MÜHJEO'2021

ULUSAL MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ VE JEOTEKNİK SEMPOZYUMU

NATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND GEOTECHNICS

İTÜ

BİLDİRİLER KİTABI / PROCEEDINGS

EDİTÖRLER/EDITORS

YILMAZ MAHMUTOĞLU
O. SERKAN ANGI
HALİL KUMSAR
S. BERAN ÇELİK

21-23 EKİM/OCTOBER 2021 İTÜ SÜLEYMAN DEMİREL KÜLTÜR MERKEZİ

MÜHJEO'2021 ULUSAL MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ VE JEOTEKNİK SEMPOZYUMU
21-23 EKİM 2021 İSTANBUL / TÜRKİYE

ENGGEO'2021 NATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND GEOTECHNICS
21-23 OCTOBER 2021 ISTANBUL / TURKEY

MÜHJEO'2021 ULUSAL MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ VE JEOTEKNİK SEMPOZYUMU BİLDİRİLERİ

PROCEEDINGS OF ENGGEO'2021 NATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND GEOTECHNICS

EDİTÖRLER / *EDITORS*

Yılmaz MAHMUTOĞLU, Osman Serkan ANGI, Halil KUMSAR, Sefer Beran ÇELİK

Düzenleme / *Organized by*

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Istanbul Technical University, Faculty of Mines, Department of Geological Engineering

Mühendislik Jeolojisi Derneği
Turkish Society for Engineering Geology

e-ISBN: 978-975-561-528-8

© İstanbul Teknik Üniversitesi ve Mühendislik Jeolojisi Derneği

Bu kitabın her hakkı saklıdır ve tüm yayın hakları "İTÜ Rektörlüğü ve Mühendislik Jeolojisi Derneği'ne" aittir.
Bu kitabın tamamı yada herhangi bir bölümü yayınevinin izni olmaksızın yayınlanamaz, basılamaz, mikrofilme çekilemez, dolaylı dahi olsa kullanılamaz. TEKSİR, FOTOKOPİ veya başka teknikle çoğaltılamaz,bilgisayarda, dizgi makinalarında işlenebilecek bir ortama aktarılamaz. Kitapta yayınlanan tüm yazı ve görsellerin sorumluluğu yazar/yazarlara aittir."

© Istanbul Technical University and Turkish Society of Engineering Geology

All rights of this book are reserved and all publication rights belong to "ITU Rectorate and Turkish Society of Engineering Geology". All or any part of this book cannot be published, printed, filmed or used indirectly without the permission of the publisher. It cannot be reproduced by DUPLICATION, PHOTOCOPY or any other technique, and cannot be transferred to an environment that can be processed on computers or typesetting machines. The responsibility of all texts and visuals published in the book belongs to the author(s).

İstanbul Teknik Üniversitesi yayınları. Yayın No. 2021.2KNF/9
İstanbul Technical University publications. No.2021.2KNF/9

Bildiriler kitabı TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası'nın katkılarıyla basılmıştır.

Bu sempozyumun düzenlenmesinde katkıda bulunan aşağıdaki kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.
Valuable contributions of the following institutions and organizations is gratefully acknowledged.

Önsöz

Mühendislik Jeolojisi Derneği (MühJeoDer) tarafından iki yılda bir düzenlenmesi geleneksel hale gelen Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumlarının dördüncüsü "MUHJEO'2021" Istanbul Teknik Üniversitesi ile Mühendislik Jeolojisi Derneği'nin ortak katkılarıyla 21-23 Ekim 2021 tarihleri arasında planlanmış, ancak Covid Salgını nedeniyle ertelenerek 2-4 Haziran 2022 tarihinde Istanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Yerleşkesi Süleyman Demirel Kültür Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir.

Ulusal düzeyde düzenlenen ve yürütülen MUHJEO'2021 Sempozyumunda, yer özellikleri ve koşullarının belirlenmesi, dayanım ve davranışlarının araştırılması ve açıklanması, yerkabuğu ile her türden etkileşimin planlanması, projelendirilmesi ve yürütülmesi için temel oluşturan mühendislik jeolojisi ve jeoteknik çalışmaların bilimsel bir ortamda paylaşılması amaçlanmıştır. Sempozyumda, ulusal ve uluslararası düzeyde uygulamaya yönelik sürdürülen araştırmalardan elde edilen teknik ve bilimsel veri ile bulguların sunularak tartışmaya açılması ve bu alanda çalışan akademisyenlerin, araştırmacıların, mühendislerin, uygulayıcı kurum-kuruluş mensuplarının ve öğrencilerin aynı platformda buluşturulması hedeflenmiştir.

MÜHJEO'2021 Sempozyum Programında, 1 Çağrılı Konuşma, 56 Sözlü ve 12 Poster Sunum yer almıştır. Sempozyumun Oturumları; Planlama ve Proje Tasarımında Mühendislik Jeolojisi, Jeomekanik, Jeodinamik Süreçler, Yeraltı Açıklıkları, Kent ve Çevre Jeolojisi, Mühendislik Jeolojisinde Jeofizik Yöntemler, Kaya ve Zeminlerin Mühendislik Özellikleri, Yamaç ve Şev Duraylılığı, Jeoteknik Ölçüm ve İzleme Teknikleri, Su Tutma Yapıları, Mühendislik Jeolojisinde Tehlike ve Risk, Doğal Yapı Malzemeleri ve Yüzey ve Yeraltısuları konu başlıkları altında düzenlenmiştir.

Düzenleme Kurulumuz, gezegenimizde afete dönüşen ağır pandemi şartlarına rağmen sempozyuma katılan ve katkı sağlayan kişi, kurum ve kuruluşlara içten teşekkür eder, bilimsel bir şölen havasındaki bu toplantının katılımcılar için verimli, faydalı ve zevkli geçmesini diler.

Düzenleme Kurulu

Foreword

The 4th Engineering Geology and Geotechnics Symposium "ENGGEO'2021" which has been planned to be organized by Turkish Society for Engineering Geology "MuhJeoDer" in every two years, was planned between 21-23 October 2021 with the joint contributions of Istanbul Technical University and the Turkish Society of Engineering Geology, but was postponed due to the Covid Pandemic and held on June 2-4, 2022 at the Suleyman Demirel Cultural Center of Istanbul Technical University Ayazağa Campus.

The MUHJEO'2021 Symposium, organized and conducted at the national level, aimed at identifying ground features and conditions, investigating and explaining their strength and behavior, and sharing engineering geology and geotechnical studies in a scientific environment, which form the basis for planning, projecting and executing all kinds of interactions with the earth's crust. In the symposium, it is aimed to present, discuss, share the findings with technical and scientific data obtained from the researches carried out for implementation at national and international level and to bring together academicians, researchers, engineers, members of the implementing institutions and students working in this field on the same platform.

Mühjeo'2021 Symposium Program included 1 Invited Speech, 56 Oral and 12 Poster Presentations. Sessions of the Symposium have been organized on main topics such as Engineering Geology in Planning and Design Stage, Geomechanics, Geodynamic Processes, Underground Opening, Urban and Environmental Geology, Geophysical Methods in Engineering Geology, Engineering Characteristics of Rocks and Floors, Engineering Geology in The Protection of Historical Structures, Mass Movement, Hydrogeology in Engineering Applications, Geotechnical Measurement and Monitoring Techniques, Water Retention Structures, Hazard and Risk and Natural Building Materials

Our Organizing Committee sincerely thanks the people, institutions and organizations that participated and contributed to the symposium despite the severe pandemic conditions that have turned into a disaster on our planet, and wishes that this meeting in a scientific festive atmosphere will be productive, useful and enjoyable for the participants.

Organizing Committee

Onursal Başkan / *Honorary Chairman*

Prof. Dr. İsmail KOYUNCU
İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörü / *Rector, Istanbul Technical University*

Sempozyum Başkanları / *Symposium Chairmen*

Prof. Dr. Cengiz KUZU
İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Dekanı *Dean, Faculty of Mines, Istanbul Technical University*

Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL
Mühendislik Jeolojisi Der. Yön. Kur.Bşk.
Chairman, Turkish Society for Engineering Geology

Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU
Düzenleme Kurulu Başkanı / *Head of Organizing Committee*

Dr. O. Serkan ANGI
Sempozyum Sekreteri / *Symposium Secretary*

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Istanbul Technical University, Faculty of Mines, Department of Geological Engineering

Düzenleme Kurulu / *Organizing Committee*

Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU (İTÜ, Düzenleme Kurulu Başkanı)
Prof. Dr. Emin ÇİFTÇİ (İTÜ, Jeoloji Mühendisliği Bölüm Başkanı)
Prof. Dr. Halil KUMSAR (MuhJeoDer, Pamukkale Üniversitesi)
Dr. Murat YILMAZ (İÜ Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi ve JMO İstanbul Şubesi)
Dr. Erkan BOZKURTOĞLU (İTÜ)
Doç. Dr. Cengiz ZABCI (İTÜ)
Dr. Rahmi EYÜBOĞLU (İTÜ)
Dr. Özge Dinç GÖĞÜŞ (İTÜ)
Dr. O. Serkan ANGI (İTÜ)
Dr. Ayhan KOÇBAY (DSİ)
Dr. Tayfun KAHRAMAN (İBB)
Dr. Orhan ŞİMŞEK (FUGRO-SİAL)
Hüseyin ALAN (JMO Başkanı)
Ahmet ŞİRİN (TCDD)
Sina KİZİROĞLU (MühJeoDer)
Dr. Murat NURLU (AFAD)
Aydın DURUKAN (KGM)
Murat KARAÇAM (İLBANK)
M. Kemal AKMAN (Yüksel Proje)
Karaca KARAKAŞ (LİMİT Teknik Proje)
Arş. Gör. Gökhan ŞANS (İTÜ)
Arş. Gör. Mehmet KORKUT (İTÜ)
Arş. Gör. Dilek KARAPINAR (İTÜ)
Arş. Gör. M. Oğuz SÜNNETÇİ (KTÜ)
Yük. Müh. Cenk KOÇAK (İTÜ)
Yük. Müh. Zeynep AKTUNA (İTÜ)

Bilimsel Kurul / *Scientific Committee*

Ahmet	KARAKAŞ	Kocaeli Üniversitesi
Ali	KAYABAŞI	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Atiye	TUĞRUL	İstanbul Üniversitesi
Ayberk	KAYA	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Ayhan	KOÇBAY	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
Aykut	AKGÜN	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Aziz	ERTUNÇ	Toros Üniversitesi
Candan	GÖKÇEOĞLU	Hacettepe Üniversitesi
Can	ANDAY	Osmangazi Üniversitesi
Caner	İMREN	İstanbul Teknik Üniversitesi
Cem	KINCAL	Dokuz Eylül Üniversitesi
Erkan	BOZKURTOĞLU	İstanbul Teknik Üniversitesi
Erdoğan	YÜZER	İstanbul Teknik Üniversitesi
Ergün	TUNCAY	Hacettepe Üniversitesi
Fahri	ESENLİ	İstanbul Teknik Üniversitesi
Fatma	GÜLTEKİN	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fikret	KAÇAROĞLU	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Hakan	ERSOY	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Halil	KUMSAR	Pamukkale Üniversitesi
Hakan	TUNÇDEMİR	İstanbul Teknik Üniversitesi
Haluk	AKGÜN	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Hasan	ÇETİN	Çukurova Üniversitesi
Hasan	KARAKUL	İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
Hidayet	TAĞA	Mersin Üniversitesi
H. Tolga	YALÇIN	İstanbul Teknik Üniversitesi
İrfan	YOLCUBAL	Kocaeli Üniversitesi
Kamil	KAYABALI	Ankara Üniversitesi
Kıvanç	ZORLU	Mersin Üniversitesi
Koray	ULAMIŞ	Ankara Üniversitesi
Mahmut	MUTLUTÜRK	Süleyman Demirel Üniversitesi
Mehmet	EKMEKÇİ	Hacettepe Üniversitesi
Mehmet Ali	KAYA	Trakya Üniversitesi
Muhterem	DEMİROĞLU	Hakkari Üniversitesi
Mustafa	KORKANÇ	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Mutluhan	AKIN	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Müge	AKIN	Abdullah Gül Üniversitesi
N. Sinan	IŞIK	Gazi Üniversitesi
Osman	UYANIK	Süleyman Demirel Üniversitesi
Ömer	AYDAN	University of Ryukyus, Japonya
Ömer	ÜNDÜL	İstanbul Üniversitesi
Özkan	ÇORUK	Kocaeli Üniversitesi
Öznur	KARACA	Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Raşit	ALTINDAĞ	Süleyman Demirel Üniversitesi
Recep	KILIÇ	Ankara Üniversitesi
Reşat	ULUSAY	Hacettepe Üniversitesi
S. Okay	EROSKAY	İstanbul Kültür Üniversitesi
Sedat	TÜRKMEN	Çukurova Üniversitesi
Sefer Beran	ÇELİK	Pamukkale Üniversitesi
Selman	ER	İnönü Üniversitesi
Süleyman	DALGIÇ	İstanbul Üniversitesi
Şener	CERYAN	Balıkesir Üniversitesi
Tamer	TOPAL	Ortadoğu Teknik Üniversitesi
Tolga	ÇAN	Çukurova Üniversitesi
Uğur	ALGANCI	İstanbul Teknik Üniversitesi
Zülfü	GÜROCAK	Fırat Üniversitesi

İçindekiler / *Contents*

Önsöz / *Foreword*..... iv
Sempozyum Başkanları ve Düzenleme Kurulu / *Symposium Chairmen and Organizing Committee* ... v
Bilimsel Kurul / *Scientific Committee* vi
İçindekiler / *Contents* vii

Çağrılı Konuşma / *Invited Speech*

Mühendisliğin Temel Nitelikleri ve Mühendislik Jeolojisi Üzerine
On Fundamental Characteristics of Engineering and Engineering Geology
Ersin Arıoğlu..... 3

Planlama ve Proje Tasarımında Mühendislik Jeolojisi / *Engineering Geology in Planning and Project Design*

Prof. Dr. Mahir Vardar: Olağanüstü Bir İnsan!.. Bir Hoca!..
Prof. Dr. Mahir Vardar: An Extraordinary Person!.. A Teacher!..
Hamdi Aydın..... 21

Prof. Dr. Mahir Vardar: Uygulamada Mühendislik Jeolojisi ve Geoteknik
Prof. Dr. Mahir Vardar: Engineering Geology and Geotechnics in Practice
Altok Kurşun..... 25

Ankara-İstanbul Hızlı Demiryolu Tüneli Güzergahındaki Taşocağında Patlatmanın Tünele Etkisinin Değerlendirilmesi
Assessment of the Blasting Impact of a Quarry to the Tunnel on the route of Ankara-Istanbul Speed Railway Alignment.
Mahir Vardar, Remzi Karagüzel, Yılmaz Mahmutoğlu, Gökhan Şans, Cengiz Kuzu, Cenk Koçak, Erkan Bozkurtoğlu, Rahmi Eyüboğlu 29

Kentsel Kullanım Alanı Yamaç Duraysızlıklarının Jeolojik ve Jeoteknik Değerlendirilmesi: Kocaeli-Darıca Örneği
Geological and Geotechnical Analysis of Slope Instabilities in an Urban Area: Kocaeli - Darıca Case Study
Nalan Şimşek, Erkan Bozkurtoğlu, Ahmet Karakaş 37

Jeoteknik / *Geotechnics*

Kaynarca-Sabiha Gökçen Havaalanı Metro Hattındaki (İstanbul) Sorunlu Kesimler İçin Yapılan Uygulama Değişiklikleri
Project Modificatons for Problematic Parts on Kaynarca- Sabiha Gokcen Subway Line (Istanbul) at Application Phase
Yılmaz Mahmutoğlu, Arzu Türker, Murat Sarıdede 47

Paleo-Heyelan Malzemesi İçinde Açılan Tünel Portalı İçin Önerilen Mühendislik Önlemleri ve Çözümlemeleri: Bahçe-Nurdağ Tüneli, Türkiye
Proposed Engineering Measures and Analysis of Tunnel Portal Excavated in Paleo-Landslide Deposits: Bahce-Nurdag Tunnel, Türkiye
Yunus Emre Özyürek, Aslı Can, Kemal Acar, Candan Gökçeoğlu 61

Konvansiyonel Yöntemle Açılan Geniş Çaplı Tünellerde Yaşanan Sorunlar ve Çözümleri: Ankara İstanbul YHT Projesi 2. Etap Tünelleri
Problems and Solutions in Large-Diameter Tunnels Opened by Conventional Method: Ankara Istanbul YHT Project 2nd Stage Tunnels
Evren Poşluk, Süleyman Dalgıç..... 69

Aydın Sultanhisar Barajı Gövde Dolgusunda Oluşan Kaymaların Nedeni ve Uygulanan İyileştirme Yöntemleri
The Reason of Earthflow Occured in Earthfill of Sultanhisar Dam Body (Aydın) and Aplied Rehabilitation Methods
Ali Rıza Özdamar, İnan Gündüz, Tuğba Sarayköylü 79

Kastamonu-Küre Bakibaba Yeraltı İşletmesinin Tahkimat Sistemlerinin Değerlendirmesi
Evaluation of Support System on Kastamonu-Küre Bakibaba Underground Mine
Ceren Uçar, Gökhan Şans, Hakan Tunçdemir 87

Jeomekanik (Kaya ve Zemin Mekaniği) / *Geomechanics (Rock and Soil Mechanics)*

Creep Experiments On Çankırı Rock Salt: Assessment of the Utilization of Impression Creep Test as An Index Creep Test
Çankırı Kaya Tuzu Üzerinde Krip Deneyleri: İz Krip Deneyinin İndeks Bir Krip Deneyi Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi
Takashi Ito, Nazlı Tunar Özcan, Ömer Aydan..... 97

Muğla-Kavaklıdere Mermer Örneklerinin Dayanımının Sürekli Yenilme Durumunda Üç Eksenli Deneylerle Araştırılması
Investigation of Post-Failure Strength of Muğla-Kavaklıdere Marble by Continuous Failure State Triaxial Tests
Hasan Mert Özkarslı, Yılmaz Mahmutoğlu 105

Volkanik Kırıntıların Killerin Dayanımı Üzerine Etkisi
The Effect of Volcanic Fragments on the Strength of Clay
Tuğba Coşkun, Çağdaş Coşkun, Süleyman Dalgıç 115

Yüksek Sıcaklıkların Kayaçların Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisinin Termal İşlem Katsayısı ile Belirlenmesi
Determination of High Temperature Effect on Engineering Properties of Rocks Using Thermal Treatment Coefficient
Hakan Ersoy, Cavit Atalar, Muhammet Oğuz Sünnetçi, Murat Karahan..... 123

Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Magmatik Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin İncelenmesinde Yeni Bir Yaklaşım
A New Approach for Investigating the Changes in Physical and Mechanical Properties of Igneous Rocks Exposed to High Temperatures
Muhammet Oğuz Sünnetci, Hakan Ersoy, Murat Karahan..... 131

Trakya Formasyonunda Emniyetli Taşıma Basıncının Süreksizlik – Dayanım – Temel Genişliği ile Değerlendirilmesi
Evaluation of Safe Bearing Pressure with Discontinuity-Strength and Foundation Width in Trakya Formation
Gamze Selçuk, Erkan Bozkurtoğlu, Cengiz Zabcı 139

Trakya Formasyonu (Kumtaşı-Şeyl) için Tek Eksenli Basınç Dayanımı - Nokta Yükü Dayanım İndeksi Korelasyonu
Corelation Between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Indeks for Trakya Formation (Sandstone – Shale)
Feyzi Polat, Ali Hazar, Gökhan Aslantaş, Abdulhalim Engin, Tayfun Şirin..... 147

Asidik ve Bazik Tüf Katkılarının Bentonitin Şişme Basıncına Etkisi
The Effect of Acidic and Basic Tuff Additives on Swelling Pressure of Bentonite
Nevin Küçükaslan, Yasemin Aslan Topçuoğlu, Zülfü Gürocak 157

Jeodinamik Süreçler (Deprem ve Kütle Hareketleri) / *Geodynamics Processes (Earthquake and Mass Movements)*

Maksimum Entropi Yöntemi ile Kaya Düşmesi Kaynak Alanlarının Belirlenmesi: Göksu Nehri Havzası Örneği
Prediction of the Rockfall Source Areas with Maximum Entropy Method: Göksu River watershed
Senem Tekin, Tolga Çan 167

Perşembe (Ordu) Bölgesi Akma Türü Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi
Flow type landslide susceptibility assessment in Perşembe (Ordu) region
Tolga Çan, Senem Tekin 175

An Integrated Study on the Stress State of Afghanistan
Afganistan'ın Gerilme Durumu Üzerine Birleşik Bir Çalışma
Ömer Aydan, Neamatullah Malistani, Nasir Zia Nasiry, Abdul Bari Jahed 183

Characteristics of Tsunami Caused by the 2019 October 30 Kuşadası Bay Earthquake and Some Thoughts
30 Ekim 2020 Kuşadası Körfezi Depremi'nin Neden Olduğu Tsunami Olgusunun Özellikleri ve Bazı Düşünceler
Ömer Aydan, Halil Kumsar, Barış Semiz 191

Wave Propagation and Vibration Characteristics in/Above Karstic Caves
Karstik Mağaralarda ve Üzerinde Sarsıntı Özellikleri ve Dalga Yayılımı
Hidemasa Inoue, Ömer Aydan, Takashi Ito, Naohiko Tokashiki 199

Geotechnical Damages Caused by the 2020 October 30 Kuşadası Bay Earthquake with an Emphasis on Slope Failures and Liquefaction Induced Structural Damage
30 Ekim 2020 Kuşadası Körfezi Depreminin Neden Olduğu Şev Duraysızlıklarına ve Zemin Sıvılaşmasına Bağlı Jeoteknik Hasarlar
Halil Kumsar, Barış Semiz, Ömer Aydan 207

Permanent Ground Displacement Based on Strong Motion Records of the 2020 October 30 Kuşadası Bay Earthquake and Some Observations
2020 Ekim 30 Kuşadası Körfezi Depreminin Kuvvetli Yer Hareketleri Kayıtlarından Kalıcı Yerdeğiştirmelerin Belirlenmesi ve Bazı Gözlemler
Halil Kumsar, Ömer Aydan 215

Gürpınar Pekmez (Beylikdüzü—İstanbul) Büyükçekmece Körfezine Bakan Yamaçta Gelişmiş Kütle Hareketinin Mekanizması ve Analizi
Analysis and Mechanism of the Mass Movement in the Gürpınar Pekmez (Beylikdüzü-Istanbul) Slope Facing Büyükçekmece Bay
Betül Çıkrıkcı, Kardelen Tolun, Senem Çetin, Gökhan Şans, Yılmaz Mahmutoğlu 223

Yamaç ve Şev Duraylılığı / *Stability of Natural and Cut Slopes*

Yusufeli Barajı ve HES Projesi, Şalt Sahası Kazısı Kaya Şev Stabilitesi Hesaplarının Yapılması
Yusufeli Dam and HEPP, Switchyard Excavation Rock Slope Stability Calculations
Mustafa Özgehan Ünal, Ali Kayabaşı 233

Çekmeköy (İstanbul) Entegre Taş Ocağının Kuzeybatı Şevinin Duraylılığının Araştırılması
Stability of the Northwest Slope of Entegre Quarry of Çekmeköy (İstanbul)
Rıza Emre Köksal, Necati Keskin, Zeynep Pınar, Yılmaz Mahmutoğlu 243

Andezit kaya kütlesi içindeki ayrışmış süreksizlik yüzeylerinin dalgalılık ve pürüzlüklerinin düzlemsel kayma üzerindeki etkisinin incelenmesi
The investigation of the effect of waviness and roughness of weathered discontinuity surfaces in andesite rock mass on planar sliding
Tümay Kadakcı Koca 253

Karayolu İnşaatı Sırasında Tetiklenen Derin Kaymanın Özellikleri ve İyileştirme Önerileri: Elâzığ–Malatya
Properties of the Deep-Seated Slide Triggered by the Highway Construction and Remedial Measures: Elâzığ–Malatya
Tamer Y. Duman, Yavuzhan Taş, C. Ruhi Cavlaz, Taha Özdilek, Burhan Avcı, Orhan Şimşek..... 261

Uluslararası Karayolunu Etkileyen Devasa Kızılbel Heyelanının Özellikleri ve İyileştirme Araştırmaları: Narin, Kırgızistan
Characteristics of the Large Landslide damaging the International Highway and Recommendations for Mitigations; Narin, Kyrgyzstan
Tamer Y. Duman, C. Ruhi Cavlaz, Burhan Avcı, Orhan Şimşek 269

Some Considerations on Slope Stability Issues in Qarabağ
Karabağ'da Şev Duraylılığı Üzerine Bazı Düşüncüler
Ömer Aydan..... 277

An Integrated Study on the Stability Assessment of An Overhanging Rock Block at Itoman Rotary, Okinawa, Japan
Itoman Kavşağı Yakınındaki Sarkık Kaya Bloğunun Duraylılığının Değerlendirmesi Üzerine Birleşik Bir Yaklaşım
Tokashiki Naohiko, Takashi Ito, Ömer Aydan, Yuu Higa, Hidemasa Inoue..... 287

Homeros Vadisi (Bornova/İzmir) Yöresinin Heyelan Hassasiyeti Değerlendirmesi
Landslide Susceptibility Assessment of Homeros Valley Region
Hakan Kayhan, Cem Kıncal 295

Açık Ocak Albit Madenindeki Şev Duraysızlıklarının Kinematik Analiz Yöntemiyle İncelenmesi
Investigation of Slope Instabilities in an Open Pit Albite Mine by Kinematic Analysis Method
Melikhan Karakaş, Cem Kıncal 305

Kaya Şevlerinde Açılmış Açık Ocak Madeninde Q-Slope Uygulaması
Application of Q-slope in an Open Pit Mine in Rock Slopes
Enes Kalhan, Cem Kıncal..... 313

İstanbul-Büyükçekmece Kemerdere Mevkii Yamaç Duraylılığının İncelenmesi
Istanbul-Büyükçekmece Kemerdere Area Slope Stability Investigation
Ömer Özkütük, Sena Erdoğan, Remzi Karagüzel 321

Kohezyonsuz Zeminlerde Yamaç Stabilitesi – Yeraltısuyu Seviyesi İlişkisi
Relation Between Slope Stability and Groundwater Level for Noncohessive Soils
Erkan Bozkurtoğlu, Gökhan Şans, Rahmi Eyüboğlu 329

Ereğli-Ulukışla Arası Demiryolu Hattındaki Derin Kazı Çalışmaları ve Şev Duraylılık İncelemesi
Investigation of Deep Excavation Slopes and Stability on the Ereğli-Ulukışla Railway Line
Selahattin Yaprak, Sedat Türkmen..... 337

Yeraltı Açıklıklarında Mühendislik Jeolojisi / *Engineering Geology and Geotechnics in Underground Spaces*

Kırkdilim-Laçin T3 Tüneli Yüksek Deplasmanlara Neden Olan Yerinde Gerilme Oranının (k) 3 Boyutlu Geri Analiz ile Belirlenmesi
The Effect of Horizontal-Vertical Stress Ratio on the Deformation of T3 Tunnel (Çorum, Turkey)
Anıl Atakan, Murat Yılmaz, Bora Arslan, Cemal Samur 347

Yeraltı Boşlukları Etrafındaki Yüklenme Mekanizmasının Statikten Dinamik Davranışa Doğru Etkileşiminin Değerlendirilmesi
Historical Evolution of the Loading Mechanism Around Underground Cavities Based on Static and Dynamic Behaviors
Hüseyin Onur Dönmez, Hakan Tunçdemir..... 357

Yerinde Gerilme Oranının Yeraltı Kazılarında Destek Boyutlandırmadaki Etkisi
The Effect of In-Situ Stress Ratio on Support Sizing in Underground Excavations
Dursun Erik, Mahmut Mutlutürk 367

Zayıf Kayaçta Örselenmenin Oturma Teknesi Genişlik Parametresi Üzerindeki Etkileri
Effects of Disturbance on Settlement Trough Wide Parameter in Weak Rock
Candaş Topal, Yılmaz Mahmutoğlu..... 375

A Study on the Effect of Overlying Limestone Layer in the Deformation Response of Twin Tunnels in Shimajiri Formation
Shimajiri Formasyonunda Açılan İkiz Tünnelerin Deformayon Davranışına Üstteki Kireçtaşı Tabakasının Etkisi Üzerine Bir Çalışma
Michio Tamashiro, Takashi Ito, Ömer Aydan,, Naohiko Tokashiki 383

Kent ve Çevre Jeolojisi / *Urban and Environmental Geology*

Manyas Gölü Havzası Yeraltısuyu Kirlilik Potansiyelinin AHS-DRASTIC Yöntemlerinin Entegrasyonu ile Değerlendirilmesi
Assessment of the Groundwater Pollution Potential of Lake Manyas Basin by Integration of AHS-DRASTIC Methods
Hazel Alan, Remzi Karagüzel..... 395

Coğrafi Bilgi Sistemleriyle Erdemli (Mersin) Kentsel Yerleşim Alanının Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi
Determination of Liquefaction Potential of Erdemli (Mersin) Urban Settlement Area with Geographical Information Systems
Serdar Erdoğan, Hidayet Tağa 405

Mersin İli (Mezitli-Davultepe-Tece) Sahil Kesiminlerindeki Sıvılaşabilen Zeminlerin Coğrafi Bilgi Sistemi Kullanarak Değerlendirilmesi
Evaluation of Liquefiable Soils in the Coastal Areas of Mersin City (Mezitli-Davultepe-Tece) Using Geographic Information System
Özcan Beytekin, Uğur Özhan, Kıvanç Zorlu..... 413

Mühendislik Jeolojisinde Jeofizik Yöntemler / *Geophysical Methods in Engineering Geology*

Elazığ İlinde Kuvaterner Birimler Üzerinde Mikrotremor Çalışmaları
Microtremor Studies on Quaternary Units in Elazig Province
F. Ahmet Yüksel, Selman Er, M. Ziya Boyraz, Kerim Avcı 423

Sıvılaşma Analizinde Standart Penetrasyon Testi ve Kesme Dalgası Hızlarının Birlikte Kullanılması: Çanakkale Örneği
Combined use of Standard Penetration Test and Shear Wave Velocities in Liquefaction Analysis: A Case Study in Canakkale
Onur Eyisüren, Öznur Karaca, Aydın Büyüksaraç..... 431

Elektrokinetik Yöntemde Kullanılan Elektrotlarda Arıtma Etkinliği ve Tahribat Düzeylerinin Karşılaştırılması
Comparison of removal Efficiency and Destruction Level in Electrodes Used in Electrokinetic Method
Buse Özentürk, Öznur Karaca, Emin Uğur Ulugergerli..... 439

Jeoteknik Ölçüm ve İzleme Teknikleri / *Geotechnical Measurements and Monitoring Techniques*

Laser Scanning Technology and Its Applications in Rock Engineering
Lazer Tarama Teknolojisi ve Kaya Yapılarına Uygulanması
Naruyuki Okabe, Takahiro Miyagi, Kouchi Suzuki, Ömer Aydan..... 447

3-Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinde TLS ve İHA ile Oluşturulan Sayısal Yüzey Modellerinin Kullanımı
Use of Digital Surface Models Generated by TLS and UAV in 3-Dimensional Rockfall Analyses
Mutluhan Akın, İsmail Dinçer, Ali Özgün Ok, Ahmet Orhan, Müge K. Akın, Tamer Topal..... 455

Tufanbeyli Enerjisa Termik Santrali Linyit Sahası ve İç Döküm Şevlerinin Yersel Radar Sistemi ile İzlenmesi
Monitoring Tufanbeyli Enerjisa Thermal Power Plant Lignite Field and Internal Casting Slopes with Terrestrial Radar System
Arif Aydın, Necati Sercan Çağan, Faruk Tolga Akbaş, Erdem Çörekçioğlu, Tolga Çan..... 463

The Monitoring of Long-term Deformation of Babadağ Landslide in Denizli, Turkey by DInSAR Technique
Denizli (Türkiye) Babadağ Heyelanı Uzun Dönem Hareketinin DInSAR Yöntemi ile Değerlendirilmesi
Naoki Iwata, Kazuki Kanose, Ömer Aydan, Halil Kumsar..... 471

Mermerlerde Isıl Etkiyle Oluşan Bozunma Düzeyinin Laboratuvarda Yersel Lazer Taraması ile Belirlenmesi
Determination of Degree of Deterioration in Thermally Treated Marble by LIDAR in The Laboratory
Dilek Karapınar, Ramazan Alper Kucak, Yılmaz Mahmutoğlu..... 481

Basınçlı Su Testlerinin Maden Hidrojeolojisi Çalışmalarında Kullanımı ve Karşılaşılan Sorunlar
Use of Water Pressure Tests in Mining Hydrogeological Works and Encountered Problems
Doğukan Tayyar, Mehmet Ekmekçi, Hasan Yazıcıgil..... 487

Su Tutma Yapıları / *Water Retaining Structures*

An Experimental Study on the Waves Induced by Rock Slope Failures in Dam Reservoirs
Baraj Rezervuarlarında Kaya Şev Duraysızlıkları Sonucu Dalga Oluşumu Üzerine Deneysel Bir Çalışma
Yuki Murayama, Nazlı Tunar Özcan, Ömer Aydan, Takashi Ito..... 497

Beton Baraj Temellerinde Laboratuvar ve Arazi Deneyleriyle Elde Edilen Kaya Kütle Parametrelerinin Karşılaştırılması: Akçalı-1 Göleti, Adıyaman
Comparison of Rock Mass Parameters Obtained by Laboratory and Field Experiments on Concrete Dam Foundations: Akçalı-1 Pond, Adıyaman
Cemal Yıldız..... 505

Yeraltı Barajları ve Yeraltısuyu Suni Besleme Tesislerinde Jeoteknik Etüt Çalışmalar ve Uygulamalardan Örnekler
Examples of Geotechnical Investigation Studiesand Applications in Underground Dams and Artificial Groundwater Recharge
Mikdat Özmen..... 513

Deriner Barajı Temelindeki Artvin Granitoyidinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Derinlikle Değişimi
The Investigation of Index and Mechanical Properties of Artvin Granitoid with Depth, Located at the Foundation of Deriner Dam
Özkan Coşkun, Koray Ulamış, Recep Kılıç 523

Doğal Yapı Malzemeleri / *Natural Building Materials*

İstanbul-Çatalca Bölgesinde Yüzeylenen Kuvarsitlerde Ayrışmaya Bağlı Fiziksel ve Mekanik Özellik Değişimleri
Change of Physical and Mechanical Properties Due to Weathering on the Quartzites Outcropped in İstanbul-Çatalca Region
Emre Paksoy, Ömer Ündül, Erkan Bozkurtoğlu 533

Saraftepe (Trabzon) Tefrit Silinin Doğal Yapıtaşı ve Çıkan Pasanın Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması
The Investigation of Usability of Saraftepe (Trabzon) Tephrite Sill as Natural Building Stone and the Tallow as Aggregate
Murat Karahan, Hakan Ersoy, Muhammet Oğuz Sünnetci, Semih Peker 541

Yüreğil Köyü (Emirdağ-Afyonkarahisar) Mermer Olarak İşletilen Kireçtaşlarının Jeolojik, Mineralojik-Petrografik ve Jeomekanik Özellikleri
Geological, Minoralogical, Petrographic and Geomechanical Properties of Limestone Produced for Marble Industry in Yüreğir Village (Emirdağ-Afyonkarahisar)
Metin Bağcı, Sami Serkan İşoğlu, Ahmet Yıldız..... 549

Mühendislik Jeolojisinde Modelleme ve Analiz / *Modelling and Analysis in Engineering Geology*

Deformasyon ve Güvenlik Sayısı Tahmininde Model Boyutunun Etkisi: İksa Sistemli Temel Kazısı Örneği
The Effect of Model Dimension on Predicted Deformation and Safety Factor: The Example of Foundation Excavation with Shoring System
İbrahim Kuşku..... 559

Ağrı İli, Hudut Duvarı Yol Şevinin Duraylılığında Nötral Nokta Yönteminin Uygulanması
Implementation of Neutral Point to the Road Cut of Boundary Wall, Ağrı
Koray Ulamış, Recep Kılıç..... 567

Mühendislik Jeolojisi Modelinin Oluşturulması
Engineering Geological Model Building
Gökhan Şans, Erkan Bozkurtoğlu, Rahmi Eyüboğlu 575

Yüzey ve Yeraltısuları / Hydrology and Hydrogeology

Yeraltısuyu Sondaj Coğrafi Bilgi Sistemi Geliştirilmesi - Acıpayam Ovası (Denizli) Uygulaması
Application of Geographic Information System for Groundwater Wells- Acıpayam Plain (Denizli)
Halil Kumsar, Tuğba Sarayköylü..... 585

Devlet Su İşleri'nde Suyun Yönetimi ve Korunmasında Son 5 Yıldaki Gelişmeler
Developments in the Last 5 Years in Water Management and Protection in State Water Works of Turkey
Çiğdem Yücel, Ümit Koç, Adnan Morkoç, Mert Murat Toklu, Mikdat Özmen..... 595

Türkiye'de Sürdürülebilir Yeraltısuyu Yönetiminin Değerlendirilmesi
Evaluation of Sustainable Groundwater Management in Turkey
Nami Erdoğan, Murat Mert Toklu 603

Yazar indeksi / *Author index*..... 611

Çağrılı Konuşma / *Invited Speech*

Mühendisliğin Temel Nitelikleri ve Mühendislik Jeolojisi Üzerine…

On Fundamental Characteristics of Engineering and Engineering Geology…

E. Arıoğlu[1,*]

[1] ***Yapı Merkezi***
*(*ersin.arioglu@ym.com.tr)*

Sayın Toplantı Başkanı, Saygıdeğer Konuklar; "Mühendislik Jeolojisi Derneği**"** ve **"**İTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü**"** tarafından birlikte düzenlenen**,** Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumunda davetli konuşmacı olarak aranızda bulunmaktan büyük mutluluk duyuyorum**.** Bana bu fırsatı veren Prof**.** Dr**. "Erdoğan Yüzer"** ve Prof**.** Dr**. "Remzi Karagüzel"** hocalarımızın şahsında bütün düzenleme kurulu üyelerine**,** gönülden gelen duygularla teşekkür ederim**.**

Üç bölümden oluşan konuşmamın birinci bölümünde**,** meslek yaşantımdan süzülüp gelen**, "**mühendislerin düşünce yapısına**", "**mühendisliğin temel niteliklerine**",** düşünceyi gerçeğe dönüştüren sihirli yeteneklere ve mühendisliği sanata dönüştüren karar süreçlerine dair bazı düşüncelerimi**,** kısa notlar halinde sizlerle paylaşacağım**.**

İkinci bölümde ise**,** Türkiye ve Dünya'da **"mühendislik jeolojisinin"** bağımsız bilim haline evrilmesini sağlayan**,** araştırmalarıyla bu bilimi zenginleştiren ve çok sayıda kıymetli mühendisler yetiştiren**,** üç nesillik efsane **"Erguvanlı-Yüzer-Vardar bilim ekolünün",** akademik dünyada benzeri çok nadir görülebilen başarılarının kendimce tespit ettiğim **"**sırrını**",** sizlere açacağım**.**

Paylaştığım fikirleri örneklemek üzere**, "**Avrasya Tüneli**"** inşaatını anlatan altı-yedi dakikalık bir **"**görseli**"** sizlere sunarak konuşmamı tamamlamak istiyorum**.**

Anahtar Kelimeler: mühendislik düşüncesi**,** mühendislik jeolojisi**,** mühendisliğin temel nitelikleri**,** meslek sevgisi**.**

Mr. Chairmen, Distinguished Guests; *I would like to take this opportunity to extend my warmest and respectful greetings to all of you. I feel honored to be with you as a guest speaker at National Symposium on Engineering Geology and Geotechnics held together by the "Turkish Society for Engineering Geology" and "Department of Geological Engineering at ITU". I would like to express my heartfelt gratitude to all the board members in the person of Prof. Dr.* ***"Erdoğan Yüzer"*** *and Prof. Dr.* ***"Remzi Karagüzel".***

In the first part of my speech which is composed of three parts, I will share some of my ideas with you distilled from my professional experience in a few words on the "mentality of engineers", "the fundamental characteristics of engineering", the magical talents that make thoughts a reality and decision-making processes that transform engineering into art.

In the second part of my speech, I will disclose you the "secret", as I found out in my own way, of rarely seen accomplishments of three-generation, legendary ***"Erguvanlı-Yüzer-Vardar scientific ecole"*** *in the academic circle worldwide, which ensured the evolution of* ***"engineering geology"*** *into an independent discipline both in Turkey and around the world, enriched this field through their research and trained several valued engineers.*

In an attempt to exemplify my ideas, I would like to complete my speech with a 6-7-minute-long "visual presentation" on the construction of "Eurasia Tunnel".

Keywords: *Engineering mentality, Engineering geology, fundamental characteristics of engineering, affection to work*

GİRİŞ

Gözümüzün değdiği her yerde, **"sessizce"** duran bir **"mühendislik emeği"** ve harikası vardır. Çoğu kere, toplum ve hatta biz mühendisler dâhil, bu eserlerin farkında olmayız. Ancak; mühendislik eserinde bir hata görülürse, araçlar kaza yaparsa, evler yıkılırsa; o zaman toplum ve medya, mühendislerin üretimlerini konuşmaya başlar, adeta varlıklarından haberdar olup, sistemi bilimsel olarak tartışmadan, mühendisleri ilk elden hedef tahtasına koyarlar.

Diğer taraftan, **"mühendislerin düşünce sistemi nedir?"** sorusuna, hazırda veya literatürde cevap bulmak zordur. Dünyayı değiştiren, şekil veren bir **"mesleğin"** toplumdan yalıtılması **"şaşırtıcıdır"**; ancak, sebepsiz de değildir. Burada, **"soyut''** düşünceleri yazıya dökmenin zorluğu yanında, birçok etkenin rolü olabilir.

Şurası kesindir ki, **"mühendislik yapıtları"** alınan sayısız soyut **"kararlar"** zinciri sonucunda oluşur. Zincirin sırası, algoritması ve stili mühendisten mühendise de değişir. Kararların başarısı, yapıtların başarısını belirler. Heyecanlı ve karmaşık bu **"akıl yürütme"** serüvenini kelimelere dökmek ise; sembollerle düşünüp hesap yapmaya çok aşina mühendisler için, arzu ettikleri ve keyif verici bir uğraş değildir. Özetle, yaptıklarını anlatmayı tevazudan uzaklaşma sayıp, pek sevmezler.

Mühendislerin ince düşüncelerinden bir diğeri de; mühendislik yapıtlarının **"tek kişinin"** eseri olmadığını ve her zaman bir **"büyük işbirliğinin"** ürünü olduğunu bilmeleridir. Her yapıt, yeni yapılmış olsa dahi, binlerce yıllık bilgi ve tecrübe birikimini bağrında barındırır. Her eser, önceki **"benzerleri"** ve bulundukları coğrafya ile etkileşimi gözetilerek inşa edilir.

Mimar Sinan'ın Galata Kulesini görmezden geldiğini; Golden Gate Köprüsünün, Brooklyn Köprüsünden ilham almadığını; Akashi Kaikyo Köprüsünü inşa edenlerin, Tacoma-Narrows Köprüsünden ders çıkarmadığını kim söyleyebilir. Bütün bilgiler akıllıca, önceki denemelerden diğerlerine aktarıldığı gibi; teoriler, formüller de bir *'yapıttan'* diğerlerine, gezinirler. Her yapıtta, Pisagor, Öklid, Arşimet, El-Câbir, Sinan, Newton, Euler, Laplace, Navier, Rankine, Terzaghi, Lorenz, Peck, Stainman, Brown gibi **sayısız** bilim-adamı ve mühendisin denklemleri, fikirleri, o yapıtı gerçekleştirenlerin hesaplarında ve sezgilerinde harmanlanır durur.

Bu büyük iş birliğine saygıları nedeniyle, mühendisler, her daim **"mütevazı"** ve adeta **''görünmezdirler''.**

Diğer taraftan, akıllarındaki en iyi fikirleri, eserlerine yansıtabilenler; yapının estetiğinde, formunda ve çevresiyle uyumunda **"başarı"** sağlamışlarsa; eserleri nesiller boyu hayat bulacak ve belki de isimleri ile beraber anılacaktır.

MÜHENDİSLİK DÜŞÜNCESİ

"*Mühendislik düşüncesi nedir?*" zorlu sorusuna verilebilecek bir kapsamlı cevap**; "insanlığın ihtiyaçlarını gidermek, doğa ile uyumlandırmak ve mühendisin aklındaki fikirleri gerçeğe çevirmek için; gerekli girişimleri düşünmek, planlamak ve yönetmektir"** olabilir. Özün özü**: "Mühendislik düşüncesi, bir *akıl yürütme hüneridir*"** ve mühendislere mahsustur**.**

"*Mühendislik Düşüncesinin Temel Nitelikleri ve Mühendislik Jeolojisi*" arasındaki ilişki**,** konuşmamın aksında yer aldığından**;** insan aklı**,** zekâsı ve yetenekleri gibi zihinsel güçlerin ***'iç-içe'*** bağlantılarına**,** konuşmamın berraklık kazanması için**,** kısaca değinmekte fayda görüyorum**.**

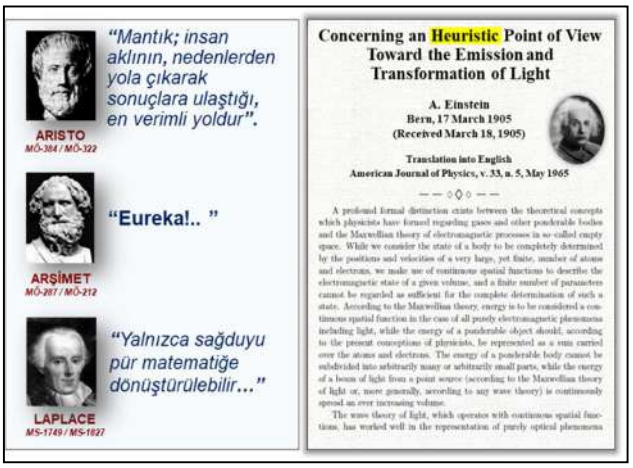
Akıl**,** zekâ**,** hafıza**,** idrak**,** arzu**,** irade ve zihin gibi**,** canlı olmanın nişaneleri olan *'güçler'* her canlıda**,** çeşitli seviyelerde mevcuttur ve topluca canlının ***'zihinsel potansiyelini'*** oluştururlar**.** Bu güçlerin**;** yeri**,** oluşumu**,** evrimi**,** çalışması**,** birbiri ile ilişkisi**,** devreye girişi hakkında**,** binlerce yıllık araştırmalara rağmen bilimsel mutabakat henüz yoktur**.** Ancak şurası kesindir ki**,** yeryüzünün zihinsel potansiyeli en yüksek canlısı *'insanoğludur'***.** Çünkü**;** *'düşünür, konuşur, yazar, sayar, bilim yapar, bilgi biriktirir, etik davranır ve proje yapar'***.**

Kısaca**,** yaşam için gerekli zihinsel ve bedensel faaliyetleri ***'AKIL'*** yürütür**.** Akıl**;** verimli - az verimli kararların ve vicdanın terazisidir**.** *'Arzu'* edilenleri**,** imkânlar ile dengeler**.** *'Geçmişten'* gelen bilgileri**,** 'güvenli bir *gelecek'* kurmak için**,** *'şimdiki zamanda'* kullanan ve karar veren bir ***'işlem merkezidir'***. ***'HAFIZA'*** ise**,** geçmişin bilgi deposudur**.** ***'ZEKÂ'****,* akıl yürütmenin tezliği**;** ***'DEHA'*** ise**,** *zekanın 'yoğunluğu' ve* keskinliğidir**.** Zekanın birçok türü**,** seviyesi ve bileşeni vardır**.** ***'AZİM'****,* karar ve istemlerde irade ve sabır göstermektir**.** Bütün bu güçlerin işlem yeri**,** ***'AKIL'*** veya ***'ZİHİN'*** olarak nitelendirilir**:** Diğer kelimelerle *'beyin'* ve uzantıları**…**

SİSTEM-I ve SİSTEM-II DÜŞÜNCE SİSTEMLERİ

Mühendisler**,** sorunlarını çözmek için temelde iki çeşit düşünce yönteminden yararlanırlar**.** Kullanılan 1'inci yöntem**;** tecrübelerden süzülüp gelen**,** yön verici prensipleri ve stratejileri içeren**,** sağduyuya dayandığı varsayılan **"sezgisel düşünce paketçikleridir".** Tanımlamaları **sözeldir** ve ani verilmiş kararlardan oluşur**.** Günümüz literatüründe **"Sistem-I"** veya **"sezgiler"** *(heuristikler)* olarak betimlenmektedir**.**

2'ncisi ise**, matematiksel mantık** ve ondan evrilen **olasılık matematiğ**ine dayalı analizlerden oluşan düşünce yöntemidir**.** Betimlemesi **sayısaldır** ve yorucu hesaplardan oluşur**.** Günümüz literatüründe **"Sistem-II"** olarak tanımlanmıştır**.** Temeli Aristo'ya dayanan matematiksel mantık**, "ya iyi / ya kötü"** şeklindeki **ikili yapısı** ile yüzyıllar boyu insan düşüncesine egemen oldu**.** Aristo mantığı 20'nci yüzyılın başında**,** Russell ve Whitehead tarafından yazılan **"Principia Mathematica"** kitabı ile düşünce dünyasındaki egemenliğini tamamen yitirdi *(Russell ve Whitehead, 1913).*
Olasılık matematiği; 17'nci yüzyıldan itibaren**,** matematiksel mantığın paralelinde ve



içinde gelişti. Teorileri, deneysel metotları, ölçme teknikleri; bilime ve hatta günlük hayata derinlemesine girdi ve hızla yaygınlaştı.

"Heuristik" terimi, Batı dünyasında, Arşimet'in **"Eureka"** sözünden türetildi ve asırlarca kullanılageldi. **Bilim** alanında ise ancak 20'nci yüzyıldan itibaren kıymeti anlaşıldı. Einstein, 1905'te yayınladığı ve ona Nobel Ödülünü getirecek makalesinin başlığında, **"Heuristic"** terimini kullandı ve sunduğu teorinin, **"henüz tamamlanmamış fakat çok yararlı"** olduğunu söyledi *(Einstein, 1905)*.

1970'lerde, **Tversky** ve **Kahneman** yaptıkları araştırmalara dayanarak; **"**İnsanların iki sistem ile düşündüklerini**"** açıkladılar. **Sistem-I "sezgisel"** düşünme sistemi ve **Sistem-II "sayısal"** tanımlayıcı düşünme sistemi *(Kahneman vd., 1982)*. Bu çalışmalar Kahneman'a 2002 Nobel Ekonomi ödülünü getirdi. Sistemler kısaca özetlenirse:

Düşünce Sistemi-I: Sezgiseldir; refleksler gibi hızlıdır, üretimi için çok az efor gerektirir. Sabit fikirlere dönüşebilir; kişiye, zamana, konuya ve çevreye özgüdür; içselleştirilmeden ve uyarlanmadan başkaları tarafından kullanılamaz; **"en iyi"** çözümlere değil, mevcut şartlarda **"yeterince iyi"** çözümlere ulaştırır. Bu nedenle, mühendisliğin çeşitli kısıtlar içinde çözüm bulma yeteneğini güçlendiren bir fikir üretme makinesidir. Günümüzde özellikle bilgisayar mühendisleri **"yapay zekâ** – *(Artificial Intelligence)***"** ve **"öğrenen sistemler** – *(Expert Systems)***"** geliştirmek üzere, heuristiklerin yapısını derinlemesine anlamaya çalışmaktadırlar.

Düşünce Sistemi-II: Sayısaldır; "optimal" sonuçlara ulaşır, kesinliği yüksektir, işlemlerde neden-sonuç boşluğu bırakmaz, hata görüldüğünde geriye dönülerek kolayca düzeltilir… Buna karşın; odaklanma ister, yorucu ve karmaşık hesaplar gerektirir, zaman ve zihinsel efor tükettirir, pahalıdır.

MÜHENDİSLERİN ORTAK HEDEFİ: GÜVENLİ, VERİMLİ ve GÜZEL

Mühendislerin, sorunlar karşısında uyguladıkları **"düşünce sistemleri"** ortak bir hedefe kilitlenmiştir: insan ihtiyaçları için, "**güvenli, verimli ve güzel çözümler bulmak…**" Çözümler, mühendisten mühendise değişir; tıpkı, yan yana duran ressamların aynı manzara için yaptıkları tablolardaki farklar gibi… Bu farklar, mühendislik düşüncesindeki **sanatsal kudretin** belirtileridir.

Çok kaba hatları ile, mühendislerin faaliyet alanları dört grupta toplanabilir: *'Taşıyıcı sistem'* kuranlar, *'makinalar'* icat edenler, *'ilişki içinde ağlar'* düzenleyenler, *'üretim yöntemleri'* geliştirenler. Genelde mühendisler, ürettikleri **"şeylerin"** adı ile anılırlar: İnşaat, makine, bilgisayar, kimya mühendisleri gibi. Günümüzde mühendislik faaliyet alanları olağanüstü genişlemiş ve çeşitlenmiştir. Ancak **"temel niteliklerindeki"** benzerlikler de, aynı oranda çoğalarak devam edegelmektedir.

İnsanlığın rüyası; bütün mühendislik faaliyetlerinin nihai gayesi; tüm insan arzularına itaat eden, yaşam süresini, kalitesini, verimliliğini arttıran düzenekler / sistemler / makineler / robotlar yapmayı başarmaktır. İlk defa, **"Aristo"** tarafından dile getirilen bu rüya, **2500** yıldır hızlanarak süregiden, sonuçları heyecan ve merakla beklenen bir serüvendir. Bilgisayar ve yapay zekanın temellerini atan Alan Turing'e göre: **"***Eğer elimizde, önceden belirlenmiş durumlar listesine ve durumdan duruma geçiş kaidelerine göre çalışan bir düzenek var ise, elimizde bir* ***"makina (engine)"*** *sistemimiz var demektir (Turing, 1950).***"** Bu düzenekleri tasarlayan, kuran, çalıştıran ve işletenlere **"mühendis *(engineer)*"** denir. Bu özlü tarif, mühendislik eserlerinin hemen hemen tamamını ve nihai gayesini kapsar.

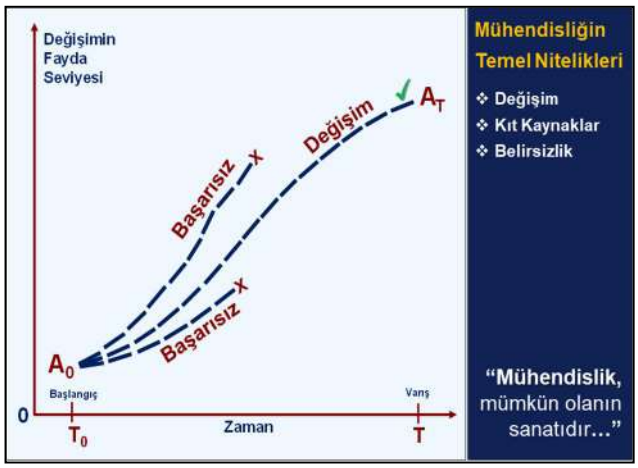
MÜHENDİSLİĞİN TEMEL NİTELİKLERİ

Mühendislerin hedefi, bilim adamları gibi **"doğa kanunlarını keşfetmek"** değildir; insan ihtiyaçlarını gidermek üzere **"şeyleri"** tasarlayıp, **"icat etmektir".** Adeta hiç yoktan var ederler. Böylece uygarlıklarımızı kurarlar. Mühendisler, mevcut bilgi ve bilimleri, icatları için çok iyi uygularlar. Hatta, kendilerine özgü tecrübeleri, **"sezgileri",** estetik duyguları ve limitli ampirik bilgileriyle bile kendi başlarına var olabilirler. Bugün kullanageldiğimiz birçok uygarlık eseri, Newton çekim kuramı veya benzeri kuramlar bilinmeksizin dahi inşa edilebilmiştir.

Çözmek istediğimiz sorunun yol haritası, **"değişim"** gerektiriyorsa, **"belirsizlikler"** içeriyorsa, üstelik **"kaynakları da kıtsa"**; sorun **"pür mühendislik"** sorunudur. Çözüm için, mühendislik düşüncesine ve mühendislerin **"yeteneklerine"**, özetle, **"icat eden"** mühendislere ihtiyaç vardır.

DEĞİŞİM

Bir mühendise ihtiyaç duyulması için, önce ortada değişim gerektiren bir durum olmalıdır. Mühendisler bir mühendislik sorununu çözdüklerinde, örneğin baraj inşa ettiklerinde, köprü kurduklarında veya bir ampul icat ettiklerinde, artık dünya barajsız, köprüsüz veya ampulsüz hali gibi değildir. Dünya A_0 noktasından A_T durumuna gelmiştir ve **"değişim"** insanlığa fayda sağlamıştır.



BELİRSİZLİK

Değişim **"gelecekle"** ilgilidir. İnsanoğlunun geleceği *(gaybı)* bilmesi mümkün değildir. Benzer şekilde, çözüm süreçlerinin geçireceği evreler de bilinemez. Ancak elimizdeki tecrübe ve bilgilere dayalı senaryolarla, **"tahminler"** yaparak kararlar verebiliriz. Örneğin; bir baraj yapıldığında tarım alanlarına vereceği zararı kısmen öngörebilir, fakat boyutlarını kesin olarak bilemeyiz. Tek bilinen; baraj gölü su tutarsa, elektrik üretecektir ve insanlar bundan faydalanacaktır.

Bir mühendislik eseri; fizibilite, tasarım, uygulama ve işletme aşamalarında alınan binlerce karar sonucu oluşur. Kararların kalitesi eserin kalitesini belirler. Her kararın temel iki düşünce süreci vardır: Mümkün alternatiflerin ortaya çıkarılması ve alternatiflerden birinin seçilmesi. Bu süreçler belirsizliklerle doludur. Belirsizlikler genellikle beş tipik kaynaktan doğar: *Gelecekteki durumların (gaybın) bilinmezliği; verilerin yetersizliği, kıtlığı veya yanlışlığı; matematiksel modellerin gerçekle uyuşmazlığı; malzeme, yük vb. özelliklerin istatistiksel değişkenliği; insan davranışları ve hataları.* Her belirsizlik kaynağı; **"bilgi eksikliği"** ve **"şans"** faktörlerini içerir.

Mühendisler belirsizlikler içinde karar verirken, Sistem-I ve Sistem-II düşünce yöntemlerini birlikte kullanırlar. Olgularda her şey biliniyorsa, ki çok nadir rastlanır, Sistem-II optimal çözüm için yeterli olacaktır *(Gigerenzer ve Gaissmaier, 2011)*.

Süre-giden belirsizlikler, mühendisler için başarıyı engelleyen **"risk"** kaynaklarıdır. Bu nedenle mühendisler **"risk"** bulmak ve yok etmekte mahir olmak zorundadırlar. Diğer taraftan, kararların **"mühendislik etiği ilkeleri"** çerçevesinde alınması, risklerin tesirli bir **'panzehiri'**dir.

Son 50 yılda, insanlığın sorunlarını çözmek üzere, kompakt takımlar halinde ve **"proje bazında"** çözümler üretilmesinin daha **"verimli"** olduğu görülmüştür. Yeni doğmakta olan uygarlığımızın parlayan yıldızları, **"proje bazında"** çalışabilen organizasyonlar olacaktır. Proje yapmak, zihindeki bir fikri hayata geçirmektir. Proje; hedefleri, bütçesi, süresi, performans kriterleri belirlenmiş ve düşünceleri gerçeğe dönüştüren, **"bir kere"** yapılabilecek bir **"iş paketidir"**.

Projelerin yapım serüveni, fırtınalı bir denizde yelken açmaya benzer. Bu serüvende hava şartları, misali **'gelecekteki durumlardır'** ve **"belirsizdir"**; dalgalar, misali 'insan davranışlarıdır', **"sorunlu ve hatalıdır"**. Aynı zamanda, proje için gerekli her türlü **"kaynak kısıtlıdır"**. Böyle bir Proje serüveninde, tek pusula **'sorular'**dır. Güzel ve **"mühendisçe"** sorulmuş sorulara, güzel cevaplar gelir. Özetle: Yelkenleri şişiren **"güç"**, sorular ve cevaplarıdır.

Mühendis, soruları kendine, meslektaşlarına, yapısına, yapıyı çevreleyen doğaya, zemine, yapı sahibine, kullanıcılara ve ilgili herkese sorabilir; limiti yoktur… Ama, her soru; imkânlar bütçesinden harcamaya neden olur. Limiti, projeye tahsis edilmiş **"kıt kaynaklarla"** orantılıdır…

KIT KAYNAKLAR

Mühendisler, hedef belirlemede ve hedeflerine tolerans sınırları içinde ulaşmada mahirdirler. Her şeyi ölçülebilir kılar, ölçer ve sıraya dizerler. Kıt kaynakları verimli kullanırlar. Bu özel yetenekleri ile, toplumların refahını sürekli yükselterek ekonomik zenginlik yaratmayı başarırlar. Özetle; mühendisler kurcalar, sorgular ve kurgulayarak **"uygarlık"** ve **"onun sistemlerini"** kurarlar.

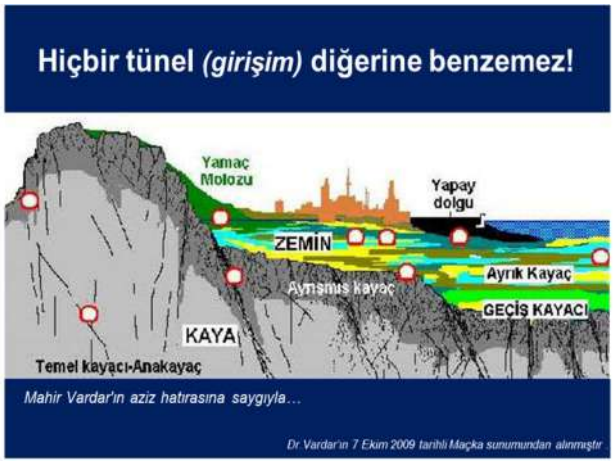
Mühendislik çözümleri için, malzeme, enerji, teknoloji, insanın beyin ve kas gücü, zaman, finansman gibi kaynaklara ihtiyaç vardır. Mühendislik âleminde genelde, kaynaklar hep kıt ve kısıtlıdır. Mühendis her zaman, elindeki kaynaklarla **"en uygun"** değiş-tokuşu yapmayı hedefler. Bugüne kadar, korozyona en dayanıklı malzeme olan altın'ı köprü yapımında kullanmayı, kimse aklına bile getirmemiştir.

Arşimet'in meşhur sözünü biliriz: **"Bana sağlam bir destek noktası ve yeterli uzunlukta bir kaldıraç verin, dünyayı yerinden oynatayım"**. Mühendisler arasında ise, **"bizler için hiçbir şey imkânsız değildir, biraz zaman alır…"** sözü slogan olarak dolaşır. Tercüme edersek: **"sınırsız zaman, bütçe ve esnek standartlar ile her şey yapılabilir"** demek isterler. Fakat bugüne kadar, ne Arşimet'e istediği **"kaldıraç"** verilebilmiştir, ne de mühendislere istedikleri kaynaklar ve imkânlar...

YERKÜRE İLE İLİŞKİ

Erguvanlı hocadan hatırladığım ve mealen şu anlama gelen sözleri paylaşmak istiyorum: **"İnşaat** mühendisi olacaksınız. Büyük-büyük köprüler, barajlar, tüneller, yollar ve yapılar yapacaksınız. Her eserinizin mutlaka ve mutlaka taşla-toprakla, suyla ilgisi olacak. Size taşı toprağı öğreteceğiz. Daha doğrusu, taşı-toprağı **"sevmeyi"** öğreteceğiz. Taşlarda yerküre tarihini nasıl okuyacağınızı öğreteceğiz. Sizden de öğrettiklerimize **"çok dikkat"** etmenizi isteyeceğiz. Meslek hayatınızda **"üzülmenizi"** istemiyoruz *(Arıoğlu, 1999)*."

Hocanın dediği gibi, her *'mühendislik eserinin'* eninde sonunda yerküreyle ilişkisi olacak. Eseri yapmak üzere yerküreye **"girişim"** yapıldığında, kaçınılmaz olarak **"boşluk"** oluşur. Doğa boşluk sevmez. Boşluğun etrafında, zeminin özelliklerine, girişimin tipine, tekniğine, boyutlarına, süresine ve daha birçok parametrelere bağlı olarak aktifleşme bölgesi oluşur. Bu bölge adeta canlı gibi davranır. Mühendislik eserleri ise, doğası gereği sükunet ve denge ister. Dolayısıyla aktifleşip harekete geçen zemin veya kayaçla, yapı arasındaki ilişkinin ve olabileceklerin **"derinlemesine"** bilinmesi gerekir.

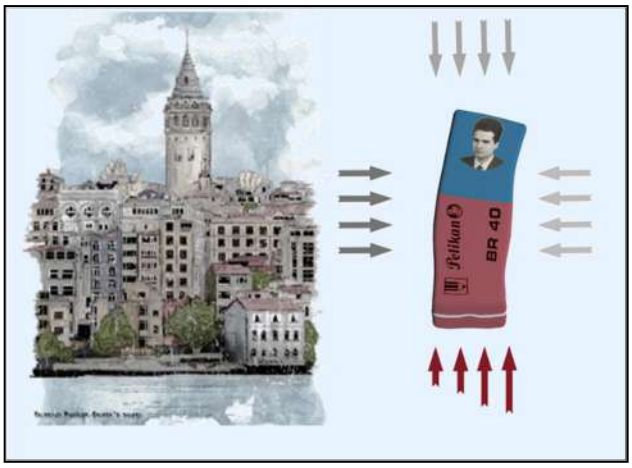


"Mühendislik Jeolojisi", bir yapının ömrü boyunca, çevresindeki aktifleşmeye meyilli zemin ve kayaçlarla kuracağı ilişkiyi betimler. Dolayısıyla, güvenli ve verimli yapılar inşa etmeyi hedefleyen mühendislerin en büyük yardımcısı ve kılavuzudur. Özetle; **"Mühendislik Jeolojisi"** yerküre ile yapı arasındaki ilişkiyi mühendise tercüme eden verimli bir **"empati"** aracıdır.

EMPATİ

Müsaadenizle, bir-iki dakika, çok sık kullandığım tecrübelerimden birini sizlerle paylaşmak istiyorum. Galata Kulesi **"takviye ve restorasyon"** projesi, 1964 yılında ortağım Köksal Anadol ile tamamladığımız ve Yapı Merkezi'nin kurulmasına vesile olan bir projedir. İtiraf etmeliyim, 23~24 yaşlarında yönettiğimiz bu proje, omuzlarımız için çok ağır sorumluluklar içeriyordu.

1500 yıllık tarihi boyunca duvarları çatlamış, düzensiz onarımlar geçirmiş olan bu yorgun yapıyı; sağlamlaştırmak, ona ömür vermek, İstanbul'un siluetinde simgeleştirmek için bilgim ve tecrübem çok eksikti. Danışmaya ihtiyacım vardı. Rüyamda, Mimar Sinan'a danışmak için sordum. **"Bana değil, yapıya sor!"** dedi. Ben de kulenin beden duvarları ve oturduğu temel ile konuşmaya çalıştım. İlk denemelerde sessiz kaldılar. Fakat sonraları, yapının; yüklerini taşırken, vücudumun kasları, kas bağları ve kemikleri ile konuşabildiğini, çektiği sıkıntıları ve halini eğer hissedebilirsem bana anlatabildiğini keşfettim.



Metodun mantığı basitti: Zihnimde; kendimi, yapının geometrisinde lastik silgi gibi esnek bir malzemeden yapılmış olarak düşünüyor ve sonra, **"üzerime yükler geldiğinde ne şekle girerim"** diye soruyordum. Kaslarımda oluşan hisler, çözümü ilham ediyordu. Sanki yapı ile **"empati"** kuruyordum.

Bu yöntem, beni her projede, yapabildiğim oranda verimli sonuçlara ulaştırdı.

Zihnimde oluşan bu tekniğin ilham kaynağı, Kemal Erguvanlı öğretisinden geliyor. 60 yıllık meslek yaşantımda çok işime yaradı. Genç mühendislere kullanmalarını tavsiye ederim.

TASARIM ÖLÇÜTLERİ

Mühendislik **"eserinin"** bütününü etkileyen en yaratıcı zihinsel süreç **"tasarım"** yapmaktır. Bir mühendislik eseri, ancak tasarımı kadar **"güzel"** ve **"mükemmel"** olabilir.

Mühendisler, genelde tasarımlarında, birbirinden etkilenen, ayrıştırılamaz ve iç içe geçmiş, **"3 çeşit ölçüt seti"** kullanırlar.

- **"Doğa yasalarına"** dayanan ölçütler: Minimum malzeme kullanmaya yönelik, fakat **"doğadan"** ve **"fonksiyondan"** kaynaklanan tüm tesirlere karşı yeterli direnç sağlayan ölçütlerdir. Eserin, doğa kanunları içinde **"verimini"** ölçer, **"güvenliğini"** sorgular. Bu tip ölçütler evrenseldir, objektiftir, **"her yerde ve projede geçerli"**dir.

- **"Ekonomik şartlara"** dayanan ölçütler: Ekonomik şartlardan, **"coğrafi ve sosyal"** faktörlerden kaynaklanır. Eserin maliyet/fayda analizini yapan, tahammül edilebilir **"ekonomik"** sınırlarını belirleyen, politik irade ve beklentileri gözeten, sübjektif ölçütlerdir.

- **"Estetik ölçütler":** Bunlar iki grupta izlenebilir: İlki, eseri tasarlayan ve inşa edenlerin iradelerinden doğan ölçütler; ikincisi, eseri kullananların beklentileridir.

  Bunlar, doğanın ve ekonominin kısıtları içinde, hangi ölçüde **"zarafet"** ile çözüm bulunabildiğini sorgular. Daha önceki örnekleri, **daha güzeli** ile **"aşma"** isteminin belirtilerini taşıyabilir. Estetik duygular, evrensel olduğu kadar, yerel kültürden, özellikle **"tarihten"** de etkilenir.

Özetlersem; mühendisler, estetiğin matematik ifadesi olan, **"minimal tamlık; maksimal fayda"** ilkesinin, diğer kelimelerle **"eksiği-fazlası yok, faydası çok"** sistemlerin peşindedirler *(King, 1982)*.

EN UYGUN ÇÖZÜM

Mühendislik düşüncesinin en heyecanlı ve hayati düğüm noktası, uygun çözümü bulma sürecidir. Yaşıyor ve kesinlikle biliyoruz ki, hayat döngüsünde **"hiçbir şey kusursuz ve kalıcı değil".** O halde, **"şeylerin"** kusurlarını kısmen azaltmak veya ömrünü uzatmak **mümkün...** Öyleyse insanlığın, her şeyin **"daha iyisine"** ulaşma umudu da her daim olacaktır. İşte, mühendisler **"daha az kusurlunun"** ve **"daha güzelin"**, özetle, **"uygun** ve **sürdürülebilir"** çözümlerin peşindedirler. Seçenekler arasında objektif kıyaslamalar gerekeceğinden, her şeyi, hata sınırları içinde, ölçülebilir kılmakta mahirdirler.

Mühendislerin görevleri, sorunu çözecek alternatifleri ortaya çıkarmak ve alternatifler arasından **"en uygun"** olanı seçmektir. Seçimlerin karara bağlanmasında, tasarım ölçütleri gibi objektif olabilen faktörlerin yanı sıra; karar zamanı, toplum kültürü, mühendisin kendi sorumluluğunu algılama biçimi gibi, sübjektif birçok duygusal faktörün de büyük etkisi vardır. Tüm bu faktörler; mevcut belirsizlik ortamında, kıt kaynaklarla uyumlu olması gereken **"en uygun"** çözüme ulaşmayı son derece **"meşakkatli"** ve **"çetin"** bir probleme dönüştürür. Problemlerin çetinleşmesi usta mühendisleri yıldırmaz; bu meydan okumanın **"yaşamlarına anlam kattığını"** söylerler.

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Uygarlığımızın endüstrileşme döneminde, doğanın kaynak olarak ölçüsüz ve çılgınca kullanılmasının, insanlığın varlığını tehdit ettiği ve sürdürülemez olduğu görülerek **"sürdürülebilirlik"** kavramı geliştirildi.

"Sürdürülebilirlik" kavramı; kalıcılığa, gelecek nesillerin haklarını tüketmemeye, kendi başına yeterli olmaya, dayanıklılığa, başarısızlıktan yılmamaya uzanan, geniş bir **"kavramlar"** yelpazesine sahiptir. Kaynağı **doğa**dır. Doğayla **uyumlu ve birlikte** yaşamayı, **"aldığı kadar vermeyi"** hedefler. Kısaca, insanlığa; sorunlarına çözüm bulmak için, doğayı **"kaynak"** değil, **"mentor"** *(yol gösterici)* olarak kullanmayı önerir.

Doğa'dan öğrendiğimize göre; milyarlarca yıldır Dünyamızda var olan **ekosistemler,** birçok karmaşık ve **"işe yarayan"** yollar deneyerek, varlıklarını sürdürmüş ve geliştirmişlerdir. Nice ekosistem, yazılı belge bırakmaz, kültür üretemez; ama mühendislik düşüncesine ilham veren, **"incelikli"** yöntemlerle yaşamını sürdürür.

İnsanoğlu, son 50 yılda; doğanın kullandığı yöntemleri anlamak için, fraktal ve kaos'un matematiğini geliştirmiştir. Sürdürülebilirliğin ödülü **"verimli yaşamaktır."**

TAKIM RUHU veya EKOL

Son 50 yıl içinde, sorunlara daha **"kompakt"** takımlar halinde ve **"proje bazında"** çözümler üretilmesinin daha **"verimli"** olduğu görülmüştür. Yeni uygarlığın parlayan yıldızları, **"proje bazında"** çalışabilen organizasyonlar olacaktır.

"Proje yapmak", mühendislerden en çok emek isteyen ve de uygarlıklarımızı en derinden etkileyen zihinsel süreçlerin başında gelir. Projeler, ***'Proje Takımı'*** ile yürütülür. Projenin içeriğine göre, birçok disiplinden birçok kişi bir araya gelir. Genelde, makinelerden makine mühendisi, beton-demir gibi işlerden inşaat mühendisi, zeminlerle ilgili işlerden jeoloji mühendisi, tasarım koordinasyonundan mimarların ve endüstri mühendislerinin sorumlu olması gibi. Projenin teknik ve mali boyutuna göre takımın büyüklüğü de değişir. Her proje benzersiz olduğundan, bir kere için bir araya gelen ekip de benzersizdir.

Her insanın sayısız yetenekleri vardır. Ama bazı yetenekleri, gördüğü eğitimle, hayatta edindiği tecrübelerle *'baskın'* hale gelmiştir. Takıma girecek kişiden, temsil ettiği disiplinde ***'bilgili'*** olması kadar, baskın yeteneklerini de maharetle sergilemesi beklenir. Bazı insanların, ***'hayal gücü'*** geniştir. Bazısı çabuk ***'öğrenir'***, bazılarının matematiksel ***'analizle'*** arası iyidir; bazısı renkleri - dokuları - orantıları seçmekte ***'yaratıcıdır'***, veya işlerin takibinde, *düzenli* ve ***'azimlidir'***. Bazıları ise; projenin içerdiği manayı derinden kavrar, *'takım ruhunu'* aşılayarak, herkesin ***'sorumluluklarını'*** yerine getirmesinde liderlik eder.

Tecrübelerimden öğrendim ki; Proje'nin başarısı, ***'takım ruhuna'*** bağlıdır. Takım ruhunu somutlaştır derseniz; insanoğlunun sayısız akıl yürütme yeteneklerinden özellikle *'sihirli 7 tanesinin'*, Proje Yönetim ve Yapımında birbirini bütünleyerek sergilenmesidir, derim.

Sayarsam; **Hayal Gücü, Öğrenme Tutkusu, Bilgi İşleme, Yaratıcılık, Estetik Tutum, İş Bitirme Azmi, Sorumluluk.** Bu yetenekler Proje uygulama alanında bir araya geldiğinde **takım ruhunu** oluşturur. Akademik alemde bir araya geldiğinde ise, **ekol** diye isimlendirilebilir.

HAYAL GÜCÜ

'Hayal gücü', proje yönetenlerin, en önemli yeteneklerinden ilki olmalıdır. Hayal gücü, zihinde görüntü oluşturabilme yeteneğidir. ***'Fikirler, Hayal Gücü ile görünür kılınır.'***

Hayal gücüne projenin *'her sürecinde'* gereksinim vardır. Takım, projesini kağıda döksün veya dökmesin, her aşamayı ilk adımdan son adıma kadar zihninde canlandırır, yaşar. Projeyi zihinde resmetmenin maliyeti yoktur. Getirisi ise birçok belirsizliğin giderilmesi, potansiyel risklerin sezilmesi ve kararlara hız verilebilmesidir.

Hayal gücü, eğitimle geliştirilebilir. Einstein, kendine sordu: **"Farz etsem ki, ışığın üstündeyim ve onun hızında seyahat ediyorum. Neler olur?"** Neler olduğunu gördük! Evrenin nasıl işlediğini öğrendik. Einstein, **"…hayal gücü bilgiden daha değerlidir…"** ve **"Mantık sizi A noktasından B noktasına götürür. Hayal gücü ise her yere…"** diyerek hayal gücünün önemini vurguladı.

Her halde ***'Ay'a gidelim'*** projesinde *de,* ***'hayal gücü'*** en yoğun şekilde devredeydi. Başka türlü, ***'insanlık için o büyük adım'*** atılamazdı.

ÖĞRENME TUTKUSU

'Öğrenme', bilgilerin ezberlenmesi değildir. Makbul öğrenme; olguların, düşünceyi hayata geçiren eylemler zinciri üzerinden, bilincimize işlenip yerleşmesidir. Bunlar her insanda farklı düzeyde oluşan ***'algılar'***, ***'bilgiler'*** ve ***'beceriler'*** olabilir.

Karl Popper'den öğrendik ki; bir bilgiyi ***'kesin'*** olarak bilemeyiz *(Popper, 2002)*. Milyonlarca bilimsel deney bile, olguları ***'her zaman doğrudur'*** diye ispatlayamaz; ama tek bir deneyle olgunun ***'yanlış'*** olduğuna karar verebiliriz. Olgu yanlışlanırsa, hâlâ doğruyu bilmiyor olacağız; arama hakkımız baki. Ayrıca, milyon kere doğrulanan bir olgudan bile, her zaman ***'kuşku duyma'*** hakkımız vardır. Dahası, durumu ***'daha iyisi'*** ile değiştirmek isteyebiliriz. Bizi ***'daha iyiyi'*** aramaya iten bu dürtü, düşüncelerden eyleme giden ***'enerjiyi'*** sağlar. Öğrenme, bu enerjinin açığa çıkması ile gerçekleşir; ve böylece düşüncelerimizi gerçekleştiririz, onları *iyi* veya *kötü*; *verimli* veya *daha az verimli*; *güzel* veya *çirkin* yaparız.

Proje Takımının hedefi, YAPMAK'tır… Hayal Gücü, projeyi önceden zihinde yapar ve eksik bilgileri gösterir. Öğrenme, ***'tutkuya'*** dönüşmüş ise, eksik bilgiler, takımın elinden kurtulamaz; mutlaka usulünce öğrenilir ve tamamlanır. Karl Popper, ***"Hayat problem çözmektir"*** der. Biz de ***"Proje yapmaktır"*** diyebiliriz.

BİLGİ İŞLEME

'Bilgi işleme', Proje Yönetimi için elzemdir. Evrenle ve yaşamla ilgili bilgilerimiz, hiçbir zaman ***'tam'*** ve ***'mükemmel'*** olamaz. Bilgilerin eksikliği nedeniyle, ***'hatasız'*** karar vermek veya iş yapmak da mümkün değildir. Ürettiğimiz bilgilerin veya verdiğimiz kararların, ancak ***'daha verimli'*** veya ***'daha az verimli'*** olduğundan bahsedebiliriz; yanlış veya doğruluğundan değil.

Özetle; kararlarımızı ancak **Bilgi İşleyerek** çoğaltabilir ve ***'herkes için daha iyiye'*** yönlendirebiliriz.

Hataları, yanlışları bulmak ve yeni daha verimli bilgiler üretmek için, insanoğlu, sihirli bir yöntem geliştirmiştir; ***'bilgi işlemek'***. ***'Bilgi İşlemek dört istasyonlu bir çevrimdir'***. Çevrimdeki hiçbir istasyon *'kalkış'* veya *'varış'* noktası değildir.

Olguların ve olayların içerdiği bilgiler atomik değil, yumaklar halindedir. Olguların içine ***'saklanmış'*** bilgiyi ayırmak için ***'Matematik model'*** ve ***'Hipotez'*** kurulur, ***'Gözlem'*** yapılır, ***'Ayrıştırılan Bilgiler'*** sınıflandırılıp, önceden doğrulanmış bilgiler ile sınanır. Hatalı bilgiler bir yandan ayıklanırken, diğer yandan mevcutlar ile ilişkilendirilerek, yeni ve daha verimli bilgiler üretilir. Tıpkı kimyada, mevcut elementlerden yeni malzemeler elde etme tekniği gibi…

Günümüzde toplumlararası ekonomik *rekabet*; öğrenme, bilgi işleme ve uygulama yarışına dönüşmüştür. Bilgiyi ***'en verimli'*** işleyen nesiller yetiştirmek, ülke eğitim sistemlerinin birincil sorumluluğudur. ***'Bilgi işlemek, öğrenmeyi öğrenmektir.'***

YARATICILIK

'Yaratıcı düşünce', yaşamın tüm alanları ve eylemleri için gereklidir; özellikle ***'Proje Yönetimi'***, sanat, bilim, mimarlık ve mühendislik için daha da çok gereklidir. Yaratıcı düşünce, sadece dâhi veya üstün yetenekli kimselere ait değildir. Her insan yaratıcı olabilir ve günlük hayatın her sorunu için yaratıcılık sergileyebilir.

Her projenin çeşitli ***'kısıtları'*** vardır. Çoğu kere kısıtlar, yaratıcılığı kamçılayan, harekete geçiren fırsatlara dönüşür. Büyük projeler yapan ustaların kısıtlardan şikayet ettiği görülmemiştir.

Yaratıcı düşünce, **ölçülebilir** kılınmak istenirse; ***'en az kaynakla'***, mevcut bilgilerden ***'en yüksek verimi'*** elde eden ***'bilgi-işleme çevrimi'*** olarak tarif edilebilir. Kısaca, yaratıcılık, bilgi-işleme çevrimi içinde gizlidir. Yaratıcı kişiler, karşıt form ve desenleri, uyuşmayan fikirleri, çelişik ve birbiriyle ilgisiz düşünceleri, ustalıkla ilintilendirirler. Onlar, ayrık duranları; uyum ve sinerji oluşturan düzeylere taşırlar. Kişi, yaratıcılık yeteneğini dilediği kadar geliştirebilir. Hayal gücü geliştirildikçe ve soru sorma teknikleri öğrenildikçe, yaratıcılık artar.

Projelerde Mr. Murphy, diğer kelimelerle aksilikler, gezinir durur. Bütçe aşılır, süre uzar; yanlış imalatlar yapılır. Bu yüzden, başlangıçtaki proje hedeflerine ulaşmak zorlaşır. Proje-ömrü boyunca hedefleri sabit tutabilmenin tek yolu, ***'yaratıcı çözüm metodları içeren'*** yeni planlar yapmaktır. Aksiliklerin panzehiri, ***'yaratıcılıktır'…***

ESTETİK TUTUM

'Estetik tutum', Kant'a göre, zihindeki kavram ile gerçeklik arasında bir ***yargı*** köprüsüdür. ***'Verimli'*** fikirler, tekniğine uygun olarak ***'iyi'*** uygulanırsa, ***'güzel'***, doğal olarak ortaya çıkacaktır. Şüphesiz, bunun söylenmesi çok kolay, yapılması çok zordur. Zamana direnip günümüze gelebilen tarihî eserler, ***'verimli'*** fikirlerin, ***'iyi'*** uygulandığını gösteren kanıtlardır.

Diğer taraftan, tüm insani eylemler, ***'estetik tutum'***un çeşitli seviyelerini yansıtırlar. Diyebiliriz ki; estetik tutum ***'toplumları değiştiren'*** ve ***'dünyayı şekillendiren'*** süreçleri belirler. Projede veya bir toplumda estetik duyarlığın artmaya başlaması, takımın veya toplumun devrimsel bir ***'değişim'*** platformu inşa etmekte olduğunun açık habercisidir. **Vurgulamalıyım ki, Projenin her eylem ve sürecinde, *estetik tutum şarttır.***

Genelde, proje liderleri, estetik tutuma öncülük etmelidirler. Onlar, ***'estetik tamlığa'***; projenin fazlalıklarını atarak, eksiklerini tamamlayarak, kalan öğelerin ***'faydalarını'*** çoğaltarak ulaşırlar. Diğer bir deyişle, ***'Eksiği-fazlası yok; faydası çok'***. Sinan misali…

İŞ BİTİRME AZMİ

'İş bitirme azmi' konusunda fazla konuşmaya gerek yok, sanırım. Bitirilmemiş, yarıda kalmış bir projenin sonuçları kadar; toplum, proje sahibi ve projeyi yürüten takım için, daha büyük bir felaket düşünülemez. *Force Major* şartlar hariç, projelerin bitirilmesi için gereken fedakârlıklara katlanmak, her zaman ***'en fizibıl'*** davranıştır.

Proje yönetimi, senaryo gibi bir ***'kurgudur'***. Projelerin başarısını, yönetimin kurgudaki başarısı belirler. Uygarlıklarımızın en parlak sayfalarında, en başarılı projeler yer alır.

Kim ki; çok proje yapar, proje yaparken derin düşünür, ileriyi görebilir, bilgi işlemede hızlıdır, fırsatlara-risklere daha hazırlıklıdır, takım ruhu yetenekleri daha yüksektir; o proje takımının yaptığı kurgular ve projeler, çok daha başarılı ve ***'verimli'*** olur.

SORUMLULUK

'Sorumluluk', şu ana kadar saydığım tüm mühendislik becerilerini çerçeveler**.** Çağımızda**,** hiçbir ***'değer' 'sorumsuzca'*** üretilemez**.** Tüm vatandaşlar**,** yöneticiler**,** kuruluşlar**,** şirketler**,** toplumlar**,** devletler**,** birbirlerine ve daha da ötesi ***'doğaya'*** karşı ***'sorumludurlar'.*** Çağımız sorumluluklar çağıdır**.**

Bana**,** "sorumluluğu soyut olmaktan çıkararak**,** Proje hayatına**,** ***'ölçülebilir'*** olarak taşı**,**" diyebilirsiniz**.** Özün özü söylenirse**:** ***'İnsanlığın evrimine en açık ve en faydalı değeri; en az toplumsal maliyetle üretmek, sorumluluktur.'*** Tüm eylemlerin sorumluluğunu**,** kalitesini ve yaratıcılığını ölçen ***'tek ETİK kural'*** budur ve ***'insanlığın onurudur'.***

Sorumluluk içeren bir üretim**,** ancak ***'bilgi işleme'*** çevrimleri ile yapılabilir**.** Sorumluluk ortaya çıkmadıkça**,** yaratıcılıktan ve kaliteden bahsedilemez**.**

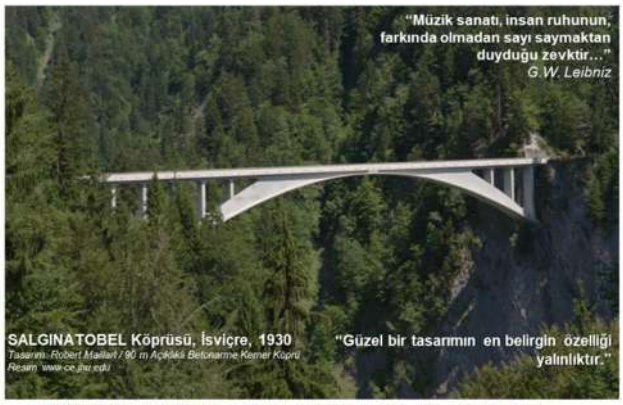
Proje yapmak**,** bir mühendislik eseri ortaya çıkarmak**,** sorumluluk taşımaktır**.** Sorumluluk duygusunun**,** diğer saydığım yeteneklerin her birinde ve her süreçte sergilenmesi**,** tüm Projeye yansıtılıp ***'nakış'*** gibi işlenmesi**,** Proje yönetiminin ortaklaşa ***'temel'*** sorumluluğudur**.**

MÜHENDİSLİK SANATI…

Mühendisler**,** belirsizlikleri azaltmak için mesleki bilgilerini durmadan yeniler ve **"zihinsel alet çantalarını zenginleştirirler".** Çantalarında**;** şartnameler**,** kalite kontrol kartları**,** test yöntemleri**,** benzer yapıların sonuçları**,** yön verici prensipler ve yaşamları boyunca biriktirdikleri **"sezgisel"** bilgi paketçiklerini**,** açıkçası binlerce **"heuristik"**leri bulundururlar**.**

Mühendisler**,** verimli sonuçlara ulaşıp ulaşamadıklarına**,** yaptıkları hesaplar sonunda karar verirler**.** Tecrübelerinden süzülüp gelen **"sezgileri"** yardımı ile de**,** bu kararları sürekli kontrol ederler**.** Tecrübe bir öğrenme eğrisidir**;** hiçbir zaman mükemmel ve kesin değildir**.** Usta mühendisler**,** tecrübelerinin sınırlarını çok iyi bilirler**.** Tecrübeyi sezgileriyle dile getirmek**,** mühendisliğin zanaatsal yanıdır**.** Tecrübeyi **bilime** ve **estetiğe** yaslayarak dile getirmek ise **sanatsal** boyutudur**.**

Mühendisler**,** önce **"bilim"** ile**,** kozmostaki büyük senfoniyi ruhlarında duyar**;** doğanın gizemlerini beyinlerinde ve kaslarında hissederler**.** Sonra**,** oluşların **"akış"** halinde dile getirdiği ezgiyi dinlerler**.** Ve bu ezgiye göre **"projeyi"** yönetir**,** sezgileriyle düzenler**,** analizleriyle hacimlendirir**;** özgün ve mekânda donmuş bir **"müzik"** gibi**,** sanat eseri niteliğinde**,** önümüze koyarlar**.**

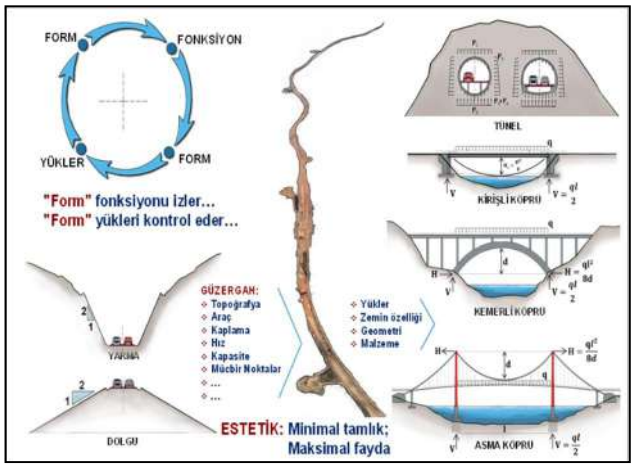


❖ "Dünya çapında bir eser..." *ASCE (1991) Amerikan Mühendisler Birliği*
❖ "20. yüzyılın en güzel köprüsü..." *British Bridge Journal (2001)*

Buraya kadar sunduğum mühendislik güzellemesini**,** bilgisayarların ilk teorisyeni sayılan Wilhelm Leibniz'den bir alıntı ile pekiştirmek istiyorum**. "Müzik sanatı, insan ruhunun, farkında olmadan sayı saymaktan duyduğu zevktir."**

Sözün özü söylenecekse: **"Mühendislik, *'şeylerin'* halinden anlama sanatıdır ."**

Teknik âlemde, tasarımların genelde sanatsal boyutunu ifade eden **"form"** ile ilgili, iki farklı felsefe var. Mimarların tezi: "*form follows function* - **form fonksiyonu izler"** diyor. Diğeri ise mühendislerin tezi: "*form controls the forces* - **form yükleri kontrol eder"** iddiasında. Bence iki tez de kıymetli ve birbirini tamamlıyor. Aynı pencereden bakıyorlar; ancak mimarların derdi fonksiyon, mühendislerin derdi yükler. Eserin formu, iki tezi de kapsıyor ve estetik anlayışın matematik ifadesi olan **"minimal tamlık, maksimal fayda - Eksiği de fazlası da yok; faydası çok"** bakış açısında birleşiyor.



Karayolu ve Demiryolu projeleri genelde mühendislik sistemleridir. Bu nedenle ana elemanlar, yüklere göre **"form"** alır. Ancak, yolun izini çizen de **"fonksiyondur".** Bu nedenle, ulaşım sistemlerinin tasarımları, **"form"** tezlerinin kaynaşmasına en güzel örneklerdendir.

Hayatı ve doğayı anlama yollarından biri, bilimle uğraşmaktır. Ama tek yol değildir. Felsefe, din, edebiyat, sanat da hayatı anlamak için geliştirilmiş yollardır. Mühendislik ise doğayı anlamanın yanı sıra, insanoğlunu doğa ile **"uyumlu"** kılma çabasıdır.

Son 20-30 yıldır, kuramcı mühendisler, dikkatlerini doğadaki matematiğe yoğunlaştırıyor. Göze çarpan ilk husus, doğa'nın ve insanoğlu'nun sürekli değiştiği ve değişimlerin birbirini etkilediğidir. Bu yeni bir görüş değil; 2500 yıldır söyleniyor. **"Doğada her şey akar. Değişmez tek olgu değişimdir. Bir ırmakta, aynı su ile iki kere yıkanamazsınız…"** gibi. Yeni olan ise; Dr. Bejan tarafından yayınlanan bir **"doğa kuramı":** Kuram, "Constructal Law" olarak anılıyor *(Bejan, 1996)*. Açıkça, **"doğanın** veya **yaşamın yapılanması".** Kuram, termodinamiğin ikinci, Newton'un üçüncü kanunları ile ilgili ve **"doğadaki canlı-cansız tüm tasarımların"** evrimini betimliyor.

Kurama göre kısaca, tasarımların yapılanması şöyle: *"Doğadaki herhangi bir akış sisteminin mevcut geometrik formu, akış süreçlerinde, üzerindeki **akı'yı** daha kolay ve çok akıtmak üzere, yeni formlara evrilir."* Diğer kelimelerle, tabiatta gördüğünüz tasarımlar tesadüfen oluşmuş değildir; formu, ritmi, dokusu, zamanla mutlaka değişir. Çünkü akış; evrilmek, akı'sını zaman içinde kolaylaştırmak, çoğaltmak ve geliştirmek zorundadır. Tıpkı, yeni inşa edilmiş bir yolun, zamanla trafiğini çoğaltması ve yeni kapasite dayatması gibi. Özetle: Her akış sistemi; hatalarını temizlemek, akı'sını çoğaltmak ve hızlandırmak üzere, zamanla evrilir.

Kuramın en güçlü yanlarından biri de dünyadaki her tür **akı'**nın evrimine ışık tutabilmesi. Su, enerji, toprak, ısı, ışık, kan dolaşımı, biomass gelişimi, plakaların oluşması, okyanus akımları, iklim değişimi, haberler, bilgi; bu ve benzeri bütün akıların zaman boyutunda nasıl evrileceğini, sezgisel ve matematiksel olarak tahmin etmek mümkün.

Akıyı harekete geçiren; geometri, biçim ve ritmine uygun olarak **"şeylerin"** üzerinde oluşan enerjidir. Hareket başlar başlamaz, hareketi önlemeye çalışan, sürtünme ve benzeri **fren güçleri** de hemen doğar. Özetle, **akışlar** adeta birbiri içinde evrilen, dünyayı ve evreni sarıp sarmalamış, sayısız **makine + fren** sistemlerinden oluşuyor. Bejan'ın kuramı açısından bakıldığında, mühendislerin görevinin, akı'ları düzenlemek, hızını arttırmak ve **"akışı"** kolaylaştırmak olduğu sonucuna varıyoruz. Belki derin düşünür, sık dokursak, mühendislik gayret ve girişimleri, bir bakıma, **zamanı genişletmek** veya zaman içinden zaman çıkarmak anlamına da geliyor. Sorumlulukları gereği, mühendisler; **evrimi en çok destekleyen** ve **toplumsal maliyeti en düşük** tasarımları seçip uyguladıklarında, insanlığı **"daha iyiye"** yönlendiriyor ve üstelik, evrimi de hızlandırıyorlar.

Bejan'ın kuramı, **"Mühendislik Jeolojisine"** yeni ufuklar açmakta olduğundan, bilimselliği yüksek olan bu toplantımızda, özellikle kuramla ilgili görüşlerimi paylaşmak istedim…

MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİNE GELİNCE…

Sene 1958-59'lardı. Ben Erguvanlı hocadan Jeoloji dersini aldım. Erdoğan ağabey de asistanıydı. Jeoloji dersleri çok renkli ve zevkli geçerdi. Erguvanlı hoca iki eliyle aynı anda tahtayı **"bilgi"** ile donatır, yapı temellerine dayanak olan taşın, toprağın, suyun yapıların ömrü için önemini vurgular; sanki onları **"dostumuz"** gibi zihnen ve kalben kuşatmamızı ve sevmemizi beklerdi. Kemal hocayı kürsüsünde ziyaret eden her öğrenci **"kırmızı elma"** ile uğurlanırdı. Hocanın elma düşkünlüğünün nedenini pek anlayamazdık o zamanlar.

'Elma' insanlık tarihi boyunca, başta kutsal metinlerde olmak üzere, bilgiyi sembolize etmiş ve uygarlığımızın kilometre taşlarında *(Newton-bilim çağına geçiş, Jobs-dijital uygarlığa geçiş)* bu anlamı aynen sürdürdüğü görülmüştür.

1960'lı yıllardan başlayan ve Erguvanlı hoca ile adeta özdeşleşen **"elma ikramı"**, bir anlamda; paylaşmanın ve karşılıksız vermenin yanı sıra, belki de *'bilgi sunmanın'* mutluluğu olarak, takipçileri tarafından da aynen sürdürülmüştür.

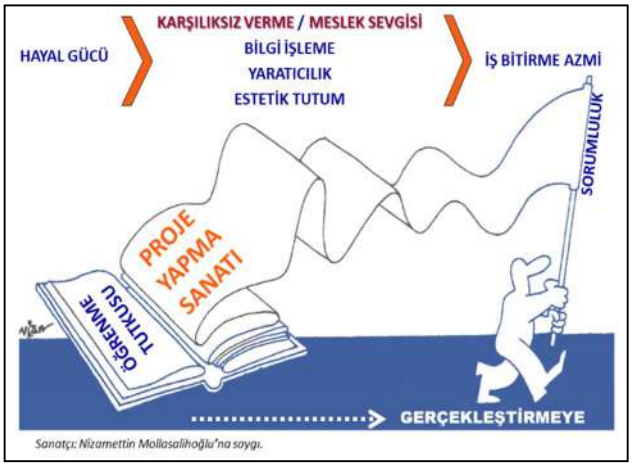
İTÜ'de; **Kemal Erguvanlı** ile başlayan, **Erdoğan Yüzer** ile devam eden ve **Mahir Vardar** ile pekişen öğreti ekolü, **"mühendislik jeolojisi"**nin Türkiye ve Dünya'da kurucu öncüleri oldular. Özgün araştırma ve yayınlarıyla, kurdukları bilimi zenginleştirerek, çok boyutlu faydalar sağlayan konuma getirdiler. Aynı süreçte, mesleklerine değer katan, kıymetli mühendisler yetiştirdiler. Dahası, Türkiye'nin önemli baraj, metro, karayolu ve demiryolu projelerinin verimini arttıran ve Mühendislik Jeolojisinin kullanımı ile ilgili, pek çok değerli bilimsel çalışmalar yaptılar.

Ben de bu süreçte, faaliyet konusu **"kent-içi ve kentler-arası demiryolu inşaatları"** olan bir şirkette *(yani **Yapı Merkezi'**nde)* yönetici ve tasarımcı bir mühendis olarak çalışıyordum. Bu kıymetli bilim adamlarıyla yollarımızın kesişmemesi mümkün mü? Her yolum kesiştiğinde ve sonrasında, **"bu ekolü"** çok başarılı kılan, ayrıca akademik hayatta pek seyrek rastlanan, ***'ekol içi uyumun'*** gizemli **"sırrını"** çok merak ededururdum. Konuşmamı hazırlarken de çok düşündüm; ve galiba sezdim.

Yüce Kitabımız, **"Oku! Rabbinin adı ile; O sizi ilgi ve sevgiden yarattı"…** diyor.

Torunlarımdan birine enerjiyi anlatmaya çalışıyordum. Ağaçların milyonlarca yıl toprağın altında kalması ile oluşan fosil enerjileri anlattım. Sözü güneşe getirip, **"her enerji güneşten doğar"** dedim. Torun itiraz etti. **"Bir şeyi unuttun." "Nedir unuttuğum?" "Sevgi!, büyükbaba! Annemizi seviyor, kucağına koşuyoruz,"** dedi. Kalakaldım. Haklı idi. Sevmek, mutluluğumuzu arttırıyor, eylemlerimizi düzenliyor ve bize enerji veriyor.

Kemal Erguvanlı ekolünden yetişenler de, birbirlerini saygı içinde seviyorlardı; yaptıkları işi, yani araştırmayı, öğrenmeyi, öğretmeyi ve öğrencilerini seviyorlardı; taşı, toprağı ve suyu da çok seviyorlardı. **"Sevgileri ile sürekli akıllarını genişletiyor ve böylece 'fark' yaratıyorlardı. Özetle; onların başarı sırrı, meslek sevgisi ve karşılıksız vermeydi."**



Bugün, enerji türleri listesine, fizikçiler henüz sevgiyi almamış olsalar da; sevgi, şairlerin ve bilgelerin liste başı. Nehirlerin toplanıp toplanıp okyanuslara coşku içinde akması gibi, bizler de etrafımızdaki her şeyle birlikte, Âşık Veysel'in diliyle; **"uzun ince bir yolda, yetişmek için menzile, akıyoruz gündüz gece.."**

Bu vesile ile, sempozyuma başarılar dilerken; zamansız kaybettiğimiz değerli Erguvanlı ve Vardar hocalarımızın aziz hatıraları önünde saygı ve şükran duyarak eğiliyorum. Erdoğan Yüzer hocama ve Erguvanlı **"karşılıksız sevgi"** ekolünü devam ettirenlere, ben de sevgilerimi sunuyorum. Elmalarınız sürekli çoğalsın.

Bundan böyle gelecekteki konuşmalarımda, bahsettiğim takım ruhunu oluşturan sihirli yedi yeteneğe, sekizincisi olarak; **"Mühendislik Jeolojisi Ekolünün"** zarif duruşlarıyla sergilediği **"meslek sevgisini"** de eklemem gerekecek.

KAYNAKLAR

Arıoğlu, E., Kasım 1999, "Bir İnşaat Mühendisinin Erguvanlı Hoca ile ilgili Hisleri ve Hatıraları", 10.yılında Erguvanlı'yı Anma Kolokyumu, Yeraltı Kaya Yapılarında Mühendislik Jeolojisi, Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni Sayı:17

Arıoğlu, E., Eylül 2012,"Kaya Mekaniğinde Mahir Bir Akademisyen / Mühendis" Prof. Dr. Mahir Vardar Jeomekanik, Tünelcilik, Kaya Yapısı Tasarımı Özel Oturumları,

Bejan, A., 1997, "Constructal - Theory Network of Conducting Paths for Cooling a Heat Generating Volume," International Journal Heat Mass Transfer, (published on 1 Nov.1996), 40, pp.799-816.

Einstein, A., 1905, "Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light", Annalen Phys., Vol: 17, pp 132-148 (In German).

Gigerenzer G., Gaissmaier W., January 2011, "Heuristic Decision Making", Annual Review of Psychology, pp. 451- 482.

Kahneman D., Slovic P., Tversky A., April 1982, "Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases", Cambridge University Press, 555 sayfa.

King J., 1992, "The Art of Mathematics", Springer, 313 pages, pp 181.

Popper, K., 2002, "Logic of Scientific Discovery", Routledge 545 pages

Russell, B., Whitehead, A. N., 1913, "Principia Mathematica, 3", 1st Edition, Cambridge: Cambridge University Press.

Turing, A.M., October 1950, "Computing Machinery And Intelligence", Mind A Quarterly Review of Psychology and Philosophy, Vol.59 No:236, pp 433-460,

Planlama ve Proje Tasarımında Mühendislik Jeolojisi / *Engineering Geology in Planning and Project Design*

Prof. Dr. Mahir Vardar: Olağanüstü Bir İnsan!.. Bir Hoca!..

Prof. Dr. Mahir Vardar: An Extraordinary Person!.. A Teacher!..

H. Aydın[1]

[1] *EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı*
[1] *ITA-AITES (Uluslararası Tünel Birliği) Yürütme Kurulu Üyesi*

ÖZ: EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.; başta karayolları, raylı sistemler, viyadükler, tüneller, toplu taşıma sistemleri, havaalanları, limanlar, deniz yapıları gibi ulaştırma projeleri olmak üzere bina ve çevre projelerinde; fizibilite etüdünden tasarıma, proje yönetiminden, inşaat kontrolluğuna kadar uzanan geniş bir yelpazede mühendislik ve teknik müşavirlik hizmeti vermekte olan, Türkiye'nin sektöründe lider kuruluşlarından biridir. Mahir Hocamız ile yolumuz tasarım anlamında ilk defa 1999 Depreminden sonra görev aldığımız depremle ilgili projelerde kesişti.

Prof. Dr. Mahir Vardar, bilim adamlığı ve mühendislik yetenekleri ile Türkiye'nin önemli projelerinde, hayalindeki düşünceleri gerçeğe ulaştırmak için hep sanatı düşünen bir sanatkâr gibi, mesleğini sanat eseri niteliğinde işledi. Birlikteliğimizde Hocamız'ın önerileri ve yaratıcı tasarımları ile yurtiçinde ve yurtdışında sayısız projeler ürettik ve örnek projeler geliştirdik. Mahir Hocamız, ülkemizde binlerce gencimizi mesleğe ve hayata hazırlarken, onların hayatlarına da dokunarak iz bırakan bir insan olmuştur. Birlikte olduğumuz tüm projelerde ekibimizdeki mühendislerin hem teknik, hem de insani gelişmesine çok önemli katkılar sağlamıştır.

Bu bildiride, Prof. Dr. Mahir Vardar ile gerçekleştirdiğimiz iz bırakan ilkleri gerçekleştirdiğimiz projelerden örnekler verilecektir. Tacikistan'da Hisar dağları buzullarının hemen altında yaklaşık 4000m rakımda inşa edilen Uştur Tüneli birlikteliğimizin ilk dönemlerine denk gelmektedir. Hoca ile Hisar dağlarında birlikte zor koşullar altında geçirdiğimiz bir haftalık seyahatimizde bir insanın çok yönlü olarak ne kadar bilgili olup, aynı zamanda ne denli alçak gönüllü ve cömert olabileceğini gördüm.

Bir başka iz bırakan örnek ise, 2001 yılında birlikte olduğumuz Karadeniz Sahil Yolu'ndaki tünel projeleridir. Denizi doldurarak yol yapmak yerine, yolu tünelli geçişlerle daha çevreci hale getirme yaklaşımı ülkemizde birlikte çalıştığımız pek çok ulaştırma projesinde uygulanmıştır. Şemsiye Borusu (umbrella arch) uygulaması, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılan tünellerde yaygın olarak kullanılan bir destek elemanıdır. İlk defa İtalya'da kullanılan bu yöntem, ülkemizde ise ilk olarak Çayeli Tünelinde Hocamız'ın yönlendirmesi ve ısrarıyla uygulanmıştır. Bir yamaç tüneli olan Çayeli Tünelinde en uygun yöntem olarak şemsiye borusu uygulamasını Karayolları Genel Müdürlüğü'ne önerdiğimizde, ilk anda, dünyada çok yeni olması ve daha önce ülkemizde hiç uygulanmamış olması nedeniyle uygulama kabul görmemişti. Tasarımı istenilen şekilde tamamlamamız ve tünel imalatı başladıktan sonra, adı daha sonra Ordu'daki tünellere verilen o zamanki Karayolları Tüneller Şube Müdiresi rahmetli Nefise Akçelik Hanım yurtdışında katıldığı bir konferansta şemsiye borusu yöntemiyle açılan bir tünel sunumunu izledikten ve Türkiye'ye döndükten sonra, ilk anda bu yöntemi kabul etmemiş olmasından dolayı üzüntülerini bildirmiş ve bizleri mühendislik yaklaşımımız nedeniyle tebrik etmişti.

Mahir Hocanın katkı sağladığı projeler arasında bulunan Kuzey Marmara Otoyolu (KMO) kapsamında, ülkemizde ilk defa inşa edilen 4 şerit genişliğindeki Riva ve Çamlık Tünelleri bulunmaktadır. Çamlık tüneli taban kemerli tünel tip kesitinde kazı genişliği yaklaşık 21,5m, kazı yüksekliği 13m'dir. Riva tüneli ise tabanı kemersiz tip kesitindeki kazı yüksekliği 11m'dir. Kuzey Marmara Otoyolu yapım işi Türk ve İtalyan ortaklığı tarafından yürütülmüştür. İşin yabancı ortağı, dünyanın en geniş tünellerinden olan bu tünellerin tasarımını yapmamız konusunda bize karşı güven eksikliği hissederek tasarımların yabancı tünel uzmanları tarafından kontrol edilmesi gereğini duymuştu. Yapılan uzun toplantı ve müzakereler sonunda Mahir Hoca'nın uzmanlığı karşısında

yabancı uzmanlar kısa süre sonra bizi denetleme işinden vazgeçip, bizi kendimizle başbaşa bırakmışlardı.

Prof. Dr. Mahir Vardar adı ülkemizde tünellerle özdeşleştirilmiştir. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, KMO kapsamındaki Riva Tüneline Prof. Dr. Mahir Vardar adını vererek, Hocamıza hak ettiği vefa örneğini göstermiştir.

Emay olarak bizlere danışmanlıktan öteye, rehberlik, abilik, hocalık yapan Mahir Abi'nin her konudaki bilgisi, candan ve alçak gönüllü olması sıradan bir insanda olacak özellikler değildir. Zaten kendisi de normal bir insan değil, "Allah vergisi" yetenekleri olan olağanüstü bir insandı!...

Anahtar Kelimeler: Mühendislik, tünel, tasarım, ulaştırma

ABSTRACT: *EMAY International Engineering and Consultancy Inc. provides services especially in transportation projects such as highways, rail systems, viaducts, tunnels, public transportation systems, airports, ports, sea structures and also in building and environmental projects. It is one of the leading companies in Turkey in its sector, providing engineering and technical consultancy services in a wide range from feasibility study to design, from project management to construction supervision in the mentioned projects. Our paths crossed with our professor Mahir Vardar for the first time in terms of design, in earthquake-related projects that we took part in after the 1999 Earthquake.*

Prof. Dr. Mahir Vardar, with his scientist and engineering skills, has worked in the important projects of Turkey as a work of art, like an artist who always thinks about art, in order to make his dreams come true. Together with our professor's suggestions and creative designs, we have produced numerous projects and developed exemplary works at home and abroad. Our professor Mahir Vardar has been a person who has left a mark on thousands of young people in our country by touching their lives while preparing them for the profession and life. In all the projects we have been with, he has made very important contributions to both the technical and human development of the engineers in our team.

In this paper, examples will be given from the projects that we realized the firsts that left a mark with Prof. Dr. Mahir Vardar. The Uştur Tunnel, which was built at an altitude of approximately 4000 m just under the Hisar Mountains glaciers in Tajikistan, coincides with the first periods of our cooperation. During our one-week trip with Mahir Vardar under difficult conditions in the mountains of Hisar, I saw that a person can be so knowledgeable in a versatile way and at the same time so humble and generous.

Another example that left a mark is the tunnel projects on the Black Sea Coastal Road, with which we were together in 2001. Instead of building roads by filling the sea, the approach of making the road more environmentally friendly with tunnel passages has been applied in many transportation projects that we have worked with in our country. Umbrella Arch application is a widely used support element in tunnels opened with the New Austrian Tunneling Method (NATM). This method, which was used for the first time in Italy, was first applied in our country in the Çayeli Tunnel under the guidance and insistence of our Professor Mahir Vardar. When we suggested the umbrella arch application to the General Directorate of Highways as the most appropriate method in the Çayeli Tunnel, which is a slope tunnel, the application was not accepted at first because it was very new in the world and had never been applied in our country before. After we completed the design as desired and the tunnel construction started, the late Nefise Akçelik, who was then the Head of the Division of Tunnels, whose name was later given to the tunnels in Ordu, expressed her regret for not accepting this method and congratulated us for our engineering approach, after watching the presentation of a tunnel opened with the umbrella arch method at a conference she attended abroad and returning to Turkey.

Within the scope of the Northern Marmara Motorway (NMM), which is among the projects that Professor Mahir Vardar contributed to, there are the Riva and Çamlık Tunnels, which are the first 4-

lane highway tunnels constructed in our country. In the Çamlık Tunnel that has a cross section with invert, the excavation width is approximately 21.5 m and the excavation height is 13 m. The Riva tunnel has an excavation height of 11 m in the tunnel type section without an invert. The Northern Marmara Motorway construction work was carried out by a Turkish and Italian partnership. The foreign partner of the business felt a lack of confidence in us in designing these tunnels, which is one of the largest tunnels in the world, and needed to have the designs checked by foreign tunnel experts. At the end of the long meetings and negotiations, when they witnessed Professor Mahir Vardar's expertise, foreign experts soon gave up the task of supervising us and left us to ourselves.

The name Prof. Dr. Mahir Vardar is associated with tunnels in our country. The Ministry of Transport and Infrastructure General Directorate of Highways, showed our professor the example of loyalty he deserves by giving the name Prof. Dr. Mahir Vardar to the Riva Tunnel within the scope of the NMM.

Being as a company of EMAY, our dear advisor Mahir Vardar gives us guidance, brotherhood and teaching beyond consulting. Our dear teacher's knowledge in every subject, his cordial and humble nature are not the characteristics of an ordinary person. After all, he was not a normal person, but an extraordinary person with "God-given" abilities!...

Keywords: *Engineering, tunnel, design, transportation*

Prof. Dr. Mahir Vardar: Uygulamada Mühendislik Jeolojisi ve Geoteknik

A. Kurşun[1]

[1] *Gülsan A.Ş.*

GENİŞLETİLMİŞ ÖZ: Mahir Vardar'ın ilmini, bilimini, mühendisliğini, hocalığını, tasarladıklarını ve yaptıklarını anlatmaya ciltler yetmez. İyi bir Mühendis olmanın son şartı "Allah vergisi" dir derler ya işte Mahir Hocamız tam bir Allah vergisi "Özel bir konstruksion"du. Yapılanları takdir etmek, övgüyü esirgememek, gençleri motive etmek çok az insana has bir meziyettir, bütün bunlar O'nda fazlası ile vardı. Cömert mi cömert, karşılıksız vermekten, paylaşmaktan zevk alan, kendisi ile barışık bir güzel adam. Mahir Hoca ile teknik konuları konuşmak, tartışmak, günlük problemlere çözümler üretmek büyük bir zevkti. Nerede karışık-kuruşuk bir tünel varsa Mahir hoca her zaman son çare, bir bilendi. Prof. Dr. Mahir Vardar'ın meslek yaşamı boyunca; Barajlar-Su ve Enerji Yapıları, Yollar-Otoyollar, Köprüler, Tüneller, Temeller, Binalar vb. mühendislik yapılarında karşılaşılan soruların çözümünde hep aranılan meslek uzmanıydı. Çözüm arayışlarında Hocanın farklılığı; jeoloji, temel mühendislik bilimleri, mühendislik jeolojisi ve geotekniğin sentezini yapabiliyor olmasında saklıydı. Hoca; veri–bilgi-deneyim ve yaratıcılık zincirini mühendisliğin temel ilkesi olarak benimsedi.

Bu bildiride, Prof. Dr. Mahir Vardar'ın Gülsan A.Ş birlikteliğinde gerçekleştirilen projelerin planlama, projelendirme ve uygulama aşamasında karşılaşılan mühendislik sorunları ve çözüm önerileri paylaşılmaktadır.

Ulaşım Yapıları GERGİN EĞİK ASKILI KÖPRÜLER

Kahta'yı Atatürk Barajı üzerinden Siverek'e bağlayan "**Nissibi Gergin Eğik Askılı Köprüsü**"nün temel kaya şevlerinde kazı ve destekleme çalışmaları (Şekil 1).

Şekil 1. Nissibi Gergin Eğik Askılı Köprüsü'nün yapım aşaması.

Malatya Elazığ karayolu bağlantısının Karakaya Barajı üzerinden geçen kesiminde "**Yeni Kömürhan Gergin Eğik Askılı Köprüsü**" temel kazı şevleri ve destek sistemleri (Şekil 2). Bunlardan, Nissibi Köprüsü çift pilonlu ve Kömürhan Köprüsü ise tek pilonlu olup, kendi kategorisinde dünyada dördüncü sıradadır.

Şekil 2. Kömürhan Köprüsü yapım aşamasından görüntüler.

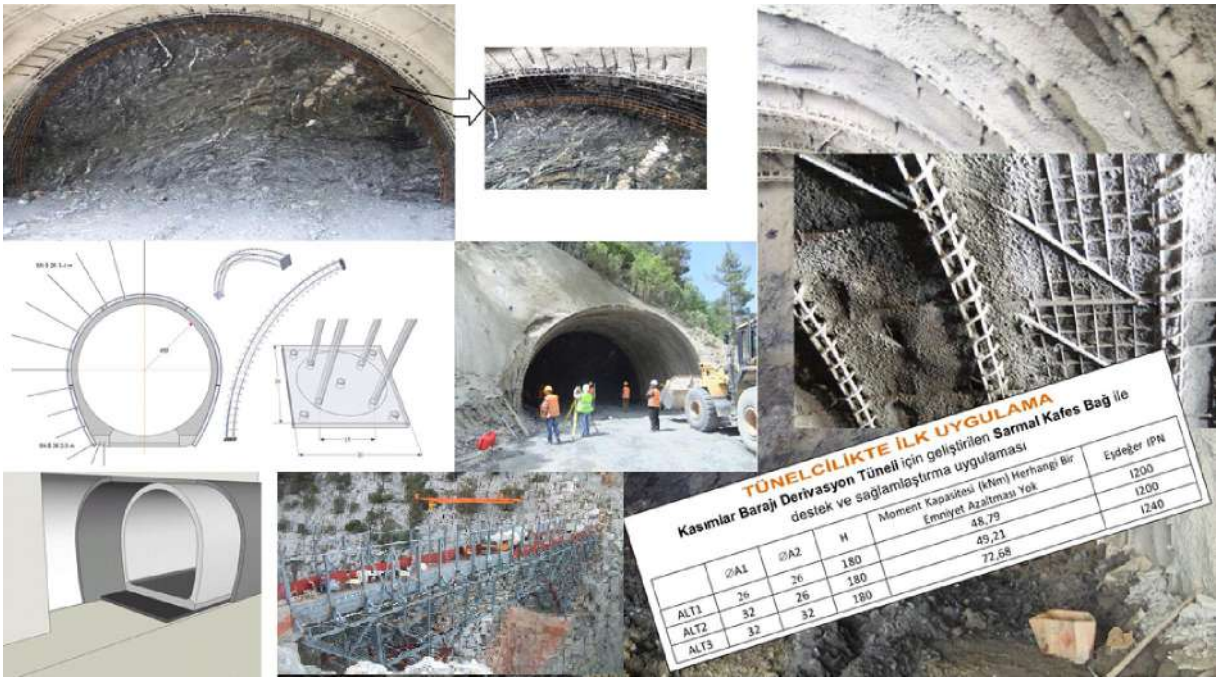
Hereke TEM ile D 100 Karayolu arasında topuklu temel kazı ve kazıklı-ankrajlı destek yapısı, yamaç stabilizasyonu için uygulanan kaya saplamalı destek kirişleri (Şekil 3).

Şekil 3. Hereke TEM-D100 arasında kaya saplamalı destek kirişleri ve kazıklı konsol platform ile yüzen yol yapımı.

Enerji Yapıları

Kasımlar Barajı ve HES ile Değirmenözü HES projesi kapsamında, baraj ve santral yeri seçimi, 14 km tünelli iletim hattı, sit alanında teleferikle tünel saplamalı konsol temel uygulaması ile **tünelcilikte sarmal kafes bağ** ilkler arasında yer alan uygulamalar olmuştur (Şekil 4).

Şekil 4. Kasımlar Barajı ve HES ile Değirmenözü HES arasındaki tünellei iletim hattı yapım aşamasından görüntüler.



Şekil 5. Kasımlar Barajı derivasyon tünelinde sarmal kafes bağ ile destek ve sağlamlaştırma uygulaması.

Aras Nehri üzerinde, Kars-Kağızman **Sefaköy Barajı ve HES** (35MW) projesinde Kule alışlı dolu savak uygulaması, ofiyolitik karmaşık gibi zorlu jeolojik koşullarda; gömülü payandalı donatılı kaya topuk desteği, çelik hasır ve püskürtme beton destekli cut-off kazısı ve yamaç destekleme sistemleri, RCC barajda temel taşıma gücü sorunu, sağ sahilde yamaç stabilizasyonu, mansapta nehir ıslahı. Sol sahilde diyabaz daykı içinde derivasyon tüneli yönlendirme projeleri. Dinlendirme havuzu ve kazı duvarlarında donatılı kaya ile iyileştirme, sağlamlaştırma ve destekleme çalışmaları, göl alanında şev düzenlemeleri, yamaç ıslahı vb. zorlu imalatlarda birçok ilkler yaşanmıştır (Şekil 6, 7, 8 ve 9).

Şekil 6. Sefaköy Barajı ve HES projesi yapım aşaması ve sağ sahil gömülü payandalı donatılı kaya destek yapıları.

Şekil 7. Sefaköy Barajı ve HES şaft dolusavak yapım aşaması.

Şekil 8. Dinlenme havuzunda ve kazı duvarlarında donatılı kaya ile İyileştirme, sağlamlaştırma ve destekleme.

Şekil 9. Sefaköy Barajı ve HES

Anahtar Kelimeler: Askılı köprü, Dolusavak kaya, Geoteknik, Jeoloji, Saplamalı kiriş.

Ankara-İstanbul Hızlı Demiryolu Tüneli Güzergahındaki Taşocağında Patlatmanın Tünele Etkisinin Değerlendirilmesi

Assessment of the Blasting Impact of a Quarry to the Tunnel on the Route of Ankara-Istanbul Speed Railway Alignment

M. Vardar[1], R. Karagüzel[1,*], Y. Mahmutoğlu[1], G. Şans[1], C. Kuzu[2], C. Koçak[1], E. Bozkurtoğlu[1], R. Eyüboğlu[1]

[1] İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
[2] İTÜ Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü
*(*karaguzel@itu.edu.tr)*

ÖZ: Ankara -İstanbul Hızlı Demir Yolu güzergahındaki tünellerden birinin Bayırköy yerleşim alanına (Bilecik) yakın bir bölgede patlatmalı üretimin yapıldığı bir kumtaşı ocağının altından geçirilmesi planlanmıştır. Bu durum, tünel hattı üzerindeki taşocağında üretim amaçlı yapılacak patlatmaların araştırılmasını ve nihai ocak taban kotunun tünele güvenli mesafesinin belirlenmesi zorunluluğunu ortaya çıkartmıştır. Bildiride, taşocağı ve tünelin konumları ve geometrileri, morfolojik, jeolojik, jeomekanik sınır koşulları dikkate alınarak, ocakta yapılacak patlatma sırasında oluşabilecek titreşimlerin alt kotlarda yer alan tünele etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, arazi ve laboratuvarda yapılan inceleme ve deneysel çalışmalardan hareketle hesap kesitleri (kavramsal model) hazırlanmıştır. Sonraki aşamada, planlanan hızlı tren tüneli ile ocaklardaki çalışmaların mekanik etkileşimi, dinamik parametreler dikkate alınarak sonlu elamanlar yöntemi (FEM) ile irdelenmiştir. Ayrıca üretim amaçlı rutin patlatmalar sırasında, yerinde parçacık hızı ve frekans ölçümleri yapılmıştır. İki ayrı kesit üzerinde yapılan analizlerde (FEM), işletme tabanının tünele 80 m yaklaşması durumunda, patlatmanın tünel üzerinde olumsuz bir etkisinin olmayacağı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bayırköy, Demiryolu tüneli, Sonlu elemanlar modeli, Patlatma, Taşocağı

ABSTRACT: *One of the tunnels on the Ankara Istanbul High Speed Railway route (let's write if there is a number) is planned to pass under a sandstone quarry where blasting production is carried out in an area close to the Bayırköy (Bilecik). This led to an investigation of the impact of the blasts on the quarry on the tunnel line and the necessity to determine the safe distance of the final quarry base elevation to the tunnel. In this study, taking into account the location and geometries of the quarry and tunnel, morphological, geological and geomechanical boundary conditions, the effect of vibrations that may occur during the blasting in the quarry on the tunnel in the lower elevations was evaluated. In this context, cross-sections (conceptual model) were prepared based on the site investigations and experimental studies carried out in the field and laboratory. In the next stage, the mechanical interaction of the planned high-speed railway tunnel and the blasting in the quarries was examined by finite element method (FEM) taking into account dynamic parameters. In addition, during routine blasts, particle velocity and frequency measurements were made on site. As a results of FEM analysis of two different sections, it was understood that if the operating base came within 80 m of the tunnel, the blasting would not have a negative effect on the tunnel.*

Keywords: *Bayırköy, Railway tunnel, Finite Element Model, Blasting, Quary*

1. GİRİŞ

Son yıllarda, dünyada ve ülkemizde yerkabuğunda mekan kullanımı ve doğal kaynakların kazanılmasına yönelik mühendislik uygulamaları giderek artmaktadır. Bu uygulamalar, bazı özel durumlarda birbirine yakın ve etkileşebilecek şekilde planlanmakta ve projelendirilmektedir. Bayırköy (Bilecik) yerleşim sınırları içerisinde yer alan kumtaşı üretim sahasında benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Patlatmalı üretimin sürdürüldüğü taşocağında cam üretiminde kullanılmak üzere kuvars kumu üretilmektedir (Şekil 1). Taşocağı, uzun dönem için bu sahadaki rezerv durumu dikkate alınarak planlanmıştır. Üretimin sürdürüldüğü ocağın altından geçecek şekilde Ankara-İstanbul hızlı

tren projesine ait tünel sonradan planlanmış ve projelendirilmiştir (İTÜ, 2011). Diğer çevresel etkilerinin yanında bu ocakta yapılacak patlatma sırasında oluşacak titreşimlerin tünele etkisi önemli bir husus olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 1. İncelemeye konu taşocağı ve tünel güzergahının konumları.

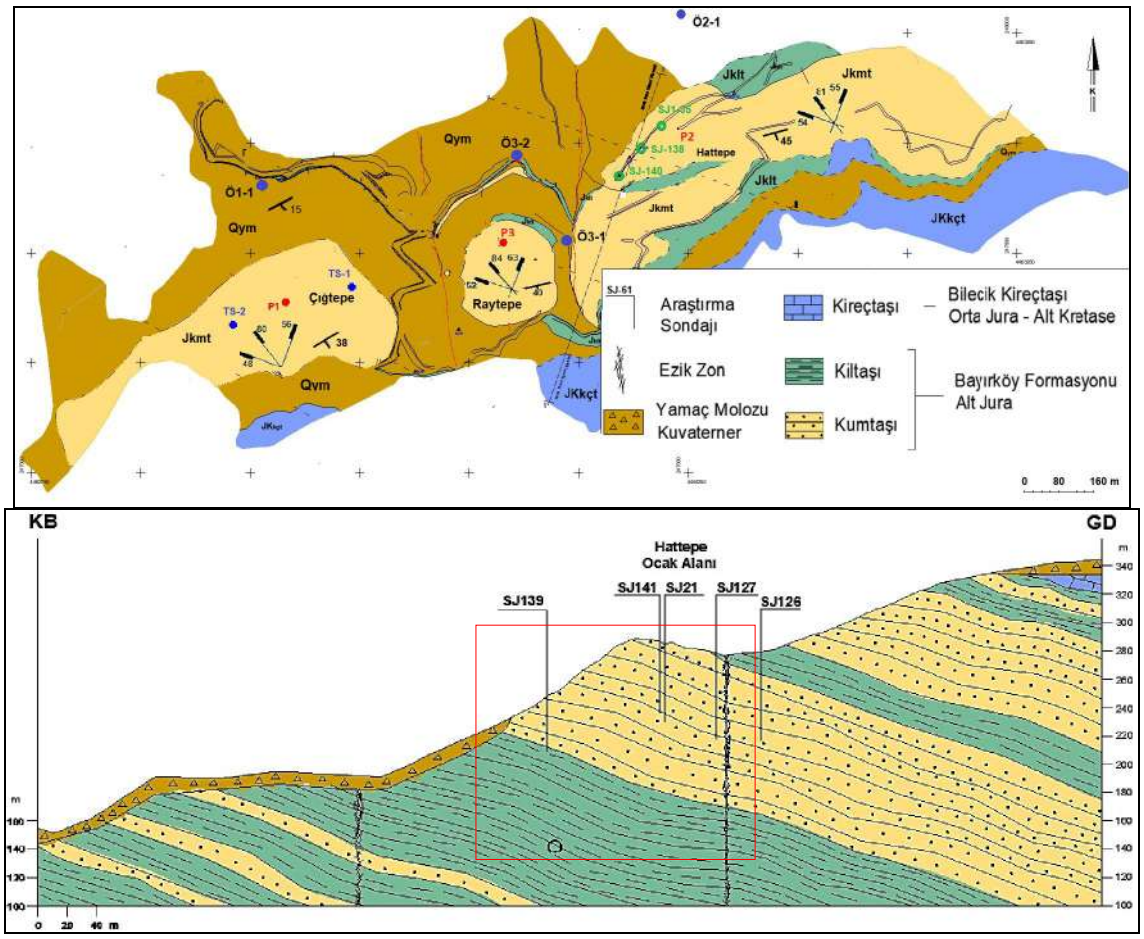
Bu çalışmada, Ankara-İstanbul Hızlı Tren Bayırköy Tüneli ile işletimdeki kumtaşı üretim alanlarının derin ocak kazıları arasındaki etkileşimin belirlenmesi hedeflenmiştir. Amaca yönelik olarak, incelenen alanın jeoloji haritası ve kesitleri hazırlanmış, özellikle kumtaşı işletmeleri ile tünel arasındaki partikül hızının ölçümü için patlatma ve ölçüm noktalarının tasarımına yönelik süreksizlik konumları belirlenmiştir. Yerinde gerçek patlatma sırasında oluşan titreşimler farklı mesafelerde ölçülerek denetlenmiştir. Daha sonra arazi, araştırma sondajları ve laboratuvarda çalışmalarından yararlanarak mühendislik jeolojisi modeli hazırlanmıştır. Patlatmalı kumtaşı işletmesinin tünele güvenli yaklaşım mesafesi (nihai acak kotu) sonlu elamanlar yöntemiyle irdelenmiştir.

2. İNCELEME ALANININ JEOLOJİK ÖZELLİKLERİ

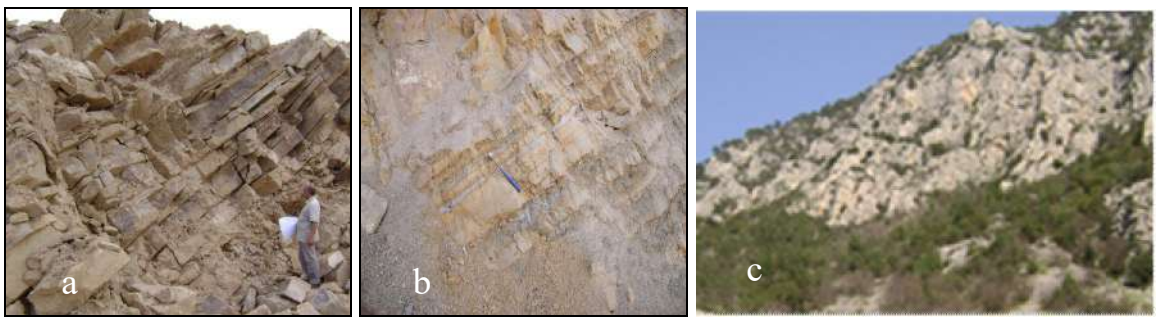
İnceleme alanı ve yakın çevresinde, temel kayalar Jura öncesi veya Permo-Triyas yaşlı kayaç toplulukları olan ve Orta Sakarya Karışık Grubu'nu oluşturan Karakaya Karmaşığı'ndan oluşmaktadır (Tüysüz vd., 1990). Permo-Triyas yaşlı Karakaya Karmaşığı'na ait birimlerin üzerine gelen örtü kayaçlarını Erken Jura ve daha genç yaştaki birimler oluşturmaktadır. Erken Jura yaşlı birimler; bölgedeki Jura transgresyonunun ilk ürünleri olup çakıltaşları ve kumtaşlarından oluşmaktadır. Bayırköy kumtaşına ait çökel kayalar akarsu çökellerinden ve sığ denizel kırıntılara geçen hızlı yanal fasiyes değişimleri sergiler (Görür vd., 1983). İnceleme alanının jeoloji haritası ve kesiti Şekil 2 de verilmiştir.

2.1. Bayırköy Formasyonu

Formasyon, yeşil renkli ve bol granit çakıllı konglomera, yeşil renkli kumtaşı, krem-sarı-pembe renkli kumlu krinoidal kireçtaşı, bol ammonitli kırmızımsı renkli yumrulu kireçtaşı ve marn-çamurtaşından meydana gelmektedir (Granit ve Tintant, 1960). Bayırköy formasyonunun, Karasu deresinin vadisine yakın tepe eteklerinde kumtaşı ara seviyeli kiltaşı, yamaç yukarılarına doğru kiltaşı ara seviyeli kumtaşı ve cam hammaddesi üretiminin yapıldığı ocaklarda 150-180 m kalınlığa ulaşan kumtaşı litolojilerinden oluştuğu belirlenmiştir. Kumtaşı'nın çimentosu genellikle silisli ve yer yer karbonatlıdır. Kumtaşları'nın üzerinde ise ince kumtaşı ara seviyeli kiltaşları bulunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası ve kesiti .



Şekil 3. Bayırköy formasyonu (a-b) ile Bilecik kireçtaşlarından (c) görüntüler.

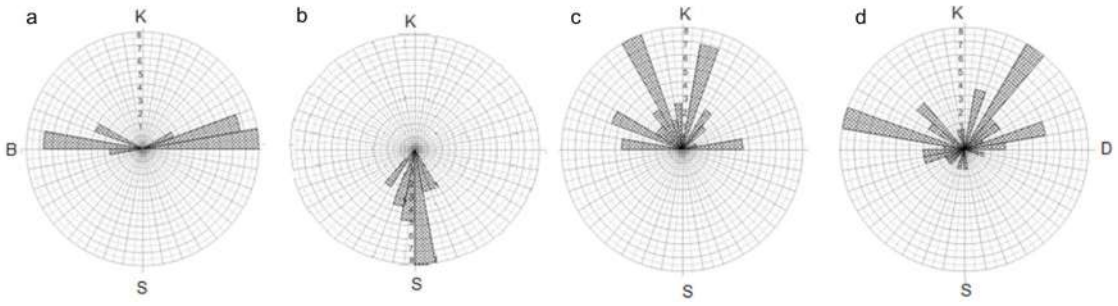
2.3. Yamaç Molozları

İnceleme alanında temel kayaların üzerinde, iç ve dış kuvvetlerin etkisinde ana kayanın parçalanması ve yerçekimi vb. taşıyıcıların etkisi altında taşınması ve çökelmesi sonucunda biriken yamaç molazları yer almaktadır. Blok boyutundan kil boyutuna kadar değişen malzemelerden oluşan yamaç molozlarının kalınlıkları yüksek kotlardan Karasu deresine doğru artmaktadır. Araştırma kuyularında 40 m'ye ulaşan yamaç molozu kesilmiştir.

2.4. Yapısal Jeoloji

İnceleme alanındaki birimler bölgesel aktif tektonizmanın etkisinde kıvrımlı, kırıklı ve faylı bir yapı kazanmıştır. Araştırma alanı bu kıvrımlı yapının kanat kesiminde yer almasına rağmen ocak

işletmelerinde bölgesel kırık hatlarına paralel ezik zonlar görülmektedir. Taş ocağı ve tünel kazısının işletme güvenliği ile karşılıklı etkileşimi açısından süreksizliklerin konumları önem taşımaktadır. Araştırmanın amacına yönelik olarak özellikle kumtaşı ocaklarında süreksizlik konumları ölçülmüş ve gül diyagramları hazırlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Ocakta yönelimleri ölçülen süreksizliklerin gül diyagramı, tabaka doğrultusu ve eğimi (a ve b), çatlak doğrultusu ve eğimi (c ve d).

3. SAHA ÖLÇÜMLERİ, JEOMEKANİK ÖZELLİKLER VE SAYISAL ÇÖZÜMLEMELER

3.1. Yeraltı Araştırmaları ve RQD

Yeraltı yapısının ortaya çıkarılması ve mühendislik jeolojisi modelinin oluşturulması amacıyla derinlikleri 40 m ile 62 m arasında değişen toplam 7 adet araştırma sondajı açılmıştır. Arazi gözlemlerine ve sondajlardan alınan karotlara dayanılarak kaya türlerinin kütle ve yapısal özellikleri belirlenmiştir. Kaya malzemesi özellikleri ise karot örnekleri üzerinde laboratuvarda yapılan fiziko-mekanik deneyleriyle tayin edilmiştir. Ocakta açılan sondajlarda yeraltısuyuna rastlanmamıştır. Taşocağının bulunduğu alanda açılan iki sondaja ait karotlardan elde edilen RQD değerlerinin derinlikle değiştiği belirlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Taşocağının yerleştiği alanda açılan araştırma sondajlarında geçilen litolojiler ve hesaplanan RQD değerleri.

Sondaj No	Derinlik	Litoloji	RQD (%)
TS-1	0.0 – 17.5	Kiltaşı	2–3
	17.5 – 51.5	Kumtaşı	90–95
	51.5 – 54.0	Kumtaşı	90
TS-2	0.0 – 20.0	Kiltaşı	10 – 15
	20.0 – 40.0	Kumtaşı	15 – 20

3.2. Kaya Malzemesinin Özellikleri

Araştırma sondajlarından alınan çoğu karot örneklerinin tek eksenli basınç eme deneyleri yapılmıştır. Yeterli boyuta sahip örnekler üzerinde ise, tek eksenli ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üç eksenli deneylerde karot örneğinin alındığı derinliğe bağlı olarak 5–50 MPa arasında değişen sabit çevre basınçları uygulanmıştır. Üç ayrı sondajdan (TS-1, TS-2 ve S-140) alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Araştırma sondajlarının aynı derinliklerine karşılık gelen tek eksenli ve üç eksenli deneylerinin sonuçlarından hareketle belirlenen, basınç dayanımı (σ_c), elastisite modülü (E), Poisson Oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Karot örnekler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre ortalama fiziko-mekanik özellikler.

Sondaj No	σ_c MPa	γ_k (kN/m^3)	E (GPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)
TS1	7.8	24.1	1.85	0.32	1.4	41
TS2	50.9	22.9	12.3	0.25	9.6	44
S135	14.8	24.4	2.68	0.32	-	-
S138	19.2	24.7	3.74	0.33	-	-
S140	22.9	24.5	4.07	0.33	2.0	47

3.3. Patlatma Çalışmaları ve Ölçümleri

Cam hammaddesi üretilen ocaklardaki patlatmaların tünele etkisi ve nihai ocak kotunun tünele ne kadar yaklaştırılabileceği irdelenmesi amacıyla yerinde yapılan gerçek patlatmalar sırasında farklı noktalarda ölçülen parçacık hızı ve titreşim frekansı ölçümleri ile desteklenmiştir. Bu amaçla farklı patlatma atımları sonucu oluşan durum farklı mesafelerde konumlandırılan titreşim ölçerler kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerde iki adet INSTANTEL MiniMate PlusTM titreşim izleme cihazı kullanılmıştır. P1 atımlarında, aynı anda ateşlenen 1550 kg ANFO+35 kg EMULITE-TG ve 950 kg ANFO+35 g EMULITE-TG patlayıcı miktarları için 320 m uzaklıkta ölçülen 7.71 mm/sn ve 7.88 mm/sn'lik maksimum bileşke parçacık hızlarına nazaran, gecikmeli ateşleme sisteminin getirdiği avantajlı bir durum izlenmiştir. P2 atımında aynı anda patlatılan maksimum 30 kg ANFO+0.625 kg Nobelex 100G patlayıcı kullanılmış, patlatmanın yapıldığı noktaya 725 m uzaklıkta bulunan tünel aynasında (Ö2-1) herhangi bir titreşim kaydı alınamamıştır.

P3 atımında; maksimum 30 kg ANFO+0.625 kg Nobelex 100G patlayıcıları kullanılmış patlatma noktasından 162.5 ve 212.5 m uzaklıklarda ise sırasıyla 1.96 ve 2.34 mm/sn'lik bileşke parçacık hızları ölçülmüştür (Ö3-1, Ö3-2). Elde edilen sonuçlar maden ve taşocaklarında yapılan patlatmalar sırasında izin verilebilen sınır değerler Çizelge 3 ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3. Maden ve taş ocakları ile benzer uygulamalarda patlatma nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapıda yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değeri.

Ölçülen Titreşim Frekansı (Hz)	İzin Verilen En Yüksek Titreşim Hızı (Tepe Değeri mm/sn)
1	5
4-10	19
30-100	50

P2 (Hattepe) atımında ölçülen maksimum bileşke parçacık hızı, titreşim ölçer cihazının eşik değerindan daha küçük bir değer (<0.5 mm/sn) olarak ölçülmüştür. P3 (Raytepe) atımında bu değerler anizotropinin varlığına işaret edecek şekilde tabaka doğrultusuna dik yönde 1.96 mm/s ve paralel yönde 2.34 mm/sn olarak kaydedilmiştir. Bu atımlar ve ölçülen titreşim verileri Çizelge 4'de sunulmaktadır.

Çizelge 3'de özetlenen bileşke parçacık hızı değerlerinin, USBM/OSMRE (U.S. Bureau of Mines/Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, (2005) normunun ve T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliğine (2002/49/EC) göre fiziki yapılara hasar verecek titreşim seviyelerinin altında olduğu belirlenmiştir. Sonuçta miktar ve özellikleri Çizelge 3'de belirtilmiş olan patlatma çalışmalarının fiziki yapılar üzerinde bir hasar oluşturmayacağı anlaşılmıştır.

Çizelge 4. Atımlarda kullanılan patlayıcı miktarları ve ölçülen titreşim değerleri.

Patlatma ile ilgili bilgiler	**P2 atımı (Hattepe)**	**P3 atımı (Raytepe)**	
Patlayıcı ve yemleme cinsi	ANFO/emülsiyon (Nobelex 100G)	ANFO/emülsiyon (Nobelex 100G)	
Ateşleme sistemi	NONEL (sıraiçi 500/2; Sıralararası 25 ms)	NONEL (sıra içi 500/25; Sıralararası 25 ms)	
Toplam patlayıcı (kg)	750/15.625	900/18.75	
Gecikme başına azami patlayıcı (kg)	30/0.625	30/0.625	
Delik boyu (m), çapı (mm) ve eğimi (°)	10/89/86	10/89/86	
Delik taban payı ve sıkılama (m)	1/3	1/3	
Delikler arası, sıralar arası mesafe (m)	2.5-3/2.5-3	2.5-3/2.5-3	
Dilim kalınlığı (m)	2.5-3	2.5-3	
Titreşimler ve ilgili bilgiler	1. Atım	2. Atım	
	Tünel Aynası Önü	TB Paralel atım	TB Dik
Ölçüm yapılan uzaklık (m)	725	162.5	212.5
Bileşke parçacık hızı (mm/sn.)	<0.5mm	1.96	2.34
Boyuna parçacık hızı (mm/sn.), frekans (Hz)		1.14	2.16
Enine parçacık hızı (mm/sn.), frekans (Hz)		1.02	1.14
Dikey parçacık hızı (mm/sn.), frekans (Hz)		1.90	1.40

4. NİHAİ OCAK KOTUNUN BELİRLENMESİ İÇİN OLUŞTURULAN HESAP KESİTİ VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

TCDD Hızlı Tren Bayırköy Tüneli ile işletimdeki Camiş, Hattepe kumtaşı üretim alanlarının derin ocak kazıları arasındaki etkileşim mekanik ve dinamik parametreler dikkate alınarak bir sonlu elamanlar programı olan Phase 7 Sürüm 2 ile hesaplarıyla irdelenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu analizler yapılmıştır. Geometrik uygunluk için boyutlandırma yapılmıştır. Sınır koşulların oluşturulmasında denge durumu gözetilerek mesnet sistemleri tanımlanmıştır. Sürekli ortam mekaniğine uygun olarak sonlu eleman ağı kurulmuştur. Bu ağ seçilirken 6 düğüm noktalı üçgen model kullanılmıştır. Tünel çevresinde iyileştirilmiş hassaslık çalışmaları kapsamın daha küçük elemanlar kullanılarak ağ oluşturulmuştur. Sayısal modelin kurulmasında bir sonraki aşamada ise arazi (in-situ) koşullar tariflenmiştir. Malzeme davranışının tanımlanması için deneysel sonuçlardan çıkarım yapılan jeoteknik parametreler kullanılmıştır. Elde edilen çıktılar arazi gözlemleri ve ölçümleri ile de doğrulama yapılarak kontrol edilmiştir.

Karot örnekleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sayısal değerler kaya kütlesi için geçerli değildir. Bu değerlerin, ortamın süreksizlik durumuna, kayanın cinsine ve anizotropisine göre seçilmesi gerekir. Arazide beklenen kaya dayanımını veren bağıntı (Vardar, 1974-1977) kazı boyutlarını ve mühendislik jeolojisi parametrelerini de öne çıkaran bir anlayışla sayısal analizlerde kullanılmıştır.

Analizler iki ayrı kesit üzerinde yapılmıştır. Bunlardan birincisi Şekil 2'de verilmiş olan jeolojik kesitin basitleştirilip sonlu elemanlar programının çalışma prensibine göre oluşturulmuştur (Şekil 5). Analiz edilen ikinci kesit ise birinci kesitten elde edilen sonuçlara göre düzenlenmiş ve yüksek hızlı demiryolu tünelinin tamamen kumtaşı içinde kalacağı varsayımı ile hazırlanmıştır.

Sayısal çözümlemelerde:

- Patlatmalar işletme koşullarına uygun olarak 3 m'lik kademeler oluşturulacak şekilde 148 kotuna kadar modellenmiştir.

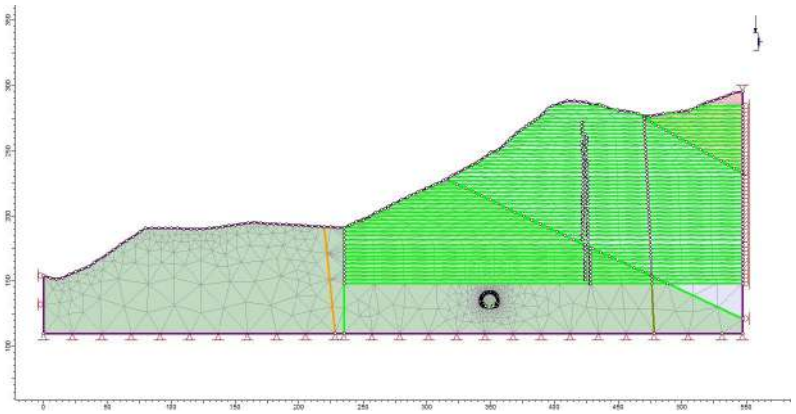
- Patlatma sırasında açığa çıkan yükü modellemek amacı ile her 3 m'lik kazı aşaması için düşey bir sondaj ile ortama 10 GPa'lık yayılı yük uygulanmıştır.
- Kullanılan Kaya Kütle Parametreleri sondajlardan alınan örnekler üzerinde yapılan deney sonuçlarına Vardar (1974 ve 1977) ve işletmede yapılan geri analiz (patlatma ve sökülme miktarlarına karşılık gelen) yöntemlerine dayalı olarak seçilmiştir.
- Çizelge 5'de analizlerde kullanılan model parametreleri verilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemine göre analizi yapılan birinci kesitte kumtaşı dokanağının yüksek hızlı tren tüneline olan en yakın mesafesi yaklaşık 60 m'dir (Şekil 6). Kesit üzerinde yapılan kademeli işletme üretimi ocak tabanı 206 kotuna kadar modellenmiştir.

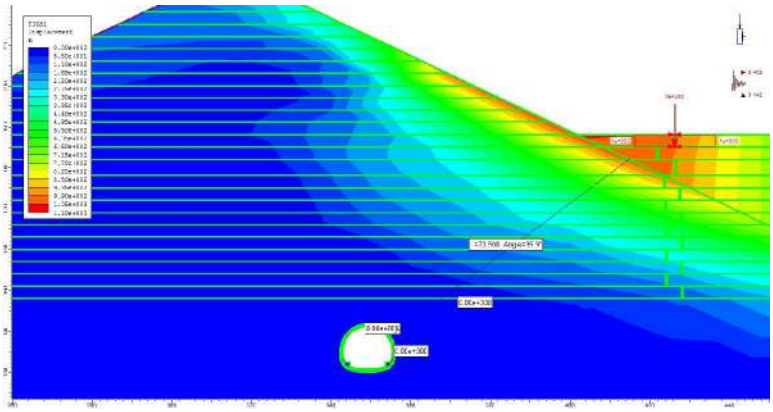
Çizelge 5. Sayısal analizlerde kullanılan kaya kütlesi parametreleri.

Litoloji	γ (kN/m^3)	E (GPa)	Poisson Oranı	ϕ (°)	c (kPa)
Kiltaşı	23	0.1	0.32	35	18
Kumtaşı	27	1.6	0.24	40	6 400

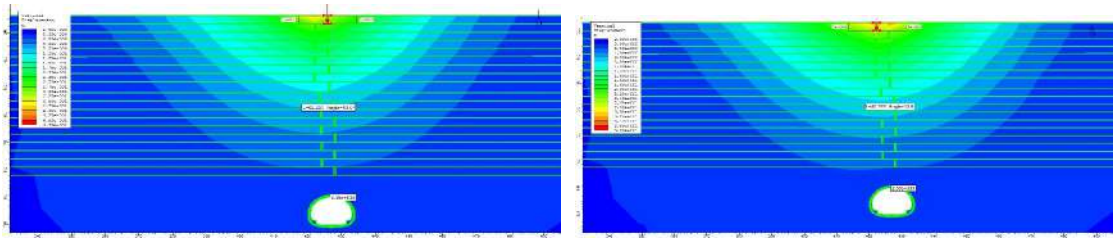
Dinamik durum için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara göre üretimi planlanan kumtaşının konumundan dolayı işletme sırasında tünele yaklaşık 74 m'den daha fazla yaklaşılmayacağı belirlenmiş ve patlatmanın da bu uzaklıkta tünel üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Şekil 6). Tünelin tamamen kumtaşları içerisinde ve işletmenin altında kalacağı varsayılan ikinci hesap kesitinde de kademeli üretim modellenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre; kumtaşlarının taş ocağının 206 m kotuna kadar sorunsuz işletilebileceği görülmüştür (Şekil 7a). Taş ocağı işletmesi 203 m kotuna kadar incelendiğinde ise tünel çevresinde 2.0 m'ye ulaşan yer değiştirmelerin gelişeceği anlaşılmaktadır (Şekil 7b).



Şekil 5. Sayısal hesap kesiti.



Şekil 6. Birinci hesap kesitinin analizi sonucunda tünel çevresinde oluşan yer değiştirmeler.



Şekil 7. Kumtaşı kesitinde (a) 206 kotu için, (b) 203 kotu için tünel çevresinde oluşan yer değiştirmeler ve patlatma sonrası etkilenme bölgeleri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ankara-İstanbul Hızlı Tren Bayırköy Tüneli ile işletimdeki kumtaşı üretim alanlarının derin ocak kazıları arasındaki etkileşimin belirlenmesi hedeflenmiştir. Amaca yönelik olarak oluşturulan jeoloji ve mühendislik jeoloji modellerinden yararlanarak iki farklı hesap kesiti hazırlanmıştır. Patlatma partikül hızı ve Sonlu Elemanlar Phase 7 Sürüm 2 ile ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Birinci kesit üzerinde yapılan analizlerde elde edilen sonuçlara göre işletme sırasında tünele 80 m den daha fazla yaklaşılamayacağı ve patlatmanın bu uzaklıkta tünel üzerinde etkisinin olmayacağı görülmüştür. İkincisi olan benzetim model kesitinin analizinden ise ocağın 206 m kotuna kadar sorunsuz işletilebileceği saptanmıştır. Sonuç olarak işletme tarafından uygulanan patlatma yöntemi dikkate alındığında tünele yaklaşılabilecek güvenli mesafenin yaklaşık 62 m olarak alınabileceği belirlenmiştir.

6. KATKI BELİRTME

Bu bildiri, CAMİŞ tarafından bünyesinde Jeoloji Mühendisliği MJKM laboratuvarlarında hazırlanmıştır. Yazarlar adı geçen kurumlara teşekkür eder, merhum Mahir Hocayı rahmet ve saygıyla anarlar.

7. KAYNAKLAR

Eroskay, S. O., 1965, Paşalar Boğazı-Gölpazarı sahasının jeolojisi, İÜ Fen Fakültesi Mec., Seri B, C. XXX, s. 3-4, 135-170, İstanbul.

Golder Associates 1979a, Instruction Manual-I: Geotechnical Data Collection. UNDP Training Project, Contract No: Con. 97/78, 56 p (yayımlanmamış).

Görür, N., Şengör, A.M.C., Akkök, R., Yılmaz, Y., 1983, Pontidlerde Neo-Tetisin kuzey kolunun açılmasına ilişkin sedimantolojik veriler. T.J.K Bülteni, 26/1, s. 135-170, Ankara.

Granit, Y. And Tintant, 1960, Observations preliminaires sur le Jurassique dela region de Bilecik (Turquie), Cumptes Rendus Seances Acad. Scie. 251, 1801-1803, Paris.

ISRM, 2006, ISRM Suggested Methods; Rock Characterization, Testing and Monitoring. E.T. Brown (ed.9, Pergamon Press, London, 211p.

İTÜ, 2011, Bilecik-Bayırköy Kumtaşı Ocaklarındaki Üretim Çalışmalarının T.C.D.D. Hızlı Tren Tüneline Etkisi.

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2002, Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği. 49/EC.

Tüysüz, O., Yiğitbaş, E. ve Serdar, H.S., 1990, Orta Pontidlerin Erken Mesozoyik evrimine bir yaklaşım: Paleotetis/Karakaya kenar denizi problemi. Türkiye 8. Petrol Kongresi, Bildiriler, Türkiye petrol Jeologları Derneği/TMMOB Petrol Müh. Odası, 351-352, Ankara.

USBM/OSMRE, 2005, U.S. Bureau of Mines/Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, RI8507.

Vardar, M., 1974, Felsmechanische Probleme bei grossen Steinbrüchen, Festschrift Leopold Müller-Salzburg zum 65. Geburtstag, Karlsruhe.

Vardar, M., 1977, Zeiteinfluss auf das Bruchverhalten und sekundaere Verformungen um Hohlraeume im druckhaften Gebirge, Schacht und Tunnelbau Kolloquium, 56-78, Berlin.

Kentsel Kullanım Alanı Yamaç Duraysızlıklarının Jeolojik ve Jeoteknik Değerlendirilmesi: Kocaeli-Darıca Örneği

Geological and Geotechnical Analysis of Slope Instabilities in an Urban Area: Kocaeli - Darıca Case Study

N. Şimşek[1,*], E. Bozkurtoğlu[2], A. Karakaş[3]

[1] İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Müh. Bölümü, Maslak-İstanbul
[2] İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, Maslak-İstanbul
[3] Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, İzmit-Kocaeli
(**simsekn16@itu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, Kocaeli ili Darıca ilçesi Yeni Mahalle'de aktif ve potansiyel yamaç duraysızlıkları jeoteknik açıdan incelenmiş ve mühendislik önlemleri tartışılmıştır. Tersiyer yaşlı Darıca formasyonu ile Triyas yaşlı Tepeköy formasyonunun yayılım sunduğu arazide topoğrafik eğim % 0 – % 45 arasındadır. Açılan 12 sondaj derinliği 15.00 – 18.50 m olup, TCR % 5- % 67, RQD % 0- % 21 arasındadır. Arazi ve laboratuvar deneyleri ile nokta yük dayanımı (Is_{50}) 10.44 – 14.36 kg/cm^2; zeminleşmiş birimler için içsel sürtünme açısı (ϕ) 8.50° – 9.38°, kohezyon (c) 0.60 – 0,68 kg/cm^2, doğal birim hacim ağırlık (γ_n) 1.985 – 2.051 g/cm^3, kuru birim hacim ağırlık (γ_k) 1.702 – 1.750 g/cm^3 arasında olup zemin sınıfı CI'dir. İnceleme alanında topoğrafik eğimin> % 30 olduğu kesimlerde kaynak sularının varlığı ve tabakaların yamaç yönünde olması durumunda aktif külte hareketleri gelişmiştir. Çalışmada, Triyas yaşlı Tepeköy formasyonu duraylılık açısından ve Tersiyer yaşlı Darıca formasyonu ise şişme ve oturma açısından önlem gereken sorunlu alanlar olarak tanımlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Darıca, kütle hareketleri, mühendislik jeolojisi, kentsel kullanım

Abstract: *In this study, Yeni Mahalle, within the Darıca district in Kocaeli province, active and potential slope instabilities were investigated geotechnically and the engineering measures were discussed. The topographic slope is between 0% and 45% in the land where Tertiary Darıca formation and Triassic aged Tepeköy formation spread. The depths of the 12 boreholes are between 15.00 and 18.50 m, the TCR is between 5% and 67%, and there is a RQD between 0% and 21%. With field and laboratory tests, point load strength index (Is_{50}) was found to be 10.44 and 14.36 kg / cm^2; for highly weathered sections an internal friction angle of (ϕ) 8.50 and 9.38^o, cohesion of (c) 0.60 and 0.68 kg / cm^2, natural unit weight (n) between 1.985 and 2.051 g / cm^3, and dry unit weight (γk) between 1.702 and 1.750 g / cm^3 and the soil classification for these sections is CI. In the study area, where the topographic slope is >30%, the presence of spring waters and the movement of layers in the direction of the slope developed active slope movements. In the study, areas with the Triassic Tepeköy formation are defined as problematic instable areas and areas with Tertiary Darıca formation are defined as problematic areas in terms of swelling and settlement.*

Keywords: *Darıca, mass movements, engineering geology, urban site usage*

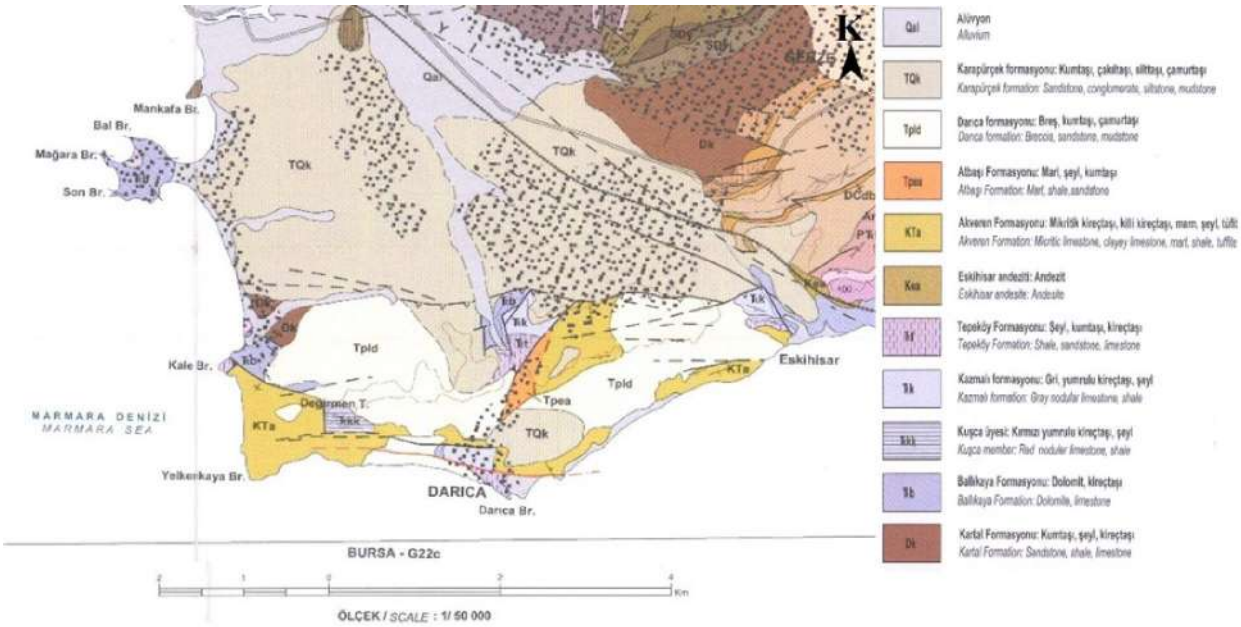
1. GİRİŞ

Külte hareketi; yamaç ve şevlerdeki toprak, geçiş kayacı ve kayanın başta yer çekimi ve arazi eğimi etkisinde olarak hareket türüne bağlı diğer etmenlerin de kontrolünde gerçekleşen her türlü yer değiştirmeye verilen genel isimdir. Külte hareketlerinin gelişiminde iç (ortam cinsi, gözenekliği ve geçirimliliği, zemin ve yeraltı suyu durumu, su basıncı, süreksizlikler ve yapısal unsurlar vb.) ve dış (insan faaliyetleri, iklim, bitki örtüsü, ortamın su içeriği değişimleri, ortamın ayrışma süreci, doğal ve yapay titreşim yükleri vb.) önemli etmenler olup bu etmenlerden uzun süre devam eden yağışların yanı sıra insan faaliyetleri ve titreşim yükleri birincil derecede önemlidir. Hızla artan nüfus ile oluşan çarpık kentleşmeyle doğal bitki örtüsünün tahrip edilmesi de değişik külte hareketlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Eğimli arazilerde; arazi yüklenme koşullarına uygun olmayan yapıların yapılması ve doğal drenajın bozulması, yamaçların topuk bölgelerinde önlem alınmadan yapılan derin kazılar, gerekli mühendislik önlemlerini almadan yamaçların ve taç bölgesinin yüklenmesi vb. pek çok etmen

sonucunda ortamlarda zamanla duraysızlıklar oluşup külte hareketleri gelişir. Çalışma konusunu oluşturan inceleme alanı, Kocaeli ili Darıca ilçesinde Yeni Mahalle içindedir. Alan, Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nün heyelan yoğunluk haritasında aktif heyelan alanındadır. Gelişmiş sanayisi ve coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu iş olanakları, Kocaeli ilinin nüfus yoğunluğunu her geçen gün daha da artırmakta ve yeni yerleşim yerlerinin oluşturulmasına neden olmaktadır (Karakaş vd., 2018). Bölge, jeolojik, tektonik ve iklim koşulları açısından heyelan oluşumlarına oldukça elverişlidir (Çan vd., 2013). Karakaş ve Coruk (2011) Kocaeli ili İzmit, Derince ve Hereke'de meydana gelen bazı kütle hareketlerinin nedenleri ve etkilerini araştırmışlardır.

2. BÖLGENİN JEOLOJİSİ

İnceleme alanı Marmara bölgesinde Kocaeli ili Darıca ilçesinin merkez kısımlarında yer alır. Kocaeli yarımadası olarak adlandırılan bu bölgede İstanbul Paleozoyik serisine ait temel formasyon ve birimler üzerinde Mesozoyik ve Senozoyik zamanların belirli dönemlerinde çökelmiş formasyon ve birimler yer alır. Paleozoyik çökel istif tabanda Ordovisiyen yaşlı birimlerle başlayıp Karbonifer'e kadar uzanan karasal ve sığ denizel çökellerle kaplı transgresif bir seriyi temsil etmektedir. Çökel tipleri Devoniyen'den itibaren sığ denizel bir çökelme ortamı bulunduğunu işaret etmektedir. Bölgede hâkim kaya birimleri sedimenter kökenli olup kumtaşı, kireçtaşı, kiltaşı litolojileri ağırlıktadır. Çalışma alanında Mesozoyik'e ait Triyas-Kratese 'de çökelmiş kalın bir kireçtaşı istifi bulunmaktadır. Ayrıca kıyı şeridi ve kıyı düzlüğü boyunca az tutturulmuş Pleyistosen yaşlı kırıntılar ve Kuvaterner'e ait alüvyal çökeller yer almaktadır (Abdüsselamoğlu, 1963). Bölgenin 1/50.000 ölçekli jeoloji haritası Şekil 1'de verilmiştir.

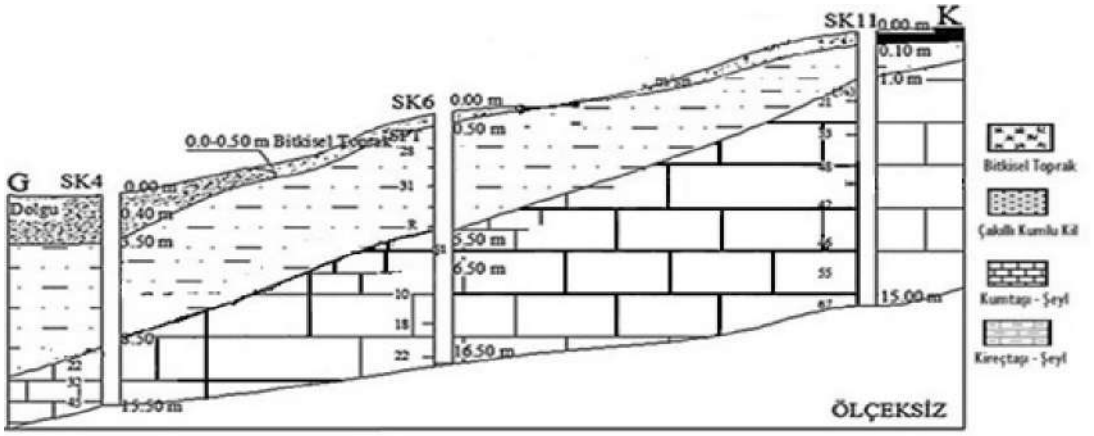


Şekil 1. İnceleme alanı ve çevresine ait jeoloji haritası (MTA, 2005).

2.1. İnceleme Alanının Jeolojisi

İnceleme alanının büyük çoğunluğu Triyas yaşlı Tepeköy formasyonu (TR_t) içinde olup çevresinde geç Pliyosen yaşlı Darıca formasyonu (Tpld) bulunmaktadır. Alttan üste doğru gri ammonitli kireçtaşı-yumrulu kireçtaşı, kırmızı şeyl ara tabakalı ve ammonitli kireçtaşı ara tabakalı halobiyalı şeyl ile kumtaşı-şeyl ardalanmasından oluşan (Yurtsever, 1982) Tepeköy formasyonu 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 nolu sondajlarda kesilmiştir. Sondajlarda nebati/dolgu kalınlığı 0.00 – 2.00 m arasında olup bu seviyenin altında 3.50 – 9.00 m kalınlıkta katı-çok katı kıvamlı sarı-kahve az çakıllı kumlu siltli-kil birim yer almaktadır. Bu birimin altından sondaj kuyu tabanına çok katı-sert kıvamlı sarı-kahve iri çakıllı kumlu yer yer şeyl ara katmanlı kil birim kesilmiştir. Darıca formasyonu breş, kumtaşı ve çamurtaşı birimler içeren alüvyon yelpaze yığışımı olup genellikle grimsi yeşil – hâkî şeyllerdir.

Gevşek tutturulmuş birimde kataklastize olmuş silttaşı ve kireçtaşı ara seviyeleri gözlenen formasyonun kalınlığı ~50 m'dir (MTA, 2005). Sondaj kuyuları 3 ve 4'te kesilen birim 1.00 – 8.00 m'lerde çok katı kıvamlı az çakıllı karbonatlı kumlu kil olup 8.00 – 15.00 m'ler arası kireçtaşı-şeyldir. İnceleme alanın jeolojik kesiti Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. İnceleme alanı jeolojik yapısını gösteren K-G kesit.

2.2. Jeomorfolojik ve Çevresel Bilgiler

Kocaeli ili, Darıca ilçesi Marmara Bölgesi'nin doğusunda, 40°31' – 41°13' paralelleriyle 29°22' – 30°21' meridyenleri arasında bulunmaktadır. Kuzeyinde Karadeniz, doğusunda Sakarya ili, güneyinde Bursa ili, batısında Yalova ve İstanbul illeri yer alır. Kocaeli ili batısında yer alan Gebze – Darıca ilçeleri, Miyosen Aşınım Yüzeyi'nin (MAY) Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı birimleri üzerindeki bir alanda kurulmuştur. Peneplen karakterli alan Darıca-Hereke çizgisi boyunca birdenbire kesintiye uğramıştır. Alanda, Beylik Dağ (271 m) ve 314 rakımlı tepe gibi monadnoklar (izole kaya tepeler) görülmektedir. Son olarak Pliyosen'de penepleşen saha, "Post-Alpin" tektonik hareketler sırasında, güney kısmı daha fazla olmak üzere tamamıyla yükselmiş ve daha sonra akarsularla yarılıp parçalanarak plato haline dönüşmüştür (Göncüoğlu vd., 1989). Batı kısmında ortalama yükselti 200 – 300 m civarındadır. İnceleme alanı 40.75713 E ve 29.38738 B koordinatları arasında olup eğimi % 0 ila % 45 arasında değişmektedir.

3. İNCELEME ALANI BİRİMLERİ FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

3.1. Fiziksel Özellikler

İnceleme alanının büyük kısmı Tepeköy formasyonu (TRt) üzerinde olup geri kalan alanda Darıca formasyonuna ait birimler yüzeyler. Formasyonların kaya kesiminde birim hacim ağırlık değerleri Tepeköy formasyonun numuneleri için doğal birim hacim ağırlık (γ_n) 1.985 – 2.051 g/cm^3, kuru birim hacim ağırlık (γ_k) 1.702 – 1.750 g/cm^3 arasında değişirken Darıca formasyonu numuneleri için doğal birim hacim ağırlık (γ_n) 2.006 – 2.016 g/cm^3, kuru birim hacim ağırlık (γ_k) 1.719 – 1.729 g/cm^3 arasında değişmektedir. Formasyonların porozite, boşluk oranı ve su içeriği değerleri ise sırasıyla; Tepeköy formasyonu numuneleri için % 0.01 – 0.03, % 1 – % 3 ve % 16.1-18.3 iken Darıca formasyonu numuneleri için % 0.01, % 1 ve % 16.2-17.5'tir. Formasyonların zemin kesiminde Atterberg limit deneyleri ile elde edilen değer aralıkları Tepeköy formasyonu numuneleri için likit limit (LL) % 36.0 – % 40.2, plastik limit (PL) % 17.10 – % 19.60, plastisite indisi %17,50 – %22,20 iken Darıca formasyonu numuneleri için likit limit (LL) % 38.2 – % 40.70, plastik limit (PL) % 17.90 – % 20.30 ve plastisite indisi (PI) % 17.90 – % 22.30 aralığındadır. Elek analizi deney sonuçları Tepeköy formasyonu numuneleri için % 0.00 – % 4.26 çakıl, % 25.05 – % 31.32 kum ve % 65,23 – % 74.95 silt+kil olup Darıca formasyonu numuneleri için % 0.39 – % 1.55 çakıl, % 25.19 – % 28.75 kum ve % 70.13 – % 74.42 siltli kildir. Her iki formasyona ait toplu sonuçlar ise Çizelge 1'deki gibidir. İnceleme alanında belirlenen formasyonlardan türeyen killer orta – yüksek plastisiteli killer olup oluşturdukları zeminin sınıfı CI'dır (TS 1500, 2000).

Çizelge 1. İnceleme alanında belirlenen formasyonlara ait fiziksel özellikler.

Formasyon	Birim hacim ağırlık ($\gamma_k - \gamma_n$) (g/cm^3) Çakıl (%) Kum (%) Silt + Kil (%)	Likit Limit (%) Plastik Limit (%) Plastisite İndisi (%)
Tepeköy F.	1.985 – 2.051	0.00 – 4.26	36.0 – 40.2
	1.702 – 1.750	25.05 – 31.32	17.10 – 19.60
		65.23 – 74.95	17.50 – 22.20
Darıca F.	2.006 – 2.016	0.39 – 1.55	38.2 – 40.70
	1.719 – 1.729	25.19 – 28.75	17.90 – 20.30
		70.13 – 74.42	17.90 – 22.30

3.2. Mekanik Özellikler

Bölgede açılan mekanik sondajlardan örselenmiş ve örselenmemiş numunelerin yanı sıra karotlu numuneler de alınmış olup bölgenin mekanik özellikleri hakkında araştırma yapılmıştır. Çalışmalar sonucu Darıca formasyonu olarak belirlenen sondaj kuyularında SK-3'te 2.00 – 2.50 m'de örselenmemiş numune alınarak zemin birimin kohezyonu ve içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Sondaj kuyusu 4'te ise dolgu birimden hemen sonra kaya birime geçiş yaptığından, bu sondaj kuyusunda karotlu numune alınmış, 9.00 – 9.50 m'de nokta yükü dayanımı deneyi yapılmıştır. Tepeköy Formasyonunun belirlendiği sondaj kuyuları 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 12'de ortalama 1.50 – 9.00 m arasında örselenmemiş numuneler, 5.50 – 18.00 m arasında ise karotlu numuneler alınmıştır. Bu sonuçlara göre Darıca ve Tepeköy formasyonlarına ait kohezyon, içsel sürtünme açısı ve nokta yükü dayanımı değerleri sırasıyla; Darıca Formasyonu için kohezyon (c) 62.69 – 66.48 kPa, içsel sürtünme açısı (ϕ) 8.84° – 9.38°, nokta yükü dayanımı (Is_{50}) 10.36 – 12.75 kg/cm^2; Tepeköy Formasyonu için kohezyon (c) 58.59 – 65.83 kPa, içsel sürtünme açısı (ϕ) 8.50° – 9.10°, nokta yükü dayanımı (Is_{50}) 10.36 – 14.36 kg/cm^2 olarak bulunmuştur (Çizelge 2).

Çizelge 2. İnceleme alanında belirlenen formasyonlara ait mekanik özellikler.

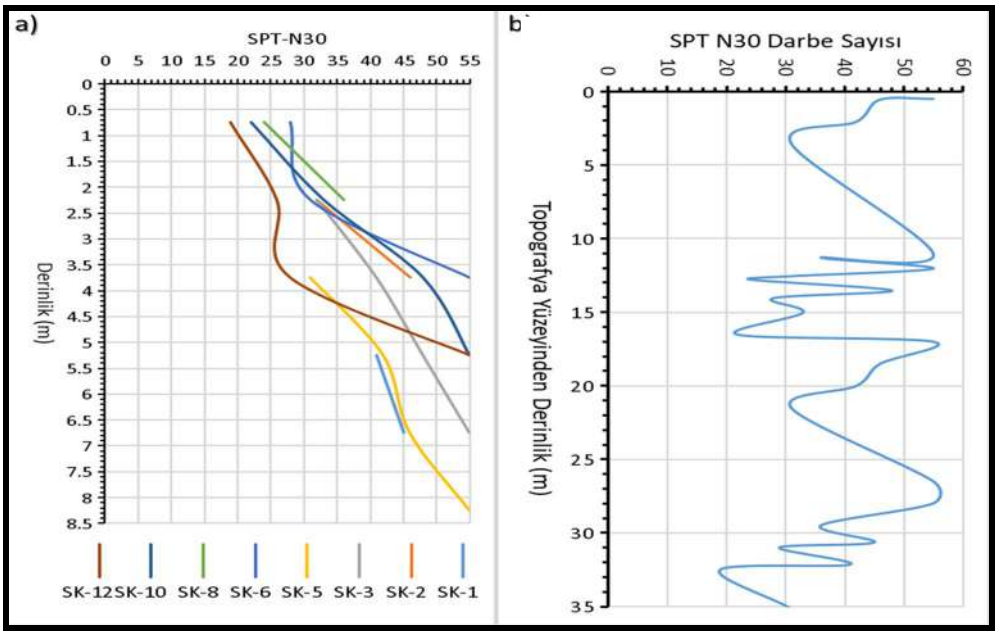
Formasyon	TCR (%) RQD (%)	Nokta yükü dayanımı (kg/cm^2)	Kohezyon (kPa) İçsel S. Açısı (°)
Tepeköy F.	5 – 67	10.36 – 14.36	58.59 – 65.83
	<25		8.50 – 9.10
Darıca F.	15 – 30		62.69 – 66.48
	<25		8.84 – 9.38

İnceleme alanında yapılan ve derinliği 15.00 – 18.50 m arasında değişen 12 adet sondajın toplam derinliği 201.50 m dir. 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 nolu sondajlar karotlu yapılmış ve TCR değeri Tepeköy formasyonunda % 5 – % 67, Darıca formasyonunda % 15 – % 30 arasında değişirken RQD değeri her iki formasyonda da % 25 değerinin altındadır. Zeminin sıkılık ve kıvam durumunu belirlemek için 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 ve 12 nolu sondajların 1,00 – 8,00 m'ler arasında her 1.50 m'de bir Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) yapılmıştır. Sondaj kuyusu 3'te 1.00 – 8.00 m'lerde Darıca Formasyonuna ait karbonatlı kumlu kil birimi, sondaj kuyuları 6, 8 ve 10'da 0.60 – 7.50 m'ler arasında Tepeköy Formasyonuna ait kumlu siltli kil birimi tespit edilmiş olup, SPT-N_{30} değerleri 0 – Refü arasında elde edilmiştir. SPT-N_{30} değerleri heterojen dağılım sunmakta ve hem yatay hem de düşey düzlemlerde değişmektedir (Şekil 3).

İnceleme alanında bölgenin mühendislik ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan arazi çalışmaları sonucunda sondaj kuyuları 3 ve 4'te 4.50 – 15.00 m arasında Darıca formasyonuna ait kireçtaşı şeyl birimi yer alırken, SK 6, 7, 8, 9, 10 ve 11'de 1.50 – 18.50 m'ler arasında Tepeköy formasyonuna ait kireçtaşı – şeyl, kumtaşı – şeyl ve silttaşı – şeyl birimleri tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda, Tepeköy ve Darıca formasyonlarının yoğun süreksizlikler sergileyen çok zayıf dayanımlı kaya birimleri içerdiği belirlenmiştir.

4. İNCELEME ALANI KÜTLE HAREKETLERİ VE NEDENLERİ

Külte hareketi; bir arazi üzerinde ayrışma ile oluşmuş malzemenin veya kütlelerin yamaçlardan aşağıya yerçekimi etkisiyle yavaş ya da hızlı bir şekildeki her türlü yer değiştirme olayına verilen genel isimdir (Varnes, 1978). Kütle hareketleri, Soeters ve Van Westen (1996)'e göre yerel jeolojik, jeomorfolojik ve hidrolojik koşulların ürünü olarak bitki örtüsü, arazi kullanımı ve insan aktiviteleri tarafından etkilenen, yağış, sismik olayların sıklığı ve şiddeti tarafından kontrol edilen yapay veya doğal şev duraysızlığıdır. İnceleme alanında oluşan külte hareketi yamaç molozunda gelişen yavaş akma (krip) şeklindedir. Bu durumun başlıca nedenleri bölgedeki yüksek topoğrafik eğim yanı sıra yağışlı ve kurak iklim döngüsü, çevrede oluşan yerleşim nedeniyle temiz ve kirli su kaçakları vb. nedenlere bağlı olarak malzeme bünyesindeki mevsimsel su içeriği değişimidir. Ayrıca çalışma alanının Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'na yaklaşık olarak 3 km uzaklıkta olması nedeniyle bölgedeki sismik hareket yoğunluğu ve buna bağlı ortam dayanımındaki farklılıklar (Şekil 3) da çalışma alanında oluşan külte hareketinin diğer bir önemli sebebidir.



Şekil 3. İnceleme alanında SPT-N_{30} değerlerinin derinlikle değişimi.

İnceleme alanında yavaş akma bölgelerinin gözlendiği Örenbaba sokak ile Eski Hükümet caddesi arasında kalan bölgede (Şekil 4), Eski Hükümet caddesi yakınlarındaki kısımlarda yüzeyleyen silttaşı mostralarının üst kısımlarında kayaç ayrışması sonucunda siltli killi ve seyrek çakıllı örtü tabakaları oluşmuştur. Bu kısımda tabaka kalınlığı zaman içinde artmış ve külte hareketinin gelişeceği yamaç molozuna dönüşmüştür. Ortamın orijinal topoğrafyası bozulmuş, genelde % 0 ile % 20 arasında olan yamaç eğimi kayma bölgelerinde % 80'e ulaşmıştır. Bu kesimlerin su ile buluşması ve birbirini izleyen sıcak ve yağışlı mevsimler sonucu ortam bünyesindeki su içeriği değişimine ek olarak, bölgedeki tektonik aktivite, jeolojik özellikler, jeomorfolojik değişim ve uzun sürelere yayılan kurak – yağışlı iklim döngüsü gibi etkenler de rol oynamaktadır (Duman vd., 2006). İnceleme alanında yapılan arazi çalışmalarının ve lokasyonların yerleri ise Şekil 5'te gösterilmektedir.

Şekil 4. İnceleme alanı Örenbaba sokak ile Eski Hükümet caddesi arasında kalan heyelan bölgesi.

Şekil 5. İnceleme alanında yapılan arazi çalışmaları.

5. BULGULAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kocaeli ili Darıca ilçesi Yeni mahallesi sınırları içerisindeki heyelanlı bölgenin jeolojik ve jeoteknik çalışmalar sonucunda duraylılık sorunları tespit edilmiştir. Bu bağlamda, inceleme alanında jeoteknik sondajlar, laboratuvar deneyleri ve duraylılık analizleri yapılmış, ayrıca bölgede meydana gelen heyelanlar hakkında bilgi toplamak amacıyla İller Bankası'nın 1990 yılında hazırladığı jeolojik etüt raporundan da faydalanılmıştır.

Yapılan eski ve yeni jeolojik ve jeofizik etüt çalışmalarında, özellikle Eski Hükümet caddesi ile Örenbaba sokak arasında kalan ve halen daha MTA'nın heyelan envanteri haritalarında aktif heyelan bölgesi olarak değerlendirilen alan ele alınmıştır. Bu bölgede yapılan stabilite analizleri sonucunda çalışma alanında stabilite sorunlarının olduğu tespit edilmiştir (Akbulut, 1990). Heyelanlı bölgede, yamaç molozu kalınlığı ve topoğrafik eğim dengesiz bir şekilde değiştiğinden ve bölgede yerleşimin artmasından ötürü yapı temellerinin mutlak suretle sağlam ana kaya üzerine oturtulması gerekmektedir (Yıldırım vd., 2013).

Bölgede yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda, inceleme alanında iki farklı formasyon tespit edilmiştir. Bu formasyonlar, Triyas yaşlı Tepeköy formasyonu ve Tersiyer yaşlı Darıca formasyonudur. Tepeköy formasyonunun temsil ettiği birimlerde yapılan duraylılık analizleri sonucu, Güvenlik katsayısının (Fs) 1.617 – 3.275 arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca bu alanlarda gözlemlenen birimlerin jeolojik ve jeoteknik özellikleri dikkate alındığında, Tepeköy formasyonuna ait bölgede heyelanlara neden olabilecek koşullardan dolayı oluşabilecek duraysızlık nedeniyle bu alanlar "Önlem Alınabilecek Nitelikte Stabilite Sorunlu Alanlar" olarak belirlenmiş ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın jeoloji haritalarında önlemli alan (ÖA) olarak gösterilmiştir. Bu alanlarda alınacak önlemler ise yamaç boyunca stabilite analizleri yapılarak stabiliteyi sağlayacak mühendislik önlemlerinin belirlenmesi, mevcut ve kazı esnasında oluşacak şevlerin istinat yapıları ile desteklenmesi, kendi ve çevre parsellerin güvenliği sağlanmadan kazı işlemlerinin yapılmaması, yüzey ve yeraltı sularının yapı temellerine ulaşmasını engelleyecek uygun drenaj sisteminin yapılması, yapı temellerinin üstteki ayrışmış ve dengesiz birimin sıyrıldıktan sonra sağlam kaya birimlere oturtulmasına özen gösterilmesi şeklinde olabilir (Şekercioğlu, 1998; Çamlıbel, 2000; Highland ve Bobrowsky, 2008).

İnceleme alanında belirlenen bir diğer formasyon olan Darıca formasyonunda yapılan arazi çalışmaları sonucu, bölgenin rezidüel birimden oluştuğu tespit edilmiştir. Bu formasyon içerisinde kalan birimlerin jeolojik özellikleri dikkate alındığında, bölgenin zeminde şişme, oturma ve taşıma gücü zemin problemleri nedeniyle "Önlem Alınabilecek Nitelikte Şişme, Oturma Açısından Sorunlu Alanlar" olarak belirlenmiştir. Bu tür alanların gösterimi ise Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın jeoloji haritalarında önlemli alan (ÖA) açıklaması ile yapılmaktadır (AİGM, 1996). Bu tür alanlarda alınabilecek önlemler; tüm alanda mevsimsel yağışların ve yeraltı sularının zeminde yapacağı olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması için uygun drenaj sistemlerinin yapılması, her parsel için sondaja dayalı zemin araştırma çalışmaları yapılarak, yapı temellerinin alttaki sağlam birime mühendislik prensiplerine uygun olan yapı temel projelerinin tespit edilmesi, yapı yüklerinin taşıttırılacağı zemin seviyelerinin sıvılaşma, şişme, oturma ve taşıma gücü parametrelerinin ayrıntılı bir şekilde irdelenmesi, inceleme alanının Kuzey Anadolu Fay hattı sistemleri içinde kaldığından, yapıların deprem bölgelerinde yapılacak yapılarla ilgili yönetmeliğe uygun olarak yapılması şeklinde olmalıdır.

6. KAYNAKLAR

Abdüsselamoğlu, Ş., 1963. Kocaeli Yarımadasının Jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Yayınlanmamış Rapor No:3249

Afet İşleri Genel Müdürlüğü (AİGM), 1996, https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/22635_1.pdf

Akbulut, Ö., 1990, Kocaeli Darıca Heyelanlı Bölgelerle İlgili Jeolojik Etüt Raporu, Jeolojik Etüt Şube Müdürlüğü, İller Bankası, Ankara

Chen, H., Lee, C. F., 2004. Geo-hazards of Slope Mass Movement and Its Prevention in Hong Kong, Engineering Geology, Vol. 76, No.1–2, 3–25

Classification of Soils in Civil Engineering Purposes, 2000, Turkish Standards 1500 TS1500*), Ankara*

Çan, T., Duman, T. Y., Olgun Ş., Çörekçioğlu Ş., Gülmez, F., K., Elmacı H., Hamzaçebi S., Emre Ö, 2013. Türkiye Heyelan Veri Tabanı, TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara

Çamlıbel, N., 2000, Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi, Birsen Yayınevi, Ankara

Duman T. Y., Emre Ö., Çan T., Nefeslioğlu H., 2006. 1/500.000 Ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-İstanbul Paftası, MTA Özel Yayın.

Göncüoğlu, M. C., Önder, F., 1989, Armutlu Yarımadasında (Batı Pontidler) Üst Triyas Konodotları, MTA Dergisi, 109, 147 – 152.

Highland, L.M., Bobrowsky, P., 2008, The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides, U.S. Geological Survey Circular 1325, Virginia

Karakaş, A, Coruk, Ö, 2011. Impact of mass movements in the Kocaeli Province, Turkey. Geology Today, Vol. 27, No. 2, 70-73.

Karakaş, A., Zengince M., 2018, Kocaeli Gölcük'te Oluşan Heyelanların Nedenleri, Etkileri ve Alınan Önlemler, Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, Cilt 17, 39-54

Maden Tetkik ve Arama Kurumu Genel Başkanlığı, 2005, Türkiye Jeoloji Haritası Bursa G22b Paftası, Jeoloji Etütleri Dairesi, M.T.A., Ankara.

Soeters, R., Van Westen, C., J., 1996, Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation, Chapter 8, 129 – 177, Hollanda.

Şekercioğlu, E., 1998, Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara.

Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and processes, In Special Report 176, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.

Yıldırım, M., Gökaşan, E., 2013, Mühendisler İçin Jeoloji Bilgileri (Genişletilmiş İkinci Baskı), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yurtsever, A., 1982, Kocaeli Triyası Biyostratigrafi Projesi, Gebze-Hereke-Tepecik alanında Mesozoyik-Senozoyik kayalarının jeolojisi. MTA Rap. No.7195, Ankara (yayımlanmamış).

Jeoteknik / *Geotechnics*

Kaynarca-Sabiha Gökçen Havaalanı Metro Hattındaki (İstanbul) Sorunlu Kesimler İçin Yapılan Uygulama Değişiklikleri

Project Modifications for Problematic Parts on Kaynarca-Sabiha Gokcen Subway Line (Istanbul) at Application Phase

Y. Mahmutoğlu[1,*], A. Türker[2], M. Sarıdede[3]

[1] İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
[2] Arcadis-Tümaş İş Ortaklığı, Kavaklıdere Çankaya-Ankara
[3] Gülermak-YSE Adi Ortaklığı, Gaziosmanpaşa-Ankara
*(*yilmazm@itu.edu.tr)*

ÖZ: Kentsel alanlardaki sığ yeraltı kazılarının sanayi tesislerinin, dolgu alanlarının ve zayıf zeminlerin altından geçişi özel önlem ve uygulamalar gerektirir. İstanbul Metrosu, Kartal-Kaynarca Raylı Sistem Hattı'nı Sabiha Gökçen Havalimanı'na bağlayan hat üzerinde bu türden sorunlarla karşılaşılmıştır. Yaklaşık 7.4 km uzunlukta, çift yönlü bu bağlantı hattı, üç adet delme tünel, bir adet aç-kapa tünelden oluşan dört adet istasyon kazısından oluşmaktadır. Yoğun yerleşim alanı altında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemiyle (NATM) ve delme patlatma tekniğine göre projelendirilen yeraltı açıklıklarının üst yapılarla etkileşim bölgesi uzunluğu, toplam hat uzunluğunun % 80'ine karşılık gelmektedir. Projelendirilen tünel kazı kotlarının yüzeyden derinliği 10-40 m arasında değişmektedir. Bildiride, bu metro hattı üzerinde kalan üç ayrı lokasyonda karşılaşılan sorunun aşılması için, yer koşulları göz önünde tutularak, uygulama aşamasındaki çözüm amaçlı proje değişiklikleri ele alınmıştır. Uygulama aşamasında yapılan değişikliklerle, projesinde öngörülen ve önemli bir maliyet oluşturan zemin iyileştirme çalışmalarının önüne geçilmiş, tünel imalatları sırasında karşılaşılması muhtemel problemler bertaraf edilerek proje maliyeti önemli oranda düşürülmüş ve projenin öngörülen sürede güvenli olarak açılması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metro tüneli, NATM, Patlatma, Sabiha Gökçen Hava Limanı, Sığ tünel

ABSTRACT: *In urban area, shallow underground excavations under industrial plants, man-made grounds and weak geological environments requires special precautions and techniques. Similar problems have been encountered on the line connecting the Kartal-Kaynarca to Sabiha Gökçen Airport Rail System. There are three boring and one cut-cower tunnels consisting of four stations on this subway connection having approximately 7.4 km double lines. Underground excavations in heavy urbanized area in this line designed according to New Australian Tunneling Method (NATM) and drilling-blasting technique. The overlapping parts of interaction areas with surface structure and infra-structures to total length of line is nearly 80%. The depths of excavation levels from the surface varies between 10 and 40 m. In this study, in order to overcome the problem observed in three different locations on this metro line, considering the boundary conditions, the solution-oriented project changes during the application stage are discussed. With these changes made during the application stage, ground improvement works that constitute a significant cost were prevented in the project. The project cost has been significantly reduced by eliminating the problems that may be encountered during tunnel construction and the tunnels were opened safely within the prescribed time.*

Keywords: *Subway tunnel, NATM, Blasting, Sabiha Gokcen Airport, Shallow tunnel*

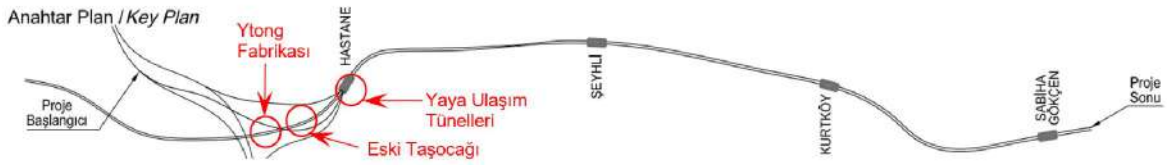
1. GİRİŞ

Bildiride, Kaynarca-Sabiha Gökçen Havalimanı metro hattı üzerinde kalan üç ayrı lokasyonda karşılaşılan sorunun aşılması için, yer koşulları göz önünde tutularak, çözüm amaçlı proje değişiklikleri ele alınmıştır. Bu kesimler sırasıyla;

- Km 0+400 – km 0+640 (sağ hatta göre) arasındaki kesimi ise 1960'lardan günümüze kadar gaz beton üretimi yapılan Türk Ytong Fabrikasına ait kritik tesislerin altından geçişin bulunduğu böge.

- Km 0+850- km 0+970 arasındaki eski taşocağı boşluğunu dolduran dolgu alanı
- Hattın km 1+320 – km 1+500 arasındaki Fevzi Çakmak İstasyonu Güney ve Kuzey Yaya Giriş Çıkış tünellerinin bulunduğu hatlardan

oluşmaktadır. Bu lokasyonların hat üzerindeki konumları Şekil 1'de gösterilmiştir.



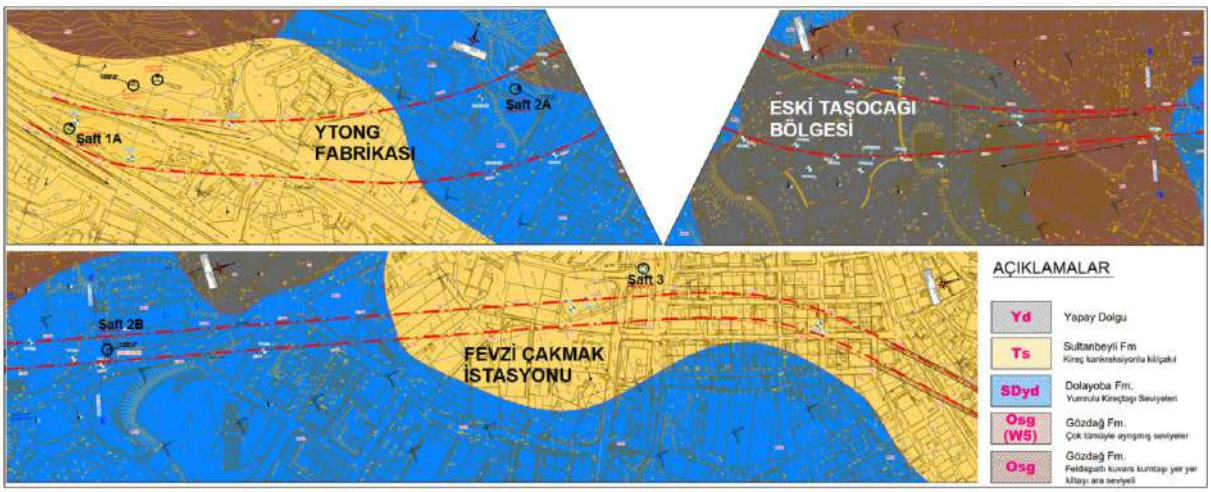
Şekil 1. Sorunlu kesimlerin metro hattı üzerindeki konumları.

Bildiride yukarıda açıklanan ve uygulama sırasında yapılan tasarım değişiklikleri ile ilgili çalışmaların sonuçları sunulmuştur.

2. JEOLOJİK VE JEOTEKNİK ÖZELLİKLER

İnceleme alanında temel kayayı Palezoik yaşlı Gözdağ ve Dolayoba Formasyonları oluşturur. Bu birimler hattın belirli kesimlerinde Pliyosen yaşlı Sultanbeyli Formasyonu ve yapay dolgularla örtülmektedir (Şekil 2).

Metro hattının incelenen kesiminde, kumtaşı ve şeyl ardalanmasından oluşan birim, Önalan (1981, 1982) tarafından "Gözdağ Formasyonu" olarak adlanmıştır. Proje güzergahında gerçekleştirilen temel araştırma sondajlarında maksimum 58.80 metre kalınlığında ayırtlanan, tünel kotlarında da yayılım gösteren Gözdağ Formasyonu; ağırlıklı olarak feldispatlı kuvars kumtaşı, kuvars kumtaşı ile temsil edilmekte olup, yer yer kiltaşı ve silttaşı seviyeleri ile kumtaşı ile ardalanmış seviyeleri tespit edilmiştir. Feldispatlı kuvars kumtaşı; açık gri – bej renkli, sert, dayanımlı – orta dayanımlı – yer yer zayıf dayanımlı, az – orta derecede ayrışmış, silis çimentolu, ince – iri taneli, sıkı tutturulmuş, yer yer breşik dokulu özellikte olup, kuvars kumtaşı ise genel olarak;koyu gri – yeşilimsi gri renkli, orta sert – sert, orta zayıf dayanımlı, az – orta derecede ayrışmış, silis çimentolu, ince – iri tanelidir.



Şekil 2. Kaynarca-Sabiha Gökçen Havalimanı metro hattının km 0+000 – km 2+500 arasınnın jeoloji haritası (Yüksel Proje 2015'den değiştirilerek düzenlenmiştir).

Güzergah araştırma sondajlarında yer yer kesilen, silttaşı genel olarak; açık gri – sarımsı kahverenkli orta sert, zayıf dayanımlı, orta derecede – çok ayrışmış, içerisinde ince – orta taneli kum barındıran özellikte, feldispatlı kuvars kumtaşı ile ardalanan kumtaşı ise genel olarak gri – yeşilimsi gri renkli,

sert, orta – orta zayıf dayanımlı, az – orta derecede ayrışmış, kil – silt matriks içerisinde, sıkı tutturulmuştur. Birim içerisinde gri – grimsi kahverenkli orta sert, orta zayıf – zayıf dayanımlı, orta derecede – yer yer çok ayrışmış volkanik sokulumlarda mevcuttur. Temel araştırma sondajları ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler formasyonun yüzeye yakın üst seviyelerinin yer yer tümüyle ayrışmış, killeşmiş olduğu belirlenmiştir. Sondaj verileri ile arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen kaya özellikleri aşağıda verilmiştir (Yüksel Proje, 2015).

Karot Yüzdesi (TCR) : % 70 ≤ TCR ≤ % 100
Kaya Kalitesi (RQD) : % 20 ≤ RQD ≤ % 52
Pressiyometre limit basıncı (Pln) : 43.10 kg/cm^2 ≤ Pln ≤ 48.60 kg/cm^2
Pressiyometre modülü (Ep) : 6.950 kg/cm^2 ≤ Ep ≤ 70.772 kg/cm^2
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (qu) : 17.40 MPa ≤ qu ≤ 87.60 MPa
Birim Hacim Ağırlık (γn) : 2.53 gr/cm^3 ≤ γn ≤ 2.70 gr/cm^3
Elastisite Modülü (E) : 11.50 GPa ≤ E ≤ 32.50 GPa

Sert ve masif nitelikteki Dolayoba Formasyonu hat üzerindeki diğer anakayayı oluşturmaktadır. Pendik kuzeyindeki Dolayoba yerleşimi civarında yüzeylenen resifal özellikli, Halysites ve brakiyopodlu kireçtaşları, Kaya (1973) tarafından Dolayoba kireçtaşı, Önalan (1981, 1982) tarafından da Dolayoba Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Formasyon gri renkli, orta sert – sert, orta dayanımlı – dayanımlı, az ayrışmış, orta – kalın tabakalı kireçtaşından oluşmaktadır. Hattın farklı noktalarında tünel kazı kotunda yer alan formasyonun volkanik sokulumlarla kesildiği belirlenmiştir. Araştırma sondajlarında geçilen kireçtaşı seviyelerine ait veriler aşağıda sıralanmıştır.
Karot Yüzdesi (TCR) : % 65 ≤ TCR ≤ % 100
Kaya Kalitesi (RQD) : % 55 ≤ RQD ≤ % 90
Pressiyometre limit basıncı (Pln) : 42.60 kg/cm^2 ≤ Pln ≤ 52.20 kg/cm^2
Pressiyometre modülü (Ep) : 6 217 kg/cm^2 ≤ Ep ≤ 65 655 kg/cm^2
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (qu) : 36.50 MPa ≤ qu ≤ 63.00 MPa
Birim Hacim Ağırlık (γn) : 2.60 gr/cm^3 ≤ γn ≤ 2.77 gr/cm^3
Elastisite Modülü (E) : 9.70 GPa ≤ E ≤ 28.80 GPa

Sultanbeyli, Kurtköy, Orhanlı, Kurnaköy köyleri arasında ve Kılıçlı – Riva (Çayağzı) dolaylarında geniş alanlar kaplayan kum, çakıl birikintileri için Özgül ve Diğ. (2005) Ömerli Formasyonu kapsamında "Sultanbeyli Üyesi" adını kullanmıştır. İBB – DEZİM tarafından, Anadolu yakasında gerçekleştirilen Mikrobölgeleme Projesi çalışmalarında, il alanının Sultanbeyli dolayını da içine alan güneydoğu kesiminde geniş alan kaplayan Geç Neojen birikintilerinin ortam özellikleri ve taban topoğrafyasının ortaya çıkarılmasını amaçlayan ayrıntılı jeolojik harita alımı, yaş tayinleri ve çok sayıda sondaj yapılmış, bu çalışmalardan sağlanan veriler, istifin formasyon aşamasında tanımlanmasını gerektirmiştir (Özgül ve diğ., 2005). Güzergah üzerinde yapılan araştırma sondajlarında kesilen çoğunlukla ayrık kayaç niteliği taşıyan bu birimin belirlenen özellikleri aşağıdaki gibidir.

SPT (N) : 14 ≤ SPT (N) ≤ 34
Su içeriği (Wn) : % 15 ≤ Wn ≤ % 30
Likit limit (LL) : % 30 ≤ LL ≤ % 60
Plastisite İndeksi (PI) : % 11 ≤ PI ≤ % 27
4 nolu elek üstünde kalan (+4) : % 0 ≤ +4 ≤ % 32
200 nolu elekten geçen (–200) : % 34 ≤ –200 ≤ % 83
Zemin sınıfı (USCS) : CL, SC, GM, SM, CH
Pressiyometre limit basıncı (Pln) : 11.80 kg/cm^2 ≤ Pln ≤ 33.00 kg/cm^2
Pressiyometre modülü (Ep) : 144 kg/cm^2 ≤ Ep ≤ 874 kg/cm^2

3. SORUNLU KESİMLER İÇİN YAPILAN UYGULAMA DEĞİŞİKLİKLERİ

Metro hattının kesin projesinde, uygulama aşamasında ortaya çıkan sorunların giderilmesine yönelik çözüm seçenekleri irdelenmiş ve üç ayrı lokasyon için önerilen ve uygulanan değişiklikler aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

3.1. Ytong Fabrikası Geçişi (km 0+300-km 0+600)

Projelendirme aşamasında açılan araştırma sondajlarına ilaveten fabrikaya ait arazi içerisinde iki adet (SGB-58A ve SGB-59A) sondaj daha açılmış, sondajlardan elde edilen verilere göre geçilecek ortam tünel mühendisliği açısından sınıflandırılmıştır. Sondajlarda sert ve yer yer masif yapıya sahip Gözdağ ve Dolayoba formasyonlarına ait kumtaşı ve kireçtaşı litolojileri geçilmiştir. Araştırma sondajları ile eşgüdümlü kuyu içi pressiometre ve basınçlı su deneyleri kademeli olarak yürütülmüştür.

Dolayoba Formasyonu genel olarak; gri – bej renkli, orta sert – sert, orta dayanımlı – dayanımlı kireçtaşından oluşur. Metro hattının km 2+682 de birim içerisinde karşılaşılan büyük karst boşluklarını dolduran gevşek ve suya doygun kırıntılı malzeme açım sırasında aşırı sökülme, su geliri ve çamur akmalarına neden olmuştur. Gözdağ Formasyonu feldispatlı ve kuvars kumtaşından oluşur. Formasyonun taze rengi açık gri – krem, ayrışma rengi bejdir. Sert – orta dayanımlı – yer yer zayıf, az – orta derecede ayrışmış, ince taneli ara tabakalar ve yer yer breşik zonlar içerir. Fabrika sahasında tünellerin geçtiği kotlarda bulunan bu iki birimin özellikleri Tablo 1' de özetlenmiştir.

Basınçlı su deneylerinden her iki birimin geçirimli ortam özelliği taşıdığı anlaşılmıştır. Ancak, Ytong arazisi içinde açılan araştırma kuyularında ölçülen yeraltısuyu seviyeleri tünel kotlarıyla karşılaştırılarak, tünellerin yeraltısuyu tablası üzerindeki kotlardan geçtiği belirlenmiştir. RMR kaya sınıflamasına göre yapılan değerlendirmede Dolayoba Kireçtaşının orta-iyi, Gözdağ Formasyonu'na ait kumtaşlarının ise zayıf-orta kaya sınıfına girdiği belirlenmiştir.

Çizelge 1. Ytong Fabrikası'nın bulunduğu alandaki kaya birimlerin jeoteknik özellikleri.

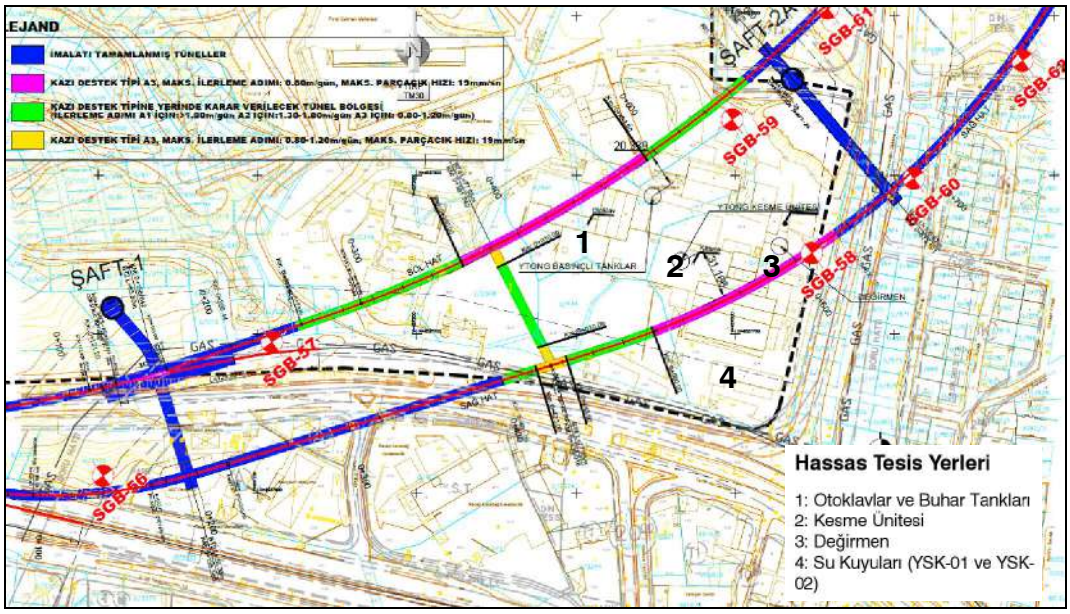
Jeoteknik Özellikler	Dolayoba Formasyonu	Gözdağ Formasyonu
TCR (%):	86–100	77–100
RQD (%):	67–100	0–51
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	26.4–29.0	31.9–66.4?
Basınç Direnci (MPa)	40.2–73.8	24.4–27.2?
Elastisite Modülü (GPa)	14.80–26.40	11.6–22.2
*Limit Basınç (kg/cm^2)	43.20–52.70	42.9–51.9
Pressiometrik Modül (kg/cm^2)	6217–29637	6145–29777

*Bu değer pressiometre deneylerinde uygulanabilen maksimum basınca karşılık gelir.

Ytong arazisi altından geçen metro tünellerinin yüzeyde oluşturacağı deplasmanlar sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş olup, analizde kazı ve sağlamlaştırma aşamaları ile üstyapı yükleri göz önünde bulundurulmuştur. Projelendirmede öngörülen kaya blonları ihmal edilmiş, yalnızca 20 cm kalınlığındaki püskürtme beton uygulaması göz önünde tutularak sayısallaştırılan jeolojik ortamın performansı değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda, fabrika yapılarının temelinde, kazı aşamasında 3 mm'yi aşmayan düşey deplasmanlar hesaplanmıştır (Mahmutoğlu, 2017., Mahmutoğlu ve Kuzu, 2016). Buna rağmen fabrikaya ait kritik tesislerle etkileşimi sınırlandırmak için patlatmalı kazı adımları düşürülmüş, üstyapıların konumlarına göre farklı kazı destek sistemleri öngörülmüştür (Çizelge 2, Şekil 3). Her bir kazı destek tipleri göz önünde tutularak, gecikmeli patlatmalar için patlatma deliği paternleri oluşturulmuş, her bir patern için deliklere yerleştirilecek patlayıcı şarjı hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Ytong Fabrikası altından geçişte uygulanan kazı destek sınıfları.

	A1	A2	A3	
Ara Mesafe	2.00 m	1.30 – 1.80	0.80 – 1.20	max. 0.80
İksa Tipi	-	115 Kafes	115 Kafes	115 Kafes
Çelik Hasır	2 x Q188/188	2 x Q188/188	2x Q221/221	2x Q221/221
Püskürtme Beton	15 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Süren Tipi	-	1.25"-1.5" 3-4 m 23 adet, ϕ26 L:4 m enjeksiyonlu	1.25"-1.5" 3-4 m 23 adet, ϕ26 L:4 m enjeksiyonlu	1.5" L:3.00 m 23 adet, ϕ26 L:4 m enjeksiyonlu
Bulon Tipi	L: 3.00 m 4-5 adet şaşırtmalı	L:3-4 m 7-8 adet şaşırtmalı	L:3-4 m 8-9 adet şaşırtmalı	L:4.00 m 8-9 adet şaşırtmalı



Şekil 3. Ytong arazisinden geçiş için uygulanan kazı-destek tipleri planı ve hassas tesislerin yerleri.

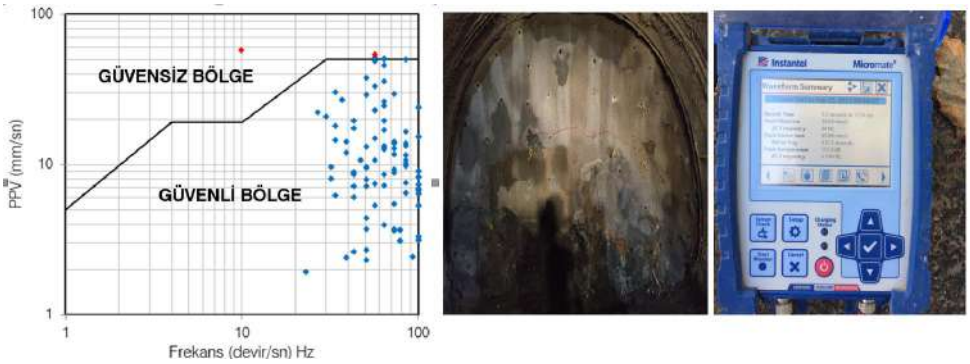
Fabrikaya ait hassas tesisler göz önünde tutularak, hattın bu kesimi için özel bir patlatma paterninin tasarımı ve her bir patlatma başına toplam ve gecikme başına patlayıcı madde miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen miktarlardan hareketle, A1, A2 ve A3 kazı destek sistemi uygulanacak kesimler için ayrı ayrı patlatma deliği sayısı, delikler arası mesafe ve delik başına patlayıcı şarjları belirlenmiştir. Patlatma tasarımında, patlatmalar sonucu oluşacak maksimum parçacık hızının (PPV) Rosenthal ve Morlock, 1987) Çevre ve Orman Bakanlığı Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nde belirtilen hızın üst sınırını (19 mm/sn) geçmemesi öngörülmüştür. Ayrıca A2 v3 A3 kazı destek sisteminin uygulanacağı kesimlerde ayna etrafında ferahlama sağlayacak içi boş deliklerin açılması öngörülmüş ve uygulanmıştır. Her patlatma, biri tünel aynasının üzeri, diğerleri kritik tesislerin bulunduğu noktalara yerleştirilen dört adet sismik algılayıcıyla ölçülerek, atımlar denetlenmiştir (Sarıdede ve Diğ., 2018).

Patlatma paterni tasarımında kullanılmak üzere, bölgede daha önce yapılan patlatmalar, ölçüm noktalarının patlatma yapılan ayna ile arasındaki uzaklıklar ve gecikme başına kullanılan patlayıcı miktarları ilişkilendirilmiştir. Fabrika sahasından kontrollü geçiş için bu veriler parçacık hızı19 mm/sn'yi aşmayacak şekilde titreşim yayılım eşitliğinin elde edilmesinde kullanılmıştır (Kahriman, 2009, Kahriman ve Diğ., 2017).

$$PPV = k.SD^{-\beta} \quad (1)$$

$$PPV = 15256 x SD^{-2,494} \quad (2)$$

Eşitlikte verilen SD ölçekli mesafe, k ve β değerleri ise bölgedeki patlatmalara göre elde edilen arazi katsayılardır. Sonuçta, elde edilen eşitlik yardımıyla Ytong arazisinde delme-patlatmayla yapılacak tünel kazılarında, parçacık hızının 19 mm/sn'yi geçmemesi için farklı mesafelerde yapılacak patlatmalarda kullanılacak patlayıcı madde miktarları hesaplanmış ve kontrollü geçiş için uygulanmıştır. A1, A2 ve A3 kazı destekleme sistemiyle geçilecek kesimler için tasarlanan delikler, ara mesafeleri, patlatılma sıraları ve ayna etrafında ferahlama sağlayacak delikler tasarlanmıştır. Atımlar sırasında yapılan sismik izleme ölçümlerinden elde edilen parçacık hızı ve frekanslar Şekil 4 deki grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu şekilde koyu çizgi ile gösterilen sınırın altı güvenli bölgeyi göstermektedir. Bu sınıra yakın değerlerin çoğu kritik tesislerden uzak noktadaki patlatma yapılan ayna üzerinde ölçülen değerlere karşılık gelir. Buradan da görüldüğü 2 atım dışında oluşan titreşimler ilgili yönetmeliklerde ön görülen sınır değerin altındadır. Parçacık hızının beklenenden yüksek ölçüldüğü bu noktalardaki jeolojik yapının (anizotropinin) etkili olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4. Ytong Fabrikası altında tünel aynasında yapılan atımları sırasında sismik izleme kayıtlarına ait titreşim değerleri, patlatma delikleri ve sarsıntı ölçümünde kullanılan alet.

3.2. Eski Taşocağı Geçişi (km 0+850-km 0+980)

Tasarımcı tünel tavan kotu ile taşocağı taban kotu arasındaki farkın 20 m den az olduğu bölgede (Sağ hat km 0+850-km 0+980 arası) anahat tüneli kazısının önünde pilot tünel projelendirmiştir. Pilot Tünel uygulaması aşağıda sıralanan gerekçelere dayandırılmıştır.

- Eski taşocağı alanında açılan sondajlarda kesilen anakaya kotları ile ocağa ait 1994 tarihli halihazır haritada gösterilen kotlar arasındaki uyumsuzluk, tünel üzerindeki anakaya örtü kalınlığının 2D'den küçük olması.
- Geçirimli dolgudan kazı alanına doğru gelebilecek yeraltısularının, tünel kesit ve ayna stabilitesi üzerinde yaratacağı olumsuz etkiler,
- Sağ Hat km 0+850 - km 0+980 arasında, tünel üzerinde eski taşocağı alanı içerisinde yer alan ve kalınlığı 25 metreye ulaşan kontrolsüz yapay dolgunun tünel tavan bölgesinde oluşturacağı yük.

Pilot Tünel yardımıyla yapılacak kimyasal enjeksiyonunun amacı, sonradan açılacak anahat tüneline su girişini en az seviyeye indirmek, tavan kayacının süreksizliklerini tıkamak, kaya kütlesinin davranış ve dayanım koşullarını sağlam (intact) kaya malzemesi niteliğine yaklaştırmak olarak savunulmuştur.

Pilot tünel uygulaması öngörülen kesimi (Sağ Hat km 0+850 - km 0+980) içine alan ve tünel güzergahı üzerinde veya yakınındaki yeraltı koşullarını ortaya çıkarmak amacıyla 7 adet araştırma sondajı açılmıştır. Eski taşocağı haritasında gösterilen kotları kontrol etmek amacıyla, km 0+960 de ilave bir araştırma sondajı daha açılmıştır.

Çizelge 3'de pilot tünel uygulaması öngörülen kesimde, tünel tavan kotları (T_{TK}), sondajlarda karşılaşılan anakaya kotları (S_{HA}) ve sondajların yapıldığı koordinatlara yakın noktalar için Şekil 6'da verilen 1994 tarihli ocak haritasında gösterilen kotlar (O_{HA}) karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu çizelgenin son iki sütununda ise sondajlarda kesilen anakaya kotları ile 1994 tarihli haritada belirtilen kotlar arasındaki fark (S_{HA}-O_{HA}) ve ortalama anakaya örtüsü kalınlığının tünel çapına oranı (Ha/D, D=6.80 m) gösterilmiştir. Tünel üzerindeki ortalama anakaya kalınlığı (Ha) Eşitlik 3 ile belirlenmiştir.

$$Ha = \frac{S_{HA} + O_{HA}}{2} - T_{TK} \qquad (3)$$

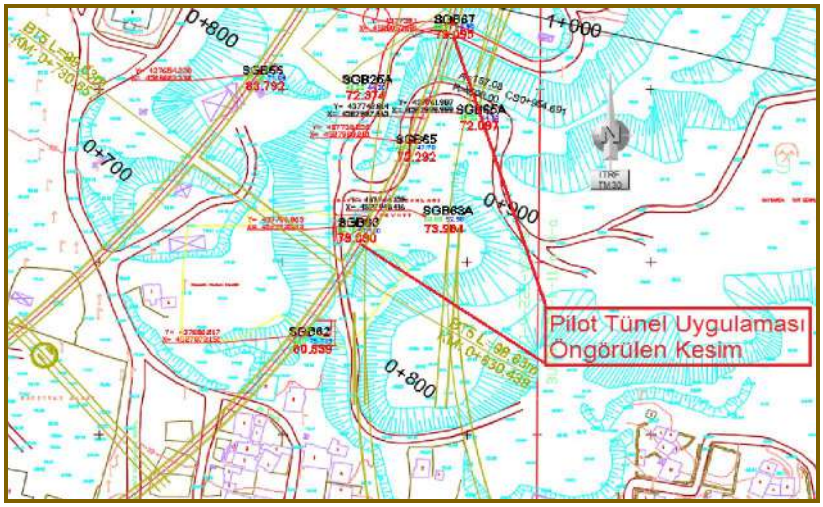
Çizelgede 3'de, SGB-65A ve SGB-67 sondajları için S_{HA} ve O_{HA} kotları arasında 3-4 m ye varan farkın olduğu görülmektedir. Bu iki sondaj eski taşocağı şevlerine yakın noktalardadır. Ancak anılan sondajların arasında (km 0+960) daha sonra ilave olarak açılan SGB-67A sondajında bu kotlar arasında önemli fark saptanamamıştır. Diğer bir ifade ile SGB-65A ve SGB-67 için bu iki kot arasında karşılaşılan uyumsuzluk SGB-67A sondajıyla kontrol edilmiş, bu sondajda kesilen ve 1994 halihazır haritasından okunan anakaya kotları arasında önemli bir fark görülememiştir.

Çizelge 3. Pilot Tünel uygulaması öngörülen kesimde sondajlarla belirlenen ve ocak haritasında gösterilen anakaya kotlarının karşılaştırılması

Sondaj No	km	Arazi Kotu (m)	Anakaya Kotu (m)		S_{HA}-O_{HA} (m)	T_{TK} (m)	Ha (m)	Ha/D
			S_{HA}	O_{HA}				
SGB-60	0+700.00	70.05	70.05	70.05	0.00	37.05	40.00	5.88
SGB-62	0+789.32	80.84	75.74	74.50	+1.24	37.06	38.06	5.59
SGB-63	0+857.45	79.34	57.44	59.10	-1.66	36.73	21.54	3.16
SGB-63A	0+878.77	73.98	52.98	54.89	-1.91	36.62	17.31	2.55
SGB-65	0+910.77	73.08	47.88	49.28	-1.40	36.42	12.16	1.79
SGB-25A[#1]	0+940.00	72.37	48.88	48.14	+0.74	36.66	11.85	1.74
SGB-65A[#2]	0+942.02	72.29	44.29	48.50	-4.21	36.61	9.78 (12.4)*	1.44 (1.82)*
SGB-67A	0+960.00	75.06	55.46	55.00	+0.46	36.40	18.83	2.77
SGB-67	0+992.57	79.09	59.69	63.56	-3.87	36.34	25.28	3.72
SGB-70	1+041.99	84.77	79.37	79.02	+0.35	36.16	43.03	6.33

[#1]: Müşavir tarafından denetlenmemiştir.
[#2]: Sağ hat tünel ekseninin 20 m sağında açılmıştır.
*: km 0+942 için halihazır haritada belirtilen kotlardan hareketle belirlenen anakaya et kalınlığı.

Çizelge 3'de verilen sondajların konum ve koordinatları, ağız kotları, sondajlarda kesilen anakaya kotları, ocak haritasında gösterilen ve sondaj yerlerine en yakın olan kotlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu haritada mevcut arazi kotları kırmızı, sondajlarda kesilen anakaya kotları mavi, 1994 tarihli haritadan okunan kotlar yeşil renklerle belirtilmiştir. 1994 yılı ocak haritası ile sondaj verileri karşılaştırıldığında, sondajlarda karşılaşılan anakaya kotlarının genel anlamda tutarlı olduğu belirlenmiştir. Bu karşılaştırmadan elde edilen değerler dikkate alındığında, Ha/D oranının en düşük olduğu SGB-65A numaralı sondajın eski taşocağının 2. basamağında ve sağ hat tünel ekseninin 20 m sağında açıldığı görülmektedir. Öte yandan, 1994 tarihli haritadan tünelin geçtiği kesimde eski ocağa ait basamak kotunun yaklaşık 49 ila 50 m arasında olduğu anlaşılmaktadır. Bu kot dikkate alındığında km 0+942 de, SGB-65A sondajında karşılaşılan 9.78 m'lik anakaya örtü kalınlığından daha fazla bir örtü kalınlığının (12.4 m) olduğu görülür. Bu durumda, tünelin anılan kilometresinde Ha/D oranının 1,82 olacağı anlaşılır.



Şekil 6. Eski taşocağı geçişi bölgesinde pilot tünel uygulaması öngörülen kesim ve ocak haritasında gösterilen kotlar ile araştırma sondajlarında anakaya kesilen derinliklerin karşılaştırılması.

Sağ hatta, tünel tavan kotu üzerinde, anakaya et kalınlığının en düşük olduğu ikinci nokta SGB-25A nolu sondajın (km 0+940) bulunduğu noktadır. Bu sondajın jeolojik-jeoteknik araştırmadan daha önce yapıldığı, projeci, yüklenici ve müşavir tarafından tam olarak denetlenmediği belirlenmiştir. Dolayısıyla değerlendirmede bu sondaj dikkate alınmamıştır**.** Sonuçta, sağ hat üzerinde, Ha/D oranının 2 den düşük olduğu kesimin km 0+920-km 0+952 arasındaki kaldığı ve yaklaşık 32 m lik tünel uzunluğuna karşılık geldiği saptanmıştır. Bu kısımda, tünelin açılacağı ortamın sert ve sağlam

kaya olması nedeniyle, tünel açımı sırasında, normal koşullarda herhangi bir kemerlenme sorununun olmayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Tünelin açılacağı ortamın geçirimliliğini belirlemek için, araştırma sondajlarında tünelin açılacağı kotlar dikkate alınarak sistematik basınçlı su deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, tünel üzerinde anakayayı örten yapay dolgunun permeabilitesi bilinmediğinden, sonradan kontrol amaçlı açılan SGB-67A sondajının değişik seviyelerinde sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Basınçlı su deneylerine ait föylerde belirtilen yeraltısuyu derinliklerinde birbirini izleyen iki günde ölçülen değerlerde önemli farklılıkların olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, 2016 tarihindeki, tüm sondajlarda yeraltısuyu derinliği tekrar ölçülmüştür. Çizelge 4'de son olarak ölçülen yeraltısıyu derinlikleri (YSD), yeraltısu kotları (YSK), ray üstü kotları ($Z_{RÜ}$) ve ray kotu üzerindeki piezometrik basınçlar ($P_{ZÜ}$) gösterilmiştir. Çizelge 4'de, sağ hat yakınında açılan sondajlar koyu, YTONG Sahasında açılan sondajlar ise italik karakterlerle belirtilmiştir. YTONG' a ait derin su kuyuları (YSK-01 ve YSK-02) sürekli çalışır durumda olduklarından bu kuyularda statik su düzeyi ölçülememiştir. Ancak, fabrika yetkililerinden kuyularla ilgili teknik bilgiler edinilmiş, pompa derinliklerinin sırasıyla YSK-01 de 100 m, YSK-02 de ise 150 m olduğu belirlenmiştir. Sağ hat km 0+850-km 0+980 arasında açılan sondajlarda yapılan basınçlı su deneyi sonuçları Çizelge 5'de topluca verilmiştir. Çizelgede, deney yapılan kademedeki litolojik birimler, RQD ve TCR değerleri ayrıca belirtilmiştir. Bu deneylerden elde edilen Lugeon değerleri, Fell ve Diğ. (2005) tarafından önerilen ($L=1,3.10^{-7}$ m/s) bağıntıyla hidrolik iletkenlik değerlerine dönüştürülmüş ve aynı çizelgede verilmiştir. Buradan görülebileceği gibi yalnızca SGB-65A sondajının deney yapılan her kademesinde kayanın geçirimli özellik taşıdığı belirlenmiştir. Diğer sondajlarda, geçirimli, az geçirimli ve geçirimsiz olarak tanımlanan deney kademeleri ile karşılaşılmıştır.

Çizelge 4. Araştırma sondajlarında ölçülen yeraltısuyu derinlikleri (YSD), kotları (YSK) ile ray kotu üzerindeki piezometrik basınçlar ($P_{RÜ}$).

Sondaj No	km	Derinlik	Koordinatlar (TM30-ITRF96)			YSD	YSK	$Z_{RÜ}$	$P_{RÜ}$
		m	x	y	z	m	m	m	kg/cm²
SGB-24*	-	50	4 527 856.00	437 927.00	66.95	8.80	58.15	-	-
SGB-25*	-	50	4 528 087.00	437 985.00	73.00	22.10	50.90	-	-
SGB-56	*0+115.00*	*42*	*4 527 611.00*	*437 103.00*	*58.20*	*36.50*	*21.70*	*25.04*	*0.00*
SGB-57	*0+220.00*	*53*	*4 527 703.00*	*437 216.00*	*65.76*	*34.80*	*30.96*	*24.88*	*0.61*
SGB-58A	*0+620.00*	*37*	*4 527 749.00*	*437 548.00*	*56.34*	*5.30*	*51.04*	*32.97*	*1.81*
SGB-59A	*0+700.00*	*57*	*4 527 837.00*	*437 498.00*	*70.34*	*13.15*	*57.19*	*27.83*	*2.94*
SGB-60	0+689.06	48	4 527 798.00	437 612.00	70.05	11.45	58.06	32.55	2.60
SGB-61	0+620.00	62	4 527 905.00	437 558.00	77.30	15.10	62.20	32.44	2.97
SGB-62	**0+789.32**	**58**	**4 527 872.15**	**437 680.21**	**80.84**	**21.20**	**59.64**	**32.02**	**2.76**
SGB-63	**0+857.45**	**57**	**4 527 935.33**	**437 706.86**	**79.34**	**19.75**	**59.59**	**31.81**	**2.78**
SGB-63A[#1]	**0+878.77**	**55**	**4 527 943.00**	**437 741.00**	**73.98**	**14.70**	**59.28**	**31.58**	**2.77**
SGB-65	**0+910.77**	**52**	**4 527 981.00**	**437 736.00**	**73.08**	**12.40**	**60.68**	**31.49**	**2.91**
SGB-65A[#2]	**0+942.02**	**54**	**4 528 005.00**	**437 763.00**	**72.29**	**12.00**	**60.29**	**31.30**	**2.90**
SGB-25A	**0+940.00**	**31**	**4 527 998.00**	**437 742.00**	**72.37**	**12.35**	**60.02**	**31.31**	**2.87**
SGB-66	0+800.00	60	4 528 023.34	437 654.23	83.79	23.65	60.14	31.38	2.88
SGB-67A	**0+960.00**	**54**	**4 528 025.00**	**437 748.00**	**75.06**	**14.60**	**60.46**	**31.07**	**2.94**
SGB-67	**0+980.00**	**58**	**4 528 059.00**	**437 761.00**	**79.09**	**18.30**	**60.79**	**31.17**	**2.96**
SGB-68	0+850.00	70	4 528 085.11	437 674.12	93.31	23.50	69.81	30.96	3.88
SGB-70	**1+025.00**	**64**	**4 528 104.00**	**437 786.00**	**84.77**	**18.00**	**66.77**	**30.83**	**3.59**
SGB-71	1+015.00	71	4 528 216.00	437 766.00	96.25	5.95	90.30	30.12	?
YSK-01	*0+550.00*	*110*	*4 527 677.00*	*437 527.00*	*51.13*	*100[£]*	-	*33.47*	-
YSK-02	*0+515.00*	*174*	*4 527 687.00*	*437 476.00*	*51.06*	*150[£]*	-	*33.28*	-

*: Güzergah dışında kalmaktadır.

[#1] : Sağ hat tünel eksenine yaklaşık 25 m uzaklıktadır.

[#2] : Sağ hat tünel eksenine yaklaşık 20 m uzaklıktadır.

[£] : Ytong kuyularında pompa yerleştirilen derinlikler.

Tünele su gelirinin maksimum hangi düzeyde olabileceğini ortaya çıkarmak amacıyla, basınçlı su deneylerinde en yüksek geçirimlilik değerlerinin elde edildiği SGB-65A sondajı dikkate alınmıştır. Bu sondajın 5 ayrı kademesi için elde edilen geçirimlilik değerlerinin ortalaması $1.87\ 10^{-6}$ m/s dir. En kritik duruma karşılık gelen bu değer dikkate alınarak Heuer (1995) ve Raymer (2001) tarafından modifiye edilen Goodman ve Diğ. (1965) eşitliğine göre, dengeli durumda birim tünel boyu için su geliri;

$$qs - \frac{2\pi k(z+h1)}{\ln(\frac{2z}{r})} x \frac{1}{8} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada; qs dengeli rejimde birim tünel boyundan gelebilecek su miktarı (m^3/s), k kaya kütlesinin eşdeğer hidrolik iletkenliği (m/s), z tünel merkezi çizgisi üzerindeki anakaya örtüsü kalınlığı (m), h_1 anakaya düzeyi üzerindeki su seviyesi yüksekliği (m), r tünel yarıçapıdır.

Bu hesaplama sonucunda, Sabiha Gökçen Metro Bağlantısı, Sağ hat km 0+850-km 0+980 arasında tünele başedilemeyecek miktarda su gelirinin olmayacağı belirlenmiştir. Birim uzunluktaki tünele gelebilecek su miktarının $19{,}2.10^{-6}$ m^3/s (1.15 lt/dak.) olduğu belirlenmiştir. Sonuçta, sağ hat tüneli üzerinde, su seviyesinin altındaki dolgunun tamamen sudan oluştuğu varsayılarak yapılan hesaplama sonucunda; tünele km 0+850-km 0+980 arasında tünel açımını ve stabilitesini etkileyebilecek önemli bir su gelirinin olmayacağı görülmüştür.

Çizelge 5. Taşocağı Bölgesinde sağ hat tüneli üzerinde yapılan basınçlı su deneylerinin sonuçları ve deney yapılan kotlardaki kayaç özellikleri (Yüksel Proje, 2015).

Sondaj No	Deney Kademesi (m)	Lugeon (l/m/dak)	TCR (%)	RQD (%)	Litoloji	Permeabilite (m/s) Fell ve Diğ, 2005	Sınıfı
SGB-62	38.50-41.00	17.34	100	60-75	Kireçtaşı	$2.25\ 10^{-6}$	Geçirimli
	42.00-45.00	6.06	100	37-47	Diyabaz	$7.89\ 10^{-7}$	Geçirimli
	46.00-49.00	3.16	100	60-80	Kireçtaşı+Diyabaz	$4.1\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
SGB-63	36.00-39.00	1.68	100	7-53	Kuvars kumtaşı	$2.1\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
	42.00-45.00	0.77	100	15-47	Kuvars kumtaşı	$1.0\ 10^{-7}$	Geçirimsiz
	46.00-49.00	0.76	97-100	27-63	Kuvars kumtaşı	$9.8\ 10^{-8}$	Geçirimsiz
SGB-63A	30.00-32.00	1.73	100	0-13	Kuvars kumtaşı	$2.2\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
	32.00-35.00	0.77	80-100	0-36	Kuvars kumtaşı(dağılgan)	$1.0\ 10^{-7}$	Geçirimsiz
	35.00-38.50	1.80	100	6-17	Kuvars kumtaşı	$2.34\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
	39.50-42.00	1.78	78-100	0-70	Kuvars kumtaşı	$2.31\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
	42.00-45.00	1.37	78-100	0-70	Kuvars kumtaşı	$1.78\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
SGB-65	30.50-32.50	2.01	100	23-37	Kumtaşı+Diyabaz	$2.63\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
	34.00-36.00	0.76	100	45-57	Kuvars Kumtaşı	$9.9\ 10^{-8}$	Geçirimsiz
	38.00-40.00	0.74	100	9-20	Kuvars Kumtaşı	$9.6\ 10^{-8}$	Geçirimsiz
SGB-65A#	30.00-32.00	15.48	50-67	0	Kumtaşı (Ocak tabanı)	$2.01\ 10^{-6}$	Geçirimli
	32.00-34.00	22.84	100	14-26	Kumtaşı Sert ve sağlam	$2.96\ 10^{-6}$	Geçirimli
	34.00-38.50	14.05	100	14-50	Kumtaşı Sert ve sağlam	$1.82\ 10^{-6}$	Geçirimli
	38.50-42.00	10.89	100	23-35	Kumtaşı Sert ve sağlam	$1.41\ 10^{-6}$	Geçirimli
	42.00-45.00	8.86	100	82-95	Kuvars Kumtaşı Masif	$1.15\ 10^{-6}$	Geçirimli
SGB-67A	23.00-26.50	1.15	100	11-79	Kuvars Kumtaşı	$1.49\ 10^{-7}$	Az Geçirlimli
	27.50-31.00	15.35	20-100	0-71	Kuvars Kumtaşı	$1.99\ 10^{-6}$	Geçirimli
	32.00-35.00	14.82	100	65-78	Kuvars Kumtaşı	$1.92\ 10^{-6}$	Geçirimli
	38.00-41.50	10.45	100	27-47	Kuvars Kumtaşı	$1.36\ 10^{-6}$	Geçirimli
	44.00-47.50	27.05	100	21-44	Kuvars Kumtaşı	$3.51\ 10^{-6}$	Çok Geçirimli
	50.50-54.00	8.63	100	85-90	Kuvars Kumtaşı	$1.12\ 10^{-6}$	Geçirimli
SGB-67	37.80-41.50	12.35	99	30	Kuvars Kumtaşı	$1.60\ 10^{-6}$	Geçirimli
	41.50-44.50	18.91	100	0	Kuvars Kumtaşı	$2.45\ 10^{-6}$	Geçirimli
	46.80-49.00	1.89	89-91	25-29	Kuvars Kumtaşı	$2.4\ 10^{-7}$	Az Geçirimli
SGB-70	41.50-45.50	0.53	100	57-63	Kuvars Kumtaşı	$6.9\ 10^{-8}$	Geçirimsiz
	45.50-48.00	6.38	100	44	Kumtaşı	$8.29\ 10^{-7}$	Geçirimli
	51.00-54.00	16.91	41-97	13-29	Kumtaşı	$2.19\ 10^{-6}$	Geçirimli

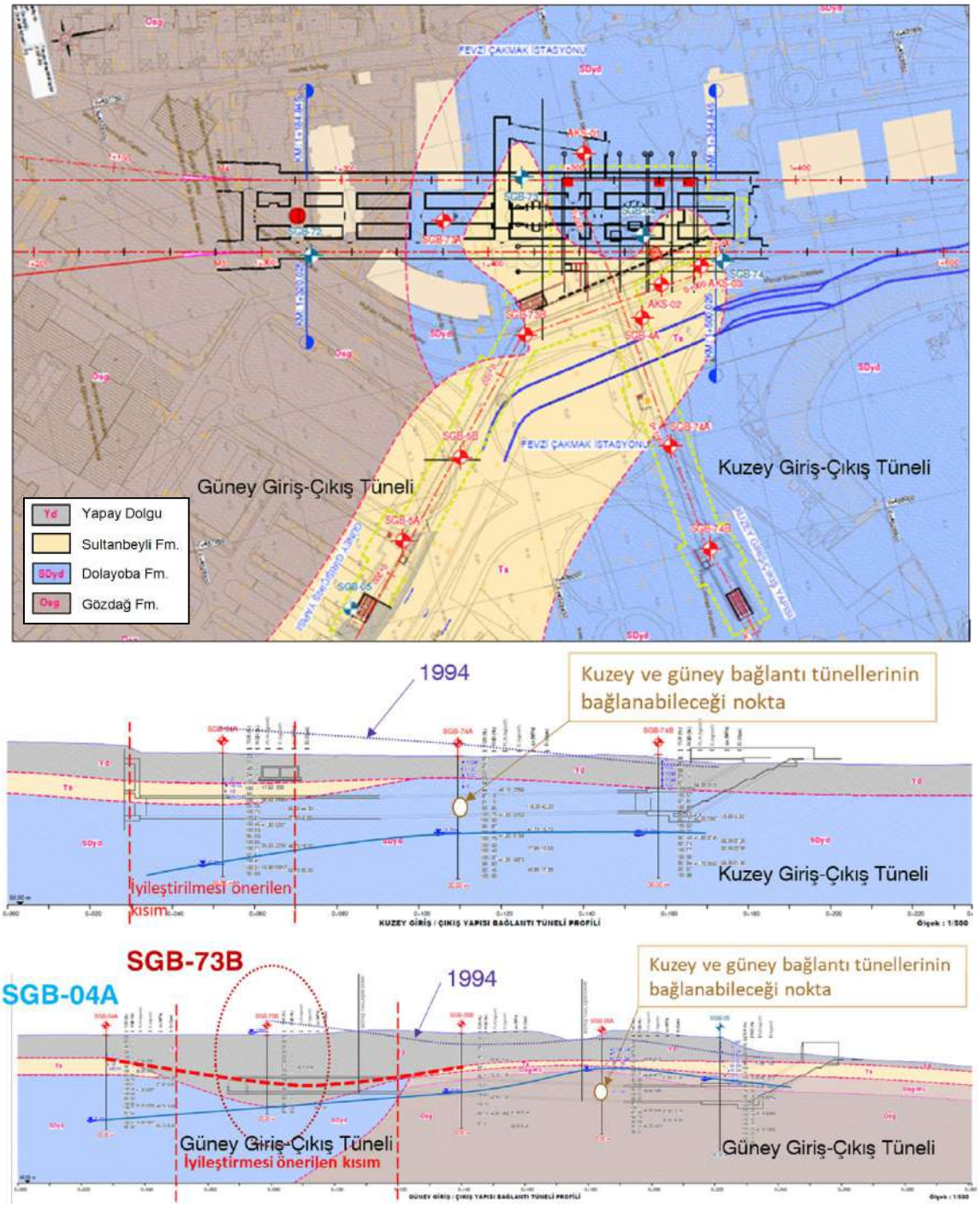
Bölgede geçerli sınır koşulları dikkate alınarak oluşturulan iki boyutlu sayısal model analiz edilerek kritik kesit, projelendirme aşamasında elde edilen kaya ve zemin parametreleri kullanılarak Phase9 (RS2) yazılımı yardımıyla analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda da anahat tünellerinin öngörülen kazı ve destekleme sistemi (A3) kullanılarak NATM yöntemi ile açılması durumunda, yüzeyde ve tünel içinde oluşacak deformasyonların sınırlı kalacağı ve tünelde stabilite sorununun yaşanmayacağı anlaşılmıştır. Ayrıca analiz sonucunda tünel ile tünel üzerindeki anakayayı örten kontrolsüz dolgu arasında etkileşimin olmadığı görülmüştür.

Sonuçta, Sağ Hat km 0+850 - km 0+980 arası için projelendirilen Pilot Tünel uygulaması için ileri sürülen gerekçeler teknik ve ekonomik açıdan anlamlı görülmemiş, tünel kazı adımları düşürülerek ve kazı aynasında birbirini takip eden yoklama delikleri yardımıyla tünelin kontrollü olarak açılabileceği

belirlenmiştir. Bu uygulama ile anılan kesimden sorunsuz geçilmiş ve proje maliyetinde % 3'e varabilecek ilave harcamanın önüne geçilmiştir.

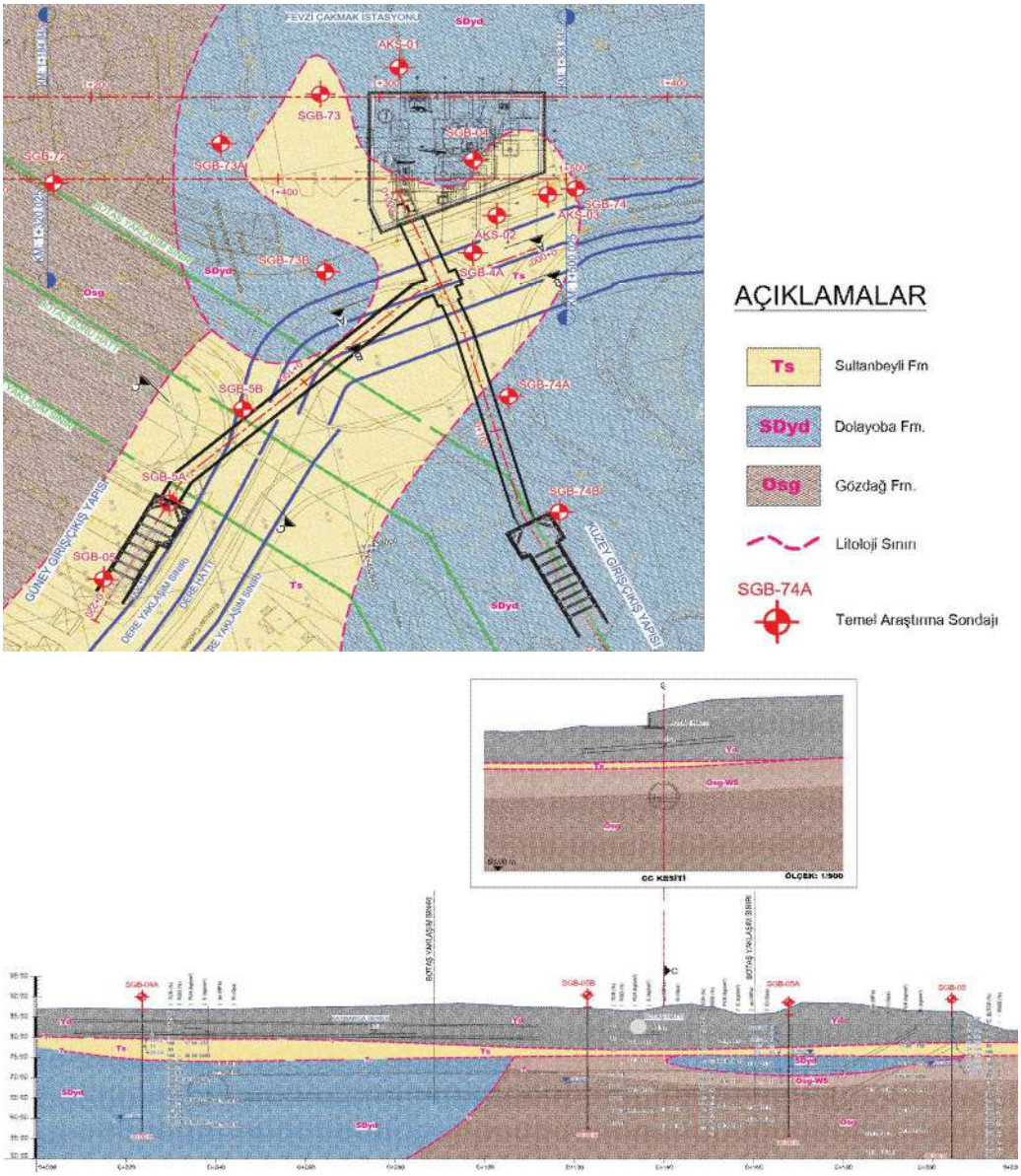
3.3. Fevzi Çakmak İstasyonu Yaya Ulaşım Tünelleri

Fevzi Çakmak İstasyonu ilave araştırma ve değerlendirme çalışmaları sonrasında, istasyon giriş-çıkış yapısı bağlantı tünelleri imalatı öncesinde yapılması öngörülen zemin iyileştirme ve altyapı deplase işleri için yaklaşık proje maliyetinin %2 sine ulaşan maliyet artışı ortaya çıkmıştır. Güney giriş-çıkış yapısı bağlantı tünelinde km 0+050-km 0+120 arasında 70 m'lik kısmı için enjeksiyonla iyileştirme projesi önerilmiştir. Bu kapsamda, idarenin isteği üzerine, Güney ve Kuzey giriş çıkış tünelleri güzergâhında ortaya çıkan durum detaylıca incelenmiş ve çözüm seçenekleri irdelenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Kuzey ve Güney Giriş-Çıkış Tüneller için zemin iyileştirmesi öngörülen kesimler.

Güney bağlantı tünelinin kısmen YAS seviyesi altında, konkors yapısına yakın 165 m'lik kısmının gevşek ve heterojen yapay dolgu içinde kaldığı anlaşılmaktadır. On metreye yakın kalınlıktaki, yapay dolgunun tünel stabilitesinin sağlanması açısından sorunlu olduğu, Kuzey bağlantı tüneli YAS seviyesinin üzerinde ve konkorstan sonraki 40 metrelik kesimin üst yarısının kısmen zayıf dayanımlı Sultanbeyli Formasyonu içinde kalacağı, diğer kısmının ise kaya içerisinde açılacağı anlaşılmıştır. Belirlenen durumda yüklenicinin güney bağlantı tüneli için iyileştirilmesini öngördüğü kesimde enjeksiyon işinin uygulama açısından zor olacağı, beklenen fonksiyonu sağlayıp sağlanmayacağı hususunda belirsizliklerin bulunduğu görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı Güney bağlantı tünelinin 165 metrelik sorunlu kısımdadan vazgeçilerek, hastaneye bağlantı için ikinci bir seçeneğin üzerinde çalışılmasının daha uygun olabileceği önerilmiştir. Bu yönde yürütülen çalışmalar sonucunda giriş çıkış tünellerinin kotları düşürülerek ve konkorstan çıkışın kuzey giriş çıkış hattı üzerinde başlangıçta tek tünel ile, daha sonra güney çıkışının ayrılmasının uygun olacağı önerilmiştir (Şekil 8). Bu öneri dikkate alınarak proje değişikliğine gidilmiş ve proje maliyetinde önemli düzeyde artışa neden olan zemin iyileştirme çalışmasının önüne geçilmiştir.



Şekil 8. Fevzi Çakmak İstasyonu Kuzey ve Güney Giriş-Çıkış Tünelleri'nin güzergah ve kuzey giriş-çıkış tüneli kotunda yapılan proje değişikliği.

4. SONUÇLAR

Sabiha Gökçen Havaalanı Metro Bağlantısı Batı Alternatifi km 0+300 - km 0+600 arasındaki Ytong arazisi altından geçen metro tünellerinin yüzeyde oluşturacağı deplasmanların sınırlı kalacağı belirlenmiştir. Buna rağmen fabrikaya ait kritik tesislerle etkileşimi sınırlandırmak için patlatmalı kazı adımları düşürülmüş, üstyapıların konumlarına göre farklı kazı destek sistemleri öngörülmüştür. Her bir kazı destek tipleri göz önünde tutularak, gecikmeli patlatmalar için patlatma deliği paternleri oluşturulmuş, her patlatma paterni için deliklere yerleştirilecek patlayıcı şarjı hesaplanarak uygulanmış, kritik tesislerin altından kontrollü geçiş sağlanmıştır. Sağ Hat km 0+850-km 980 arasında pilot tünel uygulamasına yönelik gerekçeler detaylı olarak değerlendirilmiştir. Anahat tüneli uygun zemin parametreleri ve sınır koşulları dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, sonuçta; sağ anahat tüneli üzerinde, su seviyesinin altındaki dolgunun tamamen sudan oluştuğu varsayılarak yapılan hesaplama sonucunda; tünele km 0+850-km 0+980 arasında, tünel açımını ve stabilitesini etkileyebilecek önemli bir su gelirinin olmayacağı, NATM yöntemi ile açılması durumunda, yüzeyde ve tünel içinde oluşacak deformasyonların sınırlı kalacağı ve tünelde stabilite sorununun yaşanmayacağı, tünel ile üzerindeki anakayayı örten kontrolsüz dolgu arasında öngörülen etkileşimin olmayacağı, pilot tünel uygulaması için ileri sürülen gerekçelerin teknik ve ekonomik açıdan anlamlı olmadığı, kazı adımları düşürülerek ve kazı aynasında birbirini takip eden yoklama delgileri yardımıyla tünelin açılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, Fevzi Çakmak İstasyonu giriş-çıkış yapısı bağlantı tünellerinin planlandığı hatlar üzerindeki sorunlu kesimler için çözüm seçenekleri üzerinde çalışılmış, tünel güzergahı ve kazı kotlarında yapılan değişiklikle, zayıf zemin koşulları için öngörülen zemin iyileştirmesi uygulamasından vaz geçilmiştir. Sonuç olarak giriş ve çıkış yapıları tünellerinin teknik ve ekonomik açıdan güvenli şekilde tamamlanması sağlanmıştır.

5. KAYNAKLAR

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. (2005) Geotechnical Engineering of Dams. Taylor & Francis. London. UK.

Goodman, R., D. Moye, A. Schalkwyk, and I. Javendel., (1965) Groundwater inflow during tunnel driving, Engineering Geology vol.1 , pp 150-162.

Heuer R (1995) Estimating rock tunnel water inflow. In: Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference 1995, pp 41–60.

Kahriman A., Karadoğan K., Görgün S., Tuncer G., (1999) Otaş Ocaklarında Patlatmadan Kaynaklanan Yer Sarsıntısının Ölçülmesi ve Analizi, 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul.

Kahriman A., (2017) Kaynarca-Sabiha Gökçen Metro Bağlantısı, Sağ Hat (Km:0+850-1+080) Bölgesinde Yapılacak NATM Tünel Kazı İşlerinde Uygulanacak Patlatma Paterni Tasarım Raporu ve Uygulama Planı, (Yayınlanmamış Rapor).

Kaya, O., 1973, The Devovian and Lower Carboniferous stratigraphy of the İstinye, Bostancı and Büyükada subareas In: Paleozoic of İstanbul (ed. O. Kaya). Ege Üniv. Fen Fak. Kitaplar Serisi No:40, 1-36.

Mahmutoğlu Y., (2017) İstanbul Metrosu Sabiha Gökçen Bağlantısı, Ytong Fabrikası (Km 0+300 - Km 0+600) Geçişine İlişkin Kısa Değerlendirme. (Yayınlanmamış Rapor), İstanbul

Mahmutoğlu Y., Kuzu C., (2016) İstanbul Sabiha Gökçen Metro Projesi, Sağ Hat Taş Ocağı (Km 0+850-0+980) ve Ytong Fabrikası (Km 0+300 - Km 0+600) Geçişlerine İlişkin Görüş ve Değerlendirme Raporu, İTÜ.

Önalan, M., 1981, İstanbul Ordovisiyen ve Silüriyen istifinin çökelme ortamları. İ.Ü. Yerbilimleri Derg., c. 2, s. 3–4, 161-177.

Önalan, M., 1982, Pendik bölgesi ile adaların jeolojisi ve sedimenter özellikleri. İ.Ü. Yer Bilimleri Fak. Jeoloji Böl. İstanbul (Doçentlik tezi yayınlanmamış).

Raymer JH (2001) Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: estimating the high-end of the permeability distribution. In: Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference2001, pp 1027–1038.

Rosenthal F. M., Morlock, L. G. (1987) Blasting Guidance Manual, Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, United States Department of the Interior.

Özgül. N., Üner. K., Akmeşe. İ., Bilğin. İ., Kokuz. R., Özcan. İ., Yıldız. Z., Yıldırım. Ü., Akdağ. Ö., Tekin. M., (2005) İstanbul İl Alanının Genel Jeoloji Özellikleri, İBB Yayını, İstanbul.

Sarıdede, M., Türker, A., Aşçı, AF., Mahmutoğlu,Y., Kahriman, A., (2017) Kritik Yapıların Altındaki Patlatmalı Sığ Tünel Kazılarının Tasarımı ve Kontrolü, Yer Mühendisliği, Sayı 10, 26-34.

Yüksel Proje. (2016) SGM-YP-GZ0-000-RP-001-0-0 kodlu, Sağ Hat Km: 2+500 – 7+525 ve Sol Hat Km: 2+500 – 7+438 Kesimi Kesin Proje Jeolojik - Jeoteknik Araştırma Raporu, (Yayınlanmamış), Ankara.

Paleo-Heyelan Malzemesi İçinde Açılan Tünel Portalı İçin Önerilen Mühendislik Önlemleri ve Çözümlemeleri: Bahçe-Nurdağ Tüneli, Türkiye

Proposed Engineering Measures and Analysis of Tunnel Portal Excavated in Paleo-Landslide Deposits: Bahce-Nurdag Tunnel, Türkiye

Y.E. Özyürek [1], A. Can[1], K. Acar[1], C. Gökçeoğlu[2,*]

[1] Progeo Proje, Ankara, Türkiye,
[2] Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye,
*(*cgokce@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Son yıllarda oldukça önem kazanan hızlı tren demiryolu projelerinde en çok karşılaşılan sorunlardan biri olumsuz jeolojik ve jeoteknik koşullar altında tünel kazıları yapılması zorunluluğudur. Bu çalışma kapsamında, bu soruna tipik bir örnek teşkil eden ve yaklaşık 10 km'lik uzunluğuyla Türkiye'nin en uzun demiryolu tüneli olan Bahçe-Nurdağ tünelinin Bahçe portalı incelenmiştir. Proje aşmasında tünel portal konumları seçilirken aktif heyelan alanlarından kaçınılmış, ancak Bahçe portalında paleo-heyelan kütlesinden kaçınılması mümkün olamamıştır. Bu nedenle tünelin ve Bahçe portalının güvenliğini sağlamak için ilave mühendislik önlemleri gerekmiştir. Bu çalışma kapsamında, meydana gelen yenilme mekanizmasının ortaya konulması, güvenli kazı-destek sisteminin aşamalarının sunulması ve tartışılması amaçlanmaktadır. Sonuç olarak, tasarımı gerçekleştirilen ve paleo-heyelan içinde başarılı bir şekilde imalatı tamamlanan tünel portalı, mühendislik vakası olarak sunulmaktadır. Ayrıca bu çalışmada, mühendislik çalışmaları sırasında büyük çaplı duraysızlıkları önlemede, baret kazıklı destek sistemlerinin etkin bir yöntem olduğu sonucuna varılmış ve sonlu elemanlar analiz sonuçları ile yerindeki ölçümler arasında büyük bir uyumluluk elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel Portalı, Şev Stabilitesi, Baret Kazık

ABSTRACT: *One of the most encountered problems in high-speed train railway projects is the necessity of tunnel excavations under adverse geological and geotechnical conditions. Within the scope of this study, the Bahçe Portal of the Bahçe-Nurdağ tunnel, which is a typical example of this problem was examined. Active landslide areas were avoided while selecting tunnel portal locations during the project phase, but it was not possible to avoid the paleo-landslide mass in the Bahçe portal. Therefore, additional engineering measures were required to ensure the safety of the project. It was aimed to reveal the failure mechanism, to present and discuss the stages of the safe excavation-support system. As a result, the support system of the tunnel portal, which was designed and successfully manufactured in paleo-landslide, is presented. In addition, it was concluded that barrette pile support systems are an effective method in preventing large-scale instability.*

Keywords: *Tunnel Portals, Slope Stability, Barette Pile*

1. GİRİŞ

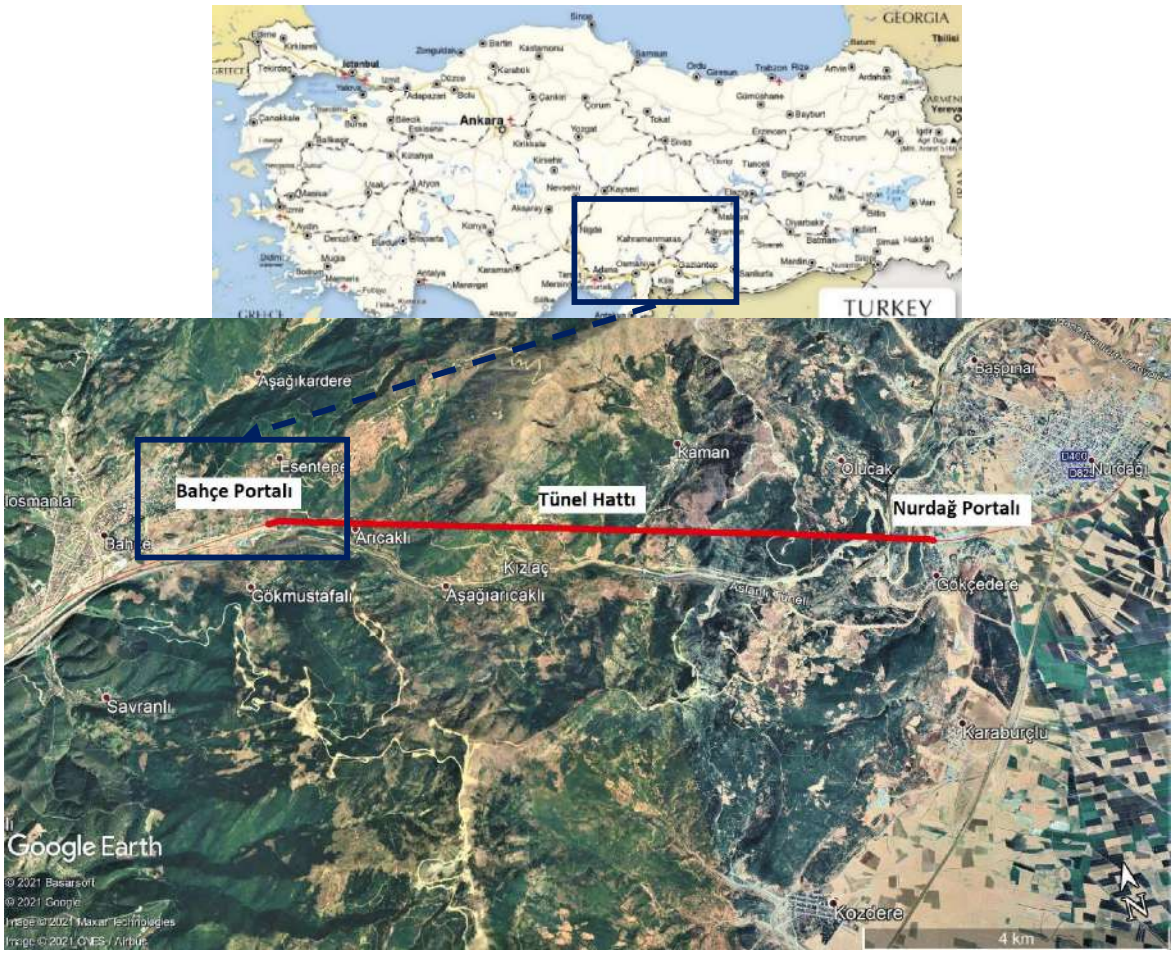
Yüksek hızlı trenlerin güzergâh projelendirilmesinde, kurp yarıçapları, eğim, hız, istasyon yerleri ve diğer çevre yapıları güzergâh geçişlerini sınırlayıcı etkenlerdir. Ulaştırma projelerinde güzergâh alternatifleri oluşturulurken yüksek dolgu ve derin yarmalarla birlikte heyelanlı alanlardan kaçınılması en önemli unsurdur. Tünellerin portal yapılarının oluşturulmasında genellikle yüksek şevler ortaya çıkmaktadır. Tünel giriş – çıkış portallarının stabilitesini koruması, tünel içi kazı çalışmaları ve tren hizmet süresi göz önünde bulundurulduğunda önem arz etmektedir. Özellikle TBM yöntemi ile açılacak olan tünellerin portallarında olabilecek göçükler, kazıcı makinenin işlevini yitirmesine neden olacağı gibi projeye ek maliyetler de getirebilmektedir. Bu kapsamda tünel geçkisi dışında, portalların duraylılığı için gerekli önlenmelerin alınabilmesine yönelik çözümlemelerin özenli ve doğru bir şekilde yapılması önem kazanmaktadır. Tünel kazılarında portal stabilitesinin önemi birçok araştırmacı tarafından vurgulanmaktadır (Kaya, 2016; Rao ve Singh, 2017; Kaya vd., 2017; Tuncay, 2018; Taromi, 2018; Aygar ve Gökçeoğlu, 2020a ve b, 2021; Komu vd., 2020). Halen yapımı devam eden ve yaklaşık 10 km'lik uzunluğu ile Türkiye demiryolu tünelleri arasında en uzunu olan Bahçe-

Nurdağ Tüneli'nin Bahçe yöresindeki giriş portalı, zorunlu olarak Paleo-heyelan alanında oluşturulmuştur. Bundan dolayı tünelin geçkisinde ve özellikle giriş portalında, duraylılığı sağlamak için özel destekleme önlemlerinin alınması gerekmiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin en uzun demiryolu tüneli olacak Bahçe-Nurdağ Tüneli giriş portalında meydana gelen deformasyonlar ve sonrasında deformasyon etkisinin giderilmesi için yeni oluşturulan derin kazı destek sistemine değinilmektedir. Tasarlanan derin kazı destekleme sistemi, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, yapısal elemanlara etkiyen kuvvetler ve sistemde oluşan deformasyonlar belirlenmiştir. Ayrıca inşaat sırasında sahada alınan ölçümlere dayanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin (FEA) güvenilirliği tartışılmıştır.

2. PROJEYE AİT BİLGİLER

Çalışmaya konu olan proje; Osmaniye İli, Bahçe İlçesi, TCDD Bahçe – Nurdağı (Fevzipaşa) Varyantı altyapı işleri kapsamında bulunmaktadır. Bahçe-Nurdağı tüneli 2 tüp olarak TBM yöntemi ile açılacak şekilde tasarlanmıştır. Bahçe-Nurdağı tüneli bulunduğu konum gereği önem arz etmesinin yanı sıra Türkiye'nin en uzun demir yolu tüneli olma özelliğine de sahiptir. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.



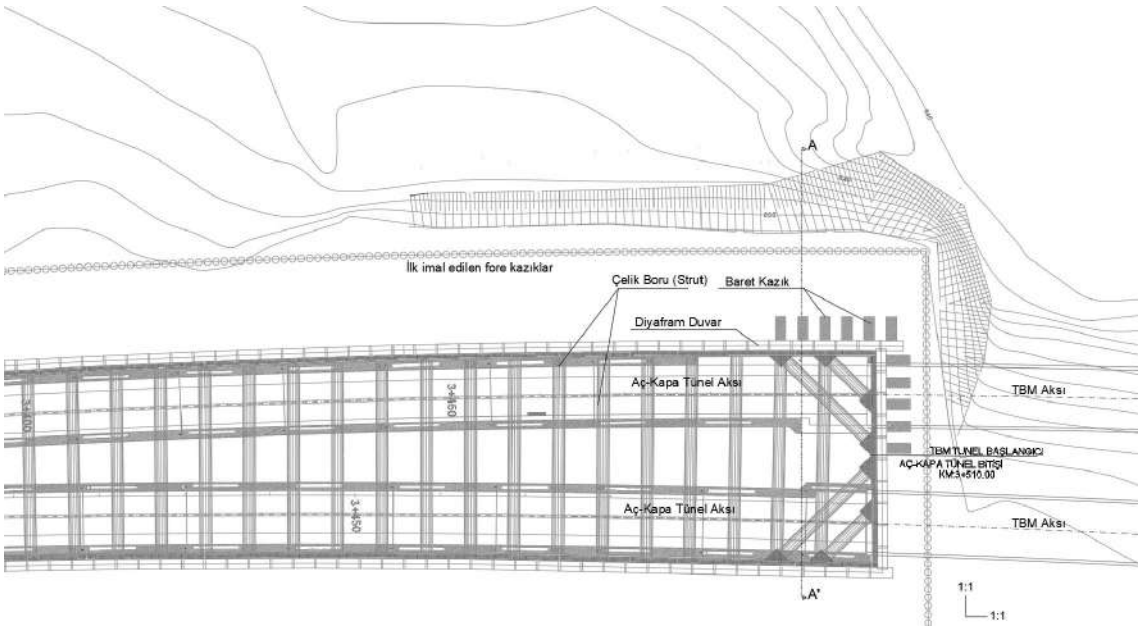
Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

Bahçe kesimindeki aç-kapa tünel ile tünel giriş portalının kesiştiği bölgede yamaç eğimi yaklaşık %93 değeri ile oldukça diktir (Şekil 2(a)). Aç-kapa tünelinin teşkil edilebilmesi için güzergah boyunca derinliği 25 m'ye varan kazıların yapılması gerekmiş ve bu nedenle derin kazı destekleme sistemi olarak, merkezden merkeze 100 cm arayla yerleşecek, değişken boylarda ve 80 cm çapında fore kazıklar imal edilmiştir (Şekil 2(b)). Ankrajlarla desteklenen fore kazıklı iksa sisteminde 2.5 m

aralıklarla kademeli kazı yapılırken, bu sistemin yaklaşık 40 m ötesinde gerilme çatlakları meydana gelmiştir (Şekil 2(c)). Yaklaşık 10 m kazı derinliğine ulaşıldığında, inklinometre okumalarında 46 mm'ye varan deplasmanların tespit edilmesi üzerine iksa sisteminin üzerine etkiyeceği ilave yükleri karşılamayacağı ve portal bölgesinde göçük tehlikesi meydana getirebileceği anlaşılmıştır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uyulacak Esaslar" yönetmeliğine göre herhangi bir kazı kademesi sırasında, iksa sistemindeki yatay deplasmanın konsol sistemler için nihai kazı derinliğinin % 1'ini (yüzde birini), yatay destekli sistemler için ise nihai kazı derinliğinin ‰ 2,5-‰ 5'ini (binde iki buçuğu ile binde beşini) aşması durumunda alınması gerekecek acil önlemler önceden planlanmalıdır. Bu nedenle kazı çalışması durdurularak, sahada ek araştırma ve yeni ölçümler yapılmış, portal bölgesindeki hareketin yağışlardan ve topuk bölgesinin hafifletilmesinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Saha araştırmalarından elde edilen veriler ışığında; yaklaşık 25 m derinlikte yamaç molozu biriminin şist birim üzerinde kayma yüzeyi oluşturduğu tespit edilmiştir. İvedilikle kazı alanları geri dolgu yapılarak hareketin ilerlemesi durdurulmuş ve dolayısıyla diğer yapılara verebileceği olumsuz etkiler engellenmiştir. Heyelanın boyutunu ve özelliklerini araştırmak amacıyla proje sahasında 4 adet yeni sondaj yapılmış ve laboratuvar deneyleri için sondajlardan örnekler alınmıştır. Yapılan sondajlarda yüzeyden itibaren 10-25 m derinliklere kadar yamaç molozu kesildikten sonra ayrışmış şist birimlerine girilmiştir. Aynı sondajlarda yeraltı suyu seviyesi yüzeyden itibaren 11-13 m arasındadır.

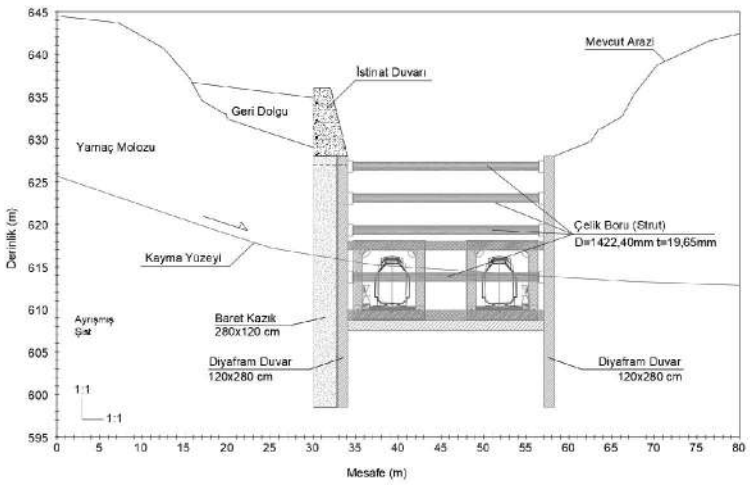
(a) (b) (c)

Şekil 2 (a) Bahçe portalının kuzeydoğu yönünden görünüşü, (b) ilk yapılan fore kazıklı destek sistemi ve aç-kapa tünel inşaatına portal yönünden bakış, (c) tansiyon çatlakları.



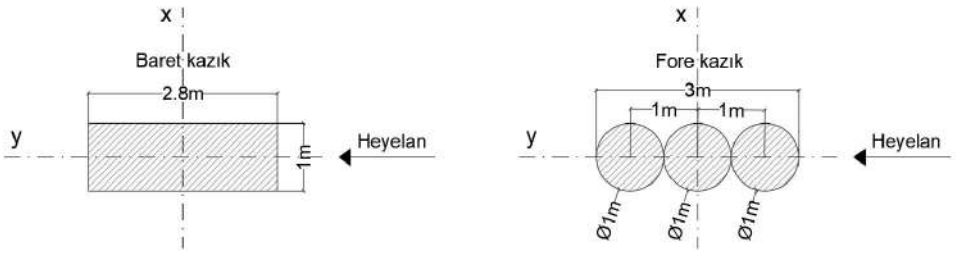
Şekil 3. Aç-Kapa tünel vaziyet planı.

Heyelan hareketi güney yönünde olup aç-kapa tüneli bu kütlenin doğu kenarında yer almaktadır. Heyelan hareketini tamamen durdurmak ve uzun dönemde stabiliteyi sağlamak amacıyla ek destekleme sisteminin tasarlanması gerekmiştir. Elde edilen tüm veriler ve sunulan değerlendirmeler ışığında, tünel ve portal inşaatının güvenliğini sağlamak için 120 x 280 cm ebatlarında ve 30 m uzunluğunda diyafram duvar ve 1400 mm boyutunda çelik boru kullanılarak yeni bir destek sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca bu diyafram duvarı heyelan yüklerine karşı desteklemek amacıyla her diyafram paneli arkasına "T" oluşturacak şekilde yine 120 x 280 cm ebatlarında ve 30 m uzunluğunda baret kazık tasarlanmıştır (Şekil 3 ve 4).



Şekil 4. Aç-Kapa tünel en kesiti

İnklinometre kuyularından ölçülen deplasman değerlerine göre aktif heyelan yüklerine karşı fore kazık çözümünün yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenle fore kazık yerine çok derinlerde dahi merkezden sapma sorunu yaşanmayan ve heyelan gibi duraysız kesimlerde sıklıkla kullanılan diyafram duvar ve baret kazık sistemleri dikkate alınmıştır. Heyelan stabilizasyonu için diyafram duvar ve baret kazık seçimine katkıda bulunan bir diğer faktör, diyafram duvar makinelerinin bu tür karmaşık oluşumlarda yüksek derinliklerde kazmada daha verimli olması gerçeğine dayanmaktadır. Bu makineler, yönlendirilebilir kepçe kafalarını kullanarak sapmalara karşı kendilerini yeniden ayarlayabilir. Ayrıca bu projedeki heyelan malzemesi ve çok ayrışmış şist oluşumu göz önüne alındığında, fore kazık imalatının yüksek derinliklerinde olası sapmalar ve/veya bütünlük sorunları yarattığı gözlenmiştir. Şev stabilite analizinde kayma yüzeyinin derinliğine bağlı olarak, yatay hareketler kazıklar üzerinde büyük bir kesme kuvvetine ve eğilme momentlerine neden olmaktadır. Şekil 5, tek bir baret kazık ve üç fore kazık çalışma prensibinin heyelan kuvvetlerine karşı karşılaştırmasını göstermektedir. Bir baret kazık ve 3 adet fore kazık için atalet momentleri sırasıyla Eşit1ik ve 2'de verilmiştir. Yapılan hesaplar neticesinde baret kazıkların moment kapasitesi, 3 adet fore kazığın moment kapasitesinden daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Baret kazık ve fore kazık çalışma prensibinin karşılaştırılması.

$I_x = (b \times h^3) / 12$ [1]

$I_x = (1 \times 2.83) / 12 = 1.83\ m^4$

$Ix = (\pi \times r4) / 4$ [2]

$Ix = (Ix + A_{dy}^2)_1 + (Ix + A_{dy}^2)_2 + (Ix + A_{dy}^2)_3$

$Ix = 1.72\ m^4$

Sonlu elemanlar analizi için yamaç molozu ve ayrışmış şist birimleri drenajlı koşulda, Pekleşen Zemin Modeli ile modellenmiştir. Analizde kullanılan genelleştirilmiş zemin parametreleri Çizelge 1'de yapısal elemanların malzeme parametreleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Genelleştirilmiş zemin parametreleri

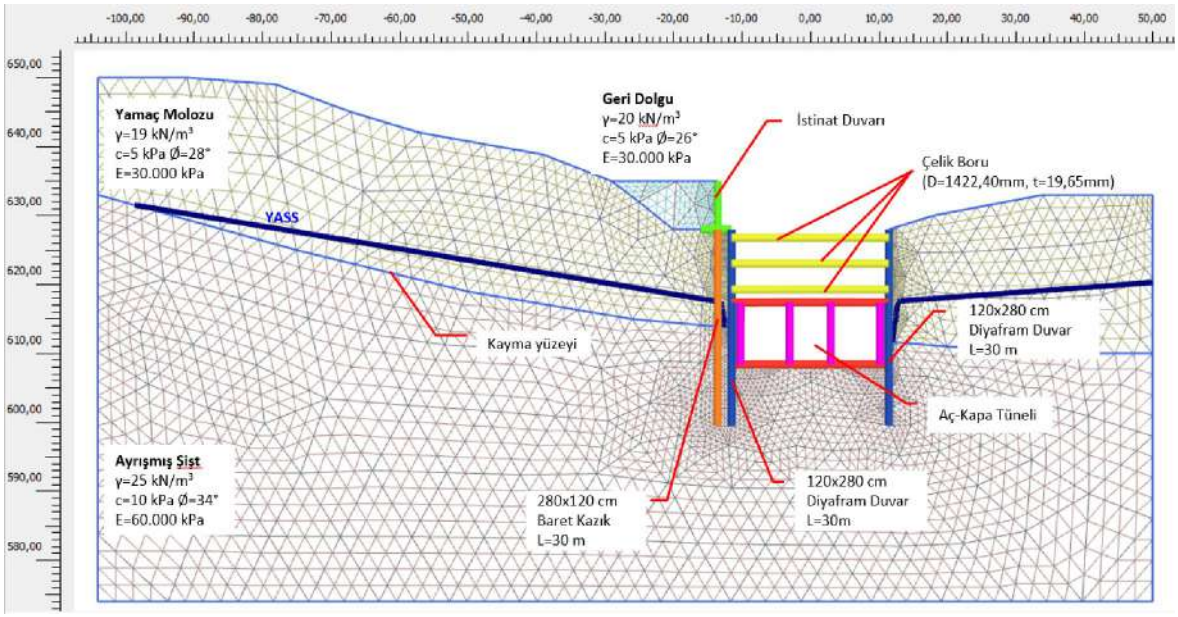
Zemin türü	Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Kohezyon c (kN/m^2)	İçsel sürtünme açısı (φ)	Elastise Modülü E_{50}^{ref} (kN/m^2)	Elastise Modülü E_{50}^{ref} (kN/m^2)	Elastise Modülü E_{50}^{ref} (kN/m^2)	Boşluk oranı (υ)	Permebilite katsayısı (k)
Geri Dolgu	20	5	26	$30x10^3$	$30x10^3$	$90x10^3$	0,20	0,60
Yamaç Molozu	19	5	28	$30x10^3$	$30x10^3$	$90x10^3$	0,20	0,60
Ayrışmış Şist	25	10	34	$60x10^3$	$60x10^3$	$180x10^3$	0,20	0,12

Çizelge 2. Plaxis 2D Yapısal eleman parametreleri

Yapısal eleman	Materyal Tipi	Rijitlik paremetresi EA1 (kN/m)	Rijitlik paremetresi EI (kN m^2/m)	Kalınlık D (m)	Boşluk oranı (υ)
Diyafram Duvar	Elastik	36,00E6	4,320E6	1,20	0,15
Baret Kazık	Elastik	33,60E6	21,95E6	2,80	0,15
Çelik Boru	Elastik	3,497E6	860,3E3	1,72	0,30

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Yenilmiş ortamın tekrar duraylı hale getirilmesi amacıyla aç-kapa tünel kazı destek sistemine ait en kritik kesit (Şekil 4), sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak PLAXIS 2D analiz programı ile modellenmiştir (Şekil 6). Analizlerde ilk yapılan fore kazıklı destek sistemi geçerliliği yitirdiği ve önü tamamen doldurulduğu için tanımlanmamıştır. Tüm imalat aşamaları adım adım modellenerek her aşamanın sisteme olan etkisi hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen sistemin analiz adımları Çizelge 3'te verilmiştir.



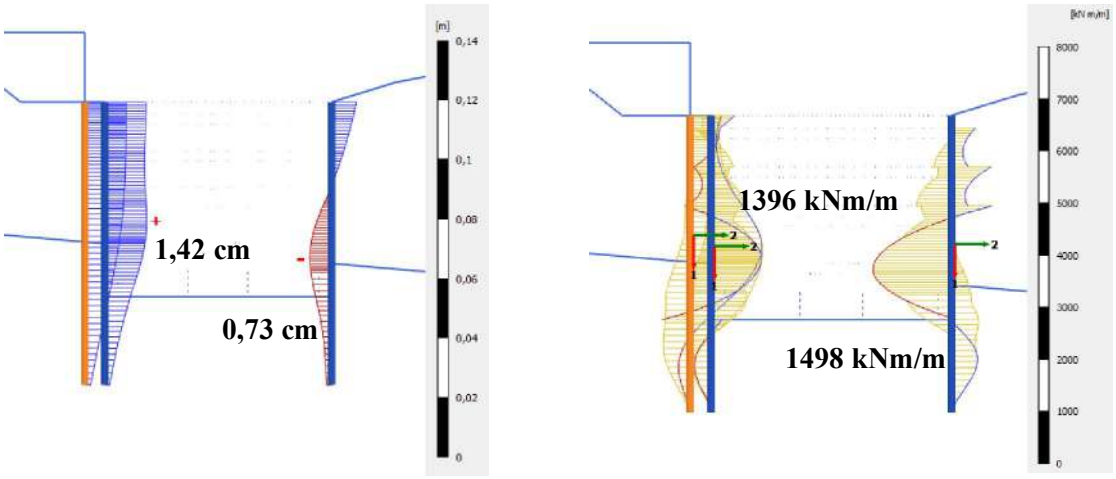
Şekil 6. Plaxis2D sonlu elemanlar analiz modeli.

Çizelge 3. Sonlu elemanlar analiz aşamaları.

Analiz Aşamaları	Tanımlama
1	Mevcut Durum (Kazı çukurunun tamamen geri doldurulduğu durum)
2	Diyafram duvar ve baret kazığın aktif edilmesi
3	Deformasyonların sıfırlanması
4	İlk kazı ve 1. sıra çelik borunun aktif edilmesi
5	İkinci kazı ve 2. sıra çelik borunun aktif edilmesi
6	Üçüncü kazı ve 3. sıra çelik borunun aktif edilmesi
7	Dördüncü kazı ve 4. sıra çelik borunun aktif edilmesi
8	Aç-kapa tünel alt kotuna kadar kazı uygulaması
9	4. sıra çelik borunun inaktif edilmesi ve tünel temelinin aktif edilmesi
10	Yatay sismik yükün sisteme uygulanması
11	Sistemin dinamik durumdaki güvenlik katsayısının hesaplanması (ΣMstage)
12	Aç-kapa tünelinin aktif edilmesi
13	3. sıra çelik borunun inaktif edilmesi ve geri dolgu yapılması
14	2. sıra çelik borunun inaktif edilmesi ve geri dolgu yapılması
15	1. sıra çelik borunun inaktif edilmesi ve geri dolgu yapılması
16	İstinat duvarının uygulanması
17	Sistemin statik durumdaki güvenlik katsayısının hesaplanması (ΣMstage)
18	Yatay sismik yükün sisteme uygulanması
19	Sistemin dinamik durumdaki güvenlik katsayısının hesaplanması

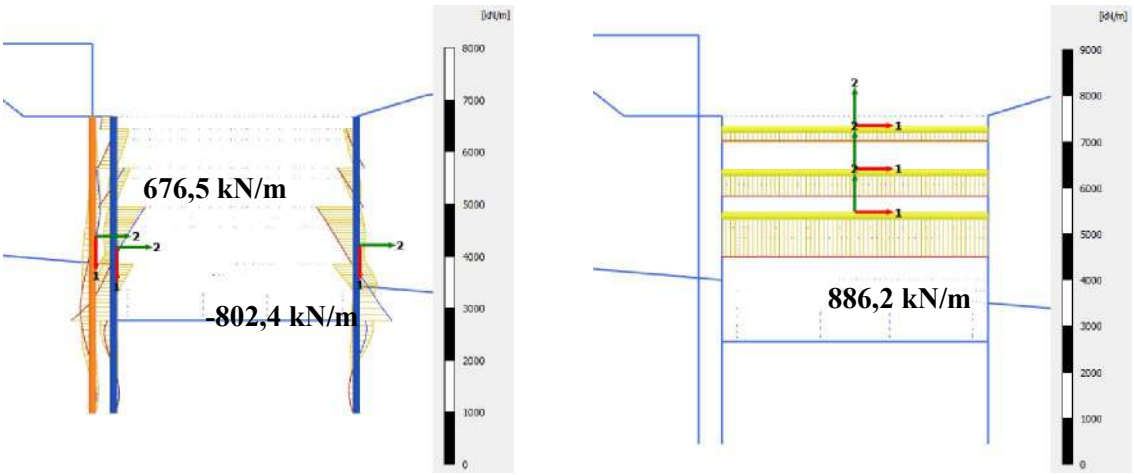
Yapılan sonlu elemanlar analizi mevcut durum koşulları ile başlamaktadır. Analizin 2. aşamasında diyafram duvar ve baret kazıkların etkinleştirilmesinden sonra tünel temel kazısına kadar 4 er m kademeli olarak kazı yapılması ve çelik boru yerleştirilmesi sıra ile devam etmiştir. 8. aşamada son kazı yapılıp aç-kapa tüneli temel kotuna inildikten sonra 9. aşamada temel yapısal elemanı aktif edilmiş ve 4. sıra çelik boru devre dışı bırakılmıştır. Ancak aç-kapa tünel imalatının sonlandırılması için ilk olarak TBM tünellerinin tamamlanması gerekmektedir. TBM imalatının tamamlanıncaya kadar geçecek sürenin uzunluğu dikkate alındığında aç-kapa tüneli için imal edilen destek sistemi kalıcı kabul edilmiştir. Bu nedenle analizin 10. aşamasında sisteme deprem ivmesi tanımlanarak sisteme etkiyen kesit tesir değerleri elde edilmiş ve güvenlik katsayısı hesaplanmıştır. Çalışma sahası için Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayınlanan Türkiye Deprem Risk Haritasına göre yatay yer ivmesi değeri 0.20 g'dir. Kalıcı aşamadaki güvenlik faktörü dinamik durum için 1.30 olarak hesaplanmış olup, limit denge koşulu üzerinde olduğundan kabul edilebilir sınırlar içindedir. "TCDD Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı" tarafından hazırlanan "Projelerde Dikkat Edilecek Hususlar" çalışması kapsamında analizlerde referans alınacak kaynaklar gereğince dinamik analizlerde önerilen minimum güvenlik katsayısı 1.10 olarak belirlenmiştir.

Kazı seviyesinin maksimum olduğu ve TBM makinasının çıkışına kadar açık kalması gereken (en az 2 yıl) aşamasına (9. aşama) ait Plaxis 2D analiz sonuçları Şekil 7 (a,b) ve Şekil 8 (a,b) gösterilmiştir. Sistemin kalıcı kabul edilen en kritik 9. analiz aşamasından sonra deprem ivmesi uygulandıktan sonra baret kazık, diyafram duvar ve çelik borular üzerine gelen kuvvetlere göre tasarım kontrol edilmiştir. Bu aşamadan sonra sıra ile aç-kapa tünel yapısının aktif edilmesi, her sıra çelik boru aşamasının kademeli olarak kaldırılması ve geri dolgu yapılması adımları ile sistem tamamlanmıştır. Son aşamada hem statik hem de dinamik durumlar için stabilite koşulları incelenmiştir. Statik durum için şev stabilite analizinde güvenlik katsayısı 2.39 ve dinamik durum için ise 1.34 olarak hesaplanmıştır. Yapısal elemanlar üzerindeki maksimum kesme kuvveti ve eğilme momentleri ve çelik borular üzerindeki maksimum eksenel kuvvetler sırasıyla Çizelge 4 ve 5'te verilmiştir. Bu değerler, donatı tasarımının hesaplamalarında kullanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 7 Sonlu elemanlar analizi sonuçları 9. aşama (a) toplam deplasman, (b) eğilme momenti



(c) (d)

Şekil 8 Sonlu elemanlar analizi sonuçları 9. aşama (a) kesme kuvveti (b) eksenel kuvvet

Çizelge 4. Diyafram duvar ve baret kazık maksimum kesit tesirleri

Yapısal Eleman	Statik Durum		Dinamik Durum	
	Moment (kNm/m)	Kesme Kuvveti (kN/m)	Moment (kNm/m)	Kesme Kuvveti (kN/m)
Baret Kazık	1396	225,7	2701	631
Sol Diyafram Duvar	962	802,4	6583	2961
Sağ Diyafram Duvar	1498	755,7	2413	1336

Çizelge 5. Çelik borulara tesir eden maksimum eksenel kuvvet değerleri

Yapısal Eleman	Statik Durum	Dinamik Durum
	Eksenel Kuvvet (kN/m)	Eksenel Kuvvet (kN/m)
1. Sıra Çelik Boru	263,5	568,3
2. Sıra Çelik Boru	508,3	829,7
3. Sıra Çelik Boru	886,2	1320
4. Sıra Çelik Boru	662,4	-

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, TCDD Bahçe-Nurdağ Tüneli, Bahçe portal girişinin hemen önündeki aç-kapa tünelinin kazısı sırasında giriş portali yamacında meydana gelen yenilme ve bunun etkileri incelenmiştir. Yenilmenin boyutu, yerinde gözlem, inklinometre okumaları ve sondaj çalışmaları ile araştırılmıştır. Bu projedeki heyelan malzemesi ve çok ayrışmış şist oluşumu göz önüne alındığında fore kazık imalatının yüksek derinliklerinde olası sapmalar ve/veya bütünlük sorunları yarattığı gözlenmiştir. Tek bir baret kazık ve üç fore kazık çalışma prensibinin heyelan kuvvetlerine karşı karşılaştırmasına göre baret kazıkların moment kapasitesi, 3 adet fore kazığın moment kapasitesinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Stabilitenin sağlanması amacıyla diyafram duvar, baret kazık ve çelik borular kullanılarak tasarlanan destek sistemi, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve sisteminin statik ve dinamik durumda güvenlik katsayıları sırasıyla 2.39 ve 1.34 olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan destek sisteminin; yapısal elemanlarının inşasına ve tünel kazısına Eylül 2017'de başlanmıştır. Diyafram duvarlara yerleştirilen inklinometreler ile sistemin deformasyonları sürekli olarak izlenmiştir. Aktif heyelan yüklerine karşı önerilen destek sistemi imalatları başarıyla Ocak 2019'da tamamlanmıştır. Bahçe-Nurdağ tüneli inşaatı hala devam ettiği için bu sistem, ikinci tünelden TBM çıkıncaya kadar açık kalacaktır. Son iki yıllık dönemde inklinometre okumalarında maksimum 12 mm deplasman değişimi gözlenmiştir. Bu değerlere göre sistemde stabilite problemi olmadığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, sonlu elemanlar yöntemi analiziyle elde edilen maksimum yüklere göre donatı hesapları yapılan yapısal elemanların, güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca böyle büyük ölçekli ve karmaşık heyelanlarda diyafram duvar ve baret kazıklar gibi yapısal elemanların, büyük kesme kuvvetlerini taşıyabildikleri ve daha güvenli sonuçlar verebildikleri için fore kazıklara göre daha etkili oldukları sonucuna varılmıştır. Böylelikle diyafram duvarların ve baret kazıkların, göreceli olarak daha büyük ölçekli şev yenilmelerinin önlenmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

7. KAYNAKLAR

Aygar, E. B. and Gokceoglu, C., 2020a. Problems Encountered during a Railway Tunnel Excavation in Squeezing and Swelling Materials and Possible Engineering Measures: A Case Study from Turkey. Sustainability, 12, 1166

Aygar, E. B. and Gokceoglu, C., 2020b. Bir tünelde portal ve tünel stabilitesi ilişkisi (Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Demiryolu Projesi, T3 Tüneli). Bilimsel Madencilik Dergisi, 59(3), 157-168

Aygar, E.B., Gokceoglu, C., 2021. Effects of Portal Failure on Tunnel Support Systems in a Highway Tunnel. Geotech Geol Eng, https://doi.org/10.1007/s10706-021-01859-z

Kaya, A., Akgün, A., Karaman, K., Bulut, F., 2016. Understanding the Mechanism of Slope Failure on a Nearby Highway Tunnel Route by Different Slope Stability Analysis Methods: A Case from NE Turkey. Bull Eng Geol Environ, 75, 945–958.

Kaya, A., Karaman, K., Bulut, F., 2017. Geotechnical Investigations and Remediation Design for Failure of Tunnel Portal Section: A Case Study in Northern Turkey. Journal of Mountain Sciences, 14 (6), 1140 –1160.

Komu, M.P., Guney, U., Kilickaya, T.E., Gokceoglu, C., 2020. Using 3D Numerical Analysis for the Assessment of Tunnel–Landslide Relationship: Bahce–Nurdag Tunnel (South of Turkey). Geotech Geol Eng, 38, 1237–1254.

Rao, K., Singh, T., 2017. Two-Dimensional Finite Element Based Parametric Analysis of South Portal Slope, Rohtang Tunnel, India. Procedia Engineering, 173, 1330 – 1333.

Taromi M., Eftekhari A., Hamidi J. K., Eghbali A., 2018. Tunnel Designing and Construction Process in Difficult Ground Conditions Using Controlled Deformations (ADECO) Approach: A Case Study. International Journal of Mining and Geo-Engineering, IJMGE 52-2,149–160.

Tuncay, E., 2018. Assessments on Slope Instabilities Triggered by Engineering Excavations Near a Small Settlement (Turkey). Journal of Mountain Sciences, 15 (1), 114-129.

Konvansiyonel Yöntemle Açılan Geniş Çaplı Tünellerde Yaşanan Sorunlar ve Çözümleri: Ankara İstanbul YHT Projesi 2. Etap Tünelleri

Problems and Solutions in Large-Diameter Tunnels Opened by Conventional Method: Ankara Istanbul YHT Project 2nd Stage Tunnels

E. Poşluk[*,1], S. Dalgıç[1]

[1] *İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Büyükçekmece Yerleşkesi G Blok Kat:2 Büyükçekmece/İSTANBUL (*evrenposluk@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, imalatları konvansiyonel yöntemle 2009 ile 2014 yılları arasında tamamlanan Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 2. Etap (Kocaeli-İnönü arasında 32 adet tünel) tünellerinde yaşanan sorunlar; tünel kazısı, desteklemesi ve sonrası aşamalarında incelenmiş, bu sorunlara getirilen çözümler irdelenmiştir. Tünel kazısı ve hemen sonrası yaşanan sorunlar aşırı sökülmeler, göçükler ve ani su gelirleridir. Tünel desteklemesi ile nihai kaplama yapılıncaya kadar geçen sürede ise tünel şeklinin bozulması ile sonuçlanan sıkışma ve şişme sorunları gerçekleşmiştir. Sorunların giderilmesi ancak süreksizlik takibi ve zayıf-çok zayıf kayada ön destekleme (göbek çivisi, boru süren vb.) yöntemlerinin birlikte kullanımıyla ve destekleme sistemlerinde rijit yaklaşım ile mümkün olmuştur. Ankara İstanbul Hızlı Tren Projesi tünellerinden edinilen tecrübeler, ülke genelinde yapılan benzer projelerde kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, aşırı sökülme, göçük, su geliri, rijit tünel desteklemesi

ABSTRACT: In this study, the problems experienced in the 2nd Stage of the Ankara-Istanbul High Speed Train Project (32 tunnels between Kocaeli-İnönü), the production of which was completed with the conventional method between 2009 and 2014; tunnel excavation, its support and post stages were examined, and solutions to these problems were discussed. Tunnel excavation and its immediate aftermath are *overbreak*, collapses and sudden water incomes. In the period between the tunnel support and the final lining, squeezeing and swelling problems resulting in deformation of the tunnel shape have occurred. The problems were solved only by using discontinuity monitoring and the use of front support (face bold, steel pipe, etc.) methods in weak-very weak rock and with a rigid approach in support systems. The experiences gained from the Ankara Istanbul High Speed Train Project tunnels have been used in similar projects across the country and continue to be used.

Keywords: *Tunnel, overbreak,* collaps*, water income, rigid tunnel support*

1. GİRİŞ

Tünelcilik çalışmalarının doğası, öngörülen ve öngörülemeyen birçok sorunu bünyesinde barındırır. İyi bir tünel çalışması, ancak imalat öncesinde sahada yapılan dikkatli ve titiz çalışmalarla toplanan verilerin irdelenmesi ve bunun sonucunda öngörülen imalatların tünel içerisinde ve tünel dışında yapılacak olan ölçümlerin değerlendirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Gerek projelendirme gerekse imalat sırasında yaşanan süre ve maliyet baskıları tüneldeki belirsizlikleri ve sorunları arttırmaktadır. Bu sorunlardan en önemlileri, aynada stabilite problemleri, aşırı sökülmeler, şişme ve sıkışmanın etkisi ile deformasyon ve inşaat aşamasında aşırı su gelmesi ile akma şeklinde malzeme gelişidir (Riedmüller ve Schubcrt, 2000). Tünel imalatlarında stabilite problemlerini en aza indirmek ve desteği optimize etmek için stabilite önlemlerine ilişkin önceden bir strateji (planlama ve tasarım sırasında) oluşturulmalıdır (Cantieni vd., 2009). Özellikle tünelde sıkışma, tünel çapının % 1'lik oranında konverjans oluşumu birkaç yazar tarafından önerilen ve alan verileriyle doğrulanan sıkışma eşiği olarak kabul edilir (Sakurai, 1983). Eşik değerin aşılması tünelde maliyet artışına ve zaman kaybının oluşmasına neden olur (Poşluk vd., 2018). Bu nedenle tünel imalatlarında hesaba katılması gereken bir diğer husus ise kazanılan tecrübenin sahaya aktarımıdır. Aynı veya benzer birimlerde yapılan tünelcilik çalışmalarında karşılaşılan sorunlar ve kazanılan tecrübeler diğer tünellerde imalat süresini,

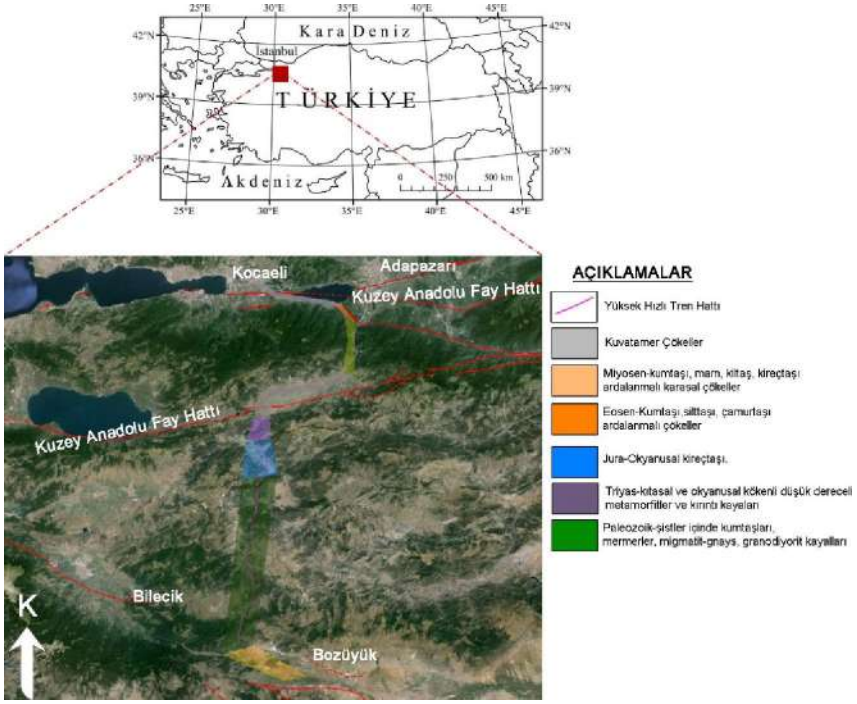
maliyet artışını ve can güvenliği riskini azaltacaktır. Bu noktadan hareketle hazırlanan bu çalışmada Ankara - İstanbul Hızlı Tren Projesi 2. Etabı'nda konvansiyonel yöntem ile açılan 55 km (13.45-16.65 m arasında değişen kazı çapında) uzunluğundaki 32 farklı tünel irdelenmiş yaşanan önemli sorunlar ve bu sorunlara getirilen çözümler aktarılmaya çalışılmıştır.

2. JEOLOJİK VE JEOTEKNİK ÖZELLİKLER

2.1. Jeolojik özellikler

Çalışma alanını oluşturan Ankara-İstanbul Hızlı Projesi'nin 2. Etap güzergahı, Kocaeli ili ile İnönü ilçesi arasında yaklaşık 155 km'lik bir hatta Karasu ve Sakarya nehirlerinin şekillendirdiği sert bir morfolojiyi takip eder (Şekil 1). Bu sert morfolojinin sonucu olarak güzergah boyunca 32 adet tünel çözümüne başvurulmuştur. Bu çalışmanın konusu olan 2. Etap tünelleri İnönü Fayı ve Kuzey Anadolu Fayı arasında, Sakarya Kıtası birimleri içerisinde kalmaktadır. Tünel çalışmaları sırasında farklı yaşlarda ve jeolojik özelliklerde birimler geçilmiştir (Çizelge 1). Bu birimlerin tabanında Göncüoğlu vd. (2000) tarafından Söğüt Metamorfitleri, Koçyiğit vd. (1991) tarafından Pazarcık Yapısal Karmaşığı olarak adlandırılan Paleozoyik yaşlı metamorfik temel bulunmaktadır. Bu temel, mika şist, talk şist, grafit şist, klorit şist, gnays, mermer blokları ve onları kesen Bozüyük Granitoidi'nden oluşmaktadır. Paleozoyik yaşlı temel birimlerin üzerine Triyas yaşlı Karakaya Karmaşığı uyumsuz olarak gelmektedir (Okay, 2000). Güzergah boyunca Karakaya Kompleksi'nin spilitik bazalt seviyesi geçilmektedir. Bazaltlar üzerine uyumsuzlukla Jura yaşlı örtü birimleri gelir. Bu örtü birimleri Bayırköy Kumtaşları ve Bilecik Kireçtaşları'dır. Jura yaşlı birimlerin üzerinde Üst Kretase yaşlı marn, şeyl, kiltaşı kumtaşı ve tüf-tüfit birimlerinden oluşan Yenipazar Formasyonu uyumsuz olarak bulunmaktadır. Güzergah tünelleri boyunca Yenipazar Formasyonu üzerinde uyumsuzla gelen Eosen yaşlı birimlerle karşılaşılmamıştır.

Bozüyük yakın dolayındaki tünellerde ise temel birimleri üzerinde Miyosen yaşlı örtü birimleri uyumsuz olarak yer alır. Bu birimler, altta örgülü akarsu çökeli olarak tanımlanan Porsuk Formasyonu ile başlar. Az tutturulmuş çakıltaşı, silt, kil birimleri ile başlayan formasyon, üste doğru marn birimlerine geçer ve nihayet bu birimlerle geçişli gölsel kireçtaşı niteliğindeki Akpınar Kireçtaşı ile son bulur.



Şekil 1. Çalışma alanı ve genel jeolojisi.

2.2. Jeoteknik özellikler

Yapılan sondajlardan elde edilen silindirik karot numuneleri üzerinde, ISRM (2007) standartları kullanılarak kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç mukavemeti, elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Birimler süreksizlik sistemlerine, ayrışma durumuna göre değişkenlik gösterse de genel özelliklerini yansıtacak şekilde her bir birime ait jeolojik ve jeoteknik özellikler Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Günümüzde en çok kullanılan kaya kütlesi sınıflama sistemleri RMR (Bieniawski, 1989), Q (Barton vd., 1974) ve GSI (Hoek vd., 2002) olarak sayılabilir. Kaya kütle sınıflama sistemleri ile özellikle zayıf - çok zayıf kayalarda doğru sonuçlar üretmek oldukça zor ve tecrübe gerektirmektedir (Ulusay vd., 2002). İnceleme alanındaki tünellerde de zayıf - çok zayıf kaya kütlesi özellikleri daha dikkatle göz önüne alınarak her ilerleme adımında GSI, RMR ve Q sınıflama sistemleri ile değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmeler sonucu tünellerdeki kaya birimleri sağlam kayadan, çok zayıf kayaya kadar değişen özellikler sunmaktadır.

Çizelge 1. Tünellerde jeolojik birimler ve özellikleri.

Litoloji	Tünel Numarası	Tanımlamalar	Kaya Kütle Sınıflamaları			Birim Hacim Ağırlık (g/cm3)	Tek Eksenli Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
			GSI	RMR	Q			
Pazarcık Karmaşığı, Paleozoik (Grafit şist, Orta sert kaya)	27-28-29-30-31	Siyah-koyu gri renkte, orta sert dayanımlı, orta derecede ayrışmış, parçalıdır.	38	36	0,1	2,52	31,2	7,20
Pazarcık Karmaşığı, Paleozoik (Grafit şist, zayıf kaya)	24-28-33-34	Siyah-koyu gri renkte, zayıf çok zayıf dayanımlı, orta-yeryer çok ayrışmış, belirgin şistoziteli, parçalı, çok kırıklı yeryer faylıdır.	19	18	0,03	2,42	18,4	4,20
Pazarcık Karmaşığı, Paleozoik (Klorit şist)	24-27	Grimsi yeşil renkte, sert dayanıma sahip, az ayrışmış, az çatlaklıdır.	50	54	2,43	2,54	66,2	8,70
Bozüyük Granatoidi, Paleozoik (Granit)	35-22-23	gri renkte, orta sert dayanıma sahip, orta derecede ayrışmış, çok çatlaklı ve kırıklıdır.	40	35	0,237	2,6	23	9,98
Karakaya Karmaşığı, Tiriyas (Sipilitik bazalt)	21	Grimsi mor renkte, orta sert dayanıma sahip, orta derecede ayrışmış, çok çatlaklıdır.	35	32	0,289	2,7	30	6,85
Bilecik Kireçtaşı, Jura (Kireçtaşı)	10-11-12-13-16-19-20-21	Açık pembe renkte, sert dayanıma sahip, az ayrışmış, az çatlaklıdır.	50	52	1,5	2,6	55	10,00
Bayırköy Kumtaşı, Liyas (Kuvars kumtaşı)	14-15	Açık gri renkte, sert dayanıma sahip, az ayrışmış, az çatlaklı kırıklıdır.	48	46	1,5	2,7	52	10,32
Yenipazar Formasyonu, Kretase, (Tüfit, kumtaşı, silttaşı, kiltaşı)	13-17-18-19	Açık yeşil renkte, zayıf dayanıma sahip, orta-çok ayrışmış, çok çatlaklıdır.	20	19	0,028	2,36	22,08	4,60
Porsuk Formasyonu, Miyosen (Kumtaşı, silttaşı, marn, kiltaşı)	35-36	Yeşilimsi kahve renkte, çok zayıf dayanıma sahip, çok ayrışmış, çok çatlaklıdır.	15	15	0,009	1,9	8,9	1,35
Akpınar Kireçtaşı, Miyosen (kumlu-killi gölsel kireçtaşı)	35-36	Sarımsı bej renkte, orta sert dayanıma sahip, orta derecede ayrışmış, çok çatlaklıdır.	30	35	0,1	2,3	22,42	4,11

3. TÜNEL KAZI YÖNTEMİ VE ÖNGÖRÜLEN DESTEKLEMELER

3.1. Tünellerde Uygulanan Kazı Yöntemi

Proje hattı boyunca T26 Tüneli haricinde tüm tünellerde konvansiyonel yöntem kullanılmıştır. Tünel profilini çevreleyen kayacın özelliğine göre 3 veya 5 aşamada kazı ve destekleme yapılmıştır. Sağlam kayada at nalı kesit tipi benimsenerek kazı üst yarı ve alt yarı sağ alt yarı sol şeklinde 3 parçaya ayrılmıştır. Üst yarı 5.80 m, alt yarı ise 4.40 m yüksekliğindedir. Tünelin toplam yüksekliği 10.20 m, genişliği ise 13.30 m'dir. Toplam kazı alanı ise 123.95 m^2'dir. Zayıf kayada ise kazı kesiti elips şeklinde olup, 3 ana parçadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, üst yarı, alt yarı ve taban kemer şeklindedir. Üst yarı 5.90 m, alt yarı 2.75 m, taban kemer ise 3.20 m yüksekliğindedir. Tünel yüksekliği toplam

11.85 m, genişliği 14.20 m'dir. Toplam kazı alanı ise 136.00 m^2'dir. Ancak bu veriler tünel desteklemesi değiştikçe artmakta ve 16 m çapa kadar değişmektedir.

3.2 Öngörülen Destek Sistemleri

Projelendirme aşamasında, ÖNORM-B 2203 (1994) prensipleri kullanılarak tünellerde 7 farklı destek sistemi uygulaması öngörülmüştür. Öngörülen bu destek sistemleri tünel kazı aynasında yapılan jeolojik - jeoteknik değerlendirmeler ile birbiri arasında değiştirilmiş, öngörülen destek sistemlerinin yetmediği noktalarda ise yeni destek sistemleri geliştirilmiştir. İmalat öncesi projelendirme çalışmalarında kaya kütle sınıflama sistemleri esas alınarak oluşturulan farklı tip desteklemeler Çizelge 2.'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Öngörülen destek sistemi detayları (Yüksel, 2004; Şimşek vd., 2009; Aksoy vd., 2012).

Destek Sistemi (ÖNORM-B 2203, 1994)	RMR Aralığı	Kesit Tipi	Çelik Kuşak Tipi ve Kalınlığı	Püskürtme Beton Tip ve Kalınlık	Hasır Çelik Tipi ve Adedi	Bulon Tipi, Uzunluğu ve Sıklığı	İlerleme Uzunluğu
B-1 Tip 1	70-55	Atnalı	-	C20/10 cm	Q221xQ221 Tek kat	Stone Norfors (SN) Ø 28 mm/4/ 2x2	2,00 m
B-2 Tip 2	55-47	Atnalı	-	C20/15 cm	Q221xQ221 Tek kat	SN Ø 28 mm/4/ 2x2	1,75-2,00 m
B-3 Tip 3	47-35	Atnalı	NPI 140 mm	C20/25 cm	Q221xQ221 Çift kat	SN Ø 28 mm/6/ 1,5x1,5	1,25-1,75 m
B-3 Tip 4	35-27	Elips	NPI 140 mm	C20/25 cm	Q221xQ221 Çift kat	SN Ø 28 mm /6/ 1,5x1,5	1,25-1,75 m
C-2 Tip 5	20-15	Elips	NPI 160 mm	C20/30 cm	Q221xQ221 Çift kat	SN Ø 28 mm/6/ 1,25x1,25	1,00-1,25 m
C-2 Tip 6	20-15 (Fay bölgeleri)	Elips	NPI 160 mm	C20/30 cm	Q221xQ221 Çift kat	Injection Bold Outside (IBO) Ø 32 mm/8/ 1,25x1,25	1,00-1,25 m
C-3 Tip 7	< 15	Elips	NPI 200 mm	C20/40 cm	Q221xQ221 Çift kat	IBO Ø 32 mm/12/ 1x1	1,00 m

4. TÜNELLERDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR

Tünel imalat çalışmaları öngörülen ve görülemeyen birçok sorunu bünyesinde barındırır. Bunlar kazı esnasında, kazıdan hemen sonra ortaya çıkan sorunlar ve tünel kazı ve desteklemesinden, kaplama beton imalatına kadar geçen sürede oluşan sorunlar olarak değerlendirilebilir. Her sorunun zaman kaybetmeden aşılması gereklidir. Bunun en önemli nedeni, ani deformasyonlarda olduğu gibi zaman geçtikçe daha fazla ek desteklemenin gerekmesidir.

4.1. Kazı Sırasında ve Hemen Sonrasında Karşılaşılan Sorunlar

Tünel kazısı sırasında, gerek kazı yapılan kaya koşulunun özellikleri (süreksizlikler, ısı, bünye suyu vb.) gerekse uygulanan teknik (patlatma, ön sürgü vb.) gibi sebepler yüzünden tünellerde sorunlarla karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada kazı sırasında yaşanan sorunlar öncelikle kaya koşulu özellikleri baz alınarak değerlendirilmiştir. Ardından ise kazı yapılan kaya koşulunun özelliklerinin iyi etüd edilmesi neticesinde teknik nedenler en aza indirilmiştir.

4.1.1. Aşırı Sökülmeler

Konvansiyonel tünelcilikte aşırı sökülmeler, jeolojik ve teknik nedenler ile oluşmaktadır (ITA, 2013). Aşırı sökülme olaylarında jeolojik nedenler, süreksizliklerin konumu, faylar, ayrışma, su gelişi vb. olaylar ile teknik nedenler olarak ise uygun patlayıcı türü ve paternin seçimi, kazı öncesi uygun desteklemeler olarak belirtilebilir (Erguvanlı, 1973; Sellers vd., 2018; Salmi vd., 2021).

Bu çalışmada jeolojik nedenler ile oluşan aşırı sökülmeler incelenmiştir. Aşırı sökülmeler uygulanan destek sisteminden bağımsız, çoğunlukla üst yarı kazısı sırasında, birkaç m3 den 600 m3 e kadar değişen miktarda gerçekleşmiştir. Özellikle belirgin şistoziteli ve zayıf kayaçlarda oluşma sıklığı artarken sağlam kayaya geçildikçe azalmaktadır. Bununla birlikte sağlam ya da zayıf kayada oluşan aşırı sökülme miktarı için böyle bir ilişki belirlenmemiştir. Zayıf ve belirgin şistoziteli grafit şistler içerisindeki kazılarda çoğunlukla eksen ve omuz bölgelerinden küçük parçalar halinde kopma/akma şeklinde aşırı sökülmeler oluşmaktadır. Bu malzeme gelişi ile ayna yüzeyinin tamamen kaplandığı durumlara rastlanmıştır (Şekil 2c). Oluşan bu malzeme gelişini engellemek için kazı yüzeyinin hava ile temasının mümkün olduğunca hızlı kesilmesi ve oluşan boşluğun betonla doldurulması en sık başvurulan çözüm yöntemi olmuştur. Bununla birlikte yeni oluşacak aşırı sökülmeleri engellemek amacı ile özellikle eksen bölgesinde sık ön sürgü ve sürgü içinden basınçla (maksimum 40 bar) su/çimento (1/3) enjeksiyonu yapılmış kazı sırasında mümkün olduğunca hızlı bir şekilde ayna püskürtme beton ile kapatılmıştır (Şekil 2e).

Şekil 2. Sağlam ve zayıf kayada oluşan aşırı sökülmeler ve alınan tedbirler (a- granitlerde Süreksizlik kontrolünde gelişen aşırı sökülme (T-35), b- klorit şistlerde süreksizlik kontrolünde gelişen aşırı sökülme (T-27) c- Grafit Şistlerde kopma-akma şeklinde aşırı sökülme (T-34), d-aşırı sökülme sonucunda oluşan obruk (T-29), e-aşırı sökülme müdahalesi, f-Obruklu bölgesine yapılan aç-kapa yapısı).

Ayrıca tünel üzerindeki örtü kalınlığının azaldığı (1.5 tünel çapından sığ) bölgelerde oluşan aşırı sökülmeler, yüzeye kadar yansımıştır. Talk şistler içerisinde açılan 29 numaralı tünelde kazı aynasında oluşan bir aşırı sökülme sonucunda (11-14 m genişliğinde göçük yaşanmış bunun sonucunda bölgenin stabilitesi etkilenmiştir (Şekil 2d). Çözüm olarak tünel uygulamasından vazgeçilip şevlendirme ve aç - kapa tünel yöntemi ile imalatlar tamamlanmıştır (Şekil 2f).

Sağlam kayada oluşan aşırı sökülmeler ise süreksizliklerin kesişim bölgelerinde ve genellikle eksen - omuz bölgelerinde kama tipi kaymalar sonucunda oluşmuştur (Şekil 3a-3b). Oluşan boşluk hasır çelik ve beton marifeti ile doldurulmuş, yeni sökülmelerin olmaması için tünel aynasında süreksizlik takibine ağırlık verilmiştir. Ayna takibi ile oluşturulan perimetrik haritalara göre riskli olduğu değerlendirilen bölgelerde ilerleme adımı kadar (1-1.25 m) patlatma uzunluğunu ve patlatma delgi adedi (220 delgiden 160 delgiye) ve patlatma (180 kg'dan 120 kg seviyelerine) miktarı azaltarak sorun büyük ölçüde giderilmiştir.

4.1.2. Ani Su Gelişi

Bozüyük ilçe sınırları içerisinde yer alan 36 numaralı tünel (4100 m uzunluğunda) Miyosen yaşlı Porsuk Formasyonu (kiltaşı, silttaşı, marn ardalanması) içerisinde açılmıştır. Tünel kazısı sırasında birim içerisine hapsolmuş sular ani ve yüksek debi ile tünel içine akmaya başlamıştır. Bu su gelişi sırasında önce iri bloklar ardından ise çamur akması gerçekleşmiştir. Bunun sonucunda tünel destek sisteminde hasarlar oluşmuştur (Şekil 3a). Tünelde su gelişi üç gün boyunca yüksek debi ile devam etmiş üçüncü günden sonra azalarak 5. günde yaklaşık 20 lt/dak seviyesinde sabit bir debi ile devam etmiştir. Bu su gelişinin sonucu olarak özellikle ringin kapanmadığı noktalarda tünel içi konverjanslar artmış, radyal yönde çatlaklar oluşmuştur. Suyun tahliyesi ve ek bulon imalatları akla ilk gelen çözümler olsa da hareketi engellemeye yetmemiş üst yarı bölgesinde hareketin hızı artmıştır. Sorunun giderilmesi ve benzer noktalarda tekrarlanmaması amacı ile püskürtme beton ve çelik hası marifetiyle oluşturulan geçici taban kemer uygulamasına başvurulmuş (Şekil 3b) ve deformasyonlar durdurulmuştur. Bu geçici beton kemer su gelişi ve deformasyon riski olduğu düşünülen tüm zayıf kaya tünellerinde uygulanmaya başlanılmış ve özellikle tünek suların bulunduğu birimlerde başarılı soruçlar vermiştir. Ek olarak tünel taban ve kemer beton drenajları revize edilmiştir.

Şekil 3. 36 numaralı tünelde ani su gelişi ve çözümü (a-iç kaplamada oluşan hasarlar, b-geçici taban kemer uygulaması).

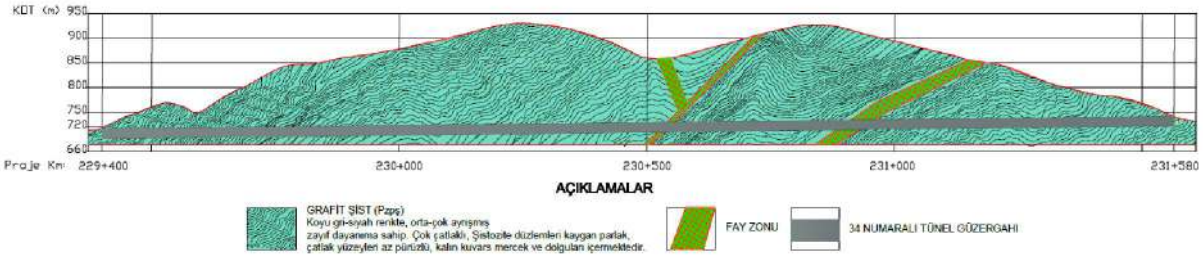
4.2. Kazı Sonrasında Karşılaşılan Sorunlar

4.2.1. Sıkışma

Sıkışma, plastik akmanın (krip akma) ürettiği, tünel etrafındaki kaya kütlesinde sınırlayıcı kayma gerilmesinin aşıldığı durumlarda, uzun süre devam edebilen ve tünel etrafında büyük deformasyonlar (Konverjans (yakınsama)) üreten bir olaydır (Barla, 1995; Dalgic, 2002). Sıkışma davranışı genellikle mikaşist, kalkşist, grafit şist, kiltaşı, killi şist, marnlı kil, vb. gibi düşük mukavemet özellikleriyle deforme olabilen zayıf kaya kütleleriyle ilgilidir (Barla, 2001). Temel olarak gerçekleşen deformasyon miktarının tünel çapına oranı şıkışmanın bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir. Sıkışma problemlerini belirlemek için ise Karl Terzaghi'den (1946) bu güne kadar, yapılan deney, teori ve uygulamada karşılaşılan sonuçlara göre çözümler önerilmektedir (Jethwa vd.,1980; Singh vd., 1992; Aydan vd., 1993; Barla, 2001., Dalgıç, 2002, Bilgin vd., 2012; Wang, 2021).

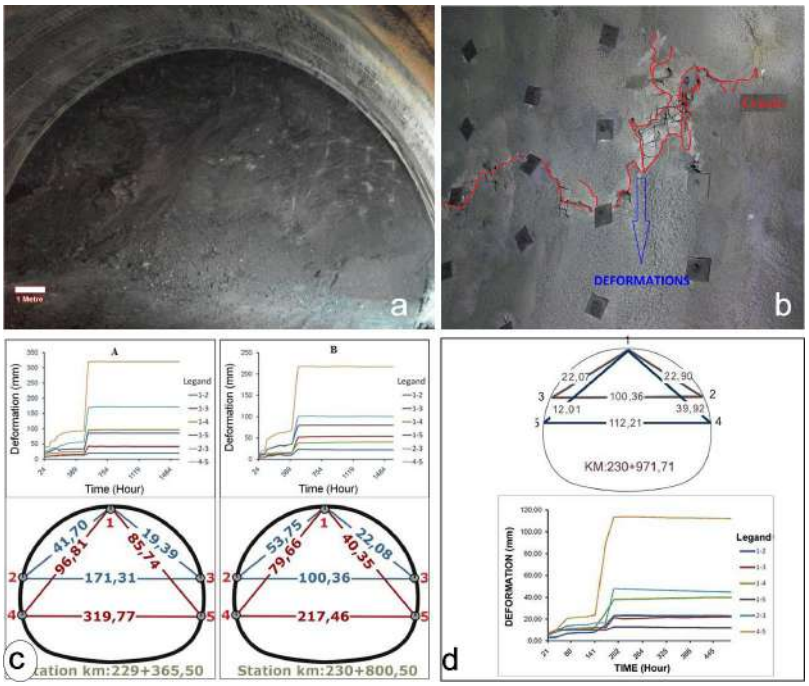
Ankara-İstanbul YHT Tünel imalatları boyunca sıklıkla sıkışma sorunları yaşanmıştır. Sıkışma sorununun yaşanmasında en büyük nedeni geçilen birimlerin anizotropik özelliklerinden dolayı uygulanan destek sisteminin tünelin her noktasında aynı performansı göstermemesidir. Buna örnek

çalışma alanında yer alan 34 numaralı tüneldir. 2200 m uzunluğundaki tünel (Şekil 4), Bozüyük ilçesinin 1.5 km K'de Pazarcık Yapısal Karmaşığı (Koçyiğit vd., 1995) olarak tanımlanan koyu gri renkte, zayıf dayanıma sahip, çok kırıklı ve ondülasyonlu, kuvars blok ve mercekleri içeren grafit şist içerisinde açılmıştır (Şekil 5a). Tünelde uygulanan destek sistemi için öngörülen maksimum deformasyon olan 10 cm iken 69 gün sonunda 31.9 cm olarak gözlenmiştir (Şekil 5b-5c). Günlük 2 m ilerleme miktarı düşünüldüğünde ölçüm noktası aynaya 138 m mesafededir. Tünelin bu kısmında ciddi çatlaklar ve oturmalar gözlenmiştir. Deformasyon verileri takip edildiğinde hareketin zamanla arttığı ve krip şeklinde geliştiği görülmektedir.



Şekil 4. 34 numaralı tünel jeolojik profili.

Tünelde uygulanan destek sisteminin yeterli olmadığı ve revize edilmesi gerektiği anlaşılmış ve daha rijit hale getirilmiştir. Rijitlikten kasıt en uygun desteklemeyle deformasyonları öngörülen bir noktada sabit tutmaktır. Bunun için sayısal analizlerile ve girdi parametrelerinin doğru seçimi gereklidir. 34 numaralı tünelde daha güçlü çelik iksa, göbek çivisi, çapo daha yüksek enjeksiyonlu süren ve daha uzun bulonlarla oluşturulmuş destek sistemi ile (Bkz: Çizelge 2. 7 numaralı destek sistemi) tünelde deformasyonlar öngörülen 120 mm sınır değerlere çok yakın (112 mm) gerçekleşmiştir (Şekil 5d). Tünel bu destek sistemiyle sorunsuz tamamlanmıştır. Tünelde uygulanmaya başlanan destek sistemi ve destekleme yaklaşımı ile T35, T13 ve T15'de yaşanan sıkışma sorunları da giderilmiştir.



Şekil 5. 34 numaralı tünelde yaşanan sorunlar ve yeni destek sistemi sonrası ölçülen deformasyon (Aksoy vd., 2016) (a-34 numaralı tünel km:229+365 aynası, b-km 229+370 de gözlenen çatlaklat, c-farklı istasyonlarda gerçekleşen şerit ekstansiyometre ölçümleri, d-yeni destekleme sistemi sonrası tünelde oluşan deformasyon).

4.2.2. Şişme

Bilecik ile Osmaneli arasında yer alan 19 numaralı tünel 4080 m uzunluğundadır. Kireçtaşı, tüfit ve kiltaşı birimleri içerisinden geçen bu tünelde, özellikle kiltaşı seviyelerinde birbirini kesen faylar ve fay zonları ile karşılaşılmıştır. Fay zonlarının bulunduğu noktalarda imalatlar kurak mevsimlerde tamamlanmıştır. Tünel imalat çalışmaları sırasında söz konusu bölgelerde herhangi bir su gelişi yaşanmamıştır. Ancak yağışlarla birlikte süreksizlik kontrolünde su gelişleri olmuş ve hassas kil oranının yüksek olduğu bazı bölgelerde taban kemer bölgesinde şişme sonucu kabarmalar gözlenmiştir (Şekil 6a). Bu sorunun giderilmesi amacı ile taban kemer bölgesinde gerekli tamiratlar yapılarak tünel kazı-desteği ile koordineli taban betonu (tünel taban betonu) uygulanarak deformasyonlar kontrol altında tutulmuştur (Şekil 6b).

Şekil 6. 19 numaralı tünelde yaşanan şişme sorunu ve çözümü (a-tünel taban kemer kısmında yaşanan kabarma, b-taban betonu uygulaması).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 2. Etap güzergahı Kocaeli ili ile İnönü ilçesi arasında yaklaşık 155 km'lik bir hattı, Sakarya Kıtası boyunca kat etmektedir. Bu güzergâh üzerinde uzunluğu 55 km'yi bulan 32 adet tünel (13,45-16,65 m kazı çapında) bulunmaktadır. Tüneller de kazı sırası ve hemen sonrası ile nihai kaplama beton imalatına kadar geçen süre de farklı sorunlarla karşılaşılmış bu sorunların sebepleri ve alınan önlemler özetlenmeye çalışılmıştır.

Tünellerde kazısı ve hemen sonrasında aşırı sökülmeler ve ani su geliri yaşanmıştır. Aşırı sökülmeler uygulanan destek sisteminden bağımsız, çoğunlukla üst yarı kazısı sırasında, birkaç metreküpten 600 metreküpe kadar değişen miktarda gerçekleşmiştir. Özellikle belirgin şistoziteli ve zayıf kayaçlarda oluşma sıklığı (50-60 m'de bir) artarken sağlam kayaya geçildikçe azalmaktadır (300 m'de bir). Bununla birlikte sağlam ya da zayıf kayada oluşan aşırı sökülme miktarı için böyle bir ilişki belirlenememiştir. Aşırı sökülmeler sağlam kayada ayna haritalaması ve süreksizlik takibi ile öngörülebilmiş zayıf kayada ise göbek çivisi, süren ve basınçlı (maksimum 40 bar) enjeksiyon (su/çimento) yöntemleri kullanarak önlenmeye çalışılmıştır. Yüzeye kadar göçük oluşan bir tünelde ise aç-kapa yöntemi ile tünel tamamlanmıştır. Tünellerde kazı sırasında ani ya da sürekli su gelişleri de sorun olmuştur. Su gelişinin problemi göçük oluşturması, gelen suyun tünel dışına tahliyesi ve suyun kil içeren kayaçta mukavemet kaybına neden olarak tünelde ek deformasyonlar oluşturmasıdır. Suyun tahliyesinin sağlanması, kazıdan önce ön delgi yapılması ve tünel üst yarı imalatlarından hemen sonra geçici beton kemer yapılması, su gelişi beklenen tünellerde gerek göçük gerekse de deformasyonları azaltmıştır.

Kazı-destek imalatlarından sonra yaşanan en önemli sorun sıkışmadır. Tüneller için öngörülen destek sistemi kırıntılı kaya, sağlam kaya ve çok sağlam kayada iyi sonuçlar vermiştir. Ancak zayıf ve çok zayıf kayada sıkışma sorunları ile karşılaşılmıştır. Uygulanan destek sistemi tünel içinden ve dışından alınan veriler kullanılarak daha rijit hale getirilmiş ve yeni destek sisteminden öngörüldüğü şekilde performans alınmıştır. Kazı-destek imalatlarından sonra yaşanan bir diğer sorun ise şişmedir. Şişme hassas kil içeriği ile ilintilidir. Şişme beklenen tünellerde tünel ilerlemesiyle eş taban betonu uygulaması gerek gelebilecek suyun tahliyesi gerekse de kilin şişerek destek sistemindeki kabarmaları engellemekte fayda sağlayacaktır.

Zayıf ve çok zayıf kayada kaya koşullarının bulunduğu alanlarda kazı sonrasında, tünelde uygulanan destek sistemi performansının belirlenmesi amacı ile tünel içi ve dışı ölçümler sürekli yapılmalı, gerekli görüldüğü anda zaman geçirilmeden ek desteklemeler ile hareketler giderilmelidir. Unutulmaması gereken bir konu da tünellerde, özellikle zayıf kayalarda sıkışmanın ve şişmenin zamana bağlı olmasıdır. Yapılan proje ve analizlerde zayıf kayalarda zamanla gelişen deformasyonların analizlere mutlaka dahil edilmelidir.

6. KAYNAKÇA

Aksoy, C. O., Uyar, G. G., Posluk, E., Ogul, K., Topal, I., Kucuk, K., 2016. Non-deformable support system application at tunnel-34 of Ankara-Istanbul high speed railway project. *Structural Engineering and Mechanics*, *58*(5), 869-886.

Aksoy, C., O., Oğul, K., Topal, İ., Özer, S.,C., Ozacar, V., Poşluk, E., 2012. Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 52 (2012) 61-70.

Aydan, Ö., Akagi, T., Kawamoto, T., 1993. The Squeezing Potential of Rocks Around Tunnels; Theory and Prediction, Rock Mechanics and Rock Engineering, 26(2), 137-163.

Barla G., Tunneling Under Squeezing Rock Conditions, 2001. Kolymbas D (ed) Tunneling Mechanics, Eurosummer School, Logos Verlag, Innsbruck,169-268.

Barton, N. R., Lien, R., Lunde, L., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. Rock Mecnanics, 6 (4), 189-239.

Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering rock mass classifications, USA: John Wiley and Sons.

Bilgin, N., Algan, M., 2012. The performance of a TBM in a squeezing ground at Uluabat, Turkey. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 58–65.

Cantieni, L., and Anagnostou, G., 2009. The interaction between yielding supports and squeezing ground. Tunnelling and Underground Space Technology, 24(3), 309-322.

Dalgıç, S., 2002. Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey, Engineering Geology 67:73–96.

Erguvanlı, K., 1973. Mühendislik jeolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.

Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., Şentürk, K., Ozcan, A., Uysal, Ş., 2000. A geotraverse across NW Turkey: tectonic units of the central Sakarya region and their tectonic evolution. Bozkurt, E., Winchester, J. & Piper, J.A. (eds), Tectonics and in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society, London, Special Publications 173, 139-161.

Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 2002. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of Athens schist formation. Bullettin of Engineering Geology and Environment, 57, 151-160.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay R, Hudson JA, editors. Ankara: Kozan offset.

ITA, 2013,- Working Group N 19 Conventional Tunnelling, ISBN : 978-2-9700776-9-5.

Jethwa, J. L., Singh, B., Mithal, R.S., 1980. Influence of geology on tunnelling conditions and deformational behaviour of supports in faulted zones — A case history of the Chhibro-Khodri tunnel in India, Engineering Geology, 16, 3-4, 291-319.

Koçyiğit, A., Kaymakçı, N., Rojay, B., Özcan, E., Dirik, K., Özçelik, Y., 1991. İnegöl-Bilecik-Bozüyük arasında kalan alanın jeoloji etüdü, TPAO Raporu, 3049, 139 s.

Okay, A.I., 2000, Was the Late Triassic orogeny in Turkey caused by the collision of an oceanic plateau ? In "Tectonics and Magmatism in Turkey and Surrounding Area" (eds. E. Bozkurt, J.A. Winchester and J.A.D. Piper), Geological Society, London, Special Publication, 173, 25-41.

ÖNORM B2203, 1994. Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm Teil 1: Zyklischer Vor-trieb“ (Underground Works – Works contracts Part 1: Cycling driving)

Poşluk, E. ve Korkanç, M., 2018. Zayıf Kayaçlarda Makinalı Kazı Performansının Kestirilmesindeki Zorluklar. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 42(2), 143-158.

Ricdmüllcr G., Schubcrt, W.,1999. Critical commcnts on quantitative rock mass classifications. Felsbau, Rock Soil Engineering, 3/99: 164-167.

Sakurai, T., 1983. Approximation of wiring delay in MOSFET LSI. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 18(4), 418-426.

Salmi, F.E., Sellers, J.E., 2021. A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design, Engineering Geology 281 , 105970.

Sellers, E., Kennelly, L., Withers, B., Monro, K., Reid, D., 2018. Design and implementation improvements for wall control blasting in an anisotropic rock mass at the Phu Kham Copper-Gold Operation. In: Schunnesson, H., Johansson, D. (Eds.), The 12th International Symposium

Şimşek O, Aygar EB, Ertin A, 2009, İnönü-Köseköy hızlı tren projesi BT0 paftaları. SİAL Yer Bilimleri Ltd. Şti., Yayınlanmamış Rapor.

Terzaghi K., 1946. Rock defects and loads in tunnel supports, Rock tunneling with steel supports, Youngstown, Ohio, R.V. Proctor and T.L. White, eds., The Commercial Shearing and Stamping Co., 17-99.

Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2002. Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri, Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.

Wang, X., Iura, T., Jiang, Y., Wang, Z., Liu, R.,2021. Deformation and mechanical characteristics of tunneling in squeezing ground: A case study of the west section of the Tawarazaka Tunnel in Japan, Tunnelling and Underground Space Technology 109, 103697.

Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., 2004. Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi (Köseköy-İnönü), Yayınlanmamış rapor.

Aydın Sultanhisar Barajı Gövde Dolgusunda Oluşan Kaymaların Nedeni ve Uygulanan İyileştirme Yöntemleri

The Reason of Earthflow Occured in Earthfill of Sultanhisar Dam Body (Aydın) and Aplied Rehabilitation Methods

A.R. Özdamar[1,*], İ. Gündüz[1], T. Sarayköylü[1]

[1] DSİ 21. Bölge Müdürlüğü, AYDIN
*(*arozdamar@hotmail.com)*

ÖZ: Aydın ili, Sultanhisar ilçesinde imalatları tamamlanan ve su tutma aşamasında olan Sultanhisar (Aydın) Barajı gövde dolgusunun mansap şevinin sol sahil kesiminde kayma meydana gelmiştir. Bu çalışma ile bu kaymanın nedenleri ve çözüm önerileri araştırılmıştır. Öncelikle göl alanı ile ilişkili olan gövde üzerinde sızan suların noktaları belirlenmiş, gerekli miktar ölçümleri yapılmıştır. Baraj dolgu malzemesinin fiziksel, mekanik ve hidrojeolojik özellikleri belirlenmiş ve mevcut proje verileri ışığında değerlendirilmeler gerçekleştirilmiştir. Barajın dolusavak kaplama betonları gözden geçirilerek onarılmış ve yapısal önlemler alınmıştır. Dolusavak yapısı tekne bölgesi çevresi boyunca enjeksiyonlar yapılarak geçirimsizlik sağlanmış, ön yüz beton altı Jeoradar çalışması ile taramalar gerçekleştirilmiştir. Sağ sahilde de yamaç içerisinden gelen kaynak suları enjeksiyon ile gövdeden uzaklaştırılmış, gövdenin mansap tarafında uygun malzeme ile yapılan gövde destek dolgusu, barajın işletme halinde maksimum su yükü durumunda ve depremde emniyetli olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar bittikten sonra tekrar su tutulmuş ve herhangi bir soruna rastlanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Sultanhisar Barajı, kayma, jeoteknik, duraysızlık, iyileştirme

ABSTRACT: *An earthflow was occurred whithin the left abutment downstream slope of the earthfill body of Sultanhisar dam located in Aydın provience. In this study, reasons of slope failure and rehabiltation methods were investigated. First of all, water seepage locations on the dam body related to reservior water were defined and some measurements were carried out. Physical, mechanical and hydrogeological properties of earthfill dam material were determined and evaluated in terms of the existing dam construction project. The spillway covering concrete checked, some parts were repaired and structural precautions were obtained. Geo-radar scanning measurements were performed and, impermeability of spillway basement rock was succeeded by means of grouting in vessel part of the structure. As a result, spring water discharge into the earthfill in the right abutment of the dam was prevented. The failed part of the downstream slope was refilled back and supported with earthfill material by considering maximum water level of the reservoir and the seismicity of the region. Finally, water storage in the resevoir was started without having any geotechnical problem.*

Keywords: *Sultanhisar Dam, flow, geotechnic, instability, rehabilitation*

1. GİRİŞ

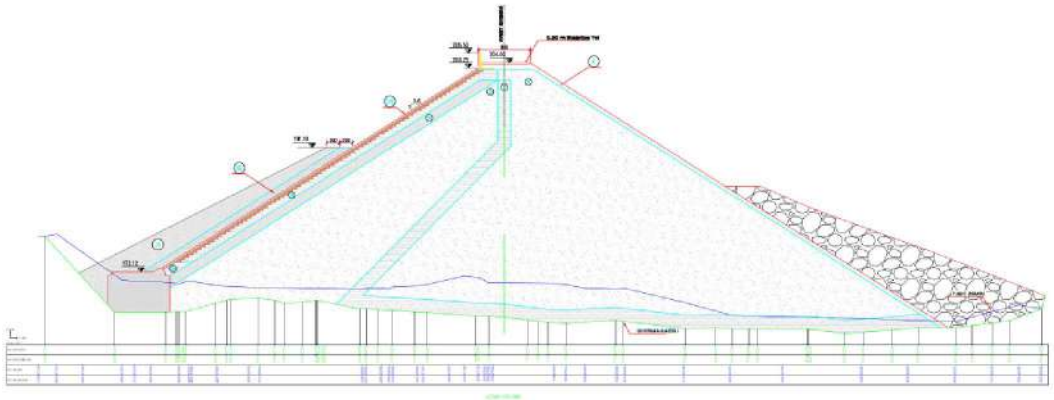
Aydın ili, Sultanhisar ilçesinin kuzeyinde Malkoç deresi üzerinde yer alır. Baraj tipi, Önyüzü Beton Kaplı Kum Çakıl Dolgu olup sulama amaçlıdır (Şekil 1). Temelden yüksekliği 42.20 m, toplam gövde dolgu hacmi 258.346 m^3 tür. Baraj imalatı yaklaşık 2 yıl içerisinde tamamlanmıştır. Yağışların yoğun olması nedeniyle yaklaşık 2 ay içerisinde dolusavak çalışmaya başlamıştır. İlerleyen zaman içerisinde gövde dolgusunun mansabında yer yer nemlenmeler oluşmuştur. Sonrasında ise gövdenin mansabında dolguda kaymalar başlamıştır. Bu çalışmada, gövde dolgusunda oluşan kaymaların nedenleri araştırılmıştır. Buna göre sol sahilde dolusavak beton kaplamalarından sızan sular ile sağ sahil yamaçlarında oluşan kaynak sularının etkisiyle gövde dolgu malzemesinin suya doygun hale gelmesidir. Gövdede oluşan kaymaların önlenmesi için öncelikli olarak baraj içerisindeki su boşaltılmıştır. Boşaltma işleminden sonra hem gövdede hem de dolusavak betonlarında incelemeler

yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda gövde ön yüz betonlarında jeoradar uygulaması yapılarak gövde altındaki boşluklar tespit edilmiştir. Ancak yapılan sondajlarda ön yüz betonunda ve altındaki dolgularda olumsuz bir durumun olmadığı tespit edilmiştir. Gövde içerisine su sızması dolusavak önünde yapılmış olan kaplama betonları ve bu betonların derzlerinden olduğu görülmüştür. Bu derzler yeni bir çalışma ile kapatılmış, betonların üzerine kaplama yapılarak geçirimsizlik sağlanmıştır. Ayrıca dolusavak teknesinde ve eşiğinde 3 sıra perde enjeksiyonu yapılmıştır. Bu enjeksiyonlar ile hem dolusavak kaplama betonlarının geçirimsizliği denenmiş hem de önceden su sızmaları sonucu dolusavak betonu altındaki boşluklar doldurularak zeminin geçirimsizliği ve taşıma gücü arttırılmıştır. Sağ sahilde ise tek sıra perde enjeksiyonu yapılarak yeraltı suyunun gövdeden uzaklaştırılması sağlanmıştır.

Bu çalışmalar sırasında gövde dolgusunda kullanılan kum çakıl malzemesinin kirlilik durumu incelenmiş, içerisindeki ince malzemenin istenilen kriterlerin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı gövdenin mansap şevine 1/2 (Düşey/Yatay) olacak şekilde destek dolgusu yapılmıştır.

2. BARAJIN PROJE ÖZELLİKLERİ

Gövde tipi	: Ön yüzü Beton Kum Çakıl Dolgu
Amacı	: Sulama
Kret Kotu	: 200.75 m
Talveg Kotu	: 165.80 m
Talvegden Yüksekliği	: 39.70 m
Temelden Yüksekliği	: 42.20 m
Kret Uzunluğu	: 218.65 m
Kret Genişliği	: 8 m
Toplam Gövde Dolgu Hacmi	: 258.346 m^3
Dolusavak	: Sol sahil (Yandan Alışlı)
Boşaltım kanalı	: Dikdörtgen Kesitli Betonarme
Boyu	: 71.80 m
Derivasyon Kondüvisi	: Sol Sahil (DSİ,2012a-DSİ,2013a)



Şekil 1. Baraj gövdesinin en kesiti (DSİ Uygulama Projeleri).

3. BARAJ YERİNİN JEOLOJİSİ

3.1. Genel Jeoloji

İnceleme alanı Büyük Menderes Masifi'nin kuzey kanadı üzerinde bulunmaktadır. Menderes Masifi (MM), Türkiye'nin batısında Alpin Orojenik Kuşağı içerisinde geniş alanda mostraları görülen metamorfik bir komplekstir (DSİ, 2012a-DSİ 2013a).
İnceleme alanı tabanındaki birimler yaşlıdan gence doğru;

a) Paleozoyik yaşlı metamorfik kayaçlar,
b) Neojen yaşlı tortul kayaçlar,
c) Kuaterner yaşlı eski alüvyon, alüvyon, killi yamaç molozu ve traverten olarak yer almıştır.

2.1.1. Metamorfik kayaçlar
Paleozoyik yaşlı metamorfik kayaçların; çekirdeğini gnays türü kayaçlar oluşturmaktadır. Çekirdekte yer alan gnaysların kenar zonlarına gidildikçe kaya türleri değişikliğe uğramakta, önce şist (mikaşist, kalkşist, killi şist, klorit şist, granatlı şist) daha sonra da mermer türü kayaçlara geçiş yapmaktadır. Proje alanımızda gölalanı içerisinde mostraları görülür.

2.1.2. Neojen yaşlı tortul kayaçlar
Sultanhisar Barajı aks yeri bu birim üzerinde yer alır. Bölgede meydana gelen tektonizma sonucunda oluşan çökelme ortamlarında istiflenmiştir. Genel istiflenme, çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı, kiltaşı ve marn şeklindedir. Metamorfik serilerle uyumsuz olan bu tortul kayaçlar içerisindeki jipsli seriler evaporasyona bağlı olarak gelişmiştir. Yine zaman zaman önemli sayılabilecek kömür oluşumları gözlenmektedir. Bu özellikleri ile bölgenin tamamına yakınında görülen Neojen tortulları gölsel, karasal çökelme ortamını belirlemektedir.

3.1.3. Traverten, alüvyon ve yamaç molozu
Sultanhisar Barajı sağ yakasında talveg kotonun üstünde, gövde yerleşim alanının dışında traverten haritalanmıştır (DSİ, 2012a-DSİ 2013a). Neojen birimlerin üstünde yer alan traverten oluşumlarının kalınlıkları en fazla 5.00-10.00 m. arasındadır. Sultanhisar Barajı'nın yapımının planlandığı Malkoç Çayı üzerinde, aks yerinde (talvegde) su akışının hızlı olması nedeniyle kalın alüvyon birikimi bulunmamaktadır. Killi yamaç molozu ise inceleme alanı ve çevresinde kalınlığı alttaki jeolojik birimlere ve topografik yapıya göre değişmektedir. Çoğunlukla killi, siltli, kumlu, çakıllı ve bloklu olarak gözlenmiştir.

3.2. Aks Yeri ve Göl Alanında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar

Baraj yerinde; baraj plint betonu ekseni üzerinde 5 adet olmak üzere toplam 12 adet temel sondaj kuyusu açılmıştır. Sultanhisar Barajı ile ilgili olarak toplam olarak 254 m derinlikte açılan temel sondaj kuyularından, baraj plint betonu ekseni üzerinde açılan kuyularda her 2 m'de bir basınçlı su testi (BST) deneyi yapılmıştır. Ayrıca gövde altında kalacak kuyularda presiyometre deneyleri yapılmıştır. Baraj yeri plint betonu ekseninde açılan temel sondaj kuyularında yapılan basınçlı su deneyleri sonucunda elde edilen geçirimlilik değerleri dikkate alınarak enjeksiyon projesi yapılmıştır. Gövde plint betonu altında yapılacak olan perde enjeksiyonu 3 m (üç metre) aralıklı ve tek sıra olarak projelendirilmiştir. Enjeksiyon derinliği talvegde ve sol yakada 30 m olacak şekilde, sağ yakada ise enjeksiyon derinlikleri 20-25 m olarak tespit edilmiştir. Ayrıca perde enjeksiyonunun her iki yanında olmak üzere 3 m aralıklı, çift sıra olarak, 5 m derinlikte kapak enjeksiyonu projelendirilmiştir.

Dolgu malzemesi olarak A-geçirimli malzeme alanı belirlenmiştir. Malzeme alanında 43 adet araştırma çukuru açtırılmış olup bunlardan 8 adedinden örnek alınmıştır. Malzeme alanının ortalama dağılımı;
% 10.49 ince malzeme,% 58.86 kum,% 30.65 çakıl şeklindedir.

A-geçirimli malzeme alanından üst kotlardan 0.30 cm sıyırma, alt kotlardan 200 cm sıyırma ile ortalama 12 m derinliğinde kazı ile 360 m^3 geçirimli ve filtre doğal yapı malzemesi alınabileceği planlanmıştır (DSİ 2012b-DSİ 2013b).

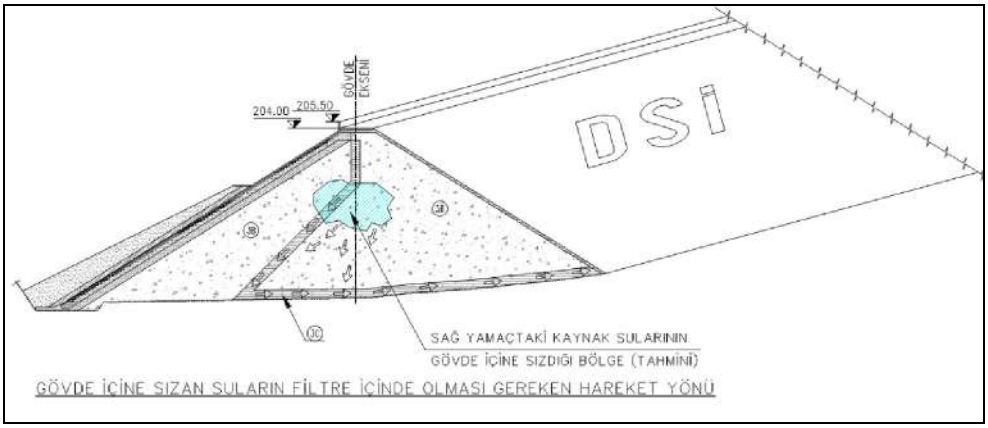
Şekil 2. İmalat sonrası gövdenin mansaptan görünüşü.

4. İMALAT SONRASI OLUŞAN KAYMALAR

Baraj imalatı yaklaşık 2 yıl içerisinde tamamlanmış olup (Şekil 2) su tutulduktan sonra yağışların yoğun olması nedeniyle yaklaşık 2 ay boyunca dolusavak çalışmaya başlamıştır. İlerleyen zaman içinde gövde dolgusunun mansabında yer yer nemlenmeler oluşmuş ve sonrasında gövdenin mansabından dolguda kaymalar başlamıştır. İmalatları tamamlanan ve su tutma aşamasında olan barajda 31.03.2018 tarihinde sol sahilde derivasyon-dip savak kondüvisi üzerinde mansap şevinde ani bir kayma meydana gelmiştir (Şekil 3).

Şekil 3. İmalat sonrası gövde mansabında oluşan kaymalar.

Kayma meydana geldikten sonra gövde üzerinde 13 farklı noktadan su çıkışları gözlemlenmiş ve bu çıkışlar sürekli kontrol altında tutularak durum gözlemlenmiştir. Gövde dolgusu içerisindeki filtre yolu ile bu sızan suların dereye drenajı düşünülmüştür (Şekil 4). Ancak bu filtrenin işlevini görmemesi sonucu gövde içinde sol sahile doğru hareket ederek gövde dolgusunda doygunluğa neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Gövde içine sızan suların filtre içinde olması gereken hareket yönü (DSİ Uygulama Projeleri).

Bu tespitlerin yanı sıra gövde dolgusunda kullanılan kum çakıl malzemesinin kirlilik durumu incelenmiştir. Bu amaçla gövde dolgu malzemesinde Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya ve Zemin Mekaniği laboratuvarında yapılan deneylerde ince malzemenin istenilen kriterlerin üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Çobanoğlu ve Bülbül, 2018).

Ocaktan alınan numunede; çakıl oranı % 41.11, kum oranı % 38.16, ince tane oranı (kil+silt) % 20.73. gövde mansap dolgusundan alınan numune; çakıl oranı % 38.57, kum oranı % 41.60, ince tane oranı (kil+silt) % 19,83 olarak belirlenmiştir.

Kıvam parametreleri ile elde edilen plastisite indisi değerleri Leonard (1962) sınıflaması kullanılarak "Az Plastik" olarak tanımlanmıştır. Yapılan deney sonuçları, her iki grup malzeme için de USCS tarafından tanımlanmış zemin sınıfının "SC (siltli kumlar, kötü derecelenmiş kum-kil karışımları)" olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışma kapsamında dolgu malzemesinin permeabilitesinin belirlenmesi amacıyla mansap malzemesinden alınan örnek üzerinde düzen seviyeli permeabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Ortalama permeabilite katsayısı $6.96*10^{-5}$ cm/sn olarak elde edilmiştir. Sonuçlar malzemenin "Yarı Geçirimli" sınıfında yer aldığını ortaya koymaktadır (Çobanoğlu ve Bülbül, 2018).

5. BARAJDA SU TUTULABİLMESİ İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

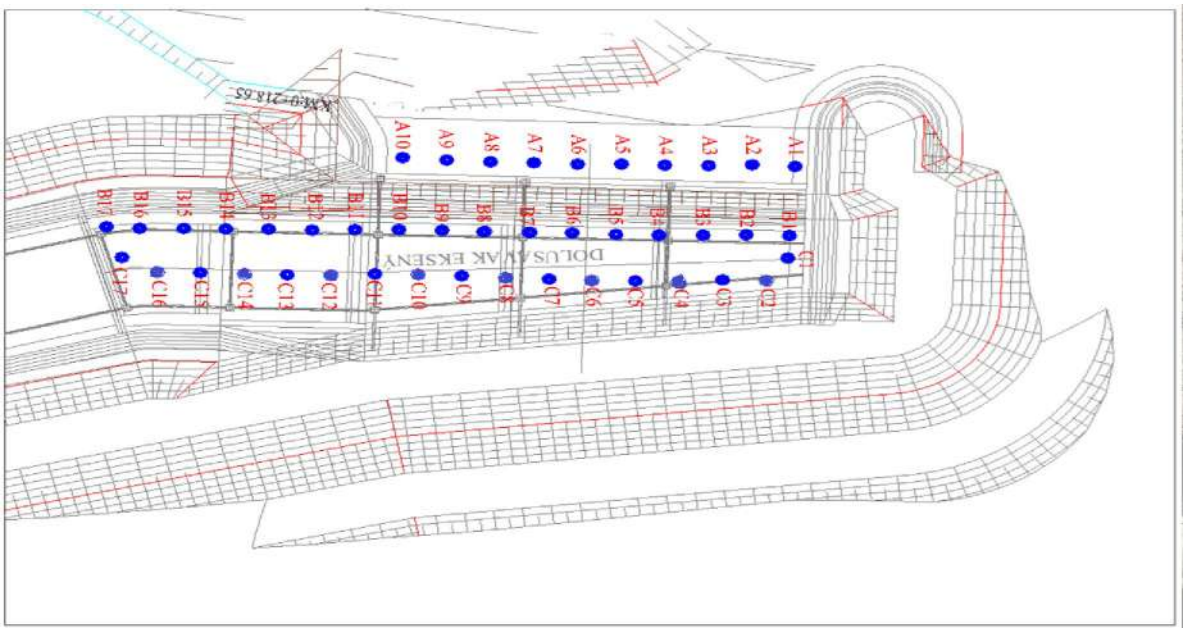
Gövde dolgusunda kullanılan malzemenin tanımlanmasından sonra gövdede oluşan kaymaların önlenmesi için öncelikli olarak baraj içerisindeki su boşaltılmıştır. Boşaltma işleminden sonra gövdede oluşan kaymaların nedenleri araştırılmıştır. Buna göre ön yüz betonundan ve dolusavak ön yüz kaplama betonundan sızan suların olabileceği, sağ sahilde gövdenin mansap kısmındaki yamaçlardan gelen suların gövde içerisine girerek gövde dolgusunun kaymasına neden olabileceği düşünülmüştür.

Öncelikle sızan ve bundan sonra sızabilecek olan suların gövdeden uzaklaştırılması ve baraj gövdesinin emniyetinde herhangi bir sorun oluşmaması için talveg bölgesinde gövdeden sızan suların drenaja olanak sağlayacak şekilde taban genişliği 4 m olan ve geçirimli malzemeden oluşan drenaj kanalı oluşturulması gerekli görülmüştür. Drenaj kanalının uzunluğu mansap şartını sağlayacak şekilde yerinde yapılmıştır.

Yapılan incelemeler sonucunda gövde ön yüz betonlarında Jeoradar uygulaması yapılarak gövde altındaki boşluklar tespit edilmiştir. Sultanhisar Barajının gövdesinin GPR yöntemi araştırılması yapılmıştır. Araştırma da 400 MHz merkez frekanslı anten tercih edilmiş ve 5 m derinliğe kadar gövde içi görüntülenmiştir. Gövdenin tamamı paralel hatlar boyunca taranmış ve 3 boyutlu model oluşturulmuştur. Elde edilen bu 3 boyutlu modelden hareketle ön yüz betonu ve gövde içi yapıların görüntülenmesi yapılmıştır. Jeoradar ile yapılan bu çalışmanın yanı sıra kritik kesitlerde ön yüz

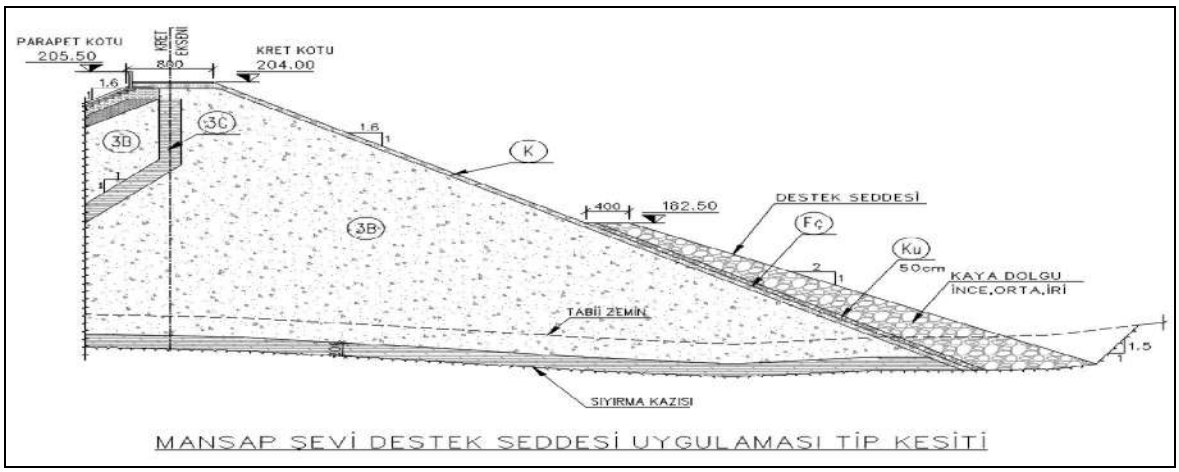
betonda yapılan sondajlarda ön yüz beton ile altındaki dolgularda olumsuz bir durumun olmadığı tespit edilmiştir.

Dolusavak bölgesinde yapılan enjeksiyonlarda (Şekil 5) dolusavak kaplama betonu ve beton dezlerinden enjeksiyonların çıkması sonucu su sızmalarının kaplama betonları ve bu betonların derzlerinden olduğu görülmüştür. Bu derzler yeni bir çalışma ile kapatılmış, betonların üzerine kaplama yapılarak geçirimsizlik sağlanmıştır. Ayrıca dolusavak teknesinde ve eşiğinde 3 sıra perde enjeksiyonu yapılmıştır. Bu enjeksiyonlar ile hem dolusavak kaplama betonlarının geçirimsizliği denenmiş, hem de önceden su sızmaları sonucu dolusavak betonu altındaki boşluklar doldurularak zeminin geçirimsizliği ve taşıma gücü arttırılmıştır. Sağ sahilde ise tek sıra perde enjeksiyonu yapılarak yeraltı suyunun gövdeden uzaklaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 5. Dolusavak tekne bölgesi enjeksiyon planı.

Baraj gövdesine gelen sular enjeksiyon yapılarak sağ ve sol sahilde uzaklaştırıldıktan sonra baraj gövdesinin stabilizesi incelenmiştir. Gövde mansap şevinin güvenliğini artırmak için, gövde mansap topuğundan DSİ yazısının yaklaşık 5 m altına kadar, en az 4 m genişliğinde palye ile başlayarak 2Yatay/1Düşey eğimle destek seddesinin yapılması önerilmiştir. Destek seddesinin dolgusu, gövde dolgusu filtrelerinden atılan sızıntıları geçirecek şekilde kaya dolgudan oluşma, sedde dolgusunun en altında, mevcut gövde kesiti üst tabakasını oluşturan koruyucu örtünün içini dolduracak şekilde filtre çakıl uygulanmıştır. Filtre çakıldan sonra 50 cm genişliğinde Kaya ufağı zonu yapılmıştır. Kaya ufağının üzerine inceden orta ve iriye doğru sıralanacak şekilde kaya dolgu malzemesi yapılmıştır. Böylece mansaplanma sırasında küçük çaplı killi ve siltli zonların gövde dışına kaçışları engellenmiş olacaktır. Destek dolgusu gövde mansap şevini korumak amaçlı talvegden 185 m kotuna kadar 1Düşey /2Yatay eğimle kaya dolgu ile desteklenmiştir (Şekil 6,7).



Şekil 6. Mansap şevi destek seddesi uygulaması tip kesiti (DSİ Uygulama Projeleri).

Şekil 7. Gövde destek dolgusu tamamlanmış hali.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sultanhisar Barajı memba dolgusunda meydana gelen kaymaların nedeni, dolusavak ön kaplama betonlarında oluşan su sızmaları ve baraj sağ sahilindeki kaynak sularının gövde içerisine girmesi sonucu oluşmuştur.

Dolusavak kaplama betonlarındaki su sızmaları kimyasal katkı maddeleri kullanılarak geçirimsizlik sağlanmıştır.

Dolusavak eşik bölgesinde su sızmalarına bağlı olarak oluşan boşluklar perde enjeksiyonları yapılarak doldurulmuştur. Sağ sahildeki kaynak sularının gövde içerisine girmemesi için tek sıra perde enjeksiyonu yapılmıştır. Bu enjeksiyonlarda 1940 m enjeksiyon kuyusu yapılmıştır. Bu kuyularda sol sahilde: çimento; 150,443 ton bentonit; 1,486 ton katkı; 1,479 ton, sağ sahilde çimento; 92,192 ton bentonit; 0,941 ton katkı; 0,941 ton malzeme kullanılmıştır.

Gövde mansap şevinin güvenliğini artırmak için gövde mansap topuğunda kaya dolgu yapılmıştır. Bu dolgu için 15.000 m^3 kaya malzeme kullanılmıştır.

Bu işlemlerden sonra barajda tekrar su tutulmuş olup gözlemlerimiz devam etmektedir.
Yandan alışlı dolusavak yapılarında eşik bölgesinde ve bu eşiğin önünde yapılan betonlarda ve anolar arasındaki derz yerlerinde geçirimsizlik kesinlikle sağlanmalıdır. Bu bölgede beton imalatı tamamlandıktan sonra enjeksiyonların yapılması daha uygun olacaktır. Bu durum, beton ile zemin arasındaki boşlukları doldurduğu gibi betonun ve derzlerdeki boşlukların geçirimliliği konusunda bilgi vermektedir.

Bu betonlardan olası su kaçaklarının gövde üzerinde borulanmaya neden olmaması için yapılan filtre çakıl (3C) zonu standartlara uygun yapılmalıdır.

Gövde dolgusunda kullanılan kum-çakıl dolgu malzemesinin granülometrik dağılımına göre dolgu şev eğimleri belirlenmelidir. İçerisindeki ince malzeme miktarı standartlar içerisinde kalmalıdır.

Malzeme ocakları belirlenirken ocak içerisindeki ince malzeme dağılımı mutlaka belirlenmeli, ocak işletmesi sırasında ince malzeme içeren seviyeler ocaktan sıyrılarak başka yerlerde değerlendirilmelidir.

7. KAYNAKLAR

DSİ, 2012-a. Sultanhisar Barajı Planlama Aşaması Jeoteknik Etüt Raporu (Yayınlanmamış), DSİ 21. Bölge Müdürlüğü - Dolsar Mühendislik, Ankara.

DSİ, 2012-b. Sultanhisar Barajı Planlama Aşaması Doğal Yapı Malzemeleri Etüt Raporu (Yayınlanmamış), DSİ 21. Bölge Müdürlüğü - Dolsar Mühendislik, Ankara.

DSİ, 2013-a. Sultanhisar Barajı Kesin Proje Aşaması Jeoteknik Etüt Raporu (Yayınlanmamış), DSİ 21. Bölge Müdürlüğü - Egezem Mühendislik, Ankara.

DSİ, 2013-b. Sultanhisar Barajı Kesin Proje Aşaması Doğal Yapı Malzemeleri Etüt Raporu (Yayınlanmamış), DSİ 21. Bölge Müd - Egezem Mühendislik, Ankara.

Çobanoğlu, İ, Bülbül A, 2018. Dolgu Barajlarda Gövde Malzemesine Ait Jeolojik ve Jeoteknik Özelliklerin Baraj Stabilitesi Açısından Önemi. 5.Uluslararası Baraj Güvenliği Sempozyumu Bildiri Kitabı, İstanbul-Türkiye, Cilt-3,1188-1198.

Leonards. G.A.(Editör),1962. Foundation Engineering, Mc. Graw Hill Book Comp. 1136p.

Kastamonu-Küre Bakibaba Yeraltı İşletmesinin Tahkimat Sistemlerinin Değerlendirmesi

Evaluation of Support System on Kastamonu-Küre Bakibaba Underground Mine

C. Uçar[1,*], G. Şans[2], H. Tunçdemir[1]

[1] İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, Maslak, İstanbul.
[2] İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, Maslak, İstanbul.
*(*ucarc16@itu.edu.tr - cerenucar1988@gmail.com)*

ÖZ: Bu bildiride, Eti Bakır A.Ş. Bakibaba Yeraltı Bakır Madeni' nin Blok-4 kesimine ait tahkimat tasarımına etken jeomekanik koşullar değerlendirilmiştir. Çalışmada, yan kayacı bazalt olan bakır madenine ait bir açıklık incelenmiştir. Bu kademenin çevresinde cevher arama amaçlı yapılmış B-131 numaralı sondaj ve bu sondaja ait fiziko-mekanik laboratuvar deney sonuçlarından faydalanılmıştır. Yeraltı jeolojik modeline göre siyah şeyllerin bulunduğu batı kesimleri çok zayıf dayanımlı kayalardan oluşmaktadır. Doğu bölgesinde bulunan bazaltlar cevherleşmeyle yoğun hidrotermal alterasyona uğradıkları için zayıf dayanımlı niteliktedir. Oluşturulan yeraltı jeolojik modeli için tahkimata etken jeomekanik parametrelerin seçiminde, yenilme sonrası dayanımlar hesaplanmış ve yerinde koşullara yönelik kestirimlerde bulunulmuştur. Çalışılan açıklık için en zayıf, ortalama ve en sağlam mukavemet durumlarını yansıtan yerinde koşullar, sonlu elemanlar yöntemiyle Rocscience RS2 yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Sonuçta gerekli tahkimat sistemlerinin özellikle ezik zonlara göre tasarlanması ve takip edilmesi gerektiği görülmüştür. Bakibaba Yeraltı Ocağı Blok-4 için tahkimatsız durum ve seçilen tahkimat sistemlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre her model için tahkimat sistemleri uygulanarak arazi üzerindeki etki incelenmiş ve en uygun seçenek önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: In-Situ Parametre Seçimi, Kaya Sınıflaması, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Tahkimat Sistemleri, Yeraltı Kaya Yapıları

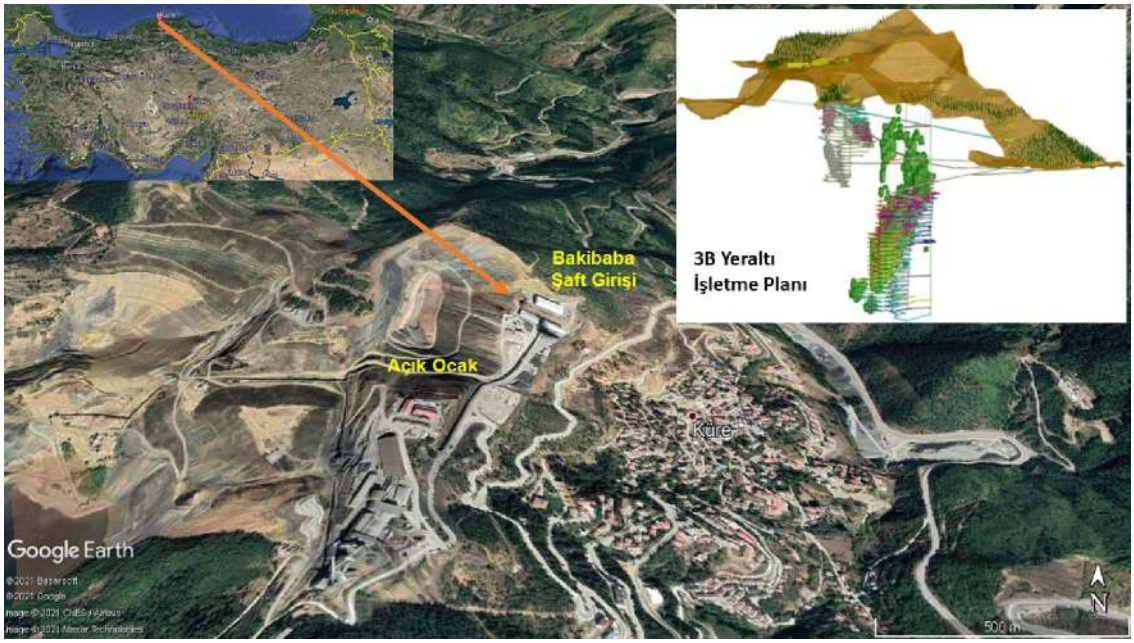
ABSTRACT: *In this paper, geomechanichal conditions of Eti Bakır A.Ş. Bakibaba underground copper mine in the location of Block 4 were evaluated in order to support design; therefore an openness in basaltic side wall isobserced. Drillhole B-131 with aim of ore exploration within the peripheral of the openness and its physico-mechnical laboratory test results are benefited. According underground geological model, black shales which is in west region is made of very weak rocks; in addition to this basalts where its location is in east are also weak rock since effect of hydrothermal alteration with mineralization. Consideration of geomechanical parameters which affect design of support systems, residual stregths are calculated and assumptions are made according to in-situ strengths in order to conceptual model. Openness is examined in terms of lowest strength, average strength and strengthest conditions with finite elements methods and for this examination RS2 Rocscience program is used. All in all, required support systems needs to design according to bruised hates. Within the examination of Bakibaba underground Block 4, comparations between without application of support and with aplication of support are made. Results of examination suggest that most convenient support system with regards to effect on ground.*

Keywords: *In-Situ Parameter Selection, Rock Classification, Finite Element Method, Support Systems, Underground Rock Structures*

1. GİRİŞ

Bakibaba Yeraltı Bakır İşletmesi, Kastamonu ilinin Küre ilçesinde bulunmaktadır. Ara katlı, dolgulu, göçertmeli üretim yöntemi kullanılan Küre bakır madeninde ilerleme, patlatma ile sağlanmakta olup her bir patlatmada 4 m ilerleme ile üretim yapılmaktadır (Şekil 1). Çalışma kapsamında madenin 4.

bloğunda açılan bir açıklık, B-131 sondajının verilerine göre değerlendirilmiştir. Bu sondaj verileri kendi aralarında dayanım açısından en sağlam, ortalama ve en zayıf olacak şekilde sınıflandırılarak üç durumda incelenmiş ve RocScience RS2 sonlu elemanlar yazılımı ile en sağlam, ortalama ve en zayıf üç model oluşturularak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Küre Bakibaba işletmesi konumu.

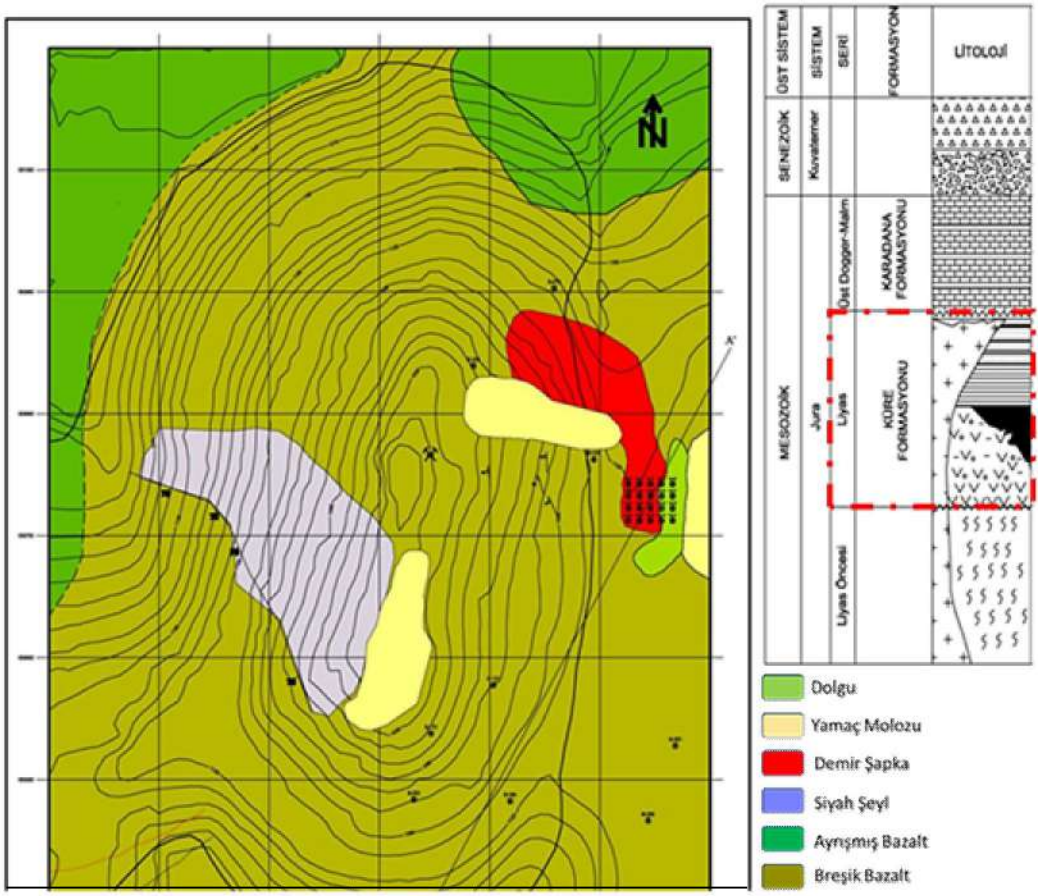
2. GENEL JEOLOJİ VE YAPISAL UNSURLAR

İnceleme alanında tabanda genellikle serpantinleşmiş peridotit ile daha az miktarlarda piroksenit ve bazaltan oluşan Jura öncesi ultrabazik kayaçlar yer almaktadır. Bunların üzerine altta bazaltik volkanitlerle başlayan ve üstte kalın bir çökel istifle biten Liyas yaşlı Küre formasyonu birimleri gelir. Daha üstte Üst Dogger-Alt Malm yaşlı kumtaşı katmanı içerikli resifal kireçtaşlarından oluşan Karadana formasyonu yer almaktadır. Ayrıca Küre formasyonuna sokulum yapan gabro,diyorit, dasit ve bazaltik dayklar da görülmektedir.

İnceleme sahasındaki en yaygın kayaç topluluğunu oluşturan Küre formasyonu, bazaltik kayaçlar üstüne ters bir fayla gelmiş olup altta bazaltik volkanik kayaçlar ile başlar üste doğru kalın bir çökel istife geçer. Bazaltik volkanik kayaçlar alt düzeylerde bazalt, yukarı doğru yastık lav ve en üst seviyelerde ise breşik karakterdedir. Çökel kayaçlar**,** siyah şeyl, silttaşı, kumtaşı ile ender olarak da üst bölümlerde kireçtaşı seviyelerinden ibarettir.

Küre bakır yatakları olarak bilinen ve başlıca pirit ve kalkopiritten oluşan bazalt ve saçınımlı sülfid yatakları, Küre ilçe merkezinin B'da yer alır ve K'den G'e doğru; Toykondu, Aşiköy, Bakibaba ve Kızılsu olarak sıralanırlar. Bu yataklar; Küre masifinin üst birimlerini oluşturan bazalt-siyah şeyl birimleri içinde yer almaktadır.

Altta bazalt, üstte şeyl olarak gözlenen ilksel volkanik ve sedimanter dizilim Küre ters fayı ile iki ana tektonik dilime ayrılmıştır. Aşıköy ve Kızılsu hattı boyunca sedimanter seri üzerine bindirmiş olan üst dilim, yükselme ve aşınma nedeniyle kendi örtüsünü kaybetmiştir. Bu dilim içerisinde yer yer gözlenen şeyl biriminin bazaltlar arasında eğim boyunca oldukça uzun devamlılıklar göstermesi üzerinde durulması gerekli önemli bir konu olarak görülmektedir. Süreksizliklerin cevherli kesimlerde kuvars ve kalsit dolgusundan oluştuğu, cevher olmayan kesimlerde ise kil dolgusuna rastlanmaktadır.



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası ve stratigrafik kesit (Demir, 2013' den derlenerek yorumlanmıştır).

Ayrışma türleri kloritleşme, breşleşme, silisleşme, uralitleşme, kalsitleşme, sideritleşme ve albitleşmedir. Sondaj karotlarındaki gözlemler, ayrışmanın yoğun olduğu kesimlerde kayacın renginin değiştiği, süreksizlik yüzeylerinin açık, cevherli hatlarda kalsit ve silis dolgulu olduğu, cevherli hatlarda ilksel dokunun çok değiştiği ve bu hattan uzaklaştıkça ayrışmanın şiddetinin azaldığını göstermektedir.

Kloritleşme dışında bütün diğer alterasyon türleri cevher yataklarına yakın, küçük, kısa dağılımlı hatlar ve mercekler oluşturmuşlardır. Çatlak pürüzlülüğünün belirlenmesi için yapılan incelemelerde açık ve dolgusuz olan çatlak yüzeylerinin sürtünme izli ve parlak olduğu görülmüştür.

Sondaj karotları üzerinde yapılan çatlak sıklığı ölçümlerinde, çatlak sıklığının çoğunlukla 14-23 adet/m olarak değiştiği belirlenmiştir. Bunların arasında yer yer 6- 11 adet/m çatlak sıklığındaki kesimlerle çok sayıda ezik ve mineralize hattın varlığı belirlenmiştir.

B-131 kuyusu için karot sandıklarında süreksizlik özellikleri değerlendirildiğinde özellikle yüzeye yakın olan 58.2 - 61 m derinliklerde yoğun ayrışma ve ezik hatlar bulunmaktadır. Özellikle 407 - 410 m derinlikler arası ve 108 - 111 m derinlikler arası yoğun ayrışmalar görülmektedir. Süreksizlik açıları çoğunlukla 31 – 60 m arasında olup çoğunlukla kalsit dolguludur. Özellikle cevherleşmenin görüldüğü kısımlarda yoğun kalsit dolguları görülmüştür.

3. KAYA SINIFLAMASI VE JEOTEKNİK PARAMETRELERİN DEĞERLENDİRMESİ

Küre bakır maden ocağının jeoteknik olarak incelenmesi için araştırma amaçlı 67 sondaj çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada ise Vardar (2011)' ın Küre bakır madeni için hazırlamış olduğu zemin etüdü

çalışmasından alınan B-131, M-262, M-263, ve MZ-304 sondajları değerlendirilmiş ve bu bildiri kapsamında incelenen açıklık için B-131 sondajının verileri kullanılmıştır.

3.1. Sondajlar

İncelenen çalışma alanında süreksizlik sıklığı 15-30 cm ve incelenen blok 4' ün RQD değeri ise Bakibaba Tahkimat Raporuna göre % 79' dur. B-131 sondajına göre ise tüm madendeki ortalama RQD değeri % 31.77' dir. Süreksizlikler, cevherli hatlarda, kuvars ve kalsit dolgulu olup cevher olmayan kesimlerde ise kil dolgusuna sahiptir. Çizelge 1 ile jeomekanik ortamlardan çok cisim ortamına ait malzemenin en sağlam, ortalama ve en zayıf seçenekler için seçilen kaya sınıflama parametrelerine ait kaya sınıflama sistemi puanları sunulmuştur.

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar çalışmaları kapsamında tek eksenli ve üç eksenli basınç ile endirekt çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Arama amacıyla cevherli bölgede yapılan B-131 sondajına ait deney sonuçları Çizelge 2 ' de verilmiş olup çalışma alanı için deney sonuçları dayanım değerlerine göre en zayıftan en sağlama doğru olacak şekilde sıralanmış ve bu doğrultuda kaya kütle sınıflama sistemleri puanları da tespit edilerek en sağlam, ortalama ve en zayıf durum seçenekleri oluşturulmuştur (Çizelge 1).

Çizelge 1. İncelenen çatlaklı ortamın kaya sınıflaması parametreleri

Parametre Türü		En Sağlam	Ortalama	En Zayıf
RMR		69	45	34
Q		8.8	1.63	0.71
GSI	GSI	64	40	30
	$GSI_{residual}$	42	24	24

Çalışma alanının mühendislik jeolojisi özellikleri; deneysel sonuçlar ve residual dayanım parametrelerine göre blok boyutu ve çatlak durum faktörü hesaba katılarak değerlendirilmiş ve genelleştirilmiş Hoek-Brown (2018) yenilme kriteri kullanılmıştır.

Çizelge 2. İncelenen çatlaklı kayanın jeomekanik parametreleri

Parametre Türü		En Sağlam	Ortalama	En Zayıf
Birim Hacim Ağırlık (MN/m^3)		0.029	0.029	0.029
Young Modülü (MPa)		16117	9647	7329
Poisson Oranı		0.25	0.25	0.25
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)		80	45	19
Endirekt Çekme Dayanımı (MPa)		7.9	4.9	1.1
İçsel Sürtünme Açısı (◦)	En Yüksek	67	51	38
	Artık	38	23	27
Kohezyon (kPa)	En Yüksek	11	7.6	3.2
	Artık	2.54	1.11	0.14

Çatlaklı kaya ortam değerlendirmesinde incelenen numunelerin tek eksenli basınç dayanımlarının kaya ortamında (in-situ) hangi değerleri alacağını görmek için Vardar (1974; 1977) bağıntısı kullanılmıştır. Bu deneysel sonuçlara dayanan bağıntıya göre kayacın yerinde dayanımı hesaplanırken anizotropi ve çatlak sıklıkları da dikkate alınmıştır. Küre bakır işletmesinde Bakibaba ocağında yapılan sondajların sonucu olarak cevher varlığı tespit edilmiştir. Bu cevher kütlesi işletilme açısından ekonomik bulunmuş ve bu cevhere ulaşmak için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında Bakibaba açık ocağının batısında bir şaft açılması ve bu şaft vasıtasıyla cevhere ulaşılması ön görülmüştür. Bu amaçlar doğrultusunda şaft ve civarının jeolojik, jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi için 30 metre derinliğinde 23 sondaj yapılmış ve çıkan veriler değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre şaft ve civar yapıların yerleşimi ile ilgili modelleme yapılmıştır.

İncelenen modellerin, tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ve Hoek-Brown parametreleri gibi mühendislik jeolojisi özelliklerinin residual dayanım değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplarda blok hacmi (V_b); eklem dalgalılığını (J_w), pürüzlülüğünü (J_s) ve alterasyonu (J_a) inceleyen eklem durum faktörü (J_c) kullanılarak GSI artık değeri ve bunun üzerinden incelenen mühendislik jeolojisi özelliklerinin residual dayanım değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3) (Cai ve Diğerleri, 2006).

Çizelge 3. İncelenen en sağlam, ortalama ve en zayıf durumlar için çatlaklı kayanın artık değerleri

GSI	GSI_r	J_w	J^r_w	J_s	J^r_s	J_a	J_c	J^r_c	$V_b(cm^3)$	$V^r_b(cm^3)$
64	42	1.92	0.96	3	1.5	0.75	5.75	1.92	12500	10
40	24	0.73	1	2	1	2	0.73	0.5	6000	10
30	24	0.6	1	2	1	2	0.6	0.5	100	10

4. AÇIM YÖNTEMİ ve TAHKİMAT SİSTEMLERİ

Ara katlı, dolgulu, göçertmeli üretim yöntemi kullanılan küre bakır madeninde ilerleme patlatma ile sağlanmaktadır. Her patlatmada 4 m ilerleme ile üretim yapılmaktadır. Küre bakır madeninde ana tahkimat elemanlarını püskürtme beton, kaya bulonları ve çelik hasırlar oluşturur. Üretim alanı açıldıktan sonra ilk olarak püskürtme beton uygulanmakta, kuruması beklendikten sonra geçici üretim alanlarına split set, kalıcı alanlara ise cable boltlar uygulanmaktadır. Kaya bulonlarına ek olarak çelik bağlar ve çelik bağların üstüne tekrar püskürtme beton uygulanmaktadır (Dereci, 2017).

İncelenen üç durum için de tahkimat sistemleri, RMR puanlarına göre oluşturulmuş olan Bieniawski tarafından önerilen tahkimat sistemlerine göre seçilmiş ve Çizelge 4 ile sunulmuştur.

Çizelge 4. Modellere yönelik seçilen tahkimat sistemleri.

Durum	Kaya Bulonu		Püskürtme Beton	Çelik Hasır
	Uzunluk (m)	Aralık (m)	Kalınlık (mm)	Aralık (cm)
En Sağlam	3	2.5	50	15x15
Ortalama	4	1.5	100	30x30
En Zayıf	4.5	1	150	30x30

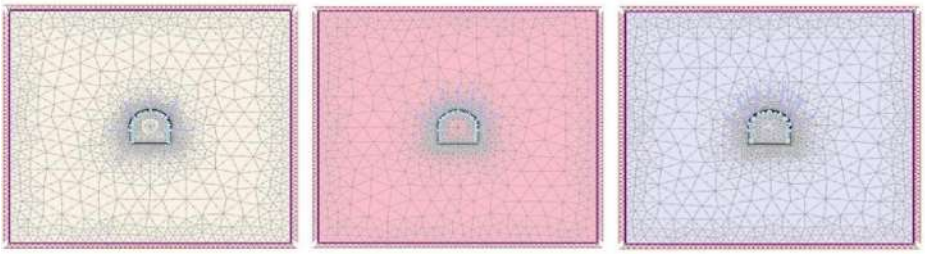
Bieniawski' nin (1989) kaya sınıflaması için sunduğu tahkimatsız ayakta kalma abağına göre, RMR puanı seçimi ile hesaplanan ayakta kalma süresi, en sağlam durum için 2 yıl 2 ay, ortalama durum için 2 gün 8 saat ve en zayıf durum için 4 saat olarak belirlenmiştir. En zayıf durumun çökme sınırına çok yakın olduğu da görülmüştür.

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAP ANALİZLERİ

En sağlam, ortalama ve en zayıf olarak çalışma alanını incelemek için oluşturulmuş olan üç durum, bir sonlu elemanlar analiz yazılımı olan RocScience RS2 yardımı ile model olarak oluşturulup hesaplanmıştır. Hesap analizlerinde plastik analiz, Hoek Brown Genelleştirilmiş Yenilme Kriteri ve Çizelge 2' deki veriler kullanılmıştır. Şekil 3' de bu üç duruma ait sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modeller sunulmuştur. Çalışma alanı içerisinde patlatma yapılarak üretim sağlanmış olduğundan, uyarılmış (induced) yük uygulanmış ve tahkimat uygulamasından önce oluşacak yer değiştirmeler RS2 programında on bir aşamada incelenmiş ve tahkimat sistemleri on birinci aşamada uygulanmıştır.

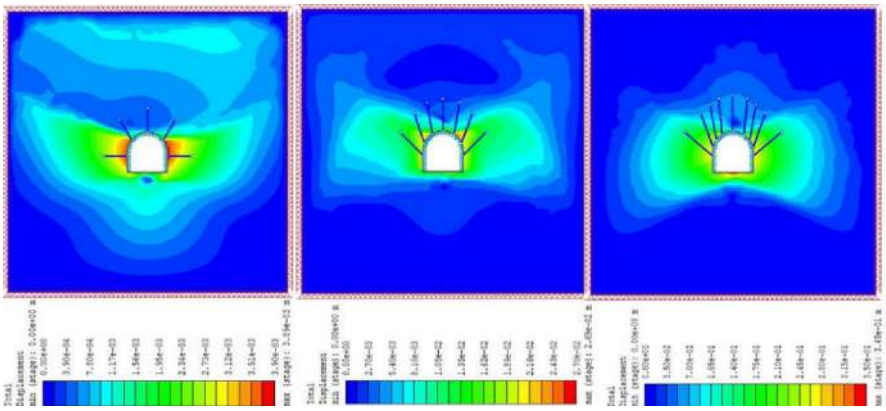
Plastik bölgenin yarı çapı ve maksimum yer değiştirme miktarı kullanılarak açıklığın patlatmadan sonraki rahatlama aşaması belirlenmiştir. Böylelikle üç durum için oluşturulan üç model; patlatma sonrası ilk aşama, açıklığın rahatlama aşaması ve tahkimatlı aşama olmak üzere üç aşamada

değerlendirilmiştir. Şekil 4' de sonlu elemanları yöntemi hesap kesitlerinde tahkimat uygulandıktan sonraki yer değiştirmelerin dağılımlarının ve Şekil 5' de de üç modelde üretim galerisi çevresindeki tahkimatlı, rahatlama ve patlatma sonrası aşamalarına yönelik yer değiştirme miktarlarının uzaklık ile değişim grafikleri sunulmuştur.



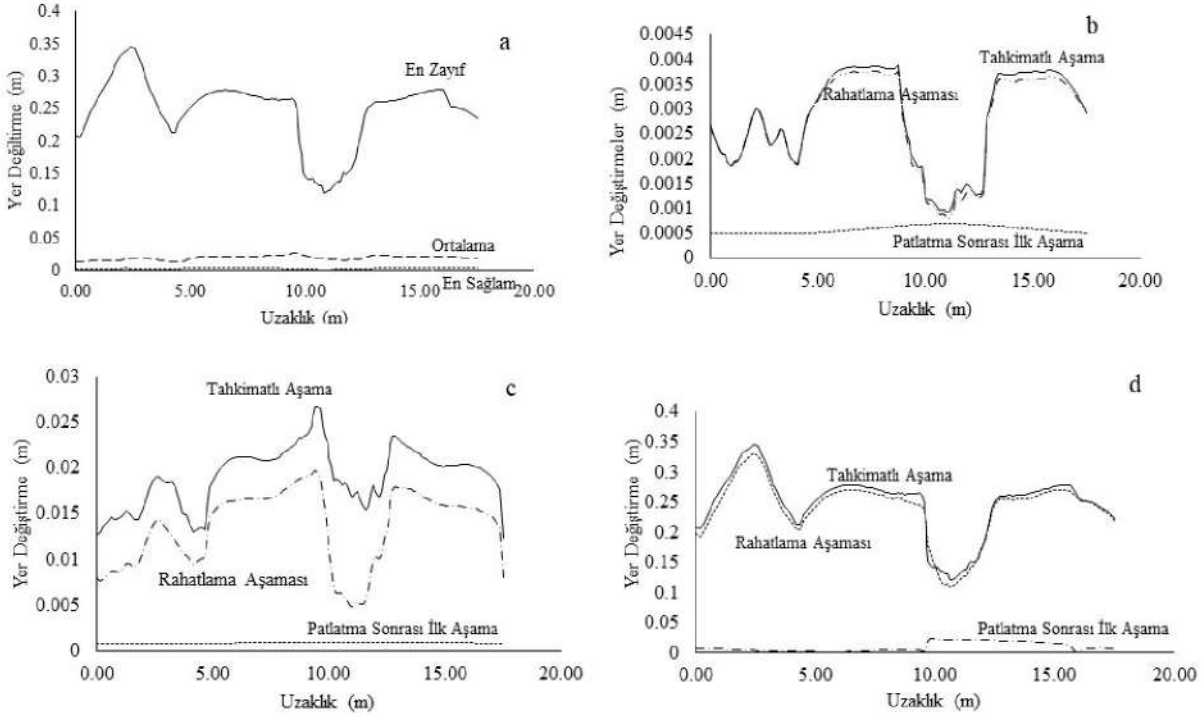
Şekil 3. En sağlam, ortalama ve zayıf modellerin RS2' de görünümü.

Model hesap sonuçlarına göre en zayıf durumda yer değiştirmeler maksimum değerdeyken kaya kütlesinin sağlamlığı arttıkça gerçekleşen yer değiştirme seviyeleri düşmektedir (Şekil 5 a). Uyarılmış (induced) yük uygulaması sonucunda, Şekil 5 b' de görülebileceği üzere en sağlam durumun modelinde sağlam kaya kütlesi uygulanan uyarılmış yükü kendi kendini taşıyabilme kapasitesine sahip oluşuyla; yükü yer değiştirmeler cinsinden aktaramamış ve açıklık rahatlama aşamasına ancak 10. aşamada ulaşılmış, 11. aşamada ise tahkimat uygulanılmıştır. Bu durumda tahkimat uygulamadan önce oluşan plastik bölgenin yarı çapı 19.3 m dir. Ön görülen kapanma miktarı ise 0.13 cm olarak hesaplanmıştır. Tahkimat uygulanmadığı durumda oluşacak maksimum yer değiştirme 0.41 cm iken tahkimat ile yer değiştirmeler 0.38 cm'ye düşürülmüş ve rahatlama durumundaki değer sabit tutulmuş olacaktır.



Şekil 4. En sağlam, ortalama ve zayıf modellerin tahkimat uygulandıktan sonraki yer değiştirme sonuçları.

Ortalama durumun modelinde uyarılmış (induced) yük uygulaması sonucunda, ortamın son aşamada duraylı olduğu fakat Şekil 5 c' de görülebileceği üzere en sağlam duruma kıyasla daha fazla yük aktarıp daha fazla yer değiştirmenin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Rahatlama aşaması, ortalama durumun modelinde en sağlam durumun modelindekine kıyasla daha zayıf bir kaya kütlesinin bulunması sebebiyle 7. aşamada gerçekleşmiş ve tahkimat uygulanana kadar yük aktarımıyla yer değiştirmeler devam etmiştir. Tahkimat uygulamadan önce oluşan plastik bölgenin yarı çapı 23.2 m dir ve gerçekleşecek kapanma ise 0.81 cm olarak hesaplanmıştır. Tahkimat uygulanmadığı takdirde oluşacak maksimum yer değiştirme 2.8 cm dir. Tahkimat uygulamasıyla gerçekleşecek yer değiştirmeler 2.6 cm ye düşürülmüştür.



Şekil 5. Üretim galerisi çevresindeki tahkimatlı ve rahatlama aşamalarına yönelik hesaplanan yer değiştirme miktarlarının uzaklık ile değişim grafikleri.

En zayıf modelde uyarılmış (induced) yük uygulaması sonucunda, ortamda yer değiştirmeleri son aşama olan tahkimat uygulama aşamasına kadar sürekli arttığı, kesinlikle duraylı olmadığı ve tespit edilen ayakta kalma süresi içerisinde mutlaka tahkimat uygulanması gerektiği gözlenmiştir (Şekil 5 d). Zayıf kaya kütlesinin etkileyen düşey gerilmeleri devamlı olarak aktarması sonucunda, açıklık 10. aşamada yer değiştirmeler açısından rahatlama aşamasına ulaşmıştır. Tahkimat uygulamadan önce oluşan plastik bölgenin yarı çapı 23.8 m dir, gerçekleşecek kapanma ise 167 cm olarak hesaplanmıştır. Tahkimat uygulanmadığı takdirde oluşacak maksimum yer değiştirme 597 cm ve ortam duraylı değilken tahkimat ile yer değiştirmeler 34 cm ye düşürülmüştür. Bu işlemler, en zayıf durum için yaşanabilecek çökme ihtimalinin tahkimat uygulandığı durumda düşey gerilmelerin sıfıra yakın değerlerine bakılarak önüne geçildiğini göstermektedir; buna karşın üretim devam ettikçe düşey gerilmelerde artış gözlemleneceğinden en zayıf durum için yenilme ihtimali tekrar açığa çıkacaktır.

6. SONUÇLAR

En sağlam durum modelinin sonuçlarından da görülebileceği üzere ortam tamamen duraylıdır. Ortamın sağlamlığı tahkimat gerektirmiyor izlenimi verse de çalışılan madenin derin bir maden olduğu ve birden fazla açıklıktan üretim yapıldığı göz önünde bulundurulduğunda etkileşimlerin söz konusu olması kaçınılmazdır. Bu açıdan tahkimatın uygulanması yerindedir.

Ortalama durumun model sonuçları; ortamın stabil, yer değiştirmelerin düşük seviyelerde olduğunu ve tahkimat elemanlarına aktarılan yükün ciddi bir seviyede olmadığını göstermektedir. Buna karşın devam eden üretim ile ortalama durum modelinde yer değiştirmelerin oluşmaya devam edeceğini ve uygulanan tahkimat elemanlarına yük aktarılacağı görülmektedir, bu doğrultuda ortalama durum modelindekine benzer çalışma zonlarına denk gelindiğinden üretim alanının takibi önem taşımaktadır. En zayıf durum modelinin sonuçlarına göre tahkimat uygulanmadığı takdirde yenilme yaşanacağı kesin olmakla birlikte uygulanan püskürtme betonun güvenlik kat sayısının düşük seviyelerde olduğu da görülmektedir. En zayıf modelde güvenlik katsayısını üçün altında olduğu noktalarda püskürtme betonda çatlamalar olmaktadır. Buna karşın uygulamada çelik hasırın üzerine tekrar püskürtme beton uygulandığından kısa vadede bu bir sorun teşkil etmeyecektir.

Sonuç olarak her üç senaryo için de gerçekleşen yer değiştirmelere, düşey gerilme seviyelerine ve tahkimat elemanlarına aktarılan yük seviyelerine bakıldığında uygulanan tahkimat uygundur. Ancak üretim devam ettikçe düşey gerilmelerde artış gerçekleşeceğinden; ortalama durum modeli için takip, en zayıf durum modeli için ise tahkimatın yenilenmesi ve güçlendirilmesi ihtiyaçları doğacaktır.

7. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, yazarları tarafından, yeraltı kaya yapıları projelendirmesi, planlanması, tasarımı ve felsefesi ile ilgili kıymetli katkıları ve yol göstericiliği ile çok değerli Hocamız Sayın Prof. Dr. Mahir Vardar' ın kıymetli hatırasına ithafen bir fırsat olarak görülmektedir. Kendilerini özlem ile anıyor ve sonsuz teşekkürlerimizi sunuyoruz.

8. KAYNAKLAR

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, New York.

Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Minami, M. 2006. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1-19.

Demir, D., 2012. Etibakır Küre İşletmesi Yeni Maden Sahasının Jeolojik ve Jeomekanik Yer Altı Modellemesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 186 sf.

Dereci, N., 2017. Eti Bakır A.Ş. Bakibaba Yeraltı İşletmesi Tahkimat Tasarımı Çalışması. Rev. 1.

Hoek, E., Brown, E.T. 2018. The Hoek Brown failure criterion and GSI. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 1-19.

Vardar, M., 1974, Felsmechanische Probleme bei grossen Steinbrüchen, Festschrift Leopold Müller-Salzburg zum 65. Geburtstag, Karlsruhe.

Vardar, M., 1977, Zeiteinfluss auf das Bruchverhalten und sekundaere Verformungen um Hohlraeume im druckhaften Gebirge, Schacht und Tunnelbau Kolloquium, 56-78, Berlin.

Vardar, M., 2011. ETİBAKIR KÜRE BAKIR İŞLETMESİ Derin Nakliye Şaft yeri ve Dolayının Jeolojik ve Jeoteknik Etüt Raporu.

Jeomekanik (Kaya ve Zemin Mekaniği) / *Geomechanics (Rock and Soil Mechanics)*

Creep Experiments On Çankırı Rock Salt: Assessment of the Utilization of Impression Creep Test as An Index Creep Test

Çankırı Kaya Tuzu Üzerinde Krip Deneyleri: İz Krip Deneyinin İndeks Bir Krip Deneyi Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi

T. Ito[1,*], N.T. Özcan[2], Ö. Aydan[1]

[1]University of the Ryukyus, Dept. of Civil Engineering, Nishihara, Okinawa, Japan
[2]Hacettepe University Dept. of Geological Engineering, Ankara, Turkey
*(*takito@tec.ryukyu-ac.jp)*

ABSTRACT: Rock salt of Çankırı of Central Turkey is well-known and there are active rock-salt mines and some remains from the period of Hittites. Rock salt blocks from one of Çankırı rock salt mines were prepared at the laboratories of Hacettepe University and short-term properties obtained from classical rock mechanical tests and a series of compression, Brazilian and impression creep tests were carried out at the University of the Ryukyus, Japan. One of the main purposes of this study is to explore the suitability of the impression creep test as an index test. So far, the results are quite promising that there is a high possibility for the utilization of the impression creep as an index creep test. The preliminary experimental results clearly demonstrated that both conventional and index tests could be quite comparable and similar type responses are observed. The authors describe these experimental studies on rock-salt samples of Çankırı under different loading conditions and discuss their implications in practice and the utilization of the impression creep tests as an index creep testing technique.

Keywords: Çankırı, rock salt, creep, impression creep, uniaxial compression, Brazilian.

ÖZ: Çankırı kaya tuzu oldukça bilinen bir kaya tuzu olup, Hititlerin kaya tuzu madenciği yaptığı tarihsel olarak bilinmektedir. Çankırı kaya tuzu numuneleri aktif bir madenden elde edildi ve Hacettepe Üniversitesinde örnek alımı yapıldı. Elde edilen kaya tuzu örnekleri üzerinde Ryukyu Üniversitesi ile Hacettepe Üniversitesi kaya mekaniği labaratuvarlarında fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine deneyler yapıldı. Bu çalışmada Çankırı kaya tuzu üzerinde tek eksenli basınç, Brazilyan çekme gerilmeleri altında krip deneyleri yapıldı. Bunun yanısıra krip deneyleri alanında indeks deney yöntemi olarak iz krip deneyinin kullanılabilirliği incelendi. Bu yazıda yapılan krip deneylerin ile elde edilen sonuçlar sunulmakta ve Çankırı kaya tuzunun uzun süreli dayanımının belirlenmesinde kullanılmakta ve tartışılmaktadır.
Anahtar Kelimeler: Çankırı, kaya tuzu, krip, iz krip deneyi, tek eksenli sıkışma, Brazilyan çekme,

1. INTRODUCTION

Rock salt of Çankırı of Central Turkey is well known and it has the remains of rock-salt mines from the period of Hittites, which came to Anatolia through Caucus to the land of Hattis and established their empire during BC 2000 and BC 1200, and modern-day underground mines. Rock salt is a well-known rock type with low permeability and high ductility to adjust itself to high pressures and stress concentrations. Therefore, it is a potential rock for the storage of natural gases as well as high level nuclear waste disposal. Therefore, the remaining mines are also precious examples for evaluating long-term response of excavations in rock salt formations.

The Rock Mechanics Laboratory of the University of the Ryukyus in Japan has recently improved their experimental facilities. As a part of this improvement program, cantilever type creep devices are acquired for carrying out creep tests on the conditions of uniaxial and triaxial compression, Brazilian, bending and double shearing tests. In addition, an impression creep device capable of applying a tip pressure up to 134 MPa for an indenter of 3 mm in diameter has been developed with a purpose as an index creep testing technique.

In this study, the authors describe a new monitoring system for continuous measurement of displacement, acoustic emissions in addition to environmental parameters, which was developed and utilized in uniaxial compression, Brazilian tensile and impression creep tests on the rock salt of Çankırı of Central Turkey. In this paper, this new monitoring system and experimental results have been explained and its utilization for evaluating long-term properties of Çankırı rock salt have been discussed.

2. CREEP TESTING DEVICES AND MONITORING SYSTEM

Rock Mechanics Laboratory of University of the Ryukyus improved their facility and new creep devices have been acquired. Figure 1a shows the cantilever type creep device with a loading capacity of 50 kN. Presently there are two creep devices with 50 kN capacity and one 0.6 kN creep device (Figure 1b). The multi-stage creep experiments are possible and the load increments can be in the order of 0.1 kN (Fig. 1a). In addition, two impression creep devices capable of applying a tip pressure up to 134 MPa tip pressure is available. The tip of the cylindrical impression rod has a diameter of 3 mm and its shape is specially designed against buckling of the rod (Fig. 1c). The creep responses of rocks having a uniaxial strength of 50-60 MPa can be evaluated through this impression device.

(a)50 kN device (b) 0.6 kN Brazilian device (c) Impression device

Figure 1. Views of creep devices with new monitoring devices.

The creep devices are equipped with displacement transducers and acoustic emission sensors, which operate independently from a conventional electrical power supply so that it is possible to monitor creep responses under any circumstance. The monitoring system is described in this section. Reliable, accurate and long-term monitoring of displacement as well as environmental parameters such as temperature and humidity is essential during creep tests. Furthermore, the power supply is another critical issue for displacement monitoring and application of the loads in the creep tests. As the authors utilize cantilever type creep devices, the load is kept constant and there is no necessity to monitor load itself. However, the authors utilize displacement transducers with a maximum capacity of 10 mm and an accuracy of 3 microns. The device operates with two A3 type alkali batteries and it is equipped with temperature and humidity sensors. The amplifier and logger unit can measure and store the displacement, temperature and humidity at a chosen time interval. The authors generally set the time interval as 10 minutes. The displacement transducers are fixed to the bottom platen and measure the deformation of samples as the relative displacement between upper and bottom platens.

Acoustic emissions (AE) occur in samples during loading and deformation process. Particularly, AE monitoring is also another important parameter during creep tests to evaluate the internal crack formation and its evolution with time. Tano et al. (2005) developed a portable AE monitoring system to monitor the rock engineering structures in long term. This system was applied in many projects in Japan, Turkey and Egypt (e.g., Tano et al. 2005, 2016; Aydan et al. 2006; Kumsar et al. 2014). This system was shown to be useful for monitoring acoustic emission creep tests (Aydan and Tano 2012). This system has been recently improved against condensation in order to eliminate noises, external

gain adjustment and power and signal check units. Fig. 2 shows the AE system and its utilization during a test.

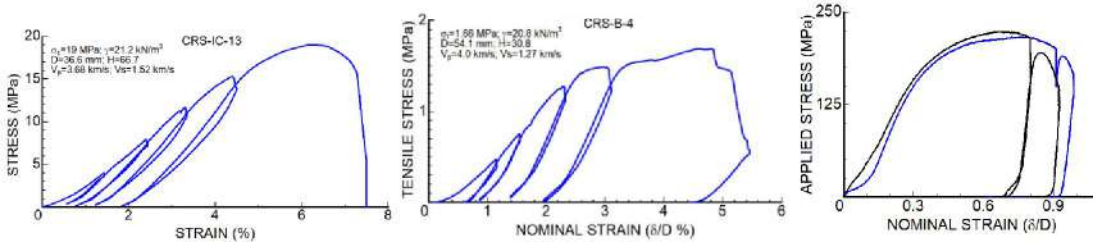
(a) (b)

Figure 2. Views of (a) Amplifier, logger unit and (b) attachment of displacement transducers, and AE monitoring unit and their attachment to rock samples during a creep test.

3. SAMPLING AND SHORT-TERM TESTS

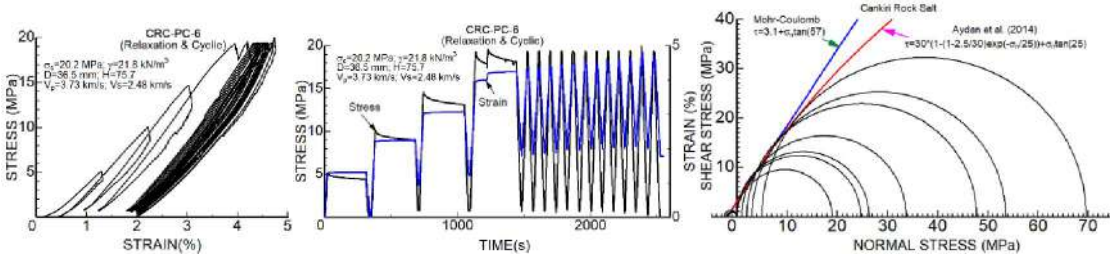
Several rock blocks were obtained from a rock salt mine in Çankırı and they were cored to obtain samples for uniaxial compression and Brazilian tests. Rectangular prismatic blocks, which were available at the mine were utilized for impression creep experiments. Cored samples were cut to designated sizes and their ends were grinded at Rock Mechanics Laboratory of Hacettepe University. Before the short-term and long-term tests, some physical properties such as unit weight, S-wave and P-wave velocity of rock salts were determined. The unit weight of the Çankırı rock salt samples ranges between 19 and 20.8 kN/m^3 with a mean of 20.1 kN/m^3. Average S-wave and P-wave velocities of the Çankırı rock salt samples were 1358.7 m/s and 3311.83 m/s, respectively. Furthermore, some samples were prepared for triaxial experiments on rock salt.

Some short-term experiments were carried out to determine mechanical properties under uniaxial compression, Brazilian tests, triaxial compression and impression tests. Figs. 3 and 4 show examples of the strain-stress responses of Çankırı rock salt samples under uniaxial compression, Brazilian impression compression tests and Triaxial Mohr-Coulomb strength envelope. As noted from the figures, Çankırı rock salt samples exhibit elasto-plastic behavior from the very low-level applied stress. The uniaxial compressive strength ranged between 19-26 MPa while the tensile strength from Brazilian test obtained to be ranging between 1.66 to 2.5 MPa. In addition, combined cyclic and relaxation tests under compression and Brazilian loading conditions were performed. Figure 3a shows the strain-stress response in cyclic and relaxation tests under uniaxial compression loading compression while Figure 4a also shows the responses in time domain. It is interesting to note that remarkable relaxation behavior and cyclic hardening of the rock salt sample is observed. As noted from Figure 4a, the cyclic test results indicated that the threshold level for time-dependent behavior was approximately 40-50% of the short-term strength, which is quite close to previous experimental results (e.g., Aydan and Nawrocki, 1998)



(a) (b) (c)

Figure 3. Responses under uniaxial compression (a), Brazilian (b) and impression (c) tests.



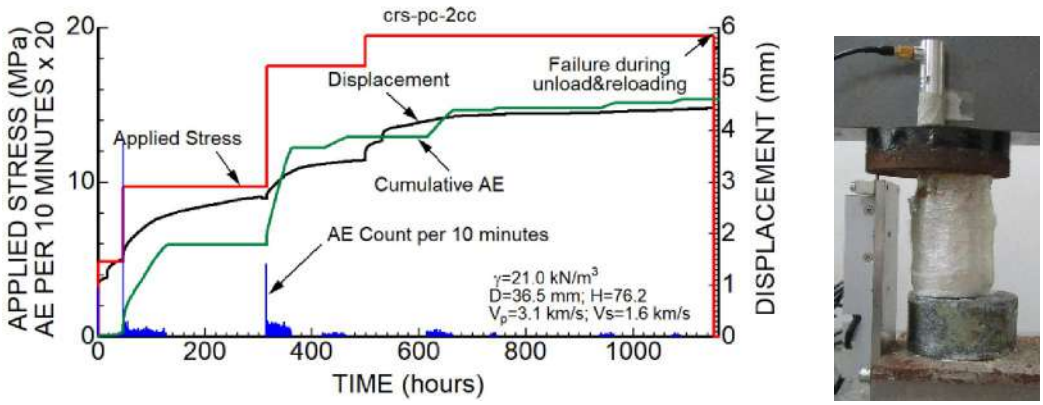
(a) Uniaxial cyclic and relaxation (b) Triaxial strength envelope

Figure 4. Cyclic and relaxation tests and triaxial strength envelope.

4. CREEP TESTS

4.1. Compression Creep Experiments

Five creep experiments have been carried out so far and Figure 5 shows one example of the responses measured displacement and acoustic emissions (AE) during a compression creep on a sample numbered crs-pc-2cc. In this particular experiment, the load was increase in steps. The compressive stress acting on the sample was 4.9, 9.8, 17.5, 19.1 MPa. The load was lowered at 69050 minutes (1150.8 hrs, 47.95 days) to obtain the permanent deformation and it was attempted to reload to the stress level of 19.1 MPa. However, the sample failed during the re-loading. When the stress level of 19.1 MPa is roughly equal to the 95 % of the short-term uniaxial compressive strength of the rock salt. The other four samples were failed when the stress was increased to 19.1 MPa. The creep duration before failure ranged between 100-400 hrs.

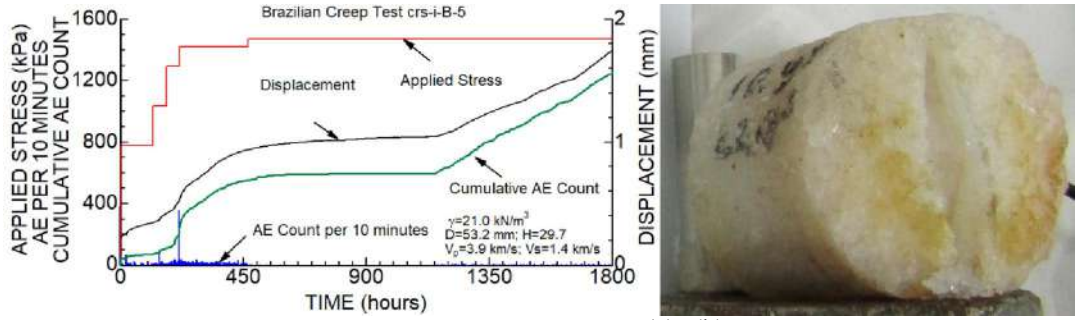


(a) (b)

Figure 5. (a) Time-displacement and acoustic emission responses of the sample denoted crs-pc-2cc and (b) sample after testing.

4.2. Brazilian Creep Experiments

In short-term experiments, the Brazilian tensile strength ranged between 1.66 and 2.5 MPa. Four Brazilian creep experiments were carried out. The lowest tensile stress was 238 kPa and the highest tensile was 1447 kPa. The failure time was less than 20 minutes. The 5th Brazilian creep experiments under a tensile stress of 1415 kPa have been continuing for more than 2500 hrs without any major fracturing with a higher deformation rate as seen in the Figure 6.



(a) (b)

Figure 6. Time-displacement and acoustic emission responses of the sample denoted crs-i-B-5 and (b) sample after testing.

4.3. Impression Creep Experiments

Impression creep experiments have been proposed an index creep testing technique and Rassoulli et al. (2010), who utilized it to determine creep characteristics of rocksalt. Aydan (2016) and Aydan et al. (2008, 2011, 2014) suggested that this method could be a useful technique as an index creep testing. However, some fundamental studies are necessary before adopting it as an index creep technique. The most important issue is how to designate the stress ratio in this technique. The short term-test using the indenter could be the simplest yet efficient procedure for evaluating the stress ratio in this testing technique. Aydan (2016) noted that the behavior of rocksalt is almost visco-plastic with negligible elastic recovery as noted in the experiments on Tuzköy rock salt from Nevşehir (Turkey). The same behavior was also observed in Çankırı rock salt samples. Four experiments were carried so far and Figure 7a shows an example of responses observed during the experiment of a sample numbered crs-pc-ic2. Figure 7b shows the state of sample after the test. As noted, permanent displacement occurred and there is a cylindrical permanent hole together with radial fractures. The plastic zone radius is roughly twice the indenter radius. The tip pressure was about 134 MPa when the experiment was terminated. It was also clearly noticed that the viscous behavior was stress-level dependent as seen in Figure 7.

5 COMPARISONS AND DISCUSSIONS

5.1 Long-term Strength

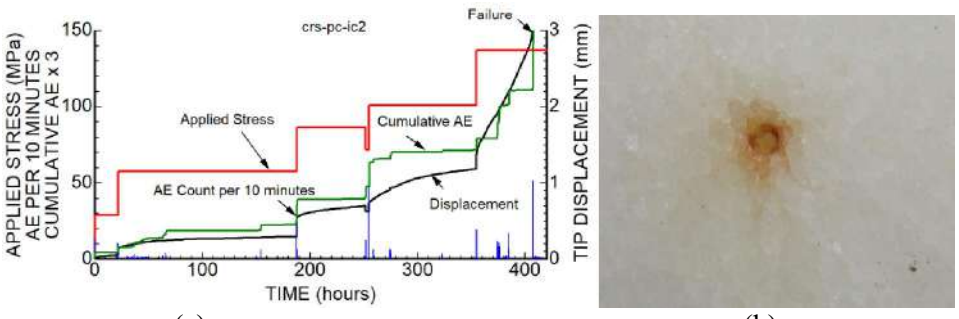
It is well known that the long-term strength (i.e. uniaxial compression strength, tensile strength or impression strength) ($\sigma_a(t)$) of rocks decreases with time and it is expressed in the following forms (Aydan et al. 1995; 1996; Aydan 2016).

Aydan et al. (1996): $\frac{\sigma_a(t)}{\sigma_s} = \alpha + (1-\alpha)e^{-b(t^*-1)}$ (1);

Aydan and Nawrocki (1998): $\frac{\sigma_a(t)}{\sigma_s} = 1 - b\ln(t^*)$ (2);

Ito et al. (2021): $\frac{\sigma_a(t)}{\sigma_s} = \alpha + (1-\alpha)(1 - b\ln t^*)$ (3)

Where α: the ultimate normalized strength of rock or creep initiation stress level; τ: the duration of short-term strength (σ_s) test; *b:* empirical constant and $t^* = t/\tau$.



(a) (b)

Figure 7. Time-displacement and acoustic emission responses of the sample denoted crs-pc-ic2 and (b) sample after testing.

Aydan et al. (2011, 2014) suggested the failure time for uniaxial compression, triaxial compression, Brazilian and impression creep experiments obey the same function when the stress ratio remains the same. Figure 8 compares the failure time of Çankırı rock salt samples tested in Brazilian, impression and uniaxial compression creep experiments. From the experimental results, it is very interesting to note that if the stress ratio remains same, the failure time of the samples irrespective of the type of experiments are very close to each other in accordance with the earlier findings (Aydan et al. 2011, 2014). Furthermore, the failure times of samples tested under uniaxial compression and Brazilian creep experiments are also similar to those of impression creep experiments.

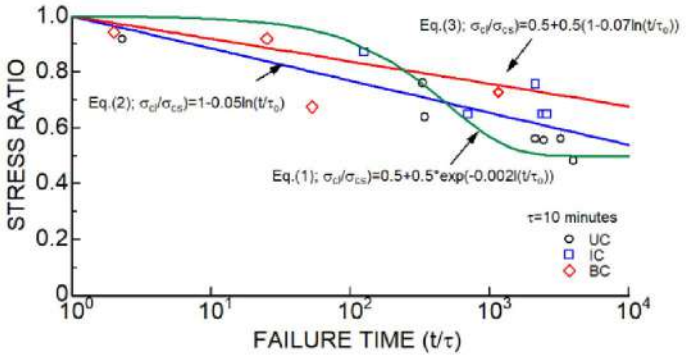


Figure 8. Comparisons of experimental results for failure time versus stress ratio with estimations obtained from Eqs. (1) to (3).

5.2 Visco-plastic Behavior

As noted from Figures 5 and 7, the recoverable strain (elastic strain or visco-elastic strain) is quite small. There are different models to describe the behaviour of time-dependent behaviour of rocks (e.g. Aydan 2016; Aydan et al. 2011; 2014); Aydan et al. 2003). In this study, the intuitive (empirical) model proposed by Aydan et al. (2003) and the rheological model suggested by Perzyna (1966) would be utilized for the interpretation of experimental responses. For a given stress level, the mathematical form of time-dependent creep strain suggested Aydan et al. (2003) and specifically given by Aydan (2016) is slightly modified to account initial deformation (elastic deformation).

$$\varepsilon_c = \varepsilon_o + A\left(1 - e^{-t/\tau_1}\right) + B\left(e^{t/\tau_2} - 1\right) \tag{4}$$

where A, B, C, τ_1, τ_2 are constants to be determined from experimental results. It should be noted that coefficients A and B and retardation time τ_1 and τ_2 would depend upon the stress level and they must be evaluated for each creep responses. However, it should be noted that this function can evaluate transient, steady and tertiary creep stages. As an alternative approach, the model proposed by Perzyna (1966) is selected. The fundamental concept is illustrated in Figure 9 (Owen and Hinton 1980; Aydan et al. 2011, 2014).

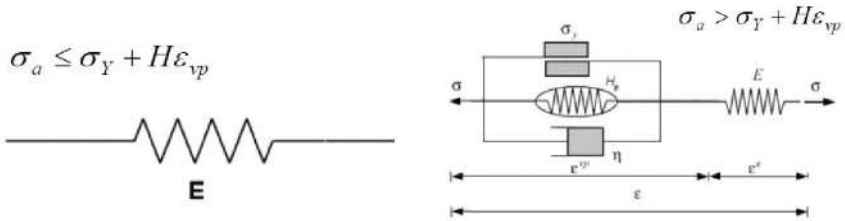


Figure 9. Elastic-visco-plastic hardening model.

As shown by Aydan et al. (2011 2014), the total creep strain according to Perzyna model can be derived as given below:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_a}{E} + \frac{(\sigma_a - \sigma_Y)}{H}\left(1 - e^{-\frac{H}{C_p}t}\right) \tag{5}$$

where $E, H, \sigma_Y, \sigma_a, C_p$ and t are elastic modulus, plastic hardening modulus, yield stress, applied stress, plastic compliance and time, respectively. An example of application of intuitive and rheological models to responses measured during a selected impression creep test (crs-pc-ic2) is shown in Figure

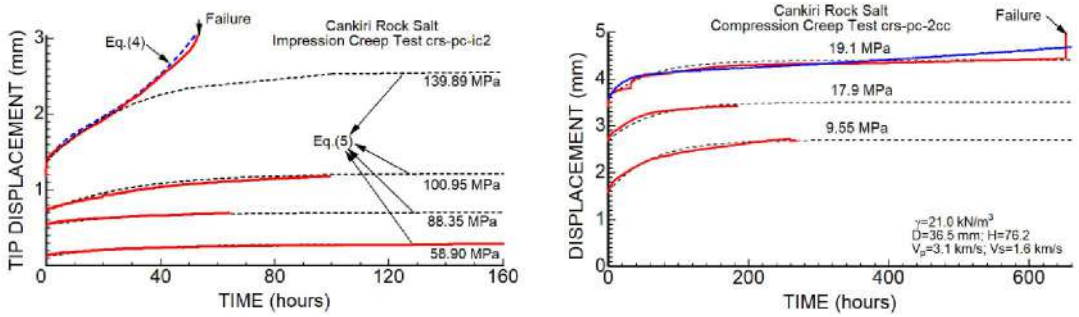
10a. The parameters of the intuitive model were obtained as

$$\varepsilon_o = 1.377; A = 0.3; B = 0.4; \tau_1 = 6; \tau_2 = 35$$

As for the rheological mode, the parameters of Eq. (5) for the impression test numbered crc-pc-ic2 are obtained as follow

$$\sigma_Y = 39.1; H = 123.7; E = 140.2; C_p = 3690.$$

As noted from the comparison of the estimations from the intuitive model and rheological models with experimental results, it is noted that the rheological model is quite consistent with converging creep responses while the response of the failing creep experiment is best represented by the intuitive model.



(a) (b)

Figure 10. Comparisons of experimental responses with those from intuitive and rheological models: (a) Impression creep tests, (b) Compression creep tests.

Next comparisons are concerned with uniaxial compression creep tests. Figure 11b shows the estimations from intuitive and rheological models to responses of a creep test (crs-pc-2cc). The parameters of the intuitive model were obtained as

$$\varepsilon_o = 3.6; A = 0.5; 0.8 = 0.4; \tau_1 = 20; \tau_2 = 1200$$

As for the rheological mode, the parameters of Eq. (5) for the compression test numbered crc-pc-2cc are obtained as follow:

$$\sigma_Y = 13.1; H = 7.5; E = 5.2; C_p = 450$$

When the creep response is convergent, the estimations from the rheological model are quite consistent with measured responses. However, it is difficult to estimate divergent response ending with failure by the rheological models. On the other hand, the intuitive model can model the divergent creep response. Nevertheless, the deformation response is somewhat different from the experimental results.

6. CONCLUSIONS

In this study, the experimental studies on creep properties of Çankırı rock salt are presented. This study is also unique in a way that three different experimental techniques are utilized for the same rock. One of the main purposes is to explore the suitability of impression creep tests as an index test (Aydan et al. 2014) and the results are quite promising that there is a high possibility for the utilization of the impression creep as an index creep test. The preliminary experimental result clearly demonstrated that both conventional and index tests could be quite comparable and similar type responses are observed. As pointed out in the previous section, the most critical aspect is the definition of the stress ratio in impression creep tests, which is easily obtained in conventional creep tests. If short-term tests on samples using the impression testing indenter are carried out, the results obtained from impression creep tests should yield almost the similar type material properties for time-dependent behavior of rocks.

7. REFERENCES

Aydan 2016. Time-Dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering, CRC Press, ISRM Book Series No.2, 246p.

Aydan, Ö. Nawrocki, P. (1998) Rate-dependent deformability and strength characteristics of rocks. *Int. Symp. On the Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks,* Napoli, 1, 403-411.

Aydan, Ö., T. Akagi, T. Ito, J. Ito and J. Sato 1995. Prediction of deformation behaviour of a tunnel in squeezing rock with time-dependent characteristics. Numerical Models in Geomechanics. NUMOG V, 463-469.

Aydan, Ö., S. Watanabe, N. Tokashiki 2008. The inference of mechanical properties of rocks from penetration tests. *5th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS5)*, Tehran, 213-220.

Aydan Ö, Rassouli F, Ito T. (2011) Multi-parameter responses of Oya tuff during experiments on its time-dependent characteristics. *Proc. of the 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, San Francisco, ARMA 11-294.

Aydan, Ö., Takashi Ito, Ugur Özbay, M. Kwasniewski, K. Shahriar, T. Okuno, A. Özgenoğlu, D. F. Malan, T. Okada (2014): ISRM Suggested Methods for Determining the Creep Characteristics of Rock, Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(1), 275-290.

Ito T., Özcan T. Nazlı, Aydan Ö, (2021). A comparative study on creep responses of rock salt of Çankırı (Turkey) under uniaxial compression and Brazilian testing conditions together with impression creep tests. *Proc. of the 15th Japan Rock Mechanics Symposium*, Osaka, JSRM,.

Owen, D.R.J., Hinton, E. 1980: Finite Element in Plasticity: Theory and Practice, Pineridge Press Ltd, Swansea.

Perzyna, P., 1966, "Fundamental problems in viscoplasticity," *Advances in applied mechanics*, 9(2), pp. 244-368.

Tano, H., Abe, T., and Aydan, Ö. (2005). *The development of an in-situ AE monitoring system and its application to rock engineering with particular emphasis on tunneling*. ITA Conference, Istanbul, 1245-1252.

Tano, H., Ö. Aydan, R. Ulusay, T. Tanaka (2016). Geomechanical investigations and pioneering monitoring attempts in Cappadocia, Turkey, EUROCK2016, Ürgüp, 1197-1202.

Muğla-Kavaklıdere Mermer Örneklerinin Dayanımının Sürekli Yenilme Durumunda Üç Eksenli Deneylerle Araştırılması

Investigation of Post-Failure Strength of Muğla-Kavaklıdere Marble by Continuous Failure State Triaxial Tests

H.M. Özkarslı[1,*], Y. Mahmutoğlu[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Maslak/İstanbul (*mertozkarsli35@gmail.com)*

ÖZ: Çalışmada, çatlaklı kaya kütlesi dayanımının sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerle araştırılması amaçlanmıştır. Model malzemesi olarak tane sınırları önceden ısıl işlem sonucunda örselenmiş ve kısmen koparılmış olan Muğla-Kavaklıdere mermeri seçilmiştir. Başlangıçta, farklı sayıda periyodik ısıl döngüye sahip örnek kategorilerinde ısıl işlem sonucu oluşan fiziksel değişiklikler belirlenmiş, daha sonra aynı örnek kategorileri üzerinde üç eksenli deneyler uygulanmıştır. Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerden her bir örneğin yenilme sonrasındaki dayanımlarına karşılık gelen yenilme zarfları $\sigma_1 = f(\sigma_3)$ elde edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde elde edilen deneysel sonuçlar uygulamada yaygın kabul görmüş olan Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılmıştır. Isıl işleme tabi tutulan örneklerin tümünde yenilmenin taneler arasında geliştiği ve doku yenilmesinin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, düşük çevre basınçları altında, yenilme zarflarının eğiminde önemli artışın olduğu belirlenmiş, sığ derinliklerde kaya kütlesi dayanımının içsel sürtünme açısı tarafından denetlendiği anlaşılmıştır. Yenilme zarfının lineer bir doğru olmadığı, bu nedenle de içsel sürtünme açısı ve kohezyonun sabit birer değer olarak alınmasının doğru olmayacağı, bu büyüklüklerin çevre gerilmesinin fonksiyonu olarak değişeceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hoek-Brown yenilme ölçütü, Isıl işlem, Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deney, Yenilme sonrası dayanım

ABSTRACT: *In this study, it is aimed to investigate the strength of the fractured rock mass by continuous failure state triaxial tests. The model material was chosen for the fractured rock of Muğla-Kavaklıdere marble, having grain boundaries were previously damaged by thermal treatment and partially detached. Initially, physical changes resulting from thermal treatment were determined for different sample categories with different number of periodic thermal cycles, and then continuous failure state triaxial tests were carried out on the same sample categories. The failure envelopes corresponding to the post failure strength of each sample obtained from the triaxial tests were compared with Hoek-Brown failure criterion accepted in geotechnical practice. It was determined that strength parameter such as internal friction angle and cohesion can be change depending on confining pressure.*

Keywords: *Post-failure strength, Hoek-Brown failure criteria, Thermal treatment, Continuous failure state triaxial test, Post-failure strength*

1. GİRİŞ

Yeraltı ve yerüstü yapıların tasarımında, kaya kütlesinin dayanım ve davranışı belirleyicidir. Bu nedenle, genellikle farklı tür, özellik ve sıklıkta süreksizlikler içeren kaya kütlesinin yenilme koşullarının bilinmesi gerekmektedir. Günümüze gelinceye değin, bu tür ortamların yenilme koşulları önemli araştırma konuları arasında yer almış, ya yeni yaklaşımlar ileri sürülmüş ya da mevcut yenilme ölçütleri tartışmaların odağını oluşturmuştur. Bu tartışmaların esas nedeni uygulamalar sırasında karşılaşılan ve ciddi sonuçlar doğuran stabilite problemleridir. Kaya kütleleri ile etkileşim sonrasında karşılaşılabilecek dayanım ve davranışın yeterli düzeyde doğru olarak önceden kestirilmesi doğayla teknik etkileşim yönteminin seçimi, sınırlandırılması ve zamanla ilişkilendirilmesi açısından önemlidir.

Geçmişten günümüze kadar yapılan uygulamalarda, jeoteknik tasarım ve pratik çözümler için Mohr-Coulomb ve Hoek Brown yenilme ölçütleri göz önünde tutulmuş ve yaygın olarak kullanılmıştır.

1970'lerde ilk kez dile getirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü, farklı zamanlarda sürekli revize edilmiş olup pratikte kabullenilmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütünün ampirik bir ölçüt olduğu, çatlaklı kayaların dayanımını kestirmede pratiklik sağladığı açıktır. Ancak, bu ölçütte önerilen ampirik katsayı ve sabitlerin fiziksel anlamları yeterince açık değildir.

Geleneksel yöntemlerden olan Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre kaya malzemesinin makaslama parametreleri (içsel sürtünme açısı ve kohezyonu) pratikte sabit değerler şeklinde ifade edilmektedir (Eşitlik 1).

$$\tau = c + \sigma . \tan\phi \quad (1)$$

Hoek ve Brown ölçütü, kaya kütlesi için dayanımın amaçlaması bakımından önemli araştırma ve deneyimlere dayanan ampirik bir ölçüttür (Hoek vd, 1980a). Lineer olmayan bu yenilme ölçütü, laboratuvardaki deney verilerinden hareketle σ_3' gerilmesinin tek eksenli dayanımı tanımlamakta tek başına yeterli olmadığı anlaşılmış ve bu ölçütün modifiye edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Bunun sonucunda modifiye edilen ölçüt aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} (m_b . (\sigma_3'/\sigma_{ci}) + s)^a \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan a, s ve m_b parametreleri Hoek ve Brown'un önermiş olduğu parametrelerdir. σ_1 ve σ_3 sırasıyla en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_{ci} ise sağlam kaya için tek eksenli basınç dayanımı değeridir. Burada sağlam kaya için önerilen *a* parametresi GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) değerinin 25'ten yüksek olması durumunda 0.5, s değeri ise 1 olarak alınması önerilmiştir (Hoek ve Brown, 1997). Kaya için ise önerilen eşitlikteki a, m_b ve s parametrelerini de göz önünde bulundurarak örselenme ile ilgili çıkarımlar yapılmış, bunlar jeolojik dayanım indeksi (GSI) ile ayrıca GSI ve D (örselenme faktörü) ile de (Hoek vd, 2002) ilişkilendirilerek tanımlanmıştır (Eşitlik 3, 4 ve 5).

$$m_b = m_i . \exp((GSI-100) / (28-14D)) \quad (3)$$

$$s = \exp((GSI-100) / (9-3D)) \quad (4)$$

$$a = 1/2 + 1/6 (e^{(-GSI/15)} - e^{(-20/3)}) \quad (5)$$

2002 yılında ilk kez dile getirilen örselenme faktörü ise burada "D" ile ifade edilmiştir. Örselenme faktörü kazı yöntemi ve kaya kütlesinin özelliğine bağlı olarak 0-1 arasında değer almaktadır (Hoek vd., 2002).

Bu bildiride, önceden fissürlü hale getirilen örnekler üzerinde laboratuvar ölçeğinde uygulanmış deneylerin sonuçları tartışılmıştır. Deney örnekleri üzerinde aynı koşullarda sürekli yenilme durumu gözetilerek üç eksenli deneyler yapılmış, örneklerin yenilme sonrası dayanım ve davranışları açıklanmıştır.

2. MALZEME VE METOT

Çalışmadaki amaç, çatlaklı kayaların dayanım ve davranışlarının özel bir deney yöntemiyle araştırılmasıdır. Bu amaca yönelik olarak, deney öncesi ısıl işleme tabi tutulan mermer örnekler tane sınırları boyunca fissürlü hale getirilmiş ve sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylere tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan farklı örnek kategorileri için elde edilen yenilme sonrası dayanım zarfları pratikte yaygın kullanılan Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılmıştır.

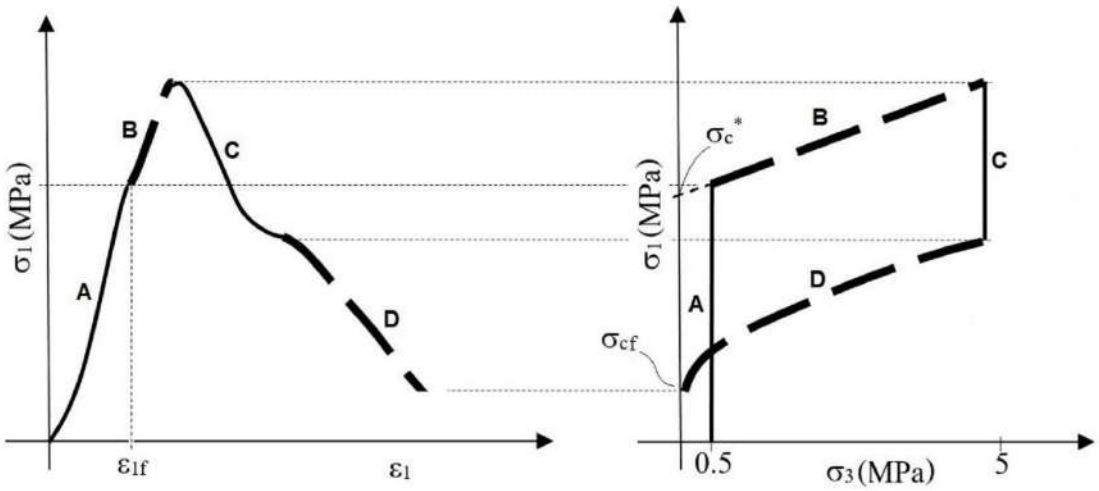
Tane sınırları önceden periyodik ısıl işlem sonucunda örselenmiş ve kısmen koparılmış Muğla-Kavaklıdere mermeri çatlaklı kaya için model malzemesi olarak seçilmiştir. Homoblastik dokuya sahip örnekler homojen özellik göstermektedir.

Eş tane boyuna sahip, düzgün şekilli ve kalsit mineralinden oluşmuştur. Oldukça iri taneli, kristalin yapıya sahip örnekler girintili çıkıntılı ve dantelsi sınırlar boyunca kimyasal olarak %99 oranında $CaCO_3$ içerir. Tane büyüklüğü 0.5-2 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Malzemede dolgu bulunmamaktadır. Isıl işleme tabi tutulan örneklerde şeker dokusu gözlenmiştir.

Seçilen örneklere öncelikle karot alma ve karot düzeltme işlemleri yapılmıştır. Burada ISRM ölçütü gözetilerek boy/çap oranı 2 olacak şekilde örnekler hazır hale getirilmiştir (ISRM, 1981). Bu işlemlerin ardından farklı sayıda periyodik ısıl döngüdeki örnek kategorileri belirlenmiş bu örnek kategorisinden orijinal numune grubu (A grubu) olarak ayrılmış diğer gruplar 400 ^{0}C'lik sıcaklıkta, farklı çevrim sayısında, 24 saatlik sürelerle ısıtma-soğutma periyoduna tabi tutulmuştur. Isıl işlemde sıcaklığın yüksek tutulması ve örnek grupları için çevrim sayılarının değiştirilmesindeki amaç yıpranmayı hızlandırmak ve kütle içerisindeki fissür sıklığını değiştirmektir. Bu uygulamanın esas nedeni ise deney malzemesi dokusunu çatlaklı kayaya benzetmektir.

Kaba taneli Muğla Mermeri örnek gruplarının ısıl işlem öncesi ve sonrasında fiziksel özelliklerinde oluşan değişiklikler öncelikle belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen örnek gruplarına ısıl işlem sonrasındaki dayanımı tespit etmek için mekanik testler uygulanmıştır. Her örnek grubundan birer örnek rastgele seçilerek tek eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuş, elde edilen dayanım ve davranışları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise her örnek grubundan ikişer numune üzerinde sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneyler yapılmış, yenilme sonrası aşamayı temsil eden dayanım zarfları farklı GSI değerleri öngörülerek Hoek-Brown yenilme zarfları ile karşılaştırılmıştır.

Uygulanan üç eksenli deneyde yükleme hızı 3.7 x 10^{-5} sn^{-1} olarak alınmıştır. Deneyde servo-kontrollü, 60-2000 kN yükleme kapasitesine sahip MTS marka hidrolik pres kullanılmıştır. NX çaplı Hoek hücresi seçilmiş olup, çevre basıncı başlangıçta 0.5 MPa değeri seçilmiştir. Şekil 1'de bu deneyin aşamaları gösterilmiştir. Burada, tek bir örneğin yenilme zarfının, yenilme noktasından itibaren çevre basıncının düzenli arttırılması sonucu buna karşılık gelen eksenel gerilme değerlerinin okunması ile yenilme zarfının elde edilmesi amaçlanmıştır. Deney sırasındaki veriler bilgisayar ve gözle yapılan okumalar ile kayda geçirilmiştir. Geleneksel üç eksenli deneylerde yenilme zarfı aynı malzemeden alınan çok sayıdaki örnek için elde edilen sonuçlardan hareketle belirlenirken, sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerde tek örnek için yenilme zarfı elde edilebilmektedir (Kovári vd., 1983a).



Şekil 1. Sürekli yenilme durumunda üç eksenli eşzamanlı deney verilerinin davranış ve dayanım düzlemlerinde gösterimi (Mahmutoğlu ve Şans, 2020).

Şekil 1'de şematize edilerek gösterilen deney aşamaları;

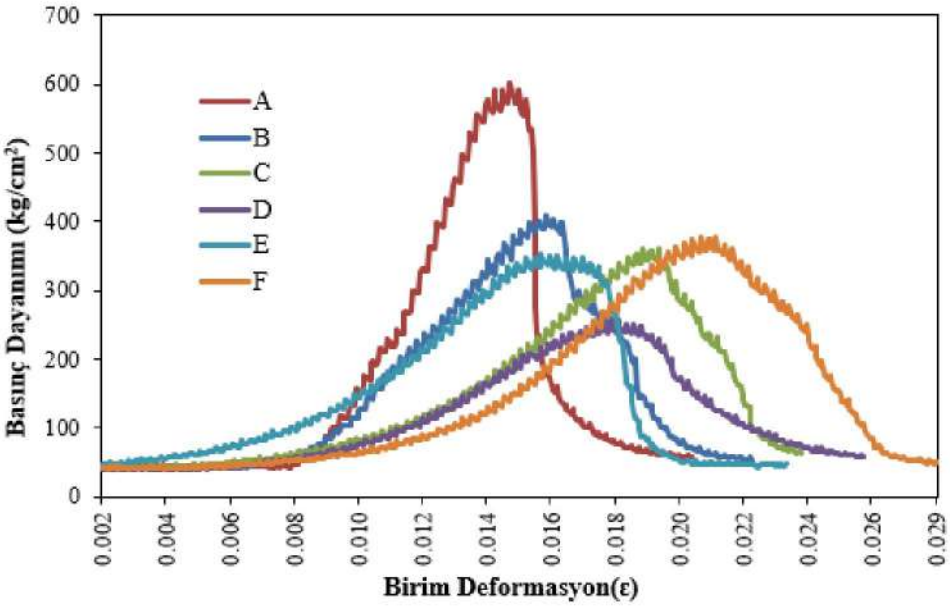
A) Örneğin yenilme anına kadar uygulanan çevre basıncı (σ_3) 0.5 MPa olarak sabit tutulmuştur.

B) Yenilme anından itibaren gerilme-deformasyon diyagramında eksenel gerilmeyi (σ_1) doğrusal arttıracak şekilde, çevre basıncı düzenli olarak 5 MPa'ya kadar artırılmıştır.

C) Bu aşamada 5 MPa'lık sabit çevre gerilmesi altında, örnekler yenilmeye maruz bırakılmış ve gerilme deformasyon diyagramında rezidüel dayanıma kadar yenilme sürdürülmüştür. Diğer bir ifade ile yenilme sonrası gerilme-deformasyon eğrisinde eksenel gerilme sabit değere ulaşıncaya kadar çevre gerilmesi maksimum değerde sabit tutulmuştur.

D) Bu noktadan sonra (D) ise çevre gerilmesi düzenli olarak sıfıra varıncaya kadar düşürülmüştür. Her bir deney için eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon (σ_1) ve eksenel gerilme-çevre gerilmesi verileri belirli aralıklarla okunarak kaydedilmiştir. Sonuçta her bir örnek için yenilme öncesine ve yenilme sonrasına karşılık gelen eğriler deney süresince okunan değerler kullanılarak elde edilmiştir (Kovári vd., 1983a; Kovári vd., 1983b).

Şekil 2'de görüldüğü üzere laboratuvar deneylerinden elde edilen tek eksenli basınç dayanım verilerine göre A grubu örnekler hiçbir şekilde ısıl işleme tabi tutulmadığı için dayanımı da diğer gruplara nazaran yüksek çıkmıştır. A grubu örneklerden D grubu örneklere doğru dayanımlarımda düzenli bir azalış görülmektedir. Ancak E ve F grubu örneklerde, örneklerin tanesel boyutlarındaki farklılık, mikro-çatlak gelişiminin diğer örneklere nazaran daha düşük olması dayanımlarında artışa neden olmasına yol açmıştır. Bu örnekler gerek mikroskop altında bakılmış gerekse tüm fiziksel parametreleri belirlenmiş olup yukarıdaki sebepler doğrultusunda ve örneklerin hepsinin tam homojen yapıya sahip olmaması sebebiyle az da olsa farklılık göstermiştir.



Şekil 2. Deney örneklerinin tek eksenli basınç dayanım eğrileri.

Çizelge 1'de ise ısıtma-soğutma döngü sayıları belirtilmiştir. Döngü sayıları A grubu örnekler için orijinal, hiçbir şekilde ısıl işleme tabi tutulmadığı için 0, sırasıyla B grubu örnekler 400 ^{0}C'lik etüvde 24 saat süre (etüvün ısınma süresi de dahil -1saat) bekletilmiştir ve bu 1 döngü sayılmıştır. C grubu örnekler 2 gün, D grubu örnekler 3 gün, E grubu örnekler 4 gün ve F grubu örnekler 5 gün ısıtma-soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Çizelge 2'de model malzemeyi temsil eden örneklerin tek eksenli dayanım değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre basınç dayanımı ve elastisite modülü en yüksek olan A grubu örnekleridir. Dayanımlar A grubu örneklerden D grubu örneklere doğru düzenli azalış gösterirken, E ve F grubu örneklerinde kısmen de olsa dayanımlarda yükselmeler görülmüştür. Bunun nedeni E ve F grubu örneklerin mikro-çatlak gelişiminin az olması, D grubu örneklerine nazaran daha homojen yapıda olması ve tane boyut farklılığının (daha ince taneli yapıya sahip) olmasıdır.

Çizelge 1. Deney örneği grupları üzerinde uygulanan ısıtma-soğutma döngülerinin sayıları.

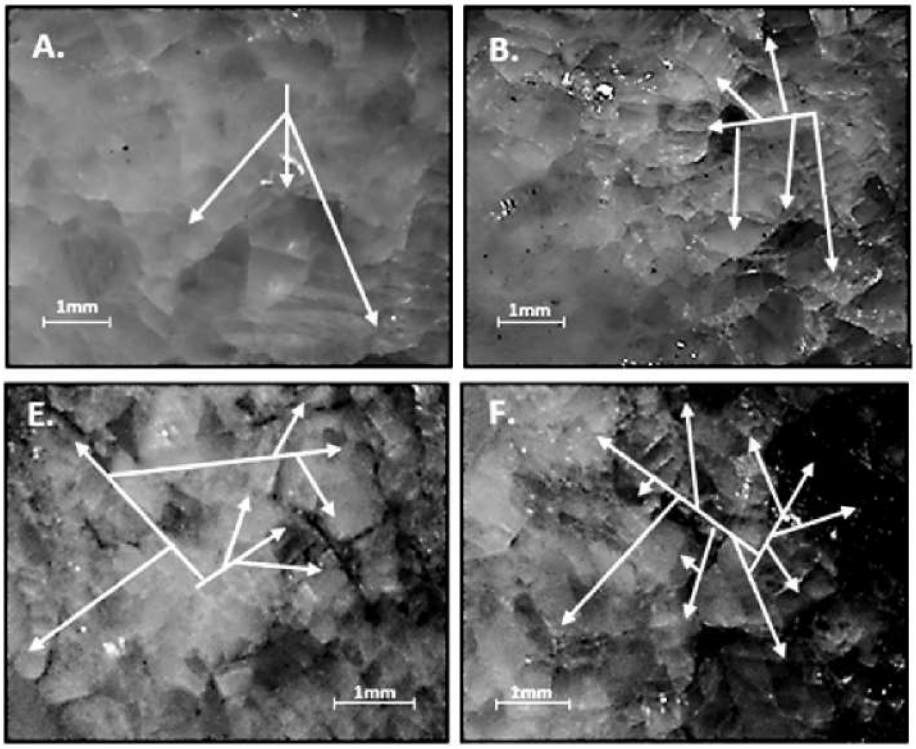
Örnek Grupları	Isıl İşlem Döngü Sayısı
A	0
B	1
C	2
D	3
E	4
F	5

Çizelge 2. Model malzemesini temsil eden örneklerin tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ve yenilme anına karşılık gelen birim deformasyon (ε_f) değerleri.

Örnek Grupları	σ_c (MPa)	E (GPa)	ε_f (10^{-3})
A	53.1	10.55	1.4
B	34.9	4.35	1.6
C	30.9	3.46	1.8
D	21.7	2.32	1.9
E	28.7	3.49	1.7
F	32.6	4.09	2.0
Ortalama	33.7	4.71	1.73

Şekil 3'de A, B, E ve F grubu mermer örneklerin binoküler mikroskop altında görünümü verilmiştir. Bu malzemelerin seçilmesinin nedeni, benzer çalışmalarda denenmiş olması ve doku, mineral bileşimi açısından homojen ve izotrop olmasıdır. Ayrıca, % 99'dan fazla $CaCO_3$ bileşimine sahip olması ve doku benzerliği de göz önünde tutulmuştur. Ayrıca homoblastik dokuya sahip olması sebebiyle homojen özellik göstermesidir. Örnekler eş tane boyuna sahip, düzgün şekilli ve kalsit minerallerinden oluşmuştur. Oldukça iri taneli kristalin yapıya sahip örnekler girintili çıkıntılı ve kopmuş parçalar içermektedir. Tane büyüklüğü 0.5-2 mm arasında değişkenlik göstermiştir. Malzemelerde dolguya rastlanılmamıştır. Kalsit kristalleri arasındaki açılmalar A grubu örnekten F grubu örneğe doğru giderek arttığını göstermektedir. Bu durum ısıl işlem döngüsü sayısının taneler arası bağın giderek zayıflamasına neden olduğuna işaret etmektedir. Bu sonuç, Mahmutoglu (2017) 'nin tane sınırlarının ısıl işlem sonrası kalsit tanelerinin ayrılması olayının ısıtma ve soğutma döngülerinin sayısına göre değişebileceği görüşü ile örtüşmektedir.

Bu görüntülere göre A grubu örneğinde kalsit dilinimleri bariz şekilde görülmektedir. Ayrıca mikro çatlaklı, fisürlü yapılara çok az rastlanmaktadır. B grubu örneğinde mikro çatlaklı yapılara rastlanılmaktadır. Ayrıca kopmuş parçalar net bir şekilde gözükmektedir. E grubu örneğinde doku sınırları daha çok granoblastik yapıya benzemektedir. Dokusu diğerlerine nazaran daha ince tanelidir. F grubu örneğinde ise artık mikro çatlakların neredeyse bütün yüzeye etki ettiği görülmektedir. F grubu örneği ısıl işleme en çok tabi tutulan örnek olduğu için kalsit minerallerinin bozunduğu gözükmektedir. Buradan ısıl işlem etkisi ile kalsit mineralini daha çok içeren örneklerin, kalsit mineralini az içeren örneklere göre bozulmasının daha hızlı geliştiği sonucuna varabiliriz. Isıl işlemden daha fazla etkilenen örneklerin mikro çatlak, fisür açıklıkları ve bozunmaların arttığı, orijinalliğini koruyan ve ısıl işlemden az etkilenen örneklerin çatlakların olmadığı ya da çok az olduğu, bozunmaların da nispeten ısıl işlemden daha fazla etkilenenlere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca örneklerin tanelerin farklılıkları (iri ve ince olması) ile ısının etkisinin uyumlu bir birlikteliğini göstermektedir.



Şekil 3. Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin farklı döngü sayısında ısıl işlem sonrası taneler arasındaki açılmalarının gösterimi (A, B, E ve F grubu örnekler).

3. SÜREKLİ YENİLME DURUMUNDA ÜÇ EKSENLİ DENEYLER

3.1. Deney Sonuçları

Üç eksenli deney sonucunda malzemelerin genelinde makaslama şeklinde yenilmenin meydana geldiği görülmüştür. Aynı zamanda model malzemesini oluşturan iri taneli kalsit minerallerinden oluşan mermer örneklerinin tane sınırlarında kopma ve dağılma gözlenmiştir. Farklı sayıdaki ısıl döngüye karşılık gelen örnek gruplarının fiziksel deney sonuçlarında ise ısıl işleme maruz bırakılma süresi ile orantılı olarak su emme, porozite gibi fiziksel parametrelerinde artış meydana geldiği, tek eksenli basınç deneyleri sonucunda ise malzemenin ısıl işlem etkisi ile dayanımının azaldığı, daha gevrek hale geldiği görülmüştür.

Tek eksenli ve üç eksenli deney sonuçları arasında dayanım ve davranış açısından genel anlamda bir uyumluluğun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin iri veya ince taneli olması da hem ısıl işlem sürecinde hem de dayanım hakkında önemli bilgi vermektedir. Bu sebepledir ki kullanılan malzemede iri taneye sahip örneklerin dayanımının ince taneye sahip örneklere oranla daha düşük seviyelerde görüldüğü saptanmıştır. Model malzemesini oluşturan kalsit minerallerin ısıl işlem sayısına bağlı olarak tane sınırlarındaki örselenmenin arttığı, fissür aralıklarının açıldığı, buna bağlı olarak da mikro-çatlak gelişiminin, porozitenin arrtığı ve dayanımının ise azaldığı belirlenmiştir. Mahmutoglu (2017)' 'nin Muğla mermeri üzerinde yapmış olduğu deneyde uyguladığı 400 ^{0}C lik ısıl işlem sonucu, farklı kategorilerdeki örnek numunelerin döngü sayısının artmasına bağlı olarak tane sınırlarının giderek açıldığını gözlemlemiştir. Bu çalışma sonucunda da fiziksel ve mekanik özelliklerde benzer değişiklikler saptanmıştır.

Üç eksenli deney sonucunda taneler arasındaki bağların ısıl işlemle kısmen zayıflamasına rağmen içsel sürtünme açıları değerlerinde yaklaşık % 25 oranında artış olmuştur. Kohezyon değerlerinin ise yaklaşık % 50 oranda azaldığı görülmüştür. Eşitlik 6'da Mohr-Coulomb yenilme ölçütü ile tanımlanan bağıntılar görülmektedir. Bu bağıntı yardımıyla hesaplanan rezidüel kesme dayanım parametre değerleri (c_r, ϕ_r) Çizelge 3 'de gösterilmiştir.

$c_r = \sigma_c \,.\, (1-\sin\phi) / (2\cos\phi)$ $\phi_r = \arcsin (m-1) / (m+1)$ $m = \Delta\sigma_1 / \Delta\sigma_3$ (6)

Çizelge 3. Deney örneklerinin yenilme sonrası dayanım zarflarından elde edilen mekanik büyüklükler.

Örnek Grupları	a_f	m_f	σ_c (MPa)	σ_{cf} (MPa)	σ_{cf} / σ_c	ϕ_r (^{0})	c_r (MPa)
A1	0.3487	11.105	65.78	18.882	0.287	71.37	2.16
B1	0.4538	11.309	62.87	17.251	0.274	70.71	2.02
C1	0.4094	10.978	61.10	15.807	0.259	70.02	1.90
D1	0.5414	11.610	58.00	13.549	0.233	69.25	1.67
E1	0.8161	13.025	56.23	10.735	0.191	68.43	1.36
F1	1.1486	14.728	52.98	7.1388	0.135	67.08	0.94

Şekil 4. Üç eksenli deney sonrası deney örneklerin görüntüleri.

Şekil 4'de üç eksenli deney sonrası örneklerin yenilme durumları görülmektedir. Örnekler makaslama şeklinde yenilmiştir. Daha iri taneli örnekler ise konik şeklinde yenilmeye uğramıştır. Üç eksenli deneyler 1 ve 2 numaralı örnekler üzerinde sabit yükleme hızı altında servo kontrollü pres yardımıyla yapılmıştır. Buna göre düşük porozite ve düşük çatlaklı yapıya sahip A grubu örneklerin dayanımının yüksek çıktığı gözlenmiştir. En çok deformasyona uğrayan F örneği olmuştur. Bunun nedeni diğer örneklere nazaran daha fazla ısıl işlem görmesi bunun sonucunda porozitesinin ve su emmesinin artması sonucu dayanımının azalması ile açıklanabilir.

3.1 Yenilme Sonrası Dayanımın Hoek-Brown Yenilme Ölçütüyle Karşılaştırılması

Şekil 1'de verilen sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneyden elde edilen yenilme sonrası dayanım zarfları Hoek-Brown Yenilme Kriteri ile karşılaştırılmıştır. Farklı örnek kategorileri için elde edilen zarflarının hepsi için yüksek regresyon değeri (R^2>0.99) bulunmuştur. Ayrıca ısıl işlem sayısının artışına bağlı örneklerin dayanımlarının azaldığı, bunun sonucunda ise yenilme zarflarının giderek aşağı doğru kaldığı gözlenmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırmada zaman elde dayanım zarflarında tam bir çakışma olmadığı, ancak dayanım zarflarının benzer olduğu görülmüştür (Şekil 5). Laboratuvardan elde edilen veri sonuçlarından hareketle çizilen yenilme zarflarının, Hoek-Brown yenilme ölçütüyle hesaplanan değerlerden elde edilen yenilme zarflarına oranla daha yüksek dayanımların elde edildiği belirlenmiştir.

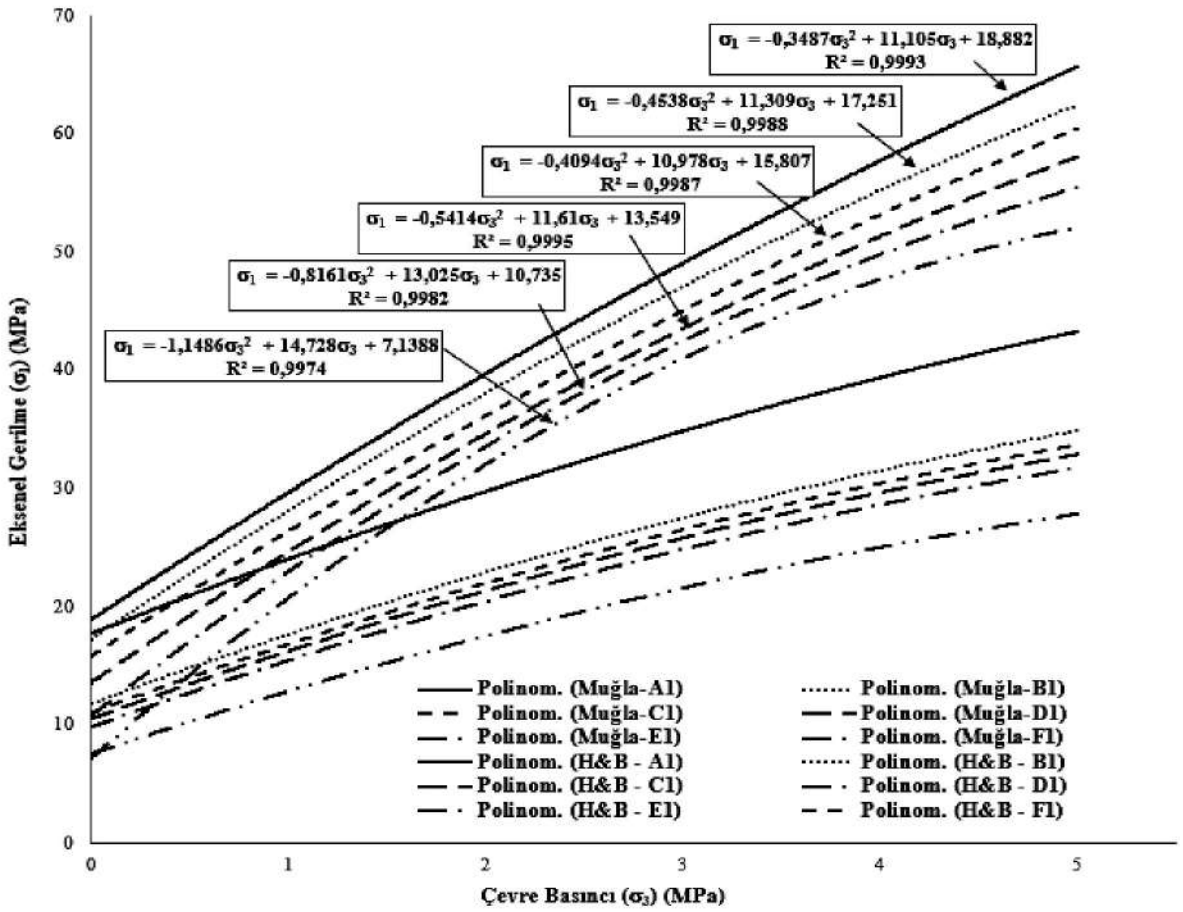
Ayrıca, bu ölçüte göre tahmini dayanımın; yüksek çevre basıncında daha düşük olduğu, düşük çevre basıncında (sığ derinlik) ise bu çalışmadan edilen verilere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yenilme süreci ve sonrası dayanım zarflarına karşılık gelen veriler kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, tüm örnek kategorilerinin yenilme sonrası dayanımlarının Eşitlik 7 ile tanımlanabileceği saptanmıştır. Elde edilen zarflar Excel programı kullanılarak değerlendirilmiş, yenilme sonrası a_p ve m_p katsayıları ve eğrinin formu ortaya konmuş, doku yenilme süreci açıklanmıştır.

$$\sigma_1 = - a_f . \sigma_3^2 + m_f . \sigma_3 + \sigma_{cf} \quad (7)$$

Bulunan değerler Çizelge 3'de gösterilmiştir. Çizelge 4'de ise yenilme öncesi durumunda a_p, m_p, c_p parametreleri verilmiştir. Çizelge 3'de c verilen büyüklükler ise;

a_f *ve* m_f*:* Yenilme sonrası dayanım zarfları için belirlenen ampirik katsayılar
σ_{cf} : Yenilme sonrası tek eksenli basınç dayanımı
ϕ_r *ve* c_r : Yenilme sonrası kesme mukavemeti parametreleri (içsel sürtünme açısı ve kohezyon)
c_p : Yenilme öncesi maksimum kesme mukavemet parametresi (kohezyon)

Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırma için yukarıdaki eşitlikler kullanılarak malzemedeki doku ve tane sınırları dikkate alınmak şartıyla, m_b ve s Hoek parametrelerinin, "D" örselenme faktörünün, m_i sağlam kaya malzemesi parametresinin ilgili abaktan seçilmiş ve dayanım zarfları çizilmiştir. Daha sonra model malzemesinden elde edilen zarflar aynı diyagram üzerine taşınarak karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 5). Deney örneklerinin özellikleri dikkate alınarak GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) 80 olarak alınmıştır. Karşılaştırmalar için model malzemesi için m_b değeri 4.424, s değeri 0.109, a değeri 0.503, "D" örselenme faktörü 1, m_i değeri 9 olarak alınmıştır.



Şekil 5. Üç eksenli deneyden elde edilen zarfların Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılması.

Çizelge 4. Yenilme sürecini temsil eden dayanım zarflarından elde edilen mekanik büyüklükler.

Örnek Grupları	a_p	m_p	σ_c	c_p	c_p / σ_c
A1	0.1435	3.4436	67.0	46.213	0.690
B1	0.2728	2.979	65.12	43.208	0.664
C1	0.0467	4.447	63.53	39.605	0.623
D1	0.0588	4.6721	60.96	35.591	0.584
E1	0.2709	7.0039	58.88	29.875	0.507
F1	0.4108	7.7515	55.01	26.779	0.487

4. SONUÇLAR

Yukarıdaki açıklamalardan görüldüğü gibi laboratuvar deneyleri ile ısıtma-soğutma çevrimi uygulanan örneklerin yenilme sonrası zarfları, aynı çevre gerilmeleri altında, Hoek & Brown ölçütüne göre hesaplanan dayanımlardan daha düşük olarak bulunmuştur. Doruk yenilme zarfları ise, aynı çevre gerilmeleri altında, Hoek & Brown ölçütüne göre hesaplanan eksenel gerilme değerleri ile uyumludur. Sonuç olarak, çatlaklı kaya kütlesi dayanımlarının tanımlanmasında kullanılan kesme mukavemeti parametrelerinin (içsel sürtünme açısı ve kohezyon) sabit birer değer olarak alınmasının doğru olmayacağı, bu büyüklüklerin çevre gerilmesinin fonksiyonu olarak değişeceği belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

Hoek, E., & Brown, E. (1980a). Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy. Stephen Austin and Sons, London, 527 p.

Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34 (8), 1165-1186.

Hoek, E., Carranza-Torres, T., & Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, Vol 1, pp. 267-273.

ISRM (1981). "Basic technical description of rock masses", International Journal of Rock Mech. and Mining Sci. And Geomech. Abst. 18, 85-110.

Kovári K, Tisa A, Attinger O. (1983a). The concept of ''continuous failure state'' triaxial tests. Rock Mech. 16 (2):117–131.

Kovári K, Tisa A, Einstein H, Franklin, J. (1983b). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression. Int. Soc. for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 20 (6):283–290.

Mahmutoglu, Y., (2017). Prediction of weathering by thermal degradation of a coarse-grained marble using ultrasonic pulse velocity, Environmental Earth Sci. 76:435.

Mahmutoğlu, Y., & Şans, G. (2020). "Comparison of post-failure strength of micro-cracked marble with Hoek-Brown failure criterion". Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 26: 1365-1372.

Volkanik Kırıntıların Killerin Dayanımı Üzerine Etkisi

The Effect of Volcanic Fragments on the Strength of Clay

T. Coşkun[1], Ç. Coşkun[2,*], S. Dalgıç[3]

[1] Talatpaşa Bulvarı, No:14-15, Bahçelievler/İstanbul
[2] Karun Çıkmazı Sok. No:2, Beyoğlu/İstanbul
[3] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği, Büyükçekmece/İstanbul
*(*cagdasco@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışma kapsamında şişme potansiyeli yüksek olan, aynı formasyona ait kil numuneleri kullanılmıştır. Kil numunelerine farklı oranlarda andezit katılması durumunda jeoteknik parametrelerde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Yapılan deneylerle andezit katkısı ile kilin kıvam limitlerinde değişiklikler meydana gelmiştir. Bunun neticesinde zemin sınıfı ve kompaksiyon parametreleri değişmiştir. Andezit oranı artışına paralel olarak kuru birim hacim ağırlık değerleri artmış, optimum su muhtevası değerleri de simetrik olarak azalmıştır. Kile andezit katıldığı için kilin su tutma kapasitesi azalmış bunun neticesinde su muhtevasında da azalma yaşanmıştır. Kesme kutusu deneyi sonucunda andezit miktarı arttıkça kayma mukavemeti açısında da artış yaşanmıştır. İçerdiği kırıntı miktarının artması kilin mukavemetinde artışa neden olmuştur. Serbest basınç deneyi neticesinde de aynı şekilde kırıntı oranına paralel olarak basınç dayanımı da artmıştır. SEM ve EDS analizlerinde kilin dokusunda bir değişim olmadığı, dayanımının artmasının mineralojik etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Tüm bu deneyler neticesinde kilin, andezit kırıntılarının katkısı neticesinde dayanımının arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kil, Dayanım, Volkanik Kırıntı, SEM-EDS

ABSTRACT: *In this study, clay samples with high swelling potential were used. Changes in geotechnical parameters were investigated when andesite was added to clay samples in different proportions. In the experiments, the consistency limits, soil class and compression parameters of andesite-added clay have changed. In parallel with the increase in andesite ratio, dry unit weight increased and decreased as optimum water content values. As andesite is added, the water holding capacity of the clay has decreased and as a result, the water content has also decreased. As a result of the shear strength test, the resistance angle increased as the amount of andesite increased. The strength of the clay increased with the increase in the amount of crumb. As a result of the compressive strength also increased parallel to the crumb ratio. In SEM and EDS analyses, it was understood that there was no change in the texture of the clay and the increase in strength had no mineralogical effect. As a result of all these experiments, it was observed that the strength of the clay increased with the contribution of andesite fragments.*

Keywords: *Clay, Strength, Volcanic-Fragments, SEM-EDS*

1. GİRİŞ

Killer stabilite açısından en çok sorun yaratan zemin türüdür. Hacim değiştirme özeliklerine sahip olan killerde şişme görülmekte olup, bünyelerine su aldıklarında şişerek hacimleri artmaktadır. Meydana gelen bu hacimsel değişiklikler üst ve alt yapılarda stabilite sorunlarına neden olmaktadır. Zeminlerin su muhtevası arttıkça kayma dayanımı azalmaktadır (Bláhová vd., 2013). Kayma dayanımındaki azalma sebebiyle zeminlerde kayma ve oturma sorunları yaşanmaktadır.

Çalışma kapsamında, Gürpınar Formasyonuna ait killer üzerinde çalışılmıştır. Killi zeminlerin mukavemetini arttırmak için bir çok malzeme ve kimyasal kullanılmakta ve bir çok yöntem denenmektedir. İlk defa bu çalışma kapsamında, kile volkanik kırıntılar katılarak, kilin mukavemetindeki ve mühendislik özelliklerindeki değişim belirlenmiştir. Deneyler için numuneler her

iki saf numuneler ile bu numunelere %10, %20, %30 ve %40 oranında katılan andezit ile hazırlanmıştır.

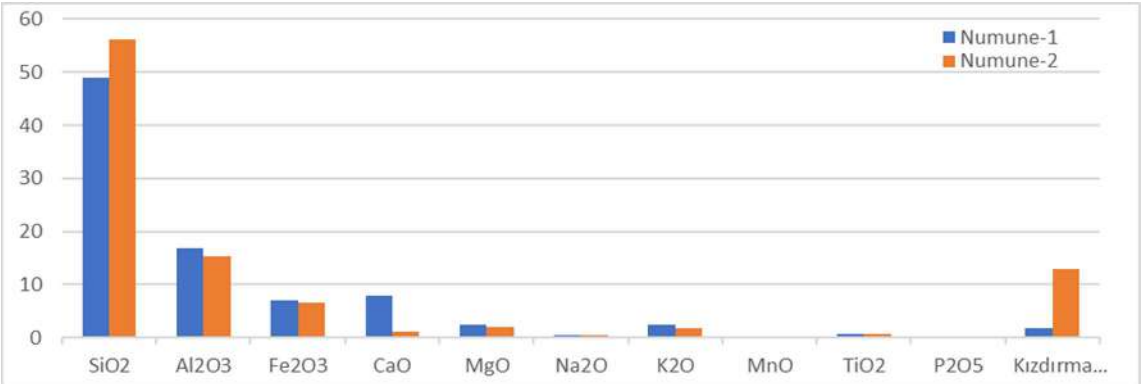
Araziden alınan numuneler (Şekil 1) laboratuvara getirildiğinde deney programı oluşturulmuştur. İlk olarak kil numuneleri için kimyasal analiz yapılmıştır. Daha sonra kıvam limitleri, kompaksiyon, kesme kutusu deneyi ve serbest basınç mukavemeti deneyi yapılmıştır. Sonraki aşamada elde edilen sonuçları mikroyapı ile ilişkilendirmek amacıyla da SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinden volkanik kırıntıların, zemin davranışında değişime yol açıp açmadığı açıklanmaya çalışılmıştır.

Şekil 1. N1 ve N2'nin aldındığı yerler.

Killer genelde mühendislik yapıları açısından sorun yaratan, zemin stabilitesi ve şev stabilitesi yetersiz olan ortamlardır. Killerin dayanımlarını arttırmak için yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Yeni araştırmalarda çeşitli katkı maddeleri ve çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Koslanant vd., 2006; Yükselen-Aksoy vd., 2008; Maliaka ve Thiyyakkandi, 2013; Hataf vd., 2018; Ghadir ve Ranjbar, 2018; Sumesh vd., 2020).

2. KİL VE ANDEZİT MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmalar Gürpınar Formasyonuna ait iki farklı konumdan alınmış olan kil numuneleri ile volkanik kayaçtan hazırlanan kırıntılar eşliğinde yapılmıştır. Zemin numuneleri İstanbul ili, Avrupa Yakası, Avcılar ve Gürpınar bölgelerinden alınmıştır. Avcılar bölgesinden alınan kil numunesi temel inşaatı kazısından (N1), Gürpınar sahil kesiminden alınan kil numuneleri ise iş makinesi yardımıyla killi seviyelere ulaşılarak alınmıştır (N2). Killerin kimyasal özelliklerinin tayini için İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarında kimyasal içerik analizi yapılmıştır. Ayrıca SEM analizleri sırasında da XRF (SEM-EDS) yapılmıştır. Analizlere sonuçlarına göre zeminler içerisinde bol miktarda SiO_2 ve Al_2O_3, ayrıca Fe_2O_3, CaO, MgO, MnO, Na_2O, K_2O, TiO_2 ve P_2O_5 olduğu görülmektedir. Zemine ait kimyasal analiz sonuçları oranlarıyla beraber aşağıdaki grafikte yer almaktadır (Şekil 2).

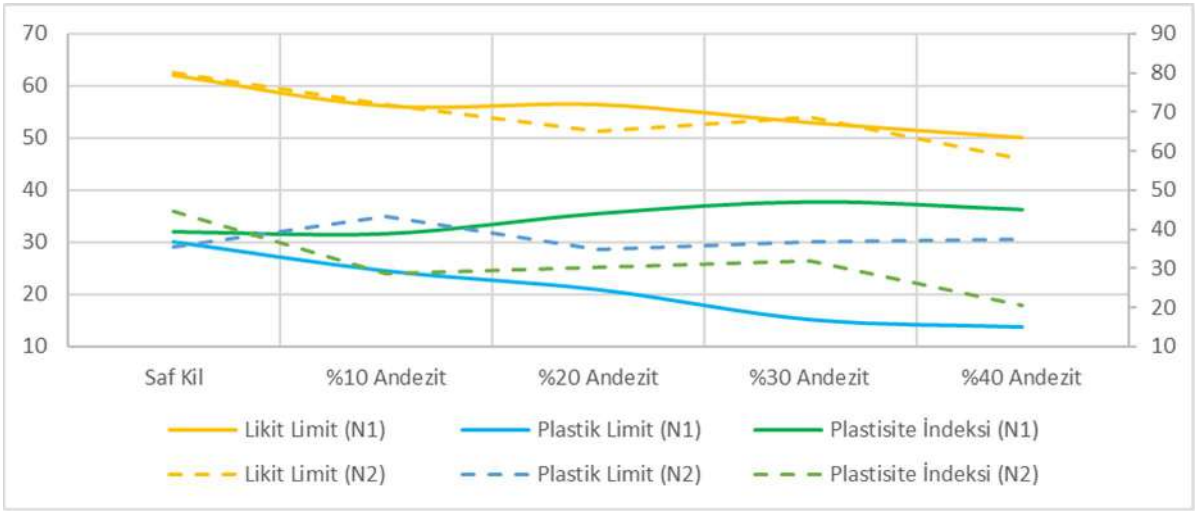


Şekil 2. Kil numunesine ait kimyasal analiz sonuçları (%)

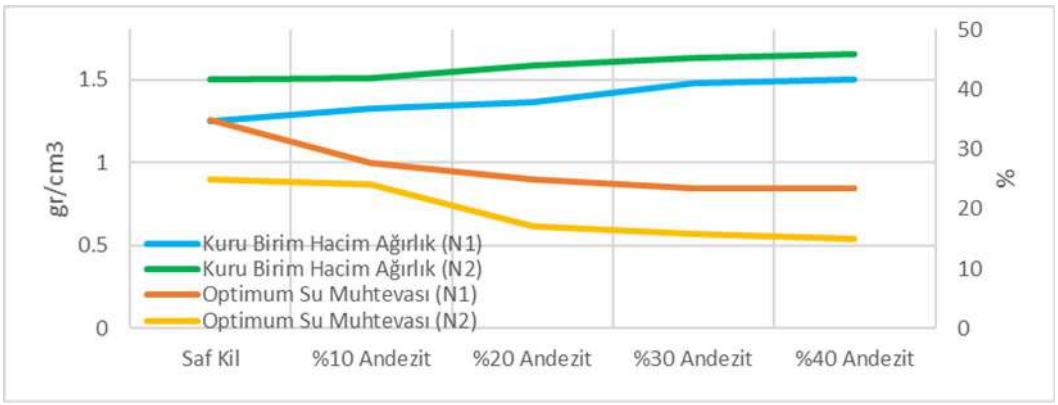
Bu çalışma kapsamında volkanik kırıntı olarak Ankara'dan temin edilen andezit örnekleri kullanılmıştır. İnce kesitler üzerinde yapılan incelemede andezitler; kristalce fakir, feldispik hamur içermekte ve hamur gri renklidir. Hamur içerisinde kısmen ufak mikrolitik plajioklaslar bulunmaktadır. Kayaçta plajioklas fenokristalleri ile tamamen opaklaşmış resorbe olmuş (magma tarafından özümsenmiş) amfiboller içermektedir. Kayaçta gözlenen opak mineraller hamurun içerisinde saçılmış olarak gözlemlenmektedir, Mafik minerallerin opak mineraline dönüştüğü kayaçta conlu ve ikizli plajioklaslar mevcut olup, kuvars gözlenmemiştir.

2.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirmesi

Çalışmalar kapsamında kil ve volkanik kırıntı katkılı kil numuneleri üzerinde kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Volkanik kırıntı içeren killerin likit limitlerinde, saf killere oranla düşüş yaşanmıştır N1'de volkanik kırıntı katıldıktan sonra yapılan kıvam limitleri deneyleri sonucunda zemin sınıfının değiştiği görülmektedir. Killer yüksek plastisiteli özellik gösterirken, içlerine katılan volkanik kırıntı neticesinde silt olarak davranmaya başlamışlardır. Plastisite indisi de arttırılan volkanik kırıntı miktarıyla ters orantılı olarak azalma göstermiştir (Şekil 3). N2'de volkanik kırıntı katkısı neticesinde zemin sınıfında herhangi bir değişme olmamıştır. İlk kil numunesinede olduğu gibi bu numuneye de katılan volkanik kırıntı neticesinde likit limittte düşüş yaşanmıştır. Plastik limit yüzdesi volkanik katkı sonrasında azalmıştır. Kıvam limitleri deneyi sonucunda, Burmister (1951) sınıflandırmasına dayanarak, kil numunesinin "yüksek plastisiteli killer" sınıfında yer aldığı belirlenmiştir (Şekil 4). Deneyler neticesinde zemin sınıflarındaki değişimlerde farklılıklar yaşanmasının nedeninin killerin oluşumlarının ve bulundukları lokasyonların faklı oluşu ve kimyasal bileşimlerindeki farklılıklar olarak açıklanabilir.



Şekil 3. Kıvam limitlerinin kil numunelerine göre andezit yüzdesi ile değişimi (%).



Şekil 4. Kil numunelerine ait optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri

Kompaksiyon deneyleri sonucunda N1'de artan volkanik kırıntı oranına paralel olarak kuru birim hacim ağırlık değerinde artış olmuştur. Saf kilin kuru birim hacim ağırlık değeri, katılan andezit yüzdelerinin artışa bağlı olarak tespit edilmiş; optimum su muhtevalarında azalma meydana gelmiştir. Saf kilde W_{opt} değeri %35 iken, %10 malzeme katıldığında %27,80, % 20 malzeme katıldığında %24,85; %30 malzeme katıldığında ise % 23,50'e düşmüştür. %40 malzeme katıldığında ise %23,40'a düşmüştür ve azalma devam etmiştir. N2'de kuru birim hacim ağırlık değerleri katkı maddesi oranının artmasıyla beraber artış, optimum su muhtevalarında ise azalma yaşanmıştır (Şekil 3). Kesme kutusu deneylerinde ise hem N1 hem de N2'de kırıntı katıldığında kayma mukavemeti açısında andezit miktarınındaki yüzdeyle beraber belirgin bir artış gözlenmektedir (Şekil 5).

Şekil 5. Kil numunelerine ait kesme kutusu deneyi sonuçları

Çalışmalar kapsamında serbest basınç ile eksenel yükler altında numunede meydana gelen boy kısalmaları ölçülmüştür ve bu verilerden yola çıkarak zeminin yük altındaki davranışı açıklanmaya çalışılmıştır. 10 farklı numune üzerinde deney yapılmıştır, her bir numune için deney üç defa tekrarlanmıştır. Genel olarak bakıldığında saf kile andezit kırıntıları katıldığı zaman serbest basınç mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Serbest basınç dayanımı değerleri (15 Günlük Numuneler) (kg/cm^2)

Andezit Oranı (%)	**N1**	**N2**
Saf Kil	2.58	2.0
%10	3.8	2.17
%20	4.18	3.18
%30	4.52	3.64
%40	4.82	4.74

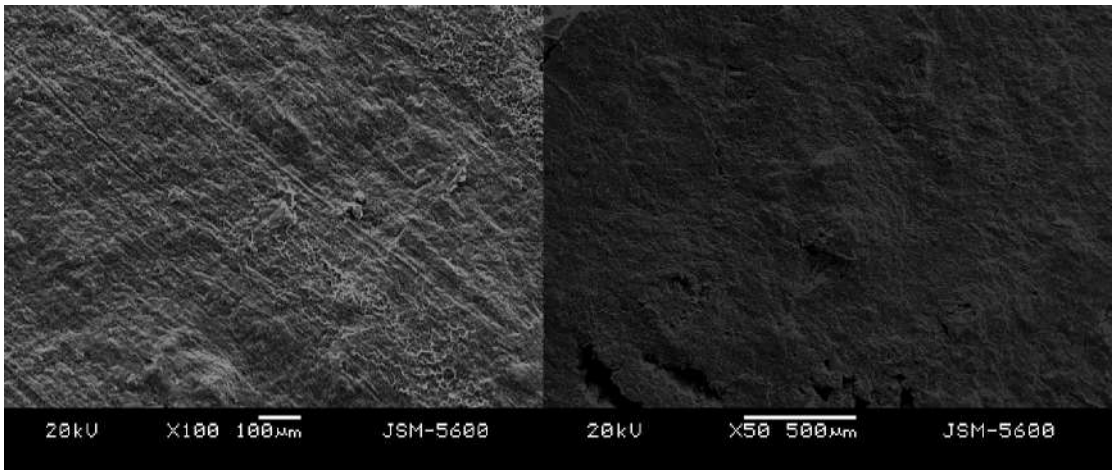
2.2. Elektron Mikroskobu Analizi (SEM) ve X Işınları Mikroanalizi (EDS)

Toplam 10 adet numune üzerinde, SEM ve EDS analizi yaptırılmıştır (Şekil 6-12). Şekillerde kilin içindeki volkanik kırıntılar, serbest basınç mukavemeti deneyiyle kırıntılarda parçalanmalar olarak görülmektedir. EDS sonuçları da kimyasal analiz değerleriyle benzer çıkmıştır. Kilde Si, Al, Fe, Mg ve Ca minerallerinin olduğu; %36 oranında Si, %13 oranında Al ve %5 oranında Fe minerali olduğu gözlenmiştir. Saf kil numunelerine ait kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde değerlerin birbirine yakın olması killerin benzer özellikte olduklarını göstermekle birlikte N1 (N1?)'deki SiO_2 oranı N2 (N2)'den azdır (%48,94 ve %56,097). Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Na_2O, MnO, TiO_2 yüzdeleri her iki kil için de birbirine benzerdir. N1'de %7,82 olan CaO değeri ise N2'de %1,083 seviyelerinde tespit edilmiştir. Özkan (2009) tarafından Gürpınar killerinden alının altı farklı numune üzerinde yapılan kimyasal analizlerde söz konusu değerlerin anlamlı şekilde benzer olduğuna işaret etmektedir.

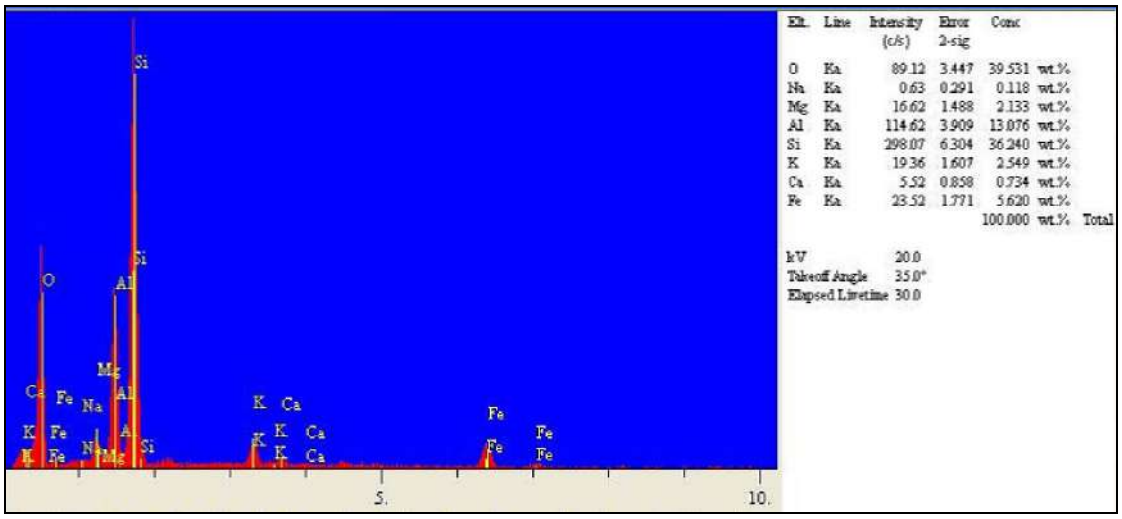
EDS analizleri yapılarak minerallerin yarı nicel bileşimleri belirlenmiş ve SEM çalışmaları ile minerallerin şekilleri, kristallenme durumları, dönüşümleri, tane büyüklükleri ve benzeri özellikleri incelenmiştir. Numuneler üzerinde yapılan EDS analizleri incelendiğinde ise saf N2 ile bu kile %20 oranında andezit katıldığında ortaya çıkan değerlerin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. N2'deki oksijen miktarı %39,531'de iken andezit katkılı kildeki değer %49,510'a çıkmıştır. Benzer bir artış kalsiyum içeriğinde meydana gelmiş ve saf kilde %0,858 iken andezit katkılı kilde bu oran yaklaşık

dört kat artarak %3.088'e yükselmiştir. Buna karşılık %20 andezit katkılı kilde alüminyum, silisyum, demir ve potasyum değerlerinde saf kile göre düşüş tespit edilmiş, sodyum ise hiç gözlenmemiştir (Şekil 10).

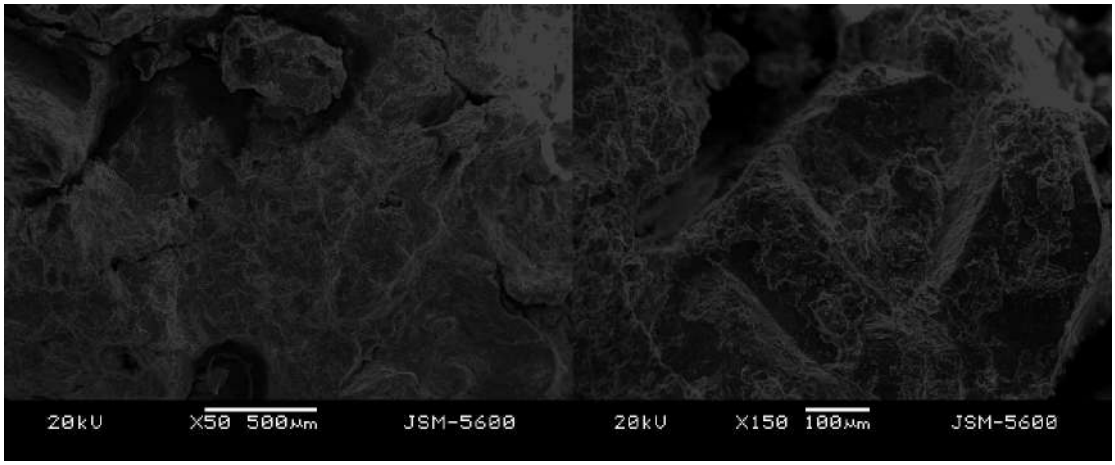
Killerin EDS analizlerine göre kimyasal içerikleri incelendiğinde montmorillonit tipi kile benzer bir kimyasal içerik gözlense de içerdiği potasyum (K^+) iyonları sebebiyle illit tipi kile daha yakın olduğu belirlenmiştir. Genel formülü $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$ olan illitin içerdiği potasyum yüzdesi söz konusu saf kil örneklerinde oldukça düşük gözlense de killerin temel fiziko-kimyasal özelliklerinden biri katyon değiştirmedir (Churchman vd., 2002). Değişebilen katyonlar ise genellikle Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, H^+,Al^{4+},NH_4^+ve Li^+,'dir. Buna dayanarak K^+ iyon yüzdesindeki farkın sebebi daha iyi anlaşılabilmektedir.



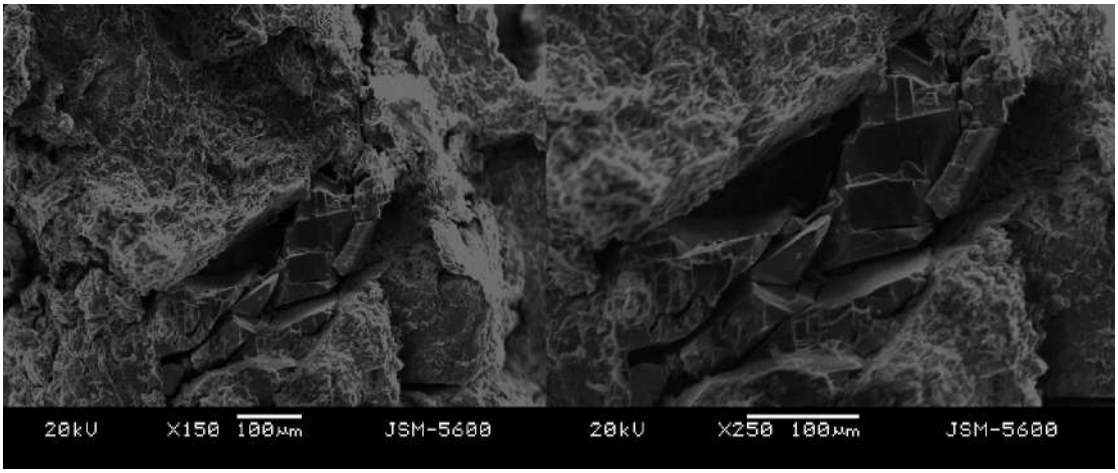
Şekil 6. N2'ye ait 100 ve 50 kez büyütülmüş görüntü



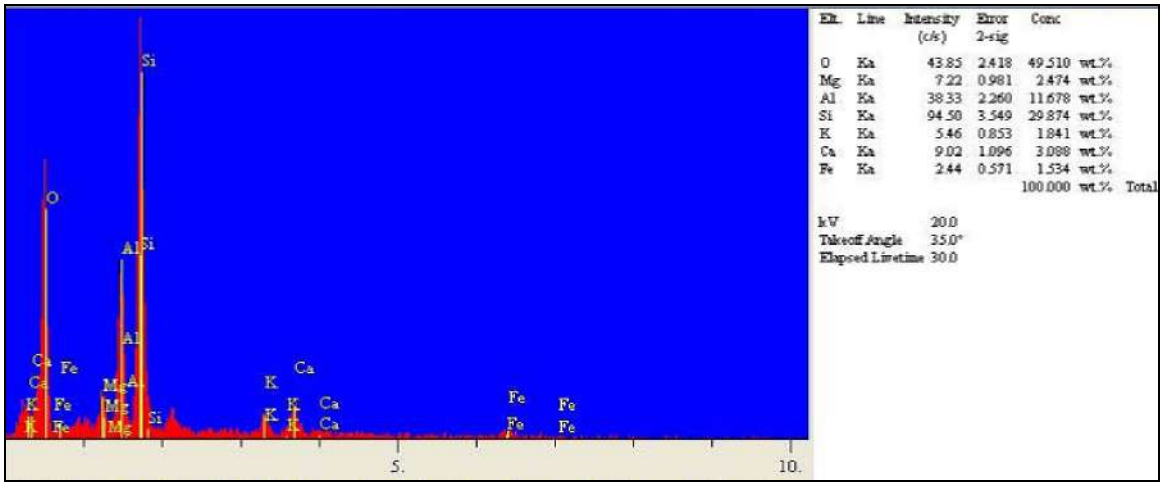
Şekil 7. N2'ye ait kimyasal analiz sonucu (EDS).



Şekil 8. %10 Andezit + N1 (sol) ile %30 Andezit + N2 ait görüntüler (sağ)



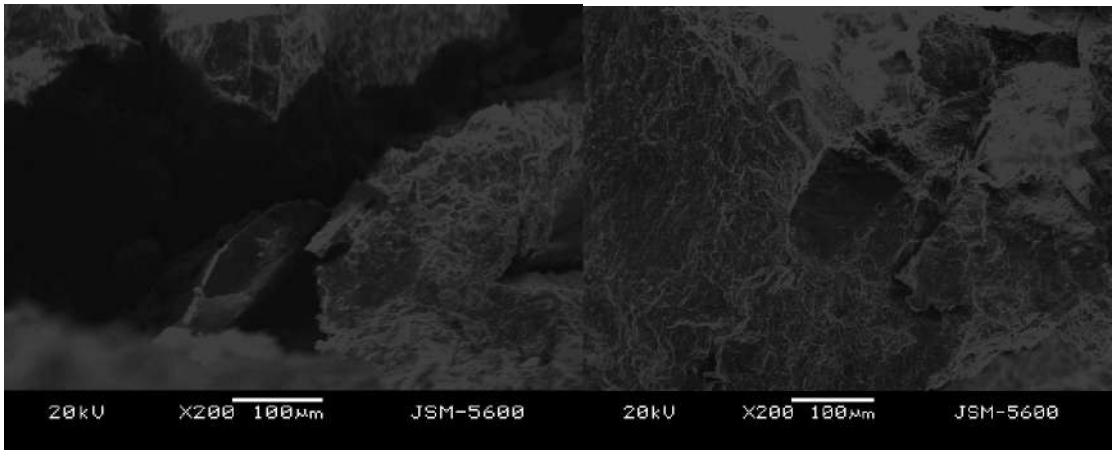
Şekil 9. %20 Andezit + N2 150 kez ve 250 kez büyütülmüş görüntüler.



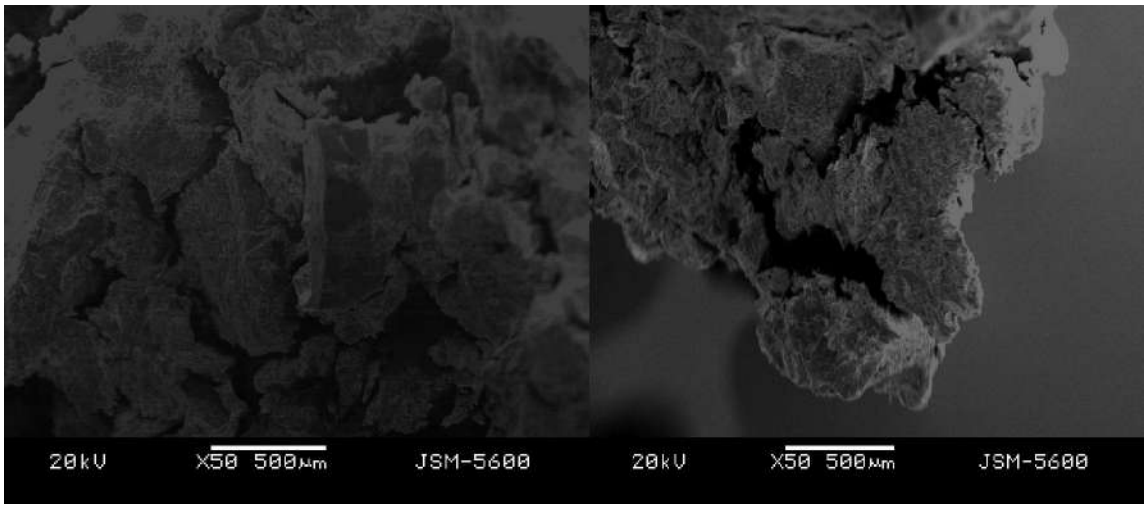
Şekil 10. %20 Andezit + N2 numunesine ait kimyasal analiz sonucu (EDS)

Doğal numunelerin ve andezitli kil numunelerinin yapı ve dokularındaki değişimi incelemek amacıyla SEM analizleri yapılmıştır. N2'ye ait saf örnek incelendiğinde doğal numunenin killerinin çok net gözlenememekle birlikte üniforma yakın yapraklı tabakalı bir yapıda olduğu görülmektedir. Özellikle %20 kırıntı içeren kilin SEM analizinde kil ve andezit etkileşimi net bir şekilde gözlenebilmektedir.

Burada kırıntının bir kısmı kil ile karışmış gibi gözlense de diğer kısmı kilde mikron ölçeğinde boşluklar meydana getirmiştir. Kırıntı oranı arttığında ise boşlukların daha fazla olduğu gözlenmektedir (Şekil 11, 12).



Şekil 11. %40 Andezit+ N1 200 kez ve 100 kez büyütülmüş görüntü



Şekil 12. %30 Andezit+ Kil 1 numunesine ait 50 kez ve 500 kez büyütülmüş görüntü

3. SONUÇLAR

Killi zeminler üzerinde iyileştirme amaçlı birçok yöntem denenmiştir. En sık kullanılan yöntem kimyasal stabilizasyondur. Bu çalışma kapsamında, volkanik kırıntılar katılarak mukavemetlerindeki değişim belirlenmiştir. İki farklı kil numunesine %0, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında volkanik kırıntılar katılarak, gerekli laboratuvar deneyleri yapılmış ve mukavemetlerindeki değişim deney sonuçlarına dayanarak açıklanmıştır.

Saf killer üzerinde yapılan deneyler neticesinde, her iki kil numunesinin mühendislik özelliklerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Saf kile katılan volkanik kırıntı oranının artmasıyla beraber, N1'de likit limit ve plastisite indis değerleri azalmıştır. Saf kilin zemin sınıfı CH, volkanik kırıntı katkılı kil MH olarak değişmiştir. N2'de likit ve plastik limit değerleri azalmıştır. Kıvam limitleri deneyleriyle örneklerin yüksek plastisiteli killer sınıfında girdiği tespit edilmiştir.
Standart proctor deneylerinde N1'de artan volkanik kırıntı oranına paralel olarak kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış olmuştur. Optimum su muhtevası değerlerinde de azalma belilrnemiştir. N1? numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları, artan andezit yüzdelerine bağlı olarak 1.25 gr/cm^3, 1.497

gr/cm^3 arasında değişim belirlenmiştir. N2'de kuru birim hacim ağırlık değerleri volkanik kırıntı yüzdelerinin artmasıyla artış göstermiştir. Numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları, artan andezit yüzdelerine bağlı olarak 1.5 gr/cm^3 ile 1.650 gr/cm^3 arasında değerler elde edilmiştir. Optimum su muhtevalarında da benzer oranlarda düşüş meydana gelmiştir.

Saf kil ve katkılı killer üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde N1'de volkanik kırıntı katıldığı zaman kayma mukavemeti açısında belirgin bir artış yaşanmıştır. Saf kilin ϕ açısı değeri 20,55° iken, artan andezit yüzdesi ile beraber 24,70 ile 33° arasında değişim göstermektedir.

Her iki kil numunesi üzerinde tekrarlanan serbest basınç dayanım deneyinde N1 dayanımı N2'ye göre daha yüksektir. Katkısız kil numunesinde tek eksenli basınç dayanımı 2,58 kg/cm^2 olarak bulunmuştur. İçerisine %10 andezit katıldığı zaman artış olmuştur ve mukavemeti 3,8 kg/cm$^{2'}$e kadar yükselmiştir. Andezit oranı %20'ye çıkarıldığında mukavemette artmıştır ve 4,18'e yükselmiştir. %40 andezit katkılı kilin mukavemetinin 4.82 kg/cm^2 olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak, saf kile andezit kırıntıları katıldığında serbest basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. N2'de kile katılan andezit kırıntıları dayanımı artırmıştır. %10 andezit katkısında 2,17 kg/cm^2 olarak tespit edilmiştir. %20 volkanik kırıntı katkısında 3,18 kg/cm$^{2'}$ye, %40 volkanik kırıntı katkısının ardından 4,74 kg/cm^2'ye yükselmiştir.
Kile katılan volkanik katkılar neticesinde, dayanım özelliklerinin değişmesi beklenmiştir ve bu sonuç deneylerle desteklenerek açıklanmıştır. Her iki kil numunesinin farklı davranışlar sergilemesi killerin alındıkları yerlerin yapısal jeolojisi ve derinlikleriyle, ayrıca kimyasal, mineralojik olarak gösterdikleri farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Neticede N1'in hem saf hem de volkanik katkılı dayanım değerlerinin, N2'ye oranla daha yüksek olduğu görülmüştür.

4. KATKI BİLDİRME

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 4149 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

5. KAYNAKLAR

Bláhová, K., Ševelová, L., Pilařová, P., 2013. Influence of water content on the shear strength parameters of clayey soil in relation to stability analysis of a hillside in Brno region. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 61, 1583-1588.

Burmister, D.M., 1951. Identification and Classification of Soils- An Apprasial and statement of principles, ASTM STP 113, Amer. Soc. For Test and Mater., Pa, 3-24, 85-91.

Churchman, G.J., Askary, M., Peter, P., Wright, M., Raven, M.D., Self, P.G., 2002. Geotechnical properties indicating environmental uses for an unusual Australian bentonite, Applied Clay Science 20 (4-5), 199-209

Ghadir, P. ve Ranjbar, N., 2018. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, Construction and Building Materials, 188, 361-371.

Hataf, N., Ghadir, P., Ranjbar, N., 2018. Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer, Journal of Cleaner Production 170(1), 1493-1500.

Koslanant, S., Onitsuka, K., Negami, T., 2006. Influence of salt additive in lime stablization on organic clay, Geotechnical Engineering, 37(2), 95-101.

Maliakal, T. ve Thiyyakkandi, S., 2013. Influence of Randomly Distributed Coir Fibers on Shear Strength of Clay, Geotechnical and Geological Engineering, 31(2), 425-433.

Özkan, M., 2009. İstanbul Gürpınar Kilinin Tekrarlı Şişme-Büzülme Davranışı, İstanbul Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi.

Sumesh, M., Singh, B., Vigneshwaran, K., Samsonchelladurai, C., Vikranth, G., 2020. Effect of coal ash on strength characteristics of clayey silt soil treated with cement, Materials Today: Proceedings, ISSN 2214-7853.

Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., Ören, A.H., 2008. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays, Geotechnical Engineering, 102(1-2), 54-61.

Yüksek Sıcaklıkların Kayaçların Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisinin Termal İşlem Katsayısı ile Belirlenmesi

Determination of High Temperature Effect on Engineering Properties of Rocks Using Thermal Treatment Coefficient

H. Ersoy[1,*], C. Atalar[2], M.O. Sünnetci[1], M. Karahan[1]

[1] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
[2]Yakın Doğu Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği, Lefkoşe, KKTC
*(*ersoy@ktu.edu.tr, blavetirraa@hotmail.com)*

ÖZ: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçlarda meydana gelen değişimler "termal hasar faktörü" adlı bir katsayı ile ifade edilir. Bu katsayının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin sıcaklık artışına bağlı olarak azaldığı kabul edilir. Bu nedenle literatürde önerilen eşitlikler sıcaklıkla dayanımın arttığı kayaçlar için geçerli değildir. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, literatürdeki denklemler düzenlenmiş, "termal işlem katsayısı" adı verilen yeni bir eşitlik ile dayanımı değişken davranış gösteren farklı kaya gruplarının birlikte değerlendirilmesine ve sınıflandırılmasına olanak kılan bir grafik önerilmiştir. Çalışmada, kil içeriği yüksek kalkerli kayaçlar Eurocode tarafından önerilen ve gerçek bir yangını temsil eden zaman-sıcaklık eğrileri kullanılarak 1000ºC'ye kadar yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Deney sonucunda tebeşirlerin dayanımının artan sıcaklıkla arttığı, 600ºC'den sonra ilksel değerden düşük dayanımların kaydedildiği belirlenmiştir. Aksine kalkarenitlerde dayanımın her sıcaklık kademesinde azaldığı görülmüştür. Önerilen eşitlik ve grafik kullanılarak, çalışma konusu tebeşirlerin 600ºC'ye kadar "tavlanmış bölgede" ve 800ºC'den sonra "hasar bölgesinde" kaldığı ve kalkarenitlerin ise her sıcaklık kademesinde "hasar bölgesinde" kaldığı ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Termal işlem katsayısı, yüksek sıcaklık, yangın, kayaç, Eurocode

ABSTRACT: *The changes occurring in rocks exposed to high temperatures are expressed with a "thermal damage factor". The parameters used in the calculation of this coefficient are considered to decrease depending on the temperature increase. For this reason, the equations suggested in the literature are not valid for rocks with increased strength with temperature. Unlike the literature, in this study, the equations in the literature were rearranged and a new "thermal treatment coefficient" was proposed. In this way, a chart that allows different rock groups with varying strengths to be evaluated and classified together was developed. In the study, calcareous rocks with high clay content were subjected to high temperatures up to 1000oC using time-temperature curves proposed by Eurocode and representing a real fire. As a result of the laboratory tests, it was determined that the strength of the chalks increased with increasing temperature, but after 600ºC, strengths lower than the original value were recorded. On the contrary, it was observed that the strength in calcarenites decreased at every temperature levels. Using the proposed equation and graphics, it was revealed that the chalk remained in the "tempered zone" up to 600oC and in the "damage zone" after 800oC, and calcarenites remained in the "damage zone" at all temperature levels.*

Keywords: *Thermal Treatment Coefficent, high temperature, fire, rock, Eurocode*

1. GİRİŞ

Son yıllarda yüksek sıcaklıklara maruz kalan kalkerli kayaçların fiziksel, dayanım ve mineralojik özelliklerindeki değişiklikler, mikro çatlak durumu ve termal hasarının değerlendirilmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır (Brotons vd., 2013; Özgüven ve Özçelik, 2014; Zang vd., 2016; Crosby vd., 2018; Yang vd., 2019; Meng vd., 2019; Ersoy vd., 2021a; 2021b).

Özgüven ve Özçelik (2013) tarafından yapılan çalışmada 1000ºC'ye kadar ısıtıldıktan sonra 30 gün soğumaya bırakılan kireçtaşlarında termal bozulmanın 10. günden sonra daha belirgin hale geldiği

ortaya koyulmuştur. Kılıç (2006), 1050^{o}C'ye kadar ısıtılan kireçtaşlarının ultrasonik dalga hız değerlerinin sürekli düştüğünü, ağırlık kaybı değerlerinin ilk 800^{o}C'de % 5'i geçmediğini ve 800^{o}C'den sonra aniden % 45'e ulaştığı belirtmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak, Meng vd. (2019), farklı sıcaklık kademelerine maruz kalan kayaçlar için XRD, SEM ve tüm kaya analizlerini gerçekleştirmiş ve bunun sonucunda farklı sıcaklıklar için kayaçlardaki elementlerin miktarlarında önemli değişiklikler kaydetmişlerdir.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kireçtaşlarının mekanik özelliklerinde meydana gelen değişikliklere odaklanan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmaların birçoğunda tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastik modülü gibi dayanım özelliklerinin 300-400^{o}C'ye kadar yaklaşık olarak aynı kaldığı ve bu sıcaklıktan sonra önemli düşüşlerin olduğu belirtilmiştir (Brotons vd., 2013; Sengun, 2014; Özgüven ve Özçelik, 2014). Bazı araştırmalarda ise artan sıcaklıklara bağlı olarak kireçtaşlarının dayanım değerlerinde sürekli düşüş gözlenmiştir. (Crosby vd., 2018).

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan karbonat kayalarında meydana gelen termal hasarı tahmin etmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Murru vd. (2018) termal şokun yapı taşı olarak kullanılan karbonat kayaçların petrografik ve petro-fiziksel özelliklerine etkisini araştırmış, Zang vd. (2015) ve Zang vd. (2016) yüksek sıcaklıkların kayaçlar üzerindeki etkilerini üç ayrı aşamada değerlendirmiştir. Bu çalışmalarda P dalgası hızının ve dayanım değerlerinin 300^{o}C'ye kadar biraz düştüğü, 300^{o}C ile 600^{o}C arasındaki düşüşün belirgin olduğu ve 600^{o}C'den sonra yine hafif bir düşüş olduğu sonucuna varılmıştır. Bazı çalışmalarda ise indeks ve dayanım değerleri kullanılarak farklı sıcaklık seviyeleri için hesaplanan hasar katsayı değerlerine göre kayaçlar farklı gruplara ayrılmıştır. Yang vd. (2019) artan sıcaklığa bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı, elastik modülü ve P-dalga hızı değerlerinin aynı oranda düştüğünü belirlemişlerdir.

Çalışmaların çoğu, yüksek sıcaklıklar nedeniyle kayaçlarda meydana gelen termal hasarlara odaklanmaktadır (Wang vd., 2016; Dong vd., 2020). Buna rağmen sıcaklığın doğrusal olarak artmadığı ve çok ani yükseldiği gerçek yangınlara maruz kalan kayalarda meydana gelecek değişimleri araştıran çalışmalar son derece sınırlıdır (Koca vd., 2006; Heldal ve Stromyr, 2015). Çalışmaların çoğunda, hızlı ısıtmanın neden olacağı termal hasarı önlemek için kayaçlar yavaşça ısıtılmış ve ısıtma hızı genellikle 1-10^{o}C / dk arasında tutulmuştur. Bu yavaş ısıtma oranları jeotermal sahalar, derin maden sahaları ve nükleer atıkların depolandığı derin jeolojik bariyerler için kabul edilebilir olsa da bir yangın esnasında sıcaklık artışını simüle etmek için yetersizdir. Çünkü bir yangın anında ortam sıcaklığı doğrusal olarak artmaz, aksine aniden yükselip 5 dakikada 500^{o}C'ye, 30 dakika sonra 800^{o}C'ye ulaşabilir. Bu artış çoğunlukla logaritmik veya üsteldir. Bu nedenle özellikle yangınların kayalar üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlayan çalışmalarda sıcaklık artış hızı ve maruz kalma süresinin doğru bir şekilde modellenmesi önerilmektedir (Wang vd., 2020; Ersoy vd., 2021b).

Literatürdeki birçok çalışmadan farklı olarak bu çalışma kapsamında, yüksek kil içerikli, düşük dayanımlı, yüksek gözenekli karbonatlı kayaçların yüksek sıcaklıklardaki davranışları ortaya koyulmuş, hızlı ısınma oranlarını doğru bir şekilde modelleyecek logaritmik veya üstel ısıtma hızları dikkate alınarak gerçek bir yangını simüle edilmiştir. Ayrıca diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, literatürde önceden önerilmiş denklemler düzenlenmiş, yüksek sıcaklıklara bağlı olarak dayanımı artan ve azalan farklı kaya gruplarını bir arada sınıflandırmak ve termal hasarı ortaya çıkarmak için yeni bir "ısıl işlem katsayısı ve grafiği" önerilmiştir.

2. MATERYAL ve METOT

Çalışma kapsamında Kıbrıs'ta birçok tarihi eserin yapımında kullanılan ve yeni yapılarda kaplama taşı olarak tercih edilen kalkarenitler ve tebeşirler kullanılmıştır (Şekil 1). Tebeşirler Eosen yaşlı Lefkara (Büyükgedik) Formasyonu'na aittir. Formasyon sarımsı beyaz, kırık beyaz renkli, orta katmanlı, planktik foraminifer tebeşirinden oluşmaktadır. Kalkarenitler ise Üst Pliyosen yaşlı Lefkoşa Formasyonu'na aittir ve bu formasyon az miktarda çakıltaşı ve marn arakatkılı kalın katmanlı kumtaşlarından oluşmaktadır (Hakyemez vd., 2002).

Şekil 1. Kıbrıs'ta karbonat kayaçlar kullanılarak inşa edilmiş tarihi ve güncel yapılar

Bir bina tasarlarken sadece mevcut statik özellikleri dikkate almak yetersizdir. Bu nedenle yapı, yangın sırasında ve sonrasında yapının yük taşıma direncinin belirli bir süre için üstlenilebileceği şekilde tasarlanmalıdır. Bir yangından sonra çelik, kaya veya beton gibi bir elemanın performansını değerlendirirken, yangın ile etkiyeceği elemanın konumu önemli bir kriterdir. Çünkü yapıya ait bina dışı ve bina içi elemanlar farklı yangın sıcaklıklarına maruz kalabilirler. Bu amaçla farklı yangın türlerini simüle etmek için Eurocode tarafından farklı sıcaklık denklemleriyle tanımlanan bazı sıcaklık-zaman yangın eğrileri önerilmiştir. Bu eğrilerden en yaygın olanları (1) standart sıcaklık-zaman eğrisi (iç), (2) harici (dış) yangın eğrisi ve (3) hidrokarbon eğrisidir (Eurocode, 2002). Bu çalışmada, bina içi bir yangının etkisini modellemek için standart sıcaklık-zaman eğrisi denklemi (Eşitlik 1) kullanılmış, kayaçlar UTD-1462 kül fırını kullanılarak farklı sıcaklık kademelerinde 1000ºC'ye kadar ısıtılmıştır. Arzu edilen sıcaklık değerinde 2 saat süreyle ısıtılan örnekler, deney sonrasında oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Çalışmada kullanılan ısıtma prosedürü özeti Tablo 1'de özetleniştir.

$$Q_e = 660\ (1\text{-}0.687e^{-0,32t} - 0.687e^{-3,8t}) + 20 \qquad (1)$$

Burada; Q_e (ºC): bina içi yangında yüksek sıcaklığa maruz kalan eleman çevresindeki gaz sıcaklığı, t (dak): hedef sıcaklığa ulaşma süresi

Tablo 1. Termal ısıtma deney prosedürü

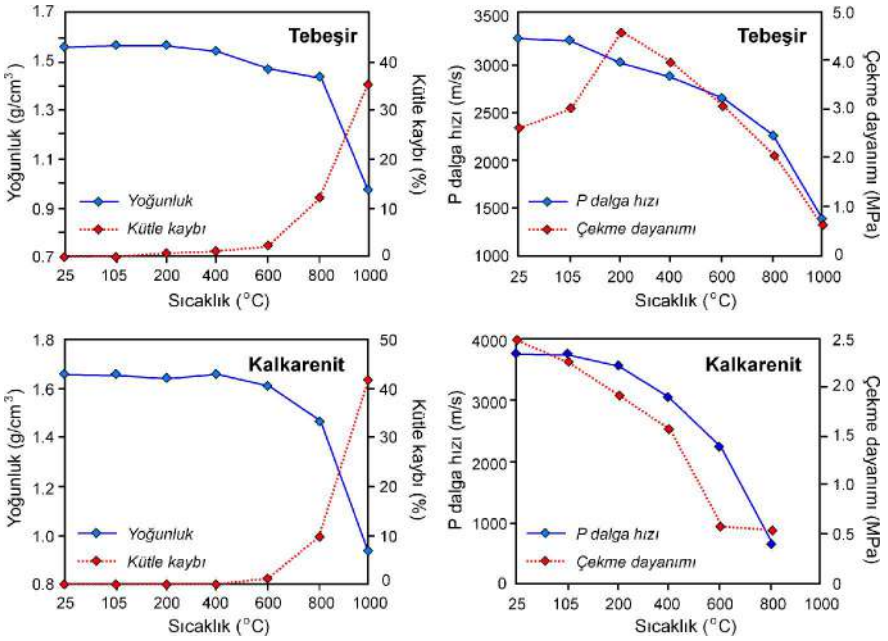
Hedef sıcaklık (ºC)	Yangın tipi (Eurocode 2002)	Hedef sıcaklığa ulaşma süresi	Maruz kalma süresi
105	Standart sıcaklık-zaman eğrisi (Eşitlik-1)	10 sn.	120 dakika
200		30 sn.	
400		90 sn.	
600		6 dak.	
800		23 dak.	
1000		85 dak.	

3. YÜKSEK SICAKLIKLARIN ETKİSİ

3.1. İndeks ve Dayanım Özelliklerindeki Değişimler

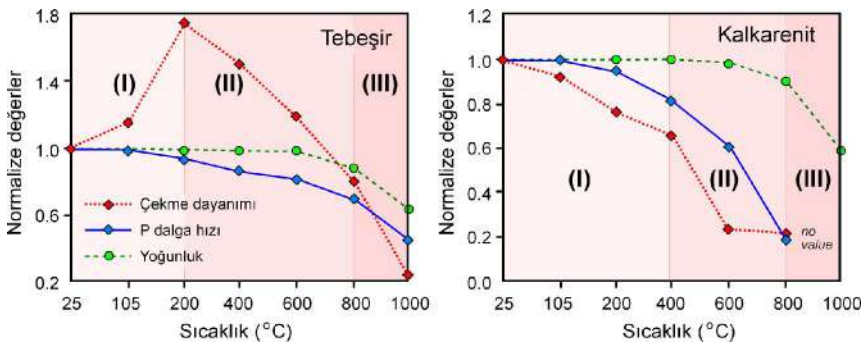
Çalışma kapsamında, kalkarenitler ve tebeşirler Eurocode tarafından önerilen standart sıcaklık-zaman eğrisi denklemi kullanılarak 1000ºC'ye kadar ısıtılmış ve 2 saat boyunca hedeflenen sıcaklıklarda bekletilmiştir. Deney sonucunda soğumaya bırakılan kalkarenit örneklerinde hem yoğunluk hem de ağırlık kaybı değerleri yaklaşık 600ºC'ye kadar sabit kalmış, bu sıcaklıktan sonra ani bir değişim göstermiştir. 1000ºC sıcaklıkta yoğunluk 1 gr/cm^3'ün altına düşerken, kütle kaybı % 45'e ulaşmıştır. P dalgası hız değerlerinde hızlı bir düşüş meydana gelmiş bu azalma 800ºC'de % 80'i aşmıştır. Çekme dayanımı değerleri ise her sıcaklık seviyesinde azalmıştır (Şekil 2)

Tebeşirlerde kütle kaybı ve yoğunluk değerleri ilk 400ºC'ye kadar değişmemiş, 400ºC'den sonra küçük bir değişiklik olmuştur. 800ºC'den sonra ise her iki değerde de ani bir değişim görülmüştür. 1000ºC sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde yoğunluk 1 gr/cm^3'ün altına düşerken, kütle kaybı değeri % 35'e ulaşmıştır. P dalgası hız değeri her sıcaklık seviyesinde azalmış, 800ºC'den sonra başlangıç değerine göre % 23 azalma kaydedilmiştir. Diğer değerlerden farklı olarak çekme dayanımı değeri 200ºC'ye kadar yükselmiştir. Bu sıcaklıktan sonra dayanım azalmaya başlamış, ancak 600ºC sıcaklıkta bile başlangıç değerinin üzerinde dayanım değerleri kaydedilmiştir. 600ºC'den sonra ise düşüş devam ederek 1000ºC'de % 80 azalmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kayaçların fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler (Ersoy vd. 2021b)

Kalsinasyon nedeniyle kireçtaşları dışında ağırlık kaybının % 50'ye vardığı ve yoğunluğunun 1 gr/cm^3'ün altına düştüğü kaya grubu yoktur. Kireçtaşlarının ısıtılması sırasında, termal ayrışmaya geçene kadar partikül yapısında bazı fiziksel değişiklikler meydana gelir. Bu sırada kalsiyum karbonatın yapısında ısıl genleşme meydana gelir ve bu genleşme mineral boyutlarında % 5'lik bir artışa neden olur (Hedin, 1954). Öncelikle maddenin yüzey nemi uzaklaştırılır, az miktarda organik madde yakılır ve karbondioksit gazı açığa çıkar. Bu işlemlere bağlı olarak kireçtaşları yapısının yaklaşık % 40-45'ini kaybederken yüzey şekilleri önemli ölçüde değişmez. Bu nedenlerle, toplam hacim yaklaşık olarak aynı kalsa da kütledeki bu tür bir azalma (% 40-45), boşluk oranında veya gözeneklilikte ani artışa neden olur (Moropoulou vd., 2001; Okonkwo ve Adefila, 2012). Normalize değerler alındığında bu durum net olarak görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kayaçların fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimin normalize değerlerle karşılaştırılması.

3.2. Sinterlenme Süreci ve Kil Minerallerinin Davranışı

Bazı kayaçlar yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında mikro-çatlak oranlarında artış olmasına karşın dayanımlarının belli sıcaklıklara kadar sürekli arttığı bilinmektedir. Özellikle karbonatlı kayalarda genleşmenin her zaman dayanımda bir azalmaya neden olmamaktadır (Hedin, 1954). Yüksek sıcaklıklar, iri kristalli kireçtaşlarında kristallerde kırılmaya neden olan gerilimi arttırırken, küçük kristaller bu gerilime daha dayanıklı hal almaktadır. İnce kristalli kireçtaşlarında, ısıtma sırasında oluşan çok sayıda mikro çatlak ve ayrı küçük kristaller genleşme sırasında genleşme mafsalı görevi görmekte ve bu nedenle yapının bütünlüğü bozulmamaktadır (Kurt, 2010). Ayrıca karbonat kayaçlarda görülen sinterlenme olgusu, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda (ergime sıcaklığının altında) birbirine bağlanmasını sağlayarak dayanımın artışına neden olmaktadır. Buna ek olarak, mikro çatlaklar oluşmasına rağmen; kil boyutundaki malzemelerin erimesi ve kil minerallerinin genişlemesi birincil boşlukların kapanmasına neden olmakta, bu durum belli sıcaklıklara kadar dayanımın artmasına katkı sağlamaktadır (Şekil 3). Bu durum, bu çalışmada tebeşirle çok net olarak gözlemlenmiştir.

Ancak 600 derece sıcaklıktan sonra sonra kil minerallerinin ne sinterlenmesi ne de kaynaşması, kaya yapısının bozulmasına ve dayanımda azalmaya engel olamamıştır. Maksimum sıcaklığa (1000ºC) maruz kalan kayaçlarda, artan mikro çatlak derecesi ikincil gözenekliliğin artmasına, kütle kaybının çok büyük oranda azalmasına ve nihayetinde dayanımda çok büyük bir azalmaya neden olmuştur.

3.3. Kayaçların Yüksek Sıcaklık Etkisine Göre Sınıflandırılması

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişiklikler genel olarak "termal hasar (DT)" olarak tanımlanır ve bu etki için sayısal olarak ifade edilen katsayı "termal hasar faktörü" olarak adlandırılır. Bu sayı (DT), başlangıç değeri ile ısıl işlemden sonra belirlenen değer arasındaki farkla ilgili sayısal bir değerdir. Genel olarak, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastik modül ve ultrasonik dalga hızı aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır (Hueckel vd., 1994; Zhang vd., 2009)

$$D_T = \frac{E_0 - E_T}{E_0} \; or \; \frac{\sigma_0 - \sigma_T}{\sigma_0} \tag{2}$$

$$D_T = 1 - \left(\frac{V_T}{V_0}\right)^2 \tag{3}$$

Burada; D_T: T sıcaklığında termal hasar faktörü (veya katsayısı), E_0: ilksel elastik modül, E_T: T sıcaklığına maruz kalan örneğin elastik modülü; σ_0: ilksel dayanım, σ_T: : T sıcaklığına maruz kalan örneğin dayanımı, V_0: ilksel P dalga hızı, V_T: T sıcaklığına maruz kalan örneğin p dalga hızı

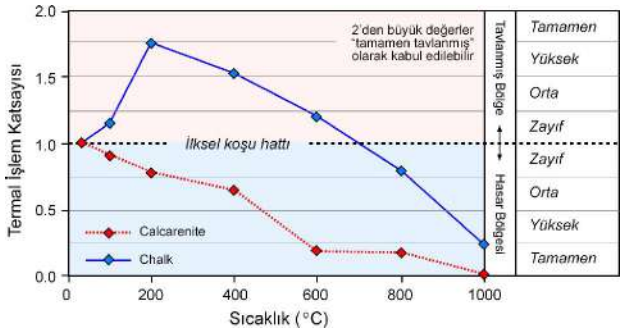
Termal hasarla ilgili yapılan hemen hemen tüm çalışmalarda, denklemlerde de kullanılan parametrelerin sıcaklıktaki artışa bağlı olarak kademeli olarak azaldığı görülmektedir (Zhang vd., 2016; Yang vd., 2019; Li vd., 2020; Wang vd., 2019; Wei vd., 2019; Ersoy vd., 2019; Liu vd., 2020; Srinivasan vd., 2020). Ancak özellikle kil içeriği ve tane boyutuna bağlı olarak sıcaklığın artmasıyla birlikte kayaların dayanımlarının arttığı çalışmalar da bulunmaktadır (Sirdesai vd., 2018; Gautam vd., 2019).

Eşitlik 2 ve 3 kullanılarak sıcaklığa bağlı olarak dayanımları bir miktar artıp sonra azalan kayaçların ısıl hasar faktörünü belirlemek, değerler negatif olduğu için mümkün değildir (Wang vd., 2015; Sirdesai vd., 2017; Liu ve Xu, 2015). Bu nedenle bu çalışmada yazarlar, artan sıcaklık nedeniyle mukavemeti artan kayaçlar için yukarıda verilen denklemleri değiştirerek yeni bir "termal işlem katsayısı" önermişlerdir (Ersoy vd. 2021b).

$$If \; A_T < A_0 \; or \; If \; A_T > A_0 \qquad D_{TC} = \frac{A_T}{A_0} \tag{4}$$

burada; D_{TC}: T sıcaklığında termal işlem katsayısı, A: ilksel kayacın "A" özelliği, A_T: T sıcaklığına maruz kalan kayacın "A" özelliği

Çalışmada ek olarak, önerilen denkleme dayalı yeni bir grafik geliştirilmiştir. Bu grafik ile hem artan hem de azalan dayınım gösteren farklı kaya grupları birlikte değerlendirilmiş ve sınıflandırılmıştır (Şekil 4). Bu çalışma kapsamında ise dayanımındaki artış ve azalışı birlikte değerlendirmek için önerilen denklem ve çizelge kullanılarak, tebeşirin 600°C'ye kadar "tavlanmış bölgede" ve 800°C'den sonra "hasar bölgesinde" kaldığı, kalkarenitlerin ise her sıcaklık kademesi için "hasar bölgesinde" kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4. Bu çalışma kapsamında önerilen "termal işlem katsayısı" grafiği ve çalışma konusu kayaçların sınıflandırılması (Ersoy vd. 2021b)

4. SONUÇLAR

Literatürde genellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayalarda termal hasarın derecesini ortaya çıkarmak için sayısal eşitlikler kullanılmaktadır. Hemen hemen tüm çalışmalarda, eşitliklerde kullanılan parametreler (dayanım, ultrasonik hız vb.) artan sıcaklığa bağlı olarak sürekli azalmaktadır. Ancak özellikle kil içeriği yüksek kayalarda sıcaklık arttıkça bu özellikler farklı davranış sunabilir. Bu nedenle literatürde önerilen denklemler, termal hasarı ölçmek için çoğunlukla yetersiz kalmaktadır. Bunun için bu çalışma kapsamında yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayalardaki değişimleri belirlemek ve sıcaklık nedeniyle dayanımı artan veya azalan farklı kayaçlardaki termal hasarı birlikte değerlendirmek için yeni bir "termal işlem katsayısı" denklemi ve yeni bir grafik önerilmiştir.

Bu amaçla çalışma kapsamında, kil içeriği yüksek kalkarenitler ve tebeşirler gerçek bir yangını temsil edecek şekilde 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuş, ısıtmada Eurocode tarafından önerilen zaman-sıcaklık eğrileri kullanılmıştır. Deney sonunda örnekler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. kalkarenit örneklerinde yoğunluk ve ağırlık kaybı değerleri yaklaşık 600°C'ye kadar sabit kalırken, tebeşirlerde bu değerler ilk 400°C'ye kadar değişmemiştir. Her iki farklı grup için 1000°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde yoğunluk 1 gr/cm^3'ün altına düşerken, kütle kaybı değeri % 45'lere ulaşmıştır. Kalkerenitlerde çekme dayanımı değerleri her sıcaklık seviyesinde azalmış, tebeşirlerde ise bu değer 200°C'ye kadar yükselmiş, bu sıcaklıktan sonra dayanım azalmaya başlamıştır. 600°C sıcaklıkta bile başlangıç değerinin üzerinde dayanım değerleri kaydedilmiş, ancak 600°C'den sonra ise düşüş devam ederek 1000°C'de % 80 azalmıştır.

Hemen hemen tüm çalışmalarda dayanım değişken davranış gösterirken, P-dalgası hız değerleri artan sıcaklıklar nedeniyle sürekli olarak azalmıştır. Bu nedenle P dalgası hızı ve dayanım değerlerinin benzer bir eğilim gösterip göstermediği hakkında yorum yapmak mümkün değildir. P dalgası hızları düşse bile yüksek sıcaklıklara maruz kalan killi kayaçların dayanım artabilir. Diğer bir deyişle dayanım (veya elastik modülü) ve p-dalga hızı değerleri, yüksek sıcaklıklara maruz kalan killi kayaçlarda farklı eğilimler sunabilir. Artan sıcaklıkla birlikte killi kayaların mukavemetindeki artış, kil mineralleri arasında belirli sıcaklıklara kadar (genellikle 400-600 derece arasında) sinterleme ve kaynaşmadan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada denklemde P dalgası hız değerleri dikkate alınmamış ve veri elde etme kolaylığı göz önünde bulundurularak çekme dayanımı değerleri kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, dayanımındaki artış ve azalışı birlikte değerlendirmek için önerilen denklem ve çizelge kullanılarak, tebeşirin 600^{o}C'ye kadar "tavlanmış bölgede" ve 800^{o}C'den sonra "hasar bölgesinde" kaldığı, kalkarenitlerin ise her sıcaklık kademesi için "hasar bölgesinde" kaldığı belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

Brotóns, V., Tomás, R., Ivorra, S., Alarcón, J.C., 2013. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. Engineering Geology, 167, 117-127.

Crosby, Z.K., Gullett, P.M., Akers, S.A., Graham, S.S., 2018. Characterization of the mechanical behavior of salem limestone containing thermally-induced microcracks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 101, 54–62.

Dong, Z., Sun, Q., Ye, J., Zhang, W., 2020. Changes in color and roughness of red sandstone at high temperatures. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 1959–1966.

Ersoy, H., Kolaylı, H., Karahan, M., Harputlu Karahan, H., Sünnetci, M.O., 2019. Effect of thermal damage on mineralogical and strength properties of basic volcanic rocks exposed to high temperatures. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78, 1515–1525.

Ersoy, H., Karahan, M., Kolaylı, H., Sünnetci, M.O., 2021a. Influence of Mineralogical and Micro-Structural Changes on the Physical and Strength Properties of Post-thermal-Treatment Clayey Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 54(2), 679-694.

Ersoy, H., Atalar, C., Sünnetci, M.O., Kolaylı, H., Karahan, M., Ersoy, A.F., 2021b. Assessment of damage on geo-mechanical and micro-structural properties of weak calcareous rocks exposed to fires using thermal treatment coefficient. Engineering Geology, 284, 106046.

Eurocode, 2002. Eurocode 1 : Actions on structures exposed to fire.

Gautam, P.K., Jha, M.K., Verma, A.K., Singh, T.N., 2019. Evolution of absorption energy per unit thickness of damaged sandstone. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 136(6), 2305-2318.

Hakyemez, H.Y., 2002. Main Geological Characteristics of Northern Cyprus. General Directorate of Mineral Research and Exploration of Turkey (unpublished report).

Hedin, R., 1954. Changes occurring in the limestone during heating before calcination. Swedish Cement and Concrete Research Institute Bulletin, 23, 34.

Heldal, T., Storemyr, P., 2015. Fire on the rocks: Heat as an agent in ancient egyptian hard stone quarrying, in: Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation, 291–295.

Hueckel, T., Peano, A., Pellegrini, R., 1994. A thermo-plastic constitutive law for brittle-plastic behavior of rocks at high-temperatures. Pure and Applied Geophysics, 143, 483- 511.

Kiliç, Ö., 2006. The influence of high temperatures on limestone P-wave velocity and Schmidt hammer strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 980–986.

Koca, M.Y., Ozden, G., Yavuz, A.B., Kincal, C., Onargan, T., Kucuk, K., 2006. Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 520–530.

Kurt, C.H., 2010. Dolomit Cevherinin Kalsinasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Li, Q., Yin, T., Li, X., Zhang, S., 2020. Effects of rapid cooling treatment on heated sandstone: a comparison between water and liquid nitrogen cooling. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 313–327.

Liu, S., Xu, J., 2015. An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks. Engineering Geology, 185, 63-70.

Liu, Z., Yao, Q., Kong, B., Yin, J., 2020. Macro-micro mechanical properties of building sandstone under different thermal damage conditions and thermal stability evaluation using acoustic emission technology. Construction and Building Materials, 246, 118485.

Meng, Q. Bin, Wang, C.K., Liu, J.F., Zhang, M.W., Lu, M.M., Wu, Y., 2020. Physical and micro-structural characteristics of limestone after high temperature exposure. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 1259–1274.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., 2001. The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. Cement and Concrete Research, 31, 633–639.

Murru, A., Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., Meloni, P., 2018. Evaluation of post-thermal shock effects in Carrara marble and Santa Caterina di Pittinuri limestone. Construction and Building Materials, 186, 1200-1211.

Okonkwo, P.C., Adefila, S.S., 2012. The kinetics of calcination of high calcium limestone. International Journal of Engineering Science and Technology, 4, 391–400.

Ozguven, A., Ozcelik, Y., 2013. Investigation of some property changes of natural building stones exposed to fire and high heat. Construction and Building Materials, 38, 813–821.

Ozguven, A., Ozcelik, Y., 2014. Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones. Engineering Geology, 183, 127-136.

Sengun, N., 2014. Influence of thermal damage on the physical and mechanical properties of carbonate rocks. Arabian Journal of Geosciences, 7, 5543–5551.

Sirdesai, N.N., Singh, T.N., Ranjith, P.G., Singh, R., 2017. Effect of varied durations of thermal treatment on the tensile strength of red sandstone. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 205–213.

Sirdesai, N., Srinivasan, V., Singh, R., Singh, T.N., 2018. Thermo-temporal behaviour of uniaxial compressive strength of a fine-grained indian sandstone, in: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses - Selected Papers from the 2018 European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2018.

Srinivasan, V., Tripathy, A., Gupta, T., Singh, T.N., 2020. An Investigation on the Influence of Thermal Damage on the Physical, Mechanical and Acoustic Behavior of Indian Gondwana Shale. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1-21.

Wang, P., Xu, J., Liu, S., 2015. Staged moduli: a quantitative method to analyze the complete compressive stress–strain response for thermally damaged rock. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 1505–1514.

Wang, P., Xu, J., Liu, S., Wang, H., 2016. Dynamic mechanical properties and deterioration of red-sandstone subjected to repeated thermal shocks. Engineering Geology, 212, 44–52.

Wang, X., Huang, L., Zhang, J., 2019. A rheological model of sandstones considering response to thermal treatment. Advances in Civil Engineering, 2019, 2143748.

Wei, S., Yang, Y., Su, C., Cardosh, S.R., Wang, H., 2019. Experimental study of the effect of high temperature on the mechanical properties of coarse sandstone. Applied Sciences, 9(12), 2424.

Yang, J., Fu, L.Y., Zhang, W., Wang, Z., 2019. Mechanical property and thermal damage factor of limestone at high temperature. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 117, 11–19.

Zhang, L., Mao, X., Lu, A., 2009. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. Science China Technological Sciences, 52, 641–646.

Zhang, W., Qian, H., Sun, Q., Chen, Y., 2015. Experimental study of the effect of high temperature on primary wave velocity and microstructure of limestone. Environmental Earth Sciences, 74, 5739–5748.

Zhang, W., Sun, Q., Hao, S., Wang, B., 2016. Experimental study on the thermal damage characteristics of limestone and underlying mechanism. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, 2999–3008.

Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Magmatik Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin İncelenmesinde Yeni Bir Yaklaşım

A New Approach for Investigating the Changes in Physical and Mechanical Properties of Igneous Rocks Exposed to High Temperatures

M.O. Sünnetci[1,*], H. Ersoy[1], M. Karahan[1]

*[1] Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü 61080 Ortahisar, Trabzon (*moguzsunnetci@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada yüksek sıcaklıkların kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasında tüm deney prosedürünün aynı örnekler üzerinde uygulandığı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu amaçla hem literatürde uygulanan metodoloji hem de yeni önerilen metodoloji kullanılarak disk şekilli andezit örnekleri 200, 350, 500 ve 680°C sıcaklık kademelerinde ısıl işleme tabi tutulmuş ve soğuma hızı etkisinin de belirlenebilmesi için 2 farklı soğutma yöntemine göre soğutulmuştur. Daha sonra örnekler üzerinde boyuna dalga hızı, Leeb Sertliği (equotip) ve Brazilian deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde önerilen metodolojinin literatürdeki yönteme kıyasla çok daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Yeni önerilen yöntemdeki ısınma-soğuma döngülerinin kayaçlar üzerinde herhangi bir yorulma etkisi oluşturmadığı gözlenmiştir. Soğuma hızının örneklerin mekanik davranışı üzerinde belirgin bir fark oluşturmadığı belirlenmiştir. Equotip deneyinin kayaçlar üzerindeki termal etkinin araştırılmasında kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek sıcaklık, hasarsız deney, equotip, boyuna dalga hızı, Brazilian

ABSTRACT: *In this study, a new method has been proposed in which the whole test procedure is applied on the same samples to investigate the effects of high temperatures on the mechanical properties of rocks. For this purpose, using both the methodology applied in the literature and the newly proposed methodology, disc-shaped andesite samples were treated at 200, 350, 500 and 680°C temperature levels and cooled according to 2 different cooling methods in order to determine the effect of cooling rate. Then, longitudinal wave velocity, Leeb Hardness (equotip) and Brazilian tests were performed on the samples. When the experimental results were examined, it was seen that the proposed methodology yields much more consistent results compared to the methodology available in the literature. It was observed that the heating-cooling cycles in the newly proposed method did not cause fatigue on the rocks. It was determined that the cooling rate did not make a significant difference on the mechanical behavior of the samples. It has been demonstrated that the equotip test can be used to investigate the thermal effect on rocks.*

Keywords: *High temperature, non-destructive test, equotip, longtidunal wave velocity, Brazilian*

1. GİRİŞ

Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin donma-çözünme, ıslanma-kuruma ve yüksek sıcaklıklara maruz kalma gibi çevresel faktörlerden oldukça etkilendikleri bilinmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklar, donma-çözünme ve ıslanma-kuruma döngülerinden farklı olarak, belli eşik değerlerden sonra kimyasal tepkimeler tetikleyerek kayacın dokusunu, mineral içeriğini ve nihayetinde mekanik davranışını dramatik bir şekilde değiştirmektedir. Killi kayaçların dayanımının sinterleme etkisiyle yüksek sıcaklıklarda artması veya magmatik kayaçlarda muskovit gibi düşük dayanımlı fillosilikatların oluşması gibi durumlar kayaçlarda sıcaklık etkisiyle gerçekleşen kimyasal tepkimelerin dayanım karakteristiklerine olan etkisini ortaya koymaktadır (Török ve Hajpal, 2005; Nigay vd., 2017; Ersoy vd. 2021).

Beton ve kaya gibi sentetik ve doğal yapı malzemelerinin ısıl işlem sonrası davranışlarının incelenmesi son yıllarda araştırmacılar arasında büyük ilgi gören bir konu haline gelmiş ve bu araştırmacılar tarafından yüksek sıcaklıklara maruz kalmanın etkilerini araştırmak için farklı deney

prosedürleri benimsenmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) gibi deneylerle malzeme dayanımındaki değişikliklerin doğrudan belirlenmesinin yanı sıra çok sayıda araştırmacı tahribatsız deneyler (TD) kullanarak yapı malzemelerindeki yangın hasarını belirleme ve ölçme yoluna gitmiştir. Kılıç (2006), artan sıcaklıklarla iki kireçtaşındaki fiziksel ve mekanik değişiklikleri araştırmak için bir dizi TD gerçekleştirmiş ve V_p ile dayanımın büyük ölçüde kalsinasyon işlemine bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Chaki vd. (2007), gözeneklilik, gaz geçirgenliği ve V_p ölçümleri gibi farklı TD ile termal olarak çatlamış granit numunelerinin dayanımını araştırmış ve bu deneylerin ısıl işlem sonrası kaya davranışını doğru bir şekilde tanımlayabildiğini belirtmiştir. Beck vd. (2016), yangın hasarına maruz kalan bir doğal yapı taşının (kireçtaşı) bozulma derecesinin yerinde *(in-situ)* belirlenebilmesi için yeni bir metodoloji önermek amacıyla kolorimetri ve V_p ölçümleri arasında korelasyonlar yapmıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar da dahil olmak üzere literatürdeki birçok çalışmada farklı sıcaklık kademelerinde farklı kayaç grupları deneylere tabi tutulmuştur. Örneğin, bir granit bloğundan 30 adet karot numunesi aldığımızı varsayalım. Bu numuneler 5'er adet numune içeren 6 farklı gruba ayrılsın. 1. grup örnekleri 100°C'de, 2. grup örnekleri 200°C'de, 3. grup örnekleri 300°C'de vb. şekilde deneye tabi tutulmaktadır. Örnekler aynı bloktan alınmasına rağmen bunlar arasında gözeneklilik, dane boyu ve mikro yapı (çatlaklar, kırıklar, özürler) bakımından bir miktar heterojenlik olması kaçınılmazdır. Bu heterojenlik özellikle yüksek sıcaklıklarda kayaçların davranışlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıklarda kayaçlarda gözlenen dayanım veya davranış farklılıklarının ısıl işlem etkisiyle mi yoksa kayaçlar arasındaki doğal heterojenlikten mi kaynaklandığı da belirlenemeyecektir. Bazı araştırmacılar (Chaki vd. 2007, Wang vd. 2015, Wu vd. 2013) bu heterojenliği ve neden olduğu sonuçları minimize etmek için çok yakın V_p veya yoğunluk değerlerine sahip örnekleri elle seçerek kullanma yoluna gitmişlerdir. Ancak elle seçilmiş örnekler üzerinde deney yapmak taraflı (biased) bir deney prosedürünün uygulanmasına yol açabilir çünkü yalnızca benzer özelliklere sahip örnekler deneye tabi tutulacak, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip örneklerin yüksek sıcaklıklardaki tepkisi ise göz ardı edilmiş olacaktır.

Bu çalışmada ise bir andezit bloğundan alınan disk şekilli örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıklardaki değişimi aynı örnekler üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. 12 gruba ayrılan örneklerden 2'şer grup tüm sıcaklık kademelerine arka arkaya maruz bırakılmış ve her bir sıcaklık kademesinden sonra örnekler üzerinde V_p ve Leeb Sertliği (H_L) (equotip) ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra aynı örnekler bir sonraki sıcaklık kademesine maruz bırakılmak üzere tekrar fırına yerleştirilmiştir. Geri kalan gruplar ise literatürde uygulandığı şekilde farklı sıcaklık kademelerine maruz bırakılmıştır. Son olarak örneklerin dayanım özelliği Brazilian (Dolaylı çekme dayanımı) deneyleri ile araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Örnek Tanımlaması

Çalışmada kullanılan andezit örneklerinden alınan karotlar elmas uçlu mekanik testere ile dilimlenerek yükseklik/çap oranı yaklaşık 0.5 olan 36 adet disk şekilli örnekler elde edilmiştir (ISRM, 1978). Örneklerin çapları ve yükseklikleri 3 farklı eksen boyunca 0.1 mm hassasiyetindeki dijital kumpasla ölçülmüş ve 3 ölçümün ortalaması kaydedilmiştir. Ölçümlerden sonra örnekler 1 hafta boyunca saf su banyosuna konularak doyurulmuş ve ağırlıkları 0.01 gr hassasiyetinde tartılmıştır. Son olarak örnekler 25°C'lik etüvde 48 saat kurutularak tekrar tartılmış ve deneyler başlayana kadar oda koşullarında saklanmıştır. Örneklerin boyutları, ağırlıkları ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan andezit örneklerinin fiziksel özellikleri.

	Yükseklik (mm)	Çap (mm)	Hacim (cm^3)	Doygun kütle (gr)	Kuru kütle (gr)	Doygun BHA (kN/m^3)	Kuru BHA (kN/m^3)
Ort.	32,56	49,31	62,19	171,20	170,25	27,01	26,86
Min.	30,50	49,25	58,25	160,45	159,36	25,64	25,47
Mak.	34,96	49,38	66,76	184,58	183,42	27,53	27,37
Std. S.	0,96	0.04	1,83	5,18	5,20	0,34	0,34

2.2. Yöntem

Hazırlanan 36 adet örnek 3'er örnekten oluşan 12 farklı gruba ayrılmıştır. Gruplar oluşturulurken birbirine yakın V_p ve H_L değeri olan örnekleri aynı gruba koymak yerine gruplar arasındaki V_p ve H_L değerlerinin ortalaması birbirine yakın olacak şekilde örnekler dağıtılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında tüm örnekler 25°C'lik etüvde 24 saat kurutulmuş ve V_p ve H_L değerleri referans olarak ölçülmüştür. "Önerilen" yönteme göre yapılan deneylerde gruplardan 2 tanesine ait örnekler 200, 350, 500 ve 680°C'lik sıcaklık kademelerine arka arkaya maruz bırakılmıştır. Her bir sıcaklık kademesinden sonra örnekler 'Isıl İşlem' bölümünde açıklanan soğutma yöntemlerinden birisine göre soğutulmuş ve V_p ve H_L ölçümleri yapılmıştır. Tüm sıcaklık kademeleri tamamlandıktan sonra örneklerin dolaylı çekme dayanımı Brazilian deneyi ile belirlenmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise literatürde yer alan 'genel' yöntem uygulanmış, 10 adet gruba ait örnekler her sıcaklık kademesinde 2'şer grup (her iki soğutma yöntemi için birer grup) olmak üzere ısıl işleme tabi tutulmuş ve örnekler üzerinde V_p, H_L ve Brazilian deneyleri yapılmıştır. Kullanılan farklı yöntemlere göre her bir sıcaklık kademesinde yapılan deneyler ve kullanılan toplam örnek sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada uygulanan deney yöntemleri ve kullanılan olan örnek sayıları.

Yöntem	25°C	200°C	350°C	500°C	680°C	Örnek sayısı
Genel	V_{P1}, H_{L1}, σ_{t1}	V_{P2}, H_{L2}, σ_{t2}	V_{P3}, H_{L3}, σ_{t3}	V_{P4}, H_{L4}, σ_{t4}	V_{P5}, H_{L5}, σ_{t5}	30 adet
Önerilen	V_{P1}, H_{L1}	V_{P1}, H_{L1}	V_{P1}, H_{L1}	V_{P1}, H_{L1}	V_{P1}, H_{L1}, σ_{t1}	6 adet

2.3. Isıl İşlem ve Soğutma

Isıl işlem uygulamaları bir dış yangını temsil etmek amacıyla 25, 200, 350, 500 ve 680°C sıcaklık kademelerinde gerçekleştirilmiştir. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra bu sıcaklık 2 saat boyunca örneğe uygulanmıştır. Soğuma hızının dayanım üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla 2 farklı soğutma yöntemi izlenmiştir. Çalışmada kullanılan örneklerin yarısı kül fırını içerisinde hazne kapağı kapalı şekilde soğutulurken diğer yarısı oda koşullarında soğutulmuştur. Kül fırını içerisinde soğutulan örnekler dışarı çıkarılmadan önce, ısıl şok etkisini minimuma indirmek amacıyla, hazne sıcaklığının 25-30°C'lere inmesi beklenmiştir. Tüm örnekler fırından çıkarıldıktan sonra örnek bütünlüğünün bozulduğunu gösteren kusurların varlığına karşı dikkatlice incelenmiştir.

2.4. V_P Ölçümleri

En çok kullanılan tahribatsız deneylerden birisi olan P-dalga hızı ölçümü neredeyse tüm malzemelerin gözenek ve çatlak oranı, sıkışma dayanımı, doygunluk ve bozunma derecesi parametrelerini temsil edebilmektedir (Ersoy vd. 2019). Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçların parçacık içi ve parçacıklar arası boşluk miktarı değiştiğinden, V_p ölçümleri kayaçların mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıklar altındaki değişiminin incelendiği çalışmalarda en çok tercih edilen deneylerin başında gelmektedir. Bu çalışmada V_p ölçümleri Proceq Pundit Plus model laboratuvar ekipmanıyla 54 kHz frekansında çalışan verici-alıcı ikilisi kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler esnasında örneğin her iki yüzeyine su bazlı bir bağlayıcı sürülmüş ve iyi bir sinyal kalitesi için bir miktar normal yük uygulanmıştır. Farklı eksenler boyunca 3 ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması örneğin ultrasonik seyahat süresi (t_p)olarak kabul edilmiştir. Örneğin V_p değeri,aşağıdaki eşitlik kullanılarak m/sn cinsinden belirlenmiştir (Ersoy vd. 2017):

$$V_p = (h/t_p)*1000 \quad (1)$$

Burada;

h : örnek yüksekliği (mm)
t_p : ultrasonik seyahat süresidir (μs).

2.5. Leeb Sertliği Deneyleri

H_L tahribatsız bir laboratuvar deney ekipmanı olan Leeb Sertliği Deney Ekipmanı veya daha yaygın ismiyle equotip kullanılarak belirlenen bir yüzey sertliği göstergesidir. Deney ekipmanının ve deneyin

prensibi Schmidt çekicine çok benzemekle birlikte equotip malzeme yüzeyine çok daha az bir enerji (bu çalışmada kullanılan D-tipi equotip cihazı için 11 mJ) uygulamakta, bu da deneyin çok zayıf kayaçlarda ya da tarihi yapılarda dahi uygulanabilmesini sağlamaktadır. Deney ilk olarak metal malzemelerin yüzey sertliğinin belirlenmesi amacıyla geliştirilse de son yıllarda araştırmacılar tarafından kayaçların mekanik özelliklerinin tahmin edilmesinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada H_L ölçümleri Time® 5100 model taşınabilir D-tipi equotip cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kayaçlarda H_L değerinin belirlenmesine yönelik herhangi bir standart bulunmadığından, literatürde en çok tercih edilen yöntem olan tek darbe ölçümü (single impact measurement) kullanılmıştır. Örnek yüzeyindeki 20 farklı noktaya tek bir darbe uygulanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması örneğin H_L değeri olarak kaydedilmiştir (Desarnaud vd. 2019). Hatırlatmak gerekir ki bu çalışmada H_L deneyleri kayaç dayanımının tahmin edilmesi amacıyla değil, kayaç dayanımındaki değişimlerin H_L verileriyle yorumlanması amacıyla yapılmıştır.

2.6. Dolaylı Çekme Dayanımı (Brazilian) Deneyi

Brazilian deneyi beton, kayaç ve kayaç benzeri malzemelerin çekme dayanımının dolaylı olarak belirlenmesi amacıyla 1940'larda geliştirilen bir deneydir. Deney disk şekilli örnekler üzerinde de yapılabildiği için bu çalışmada tercih edilmiştir. Deneyler 50 KPa'lık yükleme başlığına sahip tam otomatik servo-kontrollü deney ekipmanı kullanılarak yapılmış ve örneklerin çekme dayanımı ISRM (1978)'in önerdiği aşağıdaki eşitlik kullanılarak MPa cinsinden belirlenmiştir:

$$\sigma_t = 0.636\ P/Dt \qquad (2)$$

Burada; P yenilme anındaki yük (N), D örnek çapı (mm) ve t ise örneğin merkezden ölçülen kalınlığıdır (mm). Brazilian deneyi tahrip edici bir deney olduğundan bu çalışmada önerilen yöntem uygulanırken örneklerin σ_t değerleri tüm ısıl işlem süreci tamamlandıktan sonra yapılmıştır. Genel yönteme göre yapılan deneylerde ise her bir sıcaklık kademesinden sonra Brazilian deneyleri yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

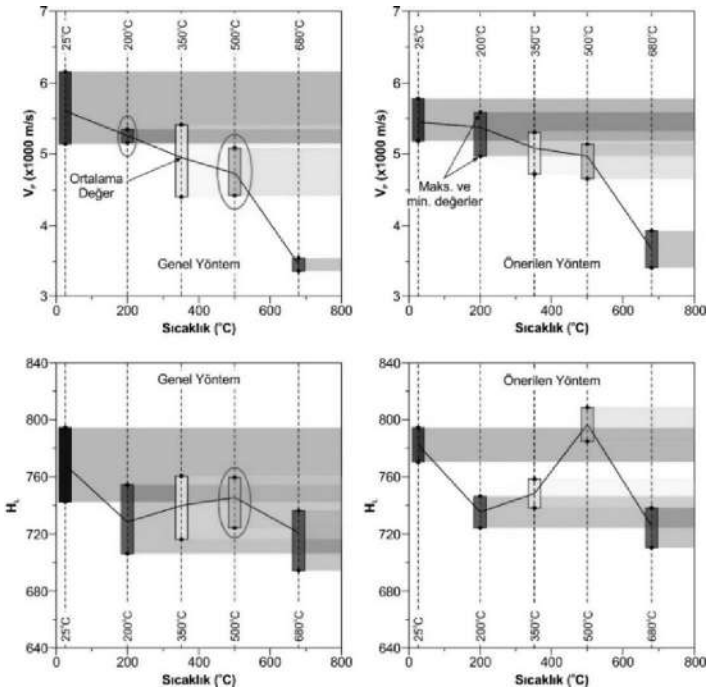
3.1. Kullanılan Deney Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Önerilen yeni yöntem genel yönteme uygun olarak yapılan deneylerin sonuçları maksimum, minimum ve ortalama olarak verilmiş ve veri ikililerinin dağılımları şeffaf huzmelerle temsil edilmiştir. Herhangi bir veri grubunu çevreleyen kırmızı halkalar o grubun veri dağılımının (yani huzmesinin) tamamen başka bir grubun huzmesi içerisinde kaldığını, yani o grup için ısıl işlem etkisini örnekler arasındaki heterojenlik etkisinden ayırmanın mümkün olmadığını ifade etmektedir. Bu durum genel yönteme göre yapılan V_p ve equotip deneylerinde açıkça gözükmektedir (Şekil 1). Önerilen yönteme göre yapılan deney sonuçları incelendiğinde, tüm veri gruplarına ait huzmelerin belirgin bir şekilde diğer gruplardan ayrılmış olduğu gözükmektedir. Ayrıca, önerilen yöntemde tüm ısıl işlem ve deney sürecinde aynı örnekler kullanıldığından, örneklere ait V_p ve H_L değerlerindeki değişimin tamamen ısıl etkiden kaynaklandığı rahatlıkla söylenebilir.

Üzerinde durulması gereken bir başka nokta da genel yönteme göre yapılan deneylerin sonuçlarına ait veri gruplarının saçınımının tutarsız ve düzensiz olmasıdır. Bir başka deyişle, maksimum ve minimum V_P ve H_L değerleri arasındaki farklar genel yöntemde çok düzensizdir. Bu düzensizlik her sıcaklık kademesinde birbirinden farklı jeomekanik özelliklere sahip örneklerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Verilerin ortalama değerleri üzerinden bir değişim trendi çıkarımı yapmak mümkün olsa da veri setindeki bu düzensizlik yapılan çıkarımın doğruluğunu ve güvenilirliğini olumsuz etkilemektedir. Önerilen yönteme göre yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde ise, yüksek sıcaklıklardaki bazı H_L değerlerinin dışında, V_p ve H_L değerlerinin maksimum ve minimumları arasındaki farkın az ve düzenli olduğu, böylece daha sağlıklı çıkarımların yapılabileceği açıkça gözükmektedir. Yukarıda bahsedilen noktaların dışında ise her iki yöntemle de çok benzer V_P ve H_L değerlerinin elde edildiği ve artan sıcaklıkla benzer değişim trendlerinin gözlendiği ortadadır.

3.2. Soğuma Hızlarının Etkisinin Değerlendirilmesi

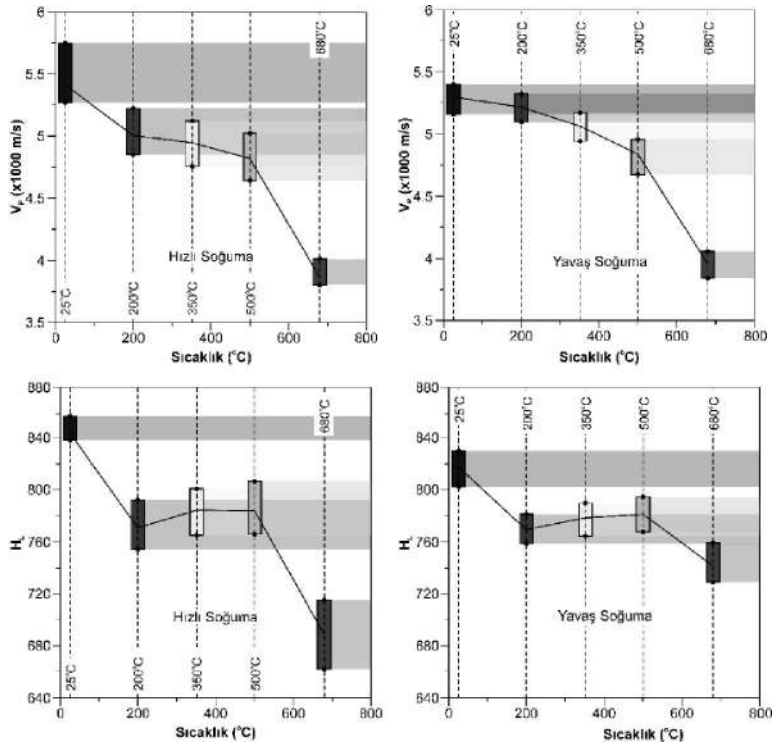
Çalışma kapsamında hızlı gerçekleşen oda koşullarında soğutma ile yavaş gerçekleşen fırın içi soğutma yöntemlerinin V_P ve H_L değerleri üzerindeki etkisi tartışılmıştır (Şekil 2). Sonuçlar incelendiğinde uygulanan soğutma yönteminin kayaçların ısıl işlem sonrası davranışını çok fazla etkilemediği görülmüştür. Yalnızca hızlı soğuyan örneklerin V_P değerlerinin saçınımının yavaş soğuyan örneklerinkine göre daha fazla ve düzensiz olduğu gözükmektedir. Bu durum hızlı soğumanın kayaç içerisindeki ilksel kusurları daha fazla etkilediğini, böylece düşük olan V_P değerlerini daha da aşağıya çekerek maksimum ve minimum değerler arasındaki farkı arttırdığını ortaya koymaktadır. Bu fark dışında; V_P değerlerindeki değişim trendlerinin her iki soğutma yönteminde de neredeyse aynı olduğu, her bir sıcaklık kademesinde çok yakın maksimum, minimum ve ortalama değerlerin elde edildiği ve nihai V_P ve H_L değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir.



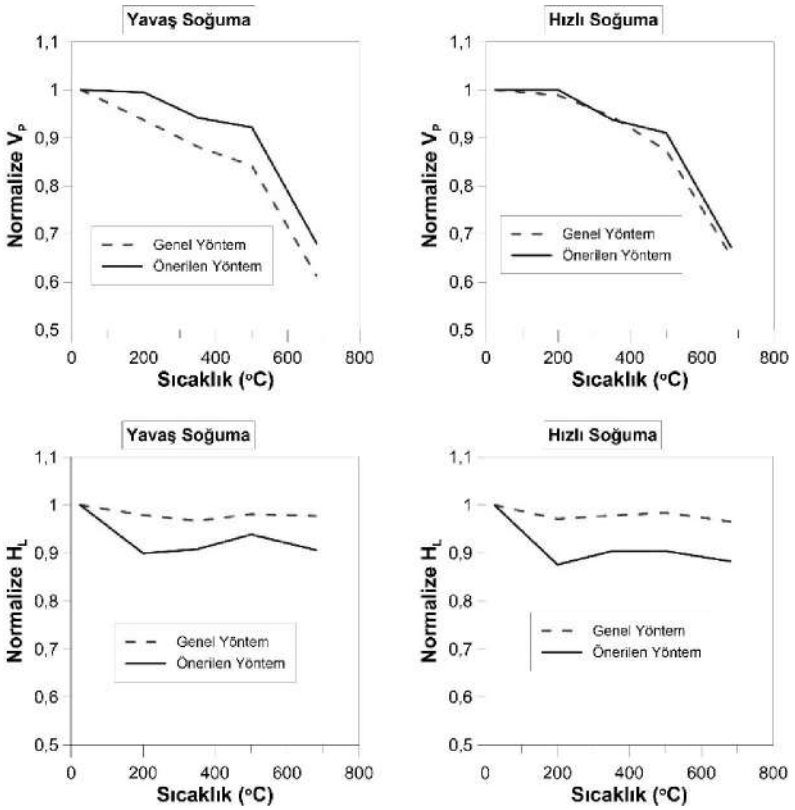
Şekil 1. Örnekler üzerinde farklı yöntemlere göre yapılan deneylerin sonuçları.

3.3. Isınma-Soğuma Döngülerinin Etkisinin Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında önerilen yöntemde kayaç örnekleri belirli sıcaklık kademelerine maruz bırakıldıktan sonra tahribatsız deneyler uygulanmış, daha sonra örnekler bir üst sıcaklık kademesine maruz bırakılmak üzere tekrar fırına yerleştirilmiştir. Bu ısınma-soğuma döngülerinin örneklerde yorulma etkisi oluşturduğu bilinen bir gerçektir (Mutlutürk vd., 2004; Yavuz, 2011). Bu çalışmada yapılan ısınma-soğuma döngüleri literatürdeki çalışmalara kıyasla çok daha az sayıda olsa da (4 döngü) bu durumun kayaçların dayanımı üzerindeki potansiyel etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla önerilen yönteme ve genel yönteme göre yapılmış olan V_P ve H_L deneylerinin sonuçları ilksel değerlere (25°C'deki) göre (başlangıç değeri 1, diğerleri de bu değerin yüzdesel olarak azalmış değerleri olmak üzere) normalize edilerek incelenmiştir (Şekil 3). Sonuçlar incelendiğinde önerilen yöntemin örneklerde yorulmaya neden olduğuna dair belirgin bir göstergenin bulunmadığı görülmüştür. Şekil 1'de her iki yönteme göre yapılan V_P ve H_L deneylerinin sonuçları da bu durumu doğrulamaktadır; V_P ve H_L değerleri her sıcaklık kademesinde ve özellikle de dördüncü ve son döngünün gerçekleştiği 680°C'de birbiriyle neredeyse aynıdır.



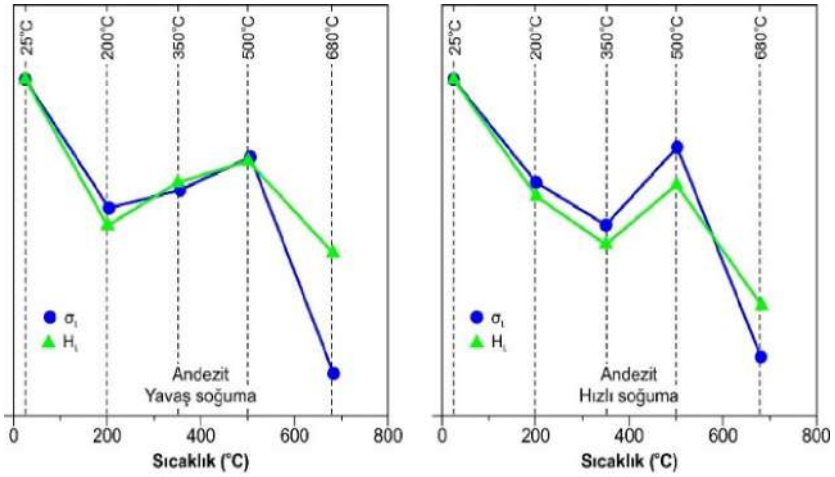
Şekil 2. Andezit örneklerinin V_P ve H_L değerlerinin farklı soğuma koşullarındaki değişimi



Şekil 3. Andezit örneklerinin normalize edilmiş V_P ve H_L değerleri.

3.4. Kayaçlarda Isıl Etkinin Araştırılmasında Equotip Deneyinin Kullanılabilirliği

Tahribatsız, kolay ve nispeten hızlı bir deney olan equotip deneyinin kayaçların mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıklar altındaki değişiminin incelendiği çalışmalarda kullanılabilirliği bu bölümde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda genel yönteme göre yapılmış olan equotip ve Brazilian deneylerinin sonuçları normalize edilerek karşılaştırılmıştır (Şekil 4). V_P değerleri dayanıma bağlı olmaksızın kayaç gözenekliliğine bağlı olarak artan sıcaklıkla azaldığı için (Ersoy vd., 2019) bu bölümde dikkate alınmamıştır. Şekil 4'te görülebildiği üzere equotip deneyi tüm sıcaklık kademelerinde σ_t ile oldukça tutarlı sonuçlar vermiştir. Elde edilen veriler equotip deneyinin kayaçlar üzerindeki ısıl etkiyi belirlemede kullanılabileceğini göstermektedir. Yine de kaba daneli magmatik kayaçlar ve kumtaşı gibi tortul kayaçlar üzerinde de çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır.



Şekil 4. Normalize edilmiş σ_t ve H_L değerlerinin artan sıcaklıkla değişimi.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kayaçların dolaylı çekilmeye karşı davranışının yüksek sıcaklıklar altındaki değişiminin araştırılmasında yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen metodoloji örnekler arasındaki heterojenlik etkisinin ortadan kaldırılması esasına dayanıp literatürde yer alan yönteme göre daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde edildiği düşünülmektedir. Her bir sıcaklık kademesinde ölçülen ortalama σ_t, H_L ve V_p değerleri incelendiğinde her iki yöntemin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu anlamda hem gereken örnek sayısının literatürdeki yönteme göre çok az sayıda olması, böylece zamansal ve maddi açıdan daha ekonomik olması, hem de örnekler arasındaki heterojenlik etkisini ortadan kaldırması bakımından önerilen metodolojinin daha kullanılışlı olduğu sonucuna varılmıştır. Önerilen metodolojide uygulanan ısınma-soğuma döngülerinin örnekler üzerinde herhangi bir yorulmaya neden olmadığı belirlenmiştir. Ancak bunun daha yüksek sıcaklık ve döngü sayılarıyla denetlenmesi gerekir. Fırın içerisinde hazne kapağı kapalı olarak soğutulan örneklerle oda koşullarında soğutulan örnekler arasında dayanım açısından belirgin bir fark oluşmadığı gözlenmiştir. Equotip deneyinin kayaçların mekanik davranışlarında yüksek sıcaklıklar etkisiyle meydana gelen değişimlerin incelendiği çalışmalarda kolay, hızlı ve güvenilir bir hasarsız deney olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur.

5. KAYNAKLAR

Beck, K., Janvier-Badosa, S., Brunetaud, X., Török, Á. and Al-Mukhtar, M., 2016. Non-destructive diagnosis by colorimetry of building stone subjected to high temperatures. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 20(6), 643-655.

Chaki, S., Takarli, M. and Agbodjan, W.P., 2008. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. Construction and Building Materials, 22(7), 1456-1461.

Desarnaud, J., Kiriyama, K., Bicer Simsir, B., Wilhelm, K. and Viles, H., 2019. A laboratory study of Equotip surface hardness measurements on a range of sandstones: What influences the values and what do they mean?. Earth Surface Processes and Landforms, 44(7), pp.1419-1429.

Ersoy, H., Karahan, M., Kolaylı, H., Sünnetci, M.O., 2021. Influence of Mineralogical and Micro-Structural Changes on the Physical and Strength Properties of Post-thermal-Treatment Clayey Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 54(2), 679-694.

Ersoy, H., Kolaylı, H., Karahan, M., Karahan, H.H., Sünnetci, M.O., 2019. Effect of thermal damage on mineralogical and strength properties of basic volcanic rocks exposed to high temperatures. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(3), 1515-1525.

Ersoy, H., Karahan, M., Babacan, A.E., Sünnetci, M.O., 2019. A new approach to the effect of sample dimensions and measurement techniques on ultrasonic wave velocity. Engineering Geology, 251, 63-70.

ISRM, 1978. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, 15, 99–103

Kılıç, Ö., 2006. The influence of high temperatures on limestone P-wave velocity and Schmidt hammer strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 980–986.

Mutlutürk, M., Altindag, R. and Türk, G., 2004. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing–thawing and heating–cooling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(2), 237-244.

Nigay, P.M., Cutard, T. and Nzihou, A., 2017. The impact of heat treatment on the microstructure of a clay ceramic and its thermal and mechanical properties. Ceramics international, 43(2), 1747-1754.

Török, A., Hajpál, M., 2005. Effect of temperature changes on the mineralogy and physical properties of sandstones. A laboratory study. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 11(4), 211.

Wang, P., Xu, J.Y., Liu, S., 2015. Ultrasonic method to evaluate the residual properties of thermally damaged sandstone based on time–frequency analysis. Nondestructive Testing and Evaluation, 30(1), 74-88.

Wu, G., Wang, Y., Swift, G., Chen, J., 2013. Laboratory investigation of the effects of temperature on the mechanical properties of sandstone. Geotechnical and Geological Engineering, 31(2), 809-816.

Yavuz, H., 2011. Effect of freeze–thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70(2), pp.187-192.

Trakya Formasyonunda Emniyetli Taşıma Basıncının Süreksizlik – Dayanım – Temel Genişliği ile Değerlendirilmesi

Evaluation of Safe Bearing Pressure with Discontinuity-Strength and Foundation Width in Trakya Formation

G. Selçuk[1,*], E. Bozkurtoğlu[1], C. Zabcı[1]
[1]İTÜ, Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
*(*gamzeselcuk74@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada İstanbul'un temel kayalarından olan Trakya formasyonunda süreksizlik özellikleri, basınç dayanımı, temel genişliği ilişkisi içinde emniyetli taşıma basıncı araştırılmıştır. İTÜ Ayazağa Yerleşkesi'nde yapılan çalışmada kayanın süreksizlik özellikleri mostralarda ölçülmüş ve ölçüm yapılan mostralardan alınan örnekler üzerinde fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Deney verileri sonucunda örnekler kaya sınıflamaları ile değerlendirilmiştir. Süreksizlik özellikleri ve kaya dayanımı kayalarda emniyetli taşıma basıncını tanımlayan eşitlik ile irdelenmiş, Trakya Formasyonunda şerit ve radye temel için emniyetli taşıma basınç değerini belirleyecek genel denklem elde edilmiştir. Çalışma alanında bir fliş istifi olan Trakya formasyonunun düşükten yüksek dayanıma ve düşükten yüksek birim hacim ağırlığa değişen litolojiler içermesi nedeniyle önerilen genel denklem kırıntılı tortul kayalar için de güvenle kullanılabilir. Önerilen genel denklem kullanılarak, kayanın ilgili bölgede ne kadar basıncı emniyet ile taşıyabileceği öngörülebildiği için buna göre temel cinsi ve boyutu için değişik seçenekler kolayca irdelenip en uygun çözüm seçilebilir.

Anahtar Kelimeler: süreksizlik, dayanım, temel genişliği, emniyetli taşıma basıncı

ABSTRACT: *In this study, the safe bearing pressure in the relation of discontinuity properties, compressive strength, footing width in Trakya Formation, which is one of the bedrock of Istanbul, has been investigated. The discontinuity properties of the rock are measured in the outcrops in the study conducted at İTÜ Ayazağa Campus and physico-mechanical experiments are carried out on the samples taken from the outcrops. As a result of the experimental data, the samples were evaluated with rock classifications. Discontinuity properties and rock strength are examined with the equation that defines the safe bearing pressure in rocks, and the general equation that will determine the safe bearing pressure value for the strip and raft foundation in the Trakya Formation is obtained. The general equation proposed can be used safely for clastic sedimentary rocks, since the Trakya Formation, which is made of a flysch sequence in the study area, contains lithologies ranging from low to high strength and low to high unit weight. Using the proposed general equation, it can be predicted how much load the rock can safely carry in the relevant region, thus different options for the foundation type and size can be easily examined and the most suitable solution can be selected.*

Keywords: *discontinuity, strength, footing width, safe bearing capacity*

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada kayalarda taşıma gücünü belirlemek için literatürde önerilen eşitliğin uygulama sınırı geliştirilmiştir. Çalışma kırıntılı kayaçları temsil etmesi için İstanbul'un fliş birimi olan Trakya formasyonunda yapılmıştır. Böylece kırıntılı kayaçta süreksizliklerin çatlak aralığı ve basınç direnci ile emniyetli taşıma kapasitesi arasında ilişkinin belirlenmesi eşitliğin tanımladığı sınırlamanın dışında da uygulanabilir olmuştur. Ayrıca önerilen eşitlikler ile ön fizibilite ve fizibilite çalışmalarında hızlı ve doğru karar alma imkânı oluşacaktır.

1.2. Metot ve Materyaller

Arazi çalışması sırasında mostralardan jeolog çekiciyle numuneler alınmıştır. Yüzeylerdeki süreksizlikler incelenip çatlak aralığı ve çatlak açıklık değerleri ölçülmüştür. Çalışma alanından

toplanan numuneler, İTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda TS 699 ve ISRM (1985) standartları referans alınarak fiziko-mekanik özelliklere göre test edilmiştir.

1.3. Yapı Temelleri ve Taşıma Gücü

Temel mühendisliği uygulamalarında; zemin – kaya mekaniği ve mühendislik jeolojisi gibi jeotekniğin alt dallarından yararlanılır. Temel ortam özelliklerine göre yapının güvenliği, ortamın taşıma gücü (makaslama yenilmesi) ve oturma faktörleri ile denetlenir. Dinamik koşullar (deprem vb.) da dikkate alınması gereken diğer bir önemli faktördür. Ortamın taşıma gücü ile temelin yenilmeden taşıyabileceği maksimum taban basıncı ifade edilir. Taşıma gücü, ortamın kayma dayanım parametrelerinin deney ile bulunması sonrası taşıma gücü bağıntıları ile belirlenir. Kaya ortamlar bozunmaya uğramış, aşırı derecede kırıklı-çatlaklı veya boşluklu olmadıklarında yapı temelleri için uygun ortamlardır. Bazı gözenekli kireçtaşları, volkanik kayalar ve bazı şeyller hariç, kayaların tek eksenli sıkışma dayanımları temel betonunun dayanımından yüksekse de süreksizlik içermesi durumunda kayada projelendirilen temeller için süreksizlik, kaya ve temel özellikleri araştırılmalıdır. Bunlar; süreksizliklerin yönelimi, devamlılığı, sıklığı, açıklığı, varsa eğer dolgunun türü ve kalınlığı (yumuşak dolgu oturmaya neden olabilir), kayanın kalitesi (RQD), ayrışma derecesi, sağlam veya yeterince ayrışmamış kesimlerin yayılımı, temel kayanın derinliği ve temel ilişkisidir. Kireçtaşı, dolomit, mermer, traverten, jips gibi boşluklu kayalarda boşlukların varlığı ve bunların boyutları ile yayılımları ayrıca incelenmelidir. Kayalarda taşıma direncinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden birisi Peck vd., 1974 tarafından önerilen RQD ve tek eksenli sıkışma dayanımını esas alan yöntemdir. Bu yöntemde RQD sınıf aralıkları için izin verilebilir taşıma direnci (q_a) değerleri tanımlanmıştır. Yöntemde; RQD'nin sınır değerleri dışındaki değerleri için q_a değerleri interplasyon ile belirlenir. Kayanın izin verilebilir taşıma direnci değeri kayanın RQD değeri ile tek eksenli basınç dayanımı (σ_u) indirgeme ilişkisi içinde veya inceleme alanında sondaj yapılamaması durumunda arazi incelemelerinde ölçülen süreksizlik ölçümleri ile RQD hesaplanarak ta tanımlanabilir (Ulusay, 2001). Bu yaklaşımlar dışında kayalarda taşıma gücü faktörlerini esas alan yöntemler de bulunmaktadır (Hoek-Brown yenilme ölçütleri, Bell çözümü) (Ulusay, 2001). Bu çalışmada Hindistan Standartlar Bürosunca kayalarda taşıma gücünü öneren eşitlik kullanılmıştır. Eşitlik uygulama aralığı 30 – 300 cm olarak tanımlanmış ve süreksizliklerin yatay olması istenmiştir. Bu kısıtlamalar nedeniyle eşitliğin arazideki pek çok mostra yüzeyinde kullanılabilmesi olanaksız olacaktır. Bu çalışmada özellikle 30 cm altındaki süreksizlik aralıkları üzerinde yoğunlaşılmış ve süreksizlik düzlemlerinin topografya yüzeyine paralelliği göz ardı edilmiştir. Yapılan hesaplamalar söz konusu eşitliğin öne sürdüğü kısıtlamalar dışında da kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışma ile önerilen eşitlik kullanılarak ön fizibilite ve fizibilite çalışmalarında mostra yüzeylerinde süreksizlik ölçümü ve nokta yük direnç değerinden hareketle hesaplanacak olası tek eksenli basınç değerinden hareketle kayanın izin verilebilir taşıma direnci (q_a) tahmin edilecektir. Proje aşamasında bu değerin literatürde önerilen diğer yöntemler ile karşılaştırılması ve ortam için uygun proje değerinin kararlaştırılması gereklidir.

2. GENEL JEOLOJİ

İTÜ Ayazağa Yerleşkesi'ndeki mostralar, İstanbul Paleozoyik istifinin bir kısmı ve bunların üzerinde uyumsuz olarak yer alan daha genç birimlerle temsil etmektedir. İstanbul Paleozoyik kayaçları, Ordovisiyen'den Alt Karbonifer'e uzanan transgresif bir istiften oluşur ve bunu regresif bir Karbonifer yaşlı istif izler. Paleozoik yaşlı jeolojik birimler, Ordovisiyen yaşlı Kurtköy ve Aydos formasyonlarından oluşup bunları Üst Ordovisiyen-Alt Silüriyen yaşlı Gözdağ, Üst Silüriyen-Alt-Devoniyen yaşlı Dolayoba, Orta Devoniyen yaşlı Kartal, Üst Devoniyen yaşlı Tuzla, Karbonifer yaşlı

Baltalimanı ve Trakya formasyonları üzerler. Paleozoik istif, granodiyorit bileşimli Çavuşbaşı ve Sancaktepe plütonları tarafından kesilmiştir (Akyüz, 2010).

2.1. İTÜ Ayazağa Yerleşkesinin Jeolojisi

Çalışma alanındaki Paleozoik taban, Üst Devoniyen yaşlı Tuzla Formasyonu olarak bilinen yumrulu kireçtaşları ile başlar. Bu birim, fosfat yumrulu çörtlerden oluşan Baltalimanı Formasyonu tarafından

örtülür. Paleozoik istifin en üst kesimi kiltaşı, silttaşı, kumtaşı ardalanması olan ve çalışma alanının büyük bölümünü oluşturan Trakya Formasyonu'nu ile temsil edilir. Paleozoik oluşumların üzerinde Pliyosen yaşlı pekişmemiş kırıntılılar olan Belgrat Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyon ile yapay dolgu bulunur.

2.2. Yapısal Jeoloji

Bölge, iki farklı orojenik süreç sırasında meydana gelen tektonik kuvvetlerin etkisiyle kırılmış ve kıvrılmıştır. Trakya Formasyonunun kumtaşı birimleri bol kırık ve faylar içerirken plastik şeyl-çamurtaşı katmanları dalgalı, kıvrımlı bir yapı kazanmıştır. Her iki karakterdeki çökellerde gözlenen ortak özellik hâkim tabaka doğrultusunun KB olduğu ve eğimin iki baskın yönde (KD, GB) geliştiğidir. Doğrultu düzlemine göre boyuna ve enine gelişmiş sistematik kırık düzlemleri yaygındır. Çatlak düzlem doğrultuları da KB olup eğimleri KD ve GB dır. Çatlakların yönelimleri fay düzlemlerinin yönelimleriyle uyumludur (Bozkurtoğlu, 1996).

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

3.1. Giriş

Çalışmanın gerçekleştirildiği Trakya formasyonundaki fasiyeslerin süreksizlik ve fizikomekanik özelliklerine dayalı sınıflama değerlendirmeleri ve ortam tanımlaması yapılmıştır. Süreksizlik özellikleri ISRM, 1978'e göre değerlendirilmiştir.

3.2. Yapısal Özelliklere Göre Sınıflandırma

Kiltaşı, silttaşı, kumtaşı çatlak aralığı ve çatlak açıklığı değerlerine göre sınıflandırılmıştır. Çatlak aralığı, aynı çatlak setine ait iki bitişik süreksizlik arasındaki dikey mesafedir. Bir dizi süreksizliğin ölçüm mesafesindeki (genellikle 1 m alınır) ortalama çatlak aralık değeri ile belirlenir. Çatlak aralık değeri ne kadar küçükse çatlaklar birbirine yaklaşır ve kaya daha küçük parçalardan (birim kaya elemanı) oluşur. Çalışma bölgesinde ortalama çatlak aralığı değeri 7.48 cm (13 1/m) dir. Bu değer ile kaya çatlak aralığı değerine göre sık çatlaklı kaya olarak sınıflandırılır (Deere, 1963). Kayalardaki çatlak açıklığının ortalama değeri 2.13 mm olup açık kırıklı kaya sınıfında aralıklı kayadır (ISRM, 1978). Kaya Deere, 1963 sınıflamasında orta çatlaklı kayadır.

3.3. Fiziksel Özelliklere Göre Sınıflandırma

Kayaçların birim ağırlık, porozite, yoğunluk, su emme, geçirgenlik, sertlik gibi fiziksel özellikleri mekanik ve elastik karakterlerini etkiler. Genel olarak kayalar sınıflandırılırken; porozite, geçirgenlik, su emme ve sertlik parametreleri kullanılır. Kayanın kuru birim ağırlık değeri ortalaması 2.31 g/cm^3'tür. Kayanın kuru birim hacim ağırlık değerine göre sınıfı 3 olup tanımı orta birim hacim ağırlıklı kaya (Anon, 1979) dır. Mühendislik problemlerinin çözümünde önemli bir yere sahip olan porozite, kayaların mekanik özelliklerini etkilemektedir. Poroziteyi oluşturan boşluklar arttıkça

kayanın mukavemeti azalır. Kayanın ortalama porozitesi %14.22'dir. Kayanın porozite değerine göre sınıfı 3 olup orta gözenekli kaya (Anon, 1979) tanımındadır.

3.4. Mekanik Özelliklere Göre Sınıflandırma

Sınıflandırma parametresi olarak kullanılan mekanik özellikler, kayaların mukavemet ve elastik özellikleridir ve bunlar kayalara statik veya dinamik kuvvet uygulanarak bulunur. Statik kuvvetlerin uygulanmasıyla düzeltilmiş nokta yük direnç değeri $Is_{(50)}$ ve basınç dayanımı, kayaların sınıflandırılma parametresi olarak kullanılır. Kayanın ortalama nokta yük dayanım değeri 0.871 MPa'dır olup kaya bu değere göre orta dayanımlıdır (Franklin & Broch, 1972). Nokta yük direnç değerinden hareketle

hesaplanan olası tek eksenli basınç dayanımı değeri 15-60 MPa arasındadır. Olası basınç dayanım değeri Bieniawski (1975) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = (14 + 0.175D)I_{s(50)} \quad (1)$$

Burada; σ_c olası tek eksenli basınç dayanımı (kg/cm^2), D örneğin boyu (cm), $I_{s(50)}$ nokta yük indeksi (kg/cm^2)'dir.

Olası tek eksenli basınç direnci değerlerinin ortalama değeri 16,95 MPa'dır. Bu değer, kayanın orta dayanımlı kaya olduğunu göstermektedir (Anon, 1979).

4. EMNİYETLİ TAŞIMA KAPASİTESİ-SÜREKSİZLİK İLİŞKİSİ

Emniyetli taşıma kapasitesi, ortamın (zemin, geçiş kayası, kaya) taşıyabileceği emniyetli maksimum yüktür. Bu çalışmada kırıntılı kaya için emniyetli taşıma kapasitesi – süreksizlik ilişkisi dayanım değeri oldukça değişken olan fliş karakterindeki Trakya formasyonunda araştırılmıştır. Kayanın dayanımı ile çatlak aralığı arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik ile tanımlıdır (BIS, 2005).

$$N_d = (3+S/B)/(10\sqrt{(1+300(\delta/S))} \quad (2)$$

$$q_p = q_{u(ort)} * N_d \quad (3)$$

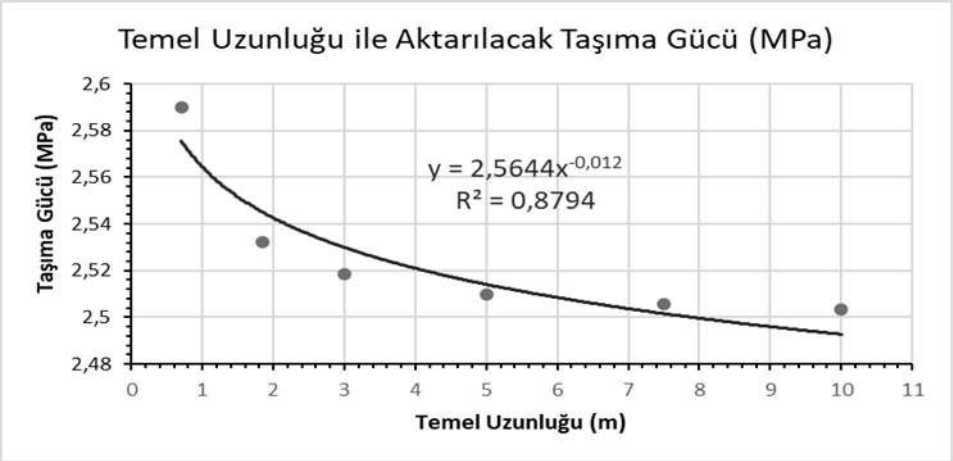
Burada; N_d ampirik katsayı, S çatlak aralığı (m), B temel genişliği (m), δ çatlak açıklığı (m), q_p emniyetli taşıma kapasitesi (MPa), $q_{u(ort)}$ ortalama sonuç (nihai) taşıma kapasitesi (MPa)'dir.
Sığ temeller için önerilen ve eşitlik 3 ile tanımlı sonuç taşıma kapasitesi değeri süreksizlik aralığı 0.3 – 3 m olan ve süreksizlikleri topografya yüzeyine yatay bulunan mostralar ile sınırlıdır. Doğada bu tür mostra yüzeyleri ile yatay tabakalanma dışında karşılaşılması zordur. Eşitliğin topografya yüzeyine eğimli olan ve 30 cm'den küçük çatlak aralıkları için değerlerinin araştırıldığı bu çalışmada sığ temeller için minimum kabul edilebilir temel genişliği 0.7 m ve maksimum temel genişliği 3 m olarak alınmıştır (TS 500, 2000). Çalışma; 1.85 m, 5 m, 7.5 m ve 10 m temel genişliği değerleri için de sürdürülmüş ve böylece çalışma ile önerilen eşitlik kullanılarak sadece sığ temeller yanı sıra aynı zamanda radye temeller için de hesaplama yapmak mümkün olmuştur. Mostra yüzeylerinde Eşitlik 2 ve 3 birlikteliğinde emniyetli taşıma kapasitesi belirlendikten sonra sahadaki çatlak aralığı değerleri kendi içinde değerlendirilmiş ve 29 mm aralık artımları ile gruplandırılmıştır. Her bir çatlak aralığı (S) değerlerine karşılık gelen emniyetli taşıma kapasitesi değerlerinin geometrik ortalama değeri ilgili çatlak aralığı için sonuç taşıma kapasite değeri olarak hesaplanmıştır. Temel genişlikleri için çatlak aralıkları ile sonuç taşıma kapasiteleri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve temel genişliklerinin tümünde iki veri kümesi arasında doğrusal ilişki olduğu görülmüştür ($R^2 > 0.5$). Elde edilen bünye denklemleri birlikteliği sağlanarak Emniyetli Taşıma Kapasitesi (ETK) için genel denklem elde edilmiştir. Genel denklemi elde etmek için farklı temel genişlikleri ile araştırılan doğrusal bünye denklemlerine ait katsayılar ile bunların geometrik ortalaması Çizelge 1 ile genel denklem Eşitlik 4 ile verilmiştir.

$$ETK = 16.1193xS+0.0602 \quad (4)$$

Eşitlik 4'ü elde etmek için farklı temel genişlikleri çatlak aralığı emniyetli taşıma direnci ilişkisini tarifleyen bünye denklemleri ile hesaplanacak ilgili temel genişliğine ait emniyetli taşıma kapasitesi ($ETK_{0.7}$, $ETK_{1.85}$, ETK_3, … ETK_{10}) değerlerinin temel genişliği (TG) ile ilişkilendirilmesiyle sığ temelden münferit ve radye temele geçiş yapılma imkânı olacaktır. Bir temel taşıdığı binanın ağırlığını inşa edildiği ortama aktarıp yayar. Temelin genişliği artarsa bina yükü daha geniş bir alana dağıtılacak ve ortama aktarılan birim yük miktarı azalacaktır. Bu amaçla temel genişliği – ortama aktarılacak yük ilişkisi araştırılmış (Şekil 1) ve temel genişliğine bağlı ortama aktarılacak basınç (AB) elde edilmiştir (Eşitlik 5).

Çizelge 1. Kırıntılı tortul kayalarda süreksizlik açıklığı-sonuç taşıma kapasitesi eşitliği eldesi.

	Temel Genişliği (m)	Katsayı -A-	Katsayı -B-	R^2
Grafiklerden Elde Edilmiştir	0.70	24.106	0.047	0.986
	1.85	23.614	0.026	0.984
	3	2.451	1.025	0.975
	5	23.304	0.033	0.983
	7.50	23.244	0.034	0.983
	10	23.214	0.035	0.983
Katsayıların Ortalama Değeri		**16.119**	**0.060**	**0.982**



Şekil 1. Temel genişliği ile zemine aktarılacak basınç grafiği.

$$AB = 2.5644TG^{-0.012} \quad (5)$$

Eşitlik 4 ile ortamda birim kaya eleman sayısına bağlı emniyetli taşıma kapasitesi hesaplandıktan sonra Eşitlik 5 ile kaya ortam için uygun temel genişliği kolayca belirlenebilecektir. Çalışmanın gerçekleştirildiği Trakya formasyonunda süreksizlik ilişkisi Şekil 2 ile gösterilmiştir.

Şekil 2. Trakya formasyonunda süreksizlik gelişimi.

Eşitlik 4 ile hesaplanan emniyetli taşıma kapasitesi (ETK) değerleri 0.0625 m – 1 m arasında değişen çatlak aralıkları için hesaplanmış ve ETK değerinin 1.07 MPa ile 16.18 MPa arasında değişeceği belirlenmiştir. Peck vd., 1974 tarafından önerilen ve kayanın taşıma gücü değerlendirmesini RQD ile tek eksenli sıkışma dayanımına göre değerlendiren yöntemde Şekil 2 ile verilen ortam için (RQD = 0 ile 25 arası) önerilen değer aralığı 1 ile 3 MPa olacaktır. Bu ortam; kayanın izin verilebilir taşıma direnci değeri ile kayanın RQD değeri ve tek eksenli basınç dayanımı (σ_u) nın indirgeme ilişkisi içinde değerlendirilir ise benzer sonuç elde edilecektir. Ortamın olası tek eksenli basınç dayanımı değeri σ_u = 16.95 MPa dır. Ortamın RQD değeri için en fazla %20 değerini kabul edersek bu durumda düzeltme faktörü 0.92 olacak ve kayanın izin verilebilir taşıma direnci değeri q_a = 16.95 – (16.95x0.92) = 1.36 MPa olarak elde edilecektir. Hesaplamalardaki benzer değerler önerilen Eşitlik 4 ile hesaplanacak emniyetli taşıma direnci değerinin gerçekçi olduğunu göstermektedir. Eşitlik 4 kullanılarak ön fizibilite ve fizibilite aşamasında kırıntılı kayaçlar için güvenilir ve hızlı tahminde bulunmak mümkün olacaktır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kayanın süreksizlik aralığı, süreksizlik açıklığı ve temel genişliği ilişkisine dayalı BIS, 2005'de tanımlı eşitliğin önerilen kullanım sınırlaması dışında uygulanabilirliği araştırılmıştır. Kaya ortam olarak fiziko-mekanik ve süreksizlik özellikleri geniş bir aralıkta değişkenlik gösteren Trakya formasyonu seçilmiş ve böylece önerilen eşitliğin kumtaşından kil taşına değişen bir oluşumda kullanılabilir olması amaçlanmıştır. Çalışma sonunda önerilen Eşitlik 4 ile yapılan hesaplama literatürde yaygın olarak kullanılan 2 farklı yöntemle elde edilen hesaplama sonuçları ile karşılaştırılmış ve üç ayrı hesaplama değerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Hesaplamalardaki benzerlik Eşitlik 4'ün belirttiği sınırlamaları dışında da kullanılabileceğini göstermiştir. Eşitlik 4, projelerin ön fizibilite ve fizibilite aşamasında kullanılabilir. Ortamın emniyetli taşıma kapasitesi (ETK) değeri hesaplandıktan sonra bu ortam için olması gereken temel genişliği değeri de Eşitlik 5 ile hesaplanıp belirlenebilir. Yazarlar, kesin proje aşamasında literatürdeki diğer yöntemlerinde kullanılmasını ve proje değerlerinin kullanılan yöntemler birlikteliğinde değerlendirilip belirlenmesini önerirler.

5. DEĞİNMELER

(Akyüz, 2010), (Anon, 1979), (BIS, 2005), (Bieniawski, 1975), (Bozkurtoğlu, 1996), (Deere, 1963), (Franklin & Broch, 1972), (ISRM, 1978), ISRM (1985; 2007), (TS 699, 2009)

6. KAYNAKLAR

Akyüz, S., 2010, "İstanbul ve Yakın Civarının Paleozoik İstifi" İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu III, Bildiriler Kitabı, TMMOB-JMO Yayını.

Anon, 1979. "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping", Part I – rock and soil materials, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 19, p. 364- 371.

BIS, 2005. Code of Practice for Design and Construction of Shallow Foundations on Rocks. IS: 12070-1987 (Reaffirmed2005), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.

Bieniawski, Z.T. 1975. The point load test in geotechnical practice. Engineering Geology, vol 9, pp 1-11.

Bozkurtoğlu, E., 1996. "İTÜ Kampüs Alanındaki Kayaçların Yüzey Pürüzlülüğünün Görüntü Analiz Yöntemi ile Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Jeoloji Müh., İstanbul.

Broch, E. & Franklin, J.A., 1972. "The point – load strength test", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 9, p. 669 - 667.

Deere, D.U., (1963). Technical description of rock cores for engineering purpose, Rock Mech. and Eng. Geol. 1, 16-22.

ISRM, 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 15(6), p. 319-368.

ISRM, 1985. Point Load Test, Suggested Method for Determining Point Load Strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 22, p. 55-60.

Peck, R.B; Hanson, W.E; Thornburn, T.H., 1974. Foundation Engineering. 544p., Wiley Press.
T.S. 500, 2000. "Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları", Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.
TS 699, 2009. Doğal yapı taşları – inceleme ve laboratuar deney yöntemleri. ICS 91.100.01; 91.100.15. Türk Standartları Enstitüsü, 36 syf., Ankara.
Ulusay, R., 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını (Genişletilmiş 4. Baskı), No:38, 400 syf. Ankara.

Trakya Formasyonu (Kumtaşı-Şeyl) için Tek Eksenli Basınç Dayanımı - Nokta Yükü Dayanım İndeksi Korelasyonu

Corelation Between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index for Trakya Formation (Sandstone – Shale)

F. Polat[1,*], A. Hazar[2], G. Aslantaş[3], A. Engin[4], T. Şirin[1]

[1]Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik, Kartal, ISTANBUL,
[2] Alsim Alarko Sanayi Tesisleri ve Ticaret A.Ş., Beşiktaş, İSTANBUL
[3] Cengiz, Kolin, Kalyon, Özgün Yapım Ortaklığı, İSTANBUL
[4] KKC Marmaray İnşaat Adi Ortaklığı Ticari İşletmesi, İSTANBUL
*(*feyzipolat@artsonmuhendislik.com)*

ÖZ: İstanbul'un özellikle batı yakasında geniş bir alanda yayılım gösteren Trakya Formasyonu birçok metro kazısı, derin kazı ve yapı temel zemini gibi mühendislik girişimlere konu olmaktadır. Bu nedenle bu kaya biriminin genel jeomekanik özelliklerinin bilinmesi önem arz eder. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı (σ_c), RMR, GSI gibi kaya kütle sınıflamaları yanı sıra anılan mühendislik girişimlerin tasarımında ve kayacın jeomekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Tek eksenli basınç dayanımı laboratuvarda doğrudan – ki pahalı ve zaman alıcıdır - veya nokta yükleme deneylerinden dolaylı olarak tayin edilebilir. Ancak, tek eksenli basınç dayanımını nokta yükleme deneylerinden dolaylı olarak belirleyebilmek için öncellikle Trakya Formasyonu için spesifik bir nokta yükü dayanım indeksi ($Is_{(50)}$) – tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) dönüşüm katsayısının (k) belirlenmesine ihtiyaç olacaktır. Bu çalışmada, İstanbul'da gerçekleştirilen metro projeleri kapsamında Trakya Formasyonundan alınan karot örnekleri üzerinde yapılan 1650 adet nokta yükleme ve 918 adet tek eksenli basınç deneyi sonucu karşılaştırılarak Trakya Formasyon için $Is_{(50)}$ - σ_c dönüşüm katsayısı (k) belirlenmeye çalışılmıştır. Veriler farklı metro projelerinden farklı laboratuvarlarda yapılmış deneylerden sağlanmıştır. Değerlendirmeler sonucunda Trakya Formasyonu için dönüşüm katsayısı *(k)* değeri 7 ile 7.5 arasında ve ortalama 7.3 şeklinde elde edilmiştir. Elde edilen k değerleri, literatürde verilen veya ISRM tarafından önerilen k değerlerine oranla düşük kalmaktadır. Bunun, kısmen Trakya Formasyonunun yapısal özelliklerinden kısmen de deneylerin yürütülmesindeki eksiklerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Trakya Formasyonu, tek eksenli basınç deneyi, nokta yükleme indeksi, dönüşüm katsayısı

ABSTRACT: *The Trakya Formation, which is commonly found on the west side of Istanbul, is subjected to many subway excavations, deep excavations and foundations. For this reason, it is important to know the general geomechanical properties of this rock unit. Compressive strength of the rock has an important role in the design of the above mentioned engineering initiatives and determination of the geomechanical properties of the rock, as well as rock mass classifications such as RMR and GSI. The compressive strength can be determined directly which is expensive and time consuming, or indirectly by point load tests, which is more practical and economical. However, in order to determine uniaxial compressive strength indirectly from point loading tests, it is necessary to determine a specific point load resistance index ($Is_{(50)}$) - uniaxial compressive strength (σc) conversion coefficient (k) for the Trakya Formation. In this study, it was tried to determine Is (50) - σc conversion coefficient (k) for Trakya Formation by comparing the results of 1650 point loading and 918 uniaxial comprehensive tests performed on core samples taken from Trakya Formation within the scope of metro projects carried out in Istanbul. The data were obtained from different metro projects and different laboratories. As a result of the evaluations, the conversion coefficient (k) value for the Trakya Formation was found between 7 and 7.5, with an average of 7.3. The k values obtained for Trakya Formation were low, compared to the values suggested in the literature and values that is*

proposed by ISRM. This was thought to be due in part to the structural features of the Trakya Formation and partly to the shortcomings in conducting the tests.

***Keywords**: Trakya Formation, uniaxial comprehensive strength, point load index, conversion coefficient*

1. GİRİŞ

Tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) kaya ortamların en önemli mühendislik özelliklerinden biridir. Yapı temelleri, derin ve yer altı kazıları tasarımında yaygın şekilde kayacın tek eksenli basınç dayanımından yararlanılır. Tek eksenli basınç dayanımının belirlenme şekli çeşitli ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından standartlara bağlanmıştır. Deney, boyu çapının iki katı olan silindirik örnekler gerektirir (ISRM 1985). Bunun için sondaj yapılması veya laboratuvara büyükçe bloklar taşımak ve örnek hazırlamak gibi zaman alıcı ve pahalı yöntemlere başvurmak gerekir. Öte yandan çok kırıklı kayaç kesimlerinde sondaj yapılsa dahi çoğu zaman test yapılmaya uygun örnek alınması mümkün olmayabilir. Bazen de sahada test için uygun olduğu düşünülerek seçilen birçok örnek; bulundurduğu, gözle görülmeyen, mikro çatlaklar veya zayıf tabaka/lamina yüzeyleri nedeniyle ya örnek hazırlama sırasında kırılmakta veya teste tabi tutulduğunda söz konusu bu süreksizlikler boyunca olması gerekenden daha düşük yüklerde yenilerek yanıltıcı sonuçlar vermektedir. Tek eksenli basınç deneylerinin doğru şekilde yapılabilmesinin diğer bir zorluğu ise örneklerin hazırlanma aşamasıdır. Kayaç örneklerinin basınç uygulanacak yüzeyleri çoğu zaman uygun şekilde kesilememekte, iki yüzey tam olarak paralel olmamakta veya pürüzlü bırakılmaktadır. Basınç uygulanacak iki yüzeyin paralel olmaması veya yüzeylerde kalan yükseklikler örneğin beklenenden daha düşük yüklemelerde kırılması ile sonuçlanır.

Yukarıda sıralanan bu neden ve çekinceler dolayısı ile birçok projede kayaca ait basınç dayanımının dolaylı olarak nokta yükleme deneylerinden belirlenmesi yoluna gidilir. Nokta yükleme deneyi, çok daha küçük kaya veya karot parçalarının yeterli olabilmesi, örnek hazırlamanın hemen hemen gerekmemesi veya az gerekmesi, şekilsiz kaya parçalarının da kullanılabilmesi, test aletinin basit ve arazide dahi uygulanabilir olması nedeniyle çok daha pratik ve tercih edilen bir yöntem olmaktadır.

Nokta yükleme deneyi ile belirlenen "nokta yükü dayanım indeksi ($Is_{(50)}$)" ile tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) arasında $\sigma_c = k \; x \; Is_{(50)}$ şeklinde bir korelasyon tanımlanmıştır. Söz konusu bu bağıntı çeşitli ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından standarda bağlanmıştır. Ancak bağıntıda yer alan *k* katsayısı farklı araştırmacılara ve kaya türlerine göre çok farklılık göstermektedir. Araştırmacılardan özellikle Trakya Formasyonuna benzer kaya grupları üzerinde çalışmış olan Rusnak ve Mark (2000) sedimanter kayalar için 8 ile 30 arasında *k* değerleri önermiştir. Öte yandan Das (1985), Vallejo vd. (1989) kumtaşı-siltaşı-kiltaşı gibi sedimanter kayalar için *k* katsayısını 10 ile 18 arasında önermiştir. Bell (1992), kumtaşları için ıslak halde 7 – 12, kuru halde 12 – 19 değerlerini önermiştir. Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM 1985) *k* katsayısı için 16 ile 24 arasında değerler alınmasını önermiştir.

Bu çalışmada İstanbul'un özellikle batı yakasında yaygın olarak bulunan ve birçok metro kazısı, derin kazı ve yapı temel zeminine konu olan Trakya Formasyonu'ndan alınan çok sayıdaki örnek üzerinde yapılmış tek eksenli basınç ve nokta yükleme deney sonuçları karşılaştırılarak Trakya Formasyonu için $Is_{(50)}$ - σ_c ilişkisi için - bir *k* katsayısı- belirlenmeye çalışılmıştır.

2. TRAKYA FORMASYONU'NUN GENEL ÖZELLİKLERİ VE YAYILIMI

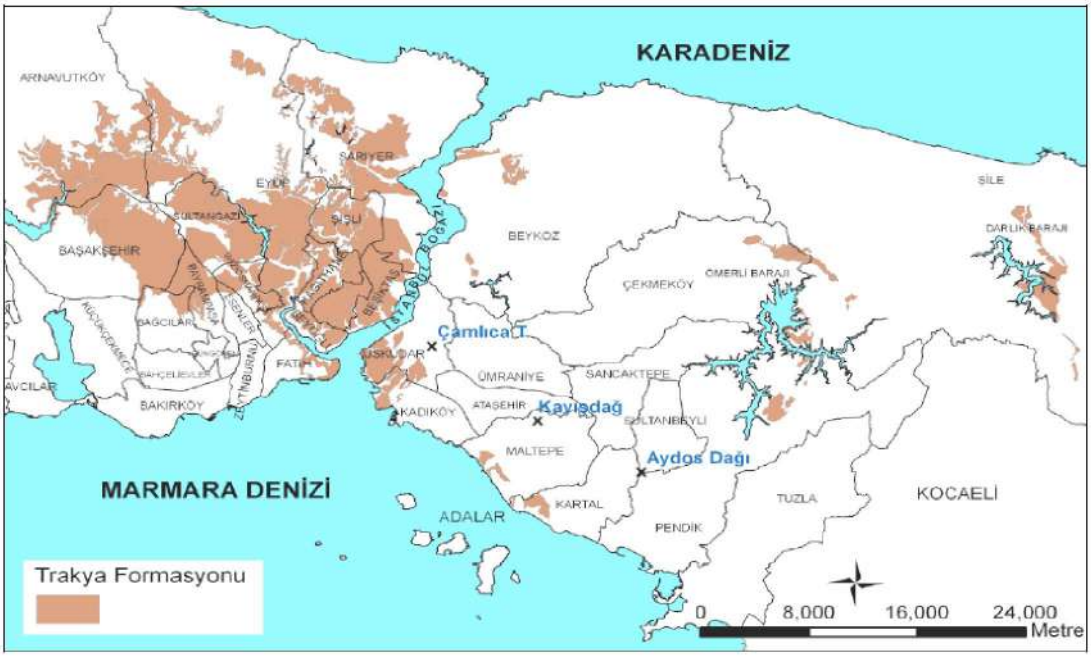
İstanbul'un özellikle batı yakasında geniş alanlar kaplayan Trakya Formasyonu, filiş türü bir çökel kayası olup kumtaşı-kiltaşı-silttaşı litolojilerinin ardalanmasından oluşur (Şekil 1). Anılan litolojilerden herhangi biri yer yer baskın (yaygın) olsa da çoğunlukla sayılan üç litolojinin ardalaşması halindedir. Birim, genel jeoloji çalışmalarda kumtaşı-şeyil ardalaşması (Kaya, 1978, Özgül 2005) veya İstanbul Grovakları olarak isimlendirilir.

Trakya Formasyonu, ISRM 1985 de tanımlanan tüm bozunma kategorilerini bünyesinde bulunduracak şekilde ayrışmaya uğramıştır. Ayrışma, dayk sokulum sınırları ve fay zonları dışında genellikle derinlikle azalır. Yüzeyde bazen kalın, bazen çok ince olmak üzere tamamen ayrışmış (W5) bir seviye bulundurur. Bu seviyenin altında sırası ile çok ayrışmış (W4), orta derecede ayrışmış (W3), az ayrışmış (W2) ve ayrışmamış (W1) seviyeler yer alır. Tabaka yapısı genel olarak ince ile kalın

arasında değişir. Kiltaşı ve silttaşı seviyeleri ince-orta, kumtaşı seviyeleri ise orta – kalın tabakalıdır. Maruz kaldığı yoğun tektonizma nedeniyle yaygın şekilde eklemli, kırıklı ve kıvrımlıdır.

3. VERİ TEMİNİ ve DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ

Çalışmada kullanılan veriler İstanbul'da planlanan – gerçekleştirilen metro güzergahlarında yapılan jeolojik – jeoteknik araştırmalar kapsamında İstanbul ve Ankara'da kurulu 3 farklı laboratuvarda yapılan tek eksenli basınç ve nokta yükleme deney sonuçlarından derlenmiştir. Bu kapsamda, farklı projelerde gerçekleştirilmiş toplam 14334 m karotlu sondajdan alınan 1650 adet nokta yükleme ve 918 adet tek eksenli basınç deneyi sonucundan yararlanılmıştır. Nokta yükleme ve tek eksenli basınç deneyleri genel olarak farklı örnekler üzerinde yapılmış, ancak az bir kısmı (105 adet örnek) aynı örnek üzerinde yapılabilmiştir. Tek eksenli basınç deneyleri için örnek (karot) çapları genellikle 54 mm ile 66 mm arasında değişim göstermiştir. Tek eksenli basınç deneyleri için genellikle gözle görülür zayıflığı olmayan, boy çap oranı standartlara uygun örnekler seçilmiştir. Nokta yükleme deneyleri için laboratuvara genellikle her deney için 3 – 4 parça örnek gönderilmiş ve her örnek üzerinde 10 adet kırım yapılıp ortalama alınmıştır. Gerek tek eksenli basınç gerekse nokta yükleme deneylerinin standartlara uygun yapıldığı varsayılmıştır.



Şekil 1. Trakya Formasyonu'nun İstanbul Metropolitten alanındaki yayılımı. İBB İstanbul İli Mikrobölgeleme Çalışmaları.

Trakya Formasyonu bir yandan kumtaşı, kiltaşı, silttaşı gibi farklı litolojilerden oluşurken diğer yandan farklı düzeylerde bozunmaya uğramıştır. Gerek litolojik değişkenlik gerekse farklı ayrışma düzeyi, kayanın dayanım özelliklerini doğrudan etkileyen ve değiştiren etmenlerdir. Metro tünellerine yönelik jeolojik – jeoteknik çalışmalarda Trakya Formasyonunun ardalanmalı özelliği nedeniyle litolojik farklılıkları çoğu zaman dikkate alınmayıp daha çok bozunmaya dayalı bir gruplama yapılmaktadır. Bu bağlamda, formasyonun *tamamen ayrışmış (W5)*, *orta-çok ayrışmış (W3 - W4)* ve *az ayrışmış – ayrışmamış (W1 - W2)* seviyeler şeklinde gruplanması genel bir alışkanlık olmuştur. Bunun nedeni, bu yakın ayrışma guruplarının gözlemsel olarak birbirinden çok kolay ayrılamaması yanı sıra, birbirlerine yakın mühendislik özelliklere sahip olmalarıdır. Bu çalışmada veriler esas olarak yukarıdaki ayrışma grupları dikkate alınarak değerlendirilmiş olmakla birlikte kısmen litolojik farklılıklar dikkate alınarak da değerlendirme yapılmıştır.

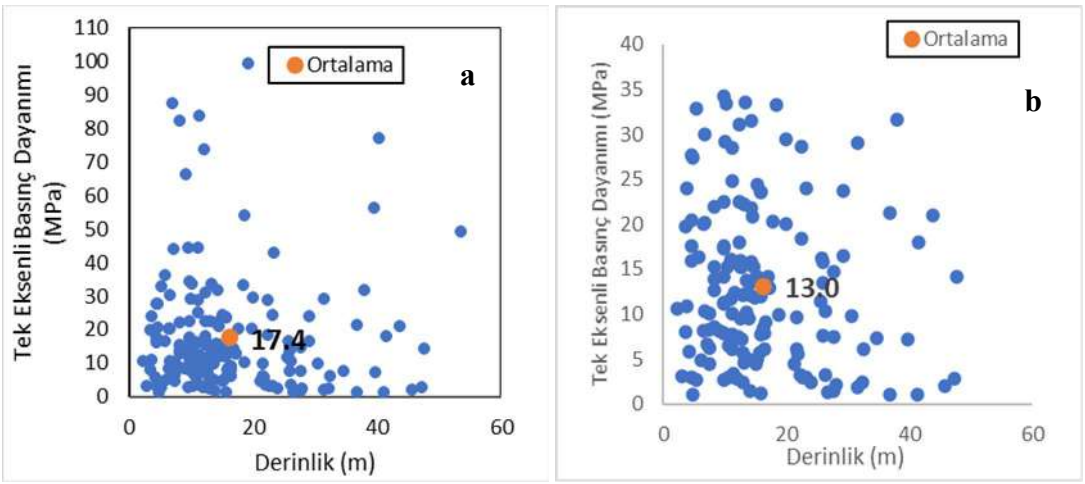
Metin içinde verilen grafikler basınç dayanımı veya nokta yükü dayanım indeksinin derinlikle değişimi şeklinde hazırlanmış olmakla birlikte dayanımın derinlikle değişimi amaçlanmamıştır. Derinlik ekseni yalnızca grafik oluşturmaya yardımcı bir parametre olarak kullanılmıştır. Öte yandan

grafikler hem *ham veri* için hem de saçıldığı düşünülen veriler atıldıktan sonra kalan veri için hazırlanmıştır.

4. TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI VERİLERİ

4.1 Orta- Çok Ayrışmış (W3-W4) Kesimlere ait Tek Eksenli Basınç Dayanım Değerleri

Sondaj loglarında orta – çok ayrışmış (W3-W4) olarak belirlenen kaya seviyelerinden alınan toplam 169 veriye ait tek eksenli basınç dayanım (σ_c) değerleri 1 MPa ile 99 MPa arasında değişim göstermiş olup ortalama değer 17.4 MPa elde edilmiştir (Şekil 2a). Şekil 2a'da görüleceği üzere veriler daha çok 1 ile 35 MPa arasında yoğunlaşmakta ve 35 MPa'nın üstünde ise fazlaca saçılmaktadır. 35 MPa dan büyük değerler değerlendirme dışı bırakıldığında W3-W4 ayrışma seviyesi için tek eksenli basınç dayanımı ortalama 13 MPa'ya karşılık gelmektedir (Şekil 2b).



Şekil 2. Trakya Formasyonu'nun orta – çok ayrışmış (W-3W4) seviyesine ait tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değerlerinin dağılımı ve ortalama değerler. (a) ham veri, b) ise 35 MPa dan büyük 16 adet ve 3 MPa dan küçük 16 adet verinin değerlendirme dışı bırakıldığı duruma ait grafikteki görünümleri.

Sondaj loglarında çok ayrışmış (W4) olarak belirlenen 41 adet örnek üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneylerinde basınç dayanımı (σ_c) 1 MPa ile 44 MPa arasında değişim göstermiştir. Ortalama değer 10 MPa elde edilmiştir. Sondaj loglarında orta derecede ayrışmış (W3) olarak belirlenen 104 adet örnek üzerinde yapılmış tek eksenli basınç deneylerinde basınç dayanımı (σ_c) değerleri 1 MPa ile 87 MPa arasında değişim göstermiştir. Bu ayrışma seviyesi için tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ortalama 15 MPa olarak elde edilmiştir.

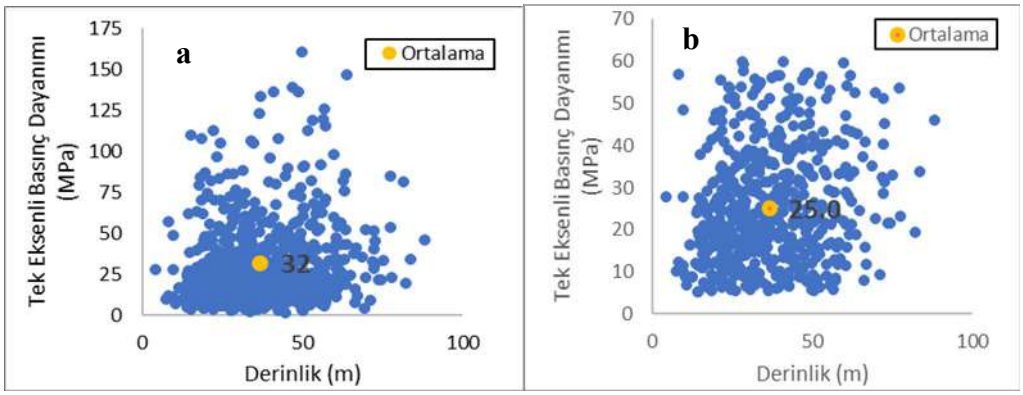
Öte yandan W3-W4 düzeyde ayrışmış kesim içinde kiltaşı – silttaşı olarak tanımlanan kısımlar (42 veri) için ortalama basınç dayanımı 10 MPa, kumtaşı olarak tanımlanan kısımlar (80 veri) için ise 17 MPa hesaplanmıştır.

4.2 Az Ayrışmış- Ayrışmamış Kesimlere ait Tek Eksenli Basınç Dayanım Değerleri

Trakya Formasyonu'nun az ayrışmış – ayrışmamış (W1-W2) kaya kesimlerinden alınan 675 adet örnek üzerinde yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde 1.50 MPa ile 160 MPa arasında değişen dayanımı (σ_c) değerleri elde edilmiştir. Ham haldeki bu veri için ortalama değer 32 MPa hesaplanmıştır (Şekil 3a). Şekil 3a'dan görüleceği üzere veriler 5 ile 60 MPa arasında yoğunlaşmıştır. 60 MPa dan büyük 84 veri ve 5 MPa dan küçük 23 veri değerlendirme dışı bırakıldığında W1-W2 ayrışma seviyesi için tek eksenli basınç dayanımı ortalama 25 MPa hesaplanmıştır (Şekil 3b). Az ayrışmış (W2) veya ayrışmamış (W1) kesimler ayrı ayrı değerlendirildiğinde her iki kısma ait ortalama değerler çok yakın elde edilmiştir. W1-W2 kaya seviyesi içindeki kumtaşı kesimler ile kiltaşı-silttaşı kesimlere ait tek eksenli basınç dayanımları belirgin farklılık göstermiştir. Sondaj loglarında kumtaşı veya kumtaşı baskın olarak tanımlanan kesimlerden alınan 182 adet örneğe ait tek

eksenli basınç dayanımı (σ_c) 2.4 MPa ile 120 MPa arasında değişim göstermiştir. Ancak veriler 10 MPa ile 65 MPa arasında yoğunlaşmıştır. Bu durum göz önünde bulundurularak 65 MPa dan büyük 16 veri ve buna karşılık 5 MPa dan küçük 6 veri değerlendirme dışı bırakıldığında kumtaşı kesimler için tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ortalama 29 MPa hesaplanmıştır.

Sondaj loglarında kiltaşı- silttaşı olarak tanımlanan kesimlerden alınan 291 adet örneğe ait tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) 1.5 MPa ile 160 MPa arasında değişim göstermiş, ortalama değer 34 MPa hesaplanmıştır. Ancak bu litolojilere ait verilerin 5 MPa ile 50 MPa arasında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum dikkate alınarak 50 MPa dan büyük ve 5 MPa dan küçük veriler değerlendirme dışı bırakıldığında, kiltaşı- silttaşı kesimler için tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ortalama 23 MPa elde edilmiştir.

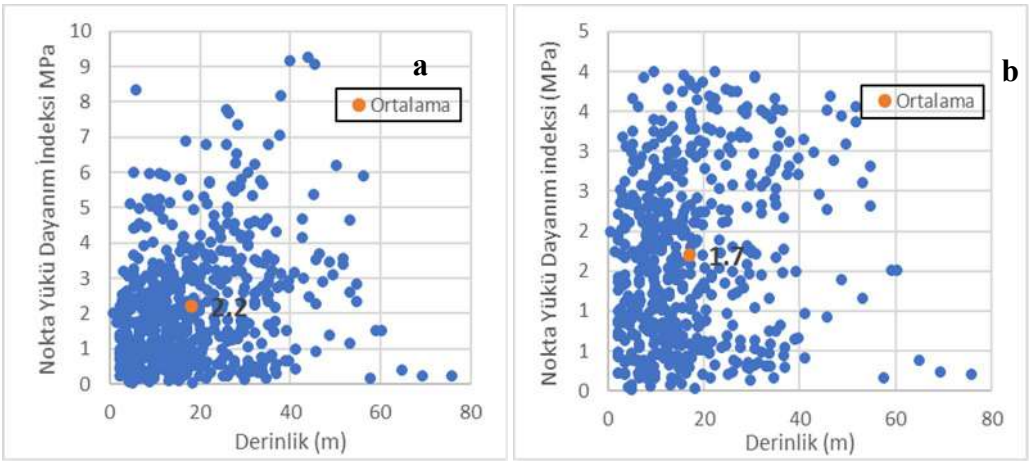


Şekil 3. Trakya Formasyonu'nun ayrışmamış – az ayrışmış (W1-W2) seviyesine ait tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değerlerinin dağılımı ve ortalama değerlerin, a) ham veri, b) 60 MPa dan büyük ve 5MPa dan küçük verilerin değerlendirme dışı bırakıldığı duruma ait grafikteki görünümleri.

5. NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ VERİLERİ

5.1 Orta- Çok Ayrışmış (W3-W4) Kesimlere ait Nokta Yükü Dayanım İndeksi Değerleri

Trakya Formasyonu'nun, litolojik farklılıkları dikkate alınmaksızın orta – çok ayrışmış kesimlerinden alınan 617 adet örnek üzerinde yapılan nokta yükü dayanım indeksi deneylerinde, dayanım indeksi ($Is_{(50)}$) 0.01 ile 9.26 MPa arasında değişim göstermiştir. Değerler 0.01 ile 4.00 MPa arasında yoğunlaşma, 4 MPa'nın üstünde ise saçılma göstermiştir (Şekil 4a). Bu durum dikkate alınarak 4 MPa dan büyük değerler değerlendirme dışı bırakıldığında, Trakya Formasyonu'nun bu ayrışma seviyesi için ortalama nokta yükü dayanım indeksi 1.7 MPa hesaplanmıştır (Şekil 4b).

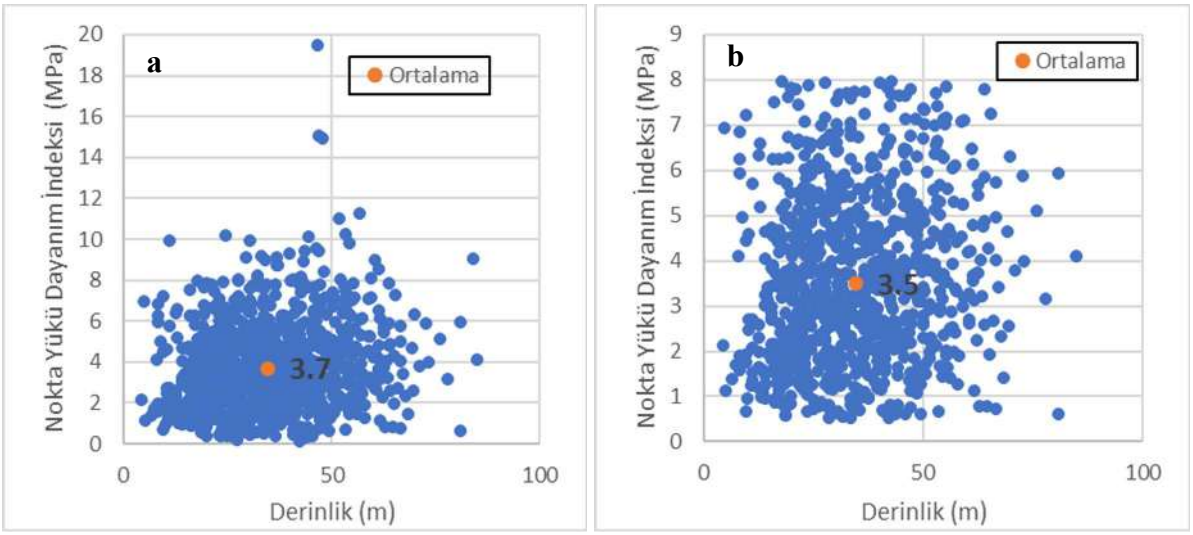


Şekil 4. Orta – çok ayrışmış kaya kesiminde elde edilen nokta yükü dayanım indeksi ($Is_{(50)}$) değerlerinin a) ham veri grafiğinde, b) 4 MPa dan büyük değerlerin değerlendirme dışı bırakıldığı grafikte görünümleri.

Öte yandan çok ayrışmış kaya kesimine ait 249 örnek üzerinde yapılmış olan nokta yükleme deneylerinde, $Is_{(50)}$ değerleri 0.07 ile 8.23 MPa arasında değişim göstermiş olup ortalama $Is_{(50)}$ 1.3 MPa hesaplanmıştır. Buna karşın orta derecede ayrışmış kaya seviyesinden alınan 268 örneğe ait $Is_{(50)}$ değerleri ise 0.15 ile 9.26 MPa arasında değişim göstermiş olup ortalama $Is_{(50)}$ 2.2 MPa hesaplanmıştır.

5.2 Az Ayrışmış–Ayrışmamış (W1-W2) Kesimlere ait Nokta Yükü Dayanım İndeksi Değerleri

Trakya Formasyonu'nun, az ayrışmış-ayrışmamış (W1W2) kesimlerinden alınan 987 adet örneğe ait nokta yükü dayanım indeksi ($Is_{(50)}$) değerleri 0.1 ile 19.4 MPa arasında değişim göstermiştir. Ancak veriler 0.1 ile 8.00 MPa arasında yoğunlaşma göstermiş, 8 MPa üstünde ise saçılma göstermiştir (Şekil 5a). Bu durum dikkate alınarak 8 MPa dan büyük değerler değerlendirme dışında tutulduğunda ortalama $Is_{(50)}$ 3.5 MPa hesaplanmıştır (Şekil 5b).



Şekil 5. Az ayrışmış - ayrışmamış kaya kesiminde elde edilen nokta yükü dayanım indeksi ($Is_{(50)}$) değerlerinin a) ham veri grafiğinde, b) 8 MPa dan büyük değerlerin değerlendirme dışı bırakıldığı grafik görünümleri.

Az ayrışmış kaya kesiminde 189 örnek üzerinde yapılan nokta yükleme deneylerinde $Is_{(50)}$ değerleri 0.2 ile 10.20 MPa arasında değişim göstermiş olup ortalama değer 3.2 MPa hesaplanmıştır. Buna karşın ayrışmamış kaya seviyesinden alınan 332 örneğe ait $Is_{(50)}$ değerleri 0.3 ile 9.5 MPa arasında değişim göstermiş olup ortalama değer 3.9 MPa hesaplanmıştır.

Az ayrışmış - ayrışmamış kaya kesiminde kumtaşı veya kumtaşı baskın olarak tanımlanan kesimlerden alınan 334 örnek üzerinde yapılan nokta yükleme deneylerinde, $Is_{(50)}$ değerleri 0.3 ile 10.20 MPa arasında değişim göstermiştir. Ortalama $Is_{(50)}$ 4.1 MPa hesaplanmıştır. Kiltaşı-silttaşı veya kiltaşı – silttaşı baskın olarak tanımlanan kesimlerden alınan 421 örnek üzerinde yapılan nokta yükleme deneylerinde ise $Is_{(50)}$ değerleri 0.3 ile 9 MPa arasında değişim göstermiş olup ortalama $Is_{(50)}$ 3.2 MPa hesaplanmıştır.

6. KARŞILAŞTIRMA VE k KATSAYISI

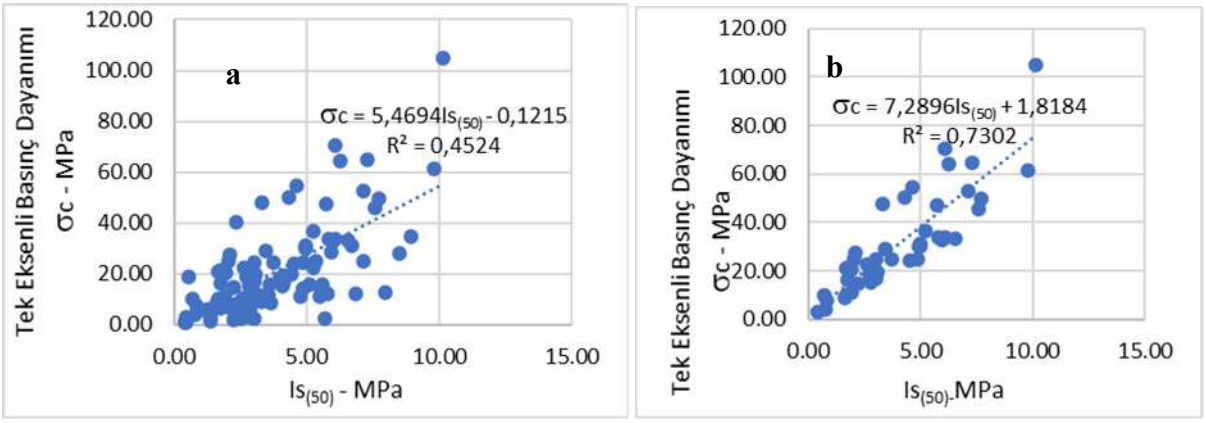
Ağırlıklı olarak W1-W2 kaya kesiminden olmak üzere hem nokta yükleme hem de tek eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuş toplam 105 adet örneğe ait σ_c – $Is_{(50)}$ korelasyonu Şekil 6'da iki aşamalı grafik halinde verilmiştir. Şekil 6a, ham verilere, Şekil 6b ise düzenlenmiş verilere aittir. Örneklere ait *k* katsayısı ($\sigma_c/Is_{(50)}$ oranı) 0.8 ile 33.4 arasında değişim göstermiş, ortalama 5.8 olarak elde edilmiştir. Grafiğe ait standart sapma değerleri σ_c, $Is_{(50)}$ ve $\sigma_c/Is_{(50)}$ için sırasıyla 2.2, 17.6 ve 4.3 şeklinde olup korelasyon katsayısı (R^2) ise 0.452 elde edilmiştir (Şekil 6a).

Literatürde *k* katsayısı için çok geniş bir aralık tarif edilmiş olmakla birlikte bu çalışmada elde edilen kadar düşük değerlere rastlanılmamıştır. Zira bu çalışmada örneklerin yaklaşık yarısı için k katsayısı 0.8 ile 5 arasında elde edilmiştir. Düşük *k* değerlerinin, test edilen örneğin bulundurduğu süreksizlik

düzlemleri ile ilişkili olabileceği ve örneği temsil etmeyeceği varsayılarak 5'ten daha küçük *k* değerleri ve belirgin şekilde saçılma gösteren en büyük iki *k* değeri değerlendirme dışı bırakıldığında R^2 değerinin 0.73 şeklinde belirlendiği sağ taraftaki grafik (Şekil 6b) elde edilmiştir. Bu veri setinde R2 > 0.5 olduğu için anlamı veri setini oluşturmaktadır.

Şekil 6'dan da görüleceği üzere hem tek eksenli basınç hem de nokta yükleme deneylerine tabii tutulan örneklere ait $Is_{(50)}$ - σ_c dönüşüm katsayısı (*k*) için aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

- Ham veri için, $\sigma_c = 5.5 Is_{(50)}$, k = 5.5
- Nispeten düzenlenmiş veri için ise $\sigma_c = 7.3\ Is_{(50)} + 1.82$, k ≈ 7.5



Şekil 6. Aynı örnek üzerinde nokta yükü dayanım indeksi ve tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin yapıldığı örneklere ait nokta yükü dayanım indeksi – tek eksenli basınç dayanımı korelasyonları. (a) 105 adet verinin tamamını, (b) $\sigma_c/Is_{(50)}$ oranının 5 ten küçük ve belirgin saçılım gösteren büyük değerlerin değerlendirme dışı bırakıldığı durumu gösterir.

Yukarıdaki bölümlerde değişik ayrışma düzeyleri veya litolojiler için elde edilen tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçlarına ait ortalama değerler ise karşılaştırmalı olarak Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere Trakya Formasyonu'nun farklı ayrışma ve litolojik seviyelerine ait ortalama nokta yükü dayanım indeksi değerleri 1.3 ile 4.1 MPa arasında, ortalama tek eksenli basınç dayanım değerleri ise 10 ile 29 MPa arasında değişim göstermektedir. Bu sonuçlara göre *k* katsayısı ise 6.8 ile 7.7 arasında değerler almakta olup ortalama *k* değer 7.3'e karşılık gelmektedir.

Çizelge 1 Trakya Formasyonu için tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ve nokta yükü dayanım indeksi ($Is_{(50)}$) değerleri ile bu değerlere bağlı olarak hesaplanan k katsayısı değerleri.

Ayrışma Seviyesi veya Litoloji	Ortalama $Is_{(50)}$-Mpa	Ortalama Basınç Dayanımı (σ_c) - MPa	$k=\sigma_c/Is_{(50)}$	Ort. *k*
W1-W2 kesimler (Litoloji ayrımsız)	3.5	25	7.2	7.3
W1-W2 kumtaşı	4.1	29	7	
W1-W2 kiltaşı-silttaşı	3.2	23	7.2	
W3-W4 kesimler (Litoloji ayrımsız)	1.7	13	7.65	
W4	1.3	10	7.7	
W3	2.2	15	6.8	

Görüldüğü üzere iki farklı yönteme dayalı belirlenen k katsayısı 6.8 ile 7.7 dolayında elde edilmektedir. Elde edilen bu *k* katsayısı değerleri, literatürde verilen veya ISRM (1985) tarafından önerilen k katsayısına oranla düşük kalmaktadır. Bunun olası nedenleri sonuçlar kısmında ele

alınmıştır. Bununla birlikte Trakya Formasyonu için k katsayısı 7 – 7.5 dolayında alınabilir görünmektedir.

7. SONUÇLAR

İstanbul'da inşa edilmekte olan metro hatları için yapılan jeolojik – jeoteknik araştırmalar kapsamında Trakya Formasyonunda yapılmış olan 1650 adet nokta yükleme ve 918 adet tek eksenli basınç deneyi sonucu karşılaştırılarak Trakya Formasyonunun farklı ayrışma ve litolojik seviyeleri için ayrı ayrı $Is_{(50)}$ - σ_c korelasyon katsayısı (k) belirlenmeye çalışılmıştır.
İki deneyin aynı veya farklı örnekler üzerinde yapılmış olduğu Trakya Formasyon'unun farklı ayrışma ve litolojik seviyeleri için elde edilen σc - $Is_{(50)}$ dönüşüm katsayısı (k) değerleri 6.8 ile 7.7 arasında değişim göstermiş ve ortalama değer 7.3 olarak elde edilmiştir.
Bu sonuçlara göre Trakya Formasyonu için *k* değeri genel olarak 7.5 kabul edilebilir.
Elde edilen ortalama *k* değeri, çok sayıda düşük değer değerlendirme dışı bırakılmış olmasına rağmen, literatürde ve ISRM (1985) tarafından önerilen *k* değerlerine oranla düşük kalmıştır. Bu durumun daha çok tek eksenli basınç dayanım deneylerinden kaynaklandığı düşünülmek üzere çeşitli nedenleri olabilir. Bu nedenler;

- Trakya Formasyonunun jeolojik - tektonik geçmişi ile birlikte düşünüldüğünde en önemli sebebin; tek eksenli basınç deneylerine tabi tutulan örneklerde yenilmenin kayanın kendisinden ziyade gözle fark edilmeyen mikro süreksizlikler veya zayıf tabaka/lamina yüzeyleri boyunca gerçekleşmiş olmasıdır. Bu halde elde edilen sonuçlar söz konusu zayıflık zonuna ait olup kayacın gerçek dayanımına göre çok daha düşük olabilmektedir.
- Tek eksenli basınç deneyleri için hazırlanan örneklerin basınç uygulanan yüzeylerinde yükseklik kalması veya yüzeylerin paralel olmaması dolayısı ile örnek dayanabileceği nihai yüke maruz kalmadan kısmi olarak kırılmaktadır. Bu durum kayaca ait basınç dayanımının düşük elde edilmesi ile sonuçlanmaktadır. Maalesef laboratuvarların birçoğunda örnekler basit dairesel testereler ile kesilmekte ve kesim sırasında özellikle son kesilen kısımda yükseklik kalmaktadır.
- Gerek nokta yükleme gerekse tek eksenli basınç dayanım deneylerinin ISRM (1985) tarafından önerilen standartlara uygun olarak yapılamıyor olması. Örneğin nokta yükleme deneylerinde standartlara uygun boyutlarda örnek kullanılamaması, yanı sıra özellikle nokta yükleme deneylerinde olmak üzere yüklemenin hızlı yapılması.
- Yenilmenin gerçekte kayada mı yoksa süreksizlik düzlemi boyunca mı geliştiğinin rapor edilmemesi. Ticari kaygılar nedeniyle deneyi yapanlar ile kullanıcıların standartlara uygun şekilde gerçekleşmemiş deney sonuçlarını iptal etmekten kaçınması.

Trakya Formasyonu gibi genellikle ince – orta tabakalı ve aşırı kırıklı kaya grupları için tek eksenli basınç deneylerinden ziyade süreksizliklerden nispeten daha fazla arınabilen küçük boyutlu örnekler üzerinde yapılabilen nokta yükleme deneylerinden yararlanılması daha sağlıklı sonuçlar verebilir. Ancak, öncellikle Trakya Formasyonu için spesifik ve gerçekçi bir *k* katsayısı belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bunun için örnek hazırlama ve laboratuvar deney süreçlerinin de kontrol altında tutulduğu ve iki deneyin de aynı örnekler üzerinde yapıldığı yeterli sayıda deney yapılarak sağlıklı bir k katsayısının belirlenmesine ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.
Laboratuvar deneylerinin konuda uzman kişilerce, standartlara uygun ekipman ve yöntemlerle yapılması konusunda asgari özen gösterilmelidir.
Önümüzdeki dönemlerde İstanbul'da çok daha fazla derin ve yer altı kazıları yapılacağı dikkate alınarak benzer çalışmalar diğer kaya grupları için de yapılmalıdır.

8. KAYNAKLAR

Bell, F.G., 1992 Engineering Properties of Soils and Rocks. Butterworth-Hein&Nann, Oxsford, 345p

Das BM (1985). Evaluation of the Point Load Strength for Soft Rock Classification. Proceeding of the 4 th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV, pp. 220-226

ISRM,1985. Suggested method for determining point load strength.. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Measure Rock

Kaya, O., (1978) The Devonian and Lower Carboniferous Srtatigraphy of the İstinye, Bostancı And Büyükada Area. Paleozoic of İstanbul.

Özgül, N., (2005) İstabul'un Jeolojisi Çalışmaları (İBB)

Rusnak and C. Mark; (2000), Using The Point Load Test to Determine The Uniaxial Compressive Strength of Coal Mesure Rocks

Vallejo LE, Walsh RA, Robinson MK. (1989) Correlation Between Unconfined Compressive and Point Load Strength for Appalachian Rocks. In the Proceeding of the 30th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1989, pp.461-468.

Asidik ve Bazik Tüf Katkılarının Bentonitin Şişme Basıncına Etkisi

The Effect of Acidic and Basic Tuff Additives on Swelling Pressure of Bentonite

N. Küçükaslan[1], Y. Aslan Topçuoğlu[1], Z. Gürocak[1,*]

[1] *Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119 Elazığ*
*(*zgurocak@firat.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, farklı oranlardaki asidik ve bazik tüf katkılarının yüksek plastisite ve şişme basıncına sahip bentonit killinin şişme basıncı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, katkısız bentonit kili, katkı malzemesi olarak da Kızılkaya Formasyonu'na (Gümüşhane) ait asidik tüfler ve Karabakır Formasyonu'na (Elazığ) ait bazik tüfler kullanılmıştır. %5, 10, 15 ve 20 oranlarında katkı içeren örneklerin optimum su içerikleri belirlenmiş ve örnekler optimum su içeriğinde Standard Proktor deneyi ile sıkıştırılmıştır. Hazırlanan bu örneklerin yarısında kür öncesi ve diğer yarısında ise 28 günlük kür sonrasında şişme basınçları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, kür sonrası katkısız bentonit örneklerinin şişme basıncında yaklaşık %16 oranında bir azalma belirlenmiştir. Asidik ve bazik tüf katkılı örneklerin kür öncesi şişme basıncındaki azalmalar genel olarak benzerdir ve katkı oranına bağlı olarak şişme basıncı değerleri azalmaktadır. 28 günlük kür sonrasında katkısız ve kürsüz bentonite ait şişme basıncına göre asidik tüf katkılı örneklerin şişme basıncı değerinde yaklaşık %63'e varan azalma meydana gelmiştir. Bu değer, bazik tüf katkılı örneklerde ise %52'dir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kür uygulamasının puzolanik aktiviteyi önemli oranda artırdığını ve böylece şişme basıncında azalmayı sağladığını, asidik tüflerin puzolanik aktivitesinin bazik tüflere göre daha yüksek olduğunu, kür uygulanmaksızın sadece katkı kullanılmasının başarılı bir stabilizasyon için yeterli olmadığını, Kızılkaya Formasyonu'na ait asidik tüflerin stabilizasyonda doğal puzolanik malzeme olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Asidik tüf, Bazik tüf, Bentonit, Kür, Şişme basıncı,

ABSTRACT: *In this study, the effects of different amounts of acidic and basic tuff additives on the swelling pressure of bentonite clay with high plasticity and swelling pressure were investigated. For this purpose, pure bentonite clay and the additive materials which are acidic tuff of Kızılkaya Formation (Gümüşhane) and basic tuff of Karabakır Formation (Elazığ) were used. The optimum water content of the samples containing 5%, 10%, 15% and 20% additives was determined and the samples were compressed with the Standard Proctor test at optimum water content. Swelling pressures were determined before curing in half of these samples and after 28 days of cure in the others. As a result of the experiments carried out, after curing, a decrease of approximately 16% in the swelling pressure of pure bentonite samples was determined. Before curing, the decreases in swelling pressure of acidic and basic tuff-added samples were generally similar and swelling pressure values decreased depending on the additive ratio. After 28 days of curing, the swelling pressure value of acidic tuff-added samples decreased by approximately 63% according to the swelling pressure of uncured and uncured bentonite. This value was 52% in basic tuff-added samples. The results obtained from this study showed that curing application significantly increases pozzolanic activity and thus provides a decrease in swelling pressure, acidic tuffs have a higher pozzolanic activity than basic tuffs, using only additives without curing is not sufficient for a successful stabilization, acidic tuffs of Kızılkaya Formation can be used as natural pozzolanic material in stabilization.*

Keywords: *Asidic tuff, Basic tuff, Bentonite, Curing, Swelling pressure*

1. GİRİŞ

Artan su içeriğine bağlı olarak hacimsel bir artışın meydana geldiği killi zeminler, şişen zeminler olarak adlandırılır. Zeminin su içeriğine, içerdiği kilin yüzdesine ve özellikle kilin mineralojik bileşimine bağlı olarak meydana gelen şişmenin miktarı değişebilmektedir. Ayrıca, değişebilir katyonların bileşimi, karbonatların oranı, doku, zemin suyunun kimyasal bileşimi ve kil taneleri

arasındaki çimentolanma gibi pek çok faktörden de etkilenen bu özellik, zeminin şişme potansiyeli olarak adlandırılır ve zeminin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını ifade eder (Thomas, 1998). Şişme, sadece su içeriğindeki artışa bağlı olarak hacimdeki artışı değil, aynı zamanda ortamdaki suyun yokluğu durumunda hacimde meydana gelen azalmayı yani büzülmeyi de vurgular. Özellikle, yağışlı bölgelerde şişme potansiyeline sahip killi zeminler üzerinde inşa edilmiş olan yapılarda, zeminin şişme basıncının, üzerindeki yapıdan kaynaklanan ek gerilmeden daha büyük olması durumunda önemli hasarlar meydana gelebilmektedir (Dif ve Bluemel, 1991; Hardcastle, 2003). Şişme nedeniyle meydana gelebilecek bu hasarların önlenebilmesi ve doğru zemin iyileştirme yöntemine karar verilebilmesi ancak zeminin şişme potansiyelinin özellikle de şişme basıncının doğru şekilde belirlenmesi ve tasarım sırasında dikkate alınması ile mümkündür (Mohan vd.,1973; Popescu, 1979; Chen, 1988). Killerin şişme basıncının limit değerlerden daha yüksek olduğu durumlarda zeminde iyileştirme yöntemlerine başvurulur ve bu yöntemlerden en yaygın olarak tercih edileni ise stabilizasyondur. Bu yöntemde, killi zemine eklenen ve puzolanik özelliğe sahip olan tüf, silis dumanı sönmüş kireç, uçucu kül, mermer tozu, pomza ve çimento gibi katkı maddeleri ile zeminde puzolanik reaksiyonların oluşumu sağlanmakta ve böylece zeminin taşıma gücü, dayanım, oturma, sıkışma, şişme ve geçirimlilik mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir (Locat vd., 1990; Chu ve Kao, 1993; Bell, 1996; Boardman vd., 2001; Kalkan ve Akbulut, 2004; Aksoy vd., 2008; Cuisinier vd., 2011; Harichane vd., 2011; Hossain ve Mol, 2011; Lin vd., 2013; Voottipruex ve Jamsawang, 2014; Asgari vd., 2015; Goodarzi vd., 2015; Bahadori vd., 2019; Aslan Topçuoğlu, 2020). Bu konuda yapılan çalışmalarda, katkı malzemesinin eklenmesinden sonra katkı ile zemine ait elementlerin reaksiyona girdiği ve bunun sonucu olarak da zeminin su içeriğinin kısa sürede azalarak işlenebilir hale geldiği, uzun süreçte ise zeminin dayanım ve duraylılığının arttığı, sıkışabilirlik, şişme potansiyeli ve hacimsel değişimin ise azaldığı belirtilmektedir. Başarılı bir stabilizasyon için kullanılacak katkı malzemesinin seçimi önemli bir yer tutar ve katkı malzemesinin puzolanik özelliğe sahip olması, ucuz olması, kolay bulunabilir ve çevreci olması ön planda gelmektedir. Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken bu özellikler, kireç, silis dumanı, uçucu kül gibi yapay (artificial) katkı malzemesi yerine pomza, volkanik kül ve tüf gibi doğal katkı malzemelerin kullanımının artırılması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle doğal katkı malzemelerinin araştırılması, bu malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi ve stabilizasyonda kullanılmaları durumunda zeminin hangi özellikleri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduklarının ortaya konulması önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, asidik ve bazik karakterli tüf katkılarının yüksek plasitisite özelliğine sahip kilin şişme basıncına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit kili, katkı malzemesi olarak da ekonomik ve ekolojik kriterlere sahip, sürdürülebilir bir malzeme olan asidik ve bazik karakterli tüfler kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan bentonit kili Reşadiye (Tokat) kil ocağından, bazik karakterli tüf Ağın (Elazığ) bölgesinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'ndan, asidik karakterli tüf ise Gümüşhane bölgesinde yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenmiştir. Bentonit kiline % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında asidik ve bazik tüf katkıları ilave edilerek hazırlanan örneklerin optimum su içerikleri belirlenmiş, daha sonra optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanan örneklerin kür öncesi ve 28 günlük kür sonrasındaki şişme basınçları belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar örneklerin derlenmesi, deneye hazırlanması, optimum su içeriği ve şişme basıncı deneylerinin yapılması olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

2.1. Örneklerin Derlenmesi ve Hazırlanması

Bentonitin literatüre girişi ilk kez sabun kili adıyla 1876 yılında olmuştur ve ismi bulunduğu Rock Creek sahasındaki Fort Benton'dan (Montana, ABD) gelmektedir. Alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozuşması sonucunda meydana gelen bentonit kili simektit grubu minerallerden montmorilloniti yüksek oranda içerir ve kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Tane boyutu 2 μm (0.002 mm) veya daha küçük olan ve en ayırt edici özelliği ise özellikle Na-bentonitlerin su ile etkileşimi durumunda şişerek hacimlerinde büyük değişimin meydana gelmesidir. Bentonitin kuruması durumunda ise büzülmeye uğrarlar, hacimleri küçülür ve yüzeyinde çatlaklar oluşur (Akbulut, 1996).

Bentonitler, ana değişebilir katyon türlerine göre sodyum bentonit, kalsiyum bentonit ve sodyum-kalsiyum (ara tip) bentonit olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Avcı, 2009).

Bu çalışmada, kullanılan yüksek plastisiteli kil, Tokat-Reşadiye (Türkiye) Bentonit ocağından temin edilen katkısız bentonittir. Aslan Topçuoğlu (2020) tarafından yaptırılan XRD analizlerine göre, bu ocaktan alınan bentonit kili montmorillonit, kuvars ve kalsit minerallerinden oluşmaktadır. Aynı araştırmacı, XRF analizi sonuçlarına göre bu bentonit kilinin Na-Bentonit sınıfında olduğunu belirtmektedir. Laboratuvara getirilen bentonit kili 200 nolu elekten elenmiş ve sabit ağırlığa gelinceye kadar 105ºC'de etüvde kurutularak deneylere hazır hale getirilmiştir. Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tüf, Gümüşhane ili ve civarında yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenmiştir. Bu formasyon ilk kez (Güven, 1993) tarafından tanımlanmıştır. Riyodasit/ dasit lav ve piroklastiklerden oluşan formasyonun lavları otobreşik ve akıntı yapılı olmak üzeri iki farklı formdadır ve üst seviyelerinde piroklastlar yüzeylenmektedir. Farklı araştırmacılar (Gülibrahimoğlu, 1985; Yalçınalp, 1992; Korkmaz, 1993) tarafından yapılan çalışmalarda formasyonun yaşı Geç Kretase olarak verilmektedir. XRF analizi sonuçlarına göre tüflerin SiO_2 miktarı %63'den fazladır ve tüf asidik karakterlidir (Çizelge 1). XRD sonuçlarına göre kuvars, kalsit, feldspat ve ikincil kil minerallerinden oluşmaktadır (Aslan Topçuoğlu, 2020).

Çizelge 1. Asidik ve bazik tüflere ait ana oksit yüzdeleri (Aslan Topçuoğlu, 2020).

Ana Oksitler (%)	Asidik Tüf (%)	Bazik Tüf (%)
SiO_2	69.10	31.40
Al_2O_3	20.70	7.15
Fe_2O_3	0.47	3.49
MgO	0.19	2.11
CaO	0.76	28.70
Na_2O	0.39	0.60
K_2O	1.43	0.87
MnO	<0.01	0.03
TiO_2	0.29	0.41
P_2O_5	0.06	0.09
SO_3	0.90	0.036
Sr	0.024	0.033
Cr_2O_3	<0.01	0.02
Ateşte kayıp	5.50	24.80

Bazik karakterli tüf ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzleme veren Karabakır Formasyonu'ndan derlenmiştir. Pliyo-Pleistosen yaşlı Karabakır Formasyonu, genel olarak bazaltik bileşimli lav akıntıları, volkanik breş ve tüflerden oluşan bir litolojiye sahiptir ve Elazığ batı ve kuzey bölgelerinde, bazaltik bileşimli bu kayaçlar alkalin özelliktedir (Kürüm ve Tanyıldızı, 2017). Karabakır Formasyonu'na ait tüflerde Aslan Topçuoğlu (2020) tarafından yaptırılan XRD ve XRF analizlerine göre tüfler esas olarak feldspat, dolomit, kalsit ve ikincil kil minerallerinden oluşmaktadır ve SiO_2 miktarı ise %45'den azdır ve bazik karakterlidir (Çizelge 1).

Çizelge 2. ASTM C 618 (2012) ve TS EN 197-1 (2012)'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları

	ASTM C 618 (2012)		TS EN 197-1 (2012)	Asidik Tüf	Bazik Tüf
	F	C			
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (%)	≥ 70.00	≥ 50.00	≥ 70.00	90.27	42.04
MgO (%)	≤ 5.00	≤ 5.00	≤ 5.00	0.19	2.11
SO_3 (%)	≤ 5.00	≤ 5.00	≤ 5.00	0.898	0.036
Nem (%)	≤ 3.00	≤ 3.00	≤ 3.00	-	-
Ateşte Kayıp (%)	≤ 12.00	≤ 6.00	≤ 10.00	5.50	24.80

F : Bitümlü kömürden elde edilen uçucu kül

C : Linyit veya yarı-bitümlü kömürden elde edilen uçucu kül

Ayrıca, tüflere ait ana oksit analiz sonuçları ASTM C-618 (2012) ve TS EN 197-1 (2012), standartlarında verilen sınır değerler (Çizelge 2) ile karşılaştırıldığında, asidik tüflerin puzolan özelliğine sahip olduğu ancak bazik tüflerin ise TS 25'e (2008) göre tras olarak kullanılabilme koşullarını sağlamadığı görülmektedir. Arazi çalışması ile derlenen tüf blokları laboratuvara getirilerek öğütülmüş ve 200 nolu elekten elenmiş ve sabit ağırlığa gelinceye kadar 105ºC'de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra iki ayrı grup örnek hazırlanmıştır. Bu gruplardan birincisinde bentonit kiline %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik tüf, ikinci grupta ise aynı oranlarda bazik tüf katkısı katılarak deneylerde kullanılacak katkılı örnekler hazırlanmıştır.

2.2. Optimum Su İçeriği Deneyleri

Bir zeminin optimum su içeriği Proktor deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu deneyin amacı, verilen bir zeminin, farklı su içeriklerinde sıkışabilme özelliklerinin ve maksimum sıkışmaya karşılık gelen maksimum kuru yoğunluk ve su içeriği değerlerinin belirlenmesidir. Proctor (1933) tarafından geliştirilen yöntemin esası, çapı ve yüksekliği belli molta (silindir kap) konan örneğe kütlesi belli bir tokmağın, belli mesafeden, belli sayıda düşürülmesi yoluyla, belli bir enerji vererek zemini sıkıştırmaya dayanır. Sıkıştırılmış yaş bir zeminin sıkışma ölçüsü o zeminin kuru yoğunluğuna bağlıdır ve kuru yoğunluk ne kadar büyük ise zemin o kadar iyi sıkışmış demektir.

Bu çalışma kapsamında yapılan laboratuvar deneylerinin ilk aşamasını katkısız bentonit ve katkılı bentonit örneklerinin optimum su içeriklerinin (w_{opt}) belirlenmesi amacıyla yapılan Standard Proktor deneyleri oluşturmaktadır. Deneyler ASTM D 698 (2012) standardına göre yapılmıştır. Bu deneyde, 10.2 cm çapında ve 11.7 cm yüksekliğindeki kalıp içerisine 3 tabaka halinde konulan zemin örneğine 2.5 kg'lık yük, 30.5 cm yükseklikten 25 defa üniform olarak düşürülerek örnek sıkıştırılmaktadır. Faklı su içeriği değerlerinde sıkıştırılan zemin örneklerine ait su içeriği (w) ve kuru birim hacim ağırlık (γ_d) değerleri kullanılarak çizilen grafikte maksimum γ_{dry} değerine karşılık gelen w değeri zeminin w_{opt} değeri olarak kabul edilmektedir. Katkısız ve katkılı bentonit örneklerinde gerçekleştirilen Proktor deneyleri ile belirlenen γ_{dmax} ve w_{opt} değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, katkısız bentonitin w_{opt} değeri %38, γ_{dmax} değeri ise 11.57 kN/m^3'tür. Asidik ve bazik tüf katkı oranları artıkça, örneklerin γ_{dmax} değerleri azalmakta, buna karşın w_{opt} değerleri ise artmaktadır.

Çizelge 3. Bentonit ve tüf katkılı bentonit örneklerinin γ_{dmax} ve w_{opt} değerleri

Örnek	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_{dmax}, kN/m^3)	Optimum Su İçeriği (w_{opt})
B	11.57	38
B+%5AT	11.49	40
B+%10AT	11.47	41
B+%15AT	11.24	42
B+%20AT	11.07	48
B+%5BT	10.98	40
B+%10 BT	10.79	43
B+%15 BT	10.55	46
B+%20 BT	10.49	47

B: Bentonit AT: Asidik tüf BT: Bazik tüf

2.3. Şişme Basıncı Deneyleri

Katkısız bentonit ve %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik ve bazik tüf eklenmiş, katkılı bentonit örnekleri yapılan Proktor deneyleri sonucunda elde edilen w_{opt} değeri dikkate alınarak sıkıştırılmıştır. Hazırlanan örneklerden yarısında kür uygulanmadan diğer yarısında ise 28 günlük kürden sonra şişme basıncı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Optimum su içeriğinde sıkıştırılmış olan örneklerin şişme basınçlarının belirlenmesinde ASTM D 4546 (2008) tarafından önerilen sabit hacim ödometre deney yöntemi (Metot C) kullanılmıştır. Ring içerisindeki örnekler ödometre hücresine yerleştirildikten sonra, sadece üst poroz blok ve yükleme başlığı ağırlığı altında 5 dk bekletildikten sonra hücre su ile doldurulmuş ve örneğin şişmesine izin verilmeden, hacmi sabit kalacak şekilde yüklemeler yapılmıştır. Yüklemelerde 0.01 mm den büyük deformasyonların meydana gelmemesine dikkat

edilmiştir. Örneğin hacminde artışın olmadığı ve daha fazla yüklemeye gerek görülmediği durumda deney sonlandırılmıştır. Deney sonucunda örneğe uygulanan nihai basınç örneğin şişme basıncıdır.

Katkısız bentonit ve tüf katkılı bentonit örneklerinin optimum su içeriklerinde sıkıştırılması ile hazırlanan toplam 18 örnekten 9 tanesi hava almayacak şekilde sarılmış ve desikatöre yerleştirilerek 28 günlük kür uygulanmıştır. Diğer 9 örnekte ise kür uygulanmadan yukarıda kısaca özetlenen deney yöntemine göre şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Kür süresinin tamamlanmasından sonra desikatörden çıkarılan örneklerde de şişme basıncı deneylerinin yapılması ile laboratuvar çalışmaları tamamlanmıştır. Katkısız ve katkılı bentonit örneklerinde kür öncesi ve 28 günlük kür sonrasına ait şişme basıncı deney sonuçları Çizelge 4'de sunulmuştur.

Çizelge 4. Katkısız ve katkılı bentonit örneklerinin kür öncesi ve kür sonrası şişme basıncı değerleri

Örnek	Kür Öncesi Şişme basıncı (kPa)	Kür Sonrası Şişme basıncı (kPa)
B	1030.72	861.05
B+%5AT	761.02	638.44
B+%10AT	760.04	563.90
B+%15AT	662.95	490.35
B+%20AT	588.42	393.26
B+%5BT	761.02	686.49
B+%10 BT	741.41	662.95
B+%15 BT	686.49	574.69
B+%20 BT	564.88	490.35

B: Bentonit AT: Asidik tüf BT: Bazik tüf

3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüksek plastisiteli katkısız bentonit ile katkılı bentonit örneklerinde kür öncesi ve 28 günlük kür sonrası gerçekleştirilen şişme basıncı deneylerine ait sonuçlara göre, katkısız bentonitin kür öncesi şişme basıncı 1030.72 kPa'dır ve bu değer kür sonrasında %16.46 oranında azalarak 861.05 kPa'a düşmüştür (Çizelge 5).

Çizelge 5. Katkısız ve katkılı bentonit örneklerinin kür öncesi ve kür sonrası şişme basıncı değerlerindeki değişim yüzdeleri

Örnek	Kür Öncesi Şişme basıncı (kPa)	Kür Sonrası Şişme basıncı (kPa)	Değişim (%)
B	1030.72	861.05	16.46
B+%5AT	761.02	638.44	16.11
B+%10AT	760.04	563.90	25.80
B+%15AT	662.95	490.35	26.04
B+%20AT	588.42	393.26	33.17
B+%5BT	761.02	686.49	9.79
B+%10 BT	741.41	662.95	10.58
B+%15 BT	686.49	574.69	16.29
B+%20 BT	564.88	490.35	13.19

B: Bentonit AT: Asidik tüf BT: Bazik tüf

Asidik tüf katkılı bentonit örneklerinde, kür öncesi şişme basıncı değerleri katkı oranı artıkça azalmaktadır. %5 asidik tüf katkılı bentonit örneğinin şişme basıncı 761.02 kPa iken bu değer katkı oranının %20 olması durumunda 588.42 kPa'a düşmektedir. Asidik tüf katkılı örneklerinin kür öncesi ve sonrası şişme basıncı değerleri karşılaştırıldığında, katkı oranının %5 olduğu örneğin şişme basıncı kür sonrasında katkısız bentonit örneğine benzer şekilde %16.11 azalmaktadır. Ancak, katkı oranının %10 ve 15 olduğu durumlarda kür sonrası şişme basıncındaki azalmalar %25 civarına yükselirken, katkı oranının %20 olduğu örnekte toplam azalma oranı %33'lere kadar ulaşmaktadır (Çizelge 5).

Bazik tüf katkılı örneklerin kür öncesi ile kür sonrası şişme basıncı arasındaki değişimler asidik tüf katkılı örneklerden farklıdır. Nitekim katkı oranının artmasıyla birlikte kür öncesi ve sonrası şişme

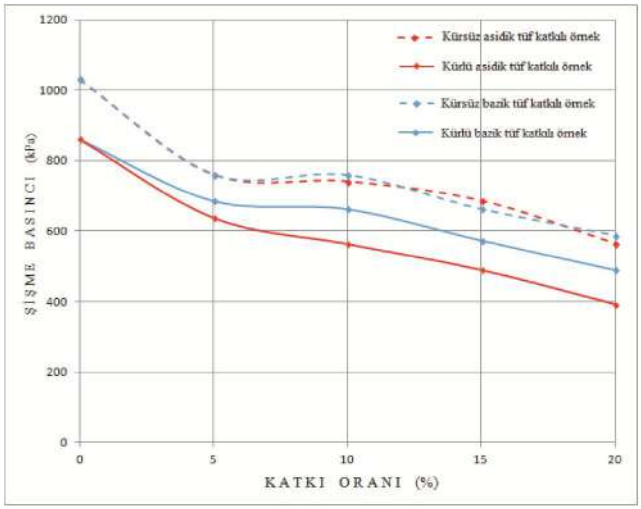
basınçlarında önemli azalmalar gözlenmemektedir ve en fazla azalma %16.29 ile %15 katkı oranının olduğu örnekte meydana gelmiştir. Bu değer katkısız bentonit örneğinin şişme basıncı değerinde kür etkisiyle meydana gelen azalma oranı ile aynıdır (Çizelge 5).

Asidik ve bazik tüf katkılı örneklerin şişme basınçlarının katkısız bentonite ait değerler ile karşılaştırılması durumunda (Çizelge 6), kür öncesi değerlerdeki azalmanın kür sonrası şişme basıncı değerlerindeki azalmaya göre daha düşük oranlarda olduğu, katkı oranı ile birlikte şişme basıncı değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Ancak, hem asidik hem de bazik tüf katkılı örneklerde kür öncesinde meydana gelen bu azalmalar birbirine çok benzerdir (Şekil 1) ve %26 ile 45 aralığında değişmektedir.

Çizelge 6. Katkılı bentonit örneklerinin kür öncesi ve kür sonrası şişme basıncı değerlerinin katkısız bentonite göre değişim yüzdeleri

Örnek	Kür Öncesi Şişme basıncı (kPa)	Kür Sonrası Şişme basıncı (kPa)	Kür Öncesi Değişim (%)	Kür Sonrası Değişim (%)
B	1030.72	861.05	-	16.46
B+%5AT	761.02	638.44	26.17	38.06
B+%10AT	760.04	563.90	26.26	45.29
B+%15AT	662.95	490.35	35.68	52.43
B+%20AT	588.42	393.26	42.91	61.85
B+%5BT	761.02	686.49	26.17	33.40
B+%10 BT	741.41	662.95	28.07	35.68
B+%15 BT	686.49	574.69	33.40	44.24
B+%20 BT	564.88	490.35	45.20	52.43

B: Bentonit AT: Asidik tüf BT: Bazik tüf



Şekil 1. Örneklerin şişme basıncındaki değişimlere ait grafik

Katkılı örneklerin katkısız bentonite göre şişme basınçlarındaki en önemli azalmalar kür sonrasında meydana gelmiştir. Hem asidik hem de bazik tüf katkılı örneklerin kür sonrası şişme basınçları katkı oranının artmasıyla birlikte azalmaktadır (Şekil 1). Bu oran asidik tüf katkılı örneklerde %60'lara kadar ulaşırken, bazik tüflerde %52'ler civarındadır. Katkılı örneklerin kür sonrası şişme basıncı değerlerindeki en yüksek azalma oranı %5 katkılı örneklerde meydana gelmiştir. Bu azalma oranı asidik tüf katkılı örnekte %38.6; bazik tüf katkılı örnekte ise %33.40'tır. Katkı oranının %10 olması durumunda, kür sonrası şişme basıncındaki azalma oranı asidik tüf katkılı örnekteki azalma oranı %7.23 artarak %45.29, bazik tüf katkılı örnekte ise %2.28 oranındaki azalma ile %35.68 olmuştur. %15 ve %20 tüf katkılı örneklerin kür sonrası şişme basıncı değerlerindeki azalma oranları da benzerdir. Bu değerler, katkı oranının artmasıyla birlikte şişme basıncındaki azalma oranlarının azaldığını, %5 katkı oranından daha fazla oranda katkıya sahip örneklerin şişme basınçlarındaki

azalma oranlarının oldukça düşük oranlarda gerçekleştiğini ve %5 katkı oranının en ideal katkı oranı olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Asidik ve bazik karakterli tüf katkılarının yüksek plastisiteli bentonitin şişme basıncı üzerindeki etkilerinin incelendiği bu çalışmada yapılan laboratuvar deneylerine ait sonuçlarından, örneklerin şişme basıncı üzerinde en önemli etkiye sahip iki etken belirlenmiştir. Bunlardan birincisi kür uygulaması diğeri ise kullanılan katkı malzemesinin türüdür. Nitekim kür öncesi şişme basıncı değerleri kür sonrası değerler ile karşılaştırıldığında, kür öncesi değerlerdeki azalmanın sınırlı kaldığı, ancak kür sonrası değerlerdeki azalmanın ciddi oranlara ulaştığı belirlenmiştir. Kür sonrasında şişme basıncındaki azalmalar asidik tüflerde %60, bazik tüf katkılı örneklerde ise %52 gibi oranlara ulaşmıştır. Ayrıca, kullanılan katkı malzemesinin türünün de şişme basıncındaki azalmada oldukça etkili olduğu görülmektedir. Tüf katkılarında yapılan XRF analiz sonuçlarının ASTM C 618 (2012) ve TS EN 197-1 (2012)'de verilen limit değerlere göre değerlendirilmesi sonucunda, asidik tüflerin puzolan özelliğine sahip olduğu, bazik tüflerin ise puzolanik özellikte olmadığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar deneylerden ortaya çıkan bulgular ile uyumludur. Asidik tüf katkılı örneklerin kür sonrası şişme basıncı değerleri bazik tüf katkılı örneklere göre daha düşüktür. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken nokta, sadece katkı oranı ve katkı türünün şişme basıncının azalmasında etkili olamayacağıdır. Tüm katkılı örneklerin kür öncesi şişme basıncı değerlerine bakıldığında katkı oranının artmasıyla şişme basıncı değerlerindeki azalma oranlarının asidik ve bazik tüf katkıları için benzer olduğu ve maksimum %45 azalmanın %20 katkı oranlı örneklerde ortaya çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla, kür öncesinde katkının türünün şişme basıncı üzerinde fazla bir etkisi olduğunu söylemek mümkün değildir. Kür öncesindeki azalmalar katkı oranı ile ilişkilidir. Ancak, kür uygulandıktan sonraki şişme basıncı değerlerindeki azalmalar incelendiğinde hem katkı türünün hem de kür uygulamasının şişme basıncı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Kür öncesinde olduğu gibi katkı oranının artmasıyla şişme basıncı azalmaktadır, ancak kür sonrasında belirlenen azalma oranları bazik tüf katkılı örneklere göre asidik tüf katkılı örneklerde çok daha fazladır. Bu durum asidik tüflerin puzolanik özelliğinin etkili olabilmesi için kür uygulamasının gerekli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu çalışmadan elde edilen verilere göre hem asidik hem de bazik tüf katkılı örneklerin kür sonrası şişme basınçlarındaki maksimum azalma oranı %5 katkılı örneklerde meydana gelmiştir ve ideal katkı oranı %5'dir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, Kızılkaya Formasyonu'na ait asidik tüflerin stabilizasyon çalışmalarında katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini, Karabakır Formasyonu'na ait bazik tüflerin ise puzolanik karakterde olmamasına karşın, şişme basıncı üzerinde azımsanamayacak bir etkiye sahip olduğunu, ancak stabilzasyonda kullanımında dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.19.22 nolu proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

Akbulut, A. (1996). Bentonit. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi, No:32, Ankara.

Aksoy, H. S., Yılmaz, M., Akarsu, E.E., 2008. Stabilization of a clayey soil with Tunçbilek fly ash. Fırat Üniversitesi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 6(3), 88–92.

Aslan Topçuoğlu, Y., 2020. Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ

Asgari, M. R., Dezfuli, A. Baghebanzadeh, Bayat, M., 2015. Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey coil with cement/lime. Arabian Journal of Geosciences. 8 (3), 1439–1452.

ASTM C-618. (2012). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 4546, 2008. Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, Annual book of ASTM standards, West Conshohocken, PA.

ASTM D 698, (2012). Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.

Avcı, S.B., 2009. Soda ve MgO ile aktiflendirilmiş aratip bentonitlerin sondaj ve döküm bentoniti karakteristiklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Bahadori, H., Hasheminezhad, A., Taghizadeh, F., 2019. Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(2), 1–10.

Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology, 42(4), 223-237.

Boardman, D.I., Glendinning, S., Rogers, C.F.D., 2001. Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes. Geotechnique, 51, 533–543.

Chu, S.C., Kao, H.S., 1993. Study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag. Fly Ash for Soil Improvement-Geotechnical Special Publication,, 36, 89–99.

Chen, F. H., 1988. Foundation expansive soils, 2nd edition. Elsevier Scientific Publication, New York.

Cuisinier, O., Auriol, J.C., Le Borgne, T., Deneele, D., 2011. Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. Engineering Geology, 123 (3), 187-193.

Dif, A.E., Bluemel, W.F., 1991. Expansive soils under cyclic drying and wetting. Geotechnical Testing Journal, 14 (1), 96-102.

Goodarzi, A.R., Goodarzi, S., Akbari, H.R., 2015. Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste, Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering, 39, 333-350.

Gülibrahimoğlu, G., 1985. Trabzon Maçka güneyi maden jeolojisi raporu. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, Rapor No: 1850.

Güven, İ.H., 1993. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin 1/25.000 ölçekli jeolojisi ve komplikasyonu, MTA, Ankara.

Hardcastle, J.H., 2003. Evaluation and treatment of. expansive volcanic soils. US95, Owyhee County, Idaho. Report No: KLK998.

Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W., Missoum, H., 2011. Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux. Proceedings of 29th meeting of AUGC-Tlemcen, Algeria, 2, 65–75

Hossain, K.M.A., Mol, L., 2011. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. Construction and Building Materials, 25 (8), 3495–3501.

Kalkan, E., Akbulut, S., 2004. The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners, Engineering Geology, 73 (1-2), 145-156.

Korkmaz, S., 1993. Tonya-Düzköy (GB Trabzon) yöresinin stratigrafisi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 36, 151–158.

Kürüm, S., Tanyıldızı, Ö., 2017. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Upper Cretaceous (calc-alkaline) and Miocene (alkaline) volcanic rocks: Elazıg, Eastern Taurides, Turkey. Journal of African Earth Sciences, 134, 332-344.

Lin, B., Cerato, A., Elwood Madden, A., Elwood Madden, M.E., 2013. Effect of fly ash on the behavior of expansive soils: microscopic analysis. Environmental Engineering Geoscience, 19 (1), 85-94.

Locat, J., Berube, M.A., Choquette, M., 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development. Canadian Geotechnical Journal, 27 (3), 294–304.

Mohan, D., Jain, G.S., Sharma, D., 1973. Foundation practice in expansive soils in India. Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa, Israel, 125–132.

Popescu, M.E., 1979. Engineering Problems associated with expansive clays from Romania. Engineering Geology, 14, 45–53.

Proctor, R.R., 1933. Fundamental principles of soil compaction. Engineering News-record, 111, 245-248.

Thomas, P.J., 1998. Quantifying properties and variability of expansive soils in selected map units, PhD Disertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

TS EN 197-1, 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 25, (2008). Doğal puzolan (tras) - Çimento ve Betonda Kullanılan-Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Voottipruex, P., Jamsawang, P., 2014. Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand. Geomechanics and Engineering, 6 (5), 437-453.

Yalçınalp, B., 1992. Güzelyayla (Maçka-Trabzon) porfiri Cu-Mo Cevherleşmesinin jeolojik yerleşimi ve jeokimyası. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Jeodinamik Süreçler (Deprem ve Kütle Hareketleri) / *Geodynamics Processes (Earthquake and Mass Movements)*

Maksimum Entropi Yöntemi ile Kaya Düşmesi Kaynak Alanlarının Belirlenmesi: Göksu Nehri Havzası Örneği

Prediction of the Rockfall Source Areas with Maximum Entropy Method: Göksu River watershed

S. Tekin[1,*], T. Çan[2]

[1] *Adıyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, 02040, Adıyaman*
[2] *Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330, Sarıçam, Adana*
*(*senemtekin@adiyaman.edu.tr)*

ÖZ: Maksimum entropi yöntemi, sınırlı bilgi ve bu bilginin çevresel değişkenler ile olan ilişkisini mümkün olan en az önyargılı tahminle, olasılık dağılımının oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, Doğu Akdeniz havzasının en büyük alt havzası olan Göksu nehri havzasında (11213 km^2) Maksimum entropi yöntemi ile kaya düşmesi kaynak alanlarının duyarlılık değerlendirilmesi yapılmıştır. 25 x 25 m mekânsal çözünürlükte sayısal yükseklik modeli, yamaç eğimi, kesit, düzlem, teğetsel yamaç eğrisellikleri, jeoloji haritası, arazi kullanımı ve pürüzlülük parametreleri kullanılmıştır. Modelin doğruluğu ve hassasiyeti, alıcı işletim karakteristik eğrileri kullanılan değişkenlerin tahminlerini hesaplamada yüzde olarak anlamlılığı ile belirlenmiş ve her bir parametrenin sonuç üzerindeki etkisini inceleyen Jacknife grafiği ile değerlendirilmiştir. Çalışma alanında kesin olarak gözlenen kaya düşmeleri envanter verisinden yola çıkılarak, Göksu nehri havzasında kaya düşme duyarlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Yüksek ve çok yüksek duyarlı kaya düşme potansiyeline sahip alanlar, çalışma alanının % 15'ine karşılık gelmektedir. Alıcı işletim karakteristiği eğrisi altında kalan alan 0.801 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, elde edilen haritanın yüksek kestirim kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Maksimum entropi yöntemi, Göksu nehri havzası, kaya düşmesi

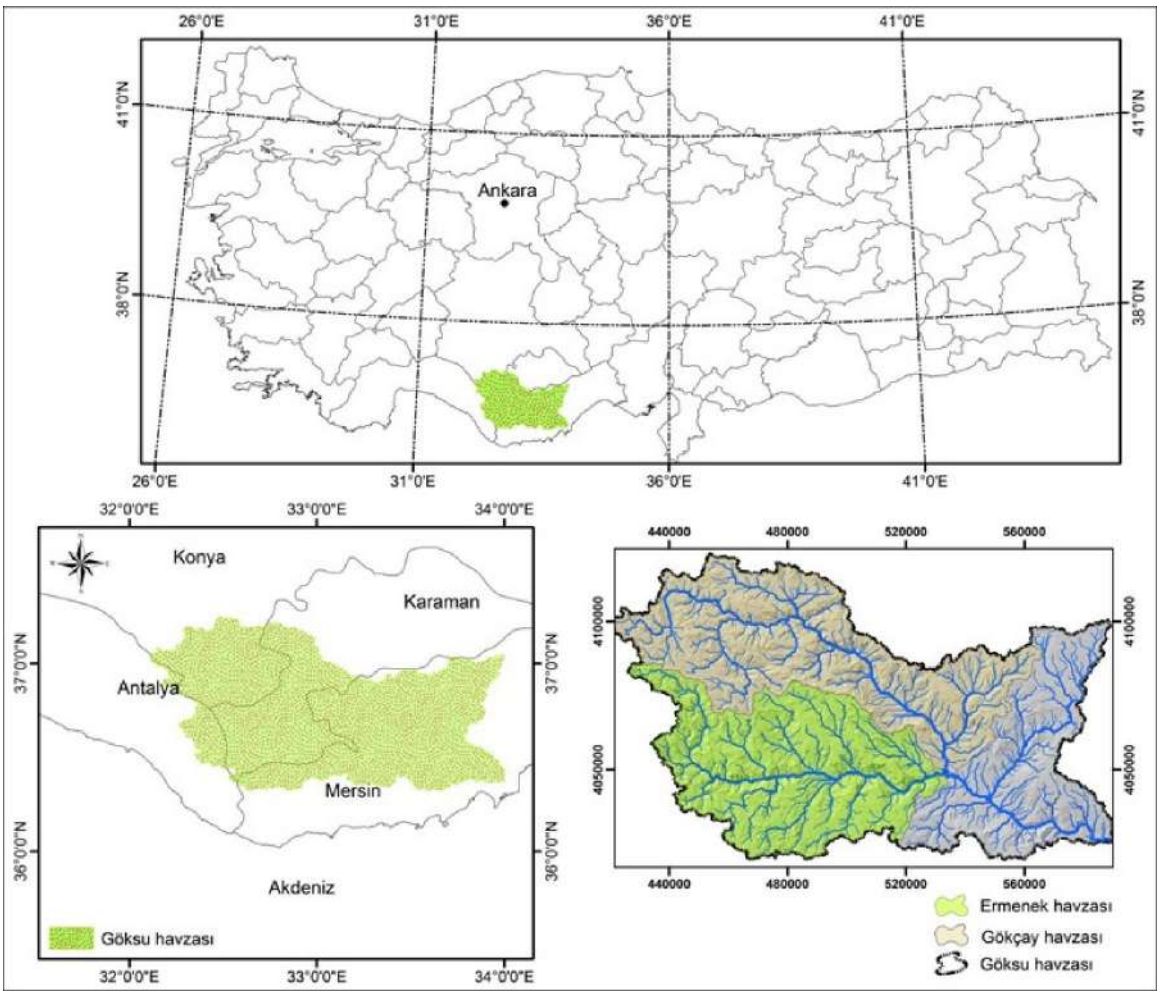
ABSTRACT: *The maximum entropy method provides limited information and the relationship of this information to environmental variables with the least biased estimation possible to create a probability distribution. In this study, susceptibility assessment of rockfall source areas in the Göksu watershed (11213 km^2), which is the largest sub-basin of the Eastern Mediterranean watershed, was carried out using the maximum entropy method. Digital elevation model with 25 x 25 m spatial resolution, slope plan, profile curvature, geology map, land use and roughness parameters were used. The accuracy and precision of the model was evaluated with the significance of the variables in which the receiver operating characteristic curves were used in calculating the estimates as percentages and evaluated with the Jacknife chart examining the effect of each parameter on the result. Based on the rock falls inventory data that were definitely observed in the study area, a rock fall susceptibility study was carried out in the Göksu river watershed. High and very susceptible area rockfall potential correspond to 15% of the study area. The area under the receiver operating characteristic curve was found to be 0.801. As a result, it was seen that the obtained map has a high predictive capacity.*

Keywords: *Maximum entropy method, Göksu river watershed, rockfall*

1. GİRİŞ

Küresel olarak, heyelanlar yılda yaklaşık 1000 ölüme ve yaklaşık 4 milyar dolara yakın maddi hasara sebep olan bir doğal afet türüdür (Pradhan ve Youssef, 2010). Raja vd., (2016), heyelanlar, doğal afetlerden kaynaklanan tüm ölümlerin yaklaşık % 17'sini oluşturmaktadır. Dolayısıyla, heyelan tehlike ve risk azaltma değerlendirmelerinin aşamalarında biri olan heyelan duyarlılık çalışmaları önem arz etmektedir (Aleotti ve Chowdhury, 1999; Kelarestaghi ve Ahmadi, 2009). Heyelan duyarlılık değerlendirmeleri, heyelanları hazırlayıcı çevresel değişkenler ile heyelan envanter haritalarının birlikte değerlendirilmesi ile farklı yöntemler ile oluşturulabilmektedir (Guzzetti vd., 2006; Raja vd., 2016; Tekin, 2019). Heyelan duyarlılık haritalarının güvenilirliği mevcut heyelan envaterinin kalitesi,

çalışma ölçeğine ve bölgeyi doğru yansıtacak yöntem ve modelleme metodolojisinin seçimine bağlıdır (Ayalew ve Yamagishi, 2005). Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) tekniklerinin giderek yaygınlaşması ile heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde literatürde artış görülmektedir. Bu çalışmada, Doğu Akdeniz havzasının en büyük alt havzası olan Göksu nehri havzasında (11213 km^2) (Şekil 1) Maksimum entropi yöntemi ile kaya düşmesi kaynak alanlarının duyarlılık değerlendirilmesi yapılmıştır.

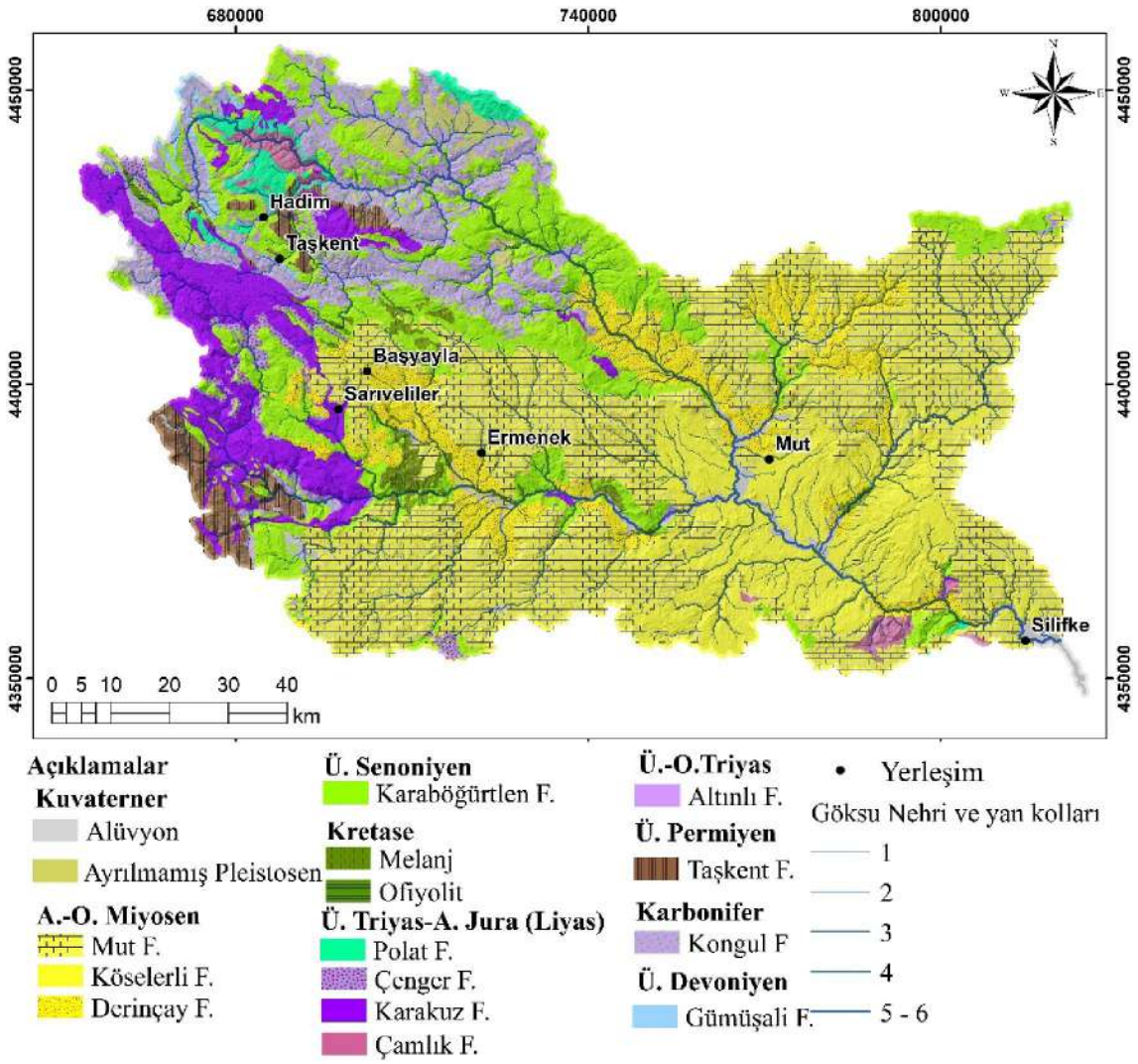


Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

2. ÇALIŞMA ALANI

Bu çalışma, 32°10′ ve 33°55′ doğu boylamları ile 36°20′ ve 37°15′ kuzey enlemleri arasında yer almakta olup, Akdeniz Havzası'ndaki Göksu Nehri'nin oluşturduğu 11.213 km^2 büyüklüğe sahip havzada gerçekleştirilmiştir. Göksu Nehri yaklaşık 260 km uzunluğunda olup, Doğu Akdeniz havzasının en büyük alt akarsu havzasını oluşturmaktadır. Mut ilçesi yakınlarında, Ermenek ve Gökçay olmak üzere iki alt havzaya ayrılmaktadır.

Göksu havzası yukarı kesimlerinde, Devoniyen-Eosen zaman aralığında Torosların farklı tektonik dilimlerine ait temel birimler bulunmaktadır (Şekil 2). Neojen öncesine ait bu birimler havzanın % 42.71'ini oluşturmaktadır. Göksu havzası orta ve alt seviyelerinde Neojen Mut havzasına ait birimler yüzeylemektedir.



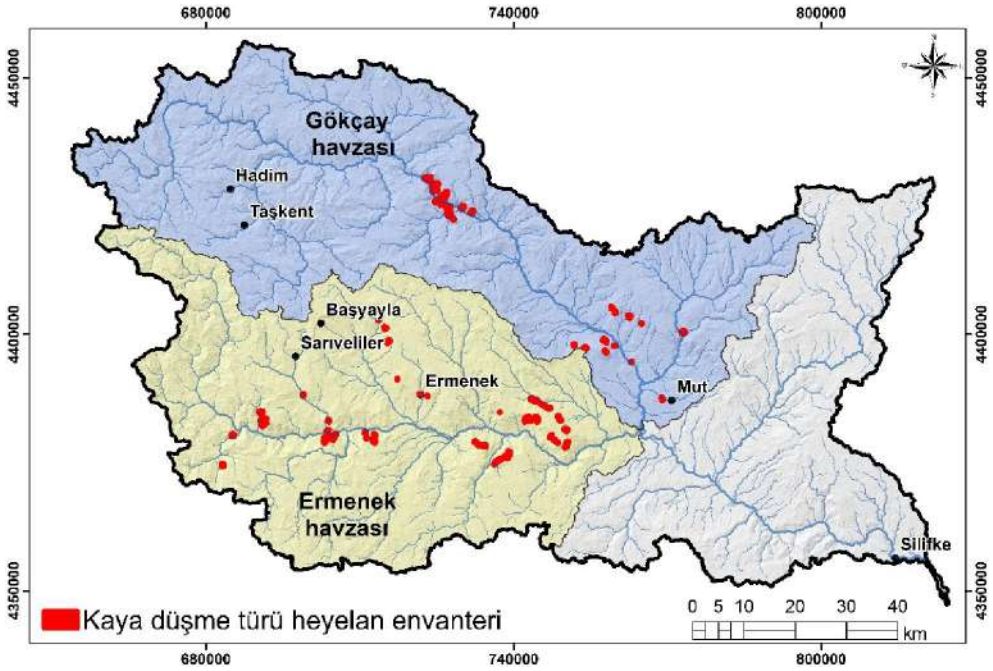
Şekil 2 . Göksu havzasının jeoloji haritası (Dalkılıç ve Balcı 2009, Bilgiç, 2009, Ulu ve Balcı 2009, Alan vd., 2011, Alan vd., 2014a, b, Şenel vd., 2016a, Şenel ve Metin 2016b, Ilgar vd., 2016, Şenel vd., 2016'ya göre hazırlanmıştır).

Yüksek eğimli veya dik bir yamaç yüzeyinde kayaç kütlesinin çok az veya hiçbir makaslama hareketi olmaksızın ayrılmasıyla düşme hareketi meydana gelmektedir. Kaya düşmeleri genel olarak ani ve çok hızlı hareket ettiklerinden dolayı mühendislik yapıları ve yerleşim birimlerinde önemli can ve mal kayıplarına da yol açmaktadır .

Ülkemizde kaya düşme türü heyelanlar için hazırlanmış envanter haritası bulunmamaktadır. Göksu Nehri havzası genelinde, kaya düşme türü heyelan envanteri, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri, farklı tarihli Google Earth görüntüleri ve arazi çalışmaları ile hazırlanmıştır (Şekil 3). Havza genelinde kaya düşmeleri genellikle resifal karbonatların oluşturduğu dik yamaçlar boyunca gözlenmektedir. Kaya düşme olayları, havza genelinde 1000 m ve üzerinde görülen Mut Formasyonunun resifal kireçtaşlarında gelişmektedir.

Ermenek havzasında kaya düşmeleri genel olarak, resifal nitelikli Mut formasyonunun kiltaşı-marn seviyelerin de yağışların tetiklemesiyle birlikte ayrışması ve dolayısıyla fosilli kireçtaşı ve kireçtaşı seviyelerinin serbest kalması ile gerçekleştiğini belirlenmiştir. Serbest kalan bu kaya bloklarının düzlemsel kayma şeklinde başlayan hareketi, topoğrafyanın dik olmasından (yüksek açılı) dolayı düşme şeklinde devam etmektedir (Tağa vd., 2009) Özellikle Ermenek ve Derinçay bölgelerinde kaya

düşmelerine rastlanmaktadır (Şekil 4). Havzanın üst kesimlerinde derin vadi oluşumu neredeyse hiç gözlenmemiş olması sebebiyle kaya düşmelerine de rastlanmamıştır.



Şekil 3. Kaya düşmesi kaynak alan envanteri.

(a) (b)

Şekil 4. Göksu havzası bazı kesimlerinde kaya düşme kaynak alanları.

3. MAKSİMUM ENTROPİ YÖNTEMİ

Maksimum entropi yöntemi (MaxEnt), sınırlı bilgi ve bu bilginin çevresel değişkenler ile olan ilişkisini mümkün olan en az önyargılı tahminle, olasılık dağılımının oluşturulmasını sağlamaktadır. MaxEnt, sadece "var" verileri ile bölgesel özellikler arasında ilişkiler kurarak çalışma alanı için dağılım modelleri üreten bir yaklaşımdır (Elith vd., 2006). Yalnızca envanter verisi olarak adlandırılan "var" verileri ile güvenilir olmayan "yok" veri kaydı probleminden uzaklaştırır. Özellikle, yok verileri potansiyel dağılım modellemesini imkansız hale getirebilen biyotik etkileşimlerin güçlü etkilerini ve dağılış kısıtlamalarını taşır (Jimenez-Valverde vd., 2008). MaxEnt yöntemi diğer "var" verisi ile çalışan yöntemlere göre daha az veri ile daha doğru sonuçlar vermesi sebebi ile öne çıkmaktadır (Wisz vd., 2008). Çalışma alanının büyüklüğü dikkate alındığında kaya düşme alanları belirli alanlarda gözlendiğinden kaya düşme duyarlılık haritaları MaxEnt yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde "var" verisi olarak kullanılan değişkenlerin (heyelanlar) büyüklüğü ya da sayısı çalışma alanının büyüklüğüne göre göreceli olarak az olan çalışmalarda, sonuca etki eden çalışma alanını

yansıtan değişkenler için tekrarlanabilirliğini inceleyen ve sonuç olasılık değerleri üzerindeki etki değerlerini kıyaslamaktadır. Jackknife eğrileri ile tek bir değişkenden yola çıkarak elde edilen olasılık tahminlerin "var" verileri olan heyelanlar için de geçerli ve kabul edilebilir tahminler olup-olamayacağını incelemektedir. Jackknife yönteminde, her tekrarlanmada veri setinden bir değişken atılarak işlem gerçekleşir. Çift çapraz geçerlilik yöntemi 3 adımda analiz edilmektedir. İlk adım, orijinal veritabanı rastgele ikiye ayılır, ikinci adımda, her iki örnekte de analizler ayrı ayrı yapılır ve üçüncü adımda ise sonuçlar deneysel olarak karşılaştırılır. Jackknife tekniği, bilinen yollardan elde edilmesi zor olan durumlarda önyargılı tahmini azaltan ve güven aralıklarını yaklaşık olarak veren bir yöntemdir. Yöntemin temeli; her bir değişken için veri setinden sırayla çıkararak sonuç üzerindeki performansını analiz etmektedir (Philips vd., 2006).

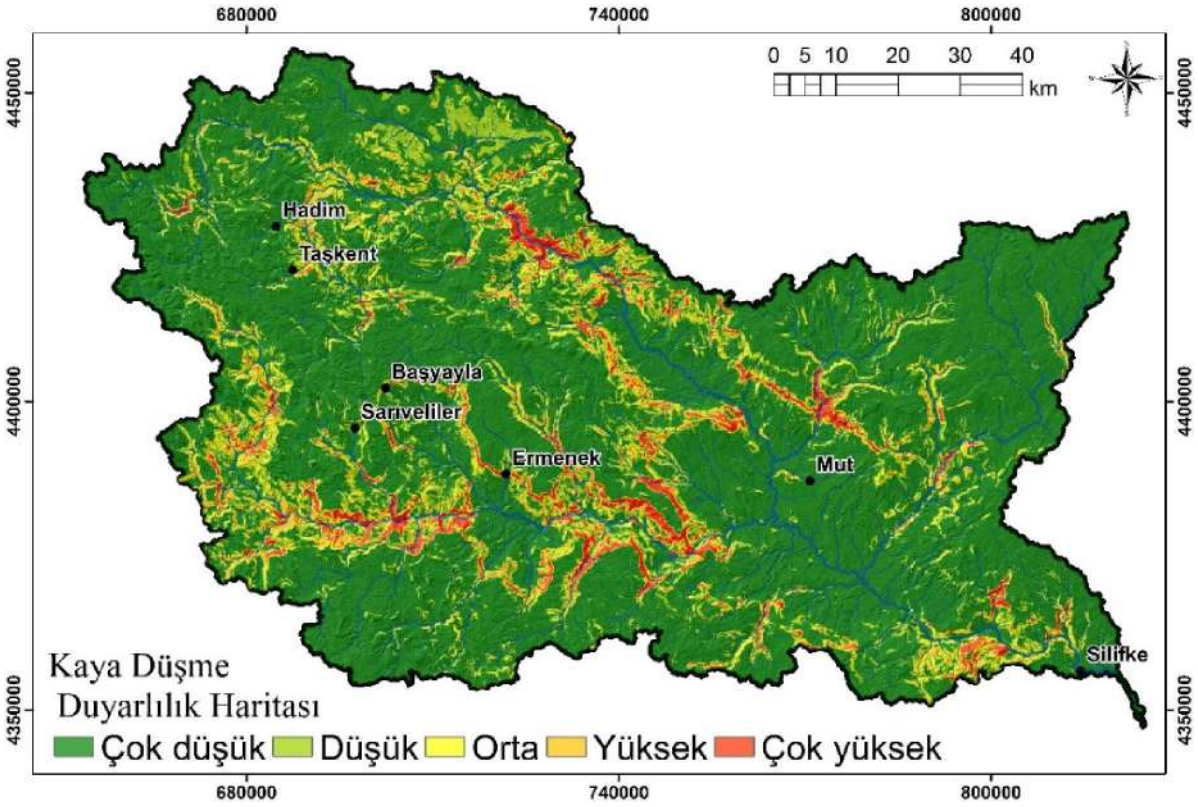
Elde edilen modelin doğruluğu alıcı işletim karakteristiği eğrisi yaklaşımıyla da kontrol edilebilmektedir. Yüksek özgüllük değerlerinde yüksek duyarlılık modelin iyiliğini belirtir. Modelin doğruluğunun sayısal olarak ifadesi eğrinin altındaki alan ile tanımlanır. Burada 1 değeri mükemmel doğruluğu 0.5'in altındaki değer ise modelin kötü olduğunu ifade etmektedir. Alan ve doğruluk arasındaki niteliksel ve niceliksel ilişkiler genelde doğrusal bir davranış gösterir ve aşağıdaki sınıflama kullanılabilmektedir (Hosmer vd., 2013).

4. KAYA DÜŞMESİ KAYNAK ALANLARININ MODELLENMESİ

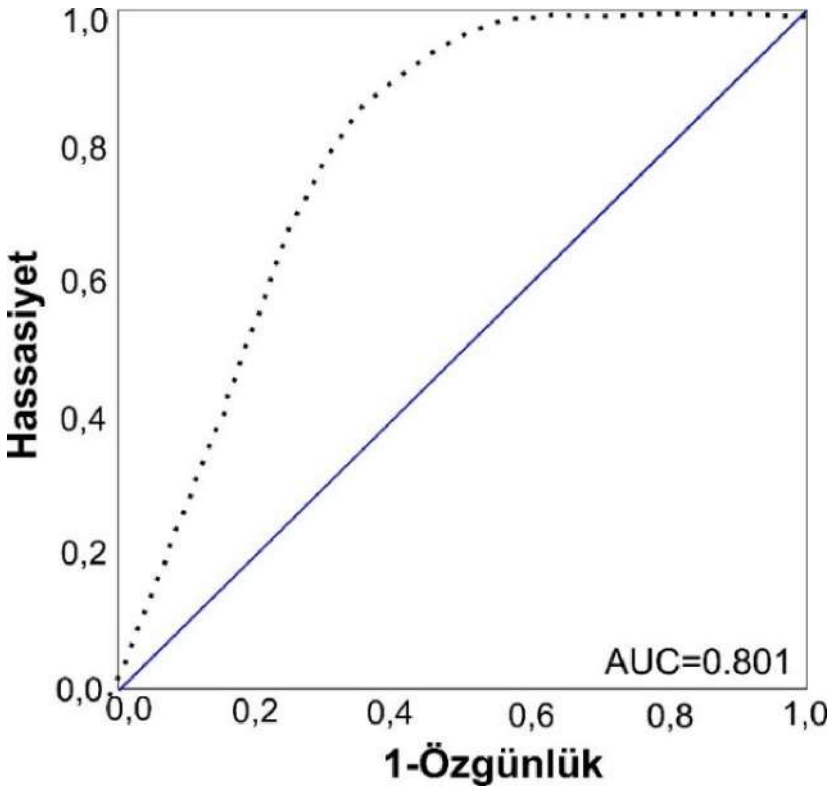
MaxEnt yaklaşımı ile Göksu havzasında sınırlı sayıda haritalandırılan kaya düşme kaynak zonları için potansiyel alanlar belirlenmiştir (Şekil 5). Havzada resifal kireçtaşlarından oluşan Mut formasyonu, başlıca marn ve killi kireçtaşlarından oluşan Köselerli formasyonu ile yanal ve düşey geçişlidir. Bölgede birkaç on metreden 300 m'yi aşan dik şevler oluşturan Mut formasyonun da kaya düşmesi olayları oldukça fazla gözlenmektedir. Kaya düşmeleri, şev yüksekliği, yayılım mesafesi üzerinde mevcut yamaç eğimi ve blok boyutuna bağlı olarak bölgede yerleşim birimlerini ve ulaşım ağlarını zaman zaman tehdit etmektedir. Bu nedenle ilk aşamada bölgesel ölçekte kaya düşmesi kaynak alanlarının belirlenmesi önem taşımaktadır.

Morfolojik olarak belirgin çevresel değişkenlerin kontrolü altında gelişen kaya düşme alanları değişik yüksekliğe sahip kaya şevlerinde sınırlı alanlarda haritalanmış ve sayısal yükseklik modeli, yamaç eğimi, kesit, düzlem, teğetsel yamaç eğrisellikleri, jeoloji haritası, arazi kullanımı ve pürüzlülük indeksleri kullanılarak maksimum entropi yaklaşımı ile modellenmiştir. Modelin doğruluğu ve hassasiyeti alıcı işletim karakteristik eğrileri kullanılan değişkenlerin tahminleri hesaplamada yüzde olarak anlamlılığı ile değerlendirilmiş ve her bir parametrenin sonuç üzerindeki etkisini inceleyen Jacknife grafiğiyle de değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, çalışma alanında kesin olarak gözlenen kısmi kaya düşmeleri envanter verisinden yola çıkılarak, Göksu Nehri havzasında kaya düşme duyarlılık çalışması gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).

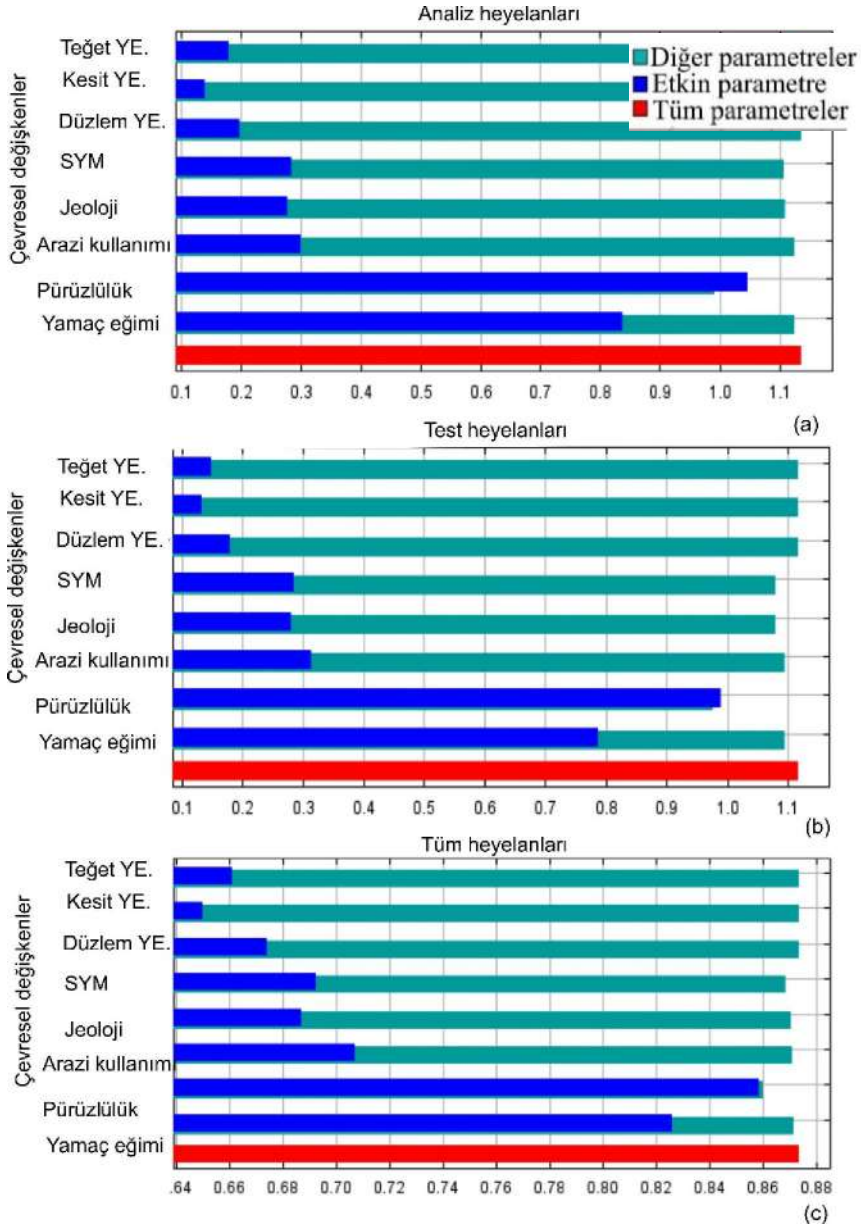
Yüksek ve çok yüksek duyarlı kaya düşme potansiyeline sahip alanlar, çalışma alanının % 15'ine karşılık gelmektedir. Alıcı işletim karakteristiği eğrisi altında kalan alan 0.801 olarak bulunmuştur (Şekil 6). Kulanılan parametreler ile kaya düşmeleri arasındaki model uyum grafiklerine göre çalışmada kullanılan çevresel değişkenlerin hepsinin kaya düşmelerinde etkin parametre olduğu görülmektedir (Şekil 7).



Şekil 5. Göksu havzası kaya düşme heyelan duyarlılık haritası.



Şekil 6. Alıcı işletim karakteristik eğrisi.



Şekil 7. Jacknife grafiği.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ülkemizin 25 ana havzasından birini oluşturan Doğu Akdeniz havzasının, 11.213 km^2 ile yarısına karşılık gelen ve en büyük alt havzası olan, Göksu Nehri Havzasında Kaya düşme kaynak alanları belirlenmiştir. Bu çalışmanın, karar vericiler ile uygulayıcılar tarafından değerlendirildiğinde, bölgede yapılacak planlama çalışmaları için, kaya düşmesi sonucu meydana gelebilecek olası kayıpların azaltılmasına yönelik önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

Alan, İ., Balcı, V., Şahin, Ş., Böke, N., Esirtgen, T., 2011. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Silifke-O32 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 194. 19s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Alan, İ., Balcı, ve Elibol, H., 2014a. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Silifke-P30 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 221. 36s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Alan, İ., Balcı, ve Elibol, H., 2014b. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Silifke-P31-32 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 222. 36s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bull. Eng. Geol. Environ. 58, 21–44.

Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology 65, 15–31.

Bilgiç, T., 2009. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Karaman N31 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 129. 25s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Dalkılıç, H., ve Balcı, V., 2009. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Silifke 0-30 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 130. 25s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M. S., and Zimmermann, N. E., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography 29, 129-151.

Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., 2006. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences 6, 115-131.

Hosmer, D. W., Lemeshow, S., and Sturdivant, R. X. 2013. Applied logistic regression (Third edition / ed., Wiley series in probability and statistics). Hoboken, New Jersey: Wiley

Ilgar, A., Esirtgen, T., Demirkaya, S., 2016. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Silifke-O31 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 233 27s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Jiménez-Valverde, A., Lobo, J.M., Hortal, J., 2008. Not as Good As They Seem: The İmportance of Concepts in Species Distribution Modelling. Diversity and Distributions, 14(6), 885-890.

Kelarestaghi, A., Ahmadi, H., 2009. Landslide susceptibility analysis with a bivariate approach and GIS in Northern Iran. Arab. J. Geosci. 2, 95–101.

Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190:231-259.

Pradhan, B., Youssef, A.M., 2010. Manifestation of remote sensing data and GIS on landslide hazard analysis using spatial-based statistical models. Arab. J. Geosci. 3, 319–326.

Raja, N.B., Çiçek, I., Türkoğlu, N., Aydin, O., Kawasaki, A., 2016. Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model. Nat. Hazards 1–24.

Şenel, M., ve Metin, Y. 2016. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Silifke-N28 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 231. 52s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Şenel, M., Bedi, Y., Çörekçioğlu, E., 2016a. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Alanya 028 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 232. 54 s., Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Şenel, M., Bedi, Y., ve Usta, M., 2016b. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Alanya P28 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 223. 29s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Tağa, H., Zorlu, K. ve Akgöz, M., 2009. Ermenek İlçesi Yerleşim Yeri (Karaman) Kuzey-Kuzey Doğusundaki Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi. TÜBİTAK Rapor No:107Y071 (Yayımlanmamış).

Tekin, S., 2019. Göksu Nehri Havzasının Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Jeomorfometrik Analizi ve Niceliksel Heyelan Olası Tehlike Değerlendirmesi" Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. 219 Sayfa, Adana.

Ulu, Ü., Balcı, V., 2009. Türkiye Jeoloji Haritaları 1:100000 ölçekli Karaman N-30 paftası jeoloji haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 128. 28s. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Wisz, M. S., Hijmans, R. J., Li J., Peterson, A. T., Graham, C. H., Guisan, A., Predicting Species Distributions Working Group. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. Divers. Distrib. 14: 763-773.

Perşembe (Ordu) Bölgesi Akma Türü Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi

Flow type landslide susceptibility assessment in Perşembe (Ordu) region

T. Çan[1,*], S. Tekin[2]

[1] Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330, Sarıçam, Adana
[2] Adıyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, 02040, Adıyaman
*(*tolgacan@cukurova.edu.tr)*

ÖZ: 5 Temmuz 2016 tarihinde, Perşembe (Ordu) ilçesinde etkili olan aşırı yağışların tetiklemesi sonucu, alanı 24 m^2 ile 8400 m^2 arasında değişen 706 adet akma türü heyelan gelişmiştir. Arazi örtüsü, kullanımı ve morfolojik yapısı aynı olmasına rağmen heyelanların yaklaşık 3 km - 20 km boyutlarında bir zon içerisinde gelişmesi, heyelanların yağış şiddetinin mekansal dağılımına bağlı olarak meydana geldiğini desteklemektedir. Bu çalışmada 230 km^2'lik alanda hazırlanan heyelan envanter haritası ve 10 m çözünürlüğündeki sayısal yükseklik modeli ve türev haritaları ile toplamda onyedi değişken kullanılarak duyarlılık değerlendirmesi yapılmıştır. Akma türü heyelanların oluştuğu bölgeler yağış şiddetine bağlı olarak sınırlı alanlarda geliştiği için akma duyarlılık değerlendirmesi, sınırlı sayıda gözleme dayalı kestirim için kullanılan Maksimum entropi yöntemi ile modellenmiştir. Sonuç duyarlılık haritasında çalışma alanının % 28.93'ü ile mevcut heyelanların %78.43'nün yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlar içinde yer aldığı belirlenmiştir. Doğu Karadeniz bölgesinde tekrarlanan heyelan olaylarının, yağış şiddet süre, frekans büyüklük ilişkilerinin sistematik olarak kayıt altına alınması ile yapılacak duyarlılık değerlendirmeleri, zarar azaltma çalışmalarının daha etkin planlanmasında önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan olay envanteri, akma, maksimum entropi, heyelan duyarlılık.

ABSTRACT: *On 5 July 2016, 706 flow-type landslides were triggered by heavy rainfall, varying in size from 24 m^2 to 8400 m^2, in the district of Persembe (Ordu). Although the land cover/use and morphological features are the same, the development of landslides within a zone of approximately 3 km - 20 km supports that the landslides occurred depending on the spatial distribution of rainfall intensity. In this study, susceptibility assessment was made using the event landslide inventory map prepared in an area of 230 km^2 and a total of twenty environmantel variables derived from the digital elevation model with 10 m resolution. Since the flow type landslides are developped in limited areas depending on the spatial intensity of rainfall, the susceptibility assessment was modeled with the Maximum entropy method, which is based on a limited number of presence data. In the final susceptibility map, it has been determined that 28.93% of the study area and 78.43% of the existing landslides are located in high and very high suscebtible classes. Susceptibility assessments to be made by systematically recording the rainfall intensity, duration and frequency magnitude relationships will significantly contribute to more effective mitigation plannings against recurrent landslides in the Eastern Black Sea region.*

Keywords: *Event landslide inventory, flow, maximum entropy, landslide susceptibility.*

1. GİRİŞ

Karadeniz bölgesi, ülkemizde heyelanların en sık ve yoğun gözlendiği bölge olması açısından, heyelanların yarattığı sosyal ve ekonomik kayıpların da en fazla olduğu bölgedir. Özellikle, Doğu Karadeniz bölgesinde sel ve heyelan olaylarının sıklığı ve meydana getirdiği sosyal ve ekonomik kayıpların son yıllarda artarak devam ettiği gözlenmektedir. Doğu Karadeniz bölgesinin kıyı kuşağı boyunca daha küçük ölçekli kaymalar ve daha sık olarak akma türü heyelanlar meydana gelmektedir. Doğu Karadeniz kıyı kuşağının engebeli arazi yapısı, bol yağışlı iklim özellikleri, ayrışma, doğal bitki örtüsünün kaldırılarak, fındık ve çay bahçelerine dönüştürülmesi, kırsal yerleşim birimlerinin dağınık yapılaşması, dağınık yapılaşmaya paralel düşük standartlı ulaşım ağı ve ulaşım ağının kontrolsüz yüzey drenaj sistemi oluşturması, heyelanların oluşmunu hazırlayan ve tetikleyen faktörlerin başında gelmektedir (Çan ve Duman 2017). Heyelanlardan kaynaklanan kayıpların azaltılması hususunda

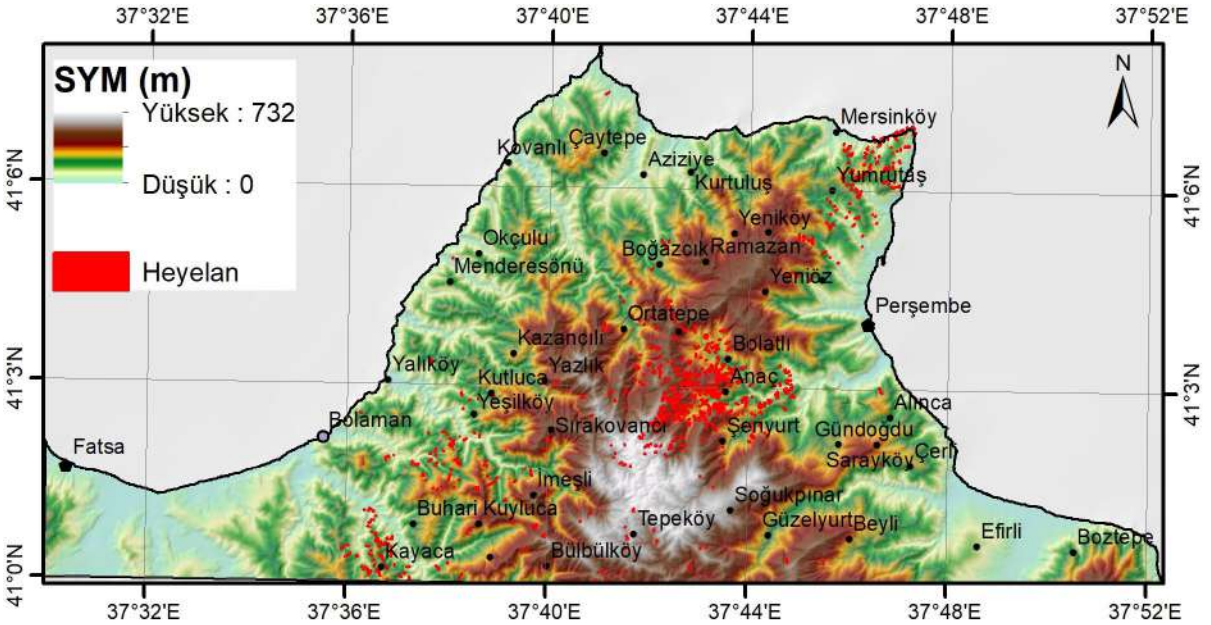
bölgesel olarak etkili olan heyelanların mekansal dağılımının ayrıntılı olarak haritalanması gerekmektedir: heyelanların büyüklüğü, dağılımı ve hasara neden olduğu üst ve alyapı elemanlarının ayrıntılı olarak kayıt altına alınması gerekmektedir. Bölgede geçmiş yıllara ait heyelan envanter haritalarının bulunmaması, heyelan kontrol çalışmalarının etkin şekilde yapılandırılmasında önemli bir eksikliktir. Bu eksiklik bölgenin tamamı için büyük ölçekli altlık haritaların olmamasından kaynaklanmaktadır.

Perşembe (Ordu) ilçesi ve çevresinde 5 Temmuz 2016 tarihinde meydana gelen sel ve heyelan olayları sonucu Perşembe ilçesinde 2 kişi hayatını kaybetmiş ve önemli ekonomik kayıplar meydana gelmiştir. Bu çalışmada olay sonrası aşırı yağışların tetiklemesi sonucu oluşan heyelanlar, Google Earth görüntüsü üzerinden sayısallaştırılarak çalışma alanının heyelan envanter haritası hazırlanmış ve Maksimum entropi yöntemi kullanılarak yüksek kestirim gücüne sahip heyelan duyarlılık haritası elde edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Ordu ili, Perşembe ilçesi ve çevresinde 230 km^2'lik bir alanı kapsamaktadır. Bölgedeki heyelanlar 5 Temmuz 2016 tarihinde 6 saat içerisinde, toplam 130 mm'lik aşırı yağışların tetiklemesi sonucu meydana gelmiştir. Heyelanlar Google Earth görüntüsü üzerinde sayısallaştırılarak bölgenin heyelan envanter haritası hazırlanmıştır. Buna göre çalışma alanında büyüklüğü 24 m^2 ile 8400 m^2 arasında değişen 706 adet heyelan tanımlanmıştır. Yükseklik değerleri deniz seviyesinden başlayarak en fazla 732 m'ye ulaşmakta, heyelanlar ise genel olarak yüksek kesimlerde GB-KD yönünde uzanan bir zon içerisinde gözlenmektedir (Şekil 1). Duyarlılık değerlendirmelerinde sayısal yükseklik modeli ve türev haritalarından üretilen toplam 17 değişken kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli ve heyelanların mekansal dağılımı.

Heyelanları hazırlayıcı çevresel değişkenler 10 m çözünürlüğündeki sayısal yükseklik modeli (Sym) ve yamaç eğimi (Slop), yamaç eğimi ikinci tüvevi (Slp2nd), teğetsel (Curv), kesit (Prcurv), düzlemsel (Plcurv), yamaç eğrisellikleri (Moore vd., 1991), topografik nemlilik indisi (Cti) (Moore vd., 1993), entergre nemlilik indisi (Imi) (Iverson vd., 1997), ortalama eğim (Mnslp), pürüzlülük (Roughns) (Riley vd., 1999), engebelilik (Dissec) (Evans 1972), yüzey röliyef oranı (Srr) (Pike ve Wilson 1971), saha açıklık indisi (Sitei) (Balice vd., 2000), yamaç eğimi yamaç yönelimi dönüşümleri; Cos(Sacos), Sin (Sasin) (Stage'in 1976) ve topoğrafik radyasyon bakı indeksi (Trasp) (Roberts ve Cooper 1989),

yüzey/harita alanı oranı (Sar) (Berry 2002) parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. İlgili parametrelerin çalışma alanı içerisindeki ve heyelanlı alanlar içerisindeki tanımlayıcı istatistiksel değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Heyelanları hazırlayıcı çevresel değişkenlerin ve heyelanlı alanların tanımlayıcı istatistik verileri.

Değişken	En düşük (piksel değeri)	En yüksek (piksel değeri)	Ortalama (piksel değeri)	Std. Sapma
Sym	0 (3.94)*	732 (674)	230 (280)	160 (137)
Cti	3.21 (3.63)	22 (16.77)	6.5 (6.35)	1.74 (1.35)
Prcurv	-7.68 (-5.77)	5.65 (2.73)	0.02 (-0.26)	0.74 (0.77)
Curv	-5,21 (-2.63)	8.62 (4.18)	0.02 (0.11)	0.71 (0.64)
Plcurv	-9.58 (-8.07)	9.67 (4.19)	0.003 (-0.37)	1.18(1.15)
Dissec	0 (0.08)	1 (0.87)	0.49 (0.48)	0.08 (0.05)
Imi	54.95 (67)	97485 (23975)	164 (133.9)	1295 (777.8)
Mnslp	0.03 (3.72)	52.7 (46.22)	20.80 (28.38)	9.20 (6.42)
Roughns	0.05 (0.66)	3.34 (2.98)	1.72 (2.10)	0.49 (0.30)
Sacos	-1.0 (-0.86)	1.0 (1.0)	0.03 (0.11)	0.3 (0.42)
Sasin	-1.0(-0.84)	1.0 (0.92)	0.00 2(0.12)	0.3 (0.35)
Trasp	0 (0)	1 (1)	0.44 (0.36)	0.35 (0.35)
Sar	100 (100)	169.79 (147.9)	108.1 (114.9)	7.36 (7.34)
Sitei	-49.2 (-47.4)	51.68 (40.74)	-1.68 (-5.75)	16.16 (21.46)
Slp2nd	0 (1.93)	53.9 (47.45)	20.79 (28.45)	9.57 (6.76)
Slop	0 (0.14)	62.6 (53.75)	12.69 (11.73)	9.57 (8.44)
Srr	0.12 (0.32)	0.85 (0.69)	0.49 (0.50)	0.04 (0.03)

*Parantez içindeki değerler heyelanlı alanlara aittir.

2.2. Yöntem

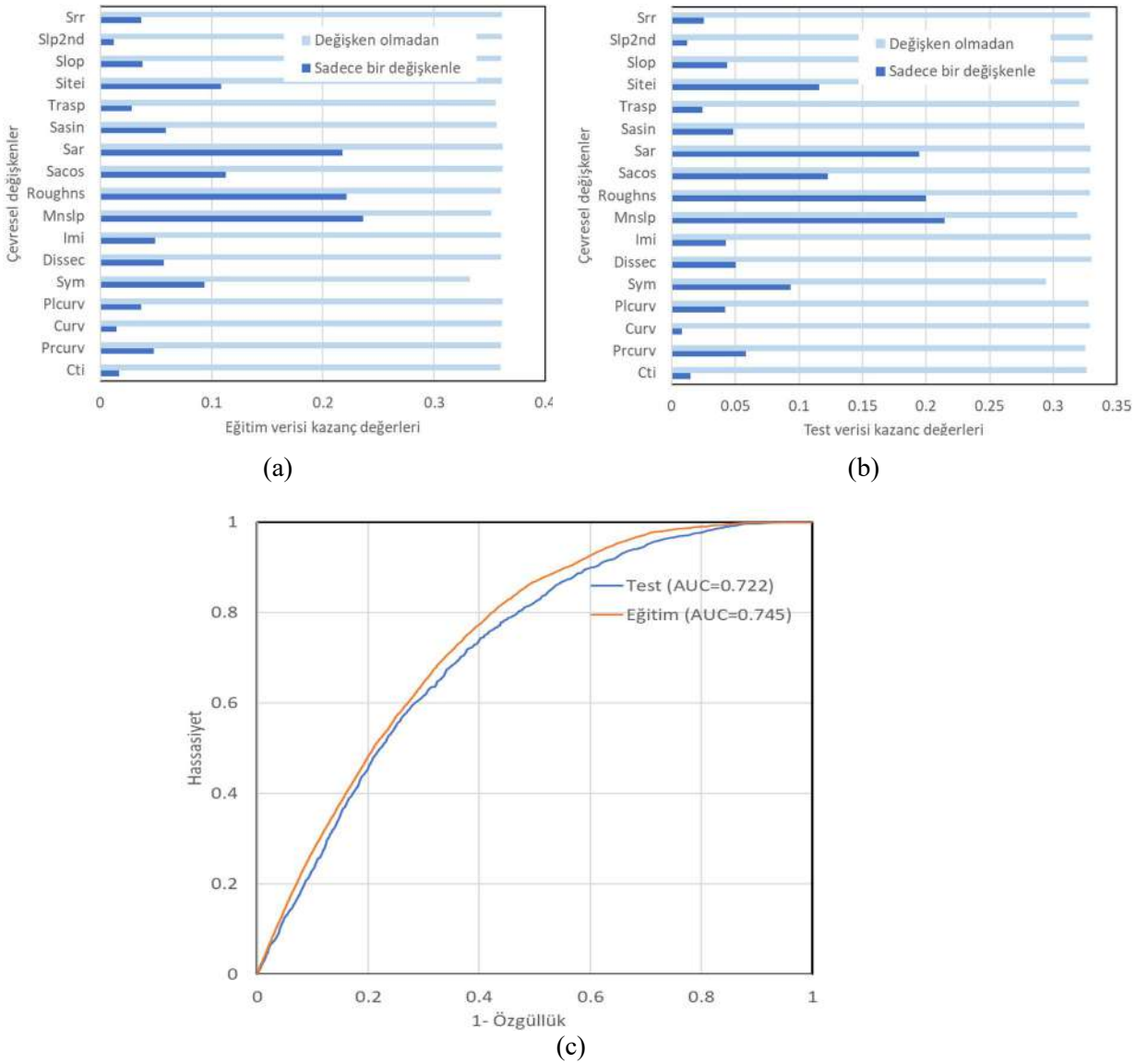
Maksimum entropi yöntemi, sınırlı bilgi ve bu bilginin çevresel değişkenler ile olan ilişkisini mümkün olan en az önyargılı tahminle, olasılık dağılımının oluşturulmasını sağlamaktadır. MaxEnt, sadece "var" verileri ile bölgesel özellikler arasında ilişkiler kurarak çalışma alanı için dağılım modelleri üreten bir yaklaşımdır (Elith vd., 2006). Yalnızca envanter verisi olarak adlandırılan "var" verileri ile güvenilir olmayan "yok" veri kaybı probleminden uzaklaştırır. Özellikle, "yok" verileri potansiyel dağılım modellemesini imkansız hale getirebilen çevresel etkileşimlerin gücünü ve dağılım kısıtlamalarını taşır (Jimenez-Valverde vd., 2008). MaxEnt yazılımı diğer "var" verisi ile çalışan yöntemlere göre daha az veri ile daha doğru sonuçlar vermesi sebebi ile öne çıkmaktadır (Hernandez vd., 2006; Wisz vd., 2008). Makine öğrenme tekniklerinden biri olan MaxEnt yazılımında model, temel fonksiyonlar yanı sıra mevcut veriler, doğrusal, eşik, ikinci derece gibi özellikler kullanılarak orjinal ortak değişkenlerin genişletilmiş bir dönüşüm kümesi şeklinde arka planda oluşturulmaktadır. MaxEnt yazılımı ile "var" verilerinin koşullu oluşma olasılığı Bayes kuralına göre Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$Pr(y = 1| z) = f1(z)Pr(y = 1)/f(z) \quad (1)$$

Burada,
y=1 "var" verilerini,
z çevresel değişkenleri,
f1(z) var verisinin bulunduğu lokasyonlarındaki ortak değişkenlerin koşullu yoğunluğunu,
f(z) çalışma alanı içerisindeki ortak değişkenlerin marjinal yoğunluğunu ifade etmektedir.
Buradan MaxEnt'in 'ham' çıktısı olarak adlandırılan f1(z)/f(z) oranı elde edilerek hangi çevresel değişkenlerin önemli olduğu ve bir yerin diğerine göre göreceli uygunluğunu tahmin edilir. Koşullu gerçekleşme olasılığını hesaplamak için yaygınlık hakkında gerekli bilgiler lojistik çıktı ve logit dönüşümü ile kestirimlerin kalibrasyonu yapılarak gerçekleştirilmektedir (Elith vd., 2011).

3. HEYELAN DUYARLILIK HARİTASI

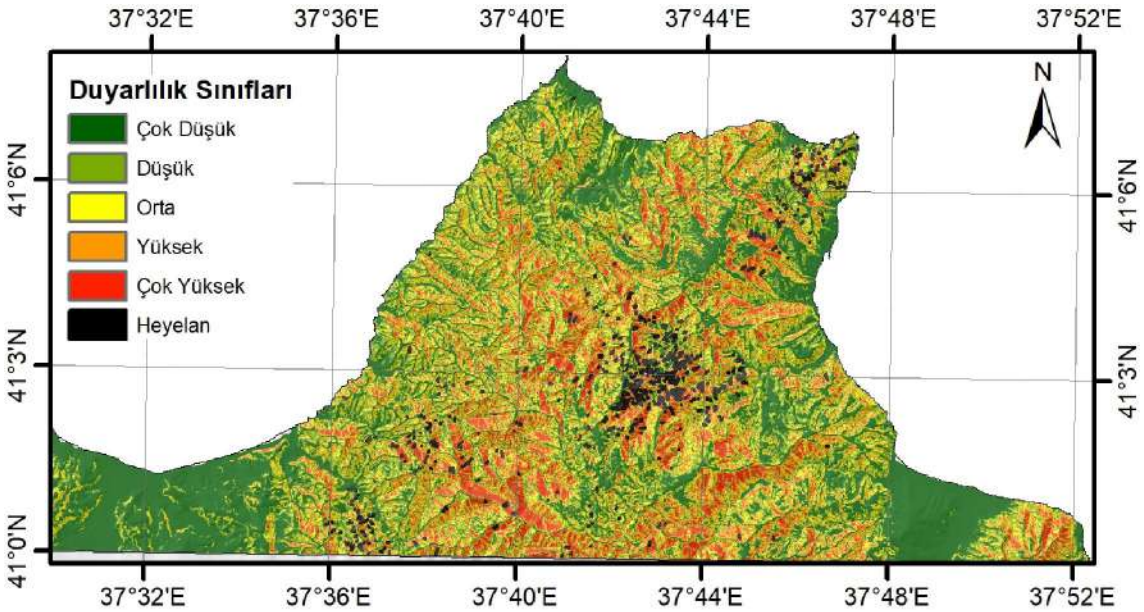
Maksimum entropi yöntemi ile heyelan duyarlılık analizlerinde, ilk olarak heyelanların, %70'i analizlerde kullanılmış, %30'u da test verisi olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte duyarlılık model yapılandırmasını durdurmadan önce eşik değerin 0.0001'in altına düşmesi koşuluyla iterasyon sayısı maksimum 500 olarak belirlenmiştir. Son olarak Maksimum Entropi dağılımını belirlemek amacıyla heyelanlı piksellerle birlikte arka planda 10000 adet heyelanlı piksel belirlenmiştir. Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde göz önünde bulundurulan toplam 17 adet çevresel değişkenin önem dereceleri eğitim ve test verilerine göre Jackknife testi ile değerlendirilmiştir (Şekil 2). Buna göre ortalama yamaç eğimi (mnslope), pürüzlülük (Roughns) ve yüzey/harita alanı (Sar) oranı parametreleri duyarlılık modeline en yüksek katkıya sahip oldukları görülmüştür. Eğitim ve test verilerine modelin doğruluğu alıcı işletim karakteristik eğrisi ve eğri altında kalan alan (AUC) ile değerlendirilmiştir. Buna göre eğitim ve test verilerine göre AUC değerleri sırasıyla 0.745 ve 0.722 olarak belirlenmiştir.



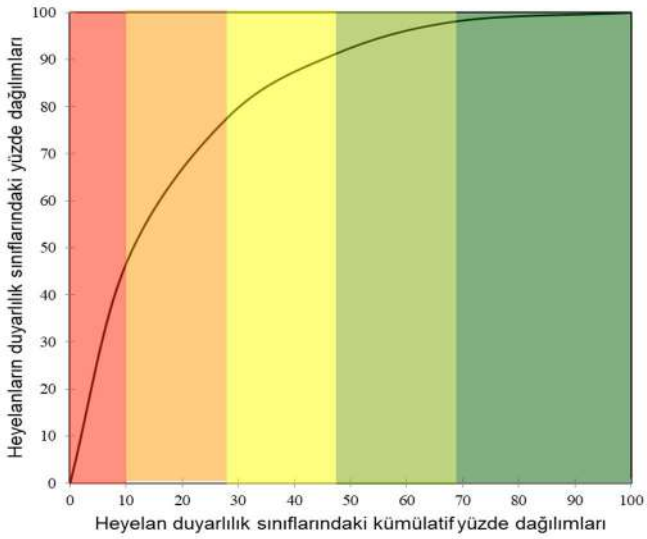
Şekil 2. Jackknife testine göre eğitim (a) ve test (b) verilerinde modele etki eden çevresel değişkenlerin etkisi ve alıcı işletim katakteristik eğrileri (c).

Buna göre Şekil 3'de verilen heyelan duyarlılık haritası elde edilmiştir. Heyelan duyarlılık haritasında çalışma alanının yaklaşık %27.96'sı heyelanların ise %77.58'i yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlarda yer almaktadır. Heyelan duyarlılık haritasının doğruluğu alıcı işletim karakteristik eğrileri ve duyarlılık

haritası başarı tahmin eğrisi ile değerlendirildiğinde oluşturulan modelin kestirim gücünün çok yüksek doğrulukta olduğu sonucu elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. Heyelan duyarlılık haritası (a) ve başarı tahmin eğrisi (b).

4. SONUÇLAR

Ülkemizin en fazla yağış alan Doğu Karadeniz bölgesi kıyı kuşağında, yılın tüm ayları yağışlı geçmekte ve yıllık ortalama yağış 2500 mm'ye ulaşmaktadır. Buna bağlı olarak kısa süreli şiddetli yağışlar bölgede akma türü heyelanları tetikleyerek, sel olayları ile birlikte önemli sosyal ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Heyelanları hazırlayıcı ve tetikleyici faktörlerin çeşitliliği, heyelan duyarlılık değerlendirmelerini zorlaştırmakta, bu nedenle kullanılması gereken yöntem ve yaklaşımlar ile ihtiyaç duyulan veriler, bölgeden bölgeye farklılıklar gösterebilmektedir. Duyarlılık haritalarının performansı açısından Çan vd., 2005'in önerdiği iki temel prensip bulunmaktadır. Bunlardan ilki çalışma alanında yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlar minimum düzeyde olması gerekirken, bu zonlar içinde mevcut heyelanların maksimum düzeyde temsil edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ilk olarak Perşembe ilçesi çevresinde 230 km^2 lik alan içerisinde, dar bir hat boyunca orografik yağış sonucu oluşan

heyelanların olay envanter haritası hazırlanmıştır. Buna göre toplam alanı 0.54km^2 olan 706 adet heyelan haritalanmıştır. Çalışma alanının %0.23'üne karşılık gelen heyelan envanter haritası ile duyarlılık haritasının klasik yöntemler ile hazırlanması duyarlılık sınıflarında abartılı tahminlere yol açmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada sadece "var" verisi ile çalışan ve sınırlı sayıda heyelan gözlemi ve heyelanların çevresel değişkenler ile olan ilişkisini mümkün olan en az önyargılı tahminle modelleyen Maksimum entropi yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak çalışma alanının % 28.93'ü ile mevcut heyelanların %78.43'nün yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlar içinde yer aldığı yüksek kestirim kapasitesine sahip akma türü heyelan duyarlılık haritası elde edilmiştir. Doğu Karadeniz bölgesinde heyelan zarar azaltma çalışmalarının etkili bir şekilde yapılabilmesi için sistematik olarak heyelan olay envanter haritalarının hazırlanması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

Balice, R. G., J. D. Miller, J. D., B. P. Oswald, B.P., C. Edminister, C., and S. R. Yool, S.R., (2000.) Forest surveys and wildfire assessment in the Los Alamos; 1998–1999. Los Alamos, NM, USA Los Alamos National Laboratory. LA 13714-MS. 12 p.

Berry, J.K. (2002). Use surface area for realistic calculations. Geoworld 15(9):20-1.

Çan, T., Duman, T.Y., 2017. Hopa (Doğu Karadeniz) Bölgesi Heyelan Olay Envanter Haritası ve Yağış Şiddet İlişkisi, MÜHJEO 2017: Ulusal Mühendislik Jeolojisi - Jeoteknik Sempozyumu , Adana, Turkey, ss.103-110.

Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M. S., and Zimmermann, N. E., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography 29, 129-151.

Evans, I. S., (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In R. J. Chorley (Ed.), Spatial analysis in geomorphology (pp. 17–90). New York, NY: Harper & Row.

Fu, P., & Rich, P. M., (1999). Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, USA. Available from http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm.

Hernandez, P.,Graham, C., Master, L., Albert, D., 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. Ecography. 29. 773 - 785. 10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x.

Iverson, L. R., M. E. Dale, M.E., C. T. Scott, C.T., and A. Prasad, A., (1997). A GIS-derived integrated moisture index to predict forest composition and productivity of Ohio forests (U.S.A.). Landscape Ecology 12:331–348.

Jiménez-Valverde, A., Lobo, J.M., Hortal, J., 2008. Not as Good As They Seem: The İmportance of Concepts in Species Distribution Modelling. Diversity and Distributions, 14(6), 885-890.

McCune, B., & Keon, D., (2002). Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. Journal of Vegetation Science, 13(4), 603–606. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02087.x.

Moore, I. D., Grayson, RB., Landson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes, 5, 3–30.

Moore, I.D., Burch, G.J., 1986a. Physical basis of the lengthslope factor in the universal soil loss equation. Soil Sciences Society America Journal, 50, 1294–1298.

Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A., Peterson, G.A., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Science Society of America Journal, 57, 443–452.

Pike, R.J., Wilson, SE. (1971. Elevation relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area altitude analysis. Geological Society of America Bulletin, 82, 1079–1084.

Riley, S.J., Degloria, S. D., Elliot, R., 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. Intermountain Journal of Sciences, 5(1–4).

Roberts, D.W., Cooper, S.V., 1989. Concepts and techniques of vegetation mapping. In D. Ferguson, P. Morgan, P., Johnson, F.D., (Eds.), Land classifications based on vegetation: Applications for resource management (pp. 90–96). Ogden, UT: USDA Forest Service GTR INT-257.

Stage, A.R., 1976. An expression of the effects of aspect, slope, and habitat type on tree growth. Forest Science, 22(3), 457–460.

Weiss, A., 2001. Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA.

Wisz, M.S., Hijmans, R.J., Li J., Peterson, A.T., Graham, C.H., Guisan, A., 2008. Predicting Species Distributions Working Group. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. Divers. Distrib. 14: 763-773.

An Integrated Study on the Stress State of Afghanistan

Afganistan'ın Gerilme Durumu Üzerine Birleşik Bir Çalışma

Ö. Aydan[1], N. Malistani[2], N.Z. Nasiry[2], A.B. Jahed[4]

[1]Dept. of Civil Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, 903-0213, Okinawa, Japan
[2]Dept. of Civil Engineering, Kabul Polytechnic University, Kabul, Afghanistan
[3] Helmand Higher Education Institute, MoHE, Helmand, Afghanistan
[4]Dept. of Civil Engineering, Kandahar University, Kandahar, Afghanistan
*(*aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp)*

ABSTRACT: The stress state of Afghanistan is unknown and there are no in-situ measurements yet. However, the constructions of underground openings such as dams, tunnels and underground caverns require the information on the stress state for stability assessments. The first studies were conducted by the authors. In that study, the inferred stress state obtained from the focal mechanism solutions obtained for some earthquakes. The authors evaluate the stress state of Afghanistan using focal plane solutions of earthquakes occurred in Afghanistan and its close vicinity, the characteristics of major active faults and inferences of strain, stress rates from GPS measurements. In this paper, the authors summarize the findings from these studies and establish a basis for the stress state of Afghanistan for both engineering and scientific purposes.

Keywords: *Afghanistan, stress state, fault, focal mechanism solutions, GPS measurements.*

ÖZ: *Afganistanın gerilme durumu bilinmemekte ve yerinde gerilme ölçümleride bulunmamaktadır. Fakat son zamanlarda tünel, baraj ve yeraltı santralları inşası artmakta ve gelecekte bu tür inşaatları artma olasılığıda oldukça yüksektir. Dolayısıyla bu tür inşaatların duraylılık analizleri yerinde gerilme ile ilgili ölçümsel verileri gerekli kılmaktadır. Bu konuda mevcut Salang Tünelin durumu ile ilgili olarak yazarlar bazı değerlendirmeler yapmıştır. Bu değerlendirmelerde fay çizikleri ve deformasyon özellikleri, faylanma mekanizmasından yararlanılmaktadır. Bu çalışmada Afganistan ve yakın çevresinde oluşan büyük depremleri faylanma mekanizması ve mevcut ana fayların deformasyon özelliklerinden yararlanarak değerlendirmeler yapılmakta sonuçlar birbiriyle ile kaşılaştırılmaktadır. Bunun yanısıra GPS ölçümlerinden yapılan değerlendirmelerde sunulmakta ve elde edilen sonuçlar önceki sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Sonuç olarak böyle bir birleşik yaklaşımın Afganistanın gerilme durumuna açıklık getirdiği düşünülmeltedir.*
Anahtar Kelimeler: *Afganistan, gerilme ortamı, fay, faylanma mekanizması, GPS ölçümleri.*

1. INTRODUCTION

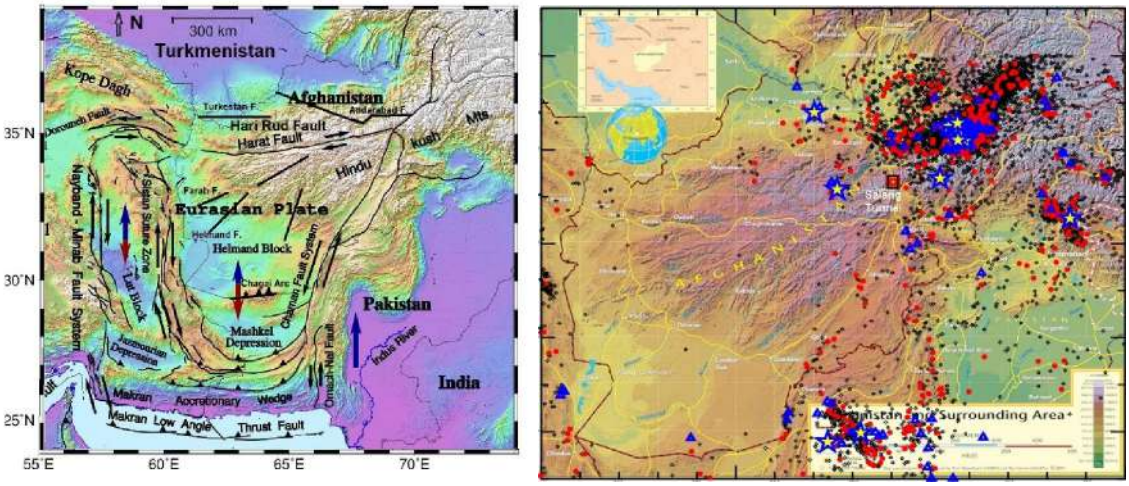
The invasion of Afghanistan by first Soviet Socialist Union (USSR) and later by USA and internal wars caused tremendous negative effects on Afghanistan and her people. As a result of these facts, the country and her people have been suffering too much. Nevertheless, the country is rich in mineral deposits and the country and her people deserve to have a better wealth and social living standards. Some infra structures and energy producing facilities have been constructed. If the country become stabilized, there is no doubt that there will be more and more construction of various structures such as, dams, tunnels, highway and railway bridges and underground power houses and storage facilities. Furthermore, the proper exploitation of minerals sources requires to implement appropriate mining techniques. All these structures require some information on the stress state of Afghanistan. The stress state of Afghanistan is unknown and there are no in-situ measurements yet.

The first studies on the stress state of Afghanistan were conducted by Malistani et al. (2016a, b) in relation to the assessment of the present condition of Salang Tunnel and the possibility of construction of new tunnels through Salang Pass. The stress state in the vicinity of the tunnel and including nearby Andarabad Fault inferred from the method of Aydan (Aydan, 2000a; Aydan and Kim 2002) using the focal mechanism solutions obtained for some earthquakes.

In this study, the authors attempt to evaluate the stress state of Afghanistan using focal plane solutions of earthquakes occurred in Afghanistan and her close vicinity, the characteristics of major active faults and inferences of strain, stress rates from GPS measurements. These results are presented and discussed. It is expected that these evaluations would establish a basis for the stress state of Afghanistan for both engineering and scientific purposes.

2. SEISMO-TECTONICS AND SEISMICITY

Afghanistan is in Eurasian orogenic belt, one of the seismically active belts in the world. Modern fault movements, deformations, and earthquakes in Afghanistan are driven by the northward subduction of Indian and Arabian plates beneath Eurasia plate (Figure 1a). The subduction of Arabian plate along Makran subduction zone and the intrusion of Indian plate into Eurasian plate resulted in some major tectonic structures in the region. The Chaman Fault System is said to be accommodating 200 km relative slip and caused some earthquakes greater than 7. The most recent event was 1935 Quetta earthquake. The subduction Arabian plate beneath Eurasian plate causes a relative slip between the Lut block in Iran and the Helmand/ Sistan block of Afghanistan, called Sistan Suture zone. The active faults within Afghanistan can be divided into 5 fault systems; namely, Chaman, Hari-rud (Herat) and Central Badakhshan fault systems and Helmand internal fault system and South Turkestan fault system. In the southeastern Afghanistan and adjacent Pakistan, the Chaman fault system accommodates much of the differential movements between the Indian and Eurasian plates. The fault system has a reported slip rate of 2-20mm/year and higher where it enters western Pakistan. The Indian plate has a 20-40mm/year velocity where it comes close to a 300-400km segment of Chaman fault between (31°N-33.5°N), suggesting that M>7.0 could occur at 200 years interval in this location. In central Afghanistan, the Hari Rud (Herat) fault having dextral sense extends from north of Kabul westward to Iran border with a slip rate of 2mm/year, but evidence for active faulting remain controversial. In northeast Afghanistan, Badakshan and Dawraz-Karakul faults extends into in Pamir and Hindu Kush Mountains. Further north next to Turkmenistan and Uzbekistan, there are some faults such as Turkestan fault, Andarabad fault. Figure 1b shows the seismic activity of Afghanistan and her close vicinity. As noted from Figure 1b, Hindukush region of Afghanistan is seismically very active as shown in Figure 1. The next seismically active regions are located along Chaman fault in east, Chagai Arc and Makran region in south and Sistan Suture Zone along Iran and Afghanistan Border in west. The north Afghanistan is also known to be very seismically active with earthquakes greater than M7.



(a) Tectonics (b) Recent seismicity

Figure 1. Tectonics (modified from Nemati, 2016) and the seismicity (from Malistani et al. 2016a,b) of Afghanistan.

3. IN-SITU STRESS MEASUREMENT AND EVALUATIONS

Aydan (2020) presented available approaches in Chapter 7 of his book on Rock Mechanics and Rock Engineering. There are many in-situ stress inference techniques classified into broadly direct or

indirect techniques (Amadei and Stephanson, 1997; Aydan 2013b, 2016, 2020). Direct techniques are generally costly and they are only utilized for some important structures. The direct techniques utilize boreholes and assume that the surrounding rock behave elastically. However, the acoustic emission (AE) method can be used as a direct stress measurement method as it is less costly and it can be performed under well-controlled conditions in laboratory once sampling is done.
Indirect stress inference techniques utilizing borehole breakouts, fault striations and earthquake focal mechanism solutions are also proposed and used (Zoback and Healy 1992; Angellier, 1984; Aydan 2000b; Aydan and Kim 2002). Recently a new stress inference technique utilizing damage zone around blastholes was proposed by Aydan (2013b; 2021) and it was applied to several sites in Japan and Turkey. Although it is difficult to obtain total stresses from GPS measurements, it may be possible to determine principal stress variations and their orientations in the tangential plane to the earth surface from the processing of GPS measurements as proposed by Aydan (2000b, 2013a) and Aydan et al. (2011). Furthermore, If the co-axiality condition between stress rate and total stress in the crust holds, it may be also possible to infer the orientation of maximum and minimum horizontal stresses in the crust. In this study, the method of Aydan (2000a, 2016, 2020) is utilized for inferences from faults and focal mechanism solutions. In addition, some evaluations based on GPS measurements (Aydan 2000b) and some comparisons have been done in the following sections.

4. STRESS INFERENCE FROM FAULTS AND FOCAL MECHANISM

Possible stress states in the crust associated with faulting were first discussed by Anderson (1951). This approach assumes that the crust is in plastic state and obeys to a Mohr-Coulomb type yield criterion. Aydan's method (Aydan 2000a) can uniquely obtain the full-stress components from a single fault, which cannot be obtained by any other available techniques in literature. This method utilizes the striations of the faults or other structural geological features (Figure 2). This method is also extended to study the stress state associated with past and current earthquakes using focal plane solutions. In order to eliminate the depth factor, the full-stress tensor components are obtained in a normalized manner by considering the overburden. The friction angle of the faults is generally assumed to be 30 degrees by considering the experimental data of Byerlee (1978) under very high normal stress conditions.

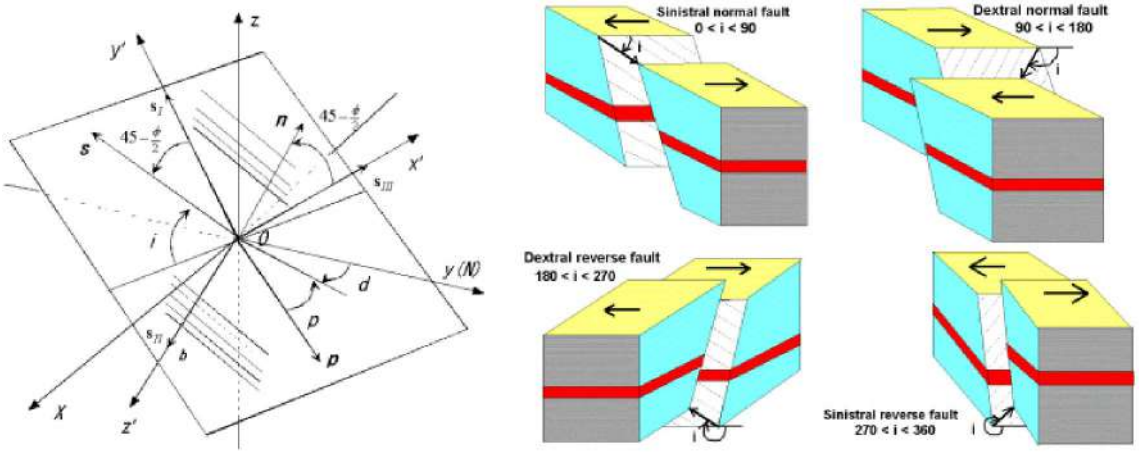
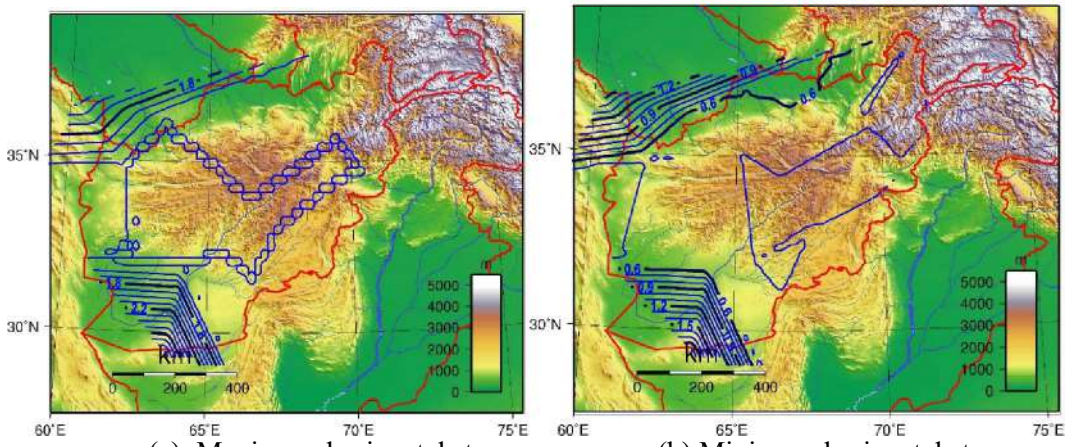


Figure 2. Illustrations for notation for fault striation method.

4.1. Stress Inferences from Fault Striations or Sense of Deformation

The data on the striations of major faults of Afghanistan are not available except a few locations due to security reasons during the site-explorations. There are several compilations of fault data. However, the dip direction and striation angles are mostly missing. The authors surveyed numerous publications on faults, geology, tectonics and GPS monitoring in Afghanistan as well as neighboring countries. A

data-base on the orientation and rake angle of faults is prepared and utilized in this study. In this study we show the contours of normalized maximum horizontal and minimum horizontal stresses by the vertical stress in Figure 3. The maximum horizontal stress ratio was up to 3 times and the minimum horizontal stress ratio 0.48. The stress state is influenced by strike-slip faulting except those by thrust faulting in Hindu-Kush Mountains and Makran subduction zone.



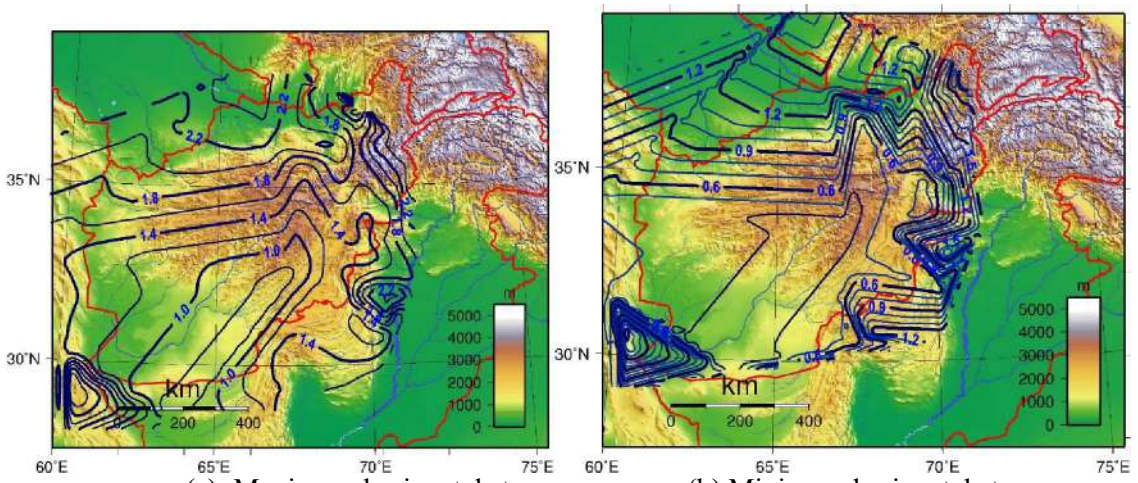
(a) Maximum horizontal stress (b) Minimum horizontal stress

Figure 3. Contours of maximum and minimum horizontal stress ratios normalized by vertical stress inferred from the characteristics of faults using Aydan's method.

4.2. Stress Inferences from Focal Mechanism of Earthquakes

There are some studies on the stress direction of Afghanistan utilizing the data-base of World-stress mapping project (Heidbach et al. 2016) The compiled direction of p-axis solutions of earthquakes were NS in Makran subduction zone and another subduction zone in Tajikistan. The p-axis solutions along Chaman fault and Suleiman Mountain area is NW-SE while it is NE-SW direction in the close vicinity of Sistan Sture Zone in Eastern Iran. The p-axis direction in Hindu-Kush Mountain range is generally NW-SE, implying that maximum horizontal stress acts perpendicular the axis of the mountain range. Malistani et al. (2016a,b) studied the stress state in the close vicinity of Salang Tunnel and the stress state was obtained from the method of Aydan (Aydan, 2000; Aydan and Kim 2002) using the focal mechanism solution obtained by Abers et al. (1988) for the earthquake with a magnitude of 6.6 on June 24, 1972. The solutions indicated that maximum and minimum horizontal stresses normalized by vertical stress were 1.232 and 1.093, respectively. This stress state was very favorable for tunnels as the stress state is close to hydrostatic in-situ stress state.

This technique is also utilized in this study and the focal plane solutions of earthquakes since 1976 were utilized. The data-base belongs to Harvard University CMT project (Dziewonski et al. 1991; Ekström et al. 2012). The major issue is how to select the appropriate fault plane from the solutions. Utmost care was taken to select the appropriate fault plane on the bases of the tectonics and previously published fault maps. When there were too many earthquakes (e.g. Hindu-Kush Mountains and Suleiman Mountain Range) the number of events reduced by giving an emphasis to the magnitude of the event. Figure 4 shows the contours of normalized maximum horizontal and minimum horizontal stresses by the vertical stress. The maximum horizontal stress ratio was up to 2.8 times and the minimum horizontal stress ratio 0.34. The stress state is influenced by strike-slip faulting except those by thrust faulting in Hindu-Kush Mountains and Makran subduction zone. Despite some differences, the results are close to those obtained from faults.

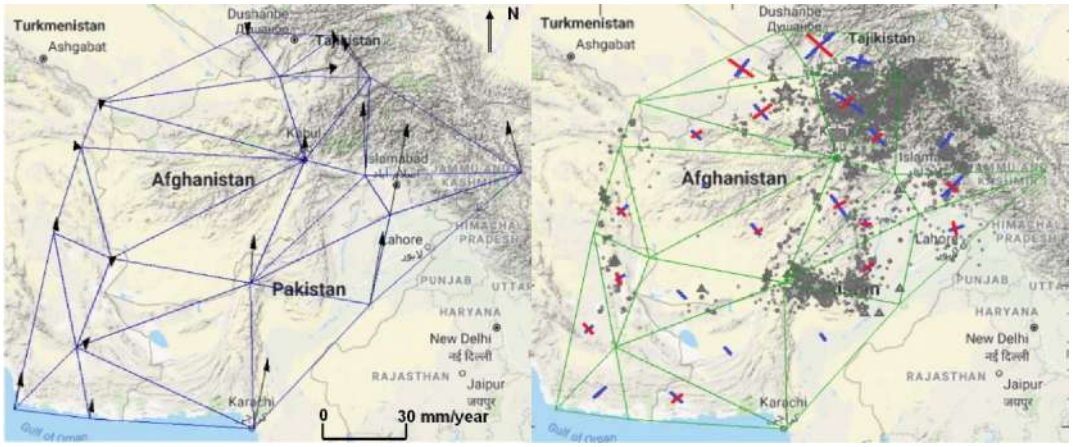


(a) Maximum horizontal stress (b) Minimum horizontal stress

Figure 4. Contours of maximum and minimum horizontal stress ratios normalized by vertical stress inferred from the focal mechanism solutions using Aydan's method.

5. STRESS INFERENCE BASED ON GPS MEASUREMENTS

It is geometrically possible to compute strain rate components on a plane tangential to the earth's surface from the variation of positions of stations at a given time interval (Aydan 2000b, 2003, 2013a, 2016). This method utilizes a procedure used in the finite element method. Compared other countries, Afghanistan has only single GPS station located in Kabul. Aydan (2000, 2013a, 2016) showed that crustal strains and stresses can be evaluated and they may related to seismicity of the region. Nevertheless, the available data of GPS stations in Kabul and other GPS stations in the neighbouring countries have been utilized by Nasiry (2020) to evaluate the crustal defromation and straining in Afghanistan and its closed vicinity and annual crustal velocity and computed principal stress variation and orientations. The details of the anaylses and results can be found in the doctorate thesis of Nasiry (2020). Figure 5(a) shows the annual deformation rate of in Afghnaistan and neighboring countries while Figure 5(b) shows the amplitude and orientation of pincipal stress rates. As the vertical component of stress tensor rate can not be obtained from GPS measurements, these principals stress rate components correspond to the maximum and minimum horizontal stress rate components. As seeen from the Figure, Afghanistan is compressed in NE-SW direction and tends to rotate clock-wise. Furthermore, stress rate components are larger in the Northern Afghanistan and Makran subduction zone as exptected. The principal stress rate along the Chaman Fault, Sistan Suture Zone and Hindu-Kush Mountain range remain while it is NE-SW in the border region with Tajikistan.

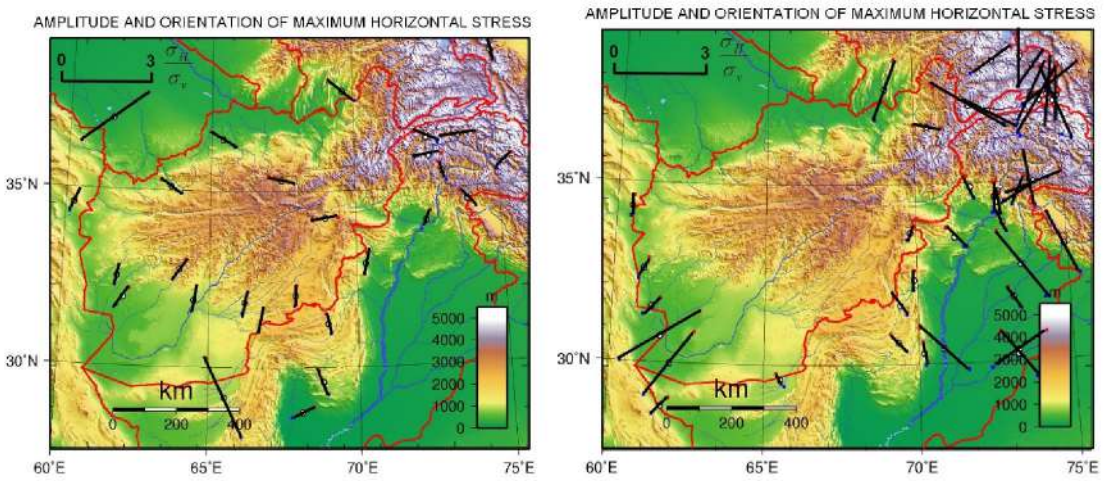


(a) Crustal annual velocity (b) Computed principal stress rates

Figure 5. Crustal deformation and computed principal stress rates (from Nasiry 2020).

6. COMPARISONS AND DISCUSSIONS

In this section, we compare the orientation and amplitude of maximum horizontal stress normalized by vertical stress. Results obtained for active faults and focal mechanism solutions are shown in Figure 6. As said in Section 4, the maximum lateral stress ratio ranges between 1.3 and 3. As noted from the figures, the lateral stress coefficient are higher in the close vicinity of the subduction zones of major subduction zones, namely Makran and Hindu-kush subduction zones. From the figure, one can infer that the lateral stresses are quite high in Northern Afghanistan, while it would be smaller in the central Afghanistan. Furthermore, these results obtained from faults and focal mechanism solutions show similar tendency. These results are similar to those obtained for Turkey and Japan previously (Aydan 2003, 2013a, 2016). When the results shown in Figure 5 are compared with those shown in Figure 4 obtained from GPS measurements, the results resemble to each other if the co-axiality of the total and incremental stress holds. These results also clearly emphasize that a comparative in-situ stress evaluations using inferences from fault planes, focal mechanism solutions and GPS based incremental stress rates could be quite useful for countries having almost no in-situ measurements as well as cross-checking the in-situ stress measurements which are commonly carried out.



(a)Inferences from faults (b) Inferences from focal mechanism solutions

Figure 6. Inferred orientations and amplitude of maximum horizontal stress normalized by vertical stress using the data from faults and focal mechanism solutions and Aydan's method.

7. CONCLUSIONS

In this article, the crustal stresses are inferred from faults with known characteristics and focal plane solutions of Afghanistan using a method proposed by Aydan (2000a,b). This also implies that the method used in this study could be a powerful technique for geo-engineers and geo-scientists for inferring crustal stresses. The inferred stress states are consistent with each other and they show similar trends reported by Aydan (2003, 2013, 2016) for Japan and Turkey.

The computed results indicated that the maximum lateral stress ratio ranges between 1.3 and 3 while the minimum lateral stress coefficients range between 0.34 and 2.05. It seems that lateral stress coefficients are higher in the close vicinity of the subduction zones in the close vicinity of Afghanistan. Furthermore, the lateral stresses are quite high in Northern Afghanistan.

These results also clearly emphasize that a comparative in-situ stress evaluations using inferences from fault planes, focal mechanism solutions and GPS based incremental stress rates could be quite useful for countries having almost no in-situ measurements as well as cross-checking the in-situ stress measurements which are commonly carried out.

8. REFERENCES

Abers, G, Bryan, C., Roecker, S., McCaffrey, R. 1988. Thrusting of the Hindu Kush over the Southeastern Tadjik Basin, Afghanistan: Evidence from two large earthquakes. Tectonics, 7(1), 41-56.

Amadei, B. and Stephanson, O., 1997. Rock Stress and Its Measurement, Chapman & Hall.

Anderson, E.M., 1951). Dynamics of Faulting. Oliver & Boyd, Edinburgh.

Angellier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets, *J. Geophys. Res.,* 89(B7), 5834-5848.

Aydan, Ö., 2000a. A stress inference method based on structural geological features for the full-stress components in the earth's crust, Yerbilimleri, No. 22, 223-236.

Aydan, Ö., 2000b. A stress inference method based on GPS measurements for the directions and rate of stresses in the earth' crust and their variation with time. Yerbilimleri, 22, 21-32.

Aydan, Ö., 2003. The Inference of crustal stresses in Japan with a particular emphasis on Tokai region. Int. Symp. on Rock Stress, Kumamoto, 343-348.

Aydan, Ö., 2013a. Inference of Contemporary Crustal Stresses from Recent Large Earthquakes and Its Comparison with Other Direct and Indirect Methods. 6th International Symposium on In Situ Rock Stress (RS2013), Sendai, Paper No. 1051, 420-427.

Aydan, Ö., 2013b. In-situ Stress Inference from Damage around Blasted Holes. Journal of Geo-system Engineering, Taylor and Francis, 16:1, 83-91.

Aydan, Ö., 2016. An integrated approach for the evaluation of measurements and inferences of in-situ stresses. RS2016 Symposium, 7th Int. Symp. on In-situ Rock Stress, Tampere, 38-57.

Aydan, Ö., 2020. Chapter 7: In-situ stress estimation, measurement and inferences. in Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 1, Fundamentals. CRC Press 379p.

Aydan, Ö., 2021. Continuum and computational mechanics for geomechanical engineers, ISRM Book Series No 7, CRC Press, 324p.

Aydan, Ö. and Kim, Y. 2002. The inference of crustal stresses and possible earthquake faulting mechanism in Shizuoka Prefecture from the striations of faults. J. of the School of Marine Sci. and Techn., Tokai University, No.54, 21-35.

Aydan, Ö., Ohta, Y., Daido, M., Kumsar, H. Genis, M., Tokashiki, N., Ito, T., and Amini, M. 2011. Chapter 15: Earthquakes as a rock dynamic problem and their effects on rock engineering structures. Advances in Rock Dynamics and Applications, Editors Y. Zhou and J. Zhao, CRC Press, Taylor and Francis Group, 341-422.

Byerlee, J.,1978. Friction of rocks. *Pure Appl. Geophys*., 116, 615-626.

Dziewonski, A. M., Chou, T.-A. and Woodhouse, J. H., 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys. Res., 86, 2825-2852, doi:10.1029/JB086iB04p02825

Ekström, G., Nettles, M., andDziewonski, A. M. , 2012, The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., 200-201, 1-9. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002.

Heidbach, O., M. Rajabi, K. Reiter, M. Ziegler, and the WSM Team, 2016. World Stress Map Database Release 2016, *GFZ Data Services*,

Malistani, N., Aydan, Ö., and J. Tomiyama, J., 2016a. Preliminary Rock Engineering Assessment of Salang Tunnels (Afghanistan). EUROCK2016, Ürgüp, 763-769.

Malistani, N., and Aydan , Ö., 2016b. Preliminary Rock Engineering Assessment of the Planned Salang Tunnel (Afghanistan). ARMS2016, Bali.

Nasiry, N.Z., 2020. A fundamental study on the seismic risk and seismic vulnerability of common buildings in Afghanistan. Doctoral Thesis of Engineering, University of the Ryukyus Graduate School of Science and Engineering, 154p.

Nemati, M., 2018. Seismotectonic and seismicity of Makran, a bimodal subduction zone, SE Iran**.** Journal of Asian Earth Sciences 169, 139-161.

Zoback M.D. ve Healy, J.H., 1992. In-situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass scientific Research Borehole: implications for the mechanics of crustal faulting. *J. Geophys. Res.*, 97, 5039-5057.

Characteristics of Tsunami Caused by the 2020 October 30 Kuşadası Bay Earthquake and Some Thoughts

30 Ekim 2020 Kuşadası Körfezi Depremi'nin Neden Olduğu Tsunami Olgusunun Özellikleri ve Bazı Düşünceler

Ö. Aydan[1,*], H. Kumsar[2], B. Semiz[2]

[1]Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, 903-0213, Okinawa, Japan
[2]Dept. of Geological Engineering, Pamukkale University, Denizli, Turkey
*(*aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp)*

ABSTRACT: An earthquake with a moment magnitude of 6.9 occurred in Kuşadası Bay and it has caused a tsunami, which also resulted in some structural damage along the shore of Kuşadası Bay. The tsunami-induced damage was quite heavy particularly in Sığacık Bay and its close vicinity. The tsunami events are, historically, known but their structural damages are quite rare. Tsunamis are often associated with normal or thrust faulting as it was the case in the 2020 Kuşadası Bay Earthquake. However, undersea slope failures may also induce tsunamis as it was observed in Değirmendere district during the 1999 Kocaeli Earthquake. In this study, the characteristics of the tsunami induced by the 2020 Kuşadası Bay Earthquake are described and observations on run-up height are compared with some empirical relations developed for Turkey. Furthermore, some estimations for arrival times at various locations were compared with observations. Although the tsunami was a small scale one, its importance and engineering implications are discussed.

Keywords: Tsunami, arrival time, runup height, Kuşadası Bay, earthquake.

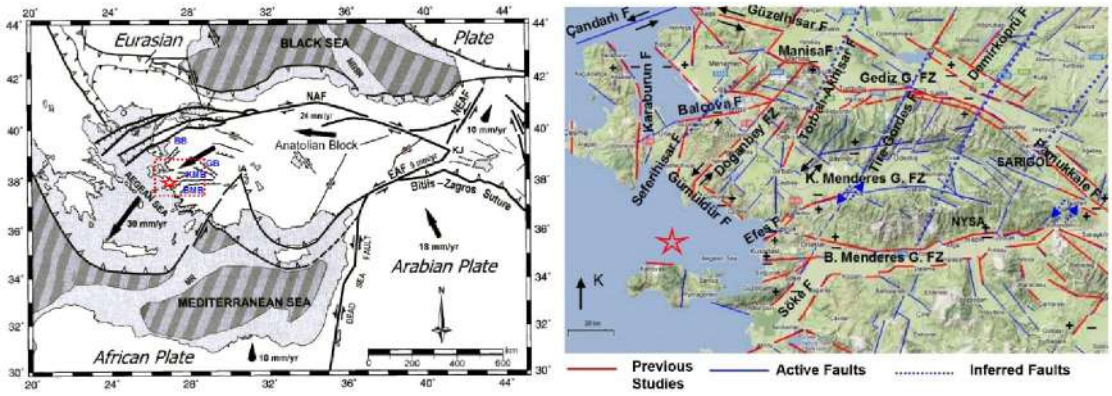
ÖZ: *Kuşadası Körfezi'nde moment büyüklüğü 6.9 olan bir deprem meydana gelmiş ve bu deprem sonucu Kuşadası Körfezi kıyılarında tsunami ve tsunamiye bağlı hasarlar gözlenmiştir. Tsunami özellikle Sığacık Körfezi ve yakın çevresinde ağır hasarlara neden olmuştur. Bölgede tsunaminin varlığı bilinmesine karşın hasar verici özellikleri oldukça nadirdir. Tsunami olgusu genellikle normal veya bindirme (ters) faylanma sonucu meydana gelmekte olup Kuşadası Körfezi'nde bu depremde meydana gelen tsunami normal faylanma sonucudur. Fakat 1999 Kocaeli Depremi'nde olduğu gibi deniz tabanında oluşan şev duraysızlıkları da tsunamiye neden olabilmektedir. Bu çalışmada Kuşadası Körfezi Depremi sonucu oluşan tsunami olgusunun özellikleri ve yapılan gözlemler sunulmaktadır. Bunun yanı sıra Türkiye ve yakın çevresi için geliştirilmiş görgül ilişkilerle ve tsunami varış zamanları da belirlenip gözlemlerle karşılaştırılmaktadır.*

Anahtar Kelimeler: *Tsunami, varış zamanı, tsunami yüksekliği, Kuşadası Körfezi, deprem.*

1. INTRODUCTION

Turkey is one of the most seismically active countries on Earth and the earthquake occurred in Kuşadası Bay on October 20, 2020 within the West Anadolu Fault System (WAFS) (Aydan, 1997; Aydan & Kumsar, 2015). Figure 1 illustrates the location of the earthquake within the general tectonic frame of Turkey. The moment magnitude of the earthquake was 6.9. The earthquake mechanism of the earthquake was reported to be due to a normal fault, which probably extends to Efes and Kuşadası and it may be viewed as a westward extension of Küçük Menderes Graben in the Kuşadası Bay.

Figure 2 shows the seismic activity during the period of the first 48 hours. As inferred from the figure, the earthquake fault activated another normal fault conjugate the seismic activity takes place within a graben associated with the normal displacement in the central part and horst-like upward movements in the north (Seferihisar) and south (Didim and Sisam) of the Kuşadası Bay.



(a) (b)

Figure 1: The epicenter of the earthquake within the (a) global (Ulusay & Aydan, 2005) and (b) regional tectonics of Turkey (Aydan & Kumsar, 2015).

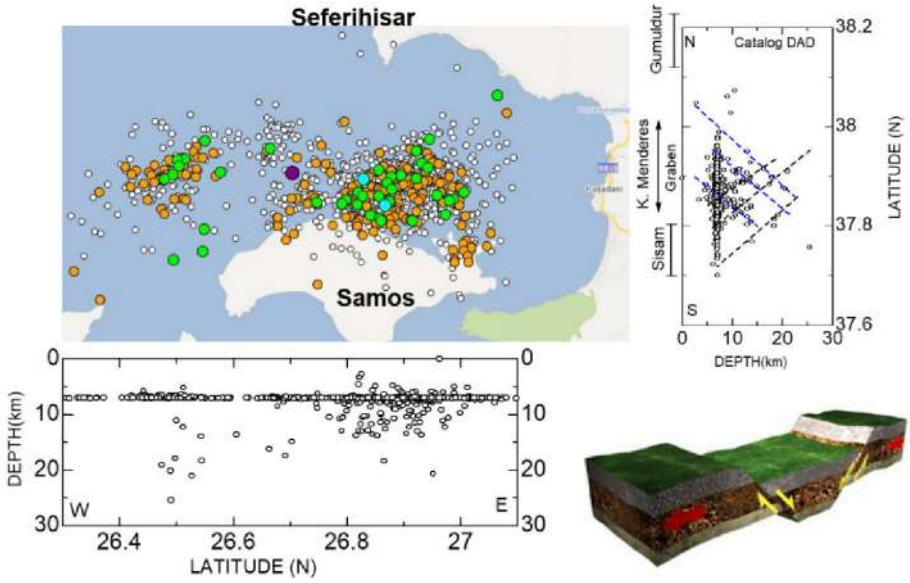


Figure 2: The projection of the seismicity during the first 48 hours (data from AFAD, 2020).

In this study, the authors describe the characteristics of the tsunami induced by the 2020 Kuşadası Bay earthquake and observations on run-up height and their comparisons with some empirical relations developed for Turkey. Some estimations for arrival times at various locations were done and compared with observations. Although the tsunami was a small scale one, its importance and engineering implications are discussed.

2. MAIN CHARACTERISTIC OF THE EARTHQUAKE

The earthquake occurred at 14:51:24 TST (11:51:24 GMT) on October 20, 2020. Table 1 gives the major parameters of the earthquake together with those inferred from Efes fault and aftershock distributions. The focal plane solutions indicated that EW striking fault was activated. Fault dip was between 46-55 degree depending upon the institute, which is also confirmed by the aftershock distribution. Furthermore, the conjugate fault has also similar dip. In other words, the region bounded by the main and auxiliary faults subsides and the region in north and south are expected to be uplifted due to stress releases and extension of the graben. The faulting is almost due to normal faulting with very slight dextral or sinistral component. It should be noted that no outcrop faulting on land was observed. The estimated slip of the normal fault differs depending upon the institute. Using the Aydan's empirical relations (Aydan, 2012), the relative slip was estimated to be 129 cm while USGS

estimated as 441 cm. Utkucu et al. (2020) estimated the maximum slip as 1.9 m (190 cm) and the rupture duration was about 17s. These results are quite close to those estimated by using the empirical relations of Aydan (2012).

Table 1. Main parameters of the earthquake

Fault / Institute	Length (km)	Parameters			M_w	Umax (cm)	Vmax (cm/s)	Amax (gal)	Td (s)
		d	*p*	*i*					
This study*	39.5	10	50	80	6.9	129	19	269	15
Kocaeli Univ.	40	0	37	80	6.9	270			20
KOERI		2	55	93	6.9		15	255	
AFAD	30	0	46	91	6.9				
USGS	40	6	29	88	7.0	441	20	211	16.8

*Efes Fault & seismicity

3. MECHANISM OF TSUNAMI AND ESTIMATION OF TSUNAMI ARRIVAL TIME

3.1 Mechanism of Tsunamis

Tsunami is a Japanese word and it simply means the wave at a harbor or "harbor wave". It has become well-accepted terminology worldwide now. The loss of more than 200,000 people along the shores of Indian Ocean by the 2004 Aceh (Off-Sumatra) earthquake is one of well-remembered tsunami event in this century together with the tsunami induced by the 1964 Chile earthquake. The well-accepted causes of tsunami are earthquake faulting, land/submarine slope failure, sub-marine volcanic eruption/collapse and meteorite impact as illustrated in Figure 3. Tsunamis occur when an earthquake faulting occur beneath sea. The fault should have a vertical component, which may be normal or thrust type movement. Pure strike-slip faulting does not cause any tsunami unless the faulting occurs beneath the closed water bodies such as lakes or in-lets. Such examples of small-scale tsunamis occurred during the 1999 Kocaeli earthquake at the eastern end of the Izmit Bay (Aydan et al. 2000). When a tsunami is caused by normal faulting, the sea will recede first and then surge waves would appear after a certain period depending upon the sea-bed topography and the amplitude of vertical movement. As for thrust type faulting, the surge waves would appear. Large tsunamis are generally caused in the close vicinity of subduction zones.

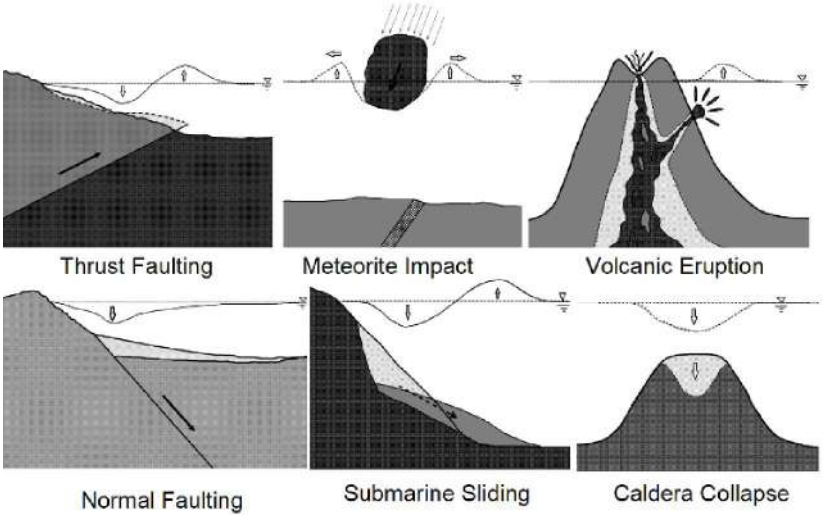


Figure 3. Illustrations of causes of tsunami occurrence.

The fundamental equations of tsunamis are based on the mass conservation law and the equation of motion. It is very common that the fluid obeys the Navier-Stokes type constitutive law (e.g. Aydan, 2021; 2022). The fundamental equations of tsunamis are derived while some assumptions are introduced to simplify the physical conditions associated with tsunamis. The waves are assumed to be obeying long wave or shallow water theory. In other words, the three-dimensional problem is simplified to two-dimensional depth-averaged equations to simulate the tsunami wave propagation and inundation. The major assumption is that the motion in vertical direction is negligible so that the pressure distribution in vertical direction is simply expressed as a function of depth with the consideration of sea surface displacement. The resulting equations are integrated to obtain the long-wave (shallow water) equations using the Leibniz rule of integration. Through linearization of higher order terms and neglecting Eddy viscosity effects, the final equations of tsunami are presented in a publication by Imamura et al. (2006). However, it should be noted that the behavior of tsunami in the close vicinity of shores and during inundation become quite non-linear and complicated.

3.2 Estimation of Tsunami Arrival Time

Tsunami wave velocity in shallow waters is given in the following form:

$$v = \sqrt{gh} \tag{1}$$

Where g and h are gravitational acceleration and sea depth, respectively. Tsunami arrival time may be obtained from the integration of the following relation as a function of seabed topography

$$T = \int_0^{\ell} \frac{1}{v(x)} dx \tag{2}$$

For integration, seabed topography data would be necessary and the integration can be carried out using numerical integration techniques. Regarding tsunami arrival estimation at Sığacık, seabed topography shown in Figure 4 is used and digitized. Figure 5 shows an example of computation for the October 20, 2020 Kuşadası Bay earthquake along the coast of Sığacık and the epicenter. The computation indicates that the first sea surface disturbance should have occurred 7.8 minutes after the earthquake. However, this situation may be quite difficult to observe when sea water retreats in a small event such as this earthquake. However, observations by locals stated that 20 minutes after the earthquake sea retreated and surge waves appeared about 4 minutes later. Some video images indicated that inundation started at the shore about 15:15:36 TST, implying the time interval was 27 minutes for the major tsunami wave (Figure 6). A more detailed tsunami simulation was carried out at Middle East Technical University (METU-ODTÜ) by the group of Prof. A.C. Yalçıner and the tsunami arrival was about 9 minutes 50 second for Sığacık Bay, which is quite close to the one obtained from Eq. (2).

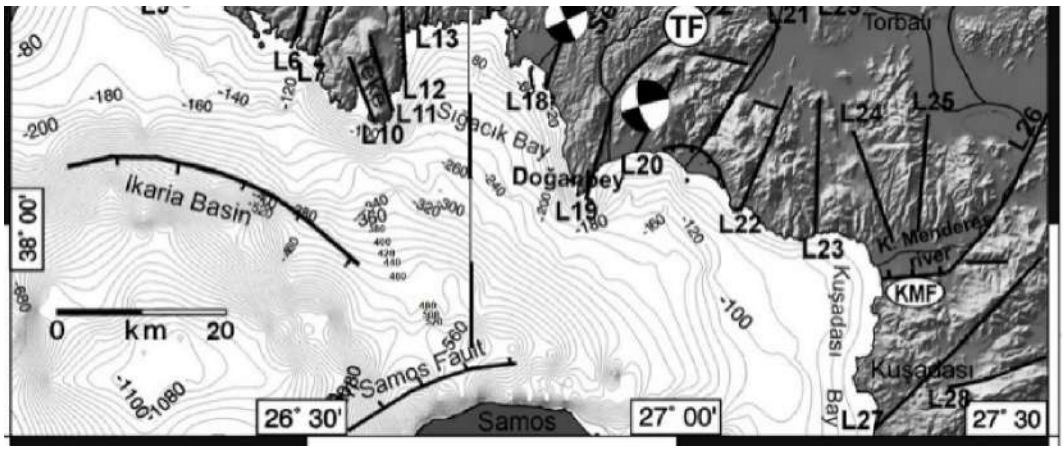


Figure 4. Seabed topography in the epicentral area.

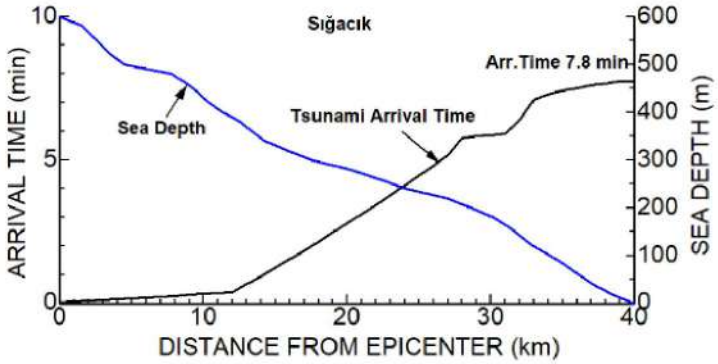


Figure 5. Seabed profile and estimated tsunami arrival time.

Figure 6: Video images of tsunami arrival in Sığacık (Anadolu Ajansı, 2020).

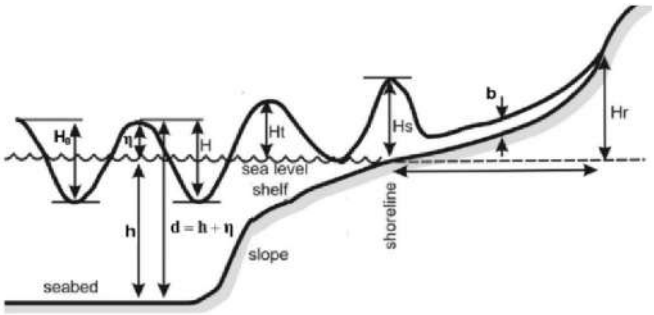


Figure 7: Illustrations of tsunami heights (modified from Alpar et al. 2003)

3.3 Inference of Tsunamis Heights

Tsunami may sometimes cause tremendous damage as observed during 2004 Aceh earthquake. Any tsunami warning system would involve the estimation of the hypocenter, magnitude of earthquake, faulting mechanism and seabed deformation. Generally, normal or thrust faulting may cause tsunami depending upon the amount of uplift or subsidence and seabed topography. Except closed basins and lakes, the strike-slip faults do not generate tsunami unless they result in submarine landslide as often observed in the earthquakes of Marmara Sea in Turkey (Aydan et al., 1999). Before any discussion, first, the tsunami height must be defined. Figure 7 illustrates some definitions. The parameters shown in Figure 7 may be defined as

H_o : Original tsunami height at the source area and it is directly associated with the vertical deformation of seabed due to faulting. If the sea depth is greater than 4000 m, this value remains the same. Otherwise, it will differ during the propagation.

H_t : Shelf tsunami height. This height would change as tsunami propagates.

H_s : Tsunami height at shore-line. This is the most important parameter for tsunami-proof design.

H_r : Tsunami run-up height. The mass-media often quotes this value and its value would depend upon the topography of inundation area.

Iida (1963) and Abe (1979) proposed some empirical relations for estimating tsunami wave height at the shoreline and run-up. Iida's formula is given in the following form

$$M = 0.383\log_2 H + 7.065 \tag{3}$$

Abe (1979) proposed two relations between tsunami magnitude (M_t) (roughly equivalent to moment magnitude (M_W)) tsunami wave height (H_m) at the shoreline for near-field earthquakes.

$$M_t \approx M_w = 2\log_{10} H_m + 6.6 \tag{4}$$

As for far field earthquakes, H_m is replaced wave height (H_{tide}) at tidal gauge and he proposed the following equation

$$M_t \approx M_w = \log_{10} H_{tide} + \log_{10} X + 5.5 \tag{5}$$

Abe (1979) also proposed that maximum run-up height of the tsunami could be taken twice that at the shoreline

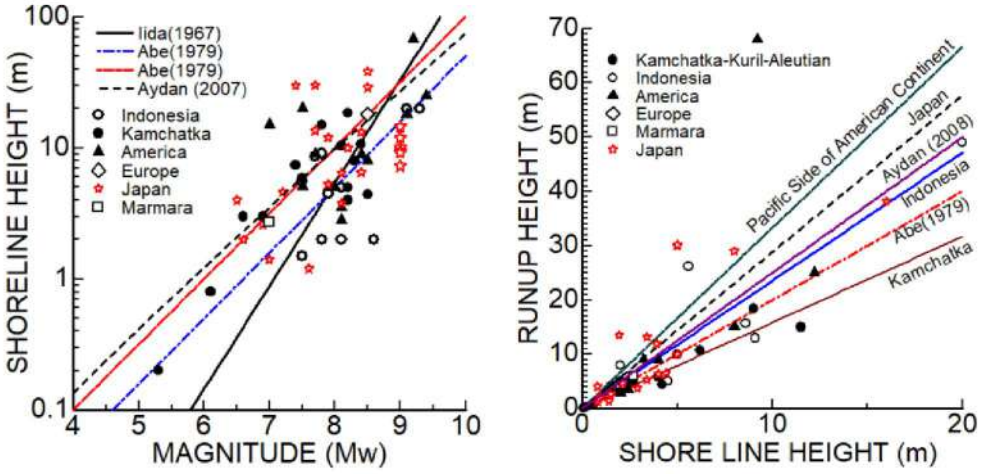
$$H_r = 2H_m \tag{6}$$

The author (Aydan, 2008) recently compiled available data on run-up heights and shoreline height of tsunamis occurred in Indonesia and neighboring areas. These data are plotted in Figure 8 together with the following empirical relations for shoreline height and run-up heights of tsunamis:

$$H_s = A\, M_w \exp(bM_w) \tag{7a}$$

$$H_r = B\, H_s \tag{7b}$$

Where *A, b* and *B* are constants. In this paper, H_m is replaced by H_s. Aydan (2008, 2015) provided some specific values for the constants of equations above. Particularly, the data of Indonesia and Japan show similar trend to tsunami data from Turkey despite the Turkish tsunami data is scarce.



(a) (b)

Figure 8. Comparison of empirical relations with observations; (a) Magnitude versus tsunami shore-line height, (b) Shore-line height vs run-up height.

4. TSUNAMI OBSERVATIONS

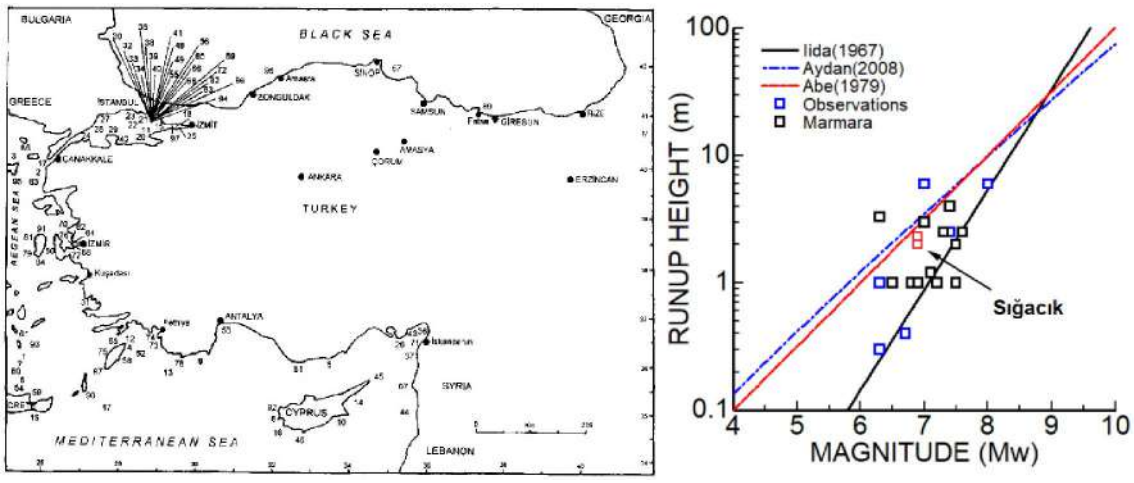
The reconnaissance team visited the shore line from Sığacık to Kuşadası (Kumsar et al., 2020) and surveyed the tsunami-affected area (Figure 9). The most devastating damage occurred in Sığacık Bay and Alaçatı at the northern side of the Kuşadası Bay (see Doğan et al. 2021; Aksoy 2021) for further information). Tsunami damage appeared in different forms. While some ships and light structures were carried out from the locations to far away distances by buoyant forces, the stationary structures were damaged by hydrodynamic (drag) force, hydrostatic force, surge force and impact forces. However, it should be noted that these forces do not act on the structure, simultaneously.

(a) (b) (c)

Figure 9. (a) Retreating sea at Didim (picture by Nazlı T. Özcan, HU on Oct. 20, 2020), (b,c) are some of damages and traces of tsunami at Sığacık Bay.

5. TSUNAMI OCCURENCE IN THE VICINITY OF TURKEY AND COMPARISONS

Altinok and Ersoy (2000) compiled tsunami data along Turkish coast and their results are shown in Figure 10(a). They provide some qualitative descriptions and some data on the tsunami run-up height and no information are given for the tsunami shoreline height, which is the most fundamental parameter for tsunami-resistant design of structures. Figure 10(b) compares tsunami run-up height data observed in Kuşadası Bay earthquake with the data of other earthquakes along the shores of Turkey and Marmara Sea. The data from this earthquake are quite close to the data from the previous earthquakes and empirical relations by Aydan (2008).



(a) (b)

Figure 10. (a) Locations of tsunami along Turkish Coast (from Altınok & Ersoy, 2000), (b) comparison of tsunami run-up height data observed in Kuşadası Bay earthquake with the data of other recent earthquakes.

6. CONCLUSIONS

The authors described the tsunami caused by the October 20, 2020 Kuşadası Bay earthquake and associated damage. The consideration on tsunami phenomenon in Turkey is almost none. Nevertheless, some earthquakes in Marmara Sea, Black Sea, Mediterranean Sea and Adalar (Aegean) Sea did resulted in tsunami and some damage in the past. The recent tsunamis caused by the 1999 Kocaeli, 2017 Gökova Bay and 2002 Kuşadası Bay earthquakes, which are small in scale, clearly showed that some consideration should be given to this issue and tsunami-resistant design should be implemented along important structures along the Turkish cost. In addition, a more detailed quantitative documentation of tsunami events along the Turkish coast and neighboring regions and seas are felt to be necessary.

7. REFERENCES

Abe, K., 1979. Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data. J. Geophys. Res., 84 (B4), 1561-1568.

AFAD (Disaster and Emergency Management Presidency), 2020. 30 Ekim 2020 Ege Denizi, Seferihisar (İzmir) Açıkları (17,26 Km) Mw=6.6 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu.

Aksoy, M.E., 2021 Post-event field observations in the İzmir–Sığacık village for the tsunami of the 30 October 2020 Samos (Greece) M_w 6.9 earthquake. *Acta Geophys.* **69,** 1113–1125.

Altinok, Y. and Ersoy, S., 2000. Tsunamis Observed on and Near the Turkish Coast. Natural Hazards 21: 185–205, Kluwer.

Alpar, B. , Altınok, Y., , Gazioğlu, C. & Yücel, Z.Y., 2003. Tsunami Hazard Assessment in İstanbul. Turkish J. Marine Sciences 9(1): 3-29.

Aydan, Ö., 2008. Seismic and Tsunami Hazard Potentials in Indonesia with a special emphasis on Sumatra Island. Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, 6(3), 19-38.

Aydan, Ö., 2012. Ground motions and deformations associated with earthquake faulting and their effects on the safety of engineering structures. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, R. Meyers (Ed.), 3233-3253.

Aydan, Ö., 2015. A critical testing of the applicability of some empirical relations used in the science and engineering of earthquakes through the 2011 Great East Japan earthquake. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Volume 74 Number 4, 1243-1254,

Aydan, Ö., 2021. Continuum and computational mechanics for geomechanical engineers, ISRM Book Series No 7, CRC Press, 324p.

Aydan, Ö., 2022. Chapter 9, Earthquake Science and Engineering. CRC Press (in Press) 483p.

Aydan Ö. & Kumsar, H., 2015. Assessment of the earthquake potential of the west Aegean region of Turkey based on seismicity, tectonics, crustal deformation and geo-archaeological evidence and its geotechnical aspects, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74:1037-1035.

Aydan, Ö., Ulusay, R., Hasgür, Z., & Taşkın, B., 1999. A site investigation of Kocaeli Earthquake of August 17, 1999. Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 08-49, 180p.

Dogan, G., G., Yalciner, A.C., Yuksel, Y., Ulutas, E., Polat, O., Guler, I., Sahin, C., Tarih, A., & Kanoglu, U., 2021. The 30 October 2020 Aegean Sea Tsunami: Post-Event Field Survey Along Turkish Coast/ https://doi.org/10.1007/s00024-021-02693-3.

Iida, K., 1963. Magnitude, energy and generation mechanisms of tsunamis and a catalogue of earthquakes associated with tsunamis. Proceedings of Tsunami Meetings Associated with the Tenth Pacific Science Congress, pp.7-18, Int. Union of Geod.and Geophys.,Paris, 1963.

Imamura, F., Hashi, K., & Imteaz, M. A., 2001. Modeling for tsunamis generated by landsliding and debris flow, in: Tsunami Research at the End of a Critical Decade, edited by Hebenstreit, G. T., Kluwer Academic Publishers, 209–228.

KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute), 2020. 30 Ekim 2020 Ege Denizi Depremi Basın Bülteni, 8 sf.

Kumsar, H., Aydan, Ö., & Semiz, B., 2020. 30 Ekim 2020 İzmir Seferihisar Depreminin Mühendislik Değerlendirmesi. Yer Mühendisliği, No. 15, 42-51.

Ulusay, R., & Aydan, Ö., 2005. Characteristics and geo-engineering aspects of the 2003 Bingöl (Turkey) earthquake. J. Geodynamics of Europe, 334-346.

Utkucu, M., Budakoğlu, E., & Doğan, E., 2020. 30 Ekim 2020 Kuşadası Körfezi Depremi Bilgi Notu, 8p, SAÜ Afet Yönetim Uygulama ve Araştırma Merkezi.

Wave Propagation and Vibration Characteristics in/Above Karstic Caves

Karstik Mağaralarda ve Üzerinde Sarsıntı Özellikleri ve Dalga Yayılımı

H. Inoue[1,*], Ö. Aydan[2], T. Ito[2], N. Tokashiki[2]

[1] Nanjyou Consultant Co. Haebaru, Okinawa, Japan
[2]Dept. of Civil Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, 903-0213, Okinawa, Japan
*(*h-inoue@nanjyou.co.jp)*

ABSTRACT: Ryukyu limestone formation is widely distributed over the Ryukyu Archipelago. There are many karstic caves associated with faulting. The authors have been involved with the stability issues of these caves. Furthermore, roads pass over some of these caves. This study is concerned with wave propagation in and above these caves due to the passage of vehicles as well as their responses during earthquakes. The authors installed some accelerometers in and ground surface at Abuchiragama cave in Itoman City karstic cave and did some micro-tremor measurements. Measurements were carried out in and above the Nunumachigama in Yaese town. The authors describe the characteristics of some data obtained during natural and man-made vibrations as well as earthquake induced vibrations and discuss their implications in rock engineering practice.

Keywords: *Abuchiragama, Nunumachigama, vibration, micro-tremor, earthquake, frequency.*

ÖZ: *Ryukyu takımadalarında Ryukyu Kireçtaşı yaygın olarak bulunmaktadır. Faylanma ve tektonik hareketler sonucu kireçtaşı parçalanmış ve dolayısıyla yeraltı suyunu akımı kayanın çözünmesine ve sonuç olarak birçok mağaraların oluşmasına neden olmuştur. Bazı bölgelerde otoyolları bu mağarların üzerinden geçmektedir. Bu çerçevede yazarlardan birkaç mağaraların duraylılığı konusunda incelemeler yapması talep edilmiş ve dolayısıyla başlatılan çalışmaların bir kısmı bu yazıda sunulacaktır. Yazarlar Abuchiragama mağarasında mikro-sarsıntı incelemelerinin yanısıra mağara üstüne ve içine ivme ölçer yerleştirerek deprem sırasında sarsıntları izlemeye başlamışlardır. Benzer şekilde Yaese kasabasında bulunan Nunumachigama mağarasında incelemeler yapmaya başlamıştır. Bu yazıda yapılan bu incelemelerin bazı sonuçları sunulmakta ve tartışılmaktadır.*

Anahtar Kelimeler: *Abuchiragama, Nunumachigama, sarsıntı, mikro-sarsıntı, frekans.*

1. INTRODUCTION

There are many karstic caves in Ryukyu limestone, which are widely distributed over the Ryukyu Archipelago (Tokashiki 2010; Okinawa Earth Science Society, 2006; Japan Geological Survey, 1997). Although some of karstic caves are open to public for touristic purposes, there are many natural caves, which were used as underground shelters during the 2nd World War and/or storage of Awamori, famous liquor of Okinawa Island. The authors have been asked to assess the stability of Abuchiragama cave, which was used as an underground shelter during the war and visited by more than 100000 students and ordinary people as a part of peace-education. Similar caves also exist and the authors also involved with another natural cave called Nunumachigama cave in Yaese town, which was also used by locals as an underground shelter during the 2nd World war. In addition, some roadways pass over these natural caves, which also cause some concerns about the possibility of sinkhole occurrence (Aydan 2018; Aydan and Tokashiki 2007, 2011).

This study is concerned with wave propagation and vibration characteristics in and above these caves due to the passage of vehicles as well as their responses during earthquakes. The authors installed some accelerometers in and ground surface at Abuchiragama in Itoman City karstic cave and did some micro-tremor measurements. Measurements were carried out in and above the Nunumachigama in Yaese town. The authors describe the characteristics of some instrumental data obtained during natural and man-made vibrations as well as earthquake induced vibrations and discuss their implications in rock engineering practice.

2. GEOLOGY

Ryukyu limestone is relatively young formation formed during Pleistocene. This formation is widely distributed in middle south area of Okinawa Island. Abuchiragama and Nunumachigama caves are located within the west plateau of Ryukyu limestone formation. There are faults around this underground shelter. There is a high possibility that they played a role on the formation of the cave (Figure 1).

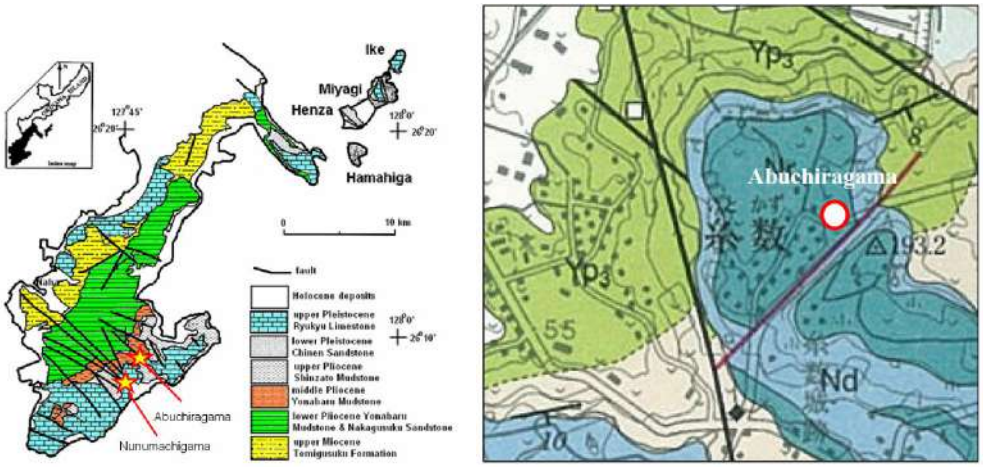


Figure 1. Geology of the south part of Okinawa Island and Abuchiragama

3. NATURAL CAVES

3.1. Abuchiragama Cave

Abuchiragama, which is also known as Itokazu underground shelter, is a karstic cave in Ryukyu limestone, utilized as an underground shelter during the battle of Okinawa. It is located in Nanjyo-city, in the south part of Okinawa Island (Figure 1). Abuchiragama cave is 200m long and its depth ranges between 6 and 17m from ground surface and its width is between 12 and 30 m. Now this cave is used for peace education trips of the schools, and the number of entrants is about 110 thousand people per year. The cave was subdivided into 7 areas with the consideration of geometrical conditions such as shape, rock cover thickness when its stability was analyzed as illustrated in Figure 2.

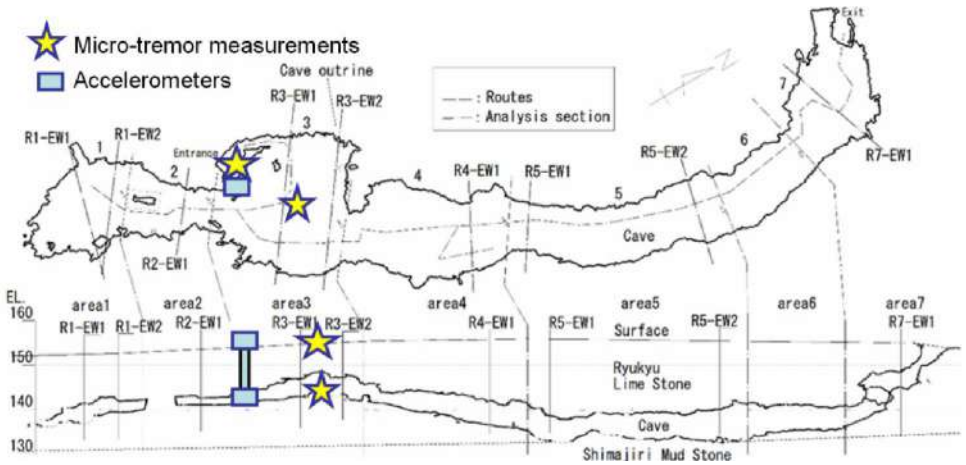


Figure 2. Areas in plan and cross section of the cave.

3.2. Nunumachigama Cave

Nunumachigama is a karstic cave in Ryukyu limestone and it was utilized as an underground shelter during the battle of Okinawa. It is located is in Yaese Town next to Nanjyo City in the south part of

Okinawa Island (Figure 1). The total length of Nunumachigama cave is 500m and about 1000 people took shelter in this karstic cave during the war (Figure 2). It was also connected to other natural underground shelter caves. Just above this cave, roads exist and the overburden is about 8 m. There is a special concern for the safety of roadways as well as public in urbanized areas as they may lead sinkholes (Aydan 2018; Aydan and Tokashiki 2007, 2011); This underground cave requires more studies besides the investigations carried out in this study.

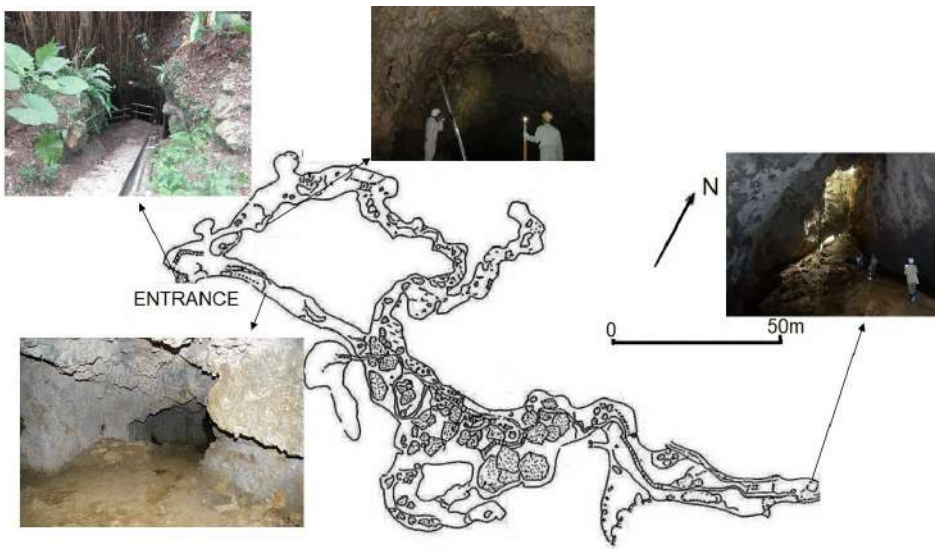


Figure 2. Plan of Nunumachigama Cave and some views of the cave

4. INSTRUMENTATION AND VIBRATION MEASUREMENTS

4.1. Abuchiragama Cave

The authors installed two accelerometers at Abuchiragama caves to measure the acceleration responses during nearby earthquakes (Inoue et al. 2019). These accelerometers are named as QV3-OAM-SYC and they can be used in different modes with different power sources (Aydan 2016; Aydan et al. 2016). One of the accelerometers is installed at the ground surface while the one was installed inside the cave. The power supply system of the strong motion observation system was damaged by a strong typhoon in July 2020 and the system was recently re-installed in February 2021. In addition, some micro-tremor measurements were implemented inside and the surface of the underground shelter. The measurements inside the cave were carried out at three locations and three measurements were carried out at each location. There is a huge cavern with a diameter of about 30 m and it is named as underground dome.

Figure 3. Views of installation of the strong-motion observations system and views of some micro-tremor measurements on the ground surface and underground.

Figure 4 shows an example of acceleration record on the ground surface taken on Feb. 7, 2018. Because of the failure of the power system since July 2020 until February 2021, there are no strong motion records. Luckily there was no major earthquake during this period.

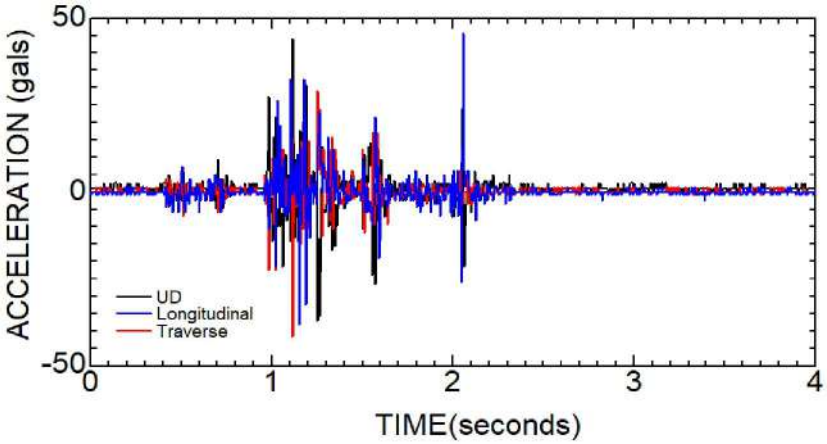


Figure 4. An acceleration record on ground surface on February 7, 2018.

Figure 5 shows the normalized H/V spectra of records taken in inside and ground surface at Area 3 of the underground shelter cave. This area is also called dome area due to the size and shape of the cave. As said previously, the diameter of the cave is about 30 m at this location. The dominant frequencies inside the cave and ground surface were almost the same.

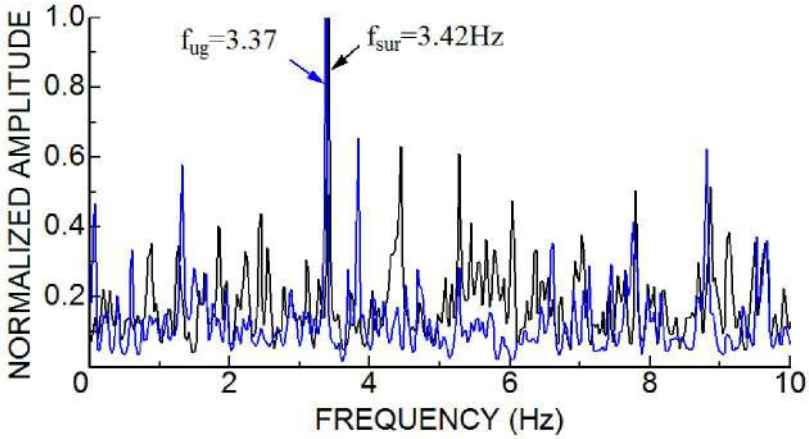


Figure 5. The normalized H/V spectra of records taken in inside and ground surface at Area 3 of the underground shelter cave.

There are no wave-propagation measurements in Abuchiragama Cave, yet. However, we have recently acquired 20 m long cables so that we can measure wave propagation characteristics between underground and ground surface. These measurements are expected to be carried out soon.

4.2. Nunumachigama Cave

We have carried out some measurements on wave propagation and micro-tremors as illustrated in Figure 6. Regarding wave propagation measurements, we have used car, impact of rock blocks at two locations on ground surface and also one location underground. For these measurements, we have utilized three sensors attached the micro-tremor device (TOKYO SOKUSHIN SPC-51). Depending upon the location, time lags can be utilized to determine wave velocity propagation velocity and characteristics of recorded waves. The measurements were recorded as acceleration waves or velocity waves. The vibrations induced by the passage of the car shown in Figure 6 did not induced distinguishable records of acceleration or velocity at the sensors attached to rock in the cave. Then, we

utilized rock blocks of about 20 kgf and dropped from a height of 80cm at two impact locations three times. In all cases, we could distinguish acceleration and velocity waves associated with impacts. An example record is shown in Figure 7. Then, we utilized a similar rock block and dropped from a certain height, the sensor at the ground surface (location is shown in Figure 6) recorded a very weak noise like record so that distinguishing the arrival wave was quite difficult. The estimated wave velocity was ranging between 130-185 m/s although these values are quite low. Nevertheless, it was possible to measure wave velocities by utilizing micro-tremor devices without any extra arrangements in two different directions.

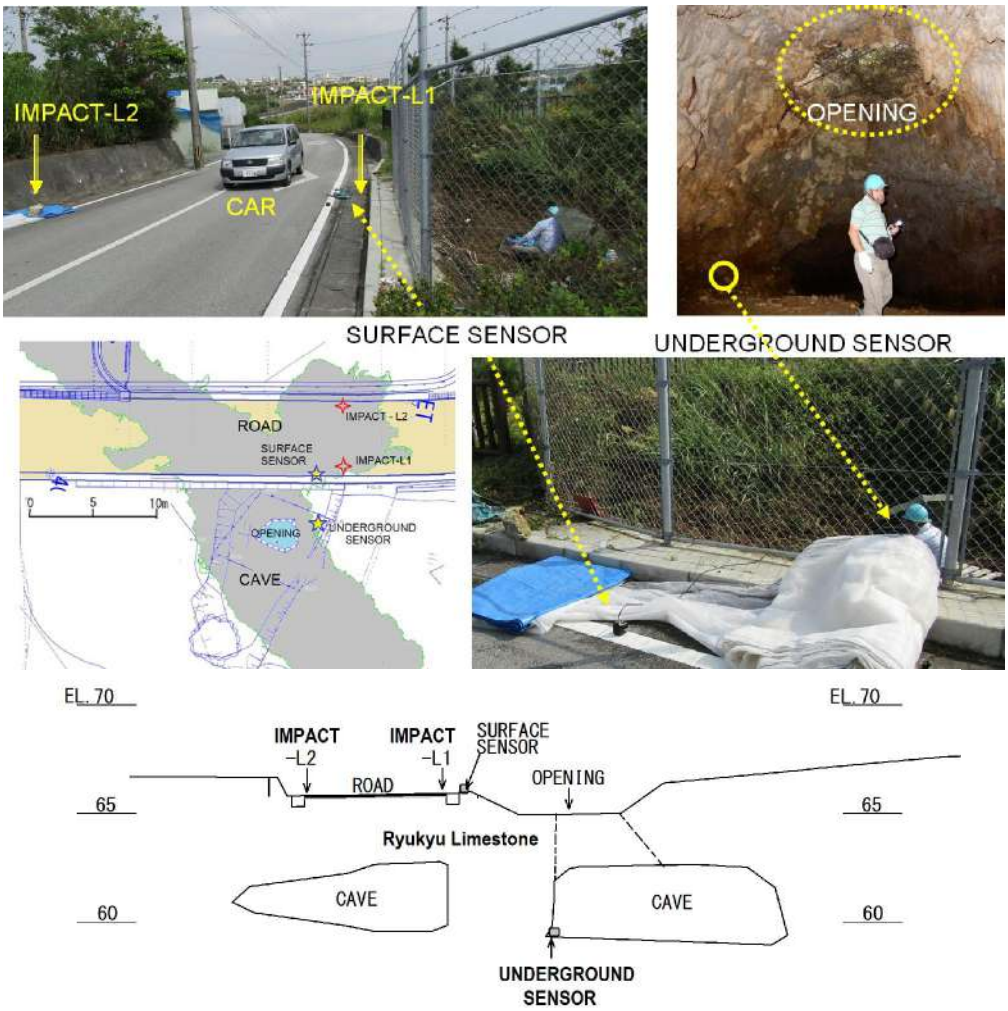


Figure 6. Illustration of wave propagation and micro-tremor measurements at Nunumachigama cave and a cross-section of measurement and impact locations.

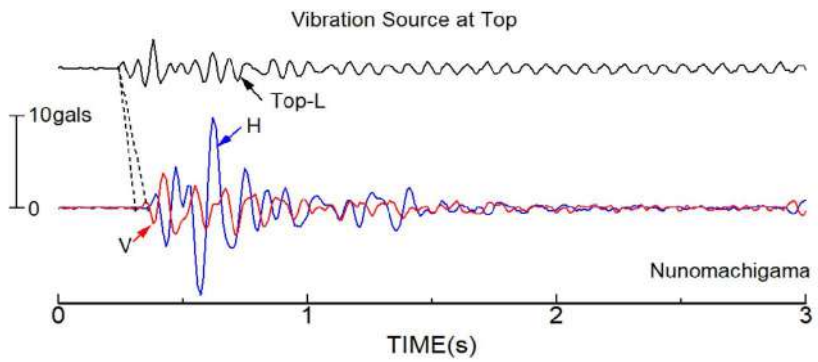


Figure 7. Wave time series recorded at ground surface and underground due to an impact source at the ground surface.

Micro-tremor measurements were carried out in the cave as illustrated in Figure 6. The recordings were in acceleration and velocity modes three times. Figure 8 shows the normalized H/V spectra of records taken in inside the underground shelter cave. The roof of this area was fallen as seen in Figure 6 also and no measurement could be done at the ground surface level for this cave. There are several dominant frequencies for the measurements inside the cave. Compared with that at Abuchiragama cave, the frequencies are slightly greater as the size of the cave is smaller in the case of Nunumachigama. Furthermore, the recording of waves in the form of acceleration and velocity yield almost similar frequency characteristics.

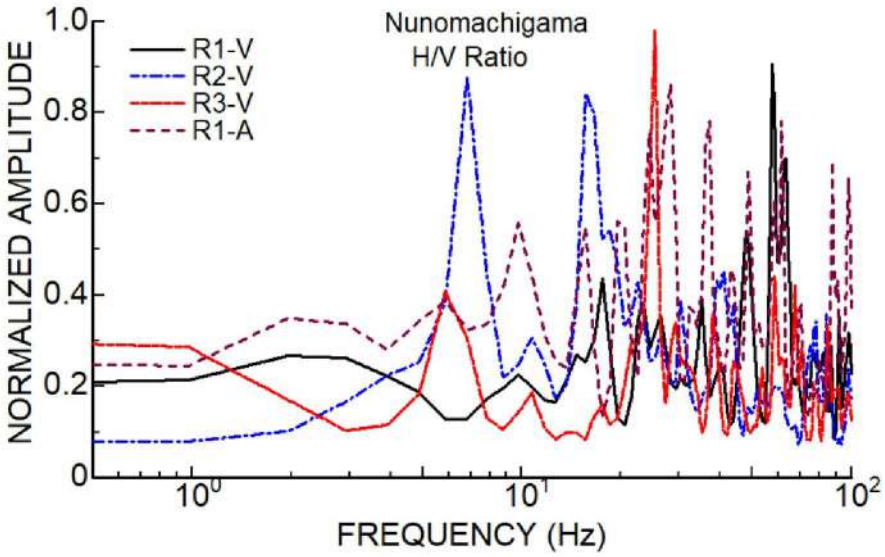


Figure 8. Ratio of horizontal spectra over vertical spectra (HVR) for impact induced waves.

5. CONCLUSIONS

The authors have attempted to measure wave propagation and vibration characteristics of two natural caves, which were used as underground shelters during the Second World War. In this article, the outcomes of these measurements are reported and discussed. Although the recording of waves in the form of acceleration and velocity yield slightly different frequency characteristics, similar results have been obtained. Nevertheless, further studies and measurements on this aspect are necessary.

We have also installed a strong motion observation system at Abuchiragama Cave and it is probably the first example of instrumentation of natural caves for their responses during earthquakes. Although we do not have many recordings yet, it would definitely provide valuable data for assessing the stability and responses of natural caves, which are used for touristic and peace-education purposes.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

A part of this work was carried out as a part of project with the consignment of the Nanjyo City. We gratefully acknowledge the authorities of the Nanjyo City for the kind permission to publish some of the content of the project. Furthermore, the authors gratefully acknowledge the support by JPOWER Electric Power Company Co., in particular, Dr. T. Tobase, for the renewal of accelerometers utilized as a part of the strong-motion observation system at Abuchiragama Cave.

7. REFERENCES

Aydan, Ö. (2016). Issues on Rock Dynamics and Future Directions. Keynote, ARMS2016, Bali, Indonesia.

Aydan, Ö., 2018. Some Thoughts on the Risk of Natural Disasters in Ryukyu Archipelago. International Journal of Environmental Science and Development, 9(10), 282-289.

Aydan, Ö., Tokashiki, N., 2007. Some damage observations in Ryukyu limestone caves of Ishigaki and Miyako Islands and their possible relations to the1771 Meiwa Earthquake. J. of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, 5(1), 23-39.

Aydan, Ö. and Tokashiki, N., 2011. A comparative study on the applicability of analytical stability assessment methods with numerical methods for shallow natural underground openings. The 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Melbourne, Australia, pp.964-969.

Aydan, Ö., H. Tano, H. Ideura, A. Asano, H. Takaoka, M. Soya, M. Imazu 2016. Monitoring of the dynamic response of the surrounding rock mass at the excavation face of Tarutoge Tunnel, Japan. EUROCK2016, Ürgüp, 1261-1266.

Inoue, H., Tokashiki, N., Aydan, Ö., 2019. An integrated study on the risk assessment of Abuchiragama karstic underground shelter (Okinawa, Japan) under static and dynamic conditions. Proceedings of the 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, 384-389

Japan Geological Survey, 2006. The geology of Okinawa Island.

Okinawa Earth Science Society, 1997. The geology of Okinawa Island.

Tokashiki, N., 2011. Study on the Engineering Properties of Ryukyu Limestone and the Evaluation of the Stability of its Rock Mass and Masonry Structures. PhD Thesis, 221p, Waseda University, Engineering and Science Graduate School.

Geotechnical Damages Caused by the 2020 October 30 Kuşadası Bay Earthquake with an Emphasis on Slope Failures and Liquefaction Induced Structural Damage

30 Ekim 2020 Kuşadası Körfezi Depreminin Neden Olduğu Şev Duraysızlıklarına ve Zemin Sıvılaşmasına Bağlı Jeoteknik Hasarlar

H. Kumsar[1,*], B. Semiz[1], Ö. Aydan[2]

[1]Dept. of Geological Engineering, Pamukkale University, Denizli, Turkey
[2]Dept. of Civil Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa, Japan
*(*hkumsar@pau.edu.tr)*

ABSTRACT: An earthquake with a moment magnitude of 6.9 occurred in Kuşadası Bay on 30 October 2020 and it has caused very heavy building damage in the Bayraklı District of İzmir. The focal mechanism of the earthquake was due to a normal fault which probably extends to Efes and Kuşadası. Various forms of geotechnical damage were observed at various locations along the shore-line of the Kuşadası Bay. In some areas, liquefaction were observed and it caused some structural damage. In this paper, he authors describe the observations of various geotechnical damage with a particular emphasis on the liquefaction induced damage. Furthermore, various empirical formula assessing the geotechnical damage are compared with observations and and their engineering implications are discussed.

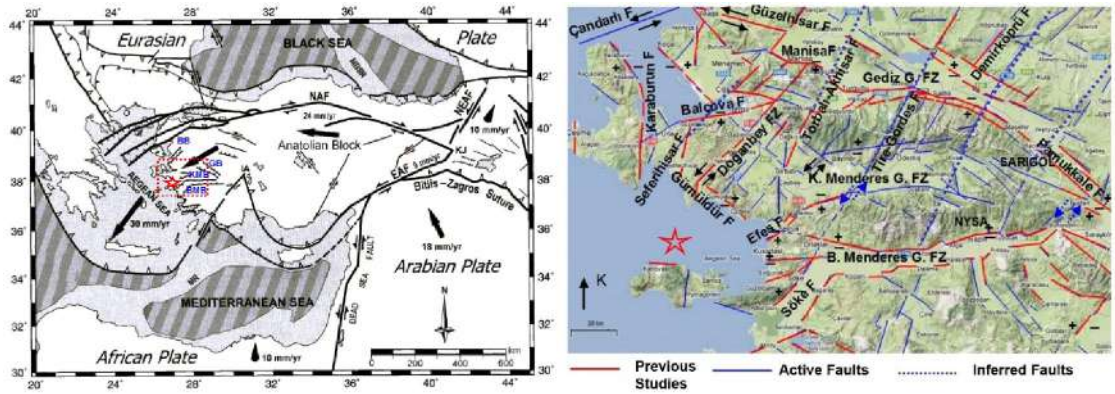
Keywords: Geotechnical damage, liquefaction, slope instability, structural damage, empirical formula.

ÖZ: *Kuşadası Körfezinde moment büyüklüğü 6.9 olan bir deprem meydana gelmiş ve bu deprem sonucu özellikle İzmir'in Bayraklı semtinde çok ağır yapısal hasar meydana gelmiştir. Bu deprem Efes ve Kuşadasına uzanan bir normal fayın kırılması sonucu oluşmuştur. Kuşadası körfezi çevresinde yaygınca jeoteknik hasarlar gözlenmiştir. Kuşadası körfezi kıyılarında tsunami ve tsunamiye bağlı hasarlar gözlenmiştir. Bayraklı semtinde özellikle oturma ve yanal yayılma şeklinde yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Bazı yörelerde sıvılaşma olgusu ve buna bağlı yapısal hasarlarda olulmuştur. Bu yazıda sıvılaşma sonucu meydana gelen yapısal hasarlarada önem vererek meydana gelen değişik jeoteknik hasarlar sunulmuş ve tartışılmıştır.*

Anahtar Kelimeler: *Jeoteknik hasar, sıvılaşma, şev duraysızlığı, yapısal hasar, görgül ilişki*

1. INTRODUCTION

Turkey is one of the most seismically active countries on Earth and the October 30, 2020 Kuşadası Bay earthquake occurred within the West Anadolu Fault System (WAFS) (Aydan 1997; Aydan and Kumsar 2015). The general tectonic frame of Turkey and regional tectonics are shown in Figure 1. The moment magnitude of the earthquake was 6.9 and it has resulted in heavy casualties and very heavy building damage in Bayraklı District of İzmir mainly due to poor ground conditons. The earthquake mechanism of the earthquake was reported to be due to a normal fault, which is probably the extension of the faults from Efes and Kuşadası. Furthermore, the region may be viewed as a westward extension of Küçük Menderes Graben in the Kuşadası Bay.



(a) General tectonics (Ulusay & Aydan, 2005) (b) Regional tectonics (Aydan & Kumsar 2015)

Figure 1: The epicenter of the earthquake within the global and regional tectonics of Turkey.

The seismic activity during the period of the first 48 hours is shown in Figure 2, with the utilization of aftershock data from AFAD (2020). As inferred from the figure, the earthquake fault activated another normal fault conjugate the seismic activity takes place within a graben associated with the normal displacement in the central part and horst-like upward movements in the north (Seferihisar) and south (Didim and Sisam) of the Kuşadası Bay.

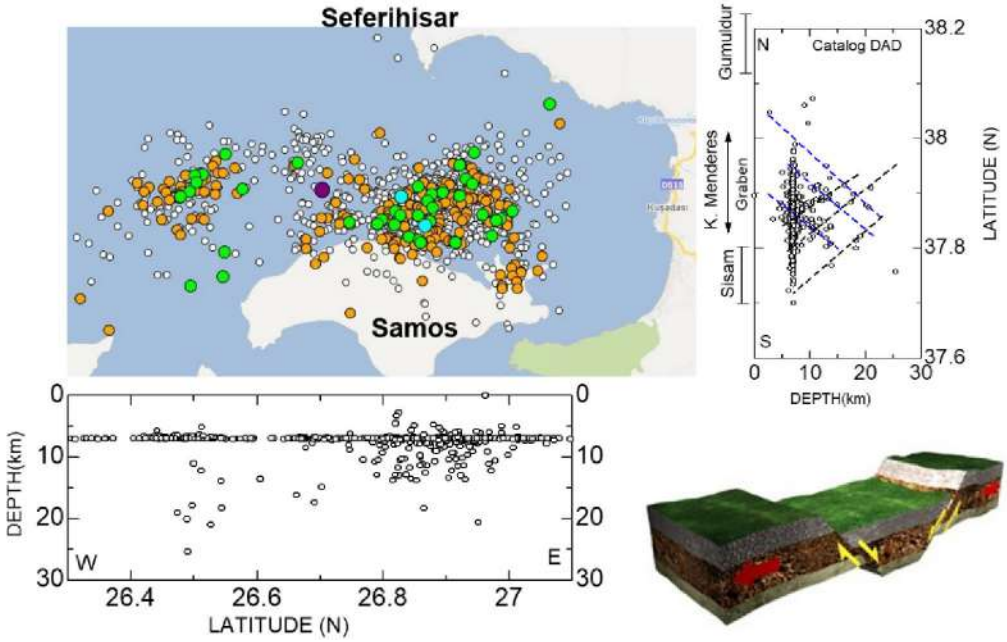
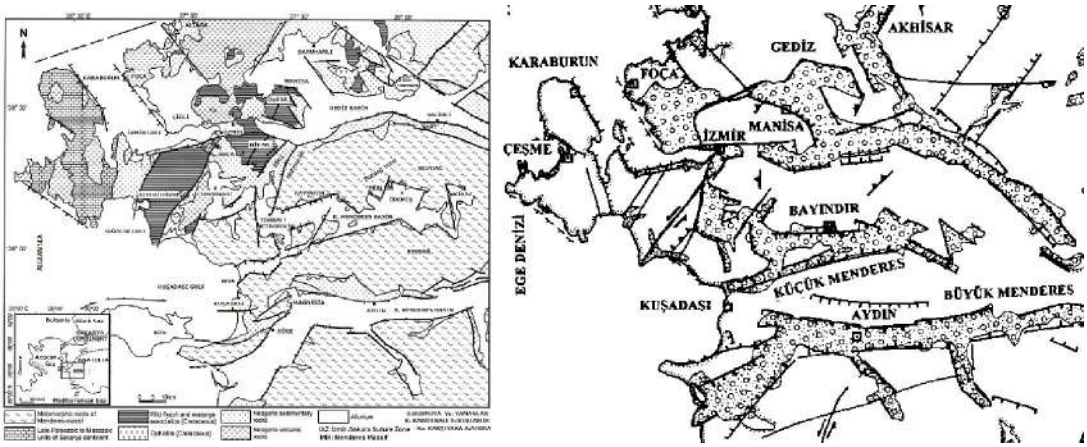


Figure 2: The projection of the seismicity during the first 48 hours (data from AFAD, 2020).

In this study, the authors present outcomes of the reconnaissance to the epicentral area including Bayraklı district where heavy strructural damage occurred. The main cause of the heavy damage was poor ground conditons and large deformation of the ground. Ground liquefaction was observed at various locations and it resulted in some structural damages along the shore. Other types of geotechnical damage was also observed. The authors describe the observations of various geotechnical damages with a particular emphasis on the liquefaction induced damage. Furthermore, various empirical formula assessing the geotechnical damage are compared with observations and their engineering implications are discussed.

2. GEOLOGY AND GEOTECHNICAL CONDITIONS

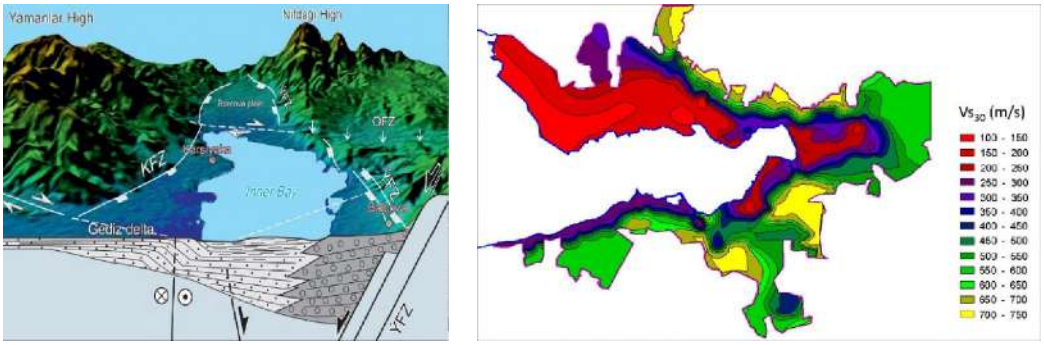
The regional geology and tectonics of the Aegean region are shown in Figure 3 within the frame of general tectonics of Turkey, whose evolution of Turkey was associated with the uplift of the Levantine Ocean base between Euro-Asia and Africa as a result of the northward motion of the Africa continent and Arabian plate. The region is situated over Izmir-Ankara Suture Zone (IAZ), Menderes massif (MM) and Sakarya continent (Yilmaz et al. 2000). Its eastern part consists of metamorphic rocks of Menderes massif, while the western part consists of the units of Sakarya Continent. The area was volcanically very active till Holocene. This volcanic activity is associated with the back-arc mechanism resulting from the subduction of African plate beneath the plates of Aegean and Anadolu (Anatolia). As a result, the northern part of the region is covered with volcanic rocks. Volcanic rocks of andesitic type outcrops along southern (Kadifekale, Susuzdede) and northern side (Yamanlar) of Izmir Gulf. The basement rock beneath the volcanic rocks is flysch. Alluvial sedimentary deposits cover river beds and shores of the Gulf and the basins of Gediz, K. Menderes and B. Menderes. The sedimentary deposits in Izmir Gulf become very thick particularly in the northern side (Çiğli, Karşıyaka) of the Gulf and Bornova. These sedimentary deposits are mainly due to Gediz river, whose outlet to the sea was diverted to the north of the Gulf in 1930s. The other thick sedimentary alluvial deposits are found along K. Menderes, B. Menderes and Gediz basins.



(a) (b)

Figure 3: (a) Regional geology and tectonics (from Genç et al. 2001) and (b) distribution of the Quaternary deposits (from Aydan and Kumsar 2015).

The geotechnical conditions of ground in the region and its close vicinity vary from very soft ground to hard rocks. Gediz, K. Menderes and B. Menderes basins, their sub-basins and the vicinity (i.e. Konak, Çiğli, Bornova etc.) of İzmir Gulf consists of Quaternary deposits. Figure 3(b) shows the Quaternary basins in the region. The most extensive geophysical explorations have been carried out in the close vicinity of Izmir Gulf as shown in Figure 4b. For example, the heavily populated areas and business quarters of Izmir are all located on soft grounds. The boring logs at Konak and Basmane districts associated with Izmir metro project indicated that the weathered bed rocks is found to be at about 20 m below the ground surface (Tezcan and Teri, 1996). The soil between the ground surface and weathered bed rock consists of clay, gravelly sand, clayey silt, sand and artificial fill. The total thickness of the liquefiable sand layers ranges between 2 m to 5 m. Borings at Çiğli, Karşıyaka and Bostanlı districts in the northern side of the Izmir Gulf indicated that the ground consisted of loose sand, silty sand, soft silty clay layers (Ulusay et al. 2000). Ulusay et al. (2000) investigated the liquefaction potential of some boring data and grain-size distributions of soil samples from Konak, Çiğli and Bayındır (K. Menderes Graben) and they found that ground was susceptible to ground liquefaction. Ground liquefaction was also observed during the 2005 Sığacık earthquake.



(a) 3D illustration of geology (b) S-wave velocity distribution

Figure 4: (a) 3D illustration and (b) s-wave velocity of Izmir Bay (İzmir Municipality (2000).

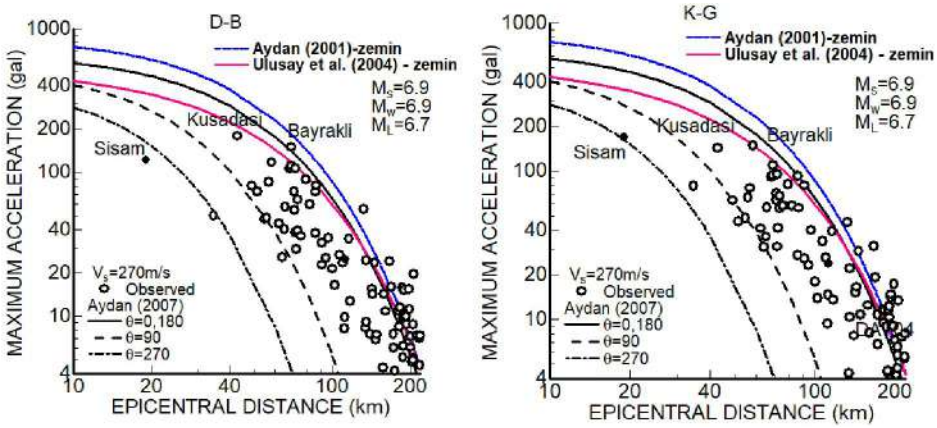
3. MAIN CHARACTERISTIC OF THE EARTHQUAKE

The earthquake occurred at 14:51:24 TST (11:51:24 GMT) on October 30, 2020. Table 1 gives the major parameters of the earthquake together with those inferred from the Efes fault and aftershock distributions. The focal plane solutions indicated that EW striking fault was activated. Fault dip was between 46-55 degrees depending upon the institutes (see Table 1), which is also confirmed by the aftershock distribution (Figure 2). Furthermore, the conjugate fault has also a similar dip. In other words, the region bounded by the main and auxiliary faults subsides and the region in north and south are expected to be uplifted due to stress releases and extension of the graben. The faulting is almost due to normal faulting with very slight dextral or sinistral component. It should be noted that no outcrop faulting on land was observed.

Table 1. Main parameters of the earthquake.

Fault / Institute	Length (km)	Parameters			M_w	U_{max} (cm)	V_{max} (cm/s)	A_{max} (gal)	T_d (s)
		d	*p*	*i*					
(This study)	39.5	10	50	80	6.9	129	19	269	15
KOERI (2020)		2	55	93	6.9		15	255	
AFAD (2020)		0	46	91	6.9				
USGS (2020)	40	6	29	88	7.0	441	20	211	16.8

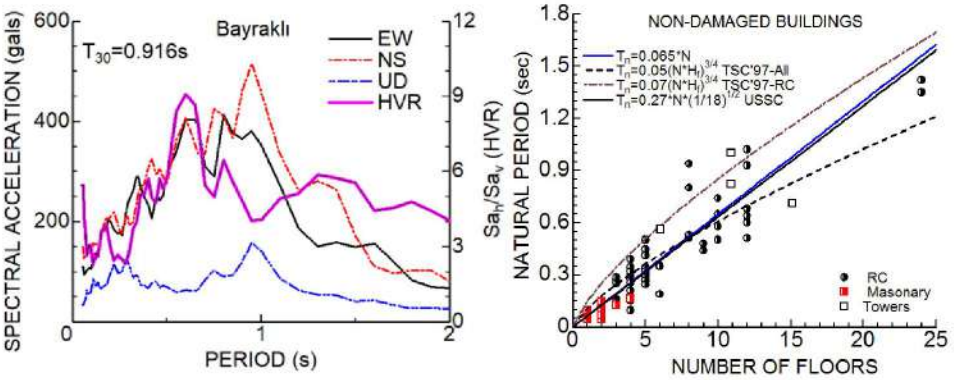
The largest strong motion was observed at Kuşadası strong motion station with a maximum amplitude of 181 gals. Figure 5 shows the attenuation of maxium ground acceleration for EW and NS components together with available attenuation equations. As noted from Figure 5, the best fit is given by the relations of Aydan (2007, 2012) in which the effect of fault orientation with respect to strong-motion station is considered. For example, the Sisam station is on the footwall while the Kuşadası station locates at the end of the fault while Seferihisar station is on the hanging-wall side.



(a) (b)

Figure 5. Attenuation of ground accelerations ((a) EW, (b) NS).

The strong motion station at Bayraklı (Code No: 3519) showed high spectral values for natural periods ranging between 0.6-0.95s (Figure 6a). This range is close to the natural period og ground computed as 0.916s on the basis of s-wave velocity. Figure 6b shows the natural period of structures in Turkey together with empirical estimations. From the comparison of observed and known natural periods, it is very likely that the RC building having stories of 8 to 10 are quite vulnerable to be damaged by the earthquake at Bayraklı District. These data also provides an explaination for the heavy damage.



(a) (b)

Figure 6. (a) Spectral analyses of the records at Bayraklı and (b) natural periods of buildings in Turkey as a function of story number.

4. GEOTECHNICAL DAMAGE

4.1 Slope Failure

Slope failures are very complicated and require information on ground shaking characteristics, parameters of failure criteria, groundwater conditions and geological conditions. Keefer (1984) studied landslides in USA and other countries, and he proposed some empirical bounds for landslides, which are classified as disrupted or coherent. Disrupted slope failures mostly involve inherent structural weakness of rock mass and ground, while coherent slope failures involve rupture surfaces through the rock mass and ground. The empirical bounds of Keefer's study are not specifically given as formula. Aydan (Aydan 2007, 2012; Aydan et al. 2012), who prefers the word "slope failures" instead of "landslides", proposed an empirical equation for the maximum epicentral distance of disrupted and coherent landslides as a function of earthquake magnitude and fault orientation. His equation is modified recently and it is given to the functional form (Aydan et al. 2012).

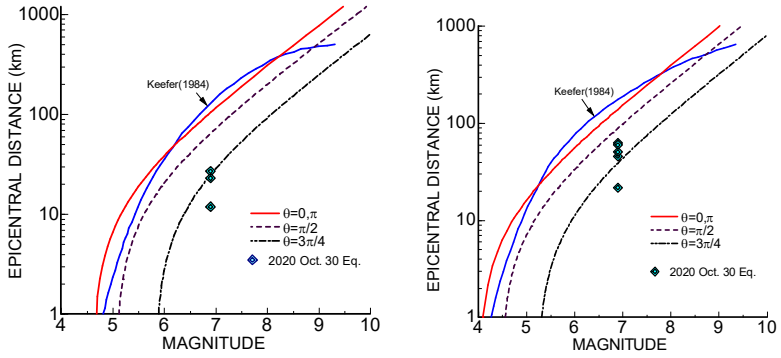
$$R_o = A*(3+0.5\sin\theta-1.5\sin^2\theta)*e^{B\cdot M_w}-C \qquad (1)$$

Where R_o, θ and M_w are hypocentral distance, the angle between the observation point and the strike of the fault and the moment magnitude. When the values of angle (θ) are 90 and 270 degrees, they correspond to positions of pure hanging wall and footwall conditions, respectively. Constants *A, B* and *C* in Eq. (1) for disrupted and coherent slope failures are given in Table 2. Since ground accelerations differ according to the location with respect to fault geometry, the empirical bounds proposed herein can provide a basis for scattering in the range of observations.

Table 2. Parameters of Eq. (1) for disrupted and coherent slope failures

Condition	*A*	*B*	*C*
Disrupted	0.3	0.8	25
Coherent	0.2	0.8	30

Figure 7 compares observations of slopes failures caused by the 2020 Kuşadası Bay earthquake with the empirical relations between magnitude and limiting hypocenter distance for coherent and disrupted slopes, as proposed in this paper. Once again, good correlations are noted between the observations and empirical relations. It should be however noted that the scales of slope failures were not of great scale particularly in the close vicinity of the epicentral area. The main reason for this situation may be associated with the geology in the close vicinity of the epicentral area and rocks were mainly metamorphic while the geological units of the distant slope failures were mainly sedimentary rocks (Figure 8).



(a) (b)

Figure 7. Comparison of the empirical relations with observations for slope failures (a) Coherent slopes, (b) Disrupted slopes.

4.2 Retaining Wall failure

Retaining wall failure was quite limited in both scale and distribution. Most of retaining wall failures was due to toppling failure if they constructed vertically (Figure 9).

4.3 Ground Liquefaction and Liquefaction Induced Structural Damage

There are several relations to estimate the limiting epicentral/hypocentral (R_l)of distances to the site of liquefaction (e.g. Aydan et al. 1998, 2012): Most of these equations may be categorized as semi-spherical equations. As mentioned previously, the ground motions are strongly affected by the directivity effects. Therefore, the equation based on moment magnitude with the consideration of orientation of the earthquake fault is proposed by Aydan (2007) and given as follows:

$$R_l = 0.08*(3+0.5\sin\theta-1.5\sin^2\theta)*e^{0.9M_w} \qquad (2)$$

Where R_l is the hypocentral distance (km) for liquefaction limit.

Figure 8. Rock slope failure in schist.

Figure 9: Toppled retaining wall.

Estimations from Eq. 2 together and other available equations are compared with ground liquefaction data of the 2020 Kuşadası Bay earthquake in Figure 10. Eq. 2 and the empirical relations by Aydan et al. (1998) provide the best bounds for the maximum limiting distance for ground liquefaction and Eq. 2 takes into account the faulting orientation.

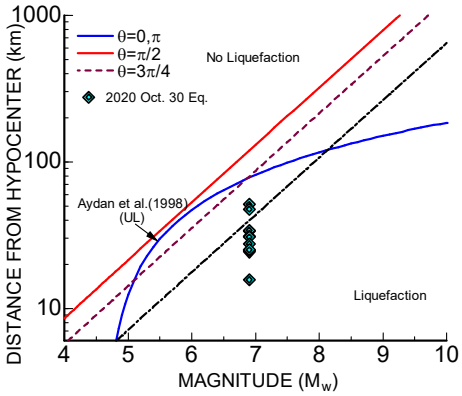


Figure 10. Comparison of empirical relations with observed data on ground liquefaction.

Many small scale piers along the northern shore of the Kuşadası Bay settled into sea as seen in Figure 11. Due to the liquefiable ground conditions, the differential settlement of the piers varied from place to place as noted in Figure 11.

Figure 11. Settlement and differential settlement of piers along the north shore of Kuşadası Bay.

5. CONCLUSIONS

The 2020 Kuşadası earthquake caused some structural damages at Bayraklı District having very soft ground. It is shown that the one of the main causes of the heavy structural damage was that the natural period of ground was close to those of RC buildings having 8-10 stories. Slope failures and ground

liquefaction were within the limits of empirical relations. Some differential settlement of piers occurred along the northern shore of the Kuşadası Bay due to ground liquefaction. Although the size of piers was small, it would be necessary to take countermeasures against the possibility of ground liquefaction along shore susceptible to round liquefaction.

6. REFERENCES

Aydan Ö (1997) Seismic characteristics of Turkish earthquakes. Turkish Earthquake Foundation, TDV/TR 97-007.

Aydan Ö (2012) Ground motions and deformations associated with earthquake faulting and their effects on the safety of engineering structures. Encyclopaedia of Sustainability Science and Technology, Springer, R. Meyers (Ed.), 3233-3253.

Aydan Ö (2007) The inference of seismic and strong motion characteristics of earthquakes from faults with a particular emphasis on Turkish earthquakes. Proceedings of the 6th National Earthquake Engineering Conference of Turkey, İstanbul, 563-574.

Aydan Ö., Kumsar H. 2015. Assessment of the earthquake potential of the west Aegean region of Turkey based on seismicity, tectonics, crustal deformation and geo-archaeological evidence and its geotechnical aspects, Bulletin of Eng. Geol. and the Env., 74:1037-1035.

Aydan Ö, Ulusay R, Kumsar H, Sönmez H, Tuncay E (1998) A site investigation of June 27, 1998 Adana-Ceyhan earthquake. Turkish Earthquake Foundation, İstanbul, TDV/DR 006-03.

Aydan Ö, Ulusay R, Hamada, M and Beetham D. (2012) Geotechnical aspects of the 2010 Darfield and 2011 Christchurch earthquakes of New Zealand and geotechnical damage to structures and lifelines. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 71(4): 637-662.

İzmir Municipality (2000) RADIUS Project, Deprem Risk Analizi (İzmir Province Earthquake Risk Analysis), http://www.izmir-bel.gov.tr/.

Genç C, Altunkayanak S, Karacık Z, Yazman M, Yılmaz Y (2001) The Çubukludağ graben, south of Izmir: its tectonic significance in the Neogene geological evolution of the western Anatolia. Geodinamica Acta 14: 45–55.

Keefer DK (1984) Landslides caused by earthquakes. Geological Society of American Bulletin 95: 406-421.

Tezcan, S. and Teri, L. (1996). Shear wave propagation and liquefaction in layered media. Publication of Earthquake Foundation of Turkey, TDV/TR 96-005, Istanbul.

Ulusay, R. and Aydan, Ö. (2005): Characteristics and geo-engineering aspects of the 2003 Bingöl (Turkey) earthquake. J. Geodynamics of Europe, 334-346.

Ulusay R, Aydan Ö, Kumsar H, Tuncay E, Sönmez H (2000) Liquefaction phenomenon in the recent earthquakes of Turkey and a general view to liquefaction potential at Western Anatolia. The Symp. on Earthquake Potential of Western Anatolia, İzmir, 279-292 (in Turkish).

Ulusay R, Tuncay E, Sonmez H, Gokceoglu C (2004) An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. Engineering Geology, 74:265-291.

Yılmaz, Y., C. Genç, O.F. Gürer, M. Bozcu, K. Yılmaz, Z. Karacık, Ş. Altunkaynak, A. Elmas, (2000). When did the western Anatolian grabens begin to develop. in: E. Bozkurt, J.A. Winchester, J.D.A. Piper, (Eds), Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geo. Soc. London, Spec. Publ. 173, 353-384.

Permanent Ground Displacement Based on Strong Motion Records of the 2020 October 30 Kuşadası Bay Earthquake and Some Observations

2020 Ekim 30 Kuşadası Körfezi Depreminin Kuvvetli Yer Hareketleri Kayıtlarından Kalıcı Yerdeğiştirmelerin Belirlenmesi ve Bazı Gözlemler

H. Kumsar[1,*], Ö. Aydan[2]

[1] *Dept. of Geological Engineering, Pamukkale University, Denizli, Turkey*
[2] *Dept. of Civil Engineering, Faulty of Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, 903-0213, Okinawa, Japan*
*(*hkumsar@pau.edu.tr)*

ABSTRACT: An earthquake with a moment magnitude of 6.9 occurred in Kuşadası Bay and it has caused very heavy building damage in Bayraklı District of İzmir. The earthquake mechanism of the earthquake was due to a normal fault, which probably extends to Efes and Kuşadası and it may be viewed as an extension of Küçük Menderes Graben in the Kuşadası Bay. The seismic activity in the first 48 hours indicated that another normal fault conjugate to the earthquake fault was activated and it is very likely that a graben associated with the normal displacement and horst-like upward movements in the north and south of the Kuşadası Bay took place. In this study, the authors describe vertical movements observed in the epicentral area. Furthermore, strong motion data analysed using the EPS method to have some quatitative data on permanent ground movements. Furthermore, similar evaluations were done for the soft sediments at the Northern shore-line of İzmir Bay and their engineering implications are discussed.

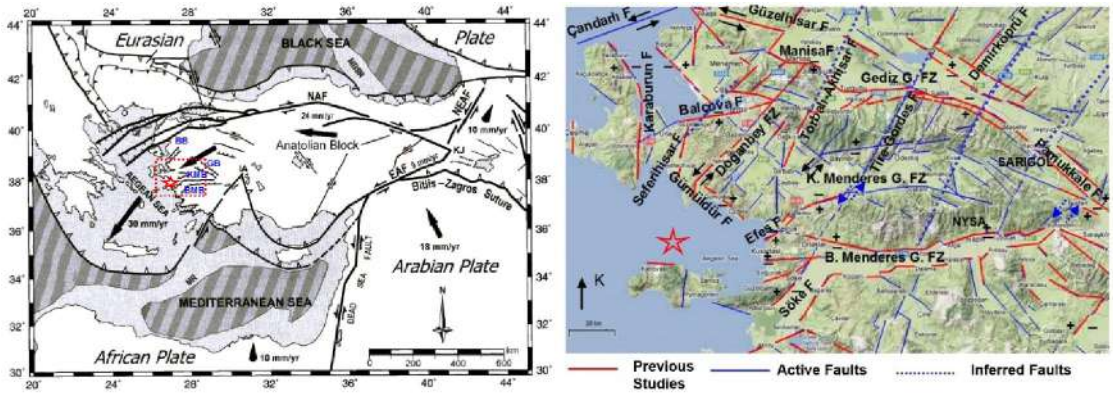
Keywords: *Permanent displacement, strong motion, horst-graben movements, EPS method*

ÖZ: *Kuşadası Körfezinde moment büyüklüğü 6.9 olan bir deprem meydana gelmiş ve bu deprem sonucu İzmir'in Bayraklı semtinde çok sayıda can ve ağır hasara neden olmuştur. Depremi oluşturan normal fay Küçük Menderes Vadisinin Kuşadası Körfezindeki uzantısı olma ihtimali yüksektir. Depremin oluşumundan sonra ilk 48 saat içinde meydan gelen artçı sarsıntılar depremi oluşturan ana fayı ve onunla ilişkili eşlenik normal fayın oluşturduğu bir çukurluk içinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada depremin etkilediği alanda sağlam veya kayalık zeminlerde oturtulmuş kuvvetli yer hareket istasyonlarında alınan ivme kayıtlarından kalıcı yer değiştirmeler EPS yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun yanısıra İzmir Bayraklı semtindeki büyük hasarın yumuşak zeminindeki meydana gelen kalıcı deformasyonlardan dolayı olduğuda belirlenmiştir. Yazarlar yapılan bu değerlendirmeyi burada sunmakta ve tartışmaktadırlar.*

Anahtar Kelimeler: *Kalıcı yerdeğiştirme, ivme, normal fay, çöküntü, EPS yöntemi*

1. INTRODUCTION

Turkey is one of the most seismically active countries on Earth and the earthquake occurred in in Kuşadası Bay on October 20, 2020 within the West Anadolu Fault System (WAFS) (Aydan 1997; Aydan and Kumsar 2015). Figure 1 illustrates the location of the earthquake within the general tectonic frame of Turkey. The moment magnitude of the earthquake was 6.9. The earthquake has resulted in heavy casualties and very heavy building damage in Bayraklı District of İzmir. The earthquake mechanism of the earthquake was reported to be due to a normal fault which probably extends to Efes and Kuşadası and it may be viewed as an extension of Küçük Menderes Graben in Kuşadası Bay.



(b) General tectonics (Ulusay & Aydan, 2005) (b) Regional tectonics (Aydan & Kumsar 2015)

Figure 1: The epicenter of the earthquake within the global and regional tectonics of Turkey.

Figure 2 shows the seismic activity during the period of the first 48 hours. As inferred from the figure, the earthquake fault activated another normal fault conjugate the seismic activity takes place within a graben associated with the normal displacement in the central part and horst-like upward movements in the north (Seferihisar) and south (Didim and Sisam) of the Kuşadası Bay.

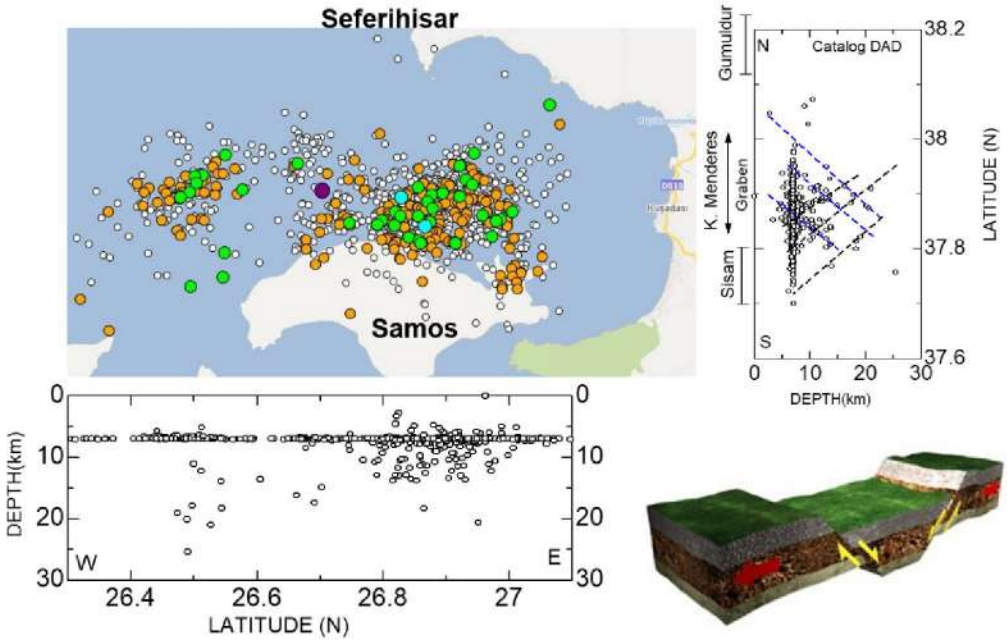


Figure 2: The projection of the seismicity during the first 48 hours (data from AFAD, 2020).

In this study, the authors describe permanent ground movements in the epicentral area by utilizing strong motion data and the EPS method (Aydan and Ohta 2011). These evaluations can ilustrate how the region is deformed due to the October 20, 2020 Kuşadası Bay earthquake. Furthermore, similar evaluations were done for the strong motion stations located over soft sediments at the Northern shore-line of İzmir Bay and their engineering implications are discussed.

2. MAIN CHARACTERISTIC OF THE EARTHQUAKE

The earthquake occurred at 14:51:24 TST (11:51:24 GMT) on October 20, 2020. Table 1 gives the major parameters of the earthquake together with those inferred from Efes fault and aftershock distributions by utilizing empirical relations by Aydan (2012). The focal plane solutions indicated that EW striking fault was activated. Fault dip varies between 46-55 degree depending upon the institute, which is also confirmed by the aftershock distribution. Furthermore, the conjugate fault has also

similar dip. In other words, the region bounded by the main and auxiliary faults subsides and the regions in north and south are expected to be uplifted due to stress releases and extension of the graben. The faulting is almost due to normal faulting with very slight dextral or sinistral component. It should be noted that no outcrop faulting on land was observed.

Table 1: Main parameters of the earthquake

Fault / Institute	Length (km)	Parameters			M_w	Umax (cm)	Vmax (cm/s)	Amax (gal)	Td (s)
		d	*p*	*i*					
This study *	39.5	10	50	80	6.9	129	19	269	15
KOERI (2020)		2	55	93	6.9		15	255	
AFAD (2020)		0	46	91	6.9				
USGS (2020)	40	6	29	88	7.0	441	20	211	16.8

*Efes Fault and seismicity

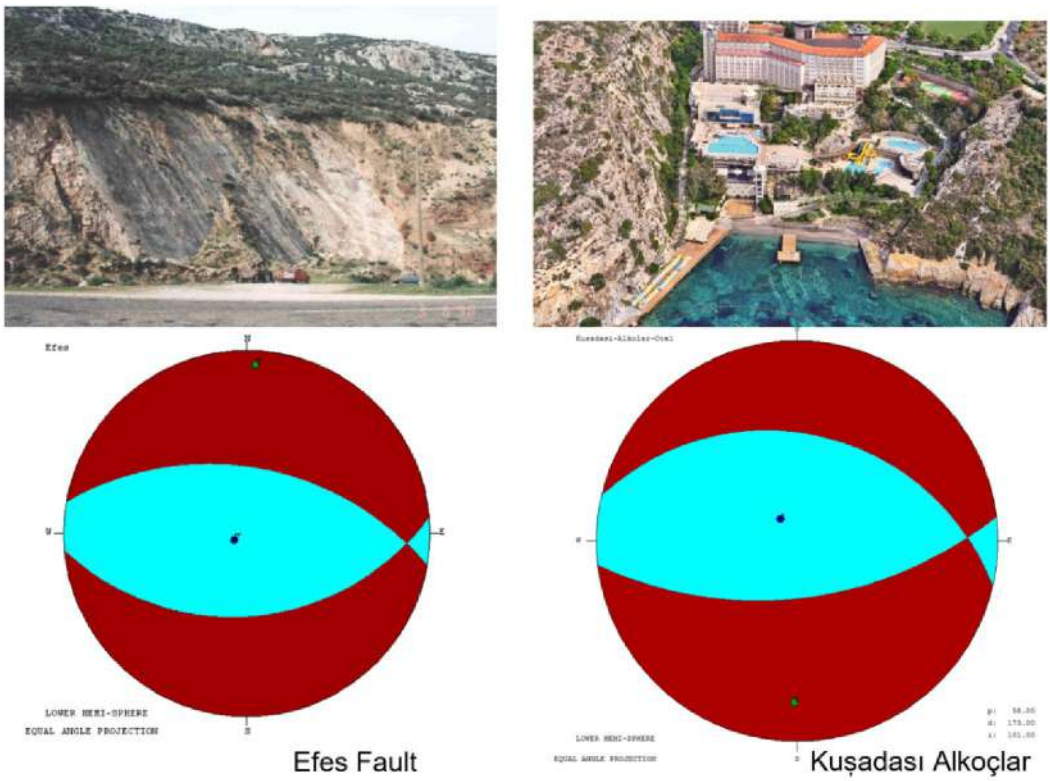


Figure 3. Outcrops and inferred focal mechanisms of faults observed at Efes and Kuşadası.

The seismicity and earthquake potential of the region was previously investigated by Aydan and Kumsar (2015). Many fault outcrops in Efes and Kuşadası, their inferred faulting (focal) mechanisms, magnitude, length and major strong motion parameters of the faults in the region were investigated. Figure 3 shows the focal mechanisms for Efes fault and the fault at Alkoç Holiday Complex inferred using Aydan's method (Aydan 2000, 2020). It is of great interest that the inferred focal mechanisms are almost the same as those inferred by major national and global seismic institutes from seismic waves. In other words, the outcrops of the faults on land give some insight view on the past events as well as the future potential events. On the basis of faulting mechanism, it is very likely that the shores in north (Sığacık, Gümüldür) and in south (Sisam Island) would be uplifted while the shore in Kuşadası and its close vicinity would slightly subsides as Kuşadası is located close to the east end of the faults.

3. OBSERVATIONS ALONG SHORES

Kumsar et al. (2020) surveyed the earthquake affected area. In Doğanbey and Gümüldür shores which are at the northern side of the Kuşadası Bay, the uplift of shores and retreated sea-front was observed (Figure 4). These observations are interpretted as indicators of the permanent ground deformation due to faulting and crustal deformations. There are some evaluations utilized InSAR or DInSAR method using Sentinel I and Alos-2 SAR images. As the movements are quite difficult to evaluate accurately due to the inherent characteristics of the electro-magnetic images, no decissive ground deformation were evaluated.

Figure 4. Uplift and retreated sea fronts at the shores of Doğanbey and Gümüldür (Kumsar et al., 2020).

4. EVALUATION OF PERMANENT DEFORMATION

Erratic Pattern Screening (EPS) method was proposed by Aydan and Ohta (2011) (see also Aydan 2016 for details) to evaluate the permanent displacement from strong motions. The method divides a given record into three parts as illustrated in Figure 5. As all strong motion stations has some threshold for triggering level and certain level of electronic noise, filtering has been applied to the first part and third part while the records directly integrated within the part 2, which is associated with rupture duration and time difference of p-wave and s-wave. The numerical integration technique utilizes the linear acceleration method.

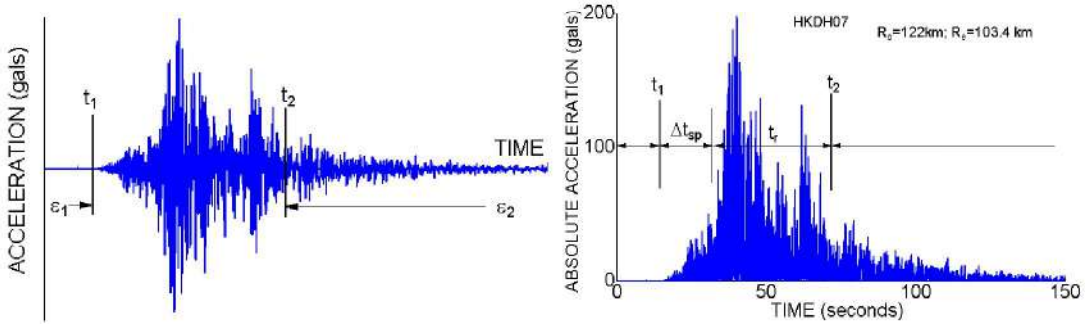


Figure 5: Definition of sections in the EPS method to HKDH07 record obtained during the 2003 Tokachi-oki earthquake (from Aydan 2016).

The EPS method has been applied to strong motion records at Seferihisar, Didim, Kuşadası of Turkish National Strong Motion Network and Sisam (Samos) of Greek National Strong Motion Network (Figure 6). The values of parameters of the EPS method have been shown in each respective figure (Figure 7). Seferihisar was displaced NE direction while Kuşadası subsided and moved west towards the hypocenter. The movements of Sisam and Didim are NW with some subsidence although uplift could be expected at these stations. The movements also imply that lateral component was dextral and it is similar to the faults observed at Efes and Kuşadası.

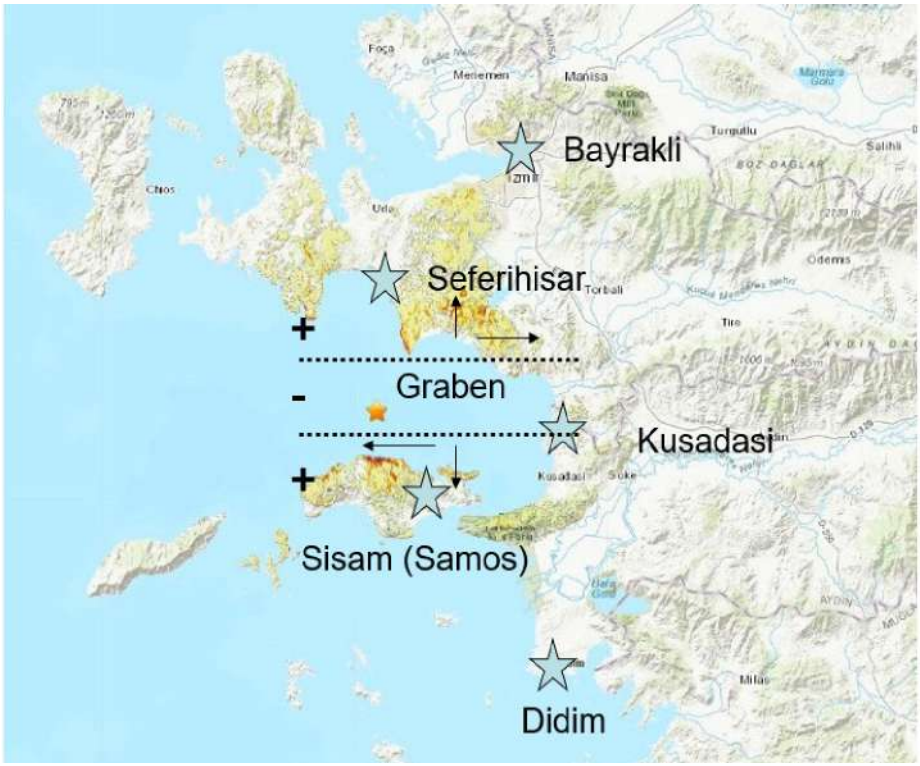
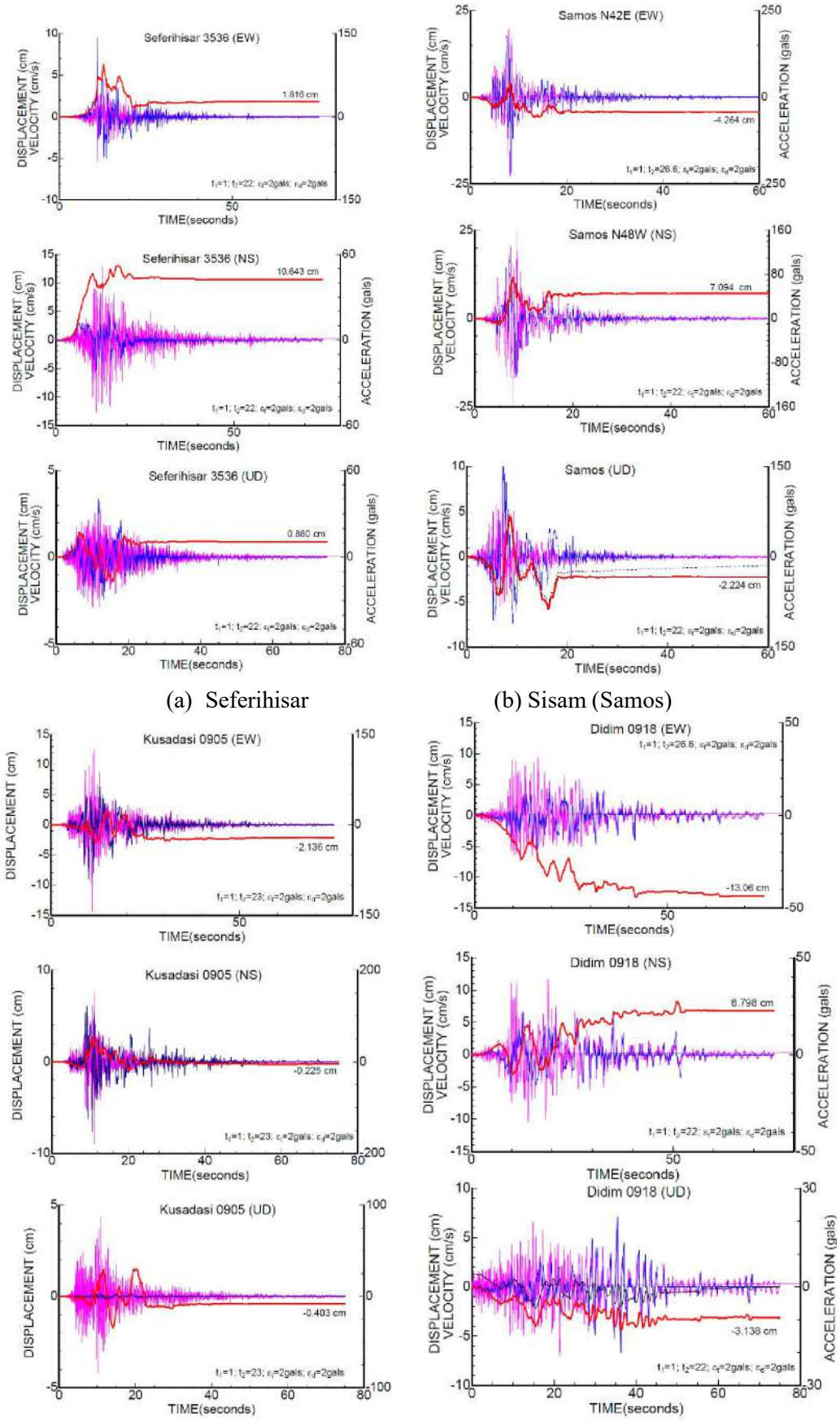


Figure 6. Locations of strong motion stations utilized in this study

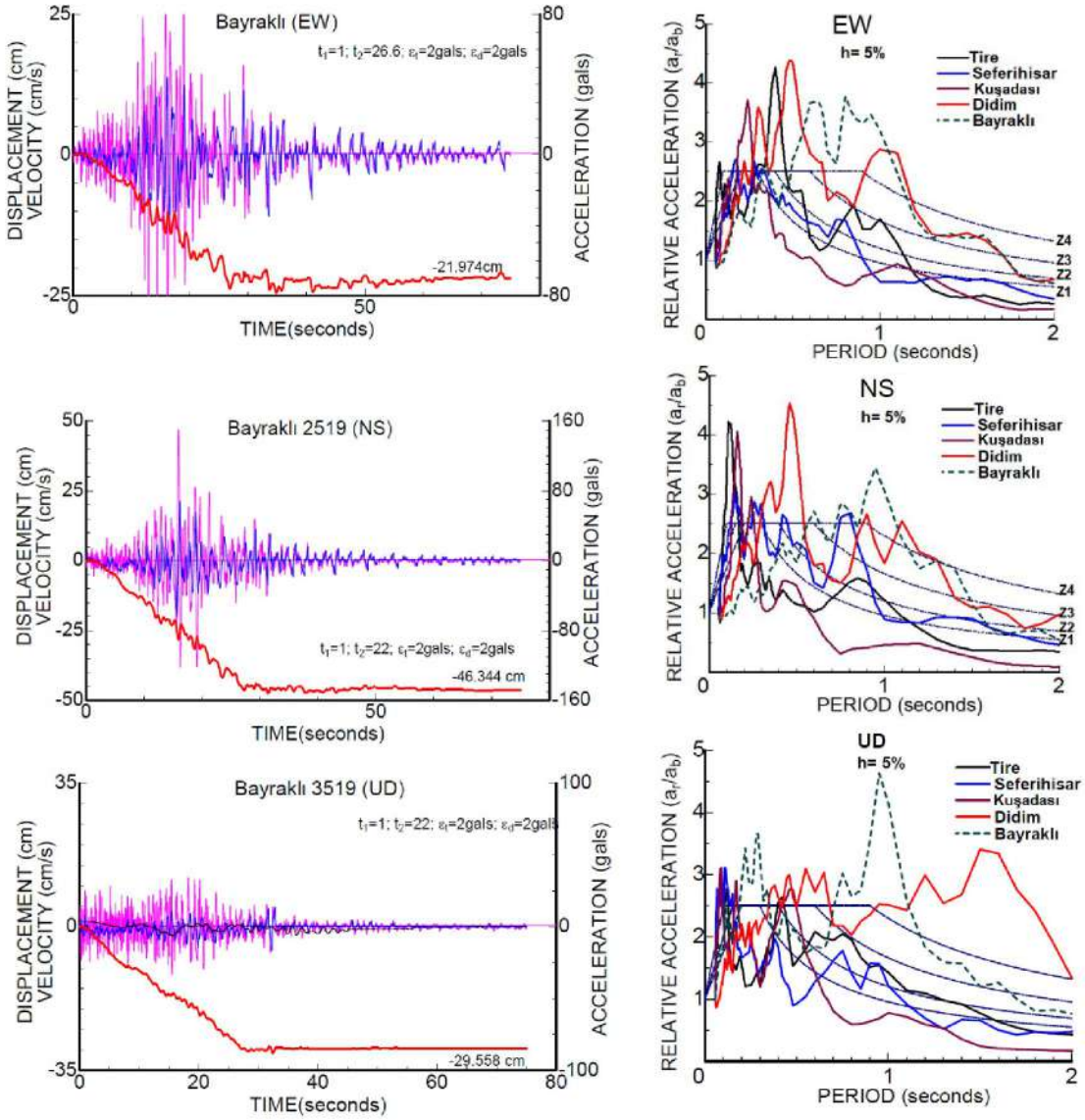


(a) Seferihisar (b) Sisam (Samos)

(c)Kuşadası (d) Didim

Figure 7: Integrated ground displacement time-series at selected stations.

The structural damage was quite extensive in the northern part of İzmir Bay and it is well known that ground mainly consists of thick clay, silt and sandy layers. Mainly apartments with 8-10 floors were damaged and some of them failed in pancake mode or completely collapsed at the ground floor. The shear wave velocity of the station (Code No. 3519) is 131 m/s and the estimated natural period of the ground is likely to be within the range of 0.7 and 0.9 s. The ground moved 51 cm in SW direction and subsided more than 29 cm as seen from Figure 8(a). Furthermore, the duration of ground shaking continued up to 40 seconds compared to the total duration of rupture period and arrival time difference of s-wave and p-waves of 26.6 seconds. Figure 8(b) shows the acceleration response spectra of various strong motion stations in the epicentral area. As noted from Figure 8(b), the dominant periods range between 0.7 and 0.9 seconds. Furthermore, the results imply that almost 3.7 times higher accelerations acted on the structures having a natural period of 0.7 and 0.9 seconds, which roughly corresponds to 8-10 story RC buildings. These results clearly confirm why the structural damage was quite heavy at Bayraklı district.



(a) Integrated displacement (b) Acceleration response spectra

Figure 8. Integrated displacement time-series at Bayraklı and acceleration response spectra at several selected strong motion station in the epicentral area.

5. CONCLUSIONS

The authors computed permanent displacement from some selected acceleration records in the epicentral area of the October 20, 2020 Kuşadası Bay earthquake. The anticipated ground movements are generally accordance with computational results except the ground subsided in the southern part. Probably further investigations may be necessary for such a discrepancy and one of the possible reasons might be related to the ground conditions at these stations. In addition, permanent ground deformation is evaluated at Bayraklı district on the northern part of İzmir Bay. The ground moved more than 51 cm towards the sea (SW direction) and subsided more than 29 cm. Furthermore, the dominant frequency of ground is likely to be similar to those of 8-10 story RC buildings. The heavy structural damage in this district is likely to be the similarity of natural periods of ground and RC buildings.

6. REFERENCES

AFAD (Disaster and Emergency Management Presidency), 30 Ekim 2020 Ege Denizi, Seferihisar (İzmir) Açıkları (17,26 Km) Mw=6.6 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, 2020; 10 sf.

Aydan, Ö., 1997. Seismic characteristics of Turkish earthquakes. *Turkish Earthquake Foundation*, TDV/TR 97-007, 41 pages.

Aydan Ö (2000) A stress inference method based on structural geological features for the full-stress components in the earth' crust. Yerbilimleri, 22: 223-236.

Aydan, Ö. 2012. Ground motions and deformations associated with earthquake faulting and their effects on the safety of engineering structures. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, R. Meyers (Ed.), 3233-3253.

Aydan, Ö. 2016. Some Considerations on a Large Landslide at the Left Bank of the Aratozawa Dam Caused by the 2008 Iwate–Miyagi Intraplate Earthquake. Rock Mech Rock Eng., 49:2525–2539

Aydan, Ö. 2020. 'Chapter 7: In-situ stress estimation, measurement and inferences' in Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 1, Fundamentals. CRC Press 379p.

Aydan Ö., Kumsar, H. 2015. Assessment of the earthquake potential of the west Aegean region of Turkey based on seismicity, tectonics, crustal deformation and geo-archaeological evidence and its geotechnical aspects, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74:1037-1035

Aydan Ö., Ohta, Y. 2011. The erratic pattern screening (EPS) method for estimation of co-seismic deformation of ground from acceleration records and its applications. In: Proceedings of the 7th National Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, Paper No. 66, 1–10.

KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute), 30 Ekim 2020 Ege Denizi Depremi Basın Bülteni, 2020; 8 sf.

Kumsar, H., Aydan, Ö., Semiz, B. 2020. 30 Ekim 2020 İzmir Seferihisar Depreminin Mühendislik Değerlendirmesi. Yer Mühendisliği, No. 15, 42-51.

Ulusay, R., Aydan, Ö. 2005. Characteristics and geo-engineering aspects of the 2003 Bingöl (Turkey) earthquake. J. Geodynamics of Europe, 334-346.

USGS, 2020. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/

Gürpınar Pekmez (Beylikdüzü—İstanbul) Büyükçekmece Körfezine Bakan Yamaçta Gelişmiş Kütle Hareketinin Mekanizması ve Analizi

Analysis and Mechanism of the Mass Movement in the Gürpınar Pekmez (Beylikdüzü-Istanbul) Slope Facing Büyükçekmece Bay

B. Çıkrıkcı[1], K. Tolun[1,*], S. Çetin[1], G. Şans[1], Y. Mahmutoğlu[1]

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye (*tolunkardelen@gmail.com)*

ÖZ: İstanbul Beylikdüzü ilçesinin güneybatısında bulunan Gürpınar yerleşkesini tehdit eden ve yerleşilmiş kısımlarda hasara neden olan yamaç hareketinin türü ve mekanizmasının ortaya konması amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle inceleme alanındaki yamacın duraylılığını denetleyen; jeolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik ve jeomekanik özellikler belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, bölgede daha önce sürdürülen çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanılmış, Pekmez ve civarının mühendislik jeolojisi haritası ve kesitleri hazırlanmış, yamacın duraylılığı etkileyen mühendislik özellikleri derlenmiştir. Hareketin mekanizmasının belirlenmesi için oluşturulan iki boyutlu sayısal kesitler analiz edilmiştir. Arazi izleme verileri ve laboratuvar deneyleri birlikte göz önünde tutularak, sahadaki gözlemlere uygun sonuçlar elde edilinceye kadar, model parametrelerinde değişiklikler yapılarak analizler tekrarlanmıştır. Hareketin arazideki kalıcı belirtileri ve analiz sonuçları derin akmaya işaret etmektedir. Statik ve dinamik koşullar öngörülerek yapılan sonlu elemanlar analizlerinden yamacın duraylılığında susuzlaştırma ile önemli bir iyileşme sağlanabileceği ve hareketin etkilerinin sınırlandırılabileceği saptanmıştır. Bu tespitten hareketle, yamacın stabilitesinin sağlanması için derin susuzlaştırma sistemi tasarlanmış, bu tür bir uygulamanın yaklaşık maliyeti hesaplanarak uygulanabilirliği irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yamaç, Stabilite, Derin krip, Susuzlaştırma.

ABSTRACT: *In this study, it is aimed to establish the type and mechanism of the slope movement that threatens the Gürpınar campus in the southwest of Istanbul Beylikdüzü district and causes damage to the settled parts. For this purpose, primarily factors controlling the stability of the slope; geological, geomorphological, hydrogeological and geomechanical properties have been determined. Within the scope of the study, borehole data obtained from previous studies in the region were used, engineering geology map and geological sections of Pekmez and its surroundings were prepared, and important characteristics affecting the stability of the slope were compiled. Two-dimensional numerical sections created to determine the mechanism of movement were analyzed. By taking into account the site monitoring data and laboratory experiments together, the analyses were repeated by making changes to the model parameters until the results were obtained in accordance with the observations. The permanent signs of movement on the land and the results of the analysis indicate a deep seated flow. From the finite elements analysis performed with static and dynamic conditions predicted, it was concluded that a significant improvement can be achieved by dewatering of the slope and the effects of movement can be limited. In order to ensure the stability of the slope, a deep dewatering system was designed and aproximate costs of the deep dewatering system were compared for two different cases.*

Keywords: *Slope, Stability, Deep creep, Dewatering.*

1. GİRİŞ

Çalışmada Beylikdüzü (İstanbul) ilçesinin güneybatısında bulunan Gürpınar yerleşkesini tehdit eden ve yerleşilmiş kısımlarda hasara neden olan yamaç hareketinin mekanizmasının araştırılması, uzun vadedeki kalıcı etkilerinin ve alınabilecek önlemlerin belirlenmesi, arazi gözlemleri ile önceki çalışmalardan elde edilen araştırma ve izleme verilerinin ışığında, yamaçta geçerli kritik sınır koşullarının belirlenmesi ve bütüncül değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Arazide belirlenecek sınır

koşullarından hareketle kavramsal ve sayısal jeolojik model oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde bölgenin depremselliği de göz önünde bulundurulmuş olup, analiz sonuçlarına göre bölgedeki hareketin mekanizması açıklanmıştır. Bölgede yer alan yapı stoğu üzerindeki hareketin olumsuz etkilerinin sınırlandırmaya yönelik uygulamalar analiz edilerek en uygun mühendislik çözümü önerilmiştir.

2. PEKMEZ YAMACINDA GEÇERLİ SINIR KOŞULLARI

2.1. Konum ve Morfoloji

Konum olarak Marmara Bölgesi'nin kuzeyinde, Çatalca-Kocaeli Bölümü'nde Çatalca Yarımadası üzerinde ve İstanbul'un batısında yer almaktadır. Beylikdüzü; 41° 00' 33.57" – 40° 57' 37.69" kuzey enlemleri, 28° 35' 42.47" – 28° 41' 58.03" doğu boylamları arasında yer almaktadır ve yüz ölçümü 3.721 hektardır. İnceleme alanı olan Pekmez bölgesi, Beylikdüzü'nün Gürpınar beldesine bağlıdır. Toplam yüzey alanı 1800 hektardır. İlçenin yerleşim alanı, Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri arasında yüksek bir düzlük şeklinde olmakla birlikte, akarsularla yarılmış platolar ve bunların yamaçlarından oluşmaktadır. İnceleme alanının yükseltisi, ortalama olarak fazla olmayıp, güneyden kuzeye gidildikçe artmaktadır. Heyelanlara neden olan yükselti farkı kıyı bölgelerindeki doğu batı uzanımlı alanlarda görülür. Bölgenin, batı ve güney kısımlarında eğim yüzdesinin oldukça arttığı gözlenmektedir. Pekmez bölgesini güneybatıya bakan yamaç oluşturur. Büyükçekmece Körfezi'ne komşu sahil kesimi yataya yakın dolgu alanlarından oluşmaktadır.

2.2. Jeoloji

Beylikdüzü ilçesi farklı litolojik birimlerden oluşmaktadır. İnceleme alanı Oligosen'den günümüze kadar uzayan zaman aralığında oluşmuş kaya-stratigrafi birimlerini kapsar (Özgül, 2011, Duman vd, 2004). Bölgede, İstanbul Formasyonu (Kıraç Üyesi), Çekmece Formasyonu (Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy Üyeleri) ve Danişmen Formasyonu (Gürpınar Üyesi, Çantaköy Tüf Üyesi) olarak bilinen birimler yüzeylemektedir. İnceleme alanında ise Danişmen Formasyonu'nun (Td) Gürpınar Üyesine (Tg) ait kiltaşı-kumtaşı-tüfit birimler ve bu birim içinde gelişmiş ve arazinin üst kısımlarını örten heyelan malzemesi niteliğindeki çakıl, kum, kil, siltten oluşan birimler bulunmaktadır. Ayrıca, Büyükçekmece Körfezi'ne komşu ve sahile yakın kıyı şeridi boyunca dolguların (Qd) olduğu belirlenmiştir.

2.2.1. Gürpınar Üyesi (Tg)

Genellikle, gevşek tutturulmuş mil-taşı ve kumtaşı ara katkılı kiltaşı-şeyl türü ince kırıntılılardan oluşur. Bazı kesimlerde tüf-tüfit ve seyrek olarak ince kömür ara düzeyleri bulunur. Gürpınar Üyesi, ince kum ara katkılı başlıca kil-mil boyu kırıntılı gereçten oluşur. Üyenin içinde yer yer kum mercekleri bulunmaktadır. Gürpınar Mahallesi'nde formasyon, çapraz katmanlı kumlarla başlayıp, pembe tüf-tüfit düzeyleri kapsayan kırmızı çamur ve killerle sona eren devresel çökelme birimlerini içerir; bazı devresel birimlerin üst kesimlerinde ince linyit ya da karbonca zengin kil ve Congeria'lı kireçtaşı düzeyleri yer alır (Ercan, 1990). İncelenen yamaçta, bu birimi örten paleoheyelan malzemesi kalınlığının yer yer 50 m'yi aştığı belirlenmiştir (Geomek, 2020).

2.3. Hidrojeoloji

İnceleme alanında mostra veren birimler hidrojeolojik olarak Geçirimli (Gç), Yarı Geçirimli (gç), Yarı Geçirimsiz (gz) ve Geçirimsiz (Gz) olarak 4 sınıfa ayrılmıştır. Şans (2020), bölgedeki geçirimsiz seviyelerin, kuzeyden güneye doğru kot kaybettiğini ve giderek derinleştiğini belirtmektedir. Gürpınar Üyesi genel olarak kiltaşı-şeyl ve aşırı konsolide killerden oluştuğu için geçirimsiz olarak tanımlanmıştır. Kum merceklerinin bulunduğu kısımlar ise geçirimli olarak adlanabilir. Gürpınar Üyesi tüf-tüfit seviyelerinin varlığı nedeniyle hidrojeolojik açıdan yarı geçirimli, yarı geçirimsiz olarak adlandırılmaktadır.

2.4. Yamaç Stabilitesi ve Depremsellik

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, Gürpınar çevresindeki kütle hareketlerinin, Çukurçeşme Formasyonu'na ait kum ve çakıl birimlerindeki yeraltı suyunun, Gürpınar Üyesi'ne ait killi düzeyleri beslemesi sonucu oluştuğu ileri sürülmektedir. Bölgedeki duraysızlık sorununun önemli sebeplerinden biri yeraltı ve yer üstü sularıdır. Su, zeminin kayma mukavemetini düşürdüğünden, kütle hareketlerine hızlandırıcı etki yapmaktadır. İnceleme alanında birçok keson ve sondaj kuyularında yeraltı suyuna rastlanmış, bu kuyulardan yeraltı suyu çekimlerinin etkili bir drenaj işlevi görmedikleri anlaşılmıştır. Bölgedeki kütle hareketi eğimi %5 ile 25 derece arasında değişen yamaçta meydana gelmektedir (Demirci ve diğ., 2011). Bu çalışmaya konu olan Pekmez bölgesi dışında, birbirine yakın alanlarda aktif oldukları bilinen Çukurlar, Pınarkent ve Onbeşevler heyelanları da bulunmaktadır. Bölge, Kuzey Anadolu Fay Hattı' nın etkisi altındadır ve bu fay zonuna en yakın mesafesi yaklaşık 17 km'dir. Ağustos 17 1999 Depremi'nde yakın bir istasyonda ölçülen yer ivmesi değeri 0,21 g'dir. Bu proje kapsamında yapılan analizlerde bu değer kullanılmıştır.

3. JEOMEKANİK ÖZELLİKLER

İnceleme alanında geçerli zemin koşullarının belirlenebilmesi, zemin ve kaya türlerinin mühendislik jeolojisi açısından özelliklerinin ve düşey yöndeki dağılımlarının belirlenebilmesi için Geomek (2020) tarafından rötari sondaj sistemi tekniği kullanılarak 49 adet jeoteknik araştırma sondajı açılmıştır.

3.1. Arazi Deney ve Ölçümleri

Araştırma sondajlarında Gürpınar Üyesi'nin örselenmiş sığ kısımlarında 1,5 metre aralıklarla Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) yapılmıştır. İnceleme alanında Geomek tarafından yapılan SPT deneylerinden elde edilen verilere göre SPT-N_{30} değerleri kil ve siltten oluşan kohezif zeminlerde 7-75 arasında değişirken, kum ve çakıl türü kohezyonsuz zeminlerde ise 20-Refü aralıklarında değişmektedir. İnceleme alanında yapılan SPT deney sonuçları incelendiği zaman, N_{30} değerleri ile derinlik arasında zayıf bir ilişkinin varlığı görülmektedir. Bununla birlikte rölatif sıkılık değerlerinin de derinlikle arttığı görülmektedir.

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

Yapılan laboratuvar deney sonuçları incelendiğinde plastisite indisi değerleri Gürpınar Üyesi'ne ait killerin makroskopik ve mezoskopik özellikleri volkanik kökenli içerikleri göz önünde bulundurulduğunda, kıvam limitlerinin yüksek olmasının montmorillonit mineralinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

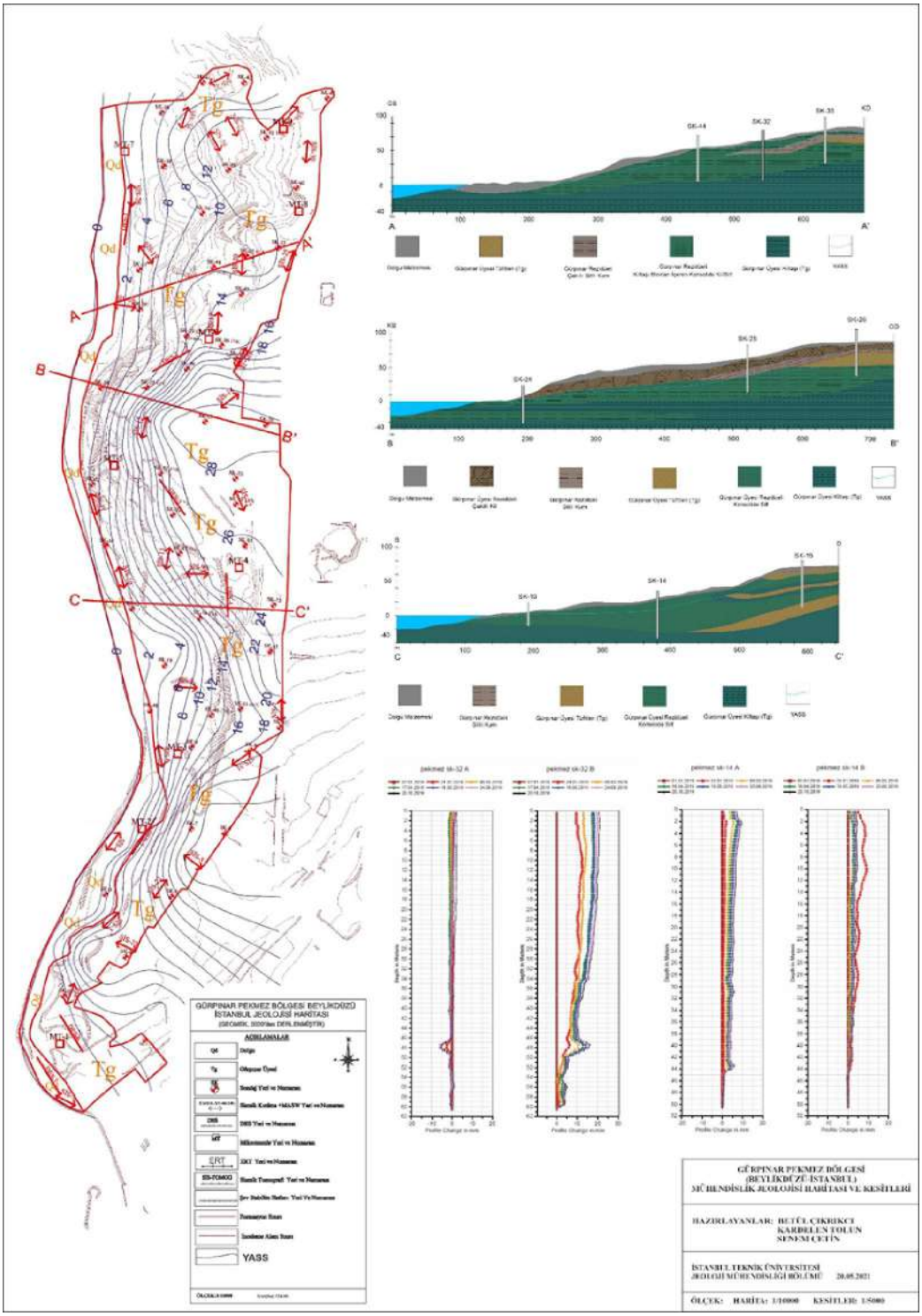
4. KAVRAMSAL MODEL VE SAYISAL ANALİZ

4.1. Mühendislik Jeolojisi Modeli

Yerinde yapılan incelemeler sırasında incelenen yamacın arkasında dike yakın çıkıntı oluşturan ve bir yay gibi uzayan morfolojik anomali paleoheyelan düzlemi olarak değerlendirilmiştir. Bu yüzeyin batısında bulunan ve yamaca doğru uzayan bölgede ise yavaş akmaya işaret sayılabilecek dönme belirtileri sıkça gözlenir. Şekil 1'de inceleme alanının mühendislik jeolojisi haritası, inklinometre kuyularında yapılan izleme ölçümlerinin sonuçları ve yamaç eğimi yönünde alınmış jeolojik kesitler verilmiştir.

4.1.1. Sayısal model

Analiz edilecek kritik kesitler, önceki çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirilerek, mevcut hareketin yönü de dikkate alınarak seçilmiştir. İki boyutlu geometrik modelin uzunluğu inceleme alanının sınırlarını kapsayacak şekilde alınmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının mühendislik jeolojisi haritası.

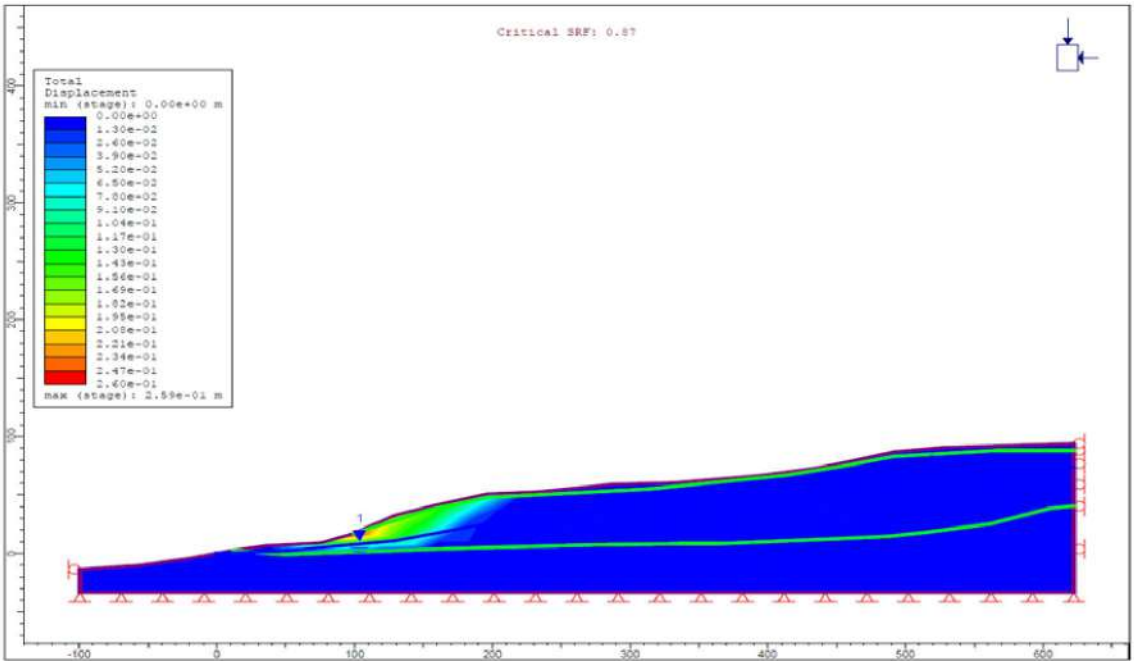
4.1.2. Sonlu elemanlar yöntemiyle stabilite analizi

Sayısal modeller, 4 farklı senaryo baz alınarak, İTÜ Bilgi İşlem Daire Başkanlığı lisanslı sonlu elemanlar yazılımı Phase V9 yardımıyla Mohr-Coulomb yenilme kriterine göre analiz edilmiştir. Analizlerde önce sondajlardan elde edilen değerler kullanılmıştır. Ancak, yerinde kuyu içi ve laboratuvar deneylerden elde edilen değerlerden hareketin hızı ve miktarı saha gözlemleri ve inklinometre ölçümleriyle uyumsuz sonuç vermiştir. Bu nedenle inklinometre ölçümlerinden elde

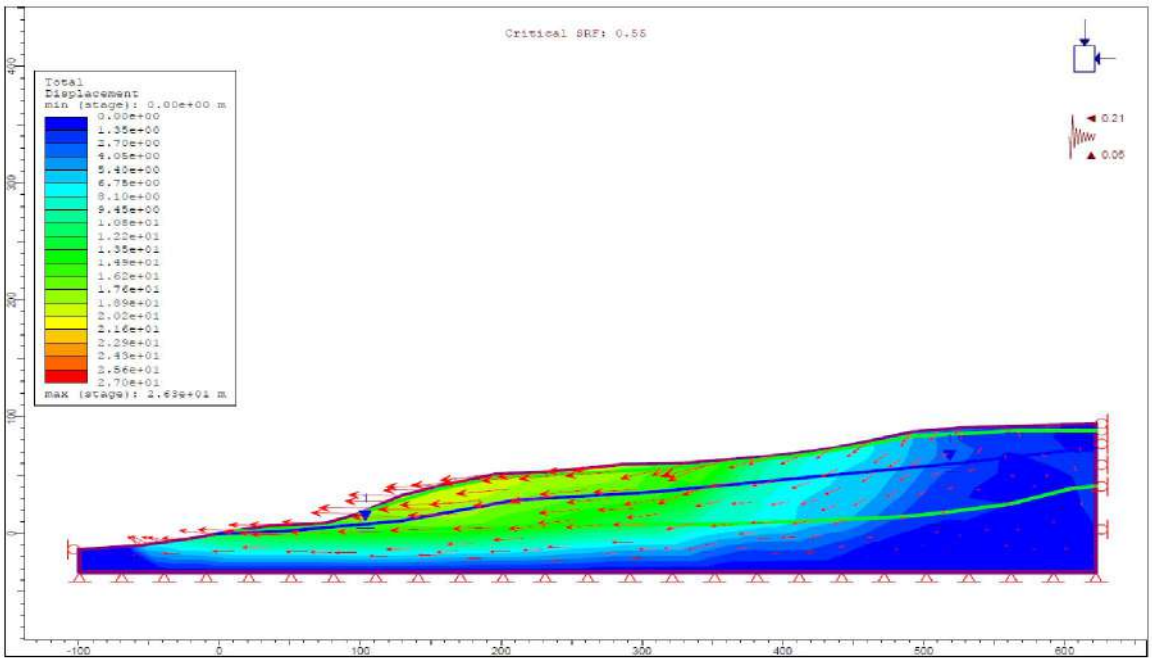
edilen değerlere uygun sonuçlar elde edilinceye kadar, zemin özelliklerinde iyileştirme yapılarak çözümler tekrarlanmıştır.

Analizlerde göz önünde tutulan 4 farklı senaryo;

Senaryo 1: Yamacın uzun dönem (drenajlı) durumu (uzun dönem)
Senaryo 2: Yamacın doğal hali-dinamik durum (kısa dönem)
Senaryo 3: Yamacın yeraltı suyunun düşürüldüğü durum (uzun dönem)
Senaryo 4: Yamacın yeraltı suyunun düşürüldüğü dinamik durumu (kısa dönem)

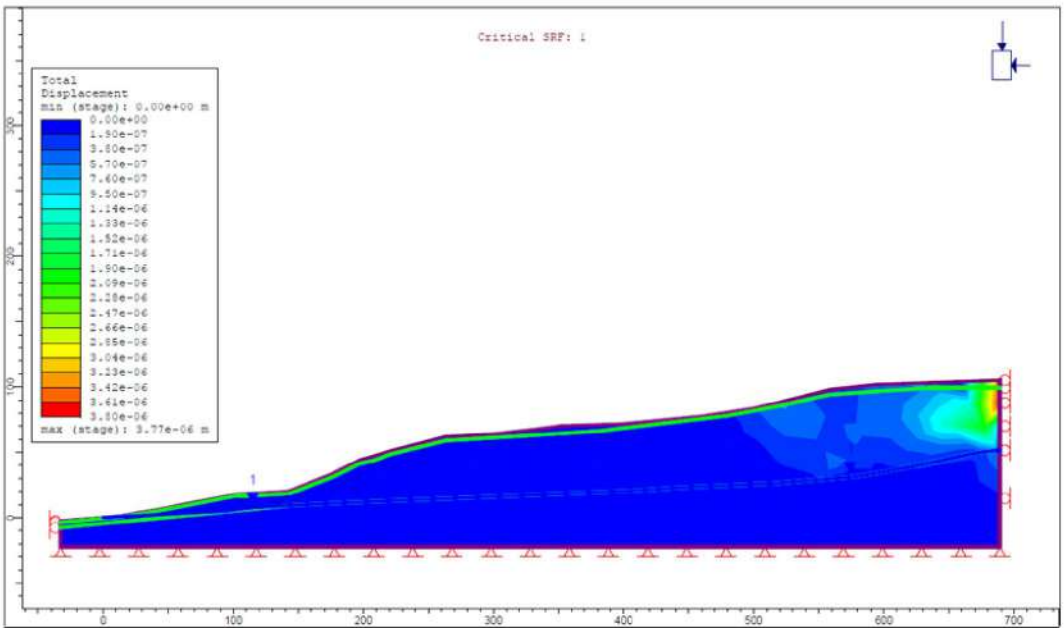


Şekil 2. Senaryo 1 için toplam yer değiştirmeler.



Şekil 3. Senaryo 2 için toplam yer değiştirmeler.

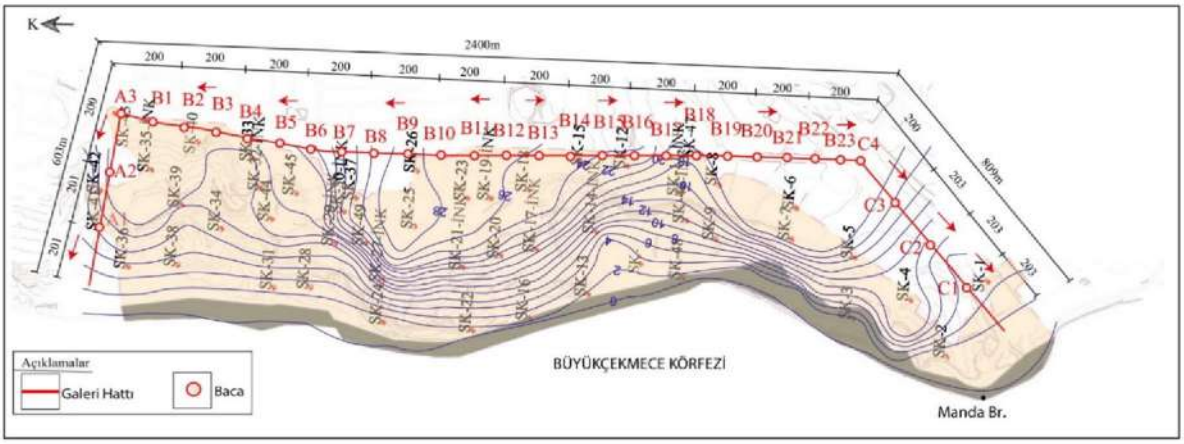
Sonlu elemanlarla yapılan analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Senaryo 1 ile Senaryo 2 karşılaştırıldığında, deprem etkisiyle hareketin dönme merkezi daha derinde oluştuğu görülmektedir. Senaryo 3 olarak verilen yeraltı suyunun düşürüldüğü uzun dönemde, yamaçta kabul edilebilir düzeylerde oturmanın oluşacağı anlaşılmaktadır. Senaryo 1 ve Senaryo 3 karşılaştırıldığında yamaçta oluşan toplam yer değiştirme miktarının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi yamaç duraylılığının sağlanmasında etkili bir yöntem olacağı görülmüştür.



Şekil 4. Senaryo 3 için toplam yer değiştirmeler.

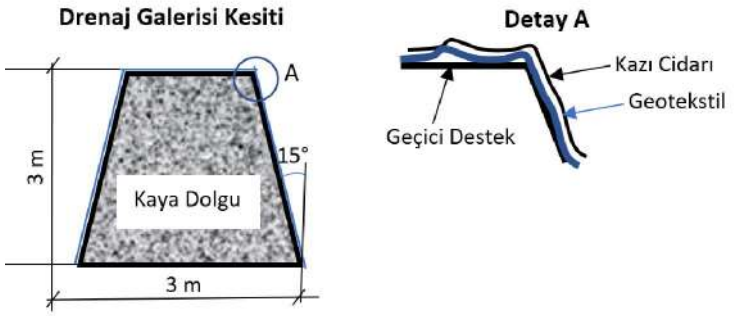
5. MEVCUT HAREKETLE MÜCADELE YÖNTEMİ

Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlardan, bölgedeki hareketin yamaç eğimi yönünde yavaş akmaya karşılık geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, aynı zamanda susuzlaştırma işleminin yamaçtaki stabiliteyi sağlama açısından yeterli bir uygulama olabileceğini göstermektedir. Bölgedeki hareketin mekanizması ve yukarıda açıklanan analiz sonuçları birlikte göz önünde tutularak, Pekmez bölgesindeki yamaç hareketinin önlenmesine yönelik galeri ve bacalardan oluşan susuzlaştırma sistemi tasarlanmış ve önerilmiştir

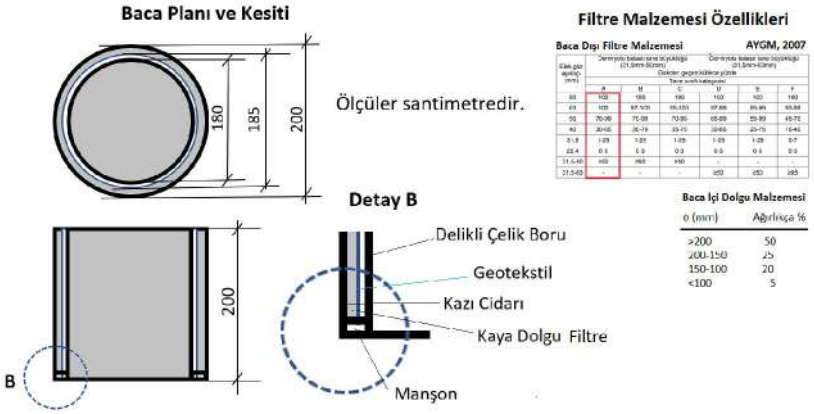


Şekil 5. Susuzlaştırma galerileri ve bacaların konum ve numaraları.

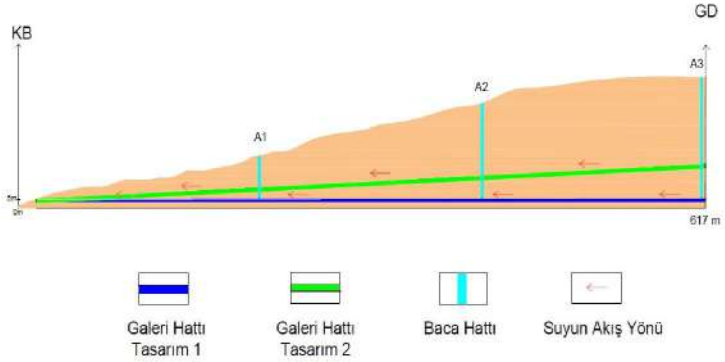
Şekil 5'teki A, B ve C eksenleri denize bakan giriş kısımlarında galeri kotları 5 m olarak seçilmiştir. Üst kotlarda yeraltı suyu taşıyan ve ileten kum bantlarını drene etmek için tasarlanan düşey bacaların ise galeri kotuna kadar ulaşması görülmüştür. Tasarlanan drenaj galerisi en kesiti Şekil 6'da, baca planı ve en kesiti ise Şekil 7' de verilmiştir. Galeri hattının tabandaki genişliği ve yüksekliği 3 metre, bacaların çapı ise 2 metre olarak tasarlanmıştır. Bölgede, yeraltı suyunun akım yönü dikkate alınarak A ve C galeri eğimleri batıya doğru alınmıştır. Susuzlaştırma sisteminin maliyetini düşürmek için bacalar 200 metre aralıklarla yerleştirilmiştir. B galeri hattında ise, yeraltı suyunun akım yönüne dik galeri ortasından eğim her iki tarafa olacak şekilde planlanmış, bacalar arası mesafe yarıya (100 m) düşürülmüştür. Maliyet analizi ise galeri eğimleri %0,2 (Tasarım 1) ve %5 (Tasarım 2) olacak şekilde öngörülmüş, hesaplanan maliyetler arasında %20'ye varan farkın oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Susuzlaştırma amaçlı tasarlanan drenaj galerilerinin geometrisi.



Şekil 7. Susuzlaştırma amaçlı tasarlanan bacaların projesi.



Şekil 8. İki farklı eğimde tasarlanan A galerisi ve bacaların yerleşimi.

Hareketle mücadeleye yönelik tasarlanan derin drenaj ağının toplam maliyeti Tasarım 1 için yaklaşık 24 milyon TL, Tasarım 2 için ise yaklaşık 20 milyon TL'dir. Bu maliyetler güncel fiyatlar için geçerlidir. Susuzlaştırma sisteminin kesin projelendirilmesi aşaması için daha detaylı bir çalışmanın yürütülmesi önerilmektedir.

6. SONUÇLAR

İncelenen yamaçta çok yavaş akma (<1 cm/yıl) hareketinin devam ettiği, bu nedenle yapı hasarlarının uzun dönemde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu nedenle, bölgedeki kütle hareketiyle uzun vadeli bir mücadele gerektirdiği görülmüştür. Bu durum öngörülerek yapılan analizlerden, yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesinin uygun bir seçenek olacağı ortaya çıkmıştır. Galeri ve bacalardan oluşan bir susuzlaştırma sisteminin kalıcı stabilitenin sağlanması açısından pratik olacağı açıktır. Derin susuzlaştırma uygulaması dışında, daha düşük maliyetli seçenekler göz önünde tutularak, arazi kullanımına kısıtlamalar getirilebileceği bilinmektedir. Yamaç hareketinin çok yavaş olması nedeniyle, bölgede geçici, esnek ve hafif yapıların inşa edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, arazinin park, fidanlık, çay bahçesi gibi günlük aktif yaşam alanı şeklinde değerlendirilebileceği açıktır.

7. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi aşamasında bölgeden elde edilen sondaj verilerinin kullanılmasına olanak tanıyan Beylikdüzü Belediyesine ve bölge ile ilgili deneyimlerini paylaşan Erdoğan CULFA'ya teşekkür ederiz.

8. KAYNAKLAR

Demirci, A., Karakuyu, M., İncekara, S. ve Karaburun, A., 2011. Gürpınar'daki Kentleşme Sürecinin Heyelan Riski Taşıyan Bölgelerdeki Yapılaşma Açısından Değerlendirilmesi.

Duman, T. Y., Keçer, M., Ateş, Ş., Emre, Ö., Gedik, İ. ve Karakaya, F., 2004. İstanbul Metropolü Batısındaki (Küçükçekmece-Silivri-Çatalca Yöresi) Kentsel Gelişme Alanlarının Yer Bilim Verileri. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Ercan, 1990. Gürpınar Bölgesinin Yer Mühendislik Projesi, Yer altı aramacılık Bilimsel Araştırma Şirketi, Cilt 1-2. İstanbul.

Geomek Mühendislik, 2020. "Beylikdüzü Belediyesi Pekmez Heyelan Havzasını İçine Alan Bölgenin İmar Planına Esas Jeoloji- Mühendislik Jeolojisi -Jeofizik Araştırmaları- Sondaj, Yerleşime Uygunluk ve Jeoteknik Araştırma Raporu", İstanbul: Beylikdüzü Belediye Başkanlığı Plan Proje Müdürlüğü.

Phase, V2, 2020. Rockscience, RS.

Özgül, N., 2011. İstanbul İl Alanının Jeolojisi. *İstanbul.*

Şans, G., 2020. İstanbul Büyükçekmece-Küçükçekmece Gölleri Arasının Mühendislik Jeolojisi Modeli ve Depremselliği. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (*Doktora Tezi Ara Rapor*).

TÜBİTAK MAM., 2016. "Beylikdüzü ve Büyükçekmece İlçelerindeki Muhtelif Heyelan Sahalarının Araştırılması, İncelenmesi ve İzlenmesi Projesi Sahalarının Araştırılması, İncelenmesi ve İzlenmesi Projesi."

Yamaç ve Şev Duraylılığı / *Stability of Natural and Cut Slopes*

Yusufeli Barajı ve HES Projesi Şalt Sahası Kazısı Kaya Şev Stabilitesi Hesaplarının Yapılması

Yusufeli Dam and HEPP, Switchyard Excavation Rock Slope Stability Calculations

M.Ö. Ünal[1, *], A. Kayabaşı[2]

[1]Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Çankaya/ANKARA
[2]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Odunpazarı/ESKİŞEHİR
*(*muozgehan@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Yusufeli Barajı ve HES Projesi, Artvin ili Yusufeli ilçesi sınırları içerisinde bulunmakta ve Çoruh nehri üzerinde yer almaktadır. Baraj, çift eğrilikli ince kemer beton tipinde inşa edilmekte olup yüksekliği 275 m'dir. Baraj aksı mansabı sağ sahilde projelendirilen şalt sahası, hidroelektrik üretimi açısında konumu ve inşası amacıyla önemlidir. Şalt sahasının çevresi dik bir topoğrafyaya sahip olması nedeniyle kazı sonrası kaya şevlerinde duraysızlık problemleri oluşabilecektir. Çalışma kapsamında pasif desteklemeler (kaya bulonu, püskürtme beton, çelik hasır gibi) ile duraysızlık tespit edilmiş olup ön germeli ankrajlar ile kazının duraylılığı sağlanmıştır. İki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile en kritik kaya şevinin duraylılığı ve toplam yer değiştirme miktarının kabul edilebilir olduğu görülerek, ön germeli ankrajların yeterliliği test edilmiştir. Bununla birlikte baraj işletme süresi boyunca bu şevlerin sürekli takibi önerilmektedir. Kazı sonrası ön germeli ankraj ve şev hareketliliği izlenmekte olup bugüne kadar herhangi bir problem gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Yusufeli Barajı, Şalt Sahası, Mühendislik Jeolojisi, Kaya Şev Stabilitesi, Ön Germeli Ankraj.

ABSTRACT: *Yusufeli Dam and HEPP project is located on the Coruh River in Yusufeli provice, Artvin. The dam is constructed a double-curvature arc dam and its height is 275 m. The switchyard projected on the right bank of downstream of the dam axis is significant for its location and construction steps terms of hydropower generation process. Instability problems may occur thorough the rock slope after excavation since the bed rock of switchyard has a steep topography. Within the scope of the study, the instability was determined with passive supports (such as rock bolt, shotcrete, and steel mesh) and the stability of the excavation was ensured with the prestressed anchors. With the two-dimensional finite element method, the stability of the most critical rock slope and the total displacement amount were found to be acceptable, and the adequacy of the prestressed anchors was tested. Additionally, the monitoring of this slope is recommended throughout the dam operation period. After the excavation, prestressed anchorage and slope movement are monitored and no problem has been observed to date.*

Keywords: *Yusufeli Dam, Switchyard, Engineering Geology, Rock Slope Stability, Prestressed Anchorage*

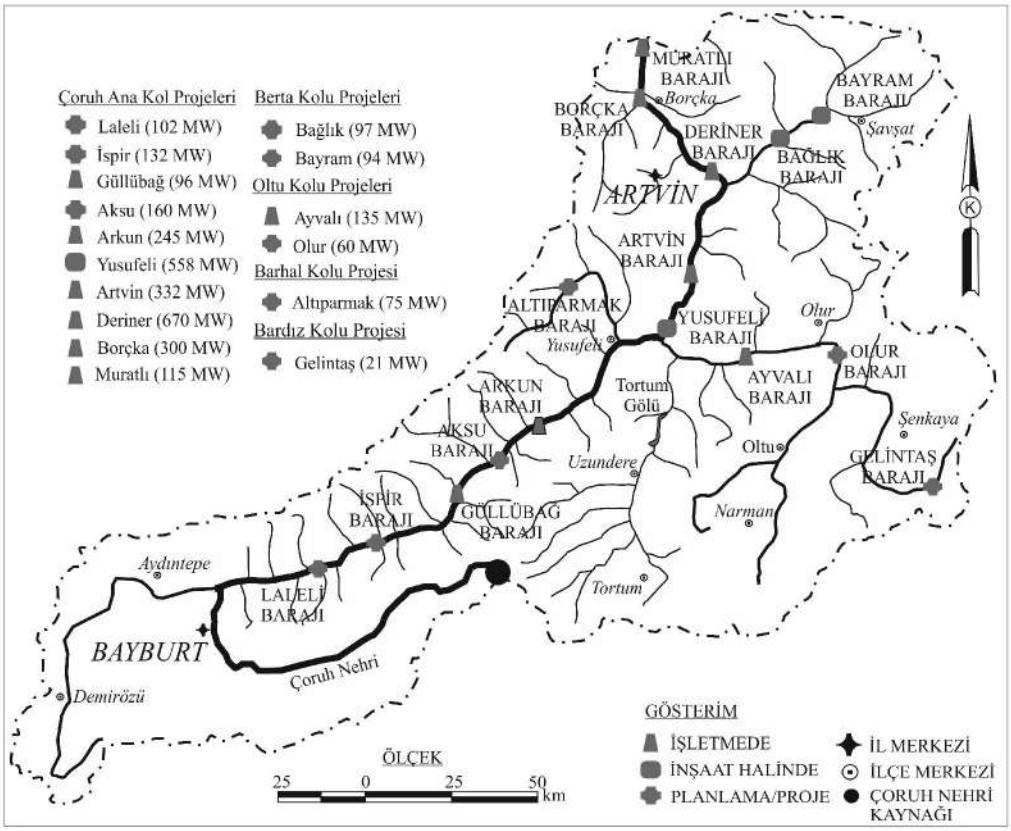
1. YUSUFELİ BARAJI VE HES PROJESİ

1.1. Proje Bilgileri ve Baraj Yeri Jeolojisi

Çift eğrilikli ince kemer beton baraj tipi olarak projelendirilen Yusufeli Barajı ve HES Projesi, Artvin ilinin 70 km GD'da ve Çoruh Havzası'nın en önemli projesi olarak gösterilmektedir (Dolsar, 2011) (Çizelge 1). Yusufeli Barajı tamamlandığında mansabında bulunan Artvin, Deriner, Borçka ve Muratlı barajlarına düzenli su temin edileceğinden, bu barajların işletilmesi kolay ve daha ekonomik bir hale gelecektir (Şekil 1).

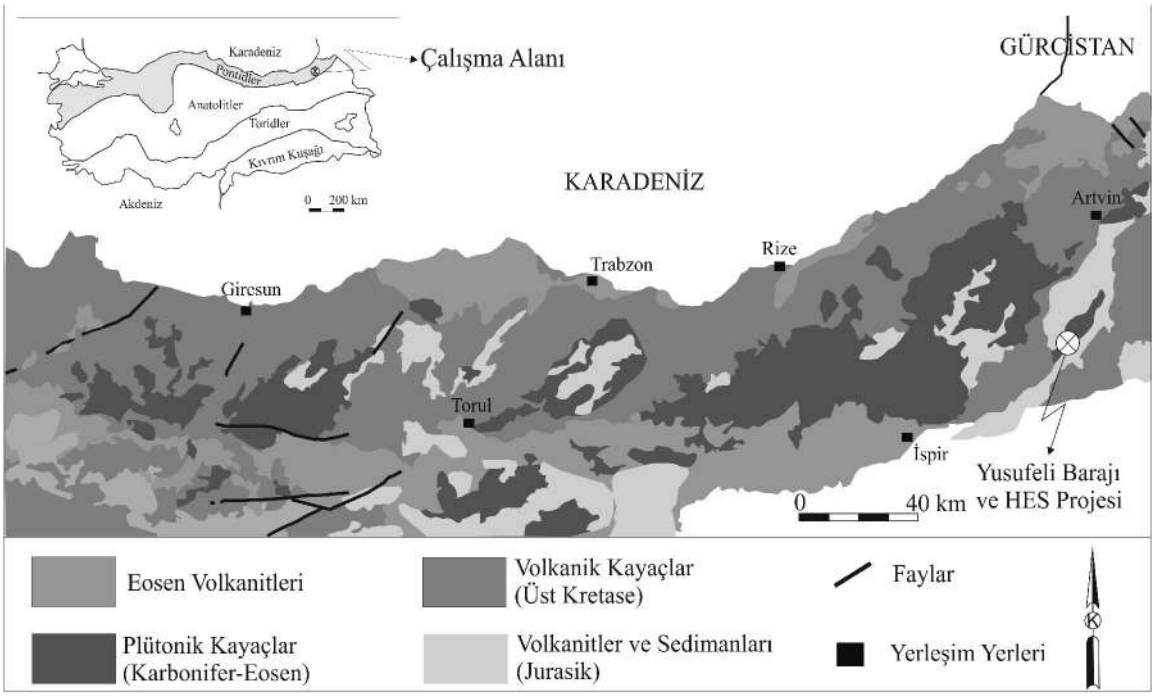
Çizelge 1. Yusufeli Barajı'nın genel özellikleri (Ünal, 2017).

Temel, talveg ve kret kotu (m)	440 m, 495 m ve 715 m
Talvegden ve temelden yükseklik (m)	220 ve 275 m
Kret genişliği ve kret uzunluğu (m)	8 ve 490 m
Gövde ve yastık betonu miktarı (m^3)	4 milyon m^3



Şekil 1. 23 numaralı Çoruh Havzası gelişim/master planı (Ünal, 2017).

Baraj aksı ve çevresi; oldukça dik bir topoğrafyaya sahiptir. Jeolojik açıdan bu kesim, Pontidler adı ile tanınan (Ketin, 1966) tektonik bölümün doğusunda yer alır (Şekil 2).

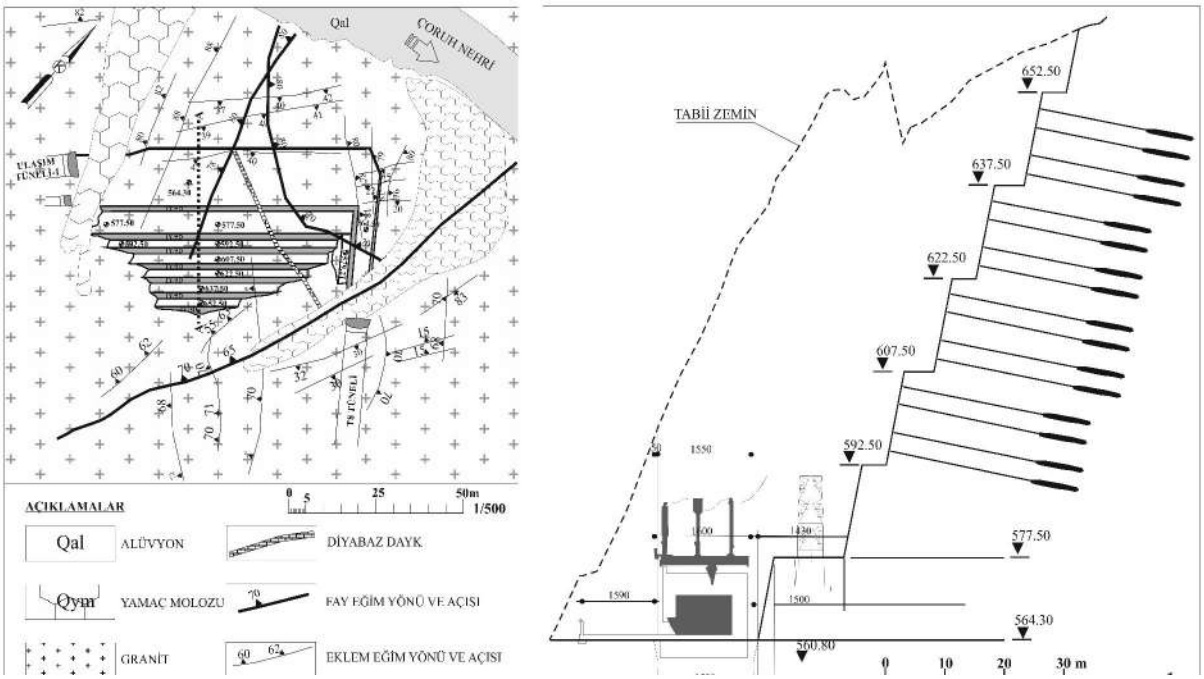


Şekil 2. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin yalınlaştırılmış jeoloji haritası (Güven, 1993).

Orta Çoruh Havzası'nda yer alan Yusufeli Barajı ve göl alanını çevreleyen bölgede, Alt Jura'dan Üst Kretase'ye kadar birimler yer almaktadır. Baraj aksı, Rize Plütonu içerisindeki Tersiyer yaşlı granitik kayalar üzerinde yapılmaktadır. Bu birimler değişik kalınlıklarda diyabaz daykları ile kesilmiş granit, granodiyorit ve tonalit grubundan oluşmaktadır. Yüzeye yakın kısımları genellikle kırıklı, derinlerde ise daha masif bir görünüme sahiptir. Baraj yerinde alüvyon kalınlığı yaklaşık 50 m olup her iki sahilde de ana kaya yer yer Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ile kaplıdır (Dolsar, 2011).

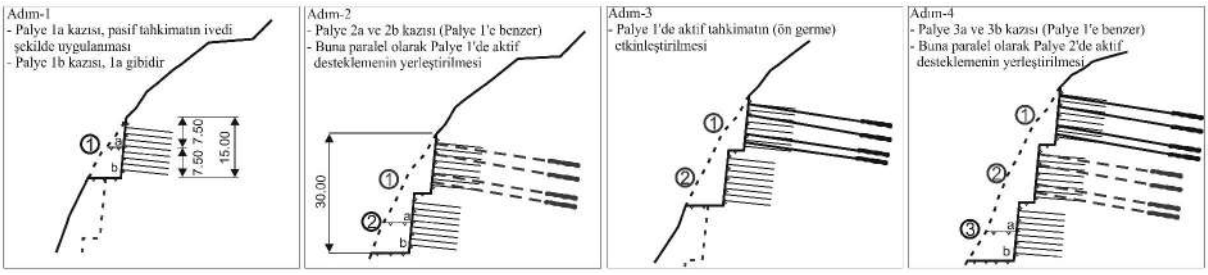
1.2. Şalt Sahası Şevleri ve Kazı Yöntemi

Yusufeli Barajı ve HES projesi kapsamında projelendirilen şalt sahası barajın 750 m kadar mansabında sağ sahilde yer almaktadır. Baraj gövdesinde olduğu gibi İkizdere Magmatitleri'nin hâkim kaya olduğu şalt sahasını çok yönlü süreksizlikler ve diyabaz daykları kesmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Şalt sahasının (a) jeolojisi ve (b) kesit görünümü (DSİ, 2014).

Onaylı kazı projeleri ve destekleme yöntemine göre; üretim patlatması, hemen akabinde pasif tahkimat (püskürtme beton, çelik hasır, kaya bulonları) uygulanmasıyla beraber, maksimum 7.5 m yüksekliğe sahip kazı adımları gerçekleştirilecektir. Ön germeli ankrajlar, devam eden kazı aynasının 1 basamak/palye yukarısına (15 m) tesis edilecektir. Maksimum 2 basamak (30 m) kazısı kadar düşey mesafe şartları oluştuğunda ön germe işlemi tamamlanarak ankraj aktif hale getirilecektir(IC Consulenten, 2014) (Şekil 4).



Şekil 4. Kaya şevlerinde uygulanacak kazı ve destekleme sırası (IC Consulenten, 2014) (şematik).

2. JEOTEKNİK ÖZELLİKLER

Baraj aksı ve şalt sahası kazıları duraylılık analizi verilerinde kullanılmak üzere temel sondaj çalışmaları veya yerinde deneyler, arazinin dik olması ve ulaşılabilirliğinin güçlüğü nedeniyle kazı öncesinde yapılamamıştır. Ancak şalt sahasının hemen menbasında ve yakın galerilerde yapılan yerinde ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu veriler farklı zamanlarda birbirinden bağımsız şekilde çalışan EİE ve DSİ Genel Müdürlükleri'nin araştırmalarıyla teyit edilmektedir. Şalt sahası kazısı başladıktan sonra ve ön germeli ankrajların yerleştirilmesinden önce şev aynasından yatay sondajlar yapılarak; duraylılık analizlerine girdi olarak tespit edilen ön germeli ankrajların toplam uzunlukları teyit edilmeye çalışılmıştır.

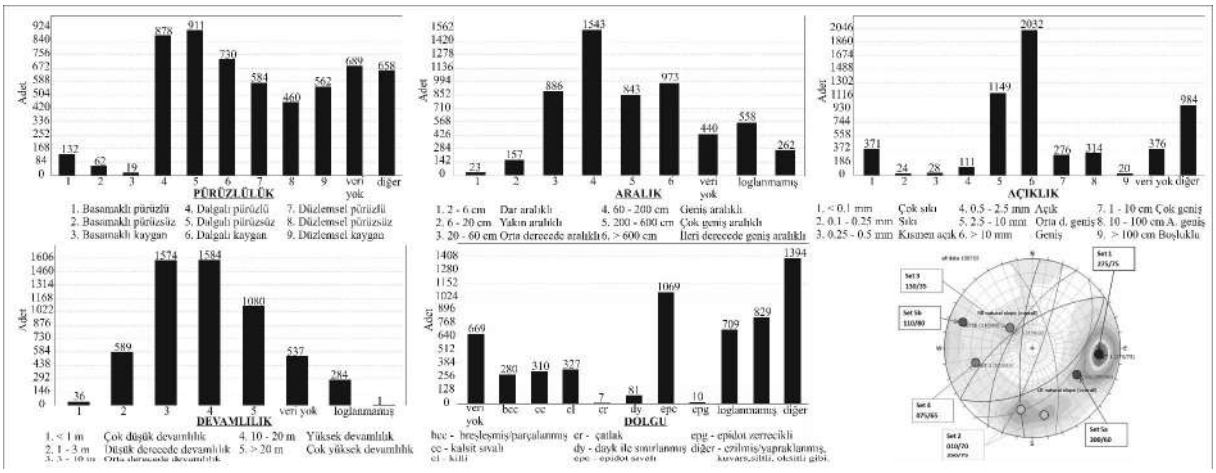
2.1. Süreksizlik Yönelimleri ve Süreksizlik Verileri

Baraj aksı ve şalt sahası çevresinde süreksizlik setlerini belirlemek amacı ile açılan tünel ve açık kazı şevlerinde yapılan jeolojik haritalama çalışmaları ile araştırma bölgesini etkileyen toplam 3 ana süreksizlik seti belirlenmiştir (Ünal, 2017) (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kazı şevi tasarımı için kullanılan karakteristik süreksizlik yönelimleri (IC Consulenten, 2014)

Set	Eğim/Eğim yönü	Değişim aralığı (Eğim/Eğim yönü)	Şalt sahası için jeoteknik önemi
1	75/275	50-90/245-305	Kayma düzlemi
2	75/350	45-90/025-325	Kayma ve serbest bırakma düzlemi
5a	60/300	50-85/280-325	Kayma ve serbest bırakma düzlemi

Şalt sahası kazılarında; şev duraylılığını 1, 2 ve 5a ana süreksizlik setleri kontrol etmektedir. Bu süreksizlik setleri şev dışına (vadiye doğru) eğimlidir ve bu nedenle birleştiklerinde düzlemsel veya kama kayma düzlemleri oluşturabilirler. Düzlemsel ve/veya dairesel olmayan (iki aşamalı) kayma riski, şalt sahası kazılarında daha kritik olduğundan, bu çalışmada sadece bu kayma tipine yönelik çözümlere yer verilmiştir. Varlığı belirlenen süreksizlikler ağırlıklı olarak fay, fay düzlemi ve eklemlerden oluşmaktadır. Süreksizliklerde yeraltısuyu sadece yağışlı dönemler ve sonrasında "çok az sızıntı" şeklinde görülmektedir (IC Consulenten, 2014) (Şekil 5).



Şekil 5. Süreksizlik setlerinin yönelimleri ve süreksizlik verilerinin kontur çıktısı, n=5685 adet (Ünal, 2017).

2.2. Jeoteknik Tasarım ve Süreksizlik Parametreleri

Çizelge 3. Tasarım parametreleri, Slide programı için (IC Consulenten, 2014).

Kaya tipi	Karakteristik dayanım parametreleri		Proje dayanım parametreleri					
			DS1 Kalıcı yükler		DS2 Obe		DS3 Mde/Mce	
	c [MPa]	ϕ [°]	c [MPa]	ϕ [°]	c [MPa]	ϕ [°]	c [MPa]	ϕ [°]
A2	5.500	39.00	4.400	32.94	5.000	36.36	5.500	39.00
Eklem	0.100	45.00	0.080	38.66	0.091	42.27	0.100	45.00

A2: Hafif tektonize, kırıklı kaya kütlesi
DS: Eurocode 7'ye göre tasarım durumları

- DS 1 – Tasarım Durumu 1 – Kalıcı durum, işletme safhaları
- DS 2 – Tasarım Durumu 2 – Geçici durum, inşaat safhaları
- DS 3 – Tasarım Durumu 3 – Tesadüfi/arızi durum, deprem safhaları

Obe: İşletme esaslı deprem
Mde: Maksimum tasarım depremi
Mce: Beklenebilecek maksimum deprem

Çizelge 4. Tasarım parametreleri, RS2/Phase^2 programı için (IC Consulenten, 2014).

Kaya tipi	Karakteristik RQD	Standart sınıflandırma		Yoğunluk	Kohezyon	İçsel sür. açısı	Deformasyon modülü		Elastisite modülü	Poisson Oranı	Sakin top. basıncı
	RQD	GSI	RMR	ρ	c'	φ'	Etd	Ed	Ee	Y	k0
	%	(-)	(-)	(g/cm^3)	(MPa)	(°)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(-)	(-)
A2	>50	45-65	II – III	2.7	5.5	39	5.0	9.0	12.0	0.28	0.38

GSI: Hoek, 1999a.

Proje tasarımı; şev duraylılık analizlerinde, projelendirme kodu olarak Eurocode 7 (EC7) kullanılması kabul edilmiştir. Bu kod projelendirme yaklaşımına bağlı olarak gerek yüklerin gerekse dirençlerin (mukavemet) yük faktörleriyle ölçeklendiği "kısmi emniyet faktörü" kavramının kapsamını genişletmektedir (IC Consulenten, 2014) (Çizelge 5).

Çizelge 5. Kısmi emniyet faktörleri ULS GEO, CC3 önem sınıfına göre (IC Consulenten, 2014).

Nihai limit durumu (ULS)*	Kalıcı DS1	Geçici/İnşaat DS2	Depremli DS3
Kalıcı etkiler, γ_G		$\gamma_G = 1.00$	
Değişken etkiler, γ_Q		$\gamma_Q = 1.10$	$\gamma_Q = 1.00$
Kesme direnci açısı (tan φ), γ_φ	$\gamma_\varphi = 1.30$	$\gamma_\varphi = 1.20$	$\gamma_\varphi = 1.10$
Etkin kohezyon, γ_C	$\gamma_C = 1.30$	$\gamma_C = 1.20$	$\gamma_C = 1.10$
Özgül ağırlık, γ_v		$\gamma_v = 1.00$	
Ön germeli ankrajın direnci, γ_a		$\gamma_a = 1.00$	
Toprak direnci, γ_R		$\gamma_R = 1.00$	

* ULS: Ultimate limit state, Nihai limit durumu

$$\eta = \frac{\gamma_G + \gamma_Q}{2} * \frac{\gamma_\varphi + \gamma_C}{2} * \gamma_v * \gamma_a * \gamma_R \quad (1)$$

Eurocode 7'ye göre

$$\eta = \frac{1.00+1.10}{2} * \frac{1.30+1.30}{2} * 1.00 \cdot 1.00 \cdot 1.00 = 1.37$$

Eşitlik (1)'de DS1 durumu için genel emniyet faktörü hesabı görülmektedir. EC 7'ye göre genel emniyet faktörü; kısmi emniyet faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Çizelge 6'da Deriner Barajı ile karşılaştırılması yapılmaktadır.

Çizelge 6. Emniyet faktörlerinin karşılaştırılması (IC Consulenten, 2014).

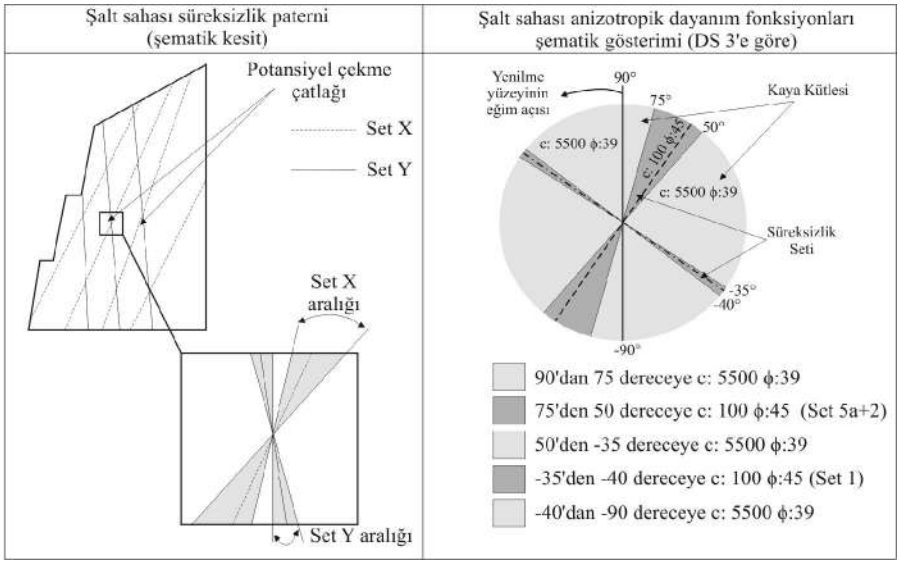
Tasarım durumu	Genel emniyet faktörü (η)	
	Deriner Barajı	Yusufeli Barajı
DS 1- Kalıcı durum	1.50	1.37
DS 2- Geçici/inşaat durum	1.30	1.26
DS 3- Tesadüfi/depremli durum	1.10	1.10

Kısaca tasarım durumlarını özetlemek gerekirse duraylılık analizlerinde girdi olarak kullanılan malzeme parametreleri, hesabı yapılan tasarım durumu oranında azaltılarak/cezalandırılarak programa girilir. Sonuç olarak DS1 durumunda limit dengede FS=1.000 çıkan analizin sonucu esasen FS=1.37'ye, DS2 durumunda FS=1.26'ya ve DS3 durumunda FS=1.10'a tekabül etmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde kritik SRF değeri ve toplam yer değiştirme miktarı belirlenir ve limit denge çıktılarıyla beraber değerlendirilerek nihai destekleme tasarımı ortaya konulmuştur (Ünal, 2017).

3. ŞEV DURAYLILIĞI ANALİZLERİ

3.1. Düzlemsel Kaymaların Analizi

Kazı şevi duraylılığı limit denge hesapları Slide (Rocscience Inc. 2021) yazılımı kullanılmıştır. Kaya kütlesinin anizotropisinin dikkate alınması için Spencer ve GLE/Morgenstern-Price yöntemleri kullanılmıştır. Belirli değer aralıklarındaki süreksizlikler boyunca indirgenmiş makaslama dayanımını dikkate almak için Slide programında anizotropik dayanım fonksiyonları, kaya kütlesi bölümlerine uygulanmıştır. Ayrıca kazı destekleme aşamalarında meydana gelebilecek olumsuzlukların önceden tahmini için RS2/Phase² (Rocscience Inc. 2021) yazılımı kullanılmıştır. Şevi etkileyen süreksizliklerin özellikleri girilerek süreksizlik ağı oluşturulmuş ve anizotropi yansıtılmaya çalışılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Şalt sahası A2 tipi kaya parametrelerinde anizotropik fonksiyonun kullanılması (Ünal, 2017).

3.2. Destekleme Çeşitleri, Drenaj Durumu ve Yükler

Kaya bulonları; donatı sınıfı S420a olan ϕ32 mm'lik kaya bulonu için servis kapasitesi F_k= 226 kN'dur. Püskürtme beton; saha gözlemleri sonucu yapılan haritalama sonucu çıkan RMR puanlamasına göre kazı şevlerine çeşitli kalınlıkta püskürtme beton uygulanacaktır. Püskürtme beton ile bindirmeli çelik hasırlarda şev yüzeyini kaplamaktadır (IC Consulenten, 2014).

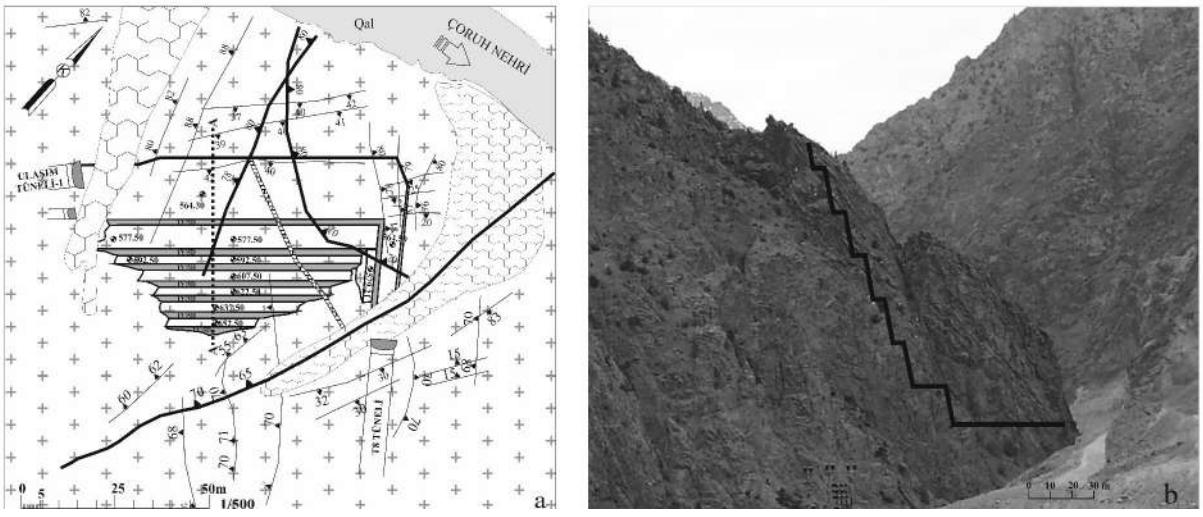
Ön germeli ankrajlar; 7 tel sarımlı 12 adet halattan oluşmaktadır. Her bir ön germeli ankrajın servis kapasitesi F_k= 1842 kN olarak hesaplanmıştır. Ön germeli ankrajların serbest boyları değişken olup kök boyları 8 m olarak yerleştirilmektedir. Tüm ön germeli ankraj uygulamaları 1 yatay/5 düşey şev eğimleri için aksi belirtilmedikçe, 10°'lik eğimle yapılmaktadır (IC Consulenten, 2014).

Drenaj delikleri; ankraja enjeksiyon uygulanması, bu enjeksiyonun yapıldığı alanlarda bir "enjeksiyon perdesi" oluşturarak, kaya kütlesinin geçirgenliğini kayda değer miktarda azaltabilir. Gelişebilecek bir su basıncının önüne geçmek amacıyla tesis edilen ön germeli ankrajların toplam uzunluğunu 1 m geçecek şekilde drenaj delikleri açılarak, sızan suların şevden uzaklaştırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle hesaplarımızda yeraltı suyu seviyesi dikkate alınmamıştır (IC Consulenten, 2014).

Sismik yükler; bütün saha çalışmalarında kullanılmak üzere 3 farklı pik yer ivmesi belirlenmiştir. OBE (işletme esaslı deprem), MDE (maksimum proje depremi) ve MCE (beklenen en şiddetli deprem) olarak sırası ile 0.11g, 0.32 g ve 0.36 g maksimum yatay yer ivmeleri hesaplanmıştır. Hesaplarda girdi olarak belirlenen deprem ivmelerinin Pseudo-statik analiz önerileri doğrultusunda yarısı yatay yer ivmesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca yatay yer ivmelerinin de yarısı kadar düşey yer ivmesi hesaba katılarak duraylılık analizleri yapılmıştır (IC Consulenten, 2014).

3.3. Hesap Kesiti

Kazı şevinin güney kısmında beklenen yenilme biçimi, güney batıya doğru (azimut ~ 275°) orta dik eğimli (50°-90°), set 1 süreksizlikleri boyunca düzlemsel kaymadır. Lokal şev eğimi her basamak için 79° iken, global (genel) şev eğimi 65° olarak ölçülmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Analiz kesitinin yeri (a) ve kazı şevlerine GB'dan bakış (b).

4. SONUÇLAR

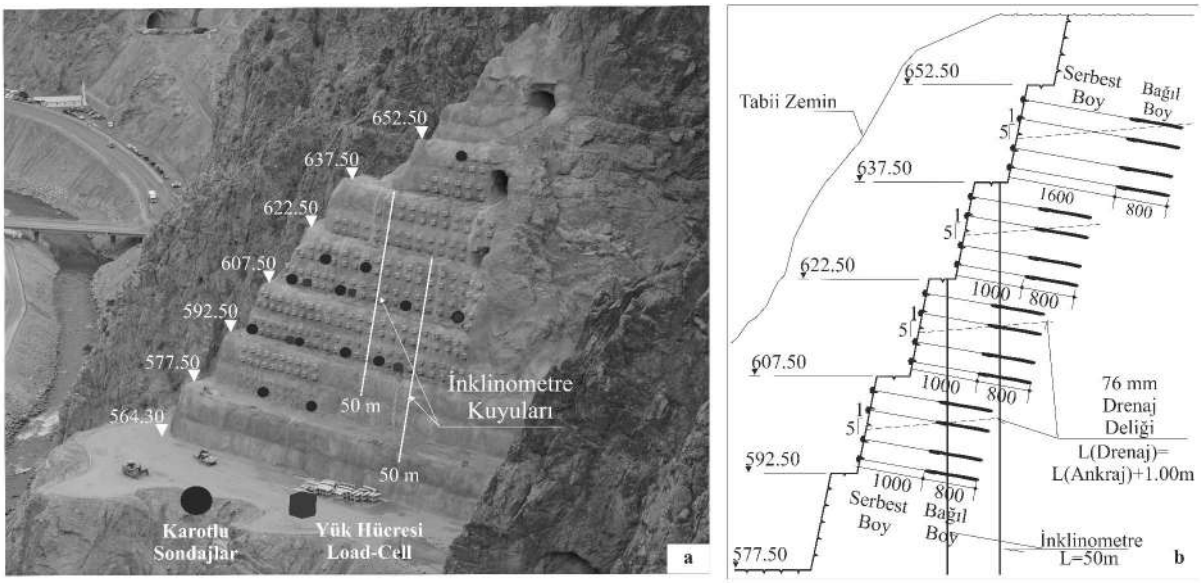
Şalt sahası kazı şevleri yaklaşık 95 m yüksekliğinde 7 palyeden oluşmaktadır. Limit denge çözümleri için Slide programı ve sonlu elemanlar çözümleri için RS2/Phase^2 programları kullanılmıştır. Slide programında DS3 – MCE (tesadüfi – beklenen en şiddetli deprem) kesiti en kritik kesit olarak görülmektedir. RS2 programında ise birbirini takip eden 9 adet kazı-destekleme aşaması tanımlanmış ve son aşamada sismik durumlar için program çalıştırılmıştır.

12 halatlı ön germeli ankraj ve kaya bulonları için; iki farklı program ve iki farklı metot ile kaya şevlerinin farklı aşamalarında nasıl davrandıkları ile ilgili çözümler elde edilmiştir. Phase^2 ile elde edilen çözüme göre şevlerin genelinde toplam yer değiştirme (yatay ve düşey) miktarı maksimum 7.5 mm olarak hesaplanmıştır. Bu yer değiştirme değeri şalt sahası kazılarımız için kabul edilebilir bir miktar olarak değerlendirebilir. Programla ilgili kritik olan değerler Çizelge 7'de verilmektedir.

Çizelge 7. Paket program sonuçları.

		Hesap durumu		FS / SRF	Görüşler
Program	Metot	Yatay yer ivmesi	Tasarım durumu	Güvenlik katsayısı	
Slide	Limit Denge	MCE (0.18g ve 0.09g)	DS3	1.143	4x4 m karelaj ön germeli ankraj
RS/Phase^2	Sonlu Elemanlar	MCE (0.18g ve 0.09g)	DS3	1.275	4x4 m karelaj ön germeli ankraj

Destekleme çalışmalarını takiben ön germeli ankrajlardaki yük değişimini görmek için yeterli sayıda yük hücresi (load-cell) ve şevlerdeki olası hareketin takibi için inklinometre ve ekstansometre delgileri yapılarak belirli aralıklarla okumaları yapılmaktadır. Kazı ve destekleme çalışmalarının tamamlanmasından bugüne kadar şalt sahası şevlerinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Kazı sonrası genel (a) ve destekleme görünümü (b).

5. KATKI BELİRTME

Katkılarından dolayı Su-Yapı Müşavirlik'ten Teoman HIZAL'a, Geodestek Yazılım'dan Yalın Umur DOĞAN'a ve DSİ Genel Müdürlüğü'nden Mehmet SAGNAK'a ve Recep ÇETİN'e teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

Dolsar, 2011. Yusufeli Barajı ve Hes Proje Yapımı – Mühendislik Jeolojisi Raporu.
DSİ, 2014. Yusufeli Barajı ve HES Kapalı Şalt Sahası ve GIS Binası Kazıları Şev Stabilite Raporu R1.
Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, MTA, Ankara.
Hoek, E, 2006. Rock Engineering Course Notes. Toronto.
IC Consulenten, 2014. Yusufeli Barajı ve HES Şev Projelendirme Raporu – Sağ Sahil Raporu.
Ketin, I., 1966. Anadolu'nun Tektonik Birliktelikleri, MTA Dergisi, 66, 20-44.

Rocscience, INC., 2021. Slide ve Phase^2/RS2 Programı

Ulusay, R, 2014. Kaya Şev Duraylılığının Değerlendirilmesinde Mühendislik Jeolojisinin Önemi, Sayı 1, Sayfa 24-28.

Ulusay, R. Sönmez, H. 2007. Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri JMO Yayınları No:60.

Ünal, M.Ö, 2017. Yusufeli Barajı ve HES Projesi, Sağ Sahil Kret Üstü Kazılarında Kaya Şevlerinin Tahkimat Tasarımının Belirlenmesi, MühJeo2017 Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, 2017-10-12, 2017-10-14, Adana, Türkiye, 2017.

Çekmeköy (İstanbul) Entegre Taş Ocağının Kuzeybatı Şevinin Duraylılığının Araştırılması

Stability of the Northwest Slope of Entegre Quarry of Çekmeköy (İstanbul)

R.E. Köksal[1,*], N. Keskin[1], Z. Pınar[1], Y. Mahmutoğlu[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul (*rizaemrekoksal@gmail.com)*

ÖZ: İstanbul-Çekmeköy İlçesi Hüseyinli Köyü'nün kuzeyinde işletilmekte olan Entegre taşocağının kuzeybatı şevine bitişik eski bir taşocağı (Orkisan) çukuru son 15 yılda doğal topoğrafik kotları aşacak şekilde hafriyat atığı ile doldurulmuştur. Her iki ocak çukuru arasında dar bir topuk (5-20 m) bırakılmış olması, işletilen ocağın kuzeybatı şevinin duraylılığı açısından kritik bir durum ortaya çıkarmıştır. Bildiride, bu ocakları da içine alan yaklaşık 25 km^2'lik bir alanda geçerli morfolojik, jeolojik, jeomekanik ve hidrojeolojik sınır koşulları belirlemek amacıyla sürdürülen çalışmalar sunulmuştur. Günümüzde üretimin sürdürüldüğü ve taban kotu -90 m'ye erişen ocağın -150 m kotuna derinleştirilmesi durumunda kuzeybatı şevinde ortaya çıkabilecek duraysızlık sorunu detaylıca irdelenmiştir. İki ocak arasında bırakılan topuğun en dar olduğu kesime karşılık gelen en kritik kesit alınarak 2 boyutlu mühendislik jeoloji modeli oluşturulmuş, bu model üzerinde laboratuvar ve arazi çalışmaları ile belirlenmiş olan şev tasarım parametreleri kullanılarak Hoek-Brown yenilme kriterine göre, sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizler iki farklı genel şev açısı için mevsim şartları ve bölgenin depremselliği göz önünde tutalarak gerçekleştirilmiş ve en uygun şev geometrisi tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İstanbul, Mühendislik Jeolojisi, Şev duraylılığı, Taşocağı, Sayısal analiz

ABSTRACT: *An old quarry (Orkisan) pit adjacent to the northwest slope of the Entegre quarry, which is being operated in the north of Hüseyinli Village in Çekmeköy District of Istanbul-Çekmeköy, has been filled with excavation waste in the last 15 years, exceeding the natural topographic elevations. The fact that a narrow (5-20 m) heel was left between both quarry pits created a critical situation in terms of the stability of the northwest slope of the operated quarry. In the paper, the studies carried out in order to determine the valid morphological, geological, geomechanical and hydrogeological boundary conditions in an area of approximately 25 km^2 including these quarries are presented. The investigations were made for the deepening of the quarry, which continues to produce today and whose bottom depth has reached -90 m, to a depth of -150 m. A 2-dimensional engineering geology model was created by taking the most critical section from the narrowest part of the heel left between the two quarries. Slope design parameters determined by laboratory and field studies on this model were determined according to Hoek-Brown failure criterion based on the Geological Strength Index (GSI), and filling design parameters were selected according to Mohr-Coulomb failure criteria. The numerical analyzes to be made with the finite element method were carried out for two different general slope angles, taking into account the seasonal conditions and seismicity of the region, and the most suitable slope geometry was designed.*

Keywords: *Istanbul, Engineering Geology, Numerical analysis, Quarry, Slope stability*

1. GİRİŞ

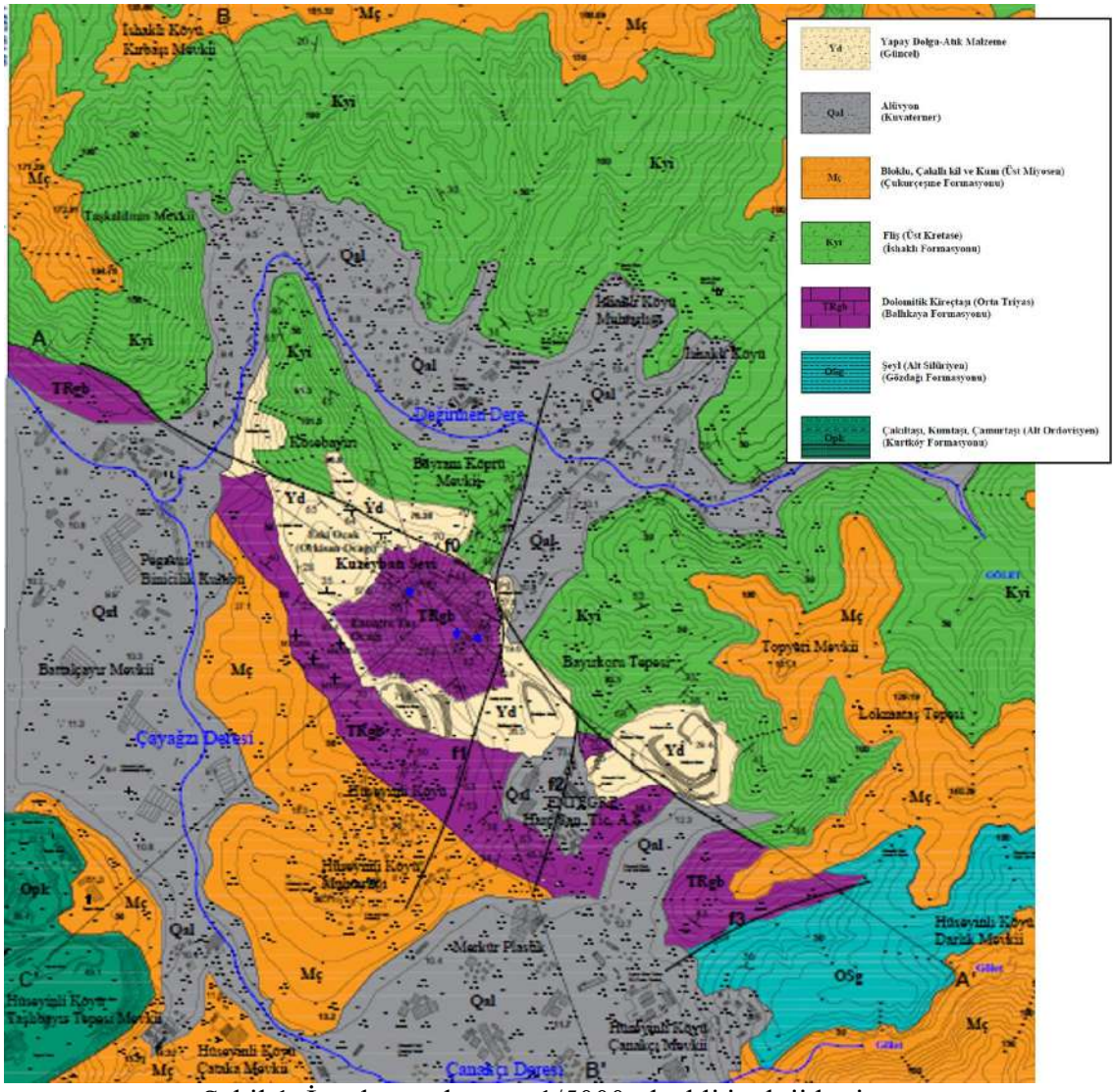
Bu çalışmada, İstanbul İli, Çekmeköy İlçesi, Ömerli Beldesi, Hüseyinli Köyü'nün kuzeyinde bulunan taş ocağının kuzeybatı şevinin bitişiğinde bulunan eski bir taş ocağının son 15 yılda doldurulmuş olması nedeniyle, bitişiğinde bulunan ve işletilmekte olan ocağın derinleştirilmesi durumunda dolgunun yaslandığı kuzeybatı şevinin duraylılığının bu durumdan etkilenip etkilenmeyeceğini ortaya koymak amacıyla yürütülen çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Çalışma kapsamında her iki ocağı da içine alan 25 km^2'lik bölgenin jeolojisi öncelikle araştırılmış ve haritalanmıştır.

2. JEOLOJİK DURUM

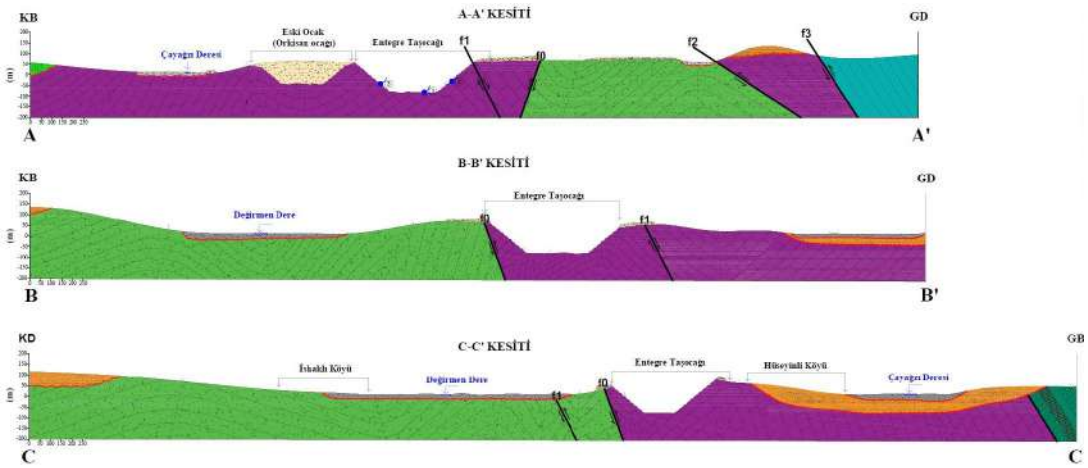
Çalışma kapmasında Entegre taş ocağı ve çevresini kapsayan 25 km^2'lik bölgede yapılan arazi çalışmaları sonucunda, söz konusu bölgenin 1/5000 ölçekli jeoloji haritası ve kesitleri, önceki jeoloji ve topoğrafya haritaları incelenerek, bölgede yapılmış sondaj çalışmaları ve önceki arazi çalışmaları da göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır (Şekil 1 ve Şekil 2).

İnceleme alanında Paleozoyik'ten günümüze değin süren geniş bir zaman aralığında oluşmuş farklı formasyonlar yer almaktadır. Çalışılan bölgede, yaşlıdan gence doğru, Paleozoyik döneme ait Erken Ordovisyen yaşlı Kurtköy Formasyonu (Arkoz, Çakıltaşı-Kumtaşı-Şeyl) ve Erken Silüriyen yaşlı Gözdağ Formasyonu (Şeyl), Mesozoik döneme ait Orta Triyas yaşlı Ballıkaya Formasyonu (Kireçtaşı-Dolomit) ve Geç Kretase yaşlı İshaklı Formasyonu (Fliş), Senozoyik döneme ait Geç Miyosen yaşlı Çukurçeşme Formasyonu (Bloklu, çakıllı kil ve kum), Kuvaterner yaşlı alüvyon ve kontrolsüz dolgu malzemesi bulunmaktadır. Arazi ve büroda yürütülen çalışmanın aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

- Bölgede daha önce yapılmış jeolojik araştırma raporları ve akademik çalışmalar derlenip, değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda ocak çevresinde saha detaylı jeolojik gözlem ve ölçümler yapılmıştır.
- Önceki çalışmalarından da yararlanılarak mevcut ocakları da içine alan 25 km^2 'lik bir bölgenin 1/5000 ölçekli jeoloji haritası ve kesitleri hazırlanmıştır (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. İnceleme alanının 1/5000 ölçekli jeoloji haritası.



Şekil 2. Entegre taş ocağı ve çevresinin 1/5000 ölçekli jeoloji kesitleri.

- Ocakta açığa çıkan durum da dikkate alınarak jeoloji haritası güncellenmiş, hazırlanan kesitler yardımıyla formasyonlar arasındaki ilişki ve jeolojik yapı üçüncü boyutta ayrıntılı olarak ortaya çıkarılmıştır.
- Kuzeybatı şevinin duraylılık analizinde temel oluşturacak süreksizlik ölçümleri, süreksizlik özellikleri ve kaya dokusu belirleme çalışmaları yapılmış, kaya kütlesi parametrelerini belirlemek amacıyla sahadan alınan bloktaş örneklerinden standart deney örnekleri hazırlanmış, bu örnekler üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır.
- Laboratuvar deneylerine ek olarak sahada, taş ocağı etrafındaki hidrojeolojik durumu ve su kalitesini incelemek için yerinde ölçümler yapılmış, önceki çalışmalar kapsamında açılmış olan 3 sondaja ait loglar değerlendirilmiş, hidrojeolojik durum somutlaştırılmıştır.
- Yukarıda belirtilen çalışmalar ışığında, mevcut ocağın -150 m kotuna kadar derinleştirilmesi halinde kuzeybatı şevinde ortaya çıkabilecek duraylılık sorunu sayısal analizlerle irdelenmiştir.

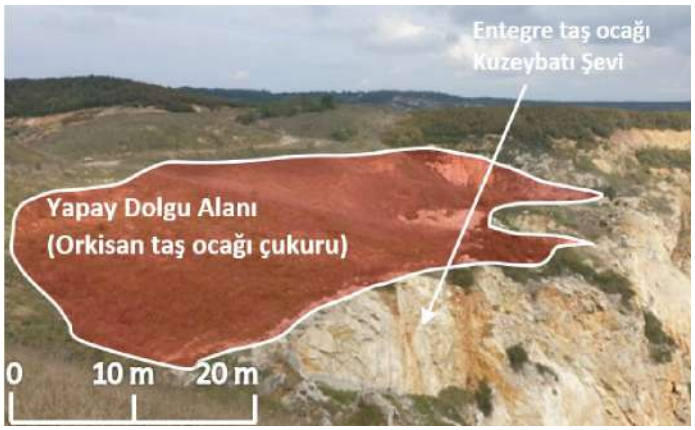
3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİ MODELİ VE DURUM BELİRLEME

Bölgede geçerli sınır koşulları, arazinin jeolojik yapısı ve jeomekanik özellikleri birlikte dikkate alınarak şev duraylılığı açısından en yüksek riske sahip kısma karşılık gelen hattın iki boyutlu sayısal mühendislik jeolojisi modeli oluşturulmuştur. RS2 (Rocscience Inc., 2020) yazılımı kullanılarak hazırlanan sayısal model sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Aşamalı olarak yapılan analizlerde öncelikle anılan şevin mevcut durumu kuru ve yağışlı sezonlarda, depremli ve depremsiz durumlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Daha sonra, ocağın derinleştirilmesi durumu için (işletme taban kotu -150 m olması durumu) aynı çözüm iki farklı genel şev açısı için tekrarlanmıştır.

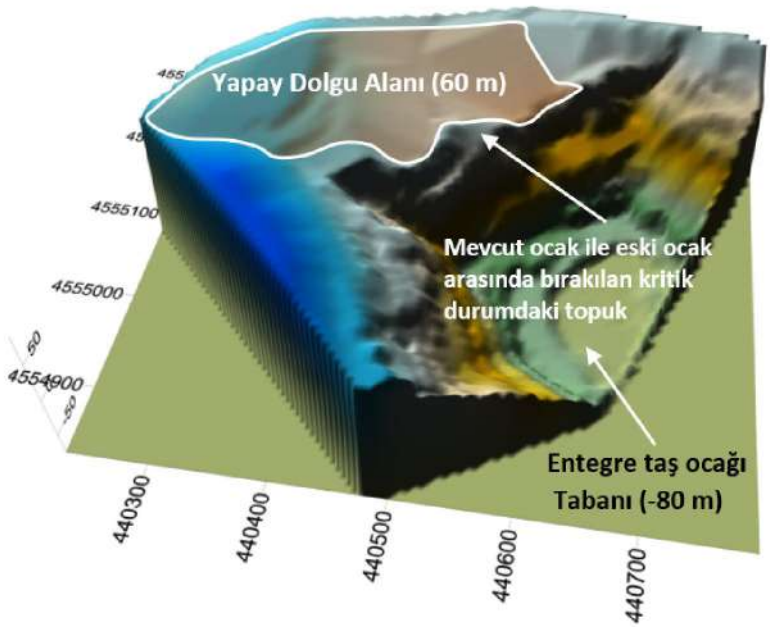
Mevcut taş ocağının duraylılığı açısından kritik durumdaki kuzeybatı şevinde gözlenen süreksizlik sistemleri ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Ocağın basamak şevlerinde gözlenen kaya dokusu ve süreksizlik özellikleri dikkate alınarak kayanın jeolojik dayanım indeksi (GSI) tanımlanmıştır (Hoek vd., 2013;2019). Şev duraylılığı ve tasarıma yönelik analizlerde kullanılacak jeomekanik parametrelerin belirlenmesi amacıyla, anılan şevi oluşturan kayadan örnekler alınmıştır. Laboratuvar çalışmaları ve belirlenen GSI değeri göz önünde bulundurularak, Hoek-Brown yenilme ölçütü esas alınarak sayısal analizde kullanılacak değerler (ϕ, m_b, s, a, E_{rm}) belirlenmiştir.

İncelemeler sırasında, taşocağının taban kotunun -90 m civarında olduğu, ocağı çevreleyen şevlerin tepe bölgesindeki doğal arazi kotlarının ise 20-80 m arasında değiştiği saptanmıştır. Basamaklı üretim yapılan açık işletmede, basamak yükseklikleri genellikle 15 m, genişlikleri ise 6 m civarındadır. Güncel ve eski ocak haritaları değerlendirilerek, Entegre taşocağının kuzeybatı şevinin bitişiğinde bulunan eski ocak (Orkisan) çukurunun, son 15 yılda söz konusu alandaki doğal arazi kotunu aşacak şekilde çoğunluğu blok ve iri kırıntılılardan oluşan hafriyat atığı malzemeler ile doldurulduğu

saptanmıştır. Dolgunun yaslandığı kuzeybatı şevinde dar bir topuk bırakıldığı görülmüş, bu durumun ise işletme açısından önemli risk oluşturduğu belirlenmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). Mevcut ocağın derinleştirilmesi durumunda, önemli bir riskin oluşacağı, bu nedenle de kuzeybatı şevinde oluşabilecek duraysızlıkların analiz edilerek, irdelenmesi gerektiği anlaşılmıştır.

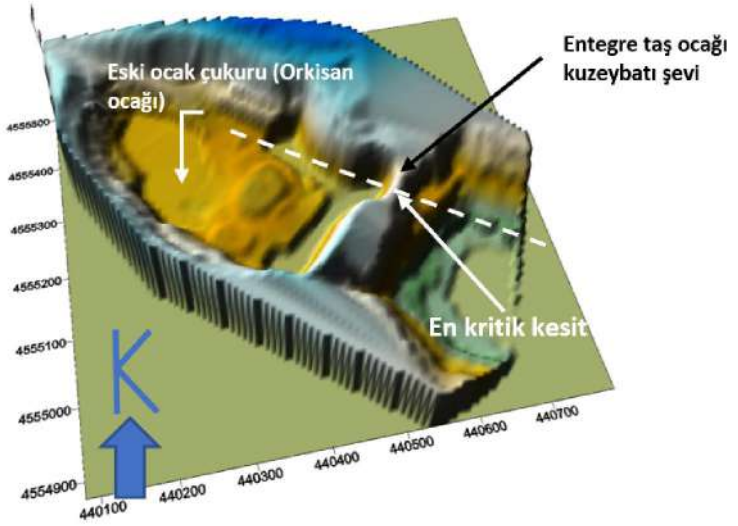


Şekil 3. Entegre taş ocağının kuzeybatı şevi ve eski ocak çukurunun (Orkisan Ocağı) doldurulmasıyla oluşan yapay dolgu alanı.

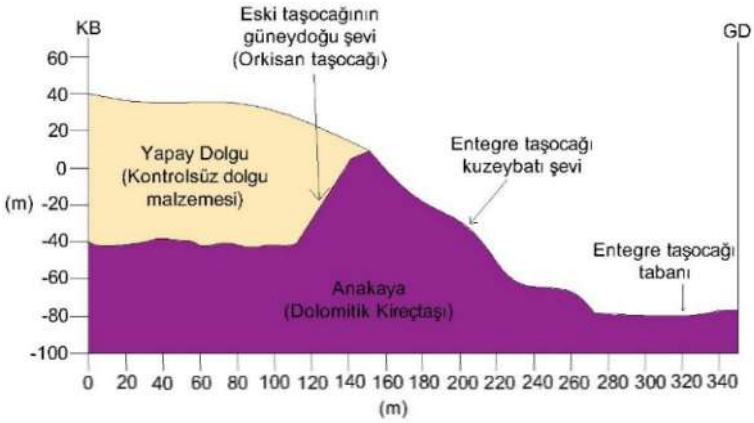


Şekil 4. Entegre taş ocağının tabanı ve yapay dolgu alanının üç boyutlu görünümü ve mevcut ocak ile eski ocak arasında bırakılan topuğun konumu.

Entegre taş ocağı ile eski ocak arasında bırakılan topuğun yüzeyde görülen genişliğinin 5-20 m olduğu saptanmıştır. Eski ocağın terk edilmeden önceki durumunu gösteren topoğrafik harita ve Entegre taş ocağındaki mevcut durum dikkate alınarak üç boyutlu model oluşturulmuş, bu model üzerinde mevcut ocağın kuzeybatı şevine dik doğrultuda uzanan ve iki ocak arasındaki topuk genişliğinin en dar olduğu noktadan geçen kritik kesit (Şekil 5 ve Şekil 6) hazırlanmıştır (Köksal vd., 2020). Bu kesit; arazi, literatür ve laboratuvar çalışmalarına dayanılarak sayısallaştırılmış ve mühendislik jeolojisi modeli oluşturulmuştur.



Şekil 5. Ocaklar arasında bırakılan topuğun üç boyutlu görünümü.



Şekil 6. Entegre ocağının kuzeybatı şevinin bitişiğinde bulunan dolguyu ve iki ocak arasında bırakılan topuğu gösteren en kritik kesit.

Sayısal analizde kullanılacak şev tasarım parametreleri, laboratuvarda ISRM (2007) standartlarına uygun olarak yapılan fiziksel ve mekanik deney sonuçlarına ve kaya kütlesi özelliklerine dayalı, pratikte en sık kullanılan Hoek-Brown yenilme kriteri dikkate alınarak aşağıdaki eşitliklere göre belirlenmiştir (Hoek vd., 2002).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \quad (1)$$

$$m_b = m_i . exp[(GSI - 100)/(28 - 14D)] \quad (2)$$

$$s = exp[(GSI - 100)/(9 - 3D)] \quad (3)$$

$$a = 1/2 + 1/6(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

Burada; σ_{ci} ve E_i değerleri, mekanik deneyler ile belirlenmiş olup sırasıyla sağlam kayanın basınç dayanımını ve elastisite modülünü temsil etmektedir. m_b, s ve a Hoek-Brown parametreleri, GSI Jeolojik Dayanım İndeksi, D kaya kütlesinin patlatma hasarı ve gerilme rahatlamasıyla maruz kaldığı örselenme derecesine bağlı faktördür ve E_m kaya kütlesinin deformasyon modülüdür. Tasarım parametreleri Çizelge 1'de özetlenmiştir. Poisson oranı (υ) değerleri belirlenirken, benzer özellikteki ortamlar için literatürde önerilen değerler göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 1. Kuzeybatı şevinin sayısallaştırılmasında kullanılan parametreler.

Sağlam kaya özellikleri	
Birim hacim ağırlık (γ) (kN/m^3)	26,6
Tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) (MPa)	90,75
Elastisite modülü (E_i) (GPa)	22,03
Çekme dayanımı (σ_t) (MPa)	6,83
İçsel sürtünme açısı (ϕ) (°)	63
m_i	15

Dolgu için seçilen tasarım parametreleri	
Doygun birim hacim ağırlık (γ_d) (kN/m^3)	18,5
Efektif kohezyon (c) (kPa)	10
Efektif içsel sürtünme açısı (ϕ) (°)	35
Deformasyon modülü (E) (MPa)	7,0
Poisson oranı (υ)	0,33

Kaya kütlesi özellikleri ve model parametreleri	
Jeolojik dayanım indeksi (GSI)	75
Örselenme faktörü (D)	1.0
İçsel sürtünme açısı (ϕ) (°)	42
m_b	2,52
s	0,016
a	0,501
Elastisite modülü (E_m) (GPa)	1,46
Poisson oranı (υ)	0,25

Yapılan arazi çalışmalarında ocak şevlerinde görülen süreksizliklerin yakın-orta aralıklı olduğu, dolayısı ile kaya ortamın sık-orta çatlaklı yapıda olduğu belirlenmiştir. Kuzeybatı şevinde görülen süreksizlik açıklıkları 2-5 mm arasında değiştiğinden şevde görülen süreksizlikler çok dar-dar açıklıklı kapalı yapılar olarak tanımlanmıştır. Ocak şevlerinde gözlenen kırık ve çatlaklar çoğunlukla kapalı, yer yer boşluklu yapı sergilemekte olup, boşluklar ise genellikle kil-silt-kum boyutlu malzeme dolgulu olmakla birlikte, nadiren kalsit dolgular görülmüştür. Ocak şevlerinin görünen süreksizlik yüzeyleri genellikle dalgalı, yer yer basamaklı iken bazı kesimlerde dalgalanma görülmemektedir. Ayrıca süreksizlik yüzeyleri genellikle pürüzlü, nadiren düz ve kaygandır.

GSI değerinin belirlenmesi için, doku kenetlenmesi ve süreksizlik koşullarına göre bloklu kaya kütlelerini karakterize eden GSI abağı kullanılmıştır. Şevde belirlenen kaya kütlesi özelliklerine göre GSI değeri 75 olarak seçilmiştir (Mahmutoğlu, 2019).

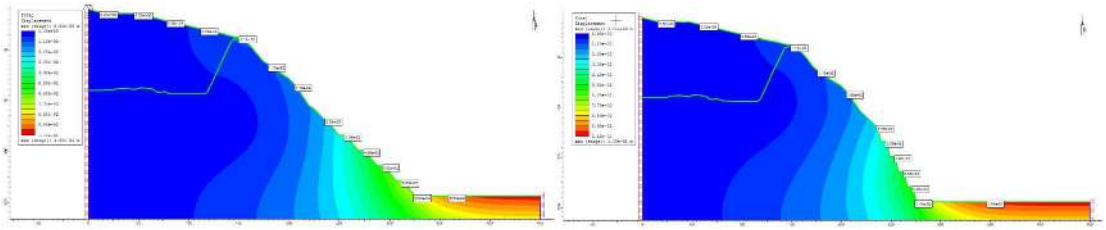
4. KUZEYBATI ŞEVİNİN MODELLENMESİ VE SAYISAL ANALİZİ

Entegre ocağının kuzeybatı şevini oluşturan kayacın ve bitişiğinde yer alan yapay dolgunun parametreleri göz önünde bulundurularak oluşturulan sayısal mühendislik modeli, söz konusu şevin güncel durumu ve 15'er metrelik 5 kademe daha derinleştirilmesi durumu için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Söz konusu şevin mevcut durumu ve kademe kazıları, kuru-yağışlı sezonlar ve depremli-depremsiz durumlar için aşamalı olarak yapılan sayısal analizler ile değerlendirilmiştir. Farklı durumlar için gerçekleştirilen sayısal analizler sonlu elemanlar yazılımı (RS2, Rocscience Inc., 2020) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu işletmeden daha fazla nitelikli malzeme kazanılabilmesi için yapılan sayısal analizlerde, statik ve dinamik yükler (deprem) altında, kuzeybatı şevinin genel şev açısı ilk olarak ocağın mevcut durumu göz önünde bulundurularak 50° seçilmiş, oluşturulan geometrik model dolgunun kuru ve yeraltı su seviyesinin (YAS) dolguda sıfır kotunda olması varsayımına dayanarak, iki farklı durum için tekrarlanmıştır. Daha sonra genel şev açısı 65°'ye yükseltilerek aynı analizler yeniden yapılmıştır. Yağışlı sezon için yapılan analizlerde, söz konusu ocak şevlerinin YAS drenajına imkan tanıyacağı dikkate alınarak, faaliyet süresince YAS düzeyinin ocağın taban kotuna kadar düşürülmüş olacağı varsayılmıştır.

4.1. Kuru Sezonda ve Depremsiz Durumda Kuzeybatı Şevinin Analizi

Yapılan analizler ilk olarak kuru sezon ve depremsiz durum için mevcut ocağın durumu göz önünde tutularak genel şev açısı 50° seçilerek, daha sonra aynı analizler genel şev açısı 65°'ye yükseltilerek

tekrarlanmıştır. Bu duruma karşılık oluşturulan depremsiz durum modeli ise ocağın mevcut durumu ve 5. kademe kazısı sonrası durumu olarak Şekil 7.'de verilmiştir. Farklı kademe kazılarına (KKN) karşılık gelen kuru sezon ve depremsiz durum şartları için elde edilen çözüm sonuçları Çizelge 2'de özetlenmiştir. Kademe '0' olarak belirtilen durum, söz konusu ocağın mevcut durumuna karşılık gelmektedir. Toplam deformasyonların yatay ve düşey bileşenleri yalnızca 5. kademe kazısı (nihai kademe) için belirtilmiştir. Yapılan hesaplamalarda, 5. kademe kazısı sonrası oluşan durum için şevin güvenlik katsayısı 3'ün üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 2'de özetlenen genel şev açısının 65°'ye yükseltilmesi durumu değerlendirildiğinde, ocağın kuzeybatı şevinde oluşabilecek yer değiştirme miktarlarında kayda değer bir artış gözlenmemiştir. Ayrıca 5. kademe kazısı sonrasında ocak tabanında 109 mm'ye varan kabarmalar oluşmasına rağmen dolguda kayda değer bir deformasyon görülmemiştir. Burada; β_g ocağın derinleştirileceği kotlar arasındaki genel şev açısı, β_b basamak şev açısı, KKN ocağın derinleştirileceği kademe kazısı numarası, Δlt_{max} maksimum toplam deformasyon, Δlx_{max} mutlak yatay deformasyon, Δlz_{max} mutlak düşey deformasyon ve G_s şevin geneli için elde edilen güvenlik sayısıdır.



Şekil 7. Kuru sezonda ve depremsiz durumda, genel şev açısının 50° ve 65° alınması durumlarına karşılık gelen sayısal analiz sonuçları

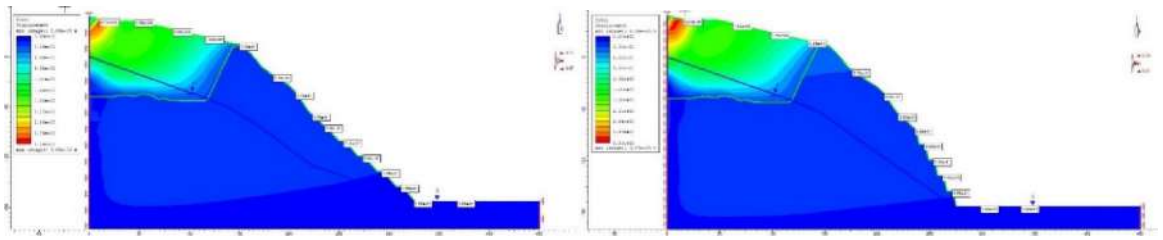
Çizelge 2. Kuru sezonda ve depremsiz durumda, ocağın derinleştirilmesi amacıyla tasarlanan kademe kazıları sonucunda kuzeybatı şevinde hesaplanan yer değiştirmeler

β_g (°)	β_b (°)	KKN	Δlt_{max} (mm)	Δlx_{max} (mm)	Δlz_{max} (mm)	G_s
50	67	0	-	-	-	>3
		1	11.2	-	-	
		2	30	-	-	
		3	46.2	-	-	
		4	58.2	-	-	
		5	66	11	66	
65	80	0	0.4	-	-	>3
		1	11.9	-	-	
		2	31.8	-	-	
		3	49.4	-	-	
		4	67.2	-	-	
		5	77	21.6	77	

4.2. Yağışlı Sezon ve Depremli Durumda Kuzeybatı Şevinin Analizi

Ocağın kuzeybatı şevinin farklı sezonlardaki depremli durum analizleri için, inceleme alanında etkili olabilecek depremlerin neden olabileceği maksimum yatay yer ivmesi, Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD, 2018) göz önünde bulundurularak bu harita üzerinden seçilmiştir. Bu haritaya göre, inceleme alanında oluşabilecek maksimum yatay yer ivme değeri yaklaşık a_{max}=0.15 g'dir. Dinamik (depremli) durum analizleri için bu değer belirlendikten sonra, farklı sezonlar için oluşturulan sayısal analiz modellerinde kullanılmıştır. Yağışlı sezon ve depremli durum için yapılan analizler, inceleme alanının iklim şartları ve yeraltı suyu beslenimi göz önünde bulundurularak, kuru sezon için hazırlanan sayısal modeller üzerine YAS ve deprem ivmeleri eklenerek tekrarlanmıştır (Şekil 8).

Analiz sonuçlarına göre, nihai kademe kazısı sonucunda dolguda oluşan toplam yer değiştirmeler, β_g=50° seçildiğinde 3050 mm iken, β_g=65°'ye yükseltildiğinde görülen yer değiştirmelerde 220 mm'lik bir artış gözlenmektedir (Çizelge 3). Kuzeybatı şevinde ise, β_g=50° seçildiğinde oluşan toplam deformasyon 310 mm iken, β_g=65°'ye yükseltildiğinde ise şevde oluşan deformasyonlarda kayda değer bir artış görülmemiştir (Çizelge 4).



Şekil 8. Yağışlı sezonda ve depremli durum için elde edilen sayısal analiz sonuçları

Yağışlı sezonda ve depremli durumda ocağın derinleştirileceği kademeler için gerçekleştirilen analiz sonuçları Çizelge 3 ve Çizelge 4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3. Yağışlı sezonda ve depremli durumda, ocağın kademeli olarak derinleştirilmesi sonucunda dolguda oluşan yer değiştirmeler ve elde edilen güvenlik katsayısı

β_g (°)	β_b (°)	KKN	Δlt_{max} (mm)	Δlx_{max} (mm)	Δlz_{max} (mm)	Gs
50	67	0	0.2	-	-	>3
		1	18	-	-	
		2	96	-	-	
		3	219	-	-	
		4	329	-	-	
		5	3050	1810	3050	
65	80	0	3.4	-	-	>3
		1	18.2	-	-	
		2	163	-	-	
		3	290	-	-	
		4	357	-	-	
		5	3270	1920	3270	

Çizelge 4. Yağışlı sezonda ve depremli durumda, ocağın kademeli olarak derinleştirilmesi sonucunda kuzeybatı şevinde oluşan yer değiştirmeler ve elde edilen güvenlik katsayısı

β_g (°)	β_b (°)	KKN	Δlt_{max} (mm)	Δlx_{max} (mm)	Δlz_{max} (mm)	Gs
50	67	0	-	-	-	>3
		1	9.5	-	-	
		2	19.4	-	-	
		3	33	-	-	
		4	49.5	-	-	
		5	310	285	-	
65	80	0	0.5	-	-	>3
		1	16.2	-	-	
		2	25.5	-	-	
		3	43.5	-	-	
		4	54	-	-	
		5	**330**	**300**	**-**	

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Entegre Taşocağı'nın kuzeybatı şevinin duraylılığının araştırılması sonucunda, kuru-yağışlı, depremli-depremsiz durumlar için tekrarlanan sayısal analizler sonucunda genel şev açısının 65°'ye yükseltilmesi durumunda kuzeybatı şevinde oluşacak deformasyonlarda kayda değer bir değişikliğin olmayacağı saptanmıştır. Ancak; arazi gözlemlerinde, bölgede düzensiz süreksizliklerin ve fay zonlarının bulunduğu anlaşıldığından ve uygulanan patlatmalı kazının oluşturacağı örselenme ile kuzeybatı şevinin derinleştirilmesinin neden olacağı sistem büyüklüğünün kaya dayanımındaki negatif etkileri dikkate alınarak, ocağın derinleştirilmesi durumunda kazı şevlerinde genel şev açısında yapılacak değişikliğe bağlı duraylılık sorunu görülmemiş olmasına rağmen, ocağın genel şev eğiminde değişiklik yapılmadan derinleştirilmesinin uygun olacağı önerilmiştir.

6. KAYNAKLAR

AFAD, 2018. "Türkiye Deprem Tehlike Haritası". Ulusal Deprem Araştırma Programı.

Hoek, E., Carranza, C. and Corkum, B. 2002. "Hoek-Brown failure criterion- 2002 Edition", Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, p. 67-273.

Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., 2013. "Quantification of the Geological Strength Index Chart". *47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium,* San Francisco, CA, USA June 23-26, 2013.

Hoek, E., & Brown, E. T., 2019. "The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 11(3), 445–463.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Ankara. 628 pp.

Köksal, Rıza E., Keskin, N., Pınar, Z., 2020. "Hüseyinli Köyü Civarının Jeolojisi ve Entegre Taş Ocağına Ait Kuzeybatı Şevinin Stabilitesi", *Lisans Tezi,* İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, s. 1-185.

Mahmutoğlu, Y., 2019. "Mikro Çatlaklı Mermerin Yenilme Sonrası Dayanımının Hoek-Brown Yenilme Kriteri ile Karşılaştırılması", Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, Denizli, Türkiye.

RS2, 2020. Rocscience Inc.

Andezit kaya kütlesi içindeki ayrışmış süreksizlik yüzeylerinin dalgalılık ve pürüzlüklerinin düzlemsel kayma üzerindeki etkisinin incelenmesi

The investigation of the effect of waviness and roughness of weathered discontinuity surfaces in andesite rock mass on planar sliding

T. Kadakçı Koca[1,*]

[1] DEÜ, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390, Tınaztepe, İzmir
*(*tumaykoca@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, İzmir Körfezi'nin K de bulunan andezit taş ocaklarında gözlenen, farklı ayrışma derecesine sahip soğuma çatlaklarındaki, dalgalılık ve pürüzlülüklerin düzlemsel kayma üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Ayrıca pürüzlülükte yenilme sonrası meydana gelebilecek azalma araştırılmıştır. Pürüzlülük ölçümleri kapsamında, yüzey geometrisi parametreleriyle eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) değerleri karşılaştırılmıştır. Düzlemsel kaymanın gerçekleştiği bir şevde yapılan hassasiyet analizleri sonucunda pürüzlülüğün, güvenlik katsayısı (GK) üzerinde dalgalılıktan daha etkili olduğu belirlenmiştir. Olasılık analizlerine göre mevcut koşullarda duraylılığını korumakta olan şevin, daha önce şiddetli yağışlar sonrası yenildiği bilindiğinden, kayma anındaki JRC ve doruk içsel sürtünme açısı değerlerini belirlemek için geriye dönük analizler yapılmıştır. Buna göre kayma sonrası içsel sürtünme açısının ve pürüzlülüğün azaldığı belirlenmiştir. Dalgalılık açısının, GK üzerinde JRC kadar etkili olacağı taban değerlerin belirlenmesine yönelik yapılan parametrik analizlerde ise düşük JRC değerleri için dalgalılık açısı en az 11.85° olursa GK üzerinde göreceli olarak daha etkili olacağı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: andezit, pürüzlülük, düzlemsel kayma, geri analiz, hassasiyet analizi

ABSTRACT: *In this study, it was aimed to reveal the effects of waviness and roughness of variously weathered cooling joints on planar sliding observed in andesite quarries located in the north of İzmir Gulf. Besides, the roughness degradation due to failure was investigated. In the context of roughness measurement, the surface geometry related parameters were correlated with the joint roughness coefficient (JRC) values. As a result of sensitivity analyses performed for a slope case of planar sliding, it was determined that the effect of roughness on factor of safety (FOS) is more significant than the waviness. The slope which preserves its stability in existing conditions based on the probability analyses is known to be failed before due to heavy rainfalls, hence back analyses were performed to obtain peak internal friction angle and JRC at the time of failure. As a result, it was found that the internal friction angle and roughness were both reduced. As a resut of parametric analyses to determine the minimum waviness angle for which have similar effect on FOS as JRC, it was found that if the undulation angle is at least 11.85° while JRC is low, it will be relatively more effective on FOS.*

Keywords: *andesite, roughness, planar sliding, back analysis, sensitivity analysis*

1. GİRİŞ

Kaya kütlelerinde bulunan süreksizlik düzlemlerinin makaslama dayanımı, sadece süreksizlik düzlemlerinin sürtünme açısı ve süreksizlik yüzeyi dayanımıyla değil aynı zamanda süreksizlik düzleminin pürüzlüğü ile ilişkilidir (Türk ve Dearman, 1985; Yoshinaka ve Yamabe, 1986; Ueng ve Chang, 1990; Bahaaddini vd., 2014). Kaya süreksizlik yüzeyi pürüzlülüğünün uygun ölçekte en doğru teknik ile belirlenmesi kaya mekaniğinde halen çalışılmakta olan konulardan biridir. Pürüzlülüğün ve buna bağlı olarak süreksizliklerin makaslama dayanımının ölçeğe bağlı değişimi birçok araştırmacı tarafından farklı kaya ve malzeme türleri için çalışılmıştır (Bhasin ve Høeg, 1998; Fardin vd., 2001; Ueng vd., 2010; Bahaaddini vd., 2014).

Çoğunlukla süreksizlik yüzey uzunluğu veya alanı arttıkça, makaslama dayanımının azaldığı bulunmuştur (Bandis vd., 1981; Fardin vd., 2001). Ancak buna zıt sonuçların elde edildiği çalışmalar da literatürde mevcuttur (Hencher vd., 1993). Pürüzlülüklerin devam eden makaslama yer değiştirmeleri sırasındaki azalmasıyla ilgili yapılan çalışmalarda makaslama dayanımının bu azalmaya bağlı olarak mobilize olduğunu göstermiştir (Ladanyi ve Archambault, 1969; Plesha, 1987; Saeb, 1990; Huang vd., 1993; Homand vd., 2001; Lee vd., 2001). Birçok çalışmada pürüzlülük ölçümleri laboratuvar ölçeğinde yapılmaktadır ve dalgalılık dikkate alınmamaktadır (Tatone, 2009). Bu ölçekteki pürüzlülük tanımlamaları kaya kütlelerinde tünel veya şev tasarımı amaçlı yapılan kazıların duraylılık incelemelerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Choi ve Chung, 2004; Amanloo ve Hosseinitoudeshki, 2013; Alemdağ vd., 2014; Pain vd., 2014; Raghuvanshi, 2019; Zhao vd., 2020).

Bu çalışmada, İzmir ili Bayraklı semtindeki terkedilmiş andezit ocaklarında, beş adet kaya şevi incelenmiştir. Günümüzde bu şevler yerleşim alanı içerisinde kalmaktadır ve çevresinde 2-5 katlı konutlar bulunmaktadır (Şekil 1).

Şekil 1. İzmir-Bayraklı yerleşim alanı içerisindeki terkedilmiş andezit ocağı

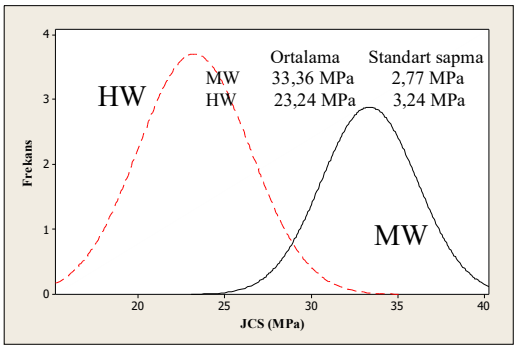
Andezit kaya kütlesinde, farklı eğimlerde bulunan soğuma yüzeyleri, akma bandı yapılarına göre düz-az pürüzlü, hafif dalgalılığa sahip yüzeylerdir. Bu nedenle şev dışına eğimli soğuma çatlakları boyunca düzlemsel kayma, şev içine eğimli çatlaklarda ise devrilme eğilimi artmaktadır. Bu yüzeyler farklı ayrışma derecelerine sahiptir. Ayrışma derecesinin belirlenmesi için Schmidt geri sıçrama değerlerinden faydalanılmıştır. Buna ilaveten, Schmidt geri sıçrama değerleri süreksizlik yüzeyinin dayanımının (JCS) hesaplanmasında da kullanılmıştır. Arazide, andezit kaya kütlesi içerisindeki soğuma çatlakları üzerinde dalgalılık ve pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen tüm değerler istatistiksel olarak incelenerek, olasılığa dayalı düzlemsel kayma analizlerinde kullanılmıştır. Dalgalılık ve pürüzlülüğün güvenlik katsayısı (GK) üzerindeki etkilerinin incelenmesi için hassasiyet analizleri yapılmıştır. Düzlemsel kayma analizi için dikkate alınan düzlemin daha önce aşırı yağışlar nedeniyle kaydığı bilindiğinden, kayma anındaki pürüzlülük ve doruk içsel sürtünme açısı değerlerinin kestirimi için geriye dönük analizler yapılmıştır. Son olarak, dalgalılığın GK üzerinde pürüzlülük kadar etkili olacağı taban değerinin bulunması için parametrik analizler yapılmıştır.

2. SÜREKSİZLİK DÜZLEMİNİN ÖZELLİKLERİ

2.1. Süreksizlik Yüzeyi Dayanımı

Süreksizlik yüzeylerinin dayanımının (JCS) bulunması için kullanılan en yaygın yöntem Schmidt çekici deneyidir. Bu çalışmada, 0.74 Nm çarpma enerjisine sahip L-tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Deneyler, ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem esas alınarak yapılmıştır. Miller (1965) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak JCS değerleri hesaplanmıştır (Şekil 2).

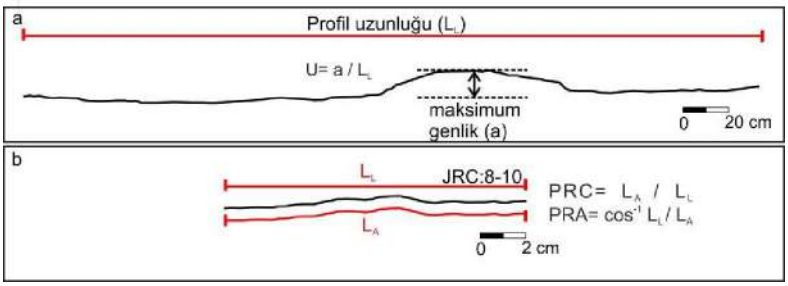
Schmidt çekici deneyleri arazide yapıldığından, buradan elde edilen JCS değerleri üzerinde ölçek düzeltmesi gereği duyulmamıştır. Schmidt çekici geri sıçrama değerleri, Gökçeoğlu ve Aksoy (2000)'un önerdiği sınıflama kullanılarak yüzeylerin ayrışma derecesinin belirlenmesi için de kullanılmıştır. Buna göre incelenen 20 süreksizlik yüzeyinden 8 tanesi orta derece ayrışmış (MW), 12 tanesi ise yüksek derecede ayrışmış (HW) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. MW ve HW süreksizlik yüzeylerindeki JCS değerlerinin dağılımları.

2.2. Süreksizlik Yüzeyi Pürüzlülüğü

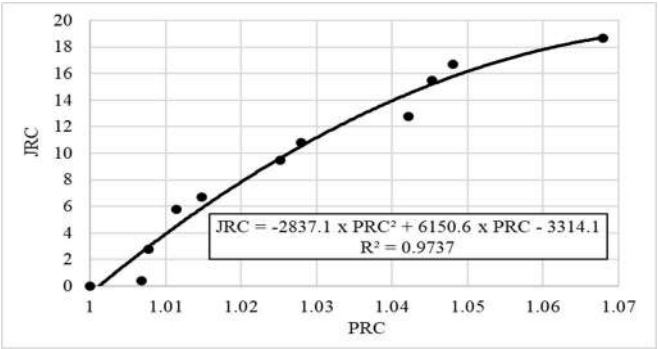
Eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) en çok kullanılan pürüzlülük katsayılarından biridir; ancak Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilmiş olan bu yaklaşım 10 adet 10 cm uzunluğundaki süreksizlik profiline karşılık gelen JRC değerinin göreceli olarak belirlenmesi esasına dayanır. Bu nedenle birçok araştırmacı, JRC değerini fraktal yöntem veya jeo-istatistiksel yaklaşımlarla sayısallaştırarak kullanmıştır (Türk vd., 1987; Lee vd., 1990; Roko vd., 1997, Sanei vd., 2015; Ficker, 2017). Bu çalışmada, Türk ve Dearman (1985)'in önerdiği yöntem kullanılarak yüzey geometrisini tanımlayan yüzey pürüzlülük açısı (PRA) ve yüzey pürüzlülük katsayısı (PRC) belirlenmiştir (Şekil 3b).



Şekil 3. PRA, PRC ve dalgalılık açısının ölçümü.

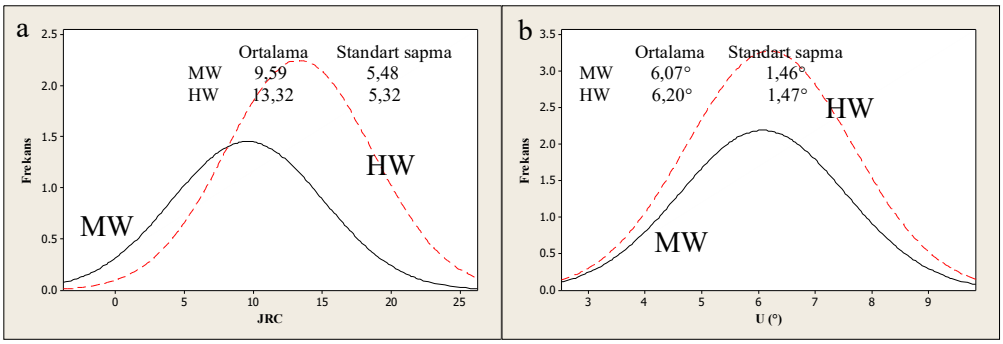
Arazide, dalgalılık, 20 farklı noktada, doğrudan şerit metre ve üzerinde hareket edebilen, geçmeli, 50 cm uzunluğunda tahta cetvel kullanılarak kayma yönüyle aynı yönde ölçülmüştür (Şekil 3a). Pürüzlülük ise 13 cm uzunluğundaki (L_L) tarak profilometre kullanılarak, 20 farklı yüzeyde, kayma yönü boyunca ölçülmüştür. Elde edilen yüzey süreksizlik profili MapInfo Professional v10.0 (Pitney Bowes, 2010) programında sayısallaştırılarak, kartezyen yöntemiyle profil yüzey uzunluğu (L_A) belirlenmiştir.

PRC ve Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilmiş 10 adet süreksizlik profiline karşılık gelen JRC değerleri karşılaştırılmış olup JRC değerinin PRC değerinden bulunması için Şekil 4'te verilen eşitlik önerilmiştir ve bu eşitlikten elde edilen JRC değerleri analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 4. JRC ve PRC arasındaki ilişki.

Ayrışma derecesi arttıkça pürüzlülüğün de göreceli olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 5a). Buna benzer bir sonuç, Özvan vd. (2014) tarafından granit örnekleri için bulunmuştur. Buna karşın dalgalılık açısının ayrışma derecesinden etkilenmediği görülmüştür (Şekil 5b). İncelenen süreksizlik yüzeylerine ait ortalama dalgalılık açısı (U) ve JRC değeri, ayrışma derecesi gözetmeksizin sırasıyla 6,15° ve 11.83'tür.



Şekil 5. a. JRC ve b. U değerlerinin dağılımları.

JRC değerleri üzerinde Barton ve Bandis (1982) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak ölçek düzeltmeleri yapılmıştır (Eş.1). Bu ölçek düzeltmesinin, 5 m ve üzerindeki süreksizlik uzunlukları için oldukça düşük pürüzlülük değerleri vereceği yazarları tarafından belirtilmiştir. Buna rağmen pürüzlülüğün düşük normal gerilme altında da yenilebileceği düşünüldüğünden, 620 cm uzunluğundaki profiller için de ölçek düzeltmesi yapılmıştır. Buna karşıt olarak dalgalılığın yenilmesi için daha yüksek normal gerilme koşulları oluşması gerekmektedir.

$$JRC_n = JRC_0 \left(L_n/L_0 \right)^{-0,02JRC_0} \quad (1)$$

Burada; JRC_n düzeltilmiş pürüzlülük katsayısı, JRC_0 10 cm ölçeği temsil eden pürüzlülük katsayısı, L_n arazideki süreksizlik uzunluğu, L_0 ise 10 cm'dir.

3. DÜZLEMSEL KAYMA ANALİZLERİ

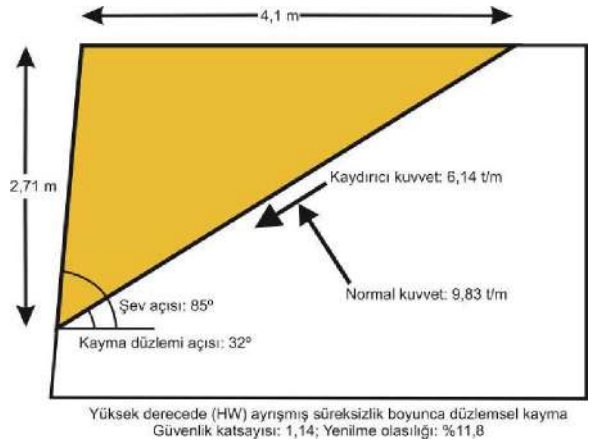
3.1 Hassasiyet ve Olasılık Analizleri

Kaya kütlesi parametrelerine ait belirsizlikler, girdi parametrelerinin ve çevresel koşulların değiştirilerek kullanılmasıyla ve olasılığa dayalı parametrik analizlerle giderilebilir (Hammah vd., 2009; Akbaş ve Huvaj Sarıhan, 2015; Ceryan vd., 2018). Daha önce üzerinde kaymanın gerçekleştiği bir şev için RocPlane v.2.038 (Rocscience, 2009) programı kullanılarak, olasılığa dayalı düzlemsel kayma analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde girdi parametresi olarak kullanılan birim hacim ağırlık ve artık içsel sürtünme açısı değerleri Koca (1995) ve Koca ve Kıncal (2004)'ten alınmıştır. Düzlemsel kayma analizlerinde kullanılan ortalama değerler Çizelge 1'de verilmiştir.
Analizlerde, süreksizlik yüzeyi, Barton ve Bandis (1982) yenilme kriteri ile modellenmiştir. 32° eğime sahip, 5 m uzunluğundaki soğuma çatlağı üzerindeki düzlemsel kayma olasılığı araştırılmıştır (Şekil

6). Buna göre mevcut koşullarda duraylılığını korumakta olan şevin MW ve HW yüzeyler için güvenlik katsayıları sırasıyla 1.16 (%5,7) ve 1.14 (%11,8)'tür.

Çizelge 1. Düzlemsel kayma analizlerinde kullanılan ortalama değerler.

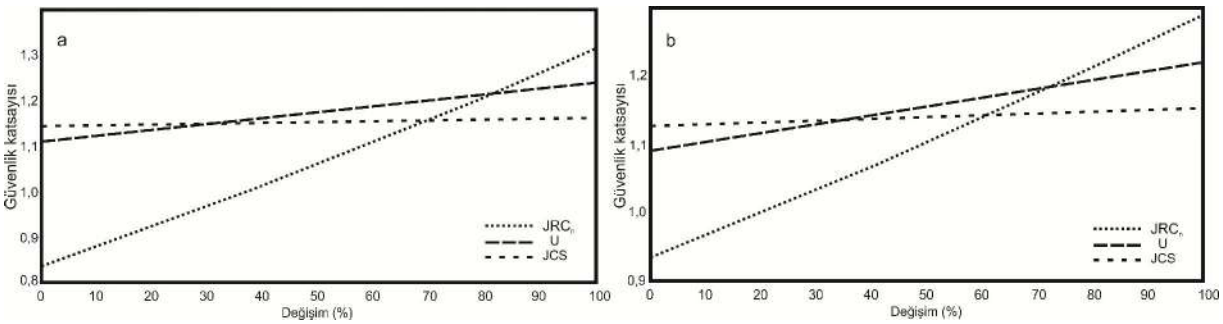
Parametre	MW	HW
Birim hacim ağırlık(kN/m^3)	22	20.86
Φ_r (°)	18	16
JRC_0	9.59	13.32
JRC_n	4.23	4.91
JCS (MPa)	33.36	23.24
Dalgalılık açısı (°)	6.074	6.119
Şev açısı (°)	85	85
Şev yüksekliği (m)	8.4	8.4
Süreksizlik eğimi (°)	32	32
Basamak genişliği (m)	4.1	4.1
N	8	12



Şekil 6. RocPlane programında yapılan mevcut durumu gösteren olasılığa dayalı düzlemsel kayma analizi çıktıları

Olasılık analizlerinden sonra güvenlik katsayısı (GK) üzerinde parametrelerin etkisinin araştırılması için hassasiyet analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, minimum ve maksimum JRC_n ve U değerleri arasındaki değişimin güvenlik katsayısıyla etkileşimi grafiksel olarak incelenmiştir (Şekil 7).

Bunun yanı sıra JCS değeri için de değişimler gözlenmiştir. Sonuç olarak ölçek düzeltmesi yapılmış JRC değerlerinin, GK üzerinde dalgalılık açısına göre daha etkili olduğu belirlenmiştir. JCS değerinin ise güvenlik katsayısı üzerindeki etkisi oldukça düşüktür (Şekil 7).

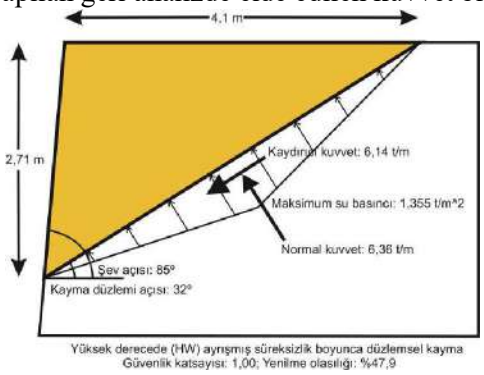


Şekil 7. RocPlane programında dalgalılık açısı (U), JRC_n ve JCS için a. MW b. HW düzlemleri dikkate alınarak gerçekleştirilen hassasiyet analizi sonuç grafikleri.

3.2 Geriye Dönük Analizler

Yenilme anında etkili olan makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi için çoğunlukla geri analizlere başvurulur. Böylece, şevin gelecekteki duraylılık koşulları daha iyi tahmin edilebilir. Limit denge koşulunu temsil eden (GK=1) durumdaki JRC ve doruk içsel sürtünme açısı değerleri belirlenmiştir. Andezit şevindeki düzlemsel kaymanın şiddetli yağışlar sonrası meydana geldiği bilinmektedir. Bu çalışmada, geriye dönük analizler kapsamında % 100 suya doygunluk oluşması durumu dikkate alınmıştır. Süreksizlik yüzeyi boyunca etkiyen su basınçları, süreksizliklerin şev yüzeyini kestiği noktada su akışına izin verecek şekilde modellenmiştir (Şekil 8). Aynı model üzerinde MW ve HW olmak üzere iki ayrı düzlem varsayımı için geriye dönük analizler gerçekleştirilmiştir. Buna göre, JRC değerleri kayma sonrasında, MW için 0,97 puan, HW için ise ortalama 1,1 puan azalmıştır. Buna bağlı olarak, MW ve HW yüzeylerin içsel sürtünme açısı değerlerinin, sırasıyla % 18.92 ve % 23.80 azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 8. RocPlane programında yapılan geri analizde elde edilen kuvvet bileşkeleri ve olasılık analizi sonucu



3.3 Parametrik Analizler

Dalgalılık açısının, JRC_n değerine göre GK üzerinde daha az etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Buna rağmen dalgalılık açısının JRC_n kadar etkili olabileceği taban değerinin belirlenmesine yönelik parametrik analizler yapılmıştır.

Arazide gözlenen Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen 10 adet süreksizlik profilinden oluşan JRC sınıflamasının ilk altı sınıfı dikkate alınarak her bir aralık için taban dalgalılık açısı belirlenmiştir. Buna göre 0-2 JRC aralığındaki yüzeylerde dalgalılık açısı en az 11.85° olursa GK üstünde göreceli olarak daha etkili olacağı bulunmuştur. JRC değer aralığı arttıkça bu taban dalgalılık açısı değeri de MW ve HW yüzeylerde aynı şekilde artmaktadır (Çizelge 2).

Çizelge 2. JRC değer aralıklarına karşılık gelen taban dalgalılık açısı değerleri.

JRC	U (°)
0-2	11.85
2-4	12.55
4-6	13.45
6-8	15.18
8-10	17.60
10-12	21.60

4. SONUÇLAR

Uzun dönemli şev duraylılık analizlerinde dalgalılık önem kazanmaktadır. JRC_n değeri ayrışma derecesi arttıkça artmaktadır; ancak üzerinde makaslama deformasyonu gerçekleşen yüzeyin JRC_n değeri azalmaktadır. Buna göre gelecekteki şev tasarımlarında dalgalılık açısının bağıl olarak yüksek olduğu yerlerde şev duraylılığı analizlerinde dalgalılık açısı mutlaka dikkate alınmalıdır. Buna karşın düşük normal gerilmelerde dalgalılık açısı değerlerinin makaslama dayanımı üzerinde JRC_n değerine

göre daha az etkili olacağı düşünülmelidir. Analizlerde çevresel etmenlerden gelebilecek yükler de değerlendirilmelidir. Analiz sonuçlarının pürüzlülük anizotropisinden etkilenmemesi için kayma yönü ile pürüzlülük ölçümlerinin aynı yönde olmasına dikkat edilmelidir.

5. KAYNAKLAR

Akbas, B., Huvaj Sarıhan, N., 2015. Probabilistic Slope Stability Analyses Using Limit Equilibrium and Finite Element Methods. Proceedings of 5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR), Rotterdam, 716-721.

Alemdağ, S., Akgun, A., Kaya, A., Gökçeoğlu, C., 2014. A large and rapid planar failure: causes, mechanism, and consequences (Mordut, Gumushane, Turkey). Arabian Journal of Geosciences, 7, 1205-1221.

Amanloo, F., Hosseinitoudeshki, V., 2013. The effect of joint roughness coefficient (JRC) and joint compressive strength (JCS) on the displacement of tunnel. International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 4(8), 2216-2224.

Bahaaddini, M., Hagan, P.C., Mitra, R., Hebblewhite, B.K., 2014. Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study. Engineering Geology, 181, 212-223.

Bandis, S., Lumsden, A. C., Barton, N., 1981. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 18, 1-21.

Barton, N.R., Bandis, S.C., 1982. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. Proceedings of 23rd U.S. symposium on rock mechanics, Berkeley, 739-760.

Barton, N.R., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 10 (1-2), 1-54.

Bhasin, R., Høeg, K., 1998. Numerical modelling of block size effects and influence of joint properties in multiply jointed rock. Tunnelling and Underground space Technology, 13(2),181-188.

Ceryan, N., Kesimal, A., Ceryan, Ş., 2018. Chapter 13- Probabilistic Analysis Applied to Rock Slope Stability: A Case Study From Northeast Turkey. P., Samui, D., Kim, C., Ghosh (eds.) Integrating Disaster Science and Management, 221-261, Elsevier.

Choi, S.O., Chung, S.K., 2004. Stability analysis of jointed rock slopes with the Barton-Bandis constitutive model in UDEC. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(1), 581-586.

Fardin, N., Stephansson, O., Jing, L., 2011. The scale dependence of rock joint surface roughness. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(5), 659-669.

Ficker, T., 2017. Fractal properties of joint roughness coefficients. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 94, 27-31.

Gökçeoğlu, C., Aksoy, H., 2000. New approaches to the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses. Engineering Geology, 58, 1-23.

Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Curran, J.H., 2009. Probabilistic slope analysis with the finite element method. Proceedings of 43rd U.S. Rock Mechanics Symposium & 4th U.S. - Canada Rock Mechanics Symposium, Asheville.

Hencher, S.R., Toy, J.P., Lumsden, A.C., 1993. Scale dependent shear strength of rock joints. Proceedings of the 2nd International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Lisbon, 233-41.

Homand, F., Belem, T., Souley, M., 2001. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads. International Journal for Numerical and Analytical Methods, 25(10), 973-999.

Huang, X., Haimson, B.C., Plesha, M.E., Qui, X., 1993. An investigation of the mechanics of rock joints-Part 1 Laboratory investagation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 30(3), 257-269.

ISRM (International Society For Rock Mechanics), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested Methods, R., Ulusay and J.A. Hudson (eds), ISRM Turkish National Group, Ankara.

Koca, M.Y., 1995. Slope stability assessment of the abondoned andesite quarries in and around the İzmir City centre. Dokuz Eylul University, İzmir.

Koca, M.Y., Kıncal, C., 2004. Abandoned stone quarries in and around the Izmir city centre and their geo-environmental impacts-Turkey. Engineering Geology, 75(1), 49-67.

Ladanyi, B., Archambault, G., 1969. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. Rock Mechanics: Theory and Practice, Proceedings of Eleventh Symposium on Rock Mechanics, Berkeley, 105-125.

Lee, H.S., Park, Y.J., Cho, T.F., You, K.H., 2001. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(7), 967-980.

Lee, Y.H., Carr, J.R., Barr, D.J., Haas, C.J., 1990. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 27(6), 453-464.

Miller, R. P. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. University of Illinois, Champaign.

Özvan, A., Dinçer, İ., Acar, A., Özvan, B., 2014. The effects of discontinuity surface roughness on the shear strength of weathered granite joints. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 801-813.

Pain, A., Kanungo, D.P., Sarkar, S., 2014. Rock slope stability assessment using finite element-based modelling–examples from the Indian Himalayas. Geomechanics and Geoengineering, 9(3), 215-230.

Pitney Bowes, 2010. MapInfo Professional v10.0. https://www.pitneybowes.com/us/mapinfo, Troy, New York, USA.

Plesha, M.E., 1987. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 11(4), 345-362.

Raghuvanshi, T.K., 2019. Governing factors influence on rock slope stability–statistical analysis for plane mode of failure. Journal of King Saud University-Science, 31(4),1254-1263.

Rocscience, 2009. RocPlane v.2.038 www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

Roko, R.O., Daemen, J.J.K., Myers, D.E., 1997. Variogram characterization of joint surface morphology and asperity deformation during shearing. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(1), 71-78.

Saeb, S., 1990. A variance on Ladanyi and Archambault's shear strength criterion. Barton, S. (ed) Rock Joints. Balkema, Rotterdam.

Sanei, M., Faramarzi, L., Goli, S., Fahimifar, A., Rahmati, A., Mehinrad, A., 2015. Development of a new equation for joint roughness coefficient (JRC) with fractal dimension: a case study of Bakhtiary Dam site in Iran. Arabian Journal of Geosciences, 8, 465-475.

Tatone, B.S.A., 2009. Quantitative characterization of natural rock discontinuity roughness in-situ and in the laboratory. University of Toronto Graduate Department of Civil Engineering, Toronto.

Türk, N., Dearman, W.R., 1985. Investigation of some rock joint properties: Roughness angle determination and joint closure. Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, 197-204.

Türk, N., Greig, M.J., Dearman, M.R., Amin, F.F., 1987. Characterisation of rock joint surfaces by fractal dimension. Proceedings of 28th US symposium on rock mechanics, Tucson, 1223-1236.

Ueng, T.S., Chang, W.C., 1990. Shear strength of joint surface profiles. Hustrulid & Johnson (eds) Rock Mechanics Contributions and Challenges. Balkema, Rotterdam.

Ueng, T.S., Jou, Y.J., Peng, I.H., 2010. Scale effect on shear strength of computer aided manufactured joints. Journal of GeoEngineering, 5(2), 29-37.

Yoshinaka, R. Yamabe, T., 1986. Joint stiffness and deformation behaviour of discontinous rock. International Journal of Rock Mechanics and Mininng Sciences & Geomechanical Abstracts, 23(1), 19-28.

Zhao, L.H., Jiao, K.F., Zuo, S., Yu, C.H., Tang, G.P., 2020. Pseudo-static stability analysis of wedges based on the nonlinear Barton-Bandis failure criterion. Geomechanics and Engineering, 20(4), 287-297.

Karayolu İnşaatı Sırasında Tetiklenen Derin Kaymanın Özellikleri ve İyileştirme Önerileri: Elâzığ–Malatya

Properties of the Deep-Seated Slide Triggered by the Highway Construction and Remedial Measures: Elâzığ–Malatya

T.Y. Duman[1,*], Y. Taş[2], C.R. Cavlaz[1], T. Özdilek[3], B. Avcı[1], O. Şimşek[1]

[1] *Fugro Sial, Farabi sok, No 40/4, 06680 Kavaklıdere Çankaya-ANKARA*
[2] *KGM, 8. Bölge Müdürlüğü, Zübeyde Hanım Cad. No 73 23100 ELAZIĞ*
[3] *Doğuş-Gülsan İSTANBUL*
*(*t.duman@fugro.com)*

ÖZ: Elâzığ–Malatya arasında bölünmüş devlet yolu inşaatı sırasında, 10 Nisan 2017 tarihinde büyük bir kayma meydana gelmiştir. Veli Palas olarak adlandırılan kayma, dağ yamacında mevcut eski bir heyelan kütlesi içinde genişliği 365m, uzunluğu 270m ve derinliği 45m olan dairesel tipte meydana gelmiştir. Kayma, denge durumunda olan eski bir heyelanın orta kesimlerinde yol inşaatı kazısı sırasında tetiklenmiştir. Ayrıntılı mühendislik jeolojisi haritalaması, sondaj ve inklinometre ölçümlerine dayalı bir jeolojik–jeoteknik model oluşturulmuştur. Bu model yavaş ancak derin bir kayma için ekonomik ve etkili bir destek sistemi ile kalıcı duraylılığı sağlayacak optimum çözümün geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Geliştirilen destek sistemi fore kazık ve aç–kapa yapısından oluşmaktadır. Destek sistemi limit denge ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilerek projelendirilmiş ve sahada uygulanmıştır. Uygulama sırası ve sonrasında aletsel olarak izlenen destek sistemi, kayma yükünü beklenen ölçülerde deformasyonla karşılamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karayolu, derin kayma, iyileştirme, aç–kapa, kazıklı destek sistemi.

ABSTRACT: *During the construction of the divided highway between Elazığ and Malatya, a large slide, named Veli Palas, occurred on April 10, 2017. The Veli Palas slide of 45m deep, 365m wide and 270m long, took place in a dormant landslide mass on the mountain slope. It formed in a rotational slide type as slow and deep-seated. The slide was triggered during construction excavation in the middle of a dormant landslide. A geological–geotechnical model created based on the detailed engineering geological mapping, drillings, and inclinometer measurements. The model has enabled to develop an optimum support system, which is both economical and effective, provides permanent stability for a slow but deep sliding. The support system consists of bored piles and cut-and-cover structures. The system has been analysed by limit equilibrium and finite element methods, designed, and implemented in the field. It has been monitoring instrumentally during and after the application and meets the slide load with expected deformation.*

Keywords: *Highway, deep–seated slide, remediation, cut & cover, bored piles.*

1. GİRİŞ

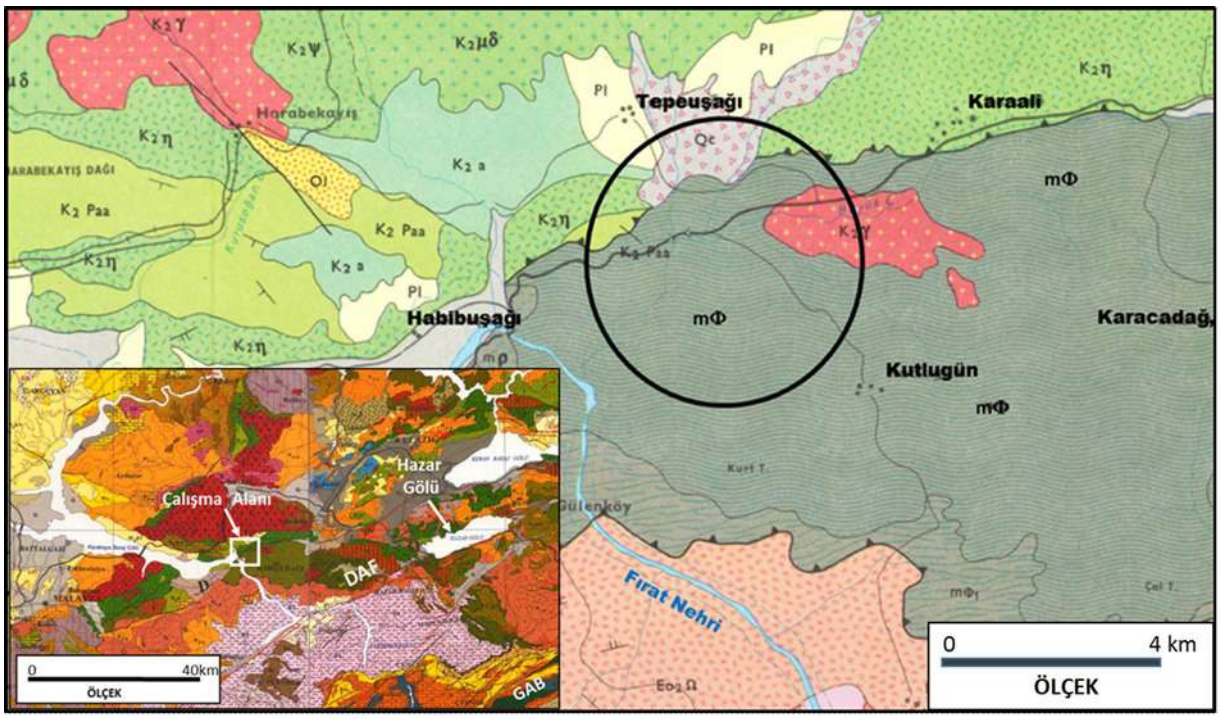
Elâzığ–Malatya arasında, bölünmüş devlet yolu yapım aşamasında, 10 Nisan 2017 tarihinde büyük bir kayma meydana gelmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü, 8nci Bölge Müdürlüğü tarafından bu kaymanın kalıcı duraylılığının sağlanması istenilmiştir. Bu istek doğrultusunda sahada gerekli araştırma ve incelemeler yapılarak jeolojik model oluşturulmuş ve çözüm önerileri araştırılmıştır. Veli Palas olarak adlandırılan kayma Fırat Nehri drenaj sistemi içinde dağ yamacı üzerinde meydana gelmiş eski bir heyelan içinde oluşmuştur. Eski heyelan yoğun tektonik aktiviteye sahip bir bölgede, ofiyolitik karmaşık içerisinde granit sokulumlarıyla kesilmiş migmatitlerde oluşmuştur. Veli Palas kayması denge durumunda olan bu eski heyelanın orta kesimlerindeki yol inşaatı kazısı sırasında tetiklenmiştir. Kaymanın alansal dağılımı ve özellikleri ayrıntılı mühendislik jeolojisi haritalamasıyla ortaya konulmuştur. Düşeydeki geometrisi ve hızı 5 adet araştırma sondajları ve inklinometre ölçümleriyle araştırılmıştır. Bu araştırmalardan elde edilen bilgiler esas alınarak oluşturulan jeolojik–jeoteknik model yavaş ancak sürekli hareket eden derin bir kaymanın kontrol edilebilmesi için gereken

parametrik bilgileri (mekanizma, boyut ve hız) sağlamıştır. Bu bilgiler sayesinde kayma için ekonomik ama güvenilir bir destek sistemi ile kalıcı duraylılığı sağlayacak optimum çözüm geliştirilmiş ve uygulanmıştır.

2. JEOLOJİ

Veli Palas kayması migmatitler içerisinde meydana gelmiştir. Migmatitler, Doğu Anadolu fayı ve Güneydoğu Anadolu bindirme kuşağı (Emre vd. 2017) içerisinde yeralan bölgede yüzeylenen ve literatürde eksiksiz bir ofiyolit istifi olarak bilinen Kömürhan ofiyolitik karmaşığının bir kaya türüdür (Şekil **1**). Kayma üzerinde ve etrafında güncel yamaç molozu, akarsu sekisi ve alüvyon çökelleri de gözlenir. Migmatitler bölgede İspendere–Kömürhan ofiyolitleri (Yazgan, 1983; Poyraz, 1988), Elâzığ magmatik karmaşığı (Hempton, 1985) veya Yüksekova karmaşığının bir bölümü olarak adlandırılmaktadır. Genelde gabro, diyabaz ve bazalt birimlerinden oluşan migmatitler yeşil şist amfibolit fasiyesinde metamorfizma geçirmişlerdir (Tekeli ve Oral, 1986). Migmatitler tabakalı ve izotropik olarak gözlenen gabrolar, kuvars–diyorit ve diyorit sokulumları, diyabaz daykları ve pegmatitlerden oluşur. Gabro ve diyabaz sınırlarında granofir daykları da gözlenir. Gabro üst kesimlere doğru levha dayaklarına geçiş gösterir. Bu birimler yer yer erken Maastrihtiyen granitoyidi tarafından kesilmektedir. Granitoyidler bej pembe, açık renkli, mikro-granit, granodiyorit porfir mikro–granodiyorit kaya türlerinden oluşmaktadır (Herece, 2008).

Çalışma bölgesinde migmatitler Eosen volkanikleri üzerinde tektonik dokanakla yer alan dağ boyutunda bir tektonik dilimdir (Şekil 1) Bu nedenle, yoğun bir deformasyona uğramış, süreksizlik sistemleri tarafından parçalanmış durumdadır. Granodiyorit sokulumları da hem kesme dokanaklarında hem de hidrotermal aliterasyonlarla kaya kütle özelliklerinin zayıflamasına neden olmuştur. Bunlara bağlı olarak, içerisinde blok boyutunda sağlam kesimleri olsa da migmatitler zayıf kaya kütle özellikleri göstermektedirler.



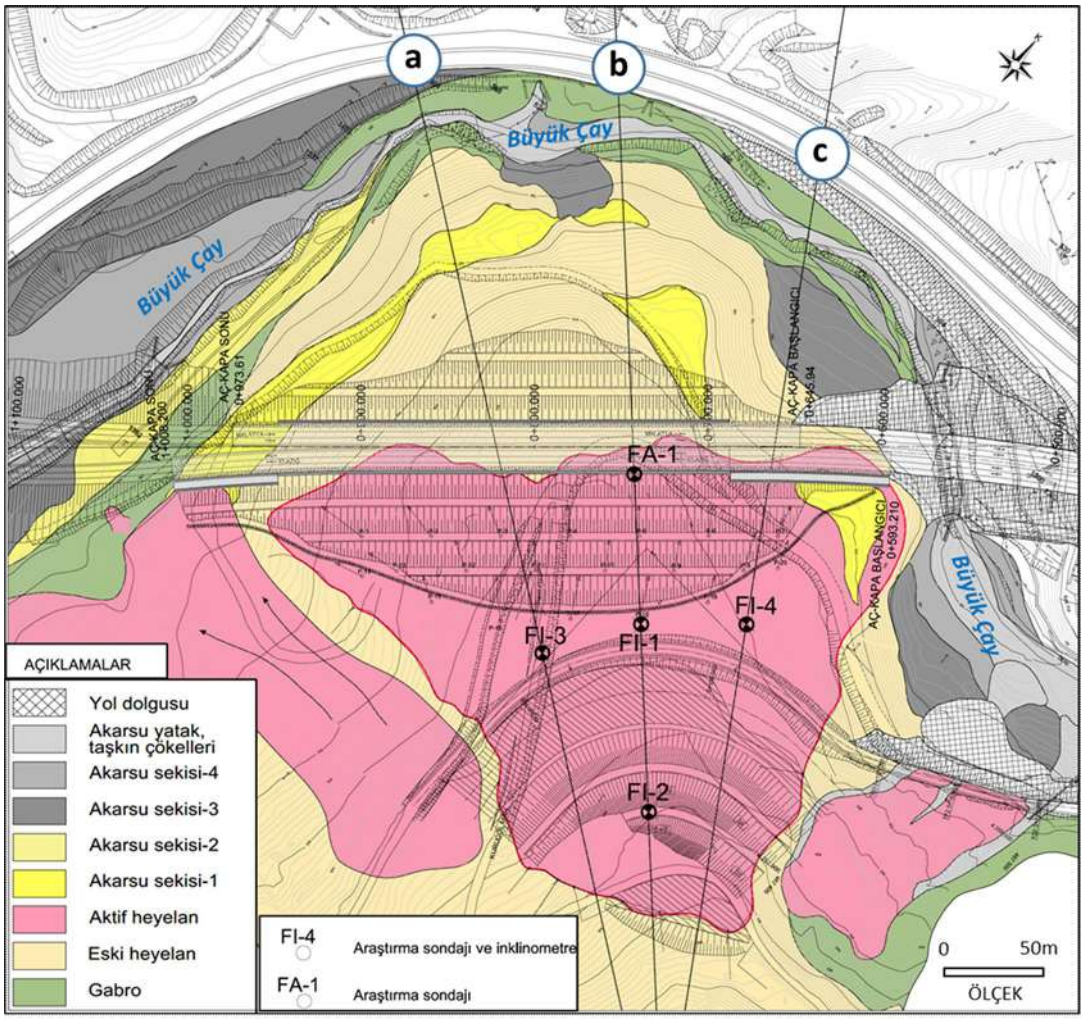
Şekil 1. (a) Çalışma alanının 1:500.000 ölçekli jeoloji haritası (Bilgiç, 2002) üzerindeki yeri; (b) Veli Palas kaymasının meydana geldiği migmatitler (mϕ) ve ilişkide oldukları diğer kayaların 1:100.000 ölçekli jeoloji haritası (Tekeli ve Oral, 1986'dan alınmıştır). Açıklamalar: E_{O2}, Eosen-Oligosen volkanitleri; K_{Pa2}, K_{δ}, K_{η} K_{μ} Kretase döneminin farklı magmatik kayalarını; DAF, Doğu Anadolu fayı; GBD, Güneydoğu Anadolu bindirme kuşağını göstermektedir.

3. JEOMORFOLOJİ

Veli Palas kayması yaklaşık D–B uzanımlı Büyük Çay Vadisi'nin sol yamacında meydana gelmiştir (Şekil 2) Vadi ofiyolitik kayalar üzerinde gelişmiş ve Fırat Nehri'ne bağlanan dentritik akaçlama ağı içerisinde yer alır. Vadinin sol yamaçları yaklaşık kuzeybatı yönüne akan ikincil dereler tarafından akaçlanmaktadır. Veli Palas kayması bu yan dereler arasında ve aynı yönde uzanan belirgin bir sırtın ucunda meydana gelmiştir.

Kayma yol çalışmaları öncesinde de var olan eski bir heyelan kütlesi içinde meydana gelmiştir. Söz konusu eski heyelanın yakın jeolojik döneme kadar etrafındaki akaçlama sistemini denetleyen etkili bir aktiviteye sahip olup, Büyük Çay bu eski heyelan etkisiyle kuzeybatıya itilerek oluşan içbükey geometriyle belirgindir (Şekil 2).

Ancak, günümüzde bu etkiyi yitirdiği, dengeye ulaştığı heyelan kütlesinin topuk kesiminde, vadi tabanında derenin heyelan malzemesini askıda bırakarak ana kayayı kazmasıyla açıktır (Şekil 2). Bununla birlikte, bu eski heyelanı işaret eden taç, kabarma ve çökme yapıları gibi morfolojik özellikler kısmen aşınsa da büyük boyutları nedeniyle halen belirgin olarak izlenmektedir. Yakın çevresinde kendisine benzer morfolojik özellikler gösteren başka heyelanlar da bulunmaktadır.



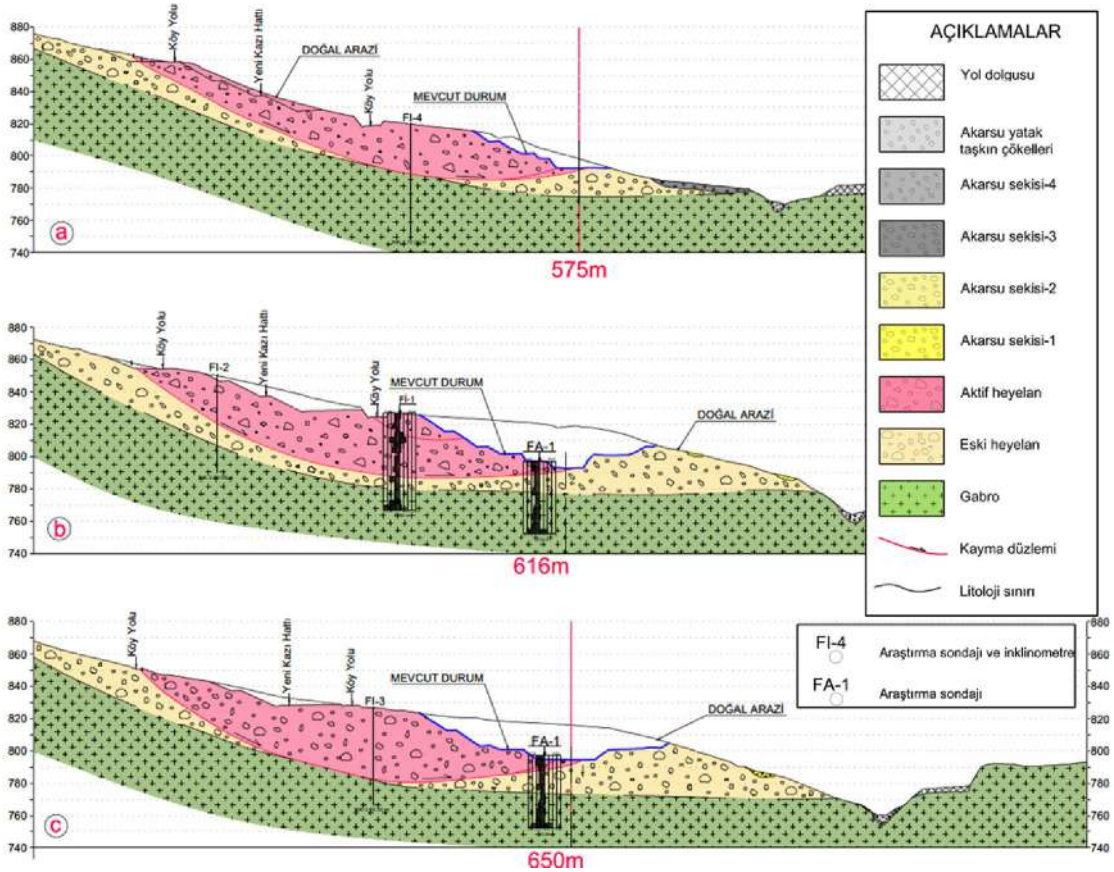
Şekil 2. Veli Palas kaymasının 1:1.000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası. Harita üzerinde kritik kesit (a, b, c), araştırma sondajı (FA-1) ve inklinometre yerleri (FI-1, FI-2, FI-3, FI-4) gösterilmiştir.

4. HEYELANIN TİPİ, BOYUTU VE ÖZELLİKLERİ

Veli palas kaymasının alansal dağılımı 1:1.000 ölçeğinde hazırlanan topoğrafya üzerinde yapılan haritalama ile ortaya konulmuştur (Şekil 2). Aynı ölçekte hazırlanan üç adet boy kesitte de kaymanın düşeydeki geometrisi belirlenmiştir (Şekil 3). Taç, yan sınır ve topuk bölgesinde meydana gelen belirgin kırıklar kayma kütlesi sınırlarının kolaylıkla haritalanmasını sağlamıştır (Şekil 3).

Kayma üzerinde yer yer gözlenen yamaç molozu migmatitlerden türeme köşeli, yarı köşeli blok, kaba çakıl, çakıl kum ve çamur malzemesinden oluşan güncel çökellerdir. Kaymanın sol tarafında, çalışma alanının güneybatı kesimlerinde haritalanan yamaç molozu >5 m kalınlıktadır. Fırat Nehri yan kollarından olan Büyük Çay tarafından oluşturulan seki çökelleri üç farklı seviyede izlenirler. Bölgede yüzeylenen farklı ofiyolitik kayalardan türeme kaba çakıl, çakıl, kaba kum ve çamur malzemesinden oluşan gevşek tutturulmuş malzemedir. Güncel yatak ve taşkın ovası çökelleri şeklinde izlenen alüvyonlar da benzer şekilde farklı ofiyolitik kayalardan türeme kaba çakıl, çakıl, kaba kum ve çamur malzemesinden oluşan tutturulmamış güncel birikimlerdir.

Kaymanın düşeydeki geometrisi için açılan dört sondaja inklinometre yerleştirilmiştir. Bu inklinometreler kayma alanı içinde kritik üç kesit üzerinde 60 m derinliğinde yerleştirilmiştir (Şekil 2 ve Şekil 3). Sondaj verileri yüzeyde yapılan gözlemlere uygun olarak kayan malzemenin tipik bir eski heyelan malzemesi olduğunu doğrulamıştır. Malzeme zaten kendi orijinal durumunda bloklu olan ancak, kaymalarla iyice deforme olmuş, yer yer kalın kırmızı kil zonları ve kaya özelliğini yitirmiş zemine dönüşmüş diyabaz ve kısmen zayıf orta dayanımlı diyabaz bloklarından oluşmaktadır. Yapılan haritalama Veli Palas kaymasının 185–366m genişlikte ve 245–270m uzunlukta olduğunu, inklinometre ölçümleri ise 45m derinlikte dairesel geometriye sahip bir düzlem üzerinde 2 mm/gün hızla kaydığını göstermiştir. Bu bilgilere göre Veli Palas heyelanı yavaş, derin ve dairesel bir kaymadır.



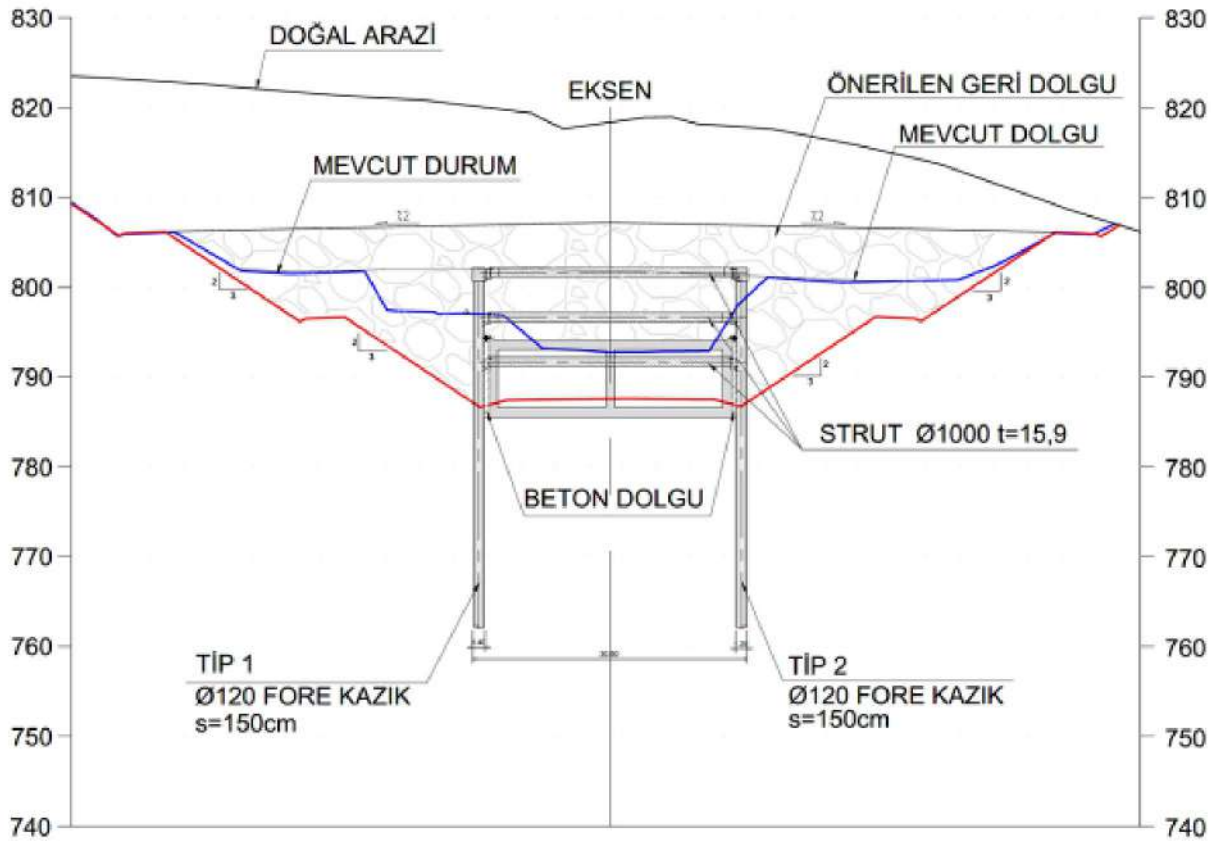
Şekil 3. Veli Palas kaymasının kritik kesitleri. Kesitlerdeki kaya türü dağılımı sondaj bilgilerine, kayma derinliği ise inklinometre ölçümlerine göre belirlenmiştir.

Şekil 4. Veli Palas kaymasının farklı kesimlerinden fotoğraflar. **a**, Taç kısmını oluşturan çatlak kısmına doğu-batı yününde bakış; **b**, aynı alanda çatlakların yakın görünümü; **c**, taş duvarda, heyelanın sağ sınırı ve yol yarmasında kayma düzlemi; **d**, yol sandık yarma tabanında kayma topuğu.

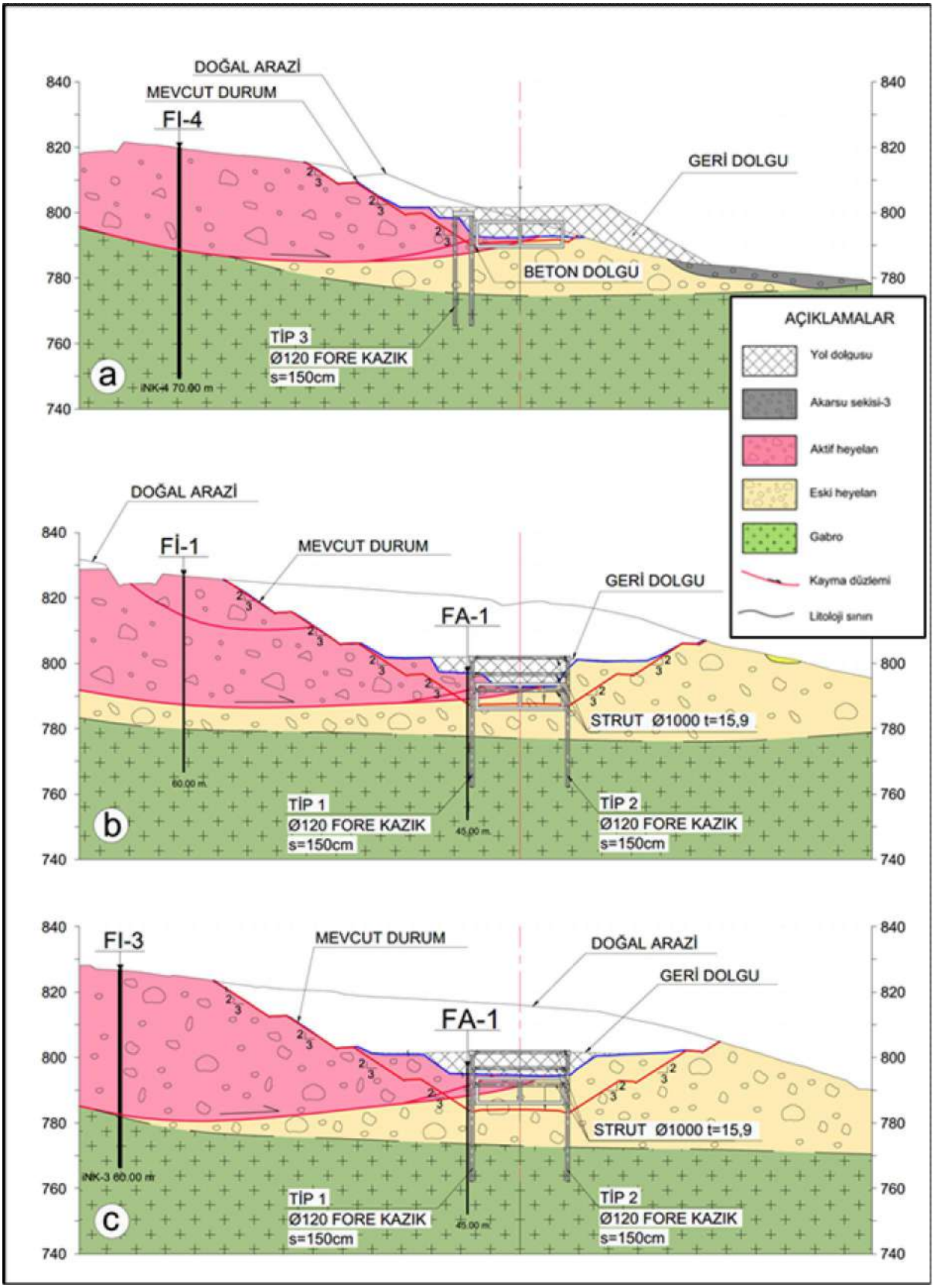
5. İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

Veli Palas kaymasının boyutları ve karayolu için gereken uzun dönem duraylılık dikkate alınarak farklı çözüm sistemleri araştırılmıştır (Şekil 5 ve 6). Bu amaçla öncelikle kalıcı destek sistemlerinin kurulması için devam eden kaymanın kontrol altına alınması ve en uygun kalıcı destek sistemlerinin belirlenmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda öncelikle geçici kontrolü sağlamak için geri dolgu yapılması, devamında da kazıklı destek sistemi ve aç-kapa yapısının en uygun ve ekonomik çözüm olduğu anlaşılmıştır (Şekil 5). Önerilen destek sistemlerinin analizleri hem sandık yarma hem de karma kesitlerde limit denge yöntemi ve sonlu eleman yöntemleriyle gerçekleştirilerek projelendirilmiş ve sahada uygulanması sağlanmıştır.

Öneri destek sistemi imalatının yapılabilmesi için öncelikle kaymanın geçici durumda stabilitesi sağlanmıştır (Şekil 5). Bu amaçla belirlenen miktarda topukta geri dolgu yapılmıştır. Devam eden aşamada ise geri dolgu üzerinden, sandık yarma kesitte karşılıklı tek sıra olarak 120 cm çapında ve 1,50 m aralıklı; karma kesitte ise çift sıra aynı çap ve aralıklı fore kazık imalatı yapılmıştır (Şekil 6). Kazık imalatlarının tamamlanmasını takiben, kırmızı kotun ~2 m altına kadar kazı ve aç-kapa yapısı inşa edilmiştir (Şekil 5). Son aşamada ise belirlenen seviyelerde uzun dönem kalıcı durumda duraylılık için gerekli olan geri dolgu yapılmıştır (Şekil 6). Uygulama sırası ve sonrasında aletsel olarak izlenen destek sistemi, kayma yükünü beklenen ölçülerde deformasyonla karşılamaktadır.



Şekil 5. Veli Palas heyelanının uzun dönem duraylılığı için önerilen, geri dolgu, fore kazık ve aç-kapa yapıları. Yapılarda öncelikle geçici kontrolü sağlamak için geri dolgu, devamında da kazıklı destek sistemi ve aç-kapa inşa edilecektir.



Şekil 6. Veli Palas heyelanının uzun dönem duraylılığı için önerilen, geri dolgu, fore kazık ve aç-kapa destek sistemlerinin jeolojik kesit üzerinde yerleşimi. Şekil üzerindeki FA-1 araştırma sondajları; Fİ-1 ve Fİ-4 hem araştırma hem de inklinometre sondaj yerini göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Veli Palas kayması derin dairesel geometride depremselliği yüksek olan bir bölgede ve kompleks bir jeolojik yapı içerisinde meydana gelmiştir. Yapılan ayrıntılı jeolojik ve jeomorfolojik çalışmalar kaymanın mevcut eski bir heyelanının yol kazısıyla tetiklenmesiyle oluştuğunu göstermiştir. Eski heyelan yakın jeolojik döneme kadar nehrin akışını kontrol eden, öteleyen bir hıza ve etkiye sahipti. Ancak sahada yapılan ayrıntılı incelemeler eski heyelanının ve tetiklenen kaymanın güncel vadi sistemini etkilemediği ve hatta günümüzde nehrin eski heyelan malzemesini deştiği, içine gömüldüğü belirlenmiştir. Bu durum yol kotu alt kesiminde kalan eski heyelan malzemesi ve yol kotu üst kesimlerde kalan tetiklenmiş kayma kütlesinin açık olarak belirlenmesine olanak sağlamıştır. Deneyime dayalı ortaya konulan bu bilgi Veli Palas kaymasının ekonomik ve güvenilir bir çözümle kontrol altına alınmasına olanak sağlamıştır. Mevcut durumda aletsel olarak izlenen destek sistemi, Veli Palas kaymasını beklenen ölçülerde deformasyonla karşılamaktadır.

7. KAYNAKLAR

Bilgiç, T., 2002. 1:500.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası Sivas Paftası. Türkiye 1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritaları, No: 10, M. Şenel (Ed.), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun, Ş., Elmacı, H., Şaroğlu, F., Çan, T. 2018. Active fault database of Turkey', Bulletin of Earthquake Engineering, 16, 3229–3275. doi 10.1007/s10518-016-0041-2.

Hempton, M. R. 1985. Structure and deformation history of the Bitlis suture near Lake Hazar, southeastern Turkey. Geological Society of America Bulletin, 96, 233–243.

Herece, E. 2008. Doğu Anadolu Fayı (DAF) Atlası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayınlar Serisi, Ankara, Seri No: 13, 359.

Poyraz, N., 1988. İspenderiye-Kömürhan (Malatya) ofiyolitlerinin jeolojisi ve petrografisi. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 151 s (Basılmamış).

Tekeli, O., Oral, A. 1986. Malatya İ27 (L41) paftası. 1:100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası. Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü, Ankara.

Yazgan, E., 1983. Geodynamic Evolution of the eastern Taurus Region. In: O. Tekeli and M.C. Göncüoğlu (Eds.). Geology of the Taurus Belt. 26-29 September 1983. MTA Ankara Turkey. 199-208 p.

Yazgan, E., 1984. Geodynamic Evolution of the eastern Taurus Region (Malatya- Elazığ area, Turkey), Proceedings of International Symposium, Geology of Taurus Belt, MTA, Ankara, 199-208.

Uluslararası Karayolunu Etkileyen Devasa Kızılbel Heyelanının Özellikleri ve İyileştirme Araştırmaları: Narin, Kırgızistan

Characteristics of the Large Landslide damaging the International Highway and Recommendations for Mitigations; Narin, Kyrgyzstan

T.Y. Duman*,[1] C.R. Cavlaz[1], B. Avcı[1], O. Şimşek[1]

[1] *Fugro Sial, Farabi sok, No 40/4, 06680 Kavaklıdere Çankaya–ANKARA*
(t.duman@fugro.com)

ÖZ: Kırgızistan'ı güney ülkelerine ve Umman Körfezi'ne bağlayan ana karayolu Bişkek'te başlar ve Narin–Torugart üzerinden güneye devam eder. Karayolu Narin kesiminde Kızılbel heyelanının orta kesiminden geçer. Heyelan, Himalaya Sıra Dağları'nda alternatifi olmayan bir geçitte meydana gelmiştir. Kızılbel heyelanı 1089 m uzunlukta, 252 m genişlikte ve 21,5 m derinliktedir. Miyosen kırıntılı karasal çökeller içinde meydan gelen heyelanın kayma yüzeyi çakıltaşı ile çamurtaşı tabakaları arasındaki düzlemlere karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, heyelan basamaklı–düzlemsel tipte meydana gelmiş devasa bir aktif kayma olarak tanımlanmıştır. Boyutları nedeniyle Kızılbel kaymasının duraylılığı ancak kazıklı destek ve diyafram duvar sistemleriyle sağlanabilmektedir. Önerilen çözümlerden ilki 1,20 m çapında, 50 m uzunlukta, 1,40 m aralıklı 3 sıra fore kazıklardan, ikincisi ise 1,00 m x 2,40 m panelli, 3 sıra 50 m uzunlukta diyafram duvardan oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Derin kayma, iyileştirme, diyafram duvar sistemi, kazıklı destek sistemi

ABSTRACT: *The main highway connecting Kyrgyzstan to the southern countries and the Gulf of Oman starts at Bishkek and continues through Narin–Torugart. The highway crosses over the central part of the Kızılbel landslide in Narin region. The landslide occurred in a pass with no alternative in the Himalayan Range Mountains in the region. The landslide is gigantic with dimensions of 1089 m long, 252 m wide and 21.5 m deep. Its rupture surface corresponds to the bedding in-between the conglomerate and mudstone layers of the Miocene clastic terrestrial sediments. Therefore, the landslide was defined as an active deep–translational rockslide type with a stepped–planar failure surface. Due to its dimensions, the stability of Kızılbel slide can only be achieved pile and diaphragm wall support systems. The first support system consists of 3 rows of bored piles of 50 m long with 1.20 m diameter in 1.40 m spacing, while the second is composed of 3 rows of 50 m long diaphragm walls with 1.00 m x 2.40 m panels.*

Keywords: *Highway, deep–translational rockslide, remediation, diaphragm walls, bored piles.*

1. GİRİŞ

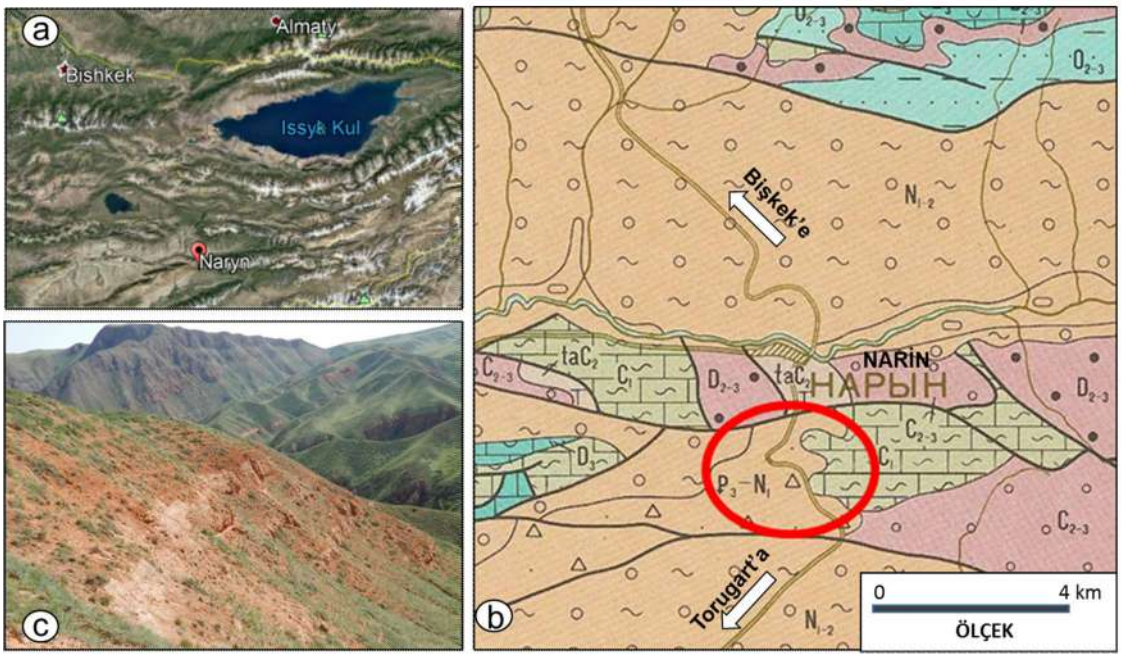
Arap Koordinasyon Grubu tarafından finanse edilen, Kırgızistan'ı güney ülkelerine ve Umman Körfezi'ne bağlayan ana karayolu Bişkek'te başlar, Narin–Torugart üzerinden devam eder. Karayolu Narin (Şekil 1a) kesiminde devasa Kızılbel heyelanının orta kesimi üzerinden geçmektedir. Heyelan, Himalaya Sıra Dağları'nda kritik bir geçitte meydana gelmiştir. Bölgede heyelanlı bu geçitte başka bir alternatif de bulunmamaktadır. Dolayısıyla, Kırgızistan Cumhuriyeti, Ulaştırma ve Haberleşme Bakanlığı bölgesel karayolu ulaşımını yıl içinde birçok kez aksamasına neden olan Kızılbel heyelanının kalıcı duraylılığının sağlanmasını istemiştir. Bu istek doğrultusunda sahada gerekli araştırma ve incelemeler yapılarak jeolojik–jeoteknik model oluşturulmuş ve çözüm önerileri araştırılmıştır.

Kızılbel kayması olarak adlandırılan heyelan karasal kırıntılı çökellerden yapılı dağ–yamacı üzerinde oluşmuştur. Kaymanın alansal dağılımı ve özellikleri ayrıntılı mühendislik jeolojisi haritalamasıyla ortaya konulmuştur. Düşeydeki geometrisi ve hızı sondaj ve inklinometre ölçümleriyle araştırılmıştır. Bu araştırmalardan elde edilen bilgiler esas alınarak oluşturulan jeolojik–jeoteknik model yavaş ancak,

sürekli hareket eden derin bir düzlemsel kaymanın kontrol edilebilmesi için gereken parametrik bilgileri (mekanizma, boyut ve hız) sağlamıştır. Bu bilgiler sayesinde kayma için güvenilir bir destek sistemi ile kalıcı duraylılığı sağlayacak optimum çözümler geliştirilmiştir. Sondajlı araştırmalar bölgedeki olağandışı iklim koşullarına uygun ekipmanların ülke dışından sağlanmasıyla gerçekleştirilebilmiştir.

2. JEOLOJİ

Kızılbel kayması karasal yelpaze çökelleri içerisinde meydana gelmiştir (Şekil 1b). Dağ–arası havzada depolanan bu çökeller kırıntılı ve jips seviyelerinde oluşur. Erken–Orta Miyosen yaşlı çökeller kalın tabakalı konglomera ve çamurtaşı seviyeleri ile karakteristiktir (Şekil 1c). Çakıltaşı seviyeleri yer yer karbonat çimentolu orta–kalın tabakalıdır. Kırmızı çamurtaşı ince tabakalı ve sıkı tutturulmuştur. Göl ve playa ortamlarını temsil eden jips tabakaları yanal ve düşey yönde devamsız olup, yer yer çamurtaşları arasında ara seviyeler şeklinde izlenmektedir (Voitovich vd. 1979). Bölge yoğun bir tektonik etki altında deformasyona uğramış ve kıvrım yapılarıyla şekillenmiştir. Kızılbel kayması geniş alanlar kaplayan yayvan bir kıvrım yapısının senklinal kanadında meydana gelmiştir. Senklinalin güney kanadında yer alan yelpaze çökelleri kuzey ve kuzeybatı yönlerinde 10–25 derece arasında değişen eğim değerleri kazanmıştır. Kayma alanında yelpaze çökelleri genelde güncel kolüvyon malzeme ile örtülmüş olarak gözlenir. Çakıltaşı seviyeleri geçirimli, az–orta derecede günlenmiş orta dayanımlı, çamurtaşı seviyeleri ise geçirimsiz, günlenmiş ve aşırı zayıf–zayıf kaya dayanımındadır. Yamaç yönündeki tabaklanma ve geçirimli–geçirimsiz seviyelerden meydana gelen yelpaze çökelleri Kızılbel kayması için uygun jeolojik koşulları oluşturmuştur.



Şekil 3. a, Çalışma alanının Google Earth görüntüsü üzerindeki yeri; b, Kızılbel kaymasının meydana geldiği Erken Orta Miyosen kırıntılı (P_3–N_1) ve daha yaşlı kayaların ($D_{2\text{-}3}$, Devoniyen; $C_{1\text{-}2\text{-}3}$, Kretase) 1:100.000 ölçekli jeoloji haritası (Voitovich vd. 1979); c, Miyosen kırıntılı yelpaze çökelleri.

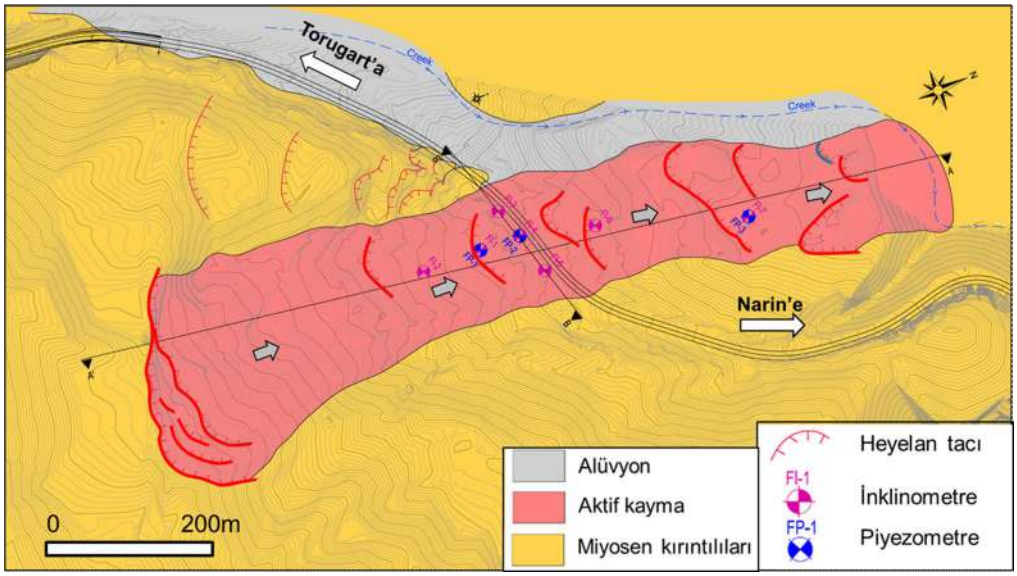
3. JEOMORFOLOJİ

Kızılbel kayması, yaklaşık doğu–batı uzanımlı İrisu Nehri'nin eksene yerleştiği bölgesel ölçekte bir senklinal yapısının güney kanadında meydana gelmiştir. Bu bölgesel yapıyı genelde kuzey–güney yönünde gelişmiş dentritik sistemler akaçlanmaktadır. Kızılbel kayması ana nehre güneyden bağlanan yaklaşık 75 km^2 alan kaplayan bir havza içinde gelişmiştir. Kaymanın meydana geldiği senklinal kanadı aynı zamanda doğu–batı uzanımlı dağların yamaçlarını da oluşturur. Bu yamaçlar kaya türü ve yapısal özelliklere bağlı olarak şekillenmiştir. Dağ yamaçları kıvrım öncesi tektonik hareketlerle bir

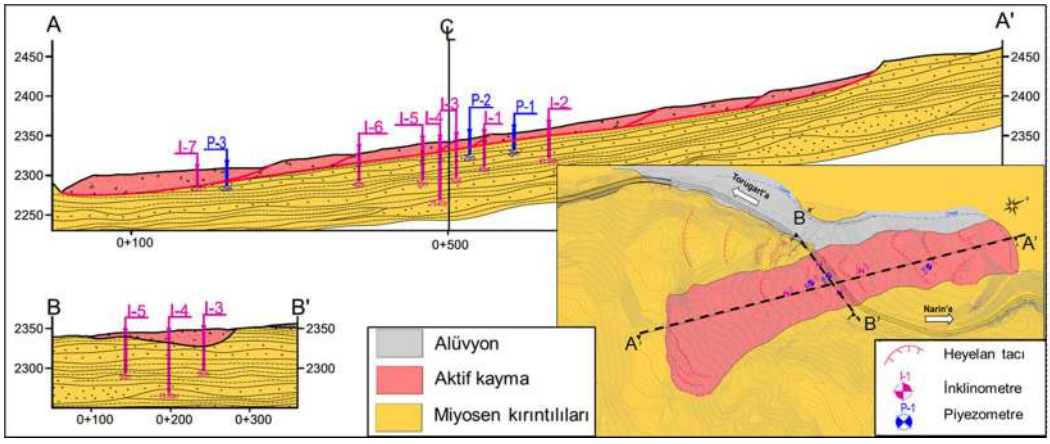
araya getirilmiş çökel kırıntılı ve karbonatlı kayalardan yapılıdır (Şekil 1b). Yamaç eğimleri tabakalanma eğimlerine uygun olarak şekillenmiş ve genelde 30–35 dereceden düşük eğimlere sahiptirler. Yamaç–içeri eğime sahip ikincil vadi yamaçları ve karbonat çimentonun yoğunlaştığı çakıltaşından oluşan kesimlerde yamaç eğimleri göreli olarak daha yüksektir. Kızılbel kayması alışılagelmiş heyelan boyutlarını aşmaktadır. Buna rağmen sahip olduğu morfolojik özellikler karmaşık görünümden daha çok sade ve belirgin ancak, büyük boyutta açıkça izlenebilmektedir. Kayma unsurlarından taç bölgesi, gerilme çatlakları, kabarma ve çökme yapıları, yan kayma sınırları etkileyici şekil ve boyutta gelişmiş morfolojik özellikler olarak gösterilebilmektedir. Diğer taraftan, Kızılbel kayması bölgede tekil örnek olup, kendisine benzer başka bir heyelan gözlenmemiştir.

4. HEYELANIN TİPİ, BOYUTU VE ÖZELLİKLERİ

Kızılbel kaymasının alansal dağılımı 1:1.000 ölçeğinde hazırlanan topoğrafya üzerinde yapılan hassas haritalama ile ortaya konulmuştur (Şekil 2). Taç, yan sınır ve topuk bölgesinde meydana gelen belirgin çatlaklar kayma kütlesi sınırlarının kolaylıkla haritalanmasını sağlanmıştır. Aynı ölçekte hazırlanan boy ve en kesitte de kaymanın düşeydeki geometrisi belirlenmiştir (Şekil 3). Kaymanın düşeydeki geometrisini belirlemek için kritik en ve boy kesit hatları üzerinde 20–75 m arası derinliklerde değişen yedi adet inklinometre yerleştirilmiştir (Şekil 2, 3).



Şekil 4. Kızılbel kaymasının 1:1.000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası. Harita üzerinde kritik kesit (A–A´ ve B–B´), inklinometre (bordo) ve piyezometre (mavi) yerleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Kızılbel kaymasının en (A-A´) ve boy (B-B´) kesitleri. Kesitlerde kaya türü dağılımı sondaj, kayma derinliği ise inklinometre ölçümlerine göredir. Kesit yerleri sağ taraftaki haritada gösterilmiştir.

Yapılan mühendislik jeolojisi haritasına göre Kızılbel kayması 1089 m uzunlukta ve 252 m genişliktedir (Şekil 2). Kaymanın derinliği boyuna kesitler boyunca yerleştirilen 5 adet inklinometre ölçümlerinden alınan derinlik bilgileriyle belirlenmiştir (Şekil 2). Kaymanın derinliği orta kesimlerde (yolun geçtiği kesiminde) 21,5 m'ye ulaşmaktadır. Bu derinlik yol boyunca alınan enine kesitte, bakışımsız bir geometri oluşturacak şekilde 5,5 m'lere azalarak sonlanmaktadır (Şekil 3). Kayma, kuzeye doğru tekil kabul edilebilecek bir kütlenin hareketi olarak meydana gelmiş ve benzer davranışla hareketini hızlı olarak sürdürmektedir. Bu durum, sahip olduğu yeni taç ve kabarma–çökme yapılarının oluşturduğu engebeli yüzey şekilleriyle belirgindir (Şekil 4). Kayma kütlesinin yan sınırları da güney–kuzey yönünde bir kilometreden fazla mesafe boyunca taze ve belirgin makaslama sınırları olarak izlenmektedir (Şekil 4). Kayma topuk kısmında beklendiği üzere daha karmaşık hale gelir ve daha çok dairesel kayma ve kısmen de akma tipi hareketleri de meydana gelir.

Kayma yüzeyi, Miyosen yaşlı kırıntılı karasal çökellerin konglomera ve çamurtaşı katmanları arasındaki tabakalanmaya karşılık gelmektedir. Bu nedenle Kızılbel heyelanı basamaklı–düzlemsel tipte meydana gelmiş devasa bir aktif kayma olarak tanımlanmıştır. Ana kayma kütlesi içinde yerel alanlarda geriye tiltlenme alanlarının özellikle orta kesimlerde kayma düzleminin basamak yaptığı kesimlerde veya topuk bölgesinde ikincil olarak meydana gelen dairesel kayma alanlarında oluştuğu düşünülmektedir.

Kayma malzemesi ve altındaki birimlerin özelliklerinin araştırılması için toplamda 316,7 m derinlikte olan 7 adet sondaj kuyusu tam karotlu olarak açılmıştır (FUGRO SIAL, 2017). Yerinde ve sondajlardan alınan 26 kaya ve 17 toprak karot örnekleri üzerinde mekanik ve fiziksel özellikleri belirlemek üzere testler yapılmıştır (Çizelge 1–3). Bunlarla birlikte, 25'er m derinlikte 3 kuyu da aynı yöntemle açılarak piyezometre yerleştirilmiş ve yeraltısuyu seviyesi ölçümleri alınmıştır. Böylece, bir sonraki aşama olan jeoteknik analizler için gerekli olan parametreler ASTM (D420, D586–11, D1587 ve D6230) standartlarına göre sağlanmıştır (STFA, 2018).

Çizelge 1. Heyelan malzemesinin fiziksel özellikleri

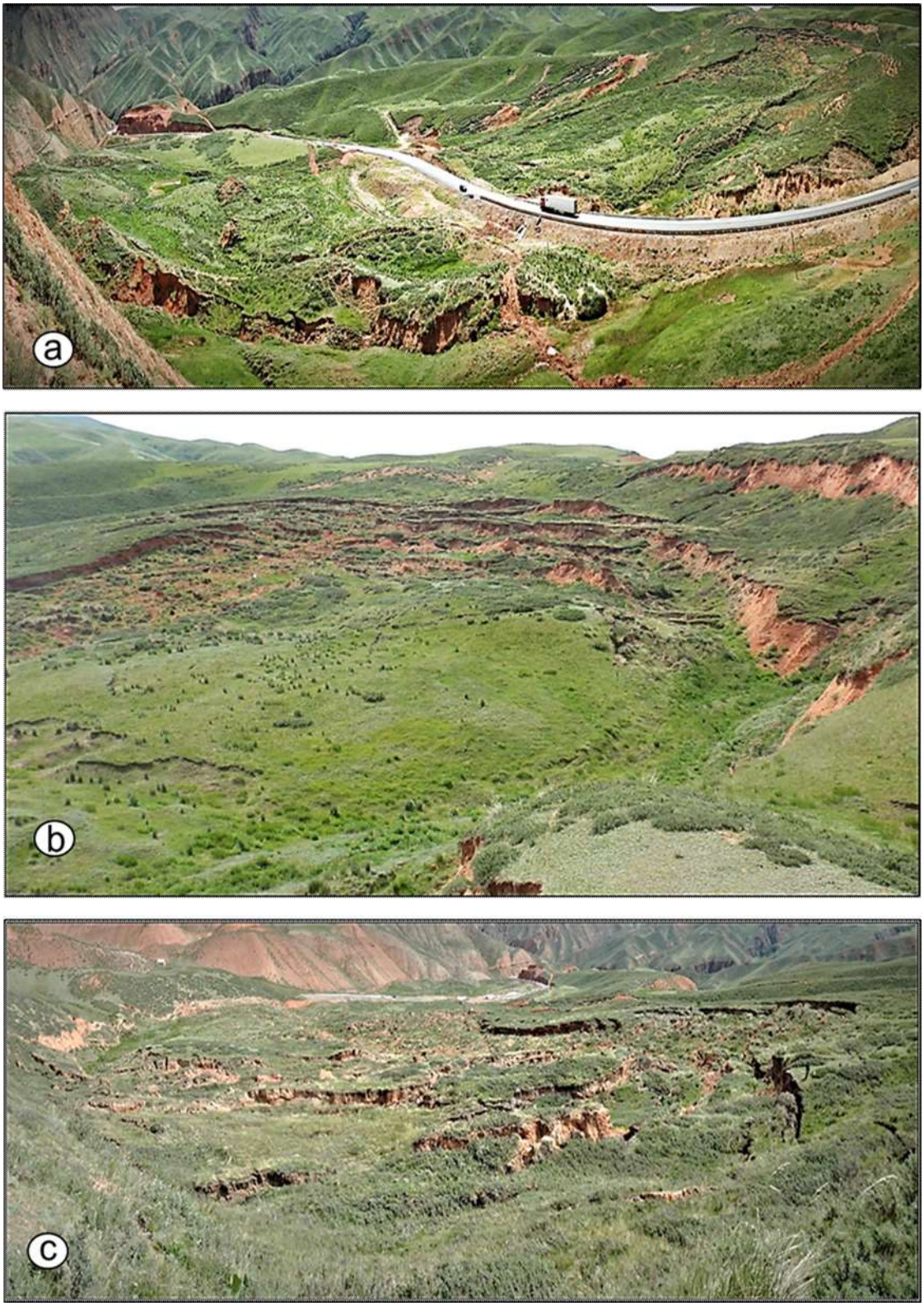
Derinlik, m	Doğal birim hacim ağırlık γ (gr/cm^3)	Doğal yoğunluk, γ (gr/cm^3)	Kuru yoğunluk γ (gr/cm^3)	Su içeriği w (%)	Boşluk oranı e (%)
0 – 5	1,93 – 2,16	–	1,59 – 1,71	21,7 – 26,5	–
5 – 25	2,70 – 2,74	1,84 – 2,22	1,38 – 1,96	10,7 – 32,9	27,2 – 49,3

Çizelge 2. Heyelan malzemesinde SPT testlerinden elde edilen N değerleri. Açıklama: çizelgede kullanılan yağlı kil fat-clay karşılığı olarak kullanılmıştır)

SPT	Çakıllı yağlı kil	Çakıllı kil	Yağlı killi kum	Kumlu kil	Kumlu silt	Çakıllı kumlu silt	Kumlu silt	Siltli kum
Sayısı	2	4	3	1	11	1	5	20
N değeri	15 – 18	2 – 50	5 – 11	16	7 – 67	8	8 – 21	19– 68

Çizelge 2. Heyelan malzemesi altındaki yelpaze çökellerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Birim	Doğal birim hacim ağırlık γ (gr/cm^3)	Tek eksenli basınç dayanımı σ_{ci} (MPa)	Çekme dayanımı σ_t (MPa)
Çakıltaşı	2,17 – 2,48	1,5 – 16,8	0,12 – 1,05
Çamurtaşı	2,04 – 2,52	0,5 – 30,30	0,04 – 1,68
Silttaşı	2,35	12,5	0,78

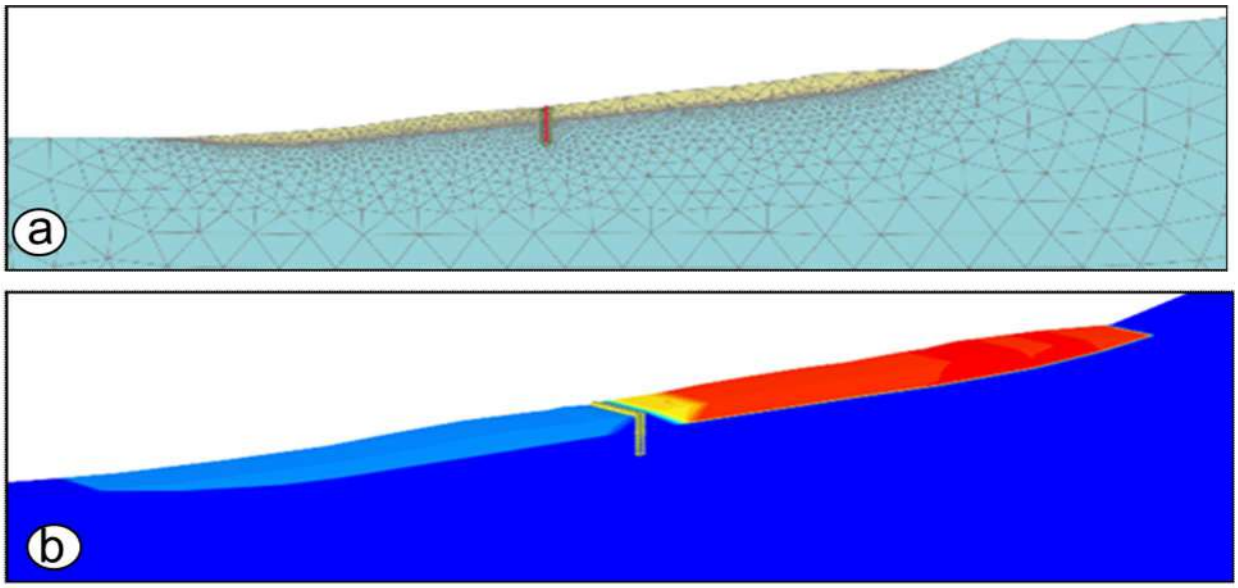


Şekil 4. Kızılbel kaymasının farklı kesimlerinden fotoğraflar. a, Kaymanın tamamına kuzeybatı taraftan bakış. Fotoğrafta Narin–Torugart yolu üzerindeki kamyon ölçektir. Fotoğrafın sol tarafında kaymanın topuğu karşı yamaca yaslanmıştır. Bu yamaçta kuzeye eğimli yamaç-içeri tabakalanma konumları belirgin olarak görülmektedir. b, Kaymanın taç kısmına kuzeybatı taraftan bakış. c, Taç bölgesinden, kuzeydoğu yönünden topuğa bakış. Topuk bölgesinde Narin–Torugart yolu üzerindeki kamyon ölçektir.

5. İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

Kızılbel kaymasının boyutları ve karayolu için gereken uzun dönem duraylılık dikkate alınarak farklı çözüm sistemleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmalarda heyelanın boyutları nedeniyle ancak, kazıklı destek ve diyafram duvar sistemleriyle duraylılığın sağlanabileceği anlaşılmış ve bu sistemler için yapılması gereken analizlere geçilmiştir. Her iki destek sistemi için limit denge, sonlu elemanlar ve yapısal analizler yapılmıştır. Limit denge analizleri 2–B ve 3–B olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Analizler sonucunda, fore kazıklı destek sisteminin 1,20 m çapında, 50 m uzunlukta, 1,40 m aralıklarda 3 sıra halinde, diyafram duvar sisteminin ise 1,00 m x 2,40 m panelli, 3 sıra halinde 50 m uzunlukta olması gerektiği anlaşılmıştır (Şekil 6).

Öneri destek sistemleri için uygulama çizimleri hazırlanarak inşaat sırası ve sonrasında uyulması gereken aşama ve standartlar belirtilmiştir. Bunlardan heyelanın en derin kesiminde ek destek yapılması ve yüzey akaçlama düzenin kurulmasının önemli olduğuna dikkat çekilmiştir. Ek destek sistemlerinin yerleri ayrıntılı özellikleri uygulama çizimlerinde belirtilmiştir. Ayrıca, uzun dönemde destek sistemi davranışının gözlemlenmesi amacıyla, inşaat sırasında yük-hücre, gerilme-ölçer ve inklinometre kurularak yapılara gelen basınç, çekme ve kesme kuvvetlerinin düzenli ölçülmesi, bu ölçümlere göre gerektiğinde önlem alınmasının önemi de belirtilmiştir.



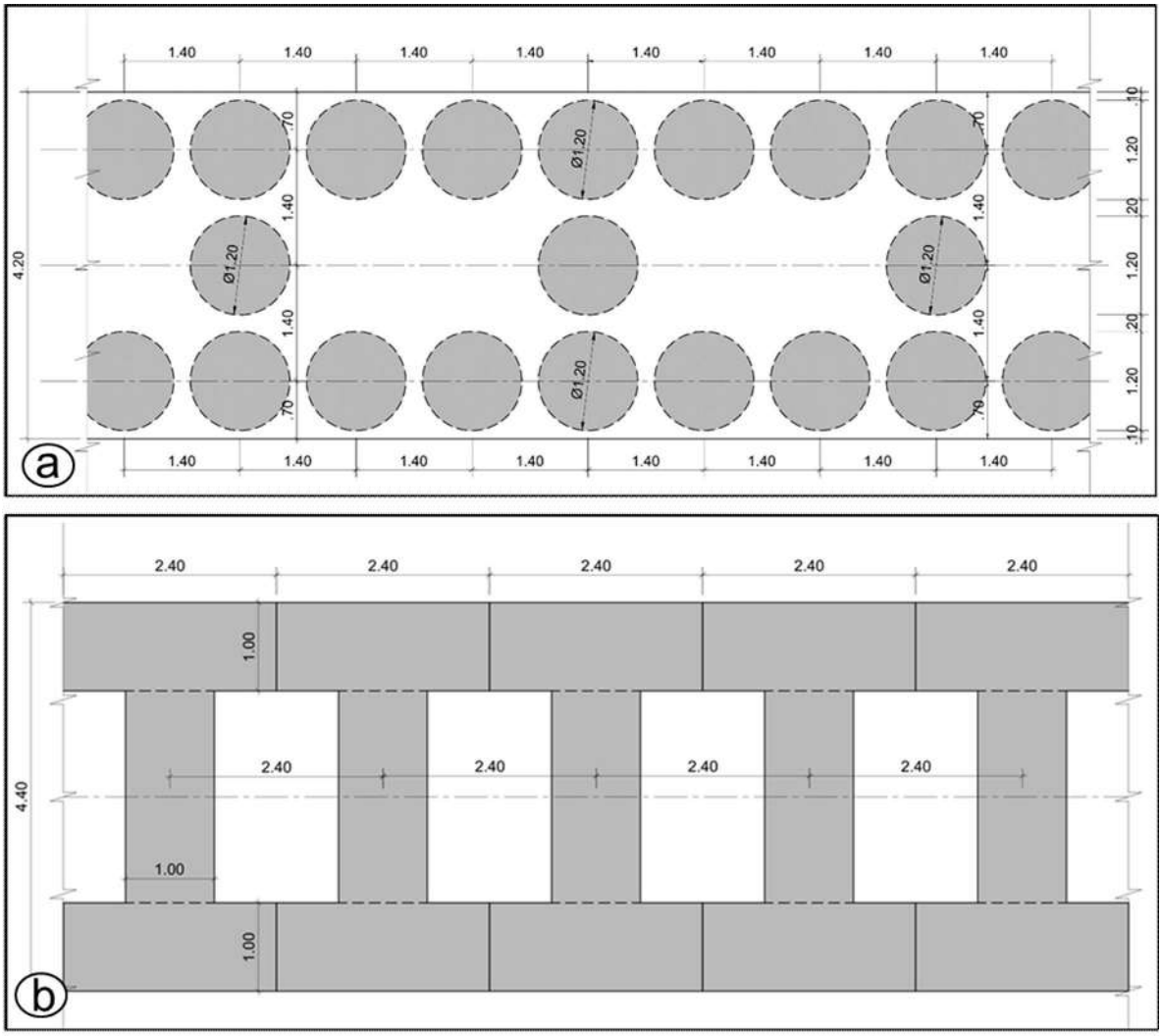
Şekil 5. Kızılbel kaymasında uzun dönem duraylılığı için önerilen destek sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan sırasıyla 2–B ve 3–B analizler.

6. SONUÇLAR

Kızılbel kayması, Bişkek'ten başlayıp Kırgızistan'ı güney ülkelerine bağlayan ana karayolu yolu etkilemektedir. Kayma, Himalaya Sıra Dağları'nda Narin bölgesinde, kritik bir geçitte meydana gelmiştir. Bölgede heyelandan etkilenen mevcut yol güzergahı dışında alternatif bir geçit de bulunmamaktadır. Bu nedenle, bölgesel karayolu ulaşımının aksaması açısından devasa boyuttaki Kızılbel kaymasının kontrol altına alınmasının hayati önemi bulunmaktadır. Dolayısıyla, bölgedeki sert iklim koşullarına rağmen sondajlı araştırmalar geçekleştirilerek kaymanın jeolojik-jeoteknik modeli kurulmuştur. Modele dayalı olarak kaymayı güvenilir şekilde kontrol edilebilecek destek sistemleri belirlenmiş jeoteknik çözümlerle uygulama projeleri hazırlanmıştır.

Böylece bakanlığın, bölgesel karayolu ulaşımını yıl içinde birçok kez aksamasına neden olan Kızılbel kaymasının kalıcı duraylılığının sağlanması isteği, araştırma ekipleri tarafından 2017 yılında yerine getirilmiş oldu. Ancak, çözüm olarak önerilen destek sistemlerinin imalatı bölgedeki teknik olanaklar nedeniyle bu yazının hazırlandığı 2021 yılı ortasında henüz gerçekleştirilememiştir. Dolaysıyla,

mühendislik çözümlerinin uygulanmasında yerel teknik olanakların da belirleyici unsurlardan birisi olduğu bir kez daha anlaşılmıştır.



Şekil 6. a, Kızılbel kaymasında uzun dönem duraylılık için önerilen fore kazık; b, diyafram duvar sistemleri.

7. KAYNAKLAR

ASTM D420 Standard Guide to Site Characterization for Engineering, Design and Construction Purposes

ASTM D586–11 Standard Test Method for Standard Penetration Test, (SPT) and Split–Barrel Sampling of Soils

ASTM D1587 Standard Practice for Thin–Walled Tube Sampling of Fine–Grained Soils for Geotechnical Purposes

ASTM D6230 Standard test method for monitoring ground movement using probe–type inclinometers.

FUGRO SIAL, 2017. Design landslide mitigation for section at km 355+400 to km 355+700 within the Bishkek–Naryn–Torugart road rehabilitation project, Kyrgyz Republic, Progress report–I. Project No P2017.0027 p 25. Ankara Turkey

STFA, 2018. Soil investigation works at Kizilbel site Bishkek–Naryn–Torugart road reconstruction project, data report. Report No: KR–2018–MOTC–STFA–RRP–RP–001–00, p. 181. Istanbul Turkey

Voitovich, I.I., Zhukov, Y. V., Zamalettinov, T.S., Izraileva, R.M.,1979. Geological map of Kyrgyz, scale 1:500.00 Scientific editor: A.B. Bakirov, Editors: I. V. Slobodyanik, T. V. Moiseenko, Technical Editor: Borisova M. A. Printed at the Tashkent Cartographic Factory. Kyrgyz.

Some Considerations on Slope Stability Issues in Qarabağ

Karabağ'da Şev Duraylılığı Üzerine Bazı Düşüncüler

Ö. Aydan[*,1]

[1] *Dept. of Civil Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, 903-0213, Okinawa, Japan (*aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp)*

Bu yazı Karabağı İşgalden Kurtaran Kahraman Azerbaycan Ordusuna ve aziz Şehitlerin hatıralarına ithaf olunur.

ABSTRACT: Qarabağ Region of Azerbaijan is relatively mountainous and there are many deep valleys and high mountain ridges. Following the liberation of the Qarabağ Region from armenians during the September 27-November 10, 2020, roadway and railway networks and energy producing facilities are going to be improved or newly constructed. The geology of the region differ from place to place. For example, Kelbecer, Lachin regions covered volcanic rocks while Shusha, Hankendi Hocalı, Hocavend and Hadrut are covered by thick limestone formation. On the south along Aras River, softer and folded intercalated sandstone, mudstone formation exist. In this study, the present slope stability issues are first summarized. Then some engineerings issues associated with the improvement of existing or/and newly built infra structures in the region and plannded Zengezur corridor are pointed out and some possible engineering countermeasures and their implementations are proposed.

Keywords: *Qarabağ, Azerbaijan, slope stability issues, counter measures*.

ÖZ: *Azerbaycan'ın Karabağ bölgesi oldukça dağlık ve derin vadiler ile yüksek dağ silsilerinden oluşmaktadır. Eylül 27'de başlayan ve Kasım 10'unda biten Vatan Muharabesi sonucu ermenilerden azad edilen Karabağ bölgesinin, eskisinden daha iyi yaşam koşullarına kavuşması ve alt yapı sistemlerinin yeniden inşası ve/veya varolanların yenilenmesi amacıyla tüneller, yeni otoyolları ile demiryolları, baraj ve yeraltı santrallarının yapımı gereklidir. Bilindiği gibi bölgenin jeolojik yapısı Kelbecer ve Laçında volkanik kayaçlardan, Şuşa, Hankendi Hocalı, Ağdere Hocavend ve Hadrut sedimanter kayaçlardan oluşmaktadır. Bunun yanısıra Aras Nehri boyunca açılacak Zengezur kordoru ise tabakalı kumtaşı, çamurtaşı, konglomera ve silttaşından oluşmaktadır. Sözü edilen inşaatlar şu anda kısmen başlamış olmakla birlikte bundan sonra yapılacak şev yarmaları ve düzenlemeleri için Kaya mekaniği ve mühendisliği açısından bazı önerilerde bulunmak amacıyla bu yazı kaleme alınmıştır. Bölgenin jeolojik yapısı ile ulaşılabilir kaynaklardan elde edilen bilgiler ışığında şev duraylılığı incelenmekte ve tartışılmaktadır.*

Anahtar Kelimeler: *Karabağ, Azerbaycan, şev duraylılığı sorunlar, sağlamştırma önlemleri.*

1. INTRODUCTION

Qarabağ Region is a part of Azerbaijan and constitutes about 20 percent of the total land of Azerbaijan (Figure 1). It was occupied by armenians in 1993. Qarabağ Region was liberated by Azerbaijan from armenians following the September 27-November 10, 2020 Homeland war lasting 44 days. The region is relatively mountainous and there are many deep valleys and high mountain ridges. Following the liberation of the Qarabağ Region, infra structures such as roadway and railway networks, energy production facilities such as dams and undeground power houses as well as water storage facilities and channels for agricultural purposes are either to be improved or newly constructed. Ground conditions are expected to differ from place to place as explained in the geology of the region. The creation of man-made slopes as well as natural slopes, which constitutes spectacular landscape, requires some considerations about their stability with the considerations of their rock mass conditions as well as gravity, groundwater, time-dependent characteristics of ground and seismic condtions. Rock mass

conditions particularly require some considerations and knowledge on engineering geology and rock mechanics and rock engineering.

Figure 1. Location of Qarabağ within Azerbaijan.

In this study, the author presents his thoughts on the present and potential slope stability and engineering issues in Qarabağ region. The stability and engineering issues would be quite important during the widening of existing roadways and new/improved transportation projects along Aras River in association with opening Nahçıvan-Zengilan coridor through Zengezur. Some issues are pointed out and some possible engineering solutions and countermeasures and their implementations are briefly explained.

2. GEOLOGY

As a part of Caucuses, Azerbaijan is the major country including her occupied lands since 1918 accommodates the well-known geologic structures called Greater and Lesser Caucuses (Figure 2). The dominant contraction took place in NE-SW direction and the axes of anticlines and synclines axes are in NW-SE direction. Furthermore, the west part of Qarabağ has extrusive volcanic rocks such as basalt and andesite and ophiolitic rocks and melange (Figure 3).

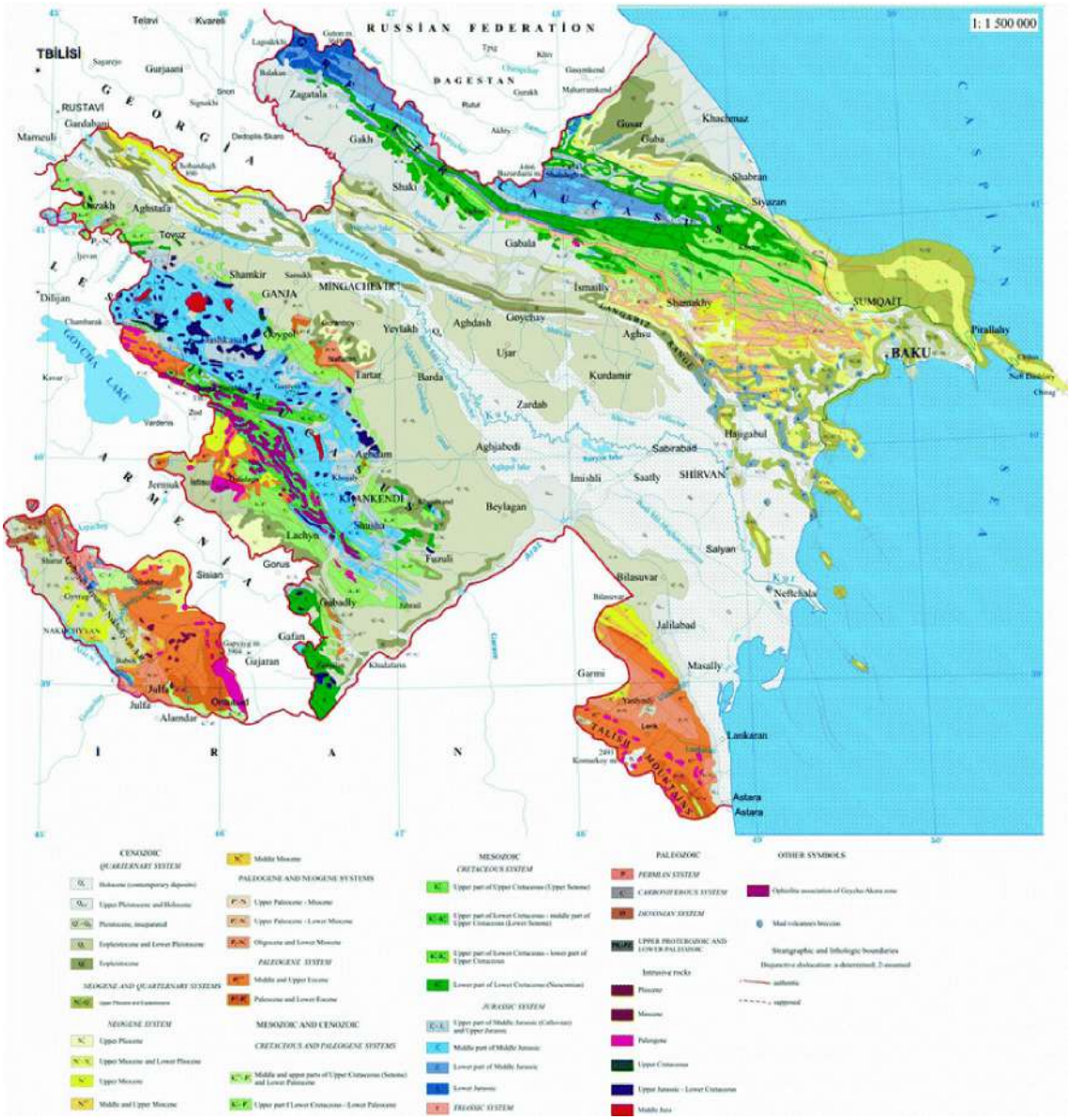


Figure 2. Geology of Azerbaijan (from National Atlas of Azerbaijan Republic, 2014).

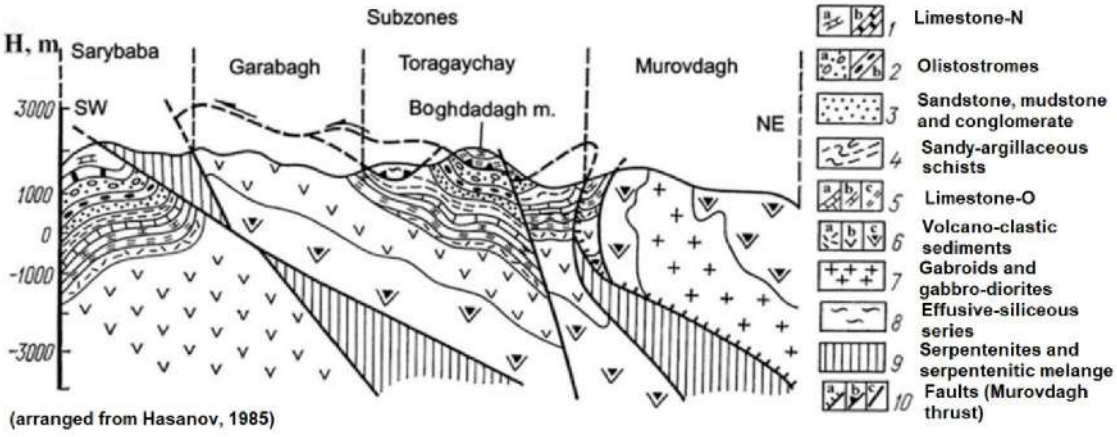


Figure 3. A cross section between Murovdagh and Sarybaba in Qarabağ (from Hasanov, 1985).

The east and the south part (near Aras River) of Qarabağ region consist of mainly limestone, sandstone, mudstone and conglomerate. Some rocks are also recognized below thick limestone layers

such as in Shusha. Figure 4 shows views of rock conditions. As noted, rock mass conditions differ from place to place and some common features such as geological discontinuities, weathering, folding etc. are also noted.

Various faults are also observed in Qarabağ region. As the region subjected to contraction, heavy folding and related large scale thrust faults and smaller scale normal faults are observed. Furthermore, there are lateral strike-slip faults with some vertical components. NW-SE trending lateral strike-slip faults has the dextral sense while NE-SW trending lateral strike-slip faults (e.g. Aras Faults) have the sense of sinistral sense.

Figure 4. Views of rock mass conditions in various parts of Qarabağ.

3. SLOPE FAILURES AND SOME EXAMPLES FROM QARABAĞ

3.1. Slope Failures

The slope failures induce tremendous damage to infrastructures as well as to residential areas, and they involved not only cut slopes but also natural rock slopes. Compared to the scale of soil slope failures, the scale and the impact of rock slope failures are very large and the form of failure differs depending upon the geological structures of rock masses of slopes (Figure 5) (Aydan 1989, 2017, 2018; Aydan et al. 1989, 2011, 2012). The slope stabilities may be categorized into three classes. The first category involves the failure of intact material under shearing, tensile or compressive stresses and the failure modes are shear or bending failure. The second category failures involve the failure of intact rock in shear or tension and slip or separation of discontinuities. The failure modes are combined shearing and sliding, buckling and flexural toppling failures. The third category is associated with the slip or separation of discontinuities and failure modes are planar or wedge sliding, toppling and/or block buckling failure. Furthermore, the failure of the rock slope failures may involve both active and passive modes under dynamic conditions such as earthquakes. However, the passive modes are generally observed when the ground shaking is quite large.

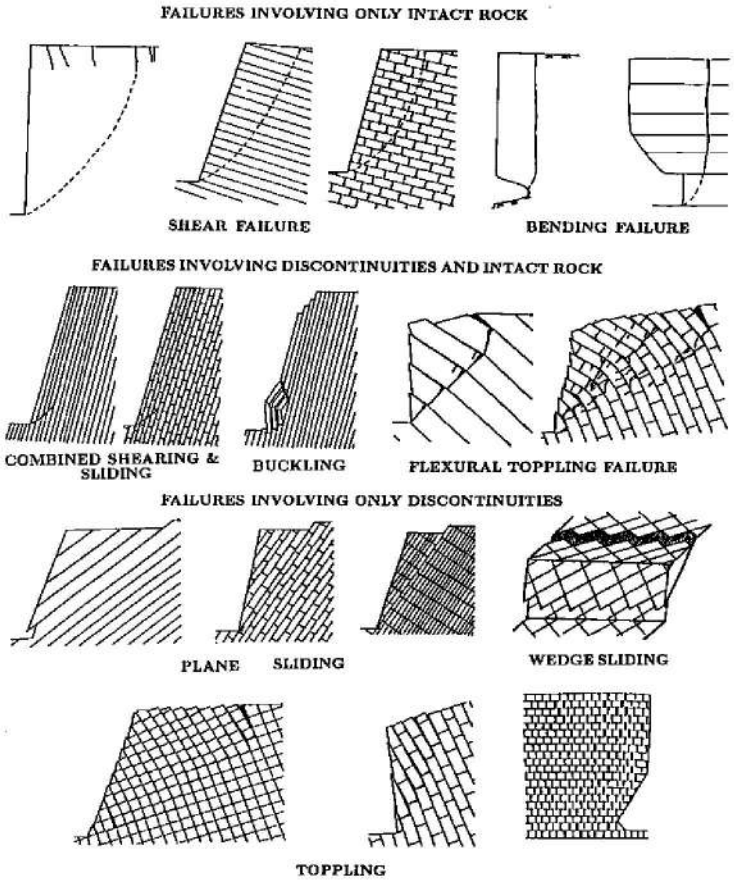


Figure 5. Active failure modes of rock slopes (from Aydan 1989).

3.2. Examples of Slope Failures in Qarabağ

A survey of available photos from various parts of Qarabağ related to the issues of this study was implemented. The pictures are trimmed for the purpose of this study and re-arranged. Figures 6-11 show the failures according to the classifications given in previous sub-section. As noted from Figures 6 to 11, the failures of rock slopes obey to those known in Rock Slope Engineering. They clearly indicate that the slope cuts must be evaluated according to the well known principles and techniques developed and utilized in Rock Slope Engineering. The natural rock slopes are much more difficult as the information would be quite limited and it must be borne in mind that earthquakes and time-dependent weathering and degradation are another important parameters. Some quidelines would be presented for this purpose (Aydan 2016, 2017, 2018).

Figure 6. Slope failures belonging to Category I involving shearing.

Figure 7. Slope failures belonging to Category I involving bending as a result of differential weathering.

Figure 8. Slope failures belonging to Category II involving combined shearing and sliding or flexural toppling.

Figure 9. Slope failures belonging to Category III involving planar or wedge sliding

Figure 10. Slope failures belonging to Category III involving planar or wedge sliding

Figure 11. Slope failures belonging to Category III involving rock falls.

4. GUIDELINES FOR ASSESSING THE STABILITY OF SLOPES

The stability assessment of rock slopes should consider by classifying slopes as soil slopes and rock slopes. Soil slopes can be generally analyzed using limiting equilibrium methods based on circular sliding method with several variations. Although numerical analyses based on FEM or FDM may also be used, it is not common to do so. As said before, the scale of soil slope failures is small while the scale and the impact of rock slope failures are very large and the form of failure differs depending upon the geological structures of rock mass of slopes (Figure 5) (Aydan 1989; Aydan et al. 1989, 1991, 12011). Aydan (1989, 2017, 2016, 2018) and Aydan et al. (1989, 1991) proposed an approach combining several methods based on the limiting equilibrium approach. This approach can be utilized for any slope of rock including soil slopes also. The readers are recommended to refer quoted references to determine the limiting stable slope angle under the given seismic, geometrical and physical conditions.

Figure 12 shows a plot of the slope angle of various rock slopes versus the inclination of the thoroughgoing discontinuity set whose strike is parallel or nearly parallel to the axis of the slope. The plotted data include the data on stable and unstable natural rock slopes as well as manmade stable and

man-made unstable rock slopes. Plotted data cover Qarabağ Region and Aras Valley. In the plots, the stability charts of a slope with a ratio of *t/H:1/75* for cross continuous and intermittent patterns (ξ=26.5^0) for η=0.0 are also included to have a qualitative insight rather than a quantitative comparison. The chosen value of t/H is arbitrary and may not correspond to the ratios of slopes plotted in the figure. It is also interesting to note there is almost no failed slopes when the slope angle is less than 25-30^0 and most of the failed slopes have a slope angle greater than 25-30^0. This is in accordance with the conclusion of Keefer (1984). Nevertheless, it is also noted that there are a great number of stable slopes having slope angle greater than 25-30^0. This implies that the angle and the height of slopes cannot be only parameters determining the overall stability of natural rock slopes. Therefore, their geometrical orientations of discontinuities with respect to slope geometry and their mechanical properties and loading conditions must also play a great role in determining the stable angles of natural rock slopes. The results shown in Figure 12 may serve as guidelines for a quick assessment of the stability of natural rock slopes and how to select the slope-cutting angle in actual constructions involving rock slopes.

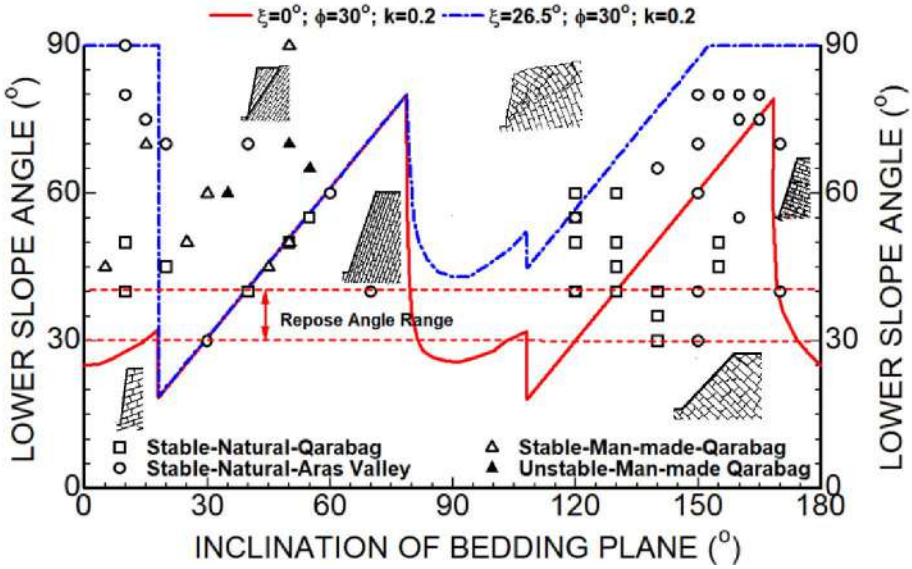


Figure 12. The relation between slope angle and bedding plane angle for stable and failed case histories in Qarabağ.

For practical purpose to assess the stability of slopes, Keefer (1984) studied slope failures induced by earthquakes and he proposed some empirical bounds for slope failures, which are classified as disrupted or coherent. However, the empirical bounds of Keefer is not specifically given as formula. Aydan et al. (2009, 2012) and Aydan (2007, 2017) also compiled slope failures caused by recent worldwide earthquakes according to Keefer's classifications and proposed an empirical equation for the maximum hypocentral distance of disrupted and coherent slope failures as a function of earthquake magnitude and fault orientation. This approach can also be used for practical purposes to assess the stability of rock slopes subjected to earthquakes in the region.

5. SUGGESTIONS FOR SLOPE STABILITY ISSUES IN QARABAĞ AND ARAS VALLEY ALONG ZENGEZUR CORRIDOR

As explained in Section 3 with information on rock types of Qarabağ in Section 2, the slope stability assessment should be carried out according to the principles of modern principles of rock slope engineering and some possible approaches are briefly explained in the previous section. As a corridor between Nakhichevan and Zengilan for roadways and railways is going to be built so that it will be a connection between Turkey and Turkestan (Turkic Countries). This corridor follows Aras River course. In fact, there was such a connection during the SSCB period and some experiences from that period may be quite useful for the construction of the new corridor. Aras River follows the Aras Fault

and it implies the necessity of consideration of seismic loading and some permanent ground deformation, which needs to be further investigated. Some possible rock slope stability issues considered on the bases of the geographical and physical conditions and available photos with the knowledge of Rock Mechanics and Rock Engineering as well as modern rock slope engineering. The final conclusions are illustrated in Figure 13. The most likely failure forms of adjacent rock slopes would be flexural toppling, plane shearing/sliding and rock falls (Types 1, 2 and 3) due to degradation and differential weathering of rock masses The simplest yet economical solution would be construction of rock-sheds or tunnels together with some fences built at several locations. In addition, some rock anchoring, dewatering and prevention of rock degradation, which may not be very economical, could be implemented. There are presently some rock-sheds over the existing route. However, their suitability need to be extensively investigated.

Figure 13. Some possible failure modes of rock slopes along Zengezur corridor.

6. CONCLUSIONS

Some possible rock slope stability issues in Qarabağ region have been considered in this study based on information gathered from available sources of documents and photos in the lights of principles of Rock Mechanics and Rock Engineering, Engineering Geology, and modern Rock Slope Engineering. It is clarified that the slope failures observed in Qarabağ region are quite similar to those observed in other regions of the worls. Therefore, when the slopes are to be cut in relation to new construction, the well-known principles of modern Rock Slope Engineering. Furthermore, the stability of natural rock slopes would be necessary and their stability condition must be evaluated by considering likely earthquake motions as well as rock mass conditions. There may be some rock slope stability issues during the contruction of new transportation structures in the planned Zengezur corridor. As pointed out in the previous section, the simplest yet economical solution would be construction of rock-sheds or tunnels together with some fences built at several locations. In addition, some rock anchoring, dewatering and prevention of rock degradation, which may not be very economical, could be implemented. Although there are some rock-sheds over the existing route, their suitability for rapid transport facilities needs to be extensively investigated.

7. REFERENCES

Aydan, Ö. 1989. The stabilization of rock engineering structures by rockbolts. *Doctorate Thesis*, Nagoya University, 204 pages.

Aydan, Ö. 2007. The inference of seismic and strong motion characteristics of earthquakes from faults with a particular emphasis on Turkish earthquakes. The 6th *National Earthquake Engineering Conference of Turkey*, Istanbul, 563-574.

Aydan, Ö. (2016). Time dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering, CRC Press, ISRM Book Series 2, 246p.

Aydan, Ö. (2017). Rock Dynamics. CRC Press, Taylor and Francis Group, 462p.

Aydan, Ö. (2018). Rock Reinforcement and Rock Support. CRC Press, Taylor and Francis Group, 486p.

Aydan, Ö., Shimizu, Y. Ichikawa, Y. 1989. The Effective Failure Modes and Stability of Slopes in Rock Mass with Two Discontinuity Sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **22**(3), 163-188.

Aydan, Ö., Y. Ichikawa, Y. Shimizu, and K. Murata (1991). An integrated system for the stability of rock slopes. *The 5th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics,* Cairns, **1**, 469-465.

Aydan, Ö., Ohta, S., Hamada, M. 2009. Geotechnical evaluation of slope and ground failures during the 8 October 2005 Muzaffarabad Earthquake, Pakistan. *Journal of Seismology*, 13(3), 399-413.

Aydan, Ö., Ohta, Y., Daido, M., Kumsar, H. Genis, M., Tokashiki, N., Ito, T., Amini, M. 2011. Chapter 15: Earthquakes as a rock dynamic problem and their effects on rock engineering structures. *Advances in Rock Dynamics and Applications*, Editors Y. Zhou and J. Zhao, CRC Press, Taylor and Francis Group, 341-422.

Aydan, Ö., Ulusay, R., Hamada, M. and Beetham, D. 2012. Geotechnical aspects of the 2010 Darfield and 2011 Christchurch earthquakes of New Zealand and geotechnical damage to structures and lifelines. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 71(4), 637-662.

Hasanov, T.A. (1985). Ophiolites of the Lesser Caucasus. Moscow, Nedra (in Russian).

Keefer, D.K. 1984. Slope failures caused by earthquakes. *Geological Society of American Bulletin*, 95, 406-421

National Atlas of Azerbaijan Republic (2014). Compiled by T.N. Kangarli, Baku, Baku Cartography Factory.

An Integrated Study on the Stability Assessment of An Overhanging Rock Block at Itoman Rotary, Okinawa, Japan

Itoman Kavşağı Yakınındaki Sarkık Kaya Bloğunun Duraylılığının Değerlendirmesi Üzerine Birleşik Bir Yaklaşım

N. Tokashıkı[1,*], Ö. Aydan[1], T. Ito[1], Y. Hıga[2], H. Inoue[2]

[1]*University of the Ryukyus, Dept. of Civil Engineering, Nishihara, Okinawa, Japan*
[2]*Nanjo Consultants Co., Nanjo, Okinawa, Japan*
*(*nao_tokasiki07@icloud.com)*

ABSTRACT: There is an overhanging large rock block at Itoman Rotary of Okinawa Island, Japan. A series of in-situ explorations, laboratory testing and the characterization of the rock block were carried out. It is understood that the block may fail due to wedge sliding, wedge toppling or bending failure. However, the detailed studies on the stability assessment using the limiting equilibrium method yielded that the block may fail either by bending or wedge toppling under seismic loads and it is suggested that some countermeasures are necessary.

Keywords: *Itoman Rotary, Overhanging rock, wedge sliding, wedge toppling, earthquake*.

ÖZ: *Japonya Itoman Şehri Itoman kavşağı yakınındaki sarkık bir kaya bloğu bulunmkatadır. Bu kaya bloğu ile ilgili olarak yerinde inceleme ve ölçmeler, labaratuvar deneyleri ve kaya bloğunun kaya mekaniği özellikleri belirlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucu kaya bloğunun kama türü kayma ve devrilme ile eğilme sonucu yenilme olasılığının olduğu anlaşılmıştır. Yazarlar bu kaya bloğunun duraylılığını kaya mekaniğinde var olan duraylılık analiz yüntemlerinin yanısıra kama devrilmesi yöntemini önermekte ve incelemektedir. Ek olarak laboratuvarda sarsma masası kullanılarakda bazı model deneyleri yapılmıştır. Bu yazıda yapılan bu çalışmalar sunulmakta ve tartışılmaktadır.*

Anahtar Kelimeler: *Itoman Kavşağı, sarkık kaya, kama kayması ve kama devrilmesi, deprem.*

1. INTRODUCTION

Ryukyu limestone is widely distributed in Ryukyu Archipelago and it is very porous. Furthermore, it is highly fractured due to tectonic movements. Ryukyu limestone is porous and contain some cavities of various sizes, When the stability of rock slopes consisting of Ryukyu limestone, it is often considered like a granular material having only frictional resistance. When boring is implemented for geological investigations, metallic bits are often utilized and cores obtained from such boring are highly damaged and porous Ryukyu limestone containing clay in the pores give the impression of clayey soil with limestone fragments after boring.

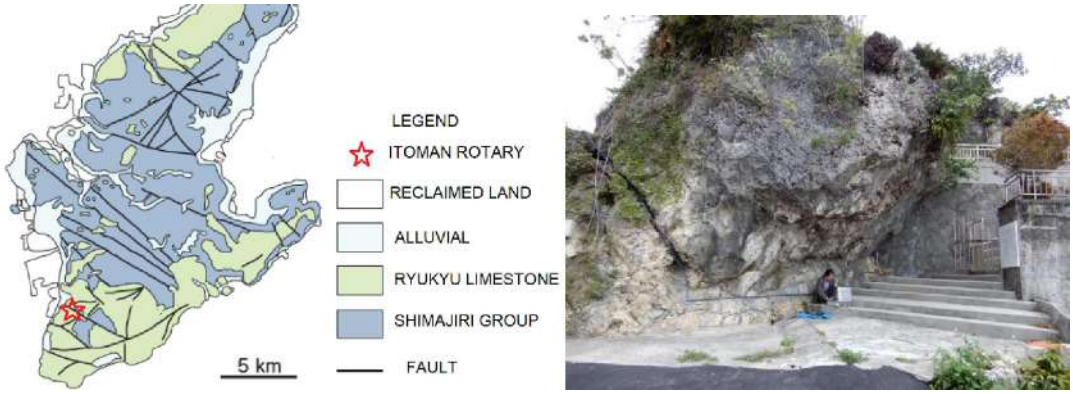
There is an overhanging large rock block at Itoman Rotary of Okinawa Island, Japan which presents some stability issues in association with re-alignment of nearby roads (Figure 1). A series of in-situ explorations and the characterization of rock block were carried out. The authors studied the effect of bit-type, bit diameter on resulting cores and borehole camera imaging techniques to evaluate the state of Ryukyu limestone rock mass. Boring by diamond bits results in better evaluation of rock mass except very porous part. The utilization of borehole camera imaging was used to evaluate the actual state of rock mass. The evaluations of Rock Mass Quality Rating (RMQR) were done using cores as well as borehole images and cores results in similar evaluations except very porous parts. In addition, some laboratory testing on intact rocks and discontinuities were carried out.

The in-situ investigations and kinematic and limiting equilibrium analyses were utilized. It is shown that there is a possibility for the block to fail in wedge sliding, wedge toppling and bending failure. These studies are explained in this study and it is pointed out that some countermeasures are necessary.

Figure 1. Location of the site and its aerial view.

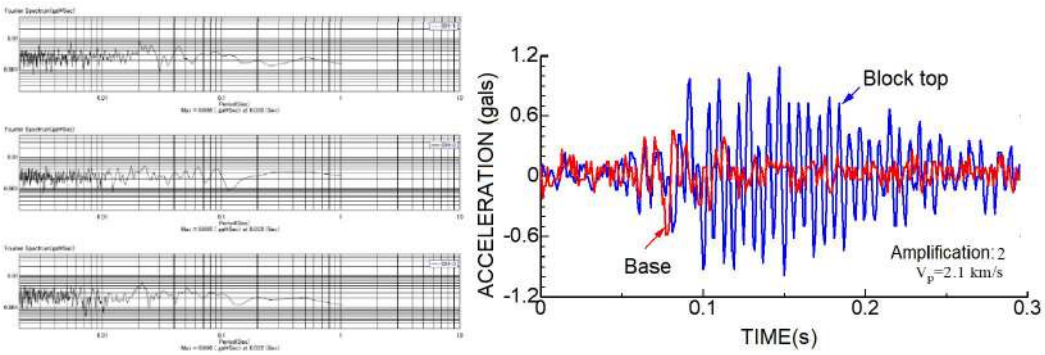
2. GEOLOGY AND IN-SITU EXPLORATIONS

The geology of the site is shown in Figure 2(a). The site is covered by Ryukyu limestone and underlain by Shimajiri group consisting of mudstone, sandstone and siltstone. Ryukyu limestone formation is highly disturbed by normal faulting. Figure 2(b) shows a view of the block consisting of Ryukyu limestone and two major discontinuities observed within the block. The measured orientations of discontinuities are used in kinematic analyses and other analyses. A micro-tremor device is used to measure vibration characteristics of the block as well as its elastic wave velocity (Figure 3). The measured elastic velocity was measured as 2.1 km/s, which is close to that determined from separate geo-tomography explorations.



(a) (b)

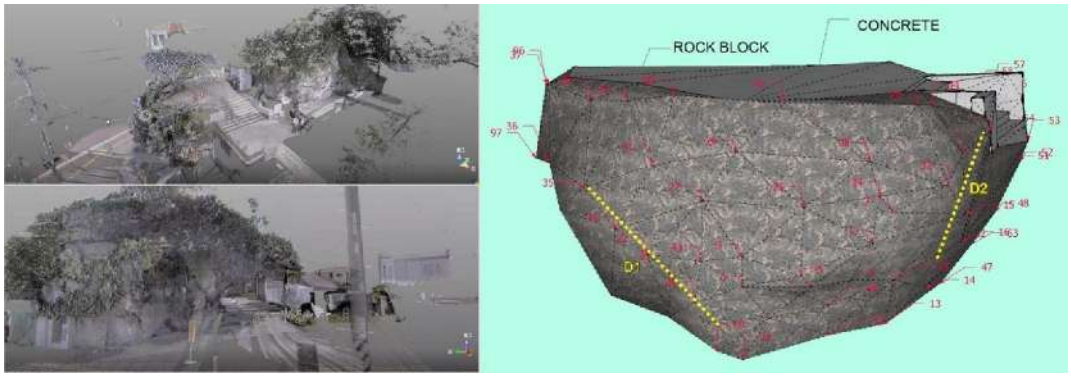
Figure 2. (a) Geology of the site and (b) a view of the block with major discontinuities.



(a) Fourier Spectra of a micro-tremor record (b) Wave propagation record

Figure 3. Micro-tremor measurements on vibration and wave propagation characteristics

The determination of the geometry of the block and visualization of the discontinuity distribution in and its close vicinity of the block are essential for stability assessments. For this purpose, laser scanning technology is utilized as shown in Figure 4.



(a) (b)

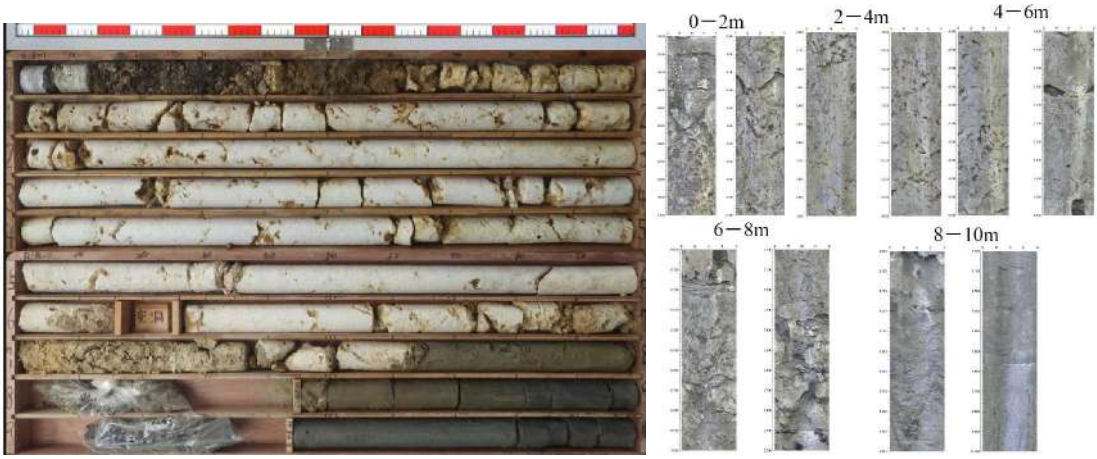
Figure 4. (a) Laser scanning images and (b) simplified block model with major discontinuities.

Figure 5 shows a plan view of the site and the locations of the borings. Four boreholes were drilled and one of the boreholes was perpendicular to the major discontinuity plane indicated as D1 in Figure 4b. When boring is implemented for geological investigations, metallic bits are often utilized in Okinawa and cores obtained from such boring are highly damaged and porous Ryukyu limestone containing clay in the pores give the impression of clayey soil with limestone fragments. The authors studied the effect of bit-type, bit diameter on resulting cores and borehole camera imaging techniques to evaluate the state of Ryukyu limestone rock mass.

(a) (b) (c)

Figure 5. (a) Boring locations; (b) Inclined drilling and (c) borehole imaging.

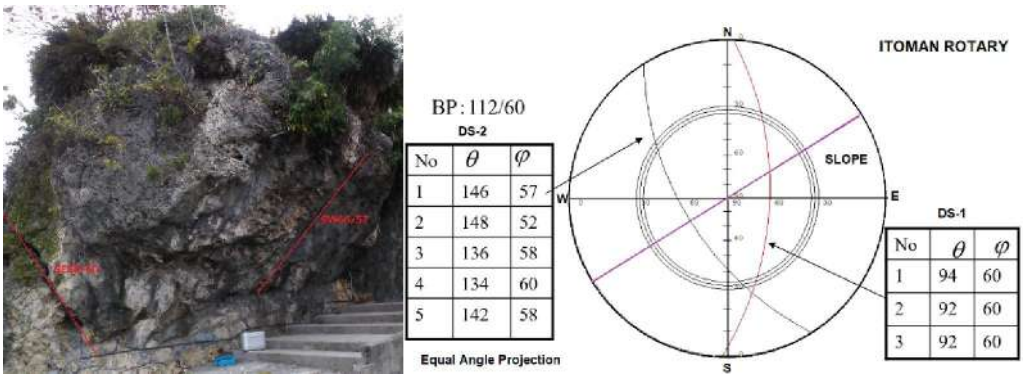
Figure 6(a) shows a view of borehole cores obtained from diamond drilling while Figure 6(b) shows the images of the borehole wall for the same drillhole obtained from borehole camera. It is interesting to note that the clayey material with limestone fragments for the first 0-1m disappears in the borehole wall images. Despite the good quality of drilling, the existence of the clayey material is artificial outcome of drilling of Ryukyu limestone containing clayey material in its pores and such an assessment leads entirely wrong interpretation of rock mass conditions. In addition, some of cracks appearing in boreholes cores do not exist in borehole wall images. However, a close inspection of cores revealed that those cracks were induced by the drilling operation despite the good quality of drilling. This implies that when rock mass conditions are assessed, such artificial cracks should be discarded from the assessment.



(a) Views of borehole cores (b) Borehole wall images

Figure 6. Views of borehole cores together with the borehole wall images.

The orientations of two major discontinuities shown in Figure 7(a) have been carefully measured at several locations using an inclinometer and their averaged stereo equal area projections are shown in Figure 7(b). As noted from Figure 7, a wedge-like body is recognized.



(a) View of major discontinuities (b) Equal angle projection of major discontinuities

Figure 7. Views of major discontinuities and their stereo projection.

3. MECHANICAL AND FRICTIONAL PROPERTIES

Some cores are used to evaluate their uniaxial compressive strength (UCS), deformability characteristics, Brazilian tensile strength (BTS) and tilting tests. The experimental results are summarized in Table 1, Table 2 and Table 3. Table 2 give the values of parameters of Mohr-Coulomb yield criterion. It is interesting to note that the friction angles obtained from tilting tests are quite close to those obtained from Mohr-Coulomb yield criterion utilizing UCS and BTS.

(a)UCS (b) Brazilian (c) Tilting (d) Three cores test

Figure 8. Views of UCS, Brazilian and tilting tests.

Table 1: UCS and BTS of intact rock,

Parameter	Maximum	Minimum	Average
UCS (MPa)	40.88	2.55	16.14
BTS (MPa)	6.02	2.09	4.28

Table 2: Mohr-Coulomb parameters.

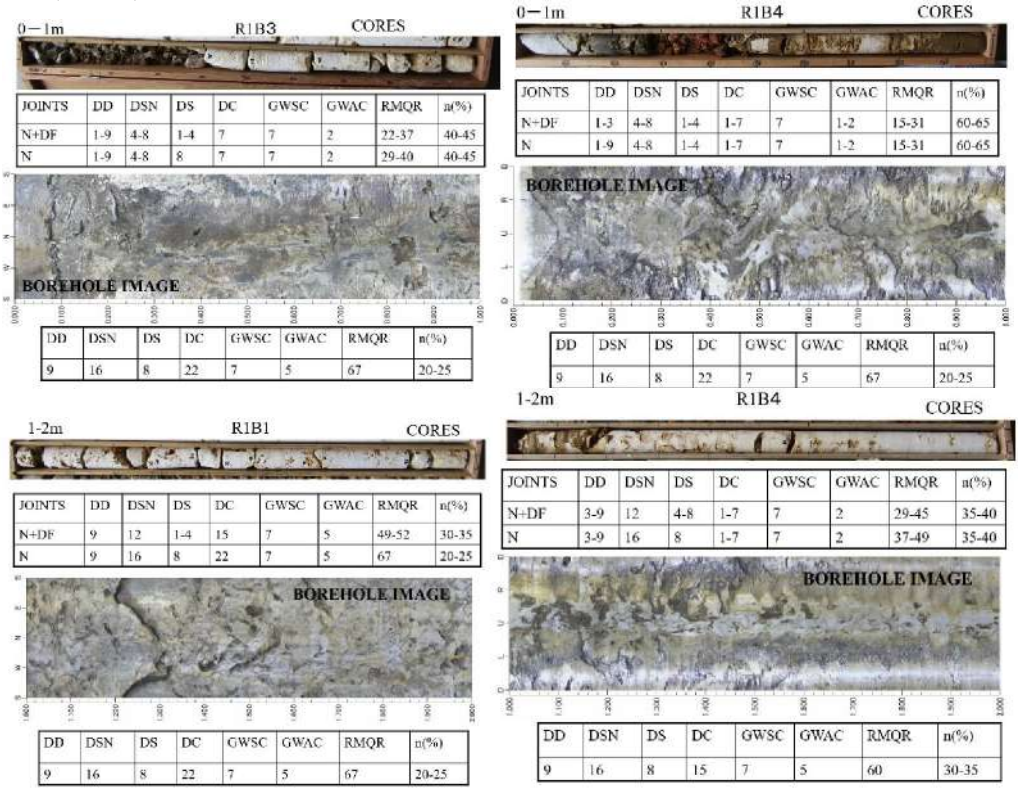
Parameter	Maximum	Minimum	Average
Cohesion (MPa)	8.5	4.2	6.3
Friction angle (°)	40	36	38

Table 3: Frictional properties obtained from tilt tests.

Parameter	Maximum	Minimum	Average
Friction angle (°)	37.6	30.5	34.9

4. ROCK MASS EVALUATIONS

We have evaluated the rock mass parameters utilizing Rock Mass Quality Rating (RMQR) rock classification system (Aydan et al. 2014). Figure 9 shows the evaluation of parameters of RMQR for the top 0-2 m for drillholes numbered R1B1(vertical boring) and R1B4 (inclined boring). We carefully observed rock cores and natural (N) and drilling induced fractures/joints (DF) are distinguished. The evaluations have been carried out separately on cores and borehole wall images. Furthermore, we refrained ourselves on the evaluation of clayey material for the reason mentioned in the previous section. As seen in the figures, individual rating parameters of RMQR and Total RMQR values are shown for cores and borehole images separately. Except the drilling induced clayey part, if natural discontinuities are carefully evaluated, RMQR values obtained from cores and borehole-wall images are the same or almost the same. However, if the drilling induced fractures (DF) are distinguished and all fractures (N+DF) are counted. RMQR values decreases.



(a) R1B1 (b) R1B4

Figure 9. Evaluation of RMQR values of rock mass from cores and borehole wall images.

Although such effects are small for diamond bit drilled boreholes, it is anticipated to be extremely affecting the rock mass evaluations if drilling is carried out by metallic bits. In addition, porosity of cores evaluated. This evaluation may be carried out through naked eye observation or image analyses. However, this issue is not discussed herein.

Aydan et al. (2014) established some empirical relations to estimate the mechanical properties of rock mass such as deformation modulus, Poisson's ratio, cohesion, friction angle, uniaxial compressive strength and tensile strength in terms of those of intact rock and RMQR values. For this site, the evaluation of the tensile strength of rock mass is necessary. As the value of RMQR varies between 49-67 and average tensile strength of intact rocks 4.3 MPa, the estimated tensile strength of rock mass would be 0.59-1.09 MPa. Utilizing elastic wave velocities of intact rock and rock mass, the estimated tensile strength of rock mass is 0.54 – 1.25 MPa. The estimations from these two approaches yield almost the same results.

5. STABILITY EVALUATIONS

Kumsar et al. (2000) proposed a method to assess the stability of wedges. According this method, wedge parameters determined and given in Table 4. Utilizing seismic coefficient method, the safety factor (SF) was estimated to be about 1.03 under severe seismic conditions against sliding.

Table 4: Wedge Parameters

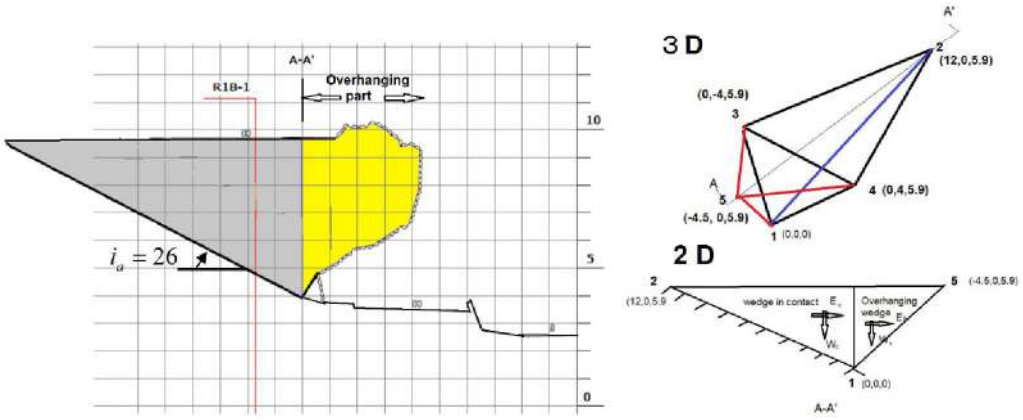
Plane	α	θ	ω	Friction Angle	Intersection Inclination
DS1	2	60	33.93	32	29
DS2	248	59	35.10	32	

Table 5: Wedge Parameters

Case No	k_H	k_V	SF
1	0.0	0.0	2.22
2	0.4g	0.0	1.18
3	0.4g	0.2	1.03

Where k_H and k_V are seismic coefficients for horizontal and vertical directions, respectively.

The method for conventional stability analyses of wedges consider only failure against sliding and does not consider the effect of the overhanging part. If the overhanging part is taken into account, the stability should be assessed against toppling failure. Figure 10(a) illustrates the actual geometry and Figure 10(b) shows the mechanical model for assessing the stability of wedge against toppling. The disturbing and resisting moments with respect to Point 1 can be computed using the geometry shown in Figure 10(b) and yields the safety factors against the toppling failure for different conditions as given in Table 6.



(a) Cross section (b) Mechanical Model (unit m)

Figure 10. (a) Cross-section and (b) Mechanical model for overhanging wedge.

Table 6: Safety factor against toppling failure.

Case No	k_H	k_V	**EMR**	**EMD**	SF
1	0.0	0.0	566.4	79.95	7.11
2	0.4g	0.0	232.22	204.97	1.13
3	0.4g	0.2	118.94	189.04	0.629

Another stability issue is the bending failure of the overhanging part shown in Figure 9(a). Tokashiki and Aydan (2010) proposed an analytical procedure for assessing the stability of overhanging cliffs against bending failure. Utilizing this method, the tensile bending stress computed for selected conditions given in Table 7. When the tensile strength of rock mass is taken into account, there is high possibility of the bending failure if the lower tensile strength is considered. Analyses by using Discrete Finite Element Method (DFEM) would be necessary to check this specific condition.

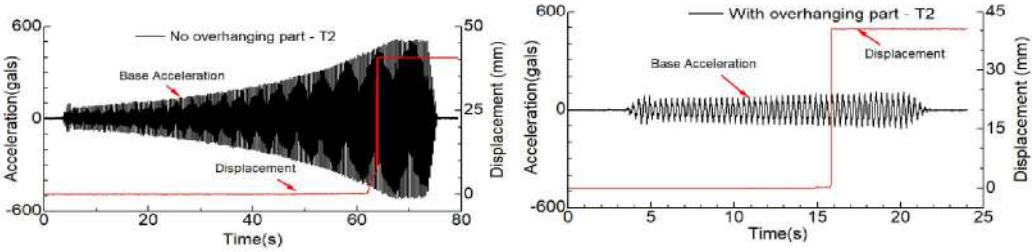
Table 7. Computed tensile bending stress for different conditions.

Case No	k_H	k_V	Tensile stress (MPa)
1	0.0	0.0	0.47
2	0.4g	0.0	0.52
3	0.4g	0.2	0.62

Kumsar et al. (2000) and Aydan and Kumsar (2010) investigated the stability of model wedges against seismic loads using a shaking table apparatus. Some unique shaking table tests on wedges were carried out using the model set-ups shown in Figure 11. The wedge models used in experiments were originally used in the previous tests. The model named STWEDGE70 with a wedge angle of 70° and intersection angle of 27° was utilized. Regarding the overhanging part, the plastic mold, which is utilized in creating wedge models, was attached as seen in Figure 11(b). The model bases were subjected sinusoidal waves of 3 Hz with gradually increasing amplitude. Figure 12 shows the displacement responses in relation to the base acceleration for classical and overhanging wedges. Compared to the resistance of classical wedges, the resistance of overhanging wedge is quite low and they fail at a very low amplitude of horizontal seismic waves. Although additional experiments were carried out to investigate the appropriate countermeasures against toppling failure of the overhanging wedges, they are not presented herein.

(a) Classical wedge model (b) Wedge with overhanging part

Figure 11. Views of wedge models after testing on a shaking table.



(a) Classical wedge model (b) Wedge with overhanging part

Figure 12. Displacement-base acceleration responses for two wedge models.

The stability of an overhanging Ryukyu limestone block at Itoman Rotary in Okinawa, Japan has been investigated through different techniques on the bases of detailed explorations and laboratory tests as well as modern rock mass classification method RMQR. The computations indicated that the overhanging rock block can fail due to toppling failure, which is not considered in classical wedge analyses. Furthermore, the overhanging part may be broken due to bending stresses. This fact is also an important factor in safety evaluations. Furthermore, some shaking table tests on model wedge were performed and the results confirm the overhanging wedges are vulnerable to fail in toppling mode. Additional analyses by using Discrete Finite Element Method (DFEM) are necessary to check this specific condition.

6. REFERENCES

Aydan, Ö., Kumsar, H. (2010). An Experimental and Theoretical Approach on the Modeling of Sliding Response of Rock Wedges under Dynamic Loading. Rock mechanics and Rock Engineering, Vol.43, No.6, 821-830.

Aydan, Ö. Ulusay, R. and Tokashiki, N. 2014. A New Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses. Rock Mech. and Rock Eng.,47, 1255-1276.

Kumsar, H., Aydan, Ö. and Ulusay, R. (2000). Dynamic and static stability of rock slopes against wedge failures. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.33, No.1, 31-51.

Tokashiki, N. Aydan, Ö. (2010a): The stability assessment of overhanging Ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of Rock Mass. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 66(2), 397-406.

Homeros Vadisi (Bornova/İzmir) Yöresinin Heyelan Hassasiyeti Değerlendirmesi

Landslide Susceptibility Assessment of Homeros Valley Region

H. Kayhan[1], C. Kıncal[2,*]

[1] *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı, Buca/İzmir*
[2] *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Buca/İzmir (*cem.kincal@deu.edu.tr)*

ÖZ: Heyelanlar oluşmadan önce heyelana duyarlı alanların belirlenerek, bu bölgelerde yapılacak çalışmalar ile oluşması muhtemel can ve mal kayıplarının önlenmesi mümkündür. Bu kapsamda, heyelan oluşumunun önceden tahmin edilebilmesi için, heyelan potansiyeli yüksek alanların haritalanması sonucu oluşturulan heyelan hassasiyet haritaları uzunca yıllardır araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada iki farklı yöntemle heyelan hassasiyet haritası üretilmiş ve karşılaştırma yapılarak daha yüksek doğrulukta sonuç veren yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda Homeros vadisi (Bornova/İzmir) ve çevresinin heyelan hassasiyet haritaları son yıllarda sıklıkla kullanılan yöntemlerden analitik hiyerarşi süreci ve frekans oranı yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Bu iki yöntem kullanılarak elde edilen heyelan hassasiyet haritaları heyelan envanteri ile karşılaştırılmış ve yüksek-oldukça yüksek derecede heyelana duyarlı alanların hangi oranda heyelan envanteri ile çakıştıkları belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, analitik hiyerarşi süreci yöntemi ile hazırlanan haritada %89,17, frekans oranı yöntemi ile hazırlanan haritada ise %83,98 oranında başarı sağlanmıştır ve analitik hiyerarşi süreci yöntemi ile hazırlanan heyelan hassasiyet haritasının daha yüksek doğrulukta sonuç verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan hassasiyet haritalaması, Analitik hiyerarşi süreci, Frekans oranı, Homeros Vadisi (Bornova-İzmir)

ABSTRACT: *It is possible to prevent possible loss of life and property by determining the areas susceptible to landslides before the occurrence of landslides. In this context, landslide susceptibility maps created as a result of mapping areas with high landslide potential have been used frequently by researchers for many years in order to predict the occurrence of landslides. In this study, it is aimed to determine the method that gives higher accuracy as a result of comparing the landslide susceptibility maps produced by two different methods and to compare them with each other. In this direction, landslide susceptibility maps of the Homeros valley (Bornova / Izmir) and its surroundings were produced using analytical hierarchy process and frequency ratio methods, which are among the methods frequently used in recent years. The landslide susceptibility maps obtained by using these two methods were compared with the landslide inventory and it was determined to what extent the areas susceptible to high-very high landslides coincided with the landslide inventory. As a result of the studies, a success rate of 89.17% was achieved in the map prepared with the analytical hierarchy process method and 83.98% in the map prepared with the frequency ratio method. In the light of these results the landslide susceptibility map prepared by analytical hierarchy process method has been determined to give results with higher accuracy.*

Keywords: *Landslide susceptibility mapping, Analytical hierarchy process, Frequency ratio, Homeros Valley (Bornova-İzmir)*

1. GİRİŞ

Heyelan, kaya kütlesi, moloz, toprak veya zeminin yer çekimi ivmesi nedeniyle hareket etmesi olarak tanımlanır (Shroder ve Davies, 2015). Heyelan meydana gelebilmesi için jeolojik, morfolojik ve çevresel gibi doğal faktörler ve durağan halde bulunan kaya kütlelerinin bazı zayıf yüzeylerden

itibaren kaymasını sağlayacak olan yüksek eğim, süreksizlikler, depremler, aşırı yağışlar, insanlar tarafından iş makineleri kullanılarak yapılacak kazı, inşaat, yol vb. faktörler olmalıdır (Shroder ve Davies, 2015). Bu gibi faktörlerin heyelanı nasıl tetiklediğini bilebilmek gelecekte meydana gelebilecek olan heyelanların tahminini kolaylaştırır. Bu veriler ile birlikte bu tahmini yapabilmemiz için en iyi yöntem ise heyelan hassasiyet haritaları hazırlamaktır.

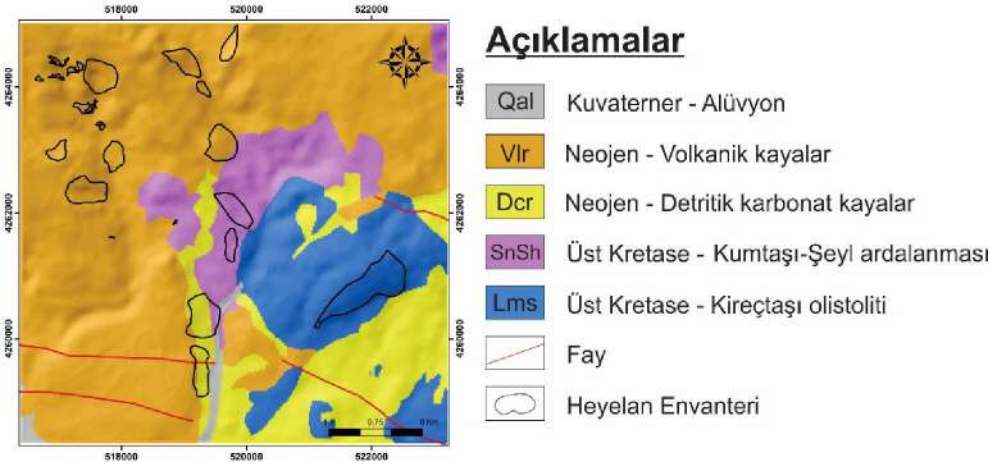
Heyelan hassasiyet haritaları hazırlanırken, geçmişte çalışma alanının nerelerinde heyelan olduğu ve oluşan bu heyelanlara eğim, bakı, jeoloji, vb. hangi faktörlerin sebep olduğu incelenir. Bu incelemelerin sonucunda faktörlerin heyelan üzerindeki ağırlıkları matematiksel olarak belirlenir ve bu veriler ile çalışma alanının incelenmesi sonucu heyelan açısından duyarlı alanlar belirlenir. Bu haritaların hazırlanması ile geniş alanlarda çalışma fırsatı elde edilecektir. Geniş alan kapsayan projelerde yapılacak çalışmalarda, bütün çalışma alanında arazi çalışması yapmak zamansal ve maddi açıdan zorluklar ortaya çıkaracaktır. Heyelan hassasiyet haritası hazırlandığında, heyelana duyarlı bölgelerde yapılacak arazi çalışmalarıyla hem zamansal hem de mali açıdan tasarruf edilmesi amaçlanmıştır.

Son yıllarda farklı araştırıcılar tarafından heyelan hassasiyet haritalamasında birçok metot geliştirilmiş ve bu metotlar ile farklı heyelan hassasiyet haritaları üretilmiştir. Akgün ve Türk (2010), Akgün (2012) ve Akgün vd (2012) mantıksal regresyon, frekans oranı ve analitik hiyerarşi yöntemlerini kullanarak İzmir ili genelinde heyelan hassasiyet haritalaması çalışmaları yapmışlardır. Bu çalışmada ise, çalışma alanı Bornova (İzmir) ilçesi Homeros vadisi ve yakın çevresi olarak sınırlandırılarak analitik hiyerarşi süreci ve frekans oranı yöntemleri ile heyelan hassasiyet haritaları hazırlanması ve bu yöntemlerin kıyaslanması çalışması yapılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı, 516435 – 523224 doğu boylamları ile 4258342 – 4264966 kuzey enlemleri arasında yer alan İzmir ili sınırları içerisinde yer almaktadır. Çalışma alanının doğusunda Bornova ilçesine bağlı Çiçekli köyü, güneyinde Bornova ilçesi, güneybatısında ise Bayraklı ilçesi yer almaktadır. Topoğrafik olarak, çalışma alanının kuzey kesimlerinde yer alan yükseltiler 1054 m'ye kadar ulaşmaktadır. Topografyada yamaçlar üzerinde 70°'ye kadar eğim görülebilse de ortalama eğim 0° ile 35° arasındadır. Bölgenin yaklaşık olarak %60'lık alanı 10°'den daha düşük bir eğim açısına sahiptir.

Çalışma alanında yer alan kaya birimleri Bornova Karmaşığı, Gölsel Tortullar ve Yamanlar Volkanitleri olarak 3 ana grupta toplanabilirler (Şekil 1). Bu gruplar haricinde de güncel olarak çökelmeye devam eden alüvyon ve yamaç molozu birimleri bulunmaktadır (Kıncal, 2005). İzmir-Ankara Zonu olarak adlandırılan tektonik kuşak içerisinde yer alan Bornova Karmaşığı biriminin matrisini, Geç Kretase–Paleosen yaşlı, filiş fasiyesinde gelişmiş kumtaşı-şeyl ardalanması oluşturur. Kumtaşı-şeyl ardalanmasından oluşan matrisin içerisinde ise yaşları Triyas'tan Kretase'ye kadar değişen farklı büyüklüklerde kireçtaşı, serpantinit, çört ve diyabaz blokları bulunur (Erdoğan, 1990; Ersoy vd., 2012). Bornova Karmaşığı üzerine açısal uyumsuzluk ile Erken Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı gölsel tortul birimler gelmektedir (Genç vd., 2001). Akarsu ve göl fasiyesinde çökelmiş olan bu gölsel tortul birimler yatay-yataya yakın konumda eğim açıları 5-20° arasında değişmektedir ve çalışma alanında kırıntılı karbonat kayalar ile temsil edilirler. Neojen yaşlı gölsel tortulların üzerine ise de uyumsuz olarak Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı, andezit, otobreşik andezit, tüf ve aglomeralardan oluşan andezitik karakterde Yamanlar Volkanitleri gelir (Akartuna 1962; Kıncal 2005). Çalışma alanında Yamanlar Volkanitlerini andezitlerden oluşan volkanik kayalar temsil etmektedir.



Şekil 1. Jeoloji haritası (MTA, 2000).

3. MATERYAL VE METOT

Homeros vadisi yöresinin heyelan hassasiyet haritasının üretilmesinin amaçlandığı bu çalışmada, ilk olarak çalışma alanında önceden meydana gelmiş olan heyelanların yeni oluşacak heyelanlara ışık tutabilmesi amacı ile Avşar (1997) ve MTA (2020)'ya ait heyelan envanter haritaları da kullanılarak yeni bir heyelan envanteri hazırlanmıştır. Daha sonra, stabiliteyi bozan faktörler (eğim, yamaç yönelimi, litoloji, genel eğrisellik, yükseklik, süreksizlik yoğunluğu, akarsu güç indeksi (SPI), arazi kullanımı ve akarsulardan uzaklık) seçilmiştir. Bu faktörler bulanık küme mantığı kullanılarak standartlaştırılmış ve 25x25 metrelik gridlerden oluşan haritalar haline getirilerek analitik hiyerarşi süreci ve frekans oranı yöntemleri ile heyelan hassasiyet haritaları oluşturulmuştur (Şekil 2).

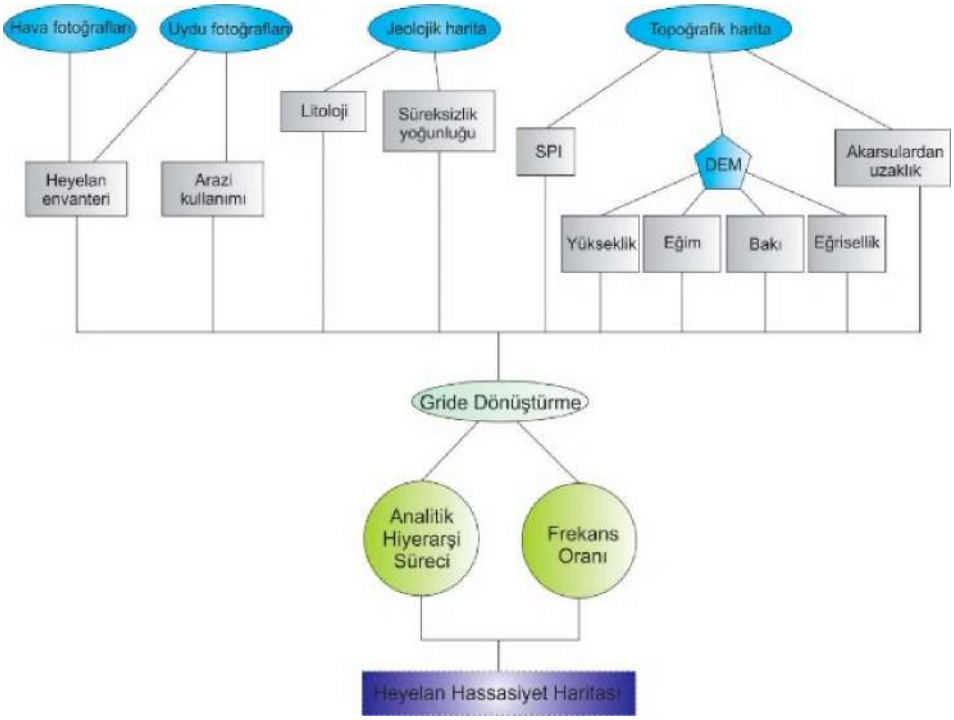
3.1. Heyelan Envanteri

Heyelan envanteri, heyelan oluşumu ile bu heyelana neden olan etkenlerin arasındaki ilişkilerin kurulabilmesi açısından heyelan hassasiyet haritalamalarının en önemli parametresidir. Bu ilişkiyi Chung ve Fabbri (1999)'da "Heyelana neden olduğu düşünülen faktörler nedeniyle meydana gelen heyelan, gelecekte de aynı faktörlerden dolayı yeni heyelanların oluşumuna ışık tutacaktır" şeklinde açıklamıştır. Bu çalışmada, Avşar (1997) ve MTA (2020)'nin oluşturduğu heyelan envanter haritaları birleştirilmiş ve uzaktan algılama verileri de kullanılarak zenginleştirilmiştir. Bu işlemde Avşar (1997) ve MTA (2020) tarafından hazırlanan heyelan envanterleri çakıştırılmış ve uydu fotoğrafları yardımı ile revize edilerek heyelan sınırları belirlenmiş ve güncel heyelanlar envantere eklenmiştir.

3.2. Jeo-Çevresel Faktörler

Kayaç kütlesi duraylılığını korurken, bu dengeyi bozan koşullar "jeo-çevresel faktörler" olarak tanımlanabilir. Heyelan için önceden belirlenmiş koşulların etkilerini belirlemek, heyelan oluşum duyarlılığını saptamak için oldukça önemlidir (Carrara vd, 1999; Guzzetti vd, 1999; Soeters ve Van Westen, 1996). Bu nedenle jeo-çevresel faktörlerin doğru seçilmesi, sonunda hazırlanacak heyelan hassasiyet haritasının doğruluğunda önemli rol oynayacaktır (Djukem vd., 2020).

Bu çalışmada heyelan hassasiyet haritası üretiminde kullanılmak üzere jeo-çevresel faktörler olarak eğim, yamaç yönelimi, yükseklik, eğrisellik, litoloji, süreksizlik yoğunluğu, akarsu güç indeksi, akarsuya yakınlık ve arazi kullanımı faktörleri kullanılmıştır.



Sekil 2. Çalışma akışı

3.3 Heyelan Hassasiyet Haritaları

3.3.1 Analitik hiyerarşi süreci (AHP)

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan analitik hiyerarşi süreci (AHP), karmaşık problemleri analiz etmek için kullanılan, farklı faktörlerin matris bazlı ikili karşılaştırmasını içerir (Saaty, 1980). AHP hem nitel hem de nicel kriterleri değerlendirme yeteneğine sahip olduğu için kullanışlıdır (Ayalew vd, 2004). Teknik veri türünden bağımsız olarak çalışır. Çünkü temel girdi kullanıcı tarafından verilir, "A parametresi B parametresine kıyasla ne kadar önemlidir?" sorusuna yanıt bir uzman kararıdır. Parametrelerin göreceli önemi, 9 puanlık sürekli derecelendirme ölçeğine çevrilir (Çizelge 1). Daha sonra ikili karşılaştırma matrisine girilir (Çizelge 2). Oluşturulan bu ikili karşılaştırma özneldir ve sonuçların kalitesi büyük ölçüde uzman yargısına bağlıdır. Bu uzman görüşünün kontrolü için tutarlılık oranı kullanılır (CR). Eş.1'de tutarlılık oranının nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.

Çizelge 1 İkili karşılaştırmalar için ölçekler (Saaty ve Vargas, 2008)

Önem	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	Hedefe katkı eşittir
3	Orta derecede önemli	Öznitelik diğerine göre biraz daha tercih edilir
5	Güçlü derecede önemli	Öznitelik güçlü bir şekilde diğerine tercih edilir
7	Çok güçlü derecede önemli	Öznitelik oldukça güçlü bir şekilde diğerine tercih edilir
9	Oldukça güçlü derecede önemli	Bir niteliği destekleyen kanıt, mümkün olan en yüksek onay düzeyine sahiptir
2,4,6,8	Ara değerler	Kıyasla arada kalan değerler için kullanılır
1/n	Karşıt	Ters karşılaştırma için kullanılır

CR = CI/RI (Saaty, 1977) (1)

RI, Saaty (1977) tarafından verilen matrisin sırasına bağlı olarak ortaya çıkan tutarlılık endeksinin ortalamasıdır. Eş.2 ile ifade edilen CI ise tutarlılık endeksidir.

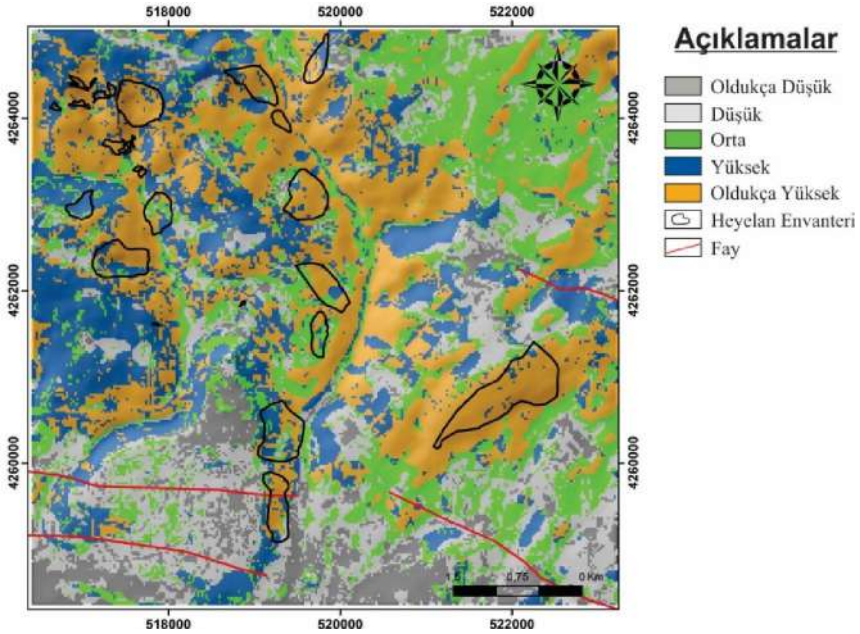
$CI = (\lambda_{max} - n)/(n-1)$ (2)

Burada λ_{max}, matrisin en büyük veya temel öz değeridir ve matristen kolayca hesaplanabilir ve n ise matrisin sırasıdır.

Çizelge 2. Veri katmanlarının ikili karşılaştırma matrisi, faktör ağırlıkları ve tutarlılık oranı

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ağırlık
(1) Yamaç yönelimi	1									0,1617
(2) Süreksizlik yoğunluğu	1/2	1								0,1113
(3) Litoloji	1	2	1							0,1617
(4) Eğim	2	3	2	1						0,2716
(5) SPI	1/4	1/3	1/4	1/6	1					0,0458
(6) Eğrisellik	1/5	1/4	1/5	1/7	1/2	1				0,0307
(7) Yükseklik	1/6	1/5	1/6	1/8	1/3	1/2	1			0,0221
(8) Arazi kullanımı	1	1	1	1/2	4	5	6	1		0,1495
(9) Akarsulardan uzaklık	1/4	1/3	1/4	1/6	1	2	3	1/4	1	0,0458
Tutarlılık oranı: 0.03										

Tutarlılık oranı değerleri 0,1'den küçükse, ikili karşılaştırma matrisi kabul edilebilir, ancak değer 0,1'den büyükse karşılaştırmalar yeniden değerlendirilmelidir (Malczewski, 1999). Bu çalışmada, tutarlılık oranı 0,03'tür ve ikili karşılaştırmada makul bir tutarlılık düzeyini gösterir. Tutarlılık oranına göre ikili karşılaştırma heyelan hassasiyet modelindeki faktör ağırlıklarını tanıyacak kadar iyidir. Oluşturulan matris ile parametrelerin heyelan hassasiyet haritası içerisindeki ağırlıkları Idrisi Terrset ağırlıklandırma modülü kullanılarak hesaplanmış ve oldukça düşükten oldukça yükseğe olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır (Çizelge 4).



Şekil 3. AHP yöntemi ile hazırlanan heyelan hassasiyet haritası

3.3.2 Frekans oranı

Frekans oranı yöntemi son derece basit hesaplamalara dayandığı için araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yöntemin ana mantığı, heyelana neden olan parametreleri heyelan envanteri ile ilişkilendirmek ve bu ilişkiler yardımıyla heyelan duyarlılığı olan alanları belirlemektir. Bu ilişkiyi kurmak için öncelikle heyelan görülen piksellerin yüzdesi (a) ve heyelansız piksellerin yüzdesi (b) hesaplanmalıdır. Daha sonra her parametre için "FR= a / b" denklemi ile frekans oranı hesaplanır (Lee ve Thalib, 2005).

Hesaplanan bu frekans oranı değerlerinin 1'den küçük olduğu durumlarda, bu parametrenin heyelan üzerindeki etkisi düşük, 1'den büyük olduğu durumlarda ise bu parametrenin heyelana etkisi yüksek olarak değerlendirilebilir.

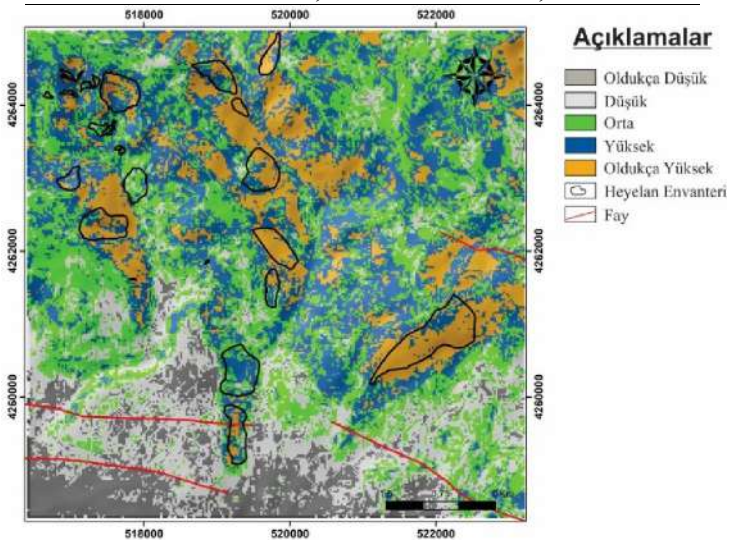
Çizelge 3. Jeo-çevresel faktörlere ait frekans oranı (FR) ve normalize edilmiş frekans oranı (NFR) değerleri

Faktör	Sınıf	Heyelansız Piksel	Heyelansız Yüzde (%)	Heyelanlı Piksel	Heyelanlı Yüzde (%)	FR	NFR
Eğim (°)	0-10	34121	1,35	372	0,86	0,64	0,03
	10-20	26885	1,06	2009	4,66	4,38	0,20
	20-30	7385	0,29	1368	3,17	10,86	0,50
	30-40	547	0,02	202	0,47	21,65	1,00
	>40	2	0,00	0	0,00	0,00	0,00
Yamaç yönelimi	K	1407	0,06	39	0,09	1,63	0,16
	KD	3232	0,13	214	0,50	3,88	0,39
	D	7551	0,30	1276	2,96	9,91	1,00
	GD	14288	0,57	1179	2,73	4,84	0,28
	GD	20063	0,79	807	1,87	2,36	0,24
	GB	13331	0,53	296	0,69	1,30	0,13
	B	6265	0,25	138	0,32	1,29	0,13
	KB	2803	0,11	2	0,00	0,04	0,00
SPI	Düşük	8422	0,33	283	0,66	1,97	0,38
	Orta	9712	0,38	156	0,36	0,94	0,18
	Yüksek	40617	1,61	2623	6,08	3,79	0,74
	Çok yüksek	10189	0,40	889	2,06	5,12	1,00
Akarsulardan uzaklık (m)	0-100	16869	0,67	629	1,46	2,19	0,52
	100-200	14221	0,56	766	1,78	3,16	0,76
	200-300	11747	0,46	825	1,91	4,12	0,99
	300-400	9946	0,39	709	1,64	4,18	1,00
	>400	16157	0,64	1022	2,37	3,71	0,89
Süreksizlik yoğunluğu	Düşük	8577	0,34	96	0,22	0,66	0,10
	Orta	26018	1,03	1209	2,80	2,72	0,40
	Yüksek	28361	1,12	1960	4,55	4,05	0,60
	Çok yüksek	5984	0,24	686	1,59	6,72	1,00
Eğrisellik	Dışbükey	11160	0,44	782	1,81	4,11	1,00
	Düz	45749	1,81	2367	5,49	3,03	0,73
	İçbükey	12031	0,48	802	1,86	3,91	0,95
Litoloji	Qalv	731	0,03	14	0,03	1,12	0,20
	Vlr	41106	1,63	1932	4,48	2,75	0,49
	Lms	10170	0,40	973	2,26	5,60	1,00
	SnSh	6545	0,26	494	1,15	4,42	0,80
	Dcr	10386	0,41	538	1,25	3,03	0,54
Yükseklik (m)	0-50	488	0,02	0	0,00	0,00	0,00
	50-100	2661	0,11	0	0,00	0,00	0,00
	100-150	5897	0,23	99	0,23	0,98	0,21
	150-200	6776	0,27	313	0,73	2,71	0,60
	200-250	6093	0,24	239	0,55	2,30	0,51
	250-300	4428	0,18	133	0,31	1,76	0,39
	300-350	4455	0,18	274	0,64	3,61	0,80
	350-400	4645	0,18	322	0,75	4,06	0,90
	>400	33497	1,32	2571	5,96	4,50	1,00
Arazi kullanımı	Yerleşim alanı	11773	0,47	193	0,45	0,96	0,24
	Kurak arazi	26004	1,03	1806	4,19	4,07	1,00
	Orman	14883	0,59	1033	2,40	4,07	1,00

Bu çalışmada, Frekans oranı yöntemi ile oluşturulan heyelan hassasiyet haritası doğal kırılım yöntemi ile sınıflandırılarak oldukça düşükten oldukça yükseğe 5 sınıfa ayrılmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4. Yöntemlerin sınıflara göre kapladıkları yüzey alanları

Sınıflama	Kapladıkları yüzey alanı (%)	
	AHP	Frekans Oranı
Old. Düşük	8,61	9,55
Düşük	19,06	19,06
Orta	21,81	21,81
Yüksek	22,07	22,07
Old. Yüksek	28,45	28,45



Şekil 4. Frekans oranı yöntemi ile hazırlanan heyelan hassasiyet haritası

4. SONUÇLAR

Homeros vadisi (Bornova-İzmir) yöresinin heyelan duyarlılığı, eğim, yamaç yönelimi, litoloji, eğrisellik, akarsu güç indeksi, süreksizlik yoğunluğu, akarsulara uzaklık, arazi kullanımı ve yükseklik jeo-çevresel faktörleri ve analitik hiyerarşi süreci ile frekans oranı yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

Avşar, 1997 ve MTA,2000 heyelan envanter verileri kullanılarak ve yeniden değerlendirilerek üretilen heyelan envanter haritası sonucunda çalışma alanının %5,42'lik kısmında heyelan oluşumu görülmüştür.

Jeo-çevresel faktör haritalarının yorumlanması sonucunda 20°'den yüksek açıya sahip, doğuya eğimli, 150 metre ve üzeri kotlarda bulunan, yüksek ve çok yüksek süreksizlik yoğunluğuna sahip, kurak arazide bulunan, içbükey ya da dışbükey eğriselliğe sahip ve akarsu güç indeksinin yüksek olduğu arazilerde bulunan yamaçların heyelan duyarlılığının diğer alanlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Analitik hiyerarşi süreci ile üretilen heyelan hassasiyet haritasının sonucuna göre çalışma alanının %8,61'i çok düşük, %19,06'sı düşük, %21,81'i orta, %22,07'si yüksek ve %28,45'i ise çok yüksek heyelan duyarlılığına sahip çıkmış ve çalışma alanında gözlenen heyelanların %0,35'lik kısmı çok düşük, %2,66'lık kısmı düşük, %7,82'lik kısmı orta, %21,13'lük kısmı yüksek ve %68,03'lük kısmı ise çok yüksek heyelan duyarlılığına sahip alanlarda gözlenmiştir.

Frekans oranı yöntemi ile üretilen heyelan hassasiyet haritasının sonucuna göre çalışma alanının %9,55'i çok düşük, %18,79'u düşük, %29,49'u orta, %28,16'sı yüksek ve %14,01'i ise çok yüksek heyelan duyarlılığına sahip çıkmış ve çalışma alanında gözlenen heyelanların %0'ı çok düşük,

%2,58'lik kısmı düşük, %13,44'lük kısmı orta, %34,32'lik kısmı yüksek ve %49,66'lık kısmı ise çok yüksek heyelan duyarlılığına sahip alanlarda gözlenmiştir.

Yöntemlerin başarı oranlarını tespit etmek için heyelan hassasiyet haritalarının heyelan envanteri ile uyumları karşılaştırılmıştır. Yüksek ve çok yüksek heyelan hassasiyetine sahip alanların mevcut heyelan lokasyonları ile karşılaştırması sonucu çıkan sonuçlar ile başarı yüzdeleri belirlenmiştir. Bu kapsamda analitik hiyerarşi süreci ile üretilen harita %89,17, frekans oranı yöntemi ile hazırlanan harita ise %83,98 başarı göstermiştir.

5. KATKI BELİRTME

Bu bildiri tam metni, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında ikinci yazarın danışmanlığında, birinci yazarın yüksek lisans tezi kapsamında hazırlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

Akartuna, M., 1962. İzmir-Torbalı-Seferihisar-Urla bölgesinin jeolojisi. Maden tetkik ve arama dergisi, 59 (59), 1-19.

Akgün, A. ve Türk, N., 2010. İki ve çok değişkenli istatistik ve sezgisel tabanlı heyelan duyarlılık modellerinin karşılaştırılması: Ayvalık (Balıkesir, kuzeybatı Türkiye) örneği. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 34 (2), 85-112.

Akgün, A., 2012. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. Landslides, 9 (1), 93–106.

Akgün, A., Kıncal, C. ve Pradhan, B., 2012. Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to Izmir city (west Turkey). Environmental Monitoring and Assessment, 184 (9), 5453–5470.Avşar, M., 1997. General assessment of landslides in Izmir metropolitan area. Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Ayalew, L., Hiromitsu, Y., ve Norimitsu, U., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. Landslides, 1 (1) 73-81.

Avşar, M., 1997. General assessment of landslides in Izmir metropolitan area. Unpublished M.S. thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylul University: Izmir, 136 p.

Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M. ve Reichenbach, P., 1999. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. Natural Hazards, 20 (2-3), 117-135.

Chung, C.-J. F. ve Fabbri, A. G., 1999. Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 65 (12), 1389–1399.

Djukem, W.D.L., Braun, A., Wouatong, A.S.L., Guedjeo, C., Dohmen, K., Wotchoko, P. Fernandez-Steeger, T.M., Havenith, H.B., 2020. Effect of soil geomechanical properties and geo-environmental factors on landslide predisposition at mount oku, Cameroon. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17 (18), 6795.

Erdoğan, B., 1990. İzmir–Ankara Zonu'nun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafik özellikleri ve tektonik evrimi. Türkiye Petrolleri Jeoloji Derneği Bülteni, 2 (2), 20.

Ersoy, E.Y., Dindi, F., Karaoğlu, Ö. ve Helvacı, C., 2012. Soma havzası ve çevresindeki miyosen volkanizmasının petrografik ve jeokimyasal özellikleri, Batı Anadolu, Türkiye. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 33 (1), 59-80.

Genç, S.C., Altunkaynak, S., Karacik, Z., Yazman, M. ve Yılmaz, Y., 2001. The Çubukludağ graben, South of Izmir: tectonic significance in the Neogene geological evolution of the Western Anatolia. Geodinamica Acta, 14 (1), 1-12.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. ve Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology, 31(1), 181-216.

Kıncal, C., 2005. İzmir iç körfezi çevresinde yer alan birimlerin coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesi. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Lee, S., ve Thalib., J.A., 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. Environmental Geology, 47 (7), 982–990.

Malczewski, J., 1999. GIS and multi-criteria decision analysis. New York: Wiley.

M.T.A., 2000. Türkiye jeoloji haritası, 1,25.000 ölçekli İzmir paftası.

M.T.A., 2020. GeoScience Map Viewer and Drawing Editor. 17.03.2020 tarihinde http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx adresinden alınmıştır.

Saaty, T.L., 1977. Ascaling method for priorities in hierarchical structure. Journal of Mathematical Psychology, 15 (3), 34–39.

Saaty, T.L., 1980. The analytical hierarchy processes., New York: McGraw-Hill.

Saaty, T.L. ve Vargas, L. G., 2008. Prediction, Projection and Forecasting. New York: Kluwer, Dordrechtp, 1991.

Shroder, J. F. ve Davies, T., 2015. Landslide Hazards, Risks, and Disasters. Elsevier, New York.

Soeters, R. ve Van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. Landslides: investigation and mitigation, 247, 129-177.

Açık Ocak Albit Madenindeki Şev Duraysızlıklarının Kinematik Analiz Yöntemiyle İncelenmesi

Investigation of Slope Instabilities in an Open Pit Albite Mine by Kinematic Analysis Method

M. Karakaş[1], C. Kıncal[2,*]

[1]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 35160, İzmir.*
[2]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35160, İzmir.*
*(*cem.kincal@deu.edu.tr)*

ÖZ: Şev duraysızlığına bağlı meydana gelen kütle hareketleri üretim yapılan açık ocak madenlerinde sık rastlanan bir olaydır. Şev duraysızlıklarını incelemek ve analiz etmek hem üretim faaliyetlerinin verimli bir şekilde devamlılığı hem de iş güvenliğinin sağlanması açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu duraysızlıkları incelemek için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu çalışma içerisinde, Menderes Masifi'ndeki gnays biriminde açılmış kaya şevlerinin duraylılığını değerlendirmek ve potansiyel kütle hareketlerini belirlemek için kinematik analiz yöntemi kullanılmıştır. Gnays biriminde açılmış bu albit madeninde geçmiş zamanlarda birçok kütle hareketi gözlenmiştir. Şev duraysızlığını incelemek, potansiyel kütle hareketlerini belirlemek ve ilk adımda yapılacak olan kinematik analizler için çalışma sahasının doğu kısmında hat etüdü yapılıp bu noktalarda süreksizlik ölçümleri alınmıştır. Çalışma alanında gözlenen ayrışma bölgeleri, daha önceden meydana gelen heyelan alanları ve su çıkış noktaları gibi şev duraysızlığına olumsuz etki oluşturacak bölgelerde süreksizlik ölçümlerinin sayısı artırılmıştır. Çalışma sahasından alınan süreksizlik ölçümleri Dips V 7.016 (2019) yardımı ile eş alanlı alt yarım küre projeksiyonu kullanılarak kaya şevlerinin kinematik analizleri yapılmıştır. Kinematik analiz sonuçlarına göre albit ocağının doğu kısmında üç farklı yenilme tipi belirlenmiştir. Bunlar; düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme tipi yenilmedir. Analiz edilen şevlerde yenilme türlerinden en baskın olanı devrilme tipi yenilme olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık ocak madeni, Gnays, Kinematik analiz, Kütle hareketleri, Şev duraysızlığı.

ABSTRACT: *Mass movements due to slope instabilities are common occurrences in open pit mines where production is made. Examining and analyzing slope instabilities is very important both in terms of efficient continuity of production activities and ensuring occupational safety. There are many different methods to examine these instabilities. In this study, kinematic analysis method was used to evaluate the stability of the rock slopes opened in the gneiss unit in the Menderes Massif and to determine the potential mass movements. Many mass movements have been observed in the past in the albite mine opened in the gneiss unit. In order to examine slope instability, determine potential mass movements and kinematic analysis to be carried out in the first step, scan-line survey was performed in the eastern part of the study area and discontinuity measurements were taken at these locations. The number of discontinuity measurements was increased in regions that would have a negative effect on slope instability such as weathering zones observed in the study area, landslide areas that occurred previously and seepage points. Kinematic analyzes were applied to the rock slopes using the discontinuity measurements taken from the study area and the equal area (Schmidt-net) lower hemisphere projection with the help of computer software. According to the results of the kinematic analysis, three different failure types were determined in the eastern part of the albite quarry. These; planar sliding, wedge type sliding and toppling failures. The most dominant of these types of failures has been determined as toppling type failure.*

Keywords: *Open pit mine, Gneiss, Kinematic analysis, Mass movements, Slope instability.*

1. GİRİŞ

Bu çalışma Menderes Masifindeki gnays biriminde açılmış açık işletme yöntemiyle üretim yapılan bir feldspat (albit) ocağındaki mühendislik jeolojisi çalışmalarını içermektedir. Bu maden ocağındaki kaya şevlerinin stabilite durumları kinematik analiz tekniği ile değerlendirilmiştir. Albit ocağının doğu kısmında daha önceki tarihlerde meydana gelen süreksizlik kontrollü şev yenilmeleri sebebiyle şirketin yetkili mühendisi tarafından kazı, üretim ve patlatma gibi faaliyetlere geçici bir süreliğine ara verilmiştir. Üretime ara verilen bu dönemde seçilen 22 noktada gözlem yapılmış ve bu noktalarda süreksizlik düzlemlerinin yönelimleri ölçülmüştür. Seçilen bu gözlem noktaları, şev duraysızlıklarının meydana geldiği orta (MW) ve orta-yüksek derecede (MW-HW) ayrışmış gnays kayaç kütlelerinin bulunduğu bölgeler olarak belirlenmiştir.

2. KİNEMATİK ANALİZLER

Kinematik analiz tekniği, potansiyel kütle hareketlerini belirlemek için oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Süreksizlik kontrollü yenilmelerin meydana geldiği açık ocak maden şevlerinde de tercih edilen bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır (Kıncal, 2021; Obregon vd., 2019; Bawa vd., 2017; Francioni vd., 2015). Bu teknik, eş alanlı (Schmidt-net) stereografik projeksiyon (alt yarımküre) kullanılarak hem şevin hem de süreksizliklerin yönelimlerini dikkate alan ve geometrik ilişkiler ile analiz yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu analiz biçimi geometrik ilişkilerin yanı sıra, kaya malzemesinin makaslama dayanım parametrelerinden biri olan içsel sürtünme açsını da (ϕ) dikkate almaktadır. Bu çalışmada kinematik analizler için gerekli olan içsel sürtünme açısını (ϕ) aynı sahada çalışması olan Koca vd. (2020)'deki raporda belirtilen deney sonuçlarından gnays biriminin içsel sürtünme açısı değeri; $\phi=23^o$ olarak alınmıştır. Albit açık ocak madeninin doğu kısmında belirlenen 22 gözlem noktasındaki 10 noktada yüksek derecede ayrışma hâkim olduğu için süreksizlik ölçümü yapılamamıştır (Çizelge 1). Diğer 12 noktada yapılan süreksizlik ölçümleri Dips V 7.016 (2019) programına aktarılarak şevlerin kinematik analizleri yapılmıştır. Yapılan 12 adet kinematik analizde 5 ve 9 numaralı gözlem noktalarında yer alan şevler, kinematik anlamda duraylı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1. Gözlem noktalarında yapılan saha çalışmaları sonucunda ortaya çıkan sonuçlar.

Gözlem noktası	Belirlenen potansiyel kütle hareketleri
1	Devrilme Yenilmesi
2	Ayrışma Bölgesi (MW)
3	Kama Tipi Kayma ve Devrilme Yenilmesi
4	Ayrışma Bölgesi (MW-HW)
5	Kinematik Olarak Stabil*
6	Kama Tipi Kayma ve Devrilme Yenilmesi
7	Kama Tipi Kayma ve Devrilme Yenilmesi
8	Düzlemsel Kayma, Kama Tipi Kayma ve Devrilme
9	Kinematik Olarak Stabil*
10	Ayrışma Bölgesi (MW)
11	Düzlemsel Kayma, Kama Tipi Kayma ve Devrilme
12	Ayrışma Bölgesi (HW)
13	Ayrışma Bölgesi (HW)
14	Ayrışma Bölgesi (HW)
15	Düzlemsel Kayma ve Kama Tipi Kayma Yenilmesi
16	Ayrışma Bölgesi (MW)
17	Devrilme Yenilmesi
18	Ayrışma Bölgesi
19	Düzlemsel Kayma Yenilmesi
20	Ayrışma Bölgesi
21	Düzlemsel Kayma, Kama Tipi Kayma ve Devrilme
22	Ayrışma Bölgesi

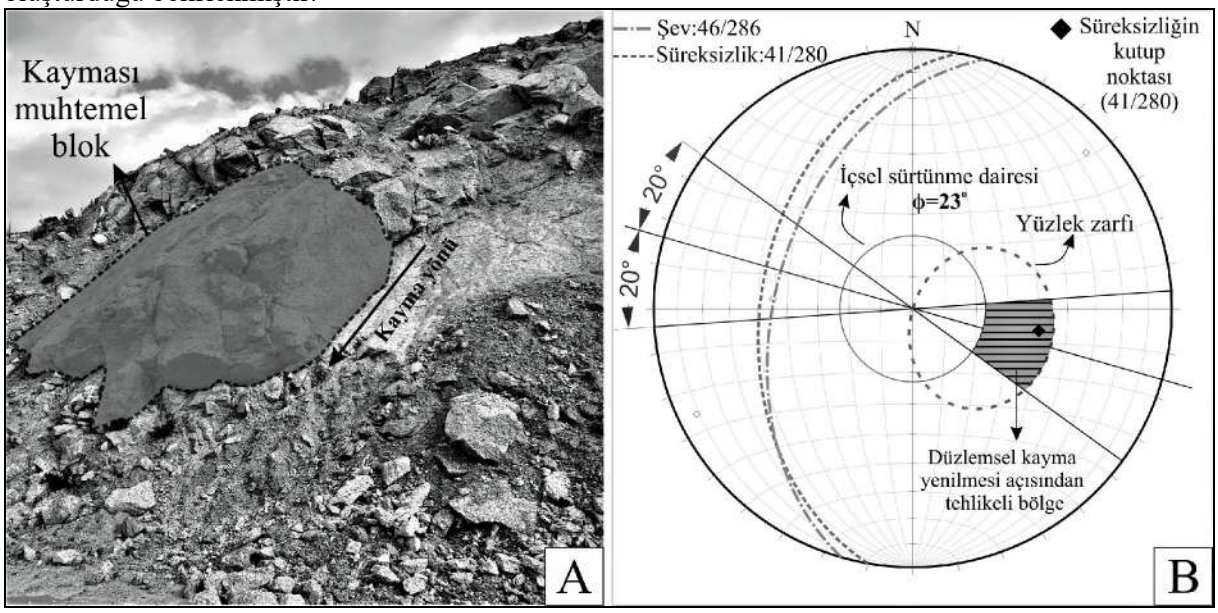
*Kinematik analiz sonucunda kinematik olarak stabil olduğu belirlenememiştir.

2.1. Düzlemsel Kayma Yenilmesi

Düzlemsel kayma yenilmesi, doğrultusu şev yüzeyine yaklaşık paralel olan bir süreksizlik düzleminin bu düzlem boyunca eğim aşağı yönde kayması ile gerçekleşen bir yenilme türüdür. Bu kayma yenilmesinin gerçekleşebilmesi veya potansiyel bir tehlike oluşturabilmesi için bazı geometrik koşullar gereklidir. Bu koşullar Hoek ve Bray (1981) ve Norrich ve Wyllie (1996)'a göre;

1. Süreksizlik düzleminin eğim açısı şevin eğim açısından küçük olmalıdır yani süreksizlik düzlemi şevi kesmelidir ($\alpha_{süreksizlik}<\alpha_{şev}$).
2. Süreksizlik düzleminin eğim açısı, kaya malzemesinin içsel sürtünme açısından büyük olmalıdır ($\alpha_{süreksizlik}> \phi$).
3. Şevin doğrultusu ile süreksizlik düzleminin doğrultusu birbirlerine yaklaşık paralel veya aralarında yaklaşık ± 20° fark olmalıdır.

Bu koşullar oluştuğunda potansiyel olarak ilgili kaya şevi için düzlemsel kayma yenilmesi meydana gelebilir. Düzlemsel kayma yenilmesinin eş alanlı alt yarım küre projeksiyonu ile kinematik analizi Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi kayma düzlemi üzerinde yer alan bloğun kinematik analiz sonucuna göre düzlemsel kayma yenilmesine uğrayabileceği ve potansiyel bir tehlike oluşturduğu belirlenmiştir.



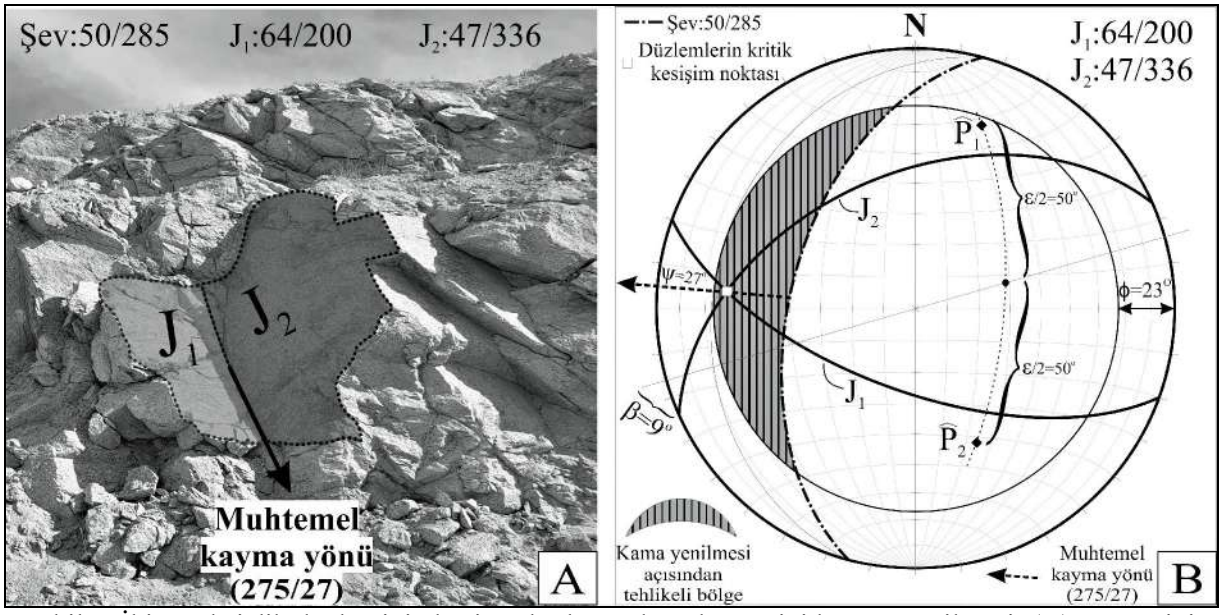
Şekil 6. Düzlemsel kayma yenilmesi; (A) Düzlemsel kaymanın sahadaki görünümü, (B) Kaymanın kinematik analizi.

2.2. Kama Tipi Kayma Yenilmesi

Kama tipi kayma, düzlemsel kaymanın özel bir türü olarak nitelendirilir. Bu kayma tipi, şev üzerinde kesişen iki süreksizlik düzleminin oluşturduğu ara kesit çizgisi boyunca kama bloğunun kayması ile gerçekleşen bir yenilme türüdür. Düzlemsel kaymada da olduğu gibi bu türde bir yenilmenin potansiyel tehlike oluşturması için bazı geometrik koşulların oluşması gereklidir. Bu koşullar (Markland, 1972);

1. Şevin eğim açısı, kamayı oluşturan düzlemlerin arakesit çizgisinin dalım açısından büyük olmalıdır($\alpha_{şev}>\psi_{arakesit}$).
2. Kamanın arakesit çizgisinin dalım açısı, kamayı oluşturan düzlemlerin içsel sürtünme açılarının ortalamasından büyük olmalıdır ($\psi_{arakesit}> \phi$).

Kama tipi kayma yenilmesinin stereografik projeksiyon yöntemi kullanılarak kinematik analizi ve arazideki görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 7. İki süreksizlik düzleminin kesişerek oluşturduğu kama tipi kayma yenilmesi; (A) Kama tipi kaymanın sahadaki görünümü, (B) Kaymanın kinematik analizi.

Kama tipi kaymanın kinematik analizi dışında analitik yöntemle Eşitlik 1'de verilen formül ile K faktörü ve güvenlik katsayısı hesaplanmıştır (Wyllie ve Mah, 2004).

$$FS = K.\frac{\tan\phi}{\tan\psi i}, \qquad FS = \frac{\sin\beta}{\sin\varepsilon/2}.\frac{\tan\phi}{\tan\psi i} \tag{1}$$

Burada, β: kamayı oluşturan düzlemlerin kutup noktalarının orta noktasından geçirilen çizgisel eleman ile eğimi düşük olan düzlemin stereonetin dış çemberini kestiği nokta arasındaki açı (derece), $\varepsilon/2$: kamayı oluşturan düzlemlerin kutup noktaları arasındaki açının yarısı (derece), ϕ: içsel sürtünme açısı (derece), ψi: kamanın dalım açısı (derece).

$$FS = \frac{\sin 9}{\sin 50}.\frac{\tan 23}{\tan 27}, \qquad FS = \frac{0.15}{0.76}.\frac{0.42}{0.50}$$

K Faktör: 0.202

FS: 0.20 x 0.83 = 0.170

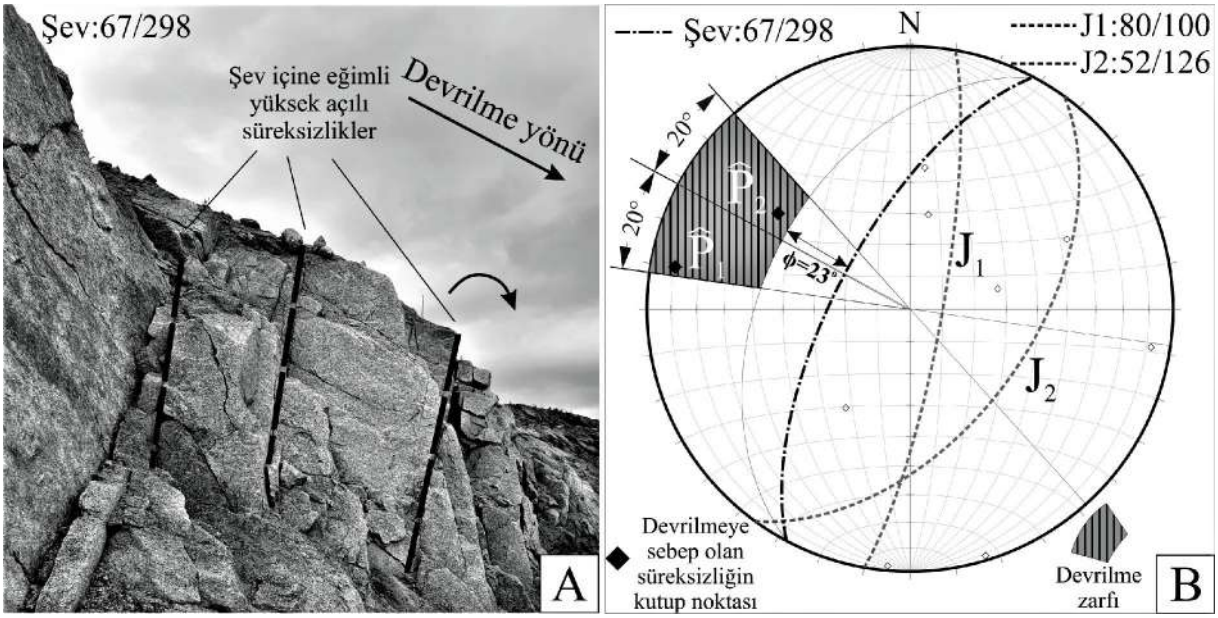
Şekil 2'de stereografik projeksiyon üzerinde gösterilen bu değerler ile Eşitlik 1'deki formül kullanıldığında güvenlik faktörü 0.170 olarak hesaplanmıştır. Bu faktör dikkate alındığında, FS < 1 olduğu için bu şev kama tipi kayma yenilmesi açısından güvenli değildir.

2.3. Devrilme Tipi Yenilme

Devrilme tipi yenilme, şev içine eğimli yüksek açılı süreksizlik düzlemlerinin oluşturduğu bir kütle hareketi olarak tanımlanabilir. Bu yenilme türü Goodman ve Bray (1976) ve Goodman (1980)'e göre aşağıdaki koşullarda potansiyel bir tehlike oluşturabilir;

1. Şev yüzeyinin doğrultusu ile süreksizlik düzlemlerinin doğrultusu arasında ± 30° fark olmalıdır.
2. Devrilmeye sebep olan yüksek açılı süreksizliğin kutup noktasının, stereonetteki devrilme yenilmesi açısından tehlikeli alanın içinde bulunması gerekir.
3. $(90 - \alpha) \leq \beta - \phi$ eşitliğinin sağlanması gerekir (Bostancı vd., 2018).

Şekil 3'teki şevde görülen devrilme tipi yenilme potansiyelinin sahadaki görüntüsü ve kinematik analiz sonucu verilmiştir.



Şekil 8.Yamaç içine eğimli yüksek açılı süreksizliklerin oluşturduğu devrilme tipi yenilme; (A) Devrilmenin sahadaki görünümü, (B) Devrilme yenilmesinin kinematik analizi.

Aynı şekilde, stereografik projeksiyon tekniği ile analiz edilen bu şevdeki süreksizliklerin devrilme tipi yenilme açısından Bostancı vd. (2018)'e göre Eşitlik 2'yi sağladığı görülmektedir.

$$(90 - \alpha) \leq \beta - \phi \quad (2)$$

Burada, α: süreksizliğin eğim açısı (derece), β: şevin eğim açısı (derece), ϕ: süreksizliğin içsel sürtünme açısı (derece).

J_1: (90-80) ≤ 67-23 J_2: (90-52) ≤ 67-23

J_1:**10** ≤ 44 J_2: **38** ≤ 44

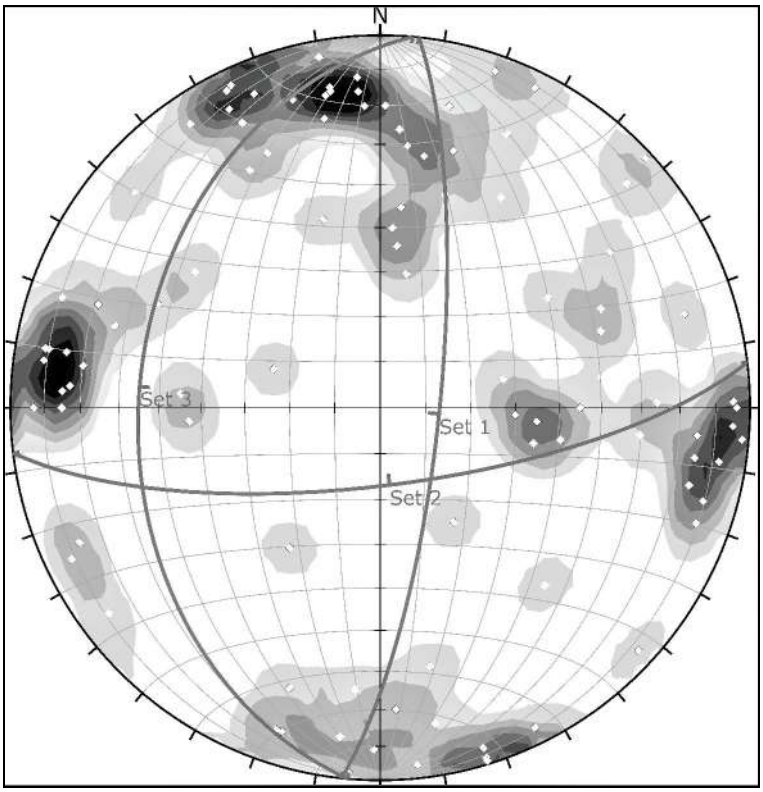
3. DEĞERLENDİRMELER

Çalışma sahasındaki şevlerden alınan süreksizlik yönelimleriyle kinematik analizler yaptıktan sonra bu yönelimler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ölçülen bu süreksizlik düzlemleri ile önce Dips V 7.016 (2019) yazılımı kullanılarak kontur diyagramı elde edilmiş ve süreksizlik setleri kümelenmiştir (Şekil 4). Kümelenen bu Set-1, Set-2 ve Set-3'ün yönelimleri sırasıyla; 77/096, 73/173 ve 35/275 olarak belirlenmiştir.

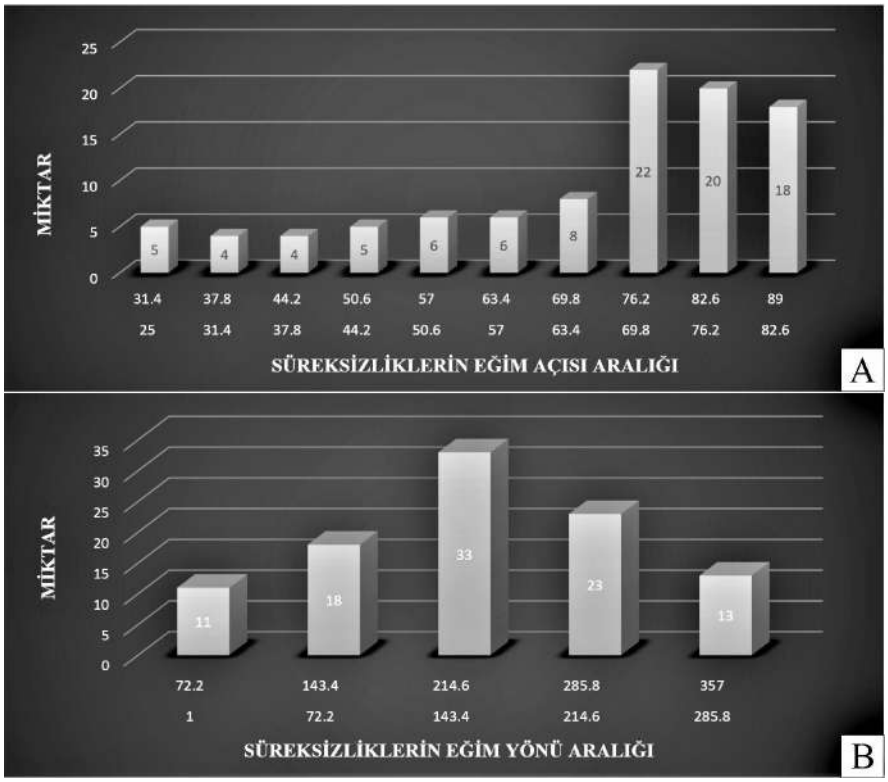
Daha sonrasında alınan bu süreksizlik ölçümlerinin açısal dağılımları incelenmiştir. Bu yönelimler, kendi aralarında hem eğim açısı hem de eğim yönü olarak grafiğe aktarılmıştır. Şekil 5'teki grafikte bu süreksizlik yönelimlerinin açısal ilişkileri verilmiştir. Süreksizliklerin eğim açısı ve eğim yönlerinin ortalama değerleri ve standart sapma değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Süreksizlik verilerinin istatistiksel dağılımları.

	Eğim açısı (°)	Eğim yönü
Ortalama Yönelim	67	187
Standart Sapma	17	93
Minimum/Maksimum Değer	25/89	1/357



Şekil 4. Alınan süreksizlik ölçümlerinin tümü kullanılarak (108 adet) elde edilen kontur diyagramı ve bu kutup yoğunlaşma noktaları kullanılarak belirlenen süreksizlik setleri.



Şekil 5. Gözlem noktalarında bulunan şevlerdeki süreksizlik yönelimlerinin aralıkları, (A) Süreksizliklerin eğim açılarının açısal dağılımı, (B) Süreksizliklerin eğim yönlerinin açısal dağılımı.

Şekil 5'te verilen grafikte süreksizliklerin eğim açılarının ağırlıklı olarak 69-89 derecede olduğu görülmektedir. Devrilme tipi yenilmelerin açısal ilişkilere bağlı olan geometrik koşullarında yüksek

eğim açılı süreksizliklerin fazla olması, kinematik analizlerle belirlenen kütle hareketlerinde bu tipteki yenilme sayısının fazla olduğunu da kanıtlamıştır.

4. SONUÇLAR

Açık işletme yöntemiyle üretim yapılan bu feldspat (albit) ocağının doğu kısmındaki şevlerde süreksizlik ölçümleri yapılmıştır. Alınan süreksizlik ölçümleri ile yapılan kinematik analizlere göre; 5 adet düzlemsel kayma yenilmesi, 7 adet kama tipi kayma yenilmesi ve 9 adet devrilme tipi yenilme belirlenmiştir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi 5 ve 9. gözlem noktalarındaki şevlerde yapılan kinematik analizlerde herhangi bir kütle hareketi belirlenememiş ve "kinematik olarak stabildir" değerlendirmesi yapılmıştır. 22 gözlem noktasının 12 tanesi, bölgenin yoğun bir şekilde rüzgâr ve yağışa maruz kalması gibi çeşitli çevresel faktörlerin etkisiyle kaya özelliğini kaybetmiş ve bu noktalarda ölçüm alınamamıştır. Sonuç olarak; ayrışmanın etkisinin gözlendiği ve ayrışma zonlarının sayıca fazla bulunduğu bu açık ocak madeninde kinematik analiz tekniği kullanılarak toplam 21 adet potansiyel kütle hareketi belirlenmiştir.

4. KATKI BELİRTME

Bu bildiri Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda birinci yazarın "Comparison of kinematic analysis results obtained from Unmanned Aerial Vehicle data and scan-line discontinuity measurements in the gneiss rock slopes" başlıklı yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında yardımlarını esirgemeyen Sibelco Madencilik bünyesinde çalışan S. Deniz KARAGÖZ'e teşekkürlerimizi sunarız.

5. KAYNAKLAR

Bawa, H., Yendaw, J., Kansake, B., Bansah, K., (2017). Rock Mass Characterization for Open Pit Slope Design using Kinematic Analysis. 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium At: San Francisco, California, USA.

Bostanci, H.T., Alemdag, S., Gurocak, Z., Gokceoglu, C., (2018) Combination of discontinuity characteristics and GIS for regional assessment of natural rock slopes in a mountainous area (NE Turkey). Catena 165: 487–502

Dips V 7.016, (2019). Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data, RocScience Inc.

Francioni, M., Salvini, R., Stead, D., Giovannini, R., Riccucci, S., Vanneschi, C., Gullì, D. (2015). An integrated remote sensing-GIS approach for the analysis of an open pit in the Carrara marble district, Italy: Slope stability assessment through kinematic and numerical methods. Computers and Geotechnics.

Goodman, R. E., (1980). Introduction to rock mechanics. John Wiley, New York.

Goodman, R. E., Bray J. W., (1976) Toppling of rock slopes. In: In: Rock engineering for foundations and slopes; Proceedings of a Specialty Conference, 2nd Edition. American Society of Civil Engineers, New York, pp 201–233.

Hoek, E., Bray, J.W., (1981) Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, London.

Kıncal, C. (2021) Fault-controlling safe slope design procedure in an open-pit mine case study: Tunçbilek-Kütahya (Turkey) coal field. Arabian Journal of Geosciences 14, 91. https://doi.org/10.1007/s12517-020-06343-1.

Koca, M. Y., Kıncal, Cem., Kadakçı Koca, T., (2020). Slope Stability Evaluation Report of the Eastern Slopes of Sarıkısık Open Pit Albite Mine, Dokuz Eylül University, İzmir.

Markland, J. T., (1972). A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected: Imperial College Rock Mechanics Research Reprints, n. 19.

Norrich, N., Wyllie, D., (1996) Rock Slope Stability Analysis. In: Landslides: investigation and mitigation, Transportation Research Board Special Report, National Research Council, Washington, pp. 391–425.

Obregon, C., Mitri, H., (2019). Probabilistic approach for open pit bench slope stability analysis – A mine case study. International Journal of Mining Science and Technology. doi: 10.1016/j.ijmst.2019.06.017.

Wyllie, D. C., Mah, C.W., (2004). Rock Slope Engineering Civil and Mining, 4th Edition. New York, Spon Press 431 p.

Kaya Şevlerinde Açılmış Açık Ocak Madeninde Q-Slope Uygulaması

Application of Q-slope in an Open Pit Mine in Rock Slopes

E. Kalhan[1], C. Kıncal[2,*]

[1]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, 35160, İzmir*
[2]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35160, İzmir*
*(*cem.kincal@deu.edu.tr)*

ÖZ: Açık ocak madenciliğindeki en büyük sorunlarından biri şev stabilitesidir. Stabilite problemlerini ortadan kaldırmak için jeoloji, iklim ve üretim faaliyeti gibi konuların bilinmesi ve bu şartlara göre uygun şev geometrilerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Menderes Masifi'ndeki gnayslarda açılmış olan bir açık ocak madenin kaya şevlerinin stabilitesi incelenmiştir. Üretimin güvenli bir şekilde devam edebilmesi için yaz aylarında sahada yapılan hat etüdü çalışmaları ile kayaç kütle özellikleri belirlenmiş ve duraysızlığa sebep olan süreksizlik takımları tespit edilmiştir. Çalışmalar sırasında mevcut şev geometrileri değerlendirilmiş ve şev basamaklarından alınan ölçümler ile jeolojik ve çevresel koşullara göre stabil kalabilecek şev geometrileri belirlenmeye çalışılmıştır. Şev stabilitesini değerlendirmek ve bu şevlerde hiçbir iyileştirme veya güçlendirme işlemi olmaksızın stabil kalabilecek en büyük şev açısını ve yüksekliğini tespit etmek amacıyla Q-Slope kayaç kütlesi sınıflandırma sistemi kullanılmıştır. Bu sınıflandırma sistemine göre, bölgenin jeolojisi ve iklim koşulları göz önünde bulundurularak, stabil olmayan kaya şevleri tespit edilmiş ve stabil hale gelmesi için gerekli şev yükseklikleri ve açıları tespit edilmiştir. Projenin başlangıç evresinde Qslope sisteminin başarılı bir şekilde uygulanabileceği bu çalışma kapsamında tespit edilmiş ve bir rehber niteliği olabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Gnays, Kaya kütle sınıflaması, Mühendislik Jeolojisi, Q-slope, Şev stabilitesi.

ABSTRACT: *One of the biggest problems in open pit mining is slope stability. In order to eliminate stability problems, subjects such as geology, climate and production activity should be known and appropriate slope geometries should be selected according to these conditions. In this study, the stability of the rock slopes of an open pit mine opened in gneisses in the Menderes Massif was investigated. In order to continue safe production, the rock mass properties were determined by scan-line carried out in the field during the summer months and the discontinuity sets that cause instability were determined. During the studies, the existing slope geometries were evaluated and the slope geometries that could remain stabile according to the geological and environmental conditions were tried to be determined by the measurements taken from the slope benches. Q-Slope rock mass classification system was used to evaluate the slope stability and determine the maximum slope angle and height that can remain stabile without any improvement or strengthening process on these slopes. According to this classification system, rock slopes in critical situation were determined and slope heights and angles required for stabilization were determined, considering the geology and climatic conditions of the region. In the initial phase of the project, it was determined within the scope of this study that the Qslope system could be successfully implemented and it was proved to be used as a guide.*

Keywords**:** *Gneiss, Rock mass classification, Engineering Geology, Q-slope, Slope stability.*

1.GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında Menderes Masifindeki açılmış olan bir açık işletmenin kaya şevleri üzerinde çalışılmıştır. Albit üretimi yapılan bir maden işletmesinin doğu şevlerinin süreksizlik kontrollü şev hareketlerinin tespit edilmesinden dolayı şirketin yöneticileri tarafından kazı, üretim ve patlatma gibi faaliyetler durdurulmuştur. Bu maden ocağındaki kaya şevlerinin stabilitesi Q-slope kayaç şev kütle sınıflandırma sistemi ile değerlendirilmiştir. Üretimin yeniden başlayabilmesi için doğu

kesimindeki şevlerden ISRM (2007) tarafından önerilen süreksizlik ara uzaklığı, pürüzlülük, devamlılık gibi ölçümler mühendislik jeolojisi kapsamında yapılmıştır. Buna ilaveten Barton ve Choubey (1973) tarafından Schmidt çekici geri sekme değerleri ile önerilen eşitlik kullanılarak süreksizlik düzlemlerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri bulunmuştur. Mühendislik jeolojisi çalışmaları sonucunda yapılan Q-slope sınıflaması sistemi vasıtasıyla stabil olmayan şevler belirlenmiş ve şevlerde hiçbir iyileştirme çalışması yapılmaksızın stabil kalabileceği en yüksek şev açıları tespit edilmiştir.

2. Q-Slope

Q-slope, Q-Sistemi'ndeki gibi 6 farklı parametreyi (RQD, Jn, Jr, Ja, Jw ve SRF) kullanan ve Barton ve Bar (2015) tarafından şev ve yol yarmaları gibi mühendislik çalışmaları için geliştirilmiş bir jeoteknik sınıflama sistemidir. Fakat Q-Sistem'den farklı olarak birkaç parametre güncellenmiş ve Q-slope değerini tahmin etmek için Eşitlik 1'deki formülü önermişlerdir (Bar ve Barton, 2017).

$$\text{Q-slope} = \frac{RQD}{J_n}\left(\frac{J_r}{J_a}\right)_c \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (1)$$

Burada, RQD: Kaya kalite indeksi, J_n: Süreksizliklerin set sayısı, J_r: Süreksizliklerin pürüzlülüğü, J_a: Süreksizliklerin alterasyon durumları, J_{wice}: Çevresel ve jeolojik koşul puanı, SRF_{slope}, Şev için gerilim azaltma faktörüdür.

Bu eşitlikte RQD/J_n blok boyutunu temsil eder. J_r/J_a, sürtünme direnci çifti olarak bilinir ve gerektiğinde kamanın her iki tarafındaki eklemlere uygulanabilir (Barton, 2017). Bununla birlikte Barton ve Bar (2015) tarafından O-faktörü adı verilen bir parametre geliştirilmiştir ve bu "süreksizlik yönelim faktörü" olarak adlandırılmıştır. Kaya şevlerindeki süreksizlikler için bir düzeltme faktörü geliştirilmiştir ve bu faktör Q-sistemde mevcut değildir. Jwice, şevlerin dış etkenlere (iklim, rüzgâr ve donma gibi) çok uzun süre maruz kaldığından dolayı Q-sistemdekinden farklıdır ve Q-slope da yeni bir yapı kazanmıştır (Barton ve Bar 2015). Jwice'ın değerlendirilmesi için Barton ve Bar (2015) tarafından önerilen tablo ile belirlenir. SRFa, Şev yüzeyinin fiziksel koşulların belirlenebilmesi için geliştirilmiştir. SRFb, Q-indeksine benzer şekilde kullanılmaktadır ve şevdeki gerilme-dayanım için geliştirilmiş bir parametredir. SRFb, yüksek derecede aşınmış, zayıf, düşük mukavemetli malzemeler için çok önemli bir parametredir. Bununla birlikte şevin eğiminin ve yüksekliğinin de artmasıyla daha önemli hale gelmektedir (Barton ve Bar, 2017). SRFc, Kaya şevlerini birçok yönüyle olumsuz şekilde etkileyen zayıflık düzlemleri için geliştirilmiştir. SRFşev, SRFa, SRFb ve SRFc arasındaki maksimum değeri kullanır. SRFa, SRFb, SRFc değerleri tahmin etmek için sistemin geliştiricileri tarafından tablolar önerilmiştir (Barton ve Bar, 2015). Özetlemek gerekirse bahsi geçen bu iki parametre (Jwice ve SRFslope) dış faktörler ve gerilme bileşenleri olarak adlandırılmıştır. Kayma direnci, τ, Eşitlik 2'deki denklem kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$\tau = \sigma_n \tan^{-1}\left(\frac{J_r}{J_a}\right) \quad (2)$$

Bununla birlikte Barton ve Bar (2015) tarafından geliştirilen Eşitlik 3 sayesinde güçlendirme ve iyileştirme yapılmadan stabil kalabilecek en dik şev eğimi aşağıdaki eşitlik yardımıyla basit bir şekilde hesaplanabilir veya Şekil 1'den tespit edilebilir.

$$\beta = 20\log_{10} Q_{slope} + 65^{o} \quad (3)$$

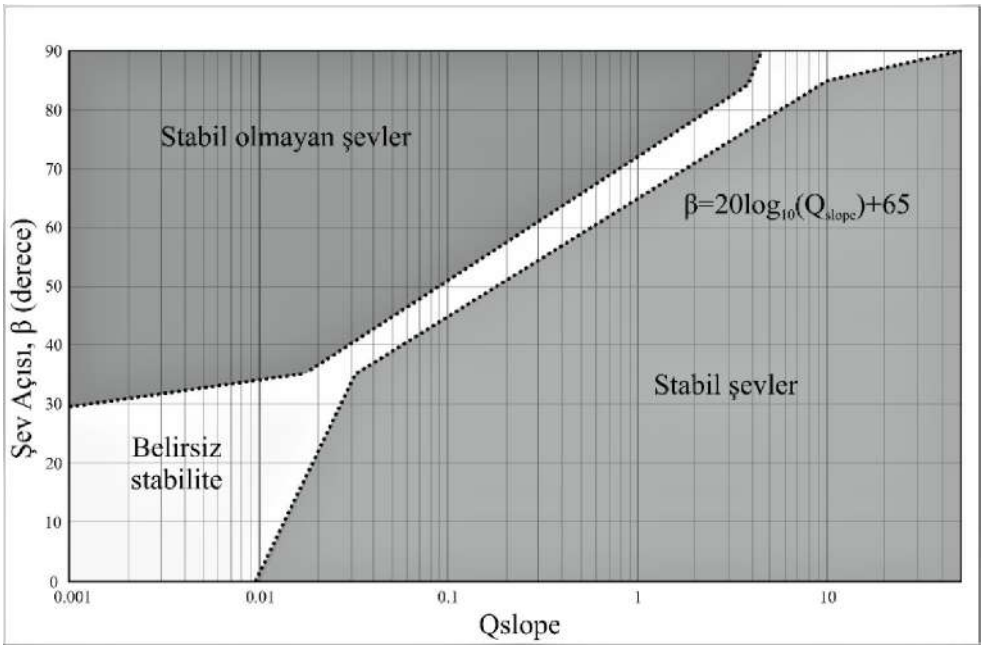
Denklem, 35 ila 85 arasındaki eğim açıları için merkezi verilerle eşleşir. Farklı Q-slope kaliteleri için, aşağıda verilen açılar sabit kabul edilebilir (Barton ve Bar, 2015).

Q-slope = 10 - (85° şev açısı için).

Q-slope = 1- (65° şev açısı için).

Q-slope = 0.1- (45° şev açısı için).

Q-slope = 0.01- (25° şev açısı için).



Şekil 9. Qslope abağı.

2.1. Qslope Uygulaması

Bu makalede şev stabilitesini daha iyi irdelenebilmesi ve değerlendirilebilmesi amacıyla kullanılan sınıflama sistemi Q-slope'dur. Barton ve Bar (2015) tarafından geliştirilen ve kaya şevlerinin farklı parametrelerle değerlendirilmesini ve hiçbir güçlendirme olmaksızın stabil kalabilecek en dik şev açısını projenin ilk aşamasında tespit etmek amacıyla geliştirilmiş ampirik bir sistemdir (Barton ve Bar, 2017). Bu çalışma kapsamında da açık ocak madeninde yapılan 28 gözlem noktasındaki şevlerin Barton ve Bar (2015)'ın önerdiği çizelgelere ve formüllere dayanarak puanlaması yapılmıştır. Çalışılan maden işletmesinde bütün şevler ortognays kütlesinde açılmıştır ve şevlerin tamamı 30 metrenin altında yüksekliğe sahiptir (şevlerin yükseklikleri ortalama 10-12 metre olarak tespit edilmiştir).

Bu sistem özelinde geliştirilen formülün ilk 6 parametresinden biri olan RQD değeri Priest ve Hudson (1976)'ın önerdiği RQD%=100'$e^{-0,1\lambda}$(0.1λ+1) eşitliğe göre elde edilmiştir. Formülün bir diğer parametresi olan Jn (Süreksizlik takımı sayısı) hat etüdü ölçümleri sonucunda tespit edilmiştir. Burada unutulmamalıdır ki her bir şev için alınan ölçümler kendine özgüdür ve diğer şevlerden bağımsız olarak düşünülmüştür. Jr/Ja yine her bir şev basamağı için farklı olarak değerlendirilmiştir. Burada Barton ve Bar (2015) tarafından geliştirilen "O-faktörü" için önerildiği gibi en elverişsiz eklem seti için puanlandırılmıştır. Kama tipi yenilmelerde ise kaymaya sebebiyet veren ikincil eklem setine de yine Barton ve Bar (2015) tarafından geliştirilen uygun puanlar verilmiştir. O-faktör değerini belirlemek için gözlem noktalarındaki süreksizliklerden ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümlere istinaden kinematik analizler yapılmış ve bu analizler sonucunda ilgili yenilme tipine göre uygun puanlar belirlenmiştir (Çizelge 1). Puanlama yapılırken Barton ve Bar (2015)'in de belirttiği gibi kaymaya sebebiyet verebilecek yani en elverişsiz süreksizlik ve/veya süreksizlik takımı puanlamaya katılmıştır.

Q sistemden farklı olarak geliştirilen bir diğer parametre olan Jwice'ın hesaplanabilmesi için ise ülkenin yerel meteoroloji kaynaklarından yararlanılarak bölgenin aylara göre aldığı yağış verileri ve sıcaklık miktarları kullanılmıştır (Şekil 2).

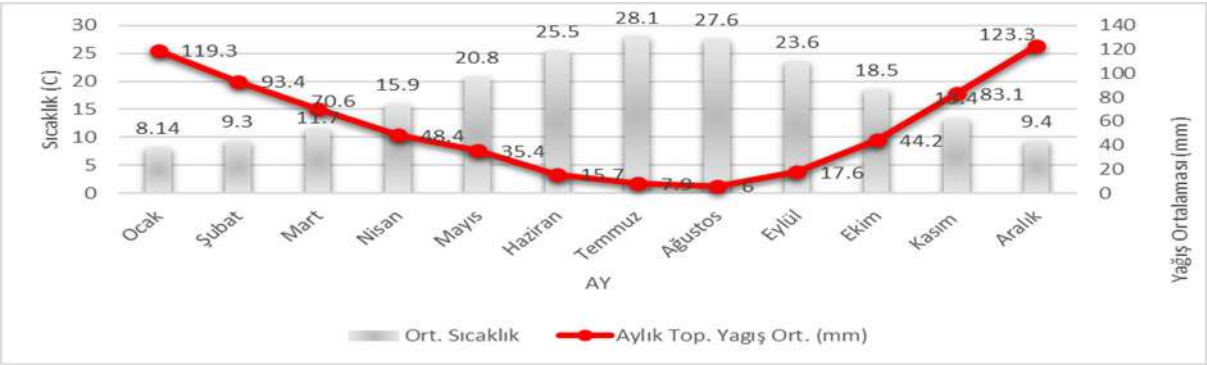
Bu verilere göre Barton ve Bar (2015) tarafından önerilen sınıflardan bir tanesi seçilmesi gerektiğinden "Islak Ortam" (Wet Environment) sınıfı seçilmiştir. Bunun nedeni ise verilerden de görüleceği üzere bölgenin özellikle kış aylarında aşırı yağış alması ve bu yağışlı dönemlerde sıcaklık ortalamasının düşük olmasından dolayıdır. Yaz dönemlerinde yapılan incelemeler sırasında ise şev basamaklarının stabil olduğu (üretim durmuş vaziyette) ancak şevlerdeki süreksizlik düzlemlerinin

özelliklerinden (yönelim, pürüzlülük, açıklık vb.) dolayı "yetersiz" (incompetent) kaya olduğu tespit edilmiştir. Yani bu çalışma için her bir şevin Jwice değeri 0,6 olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra ocak şevlerinin hiçbir basamağında önerilen grafikteki drenaj ve/veya güçlendirme sistemi olmadığından herhangi bir katsayıyla çarpımı olmamıştır. SRFa parametresi için gözlem noktaları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu gözlemler sonucunda şevlerde patlatmadan dolayı büyük blok düşmeleri ve ayrışmaya yönelik duyarlı bir kaya şevi olduğu düşünülmüştür.

Çizelge 1. Gözlem noktalarındaki hâkim süreksizlik takımları ve muhtemel yenilme mekanizmaları

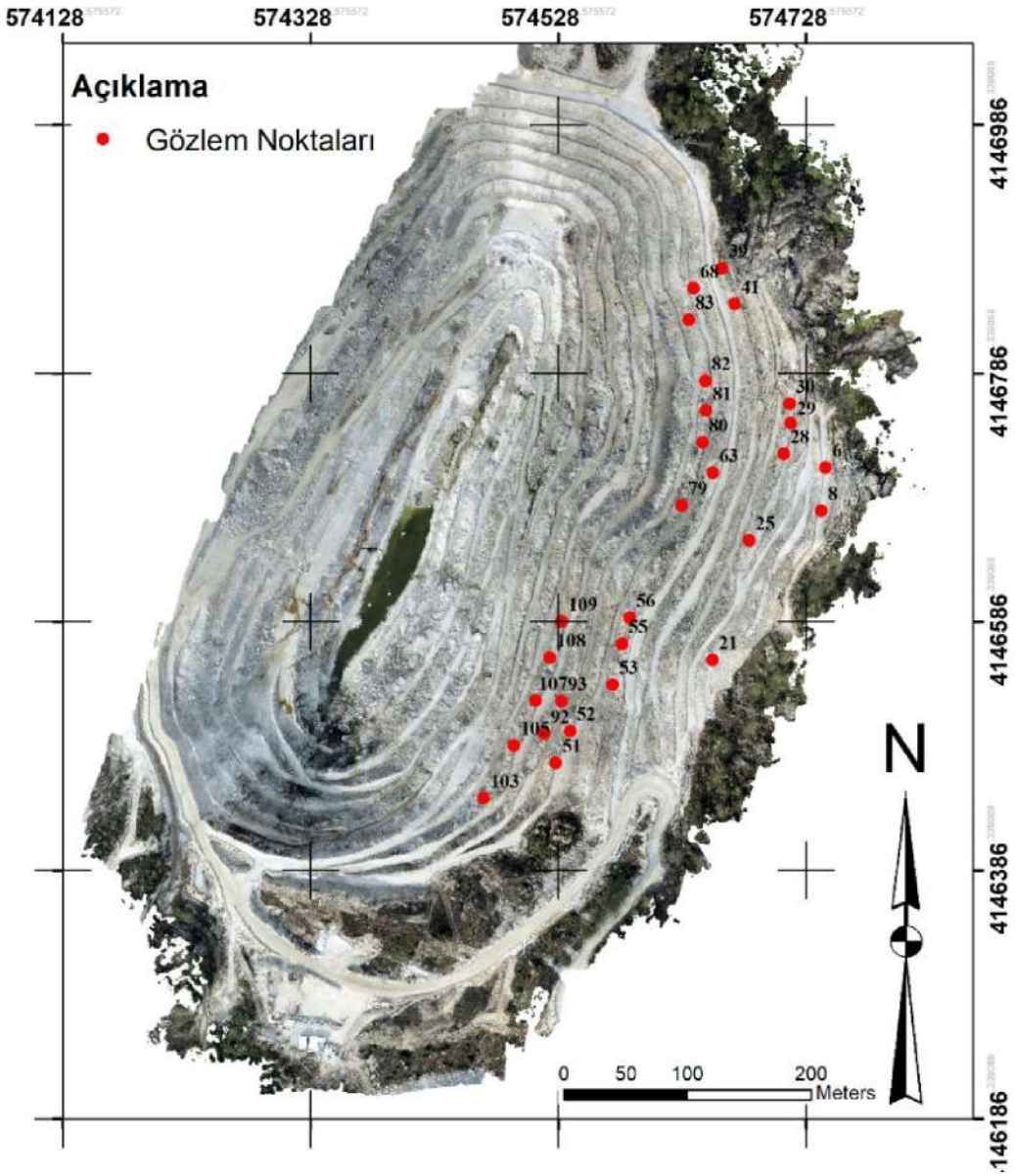
K	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	Muhtemel Yenilme Tipleri	Şev Eğim/Eğim Yönü	O-Faktör	
										Set1	Set2*
6	46/030	31/210	86/093	60/061	-	-	-	T	41/274	0,75	1
8	43/251	76/217	44/250	-	-	-	-	P/W	58/281	0,75	0,9
21	22/212	50/270	76/064	84/183	-	-	-	T	47/288	0,5	0,8
25	70/074	67/325	40/310	40/310	-	-	-	P/W	59/295	0,5	0,8
28	86/186	40/235	80/095	-	86/186	80/095	-	W/T	50/295	0,5	0,8
29	87/288	40/308	84/020	40/304	-	-	-	W/P	53/286	0,5	0,8
30	88/174	62/190	65/090	60/340	88/174	65/090	60/164	W/T	56/269	0,5	0,8
39	62/016	70/007	64/259	-	70/045	64/259	70/007	P/T/W	74/248	0,5	0,8
41	68/151	84/277	84/286	54/287	58/248	76/056	73/147	W/T	54/253	0,5	0,8
51	52/160	66/273	30/249	34/208	80/274	30/249		W/P	51/287	0,75	0,9
52	40/242	77/337	64/156	-	-	-	-	W	53/295	0,75	0,5
53	82/97	80/323	40/222	57/337	-	-	-	W/T	43/278	0,5	0,8
55	72/101	80/110	28/287	80/046	28/287	63/080	62/139	T/W/P	45/296	0,5	1
56	72/135	75/147	56/326	34/207	60/180	70/088		T/W	41/302	0,5	0,8
63	47/190	70/321	87/119	87/089	83/076	62/094	82/154	W/T	45/278	0,75	0,9
68	47/284	70/180	73/285	80/190	73/259	70/025	-	W	44/257	0,75	0,9
79	28/285	48/257	60/331	75/108	74/113	60/131	88/097	P/W/T	60/291	0,75	0,9
80	76/109	14/040	-	-	-	-	-	T	50/284	0,5	1
81	54/210	50/310	74/113	85/115	50/248	60/035	77/310	W/T	48/276	0,5	0,8
82	84/341	60/195	82/101	69/081	84/030	70/081	79/284	W/T	50/261	0,75	0,9
83	57/224	40/336	84/084	88/348	86/160	59/153	87/253	W/T	45/260	0,5	1
92	37/308	58/358	60/212	83/080	81/109	88/175	70/105	P/W/T	54/289	0,75	0,9
93	40/319	50/039	74/267	70/325	89/280	53/185	20/090	P/W	60/308	0,75	1
103	45/256	70/008	83/356	83/337	-	-	-	W	45/315	0,5	1
105	30/282	36/267	54/255	61/335	80/091	63/055	80/181	P/W/T	54/298	0,5	0,8
107	39/204	62/333	79/088	68/094	68/094	60/154	74/004	W/T	63/293	0,5	1
108	45/260	45/260	57/339	71/088	70/097	68/128	70/097	P/W/T	60/278	0,5	1
109	45/312	47/314	70/353	81/095	72/090	81/060	72/090	P/W/T	60/285	0,5	1

K: Konum, J: Eklem takımı, P: Düzlemsel, W: Kama, T: Devrilme, Set: Eklem takımı, (*): Set2; Düzlemsel kayma için 1 alınır.



Şekil 2. Aydın ili yağış-sıcaklık grafiği (MGM, 2019).

Bu durumlar göz önüne alındığında kaya şevi için puanlama sisteminde önerilen B sınıfı verilmiştir, yani; blok düşmeleri, gerilim çatlakları belirtileri (izleri), hava koşullarına duyarlılık, patlamadan kaynaklanan ciddi dağılma. SRFb parametresi tanımlanması için gerekli parametrelerden birincisi UCS'dir ve bu parametre sahada yapılan Schmidt çekici vasıtasıyla ampirik yollarla tespit edilmiştir. SRFb'nin tespiti için 2. parametre ise en büyük asal gerilmedir. Bu parametre, eklemli kaya kütlesi için Genelleştirilmiş Hoek ve Brown yenilme kriteri kullanarak Roclab yazılımı ile hesaplanmıştır (Hoek vd., 2002). Bu işlemlerin sonucunda σ_c / σ_1 değeri hesaplanmış ve SRFb puanı bulunmuştur. Sistemin son paydası olan SRFc değeri yine gözlem noktalarından ana süreksizlik setlerinin tanımlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir şev için farklı bir SRFc puanı bulunmuştur. Barton ve Bar (2015) e göre SRF a, b, c, değerlerinin en yüksek değeri hesaplamaya katılmıştır. Bütün bu işlemlerin sonunda maden ocağındaki 28 noktada gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra her bir şevin Q-slope puanı ortaya çıkartılmıştır (Çizelge 2). Bahsi geçen gözlem noktalarının konumları insansız hava aracı vasıtasıyla elde edilen görüntüler ile coğrafi bilgi sistemleri yazılımı kullanılarak ocak içerisinde hangi bölgelerde olduğu Şekil 3'de gösterilmiştir.



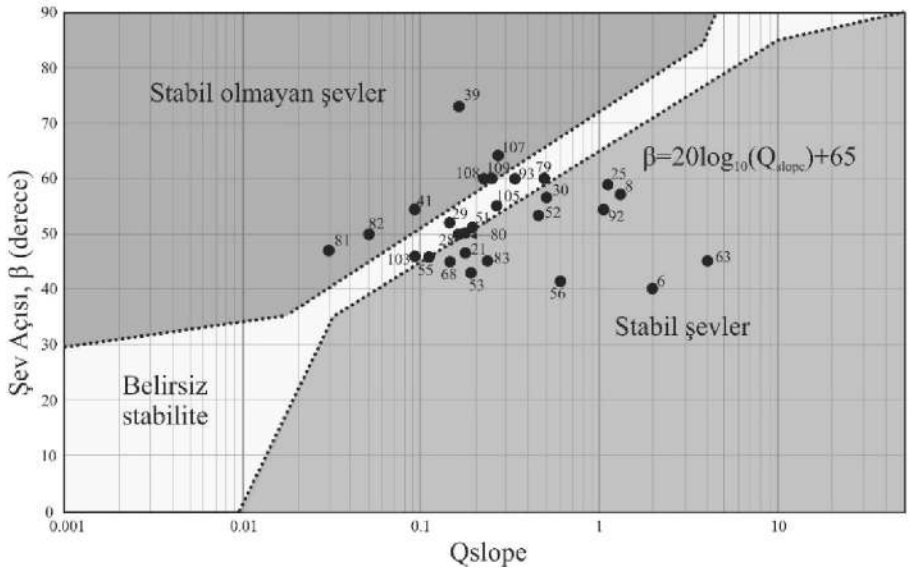
Şekil 3. Madenin doğu tarafından alınan 28 gözlem noktasının konumları.

Çizelge 2. Şev noktalarında Qslope değerleri.

Konum	RQD/Jn	(Jr/Ja) *(O-fac)	(Jr/Ja) *(O-fac)	Jwice/SRF (a,b,c)	QSlope Değeri	Konum	RQD/Jn	(Jr/Ja) *(O-fac)	(Jr/Ja) *(O-fac)	Jwice/SRF (a,b,c)	QSlope Değeri
6	15,5	1,125	1	0,12	2,09	63	5,66	2,25	2,7	0,12	4,13
8	7,08	1,125	1,35	0,12	1,29	68	6,91	0,38	0,45	0,12	0,14
21	10,33	0,19	0,8	0,12	0,18	79	5,4	1,13	0,68	0,12	0,49
25	7,08	1,5	0,8	0,12	1,02	80	3,86	0,38	1	0,12	0,17
28	5,66	0,38	0,6	0,12	0,15	81	4,86	0,19	0,3	0,12	0,03
29	5,53	0,38	0,6	0,12	0,14	82	5,12	0,28	0,34	0,12	0,05
30	4,6	0,75	1,2	0,12	0,49	83	4,90	0,38	1	0,12	0,22
39	4,26	0,38	0,8	0,12	0,15	92	5,70	1,13	1,35	0,12	1,03
41	2,66	0,38	0,8	0,12	0,09	93	4,95	0,56	1	0,12	0,33
51	4,16	0,56	0,68	0,12	0,18	103	4,26	0,19	1	0,12	0,09
52	4,6	1,13	0,75	0,12	0,46	105	2,66	0,75	1,2	0,12	0,28
53	7,08	0,38	0,6	0,12	0,19	107	4	0,38	1	0,12	0,18
55	4,86	0,19	1	0,12	0,10	108	5,13	0,38	1	0,12	0,23
56	6,13	0,75	1,2	0,12	0,66	109	5,4	0,38	1	0,12	0,24

3. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında ocağın doğu kesimindeki hareket gözlenme ihtimali olan 28 şevde yapılan Qslope sonuçlarına göre 7 adet "belirsiz sınıf" tespit edilmiştir. Bu şevlerde yalnızca şev açıları birkaç derece düşürülmesiyle bile ampirik olarak yapılan sınıflama sisteminde stabil hale geçebileceklerdir. Örnek vermek gerekirse 51 numaralı şev yalnızca 0,43 derecelik bir fark ile yatırılmasıyla stabil sınıfına girmektedir. Bir başka deyişle, şevlerde yapılabilecek gerekli şev açısı düşürme işlemiyle malzeme özellikleriyle ilişkili olarak şev stabil hale geçebilmektedir. Bununla birlikte "Stabil" olarak gözüken birkaç şevin gereğinden fazla açışı düşürülmüştür. Bu da kazı maliyetini arttırmakla birlikte zaman kaybına da sebebiyet vermektedir. Bahsi geçen şevlerden bazıları 56 ve 63 olarak verilebilir.
Qslope puanları hesaplandıktan sonra Barton ve Bar (2015) tarafından önerilen yarı logaritmik çizelgeye yerleştirilmiştir (Şekil 4). İncelenen bütün kaya şevleri siyah daireler ile belirtilmiştir.



Şekil 4. Şevlerin Qslope sisteminde sınıflandırılması.

Bu sınıflandırma sistemine göre toplam 28 şevde yapılan analizler sonucunda 13 şev stabil, 8 şev stabil değil, 7 şev de belirsiz sınıflar tespit edilmiştir. Bahsi geçen şevlerin mevcut şev açıları ve Barton ve Bar (2015) tarafından geliştirilen formülle (Eşitlik 3) en yüksek şev açılarını karşılaştırarak kaya şevinin sınıflamasını yapmak mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde her iki yöntemle de en yüksek şev açısı tespit edilmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Önerilen eşitliğe göre en dik şevlerin mevcut şevlerle kıyaslanıp sınıflandırılması.

Konum	Mevcut şev açısı	En dik şev açısı	Qslope Sınıfı	Konum	Mevcut şev açısı	En dik şev açısı	Qslope Sınıfı	Konum	Mevcut şev açısı	En dik şev açısı	Qslope Sınıfı	Konum	Mevcut şev açısı	En dik şev açısı	Qslope Sınıfı
6	41	71,41	Stabil	39	74	48,7	Stabil değil	63	45	77,3	Stabil	92	54	65,3	Stabil
8	58	67,21	Stabil	41	54	44,6	Stabil değil	68	44	47,9	Stabil	93	60	55,4	Belirsiz
21	47	50,39	Stabil	51	51	50,5	Belirsiz	79	60	58,8	Belirsiz	103	45	44,6	Belirsiz
25	59	65,17	Stabil	52	53	58,3	Stabil	80	50	49,8	Belirsiz	105	54	54,1	Belirsiz
28	50	48,69	Belirsiz	53	43	50,6	Stabil	81	48	35,3	Stabil değil	107	63	50,1	Stabil değil
29	53	48,48	Stabil değil	55	45	45,7	Stabil	82	50	40,3	Stabil değil	108	60	52,2	Stabil değil
30	56	58,92	Stabil	56	41	61,4	Stabil	83	45	51,8	Stabil	109	60	52,7	Stabil değil

4. KATKI BELİRTME

Bu bildiri Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dali'nda "Monitoring and numerical analysis of open pit mine slopes in gneisses" başlıklı birinci yazarın yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında Sibelco Madencilik bünyesinde çalışan Yüksek Mühendis S. Deniz KARAGÖZ'e katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR

Bar, N., Barton, N., (2017). The Q-slope method for rock slope engineering. Rock Mechanics Rock Engineering 50:3307–3322

Barton, N., Bar, N., (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. In: Schubert, Kluckner (eds) Future development of rock mechanics, proceedings of the ISRM regional symposium EUROCK 2015 and 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, 7–10 Oct 2015, pp 157–162

Barton N, Lien R, Lunde J (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech 6(4):189–236

Barton, N., Choubey, V., (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 10, 1-54.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., (2002). Hoek-Brown criterion-2002 edition. In Proceedings of North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 1, 267-273.

International Society for Rock Mechanics-Turkish National Group (ISRM-TNG). In: Ulusay, R., Hudson, J. A., editors. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. 1974-2006, Ankara, Turkey; 2007:165–173.

RocLab V.0.1, (2007). Rock Mass Strength Analysis using the Generalized Hoek-Brown Failure Criterion. RocScience Inc.

İstanbul-Büyükçekmece Kemerdere Mevkii Yamaç Duraylılığının İncelenmesi

Istanbul-Büyükçekmece Kemerdere Area Slope Stability Investigation

Ö. Özkütük[1,*], S. Erdoğan[1], R. Karagüzel[1]

[1] İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
*(*ozkutuk15@itu.edu.tr)*

ÖZ: Bu bildiride, İstanbul - Büyükçekmece Kemerdere mevkiinde eski bir kütle hareketi bölgesinin yamaç duraylılığı incelenmiştir. Amaca yönelik olarak inceleme alanında yamaçların duraylılığını denetleyen; jeolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik ve jeomekanik özellikleri belirlenmiştir. Yamaç duraylılığı analizlerinde gerekli olan litolojik birimlerin kayma parametreleri; kohezyon ve içsel sürtünme açısı belirlenmiş, Poisson oranı ve elastisite modülü ise ilgili literatürden derlenmiştir. İnceleme konusu yamacın duraylılığına yönelik olarak kavramsal hesap kesiti sayısallaştırılmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik koşullar için analiz edilmiştir. Stabilite analizlerinde Phase2.V9 yazılımı kullanılmış ve kritik dayanım düşürme faktörü (SRF) hem statik yükler altında hem de dinamik yükler altında analiz edilmiştir. Yamacın doğal hali senaryoları statik durum için SRF 3.28, dinamik durum analizlerinde ise güvenlik sayısı kritik değerin (SRF=0.86) altında hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: duraylılık, heyelan, limit denge, mühendislik jeolojisi, sonlu elemanlar

ABSTRACT: *In this paper, the slope stability of an old mass movement region in Istanbul - Büyükçekmece Kemerdere locality was investigated. Inspecting the stability of the slopes in the study area for the purpose; geological, geomorphological, hydrogeological and geomechanical properties were determined. Slip parameters of lithological units required in slope stability analysis; cohesion and internal friction angle were determined, Poisson ratio and modulus of elasticity were compiled from the relevant literature. For the stability of the slope, which is the subject of the study, the conceptual calculation section has been digitized and analyzed for static and dynamic conditions with the finite element method. Phase2.V9 software was used for stability analysis and the critical strength reduction factor (SRF) was analyzed both under static loads and dynamic loads. The natural state scenarios of the slope were SRF 3.28 for the static situation, and the safety number was calculated below the critical value (SRF=0.86) in the dynamic situation analyses.*

Keywords*: stability, landslide, limit equilibrium, engineering geology, finite element*

1. GİRİŞ

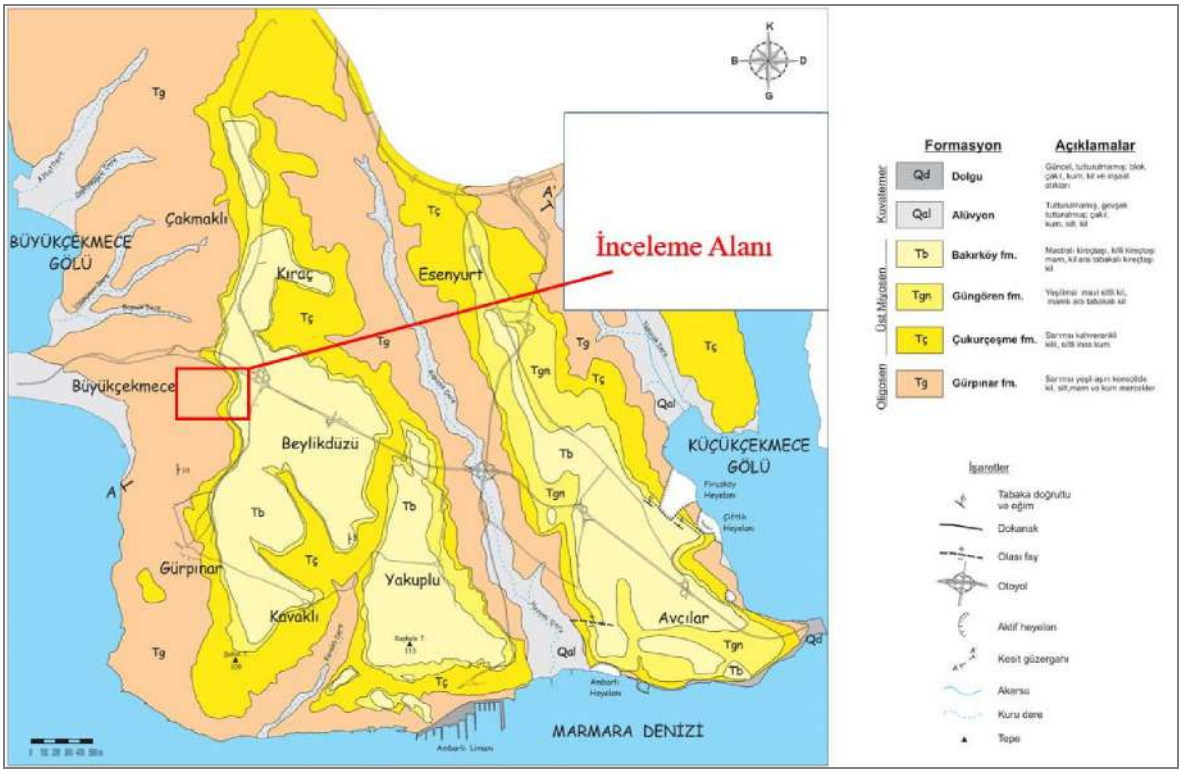
Heyelan, kayma, düşme, devrilmesi vb. toprak ve kaya kütle hareketleri afete dönüşmekte, can ve mal kaybına neden olan olmaktadır. Afete dönüşen doğa olayları birbirlerini etkiledikleri gibi insanlar tarafından da tetiklenmektedir. Özellikle deprem tehlikesi yüksek olan İstanbul her yönüyle bir çekim merkezidir. Kentte artan nüfusun etkisinde yerleşimler içme suyu havzalarında veya doğal tehlike potansiyeli olan heyelan bölgelerinde gelişmektedir.

Bu çalışmada, yerleşim baskısı altında bulunan, Büyükçekmece ilçesi Kemerdere mevkiinde bulunan pasif ve aktif heyelanların (MTA, 2005; İBB, 2020;TÜBİTAK-MAM; 2016, Arpat, 1999) yer aldığı yamaçlardan birinin duraylılığı incelenmiştir (Şekil 1).

2. JEOLOJİ

İnceleme alanında yüzeyleyen jeolojik birimlerin konumlarını ortaya koymak amacıyla, 1/5000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmış ve kritik doğrultuda jeolojik kesit alınmıştır. İnceleme alanında Paleozoyik yaşlı temel kayalar üzerinde; Oligosen yaşlı kiltaşı, silttaşı, kumtaşı ve tüf ara katkılardan oluşan

Gürpınar Formasyonu (Arıç, 1955), gevşek çapraz tabakalı kumlardan ve zayıf tutturulmuş kumtaşlarından oluşan Miyosen yaşlı Çukurçeşme Formasyonu, konsolide killer ile kum merceklerinden oluşan Güngören Formasyonu ve marn-kireçtaşı ardalanmasından oluşan Bakırköy Formasyonu haritalanmıştır (Şekil 1). Ayrıca, kalınlığı 0.5 m ile 8.0 m arasında değişen yapay dolgu alanları bulunmaktadır Yataya yakın konumlu tabakalı yapılarından bu litolojik birimlerin tektonizmadan fazla etkilenmediği anlaşılmaktadır. Ancak, inceleme alanı yaklaşık 15 km güneyinden Marmara Denizi içinden geçen Kuzey Anadolu Fayının etki alanında yer almaktadır.

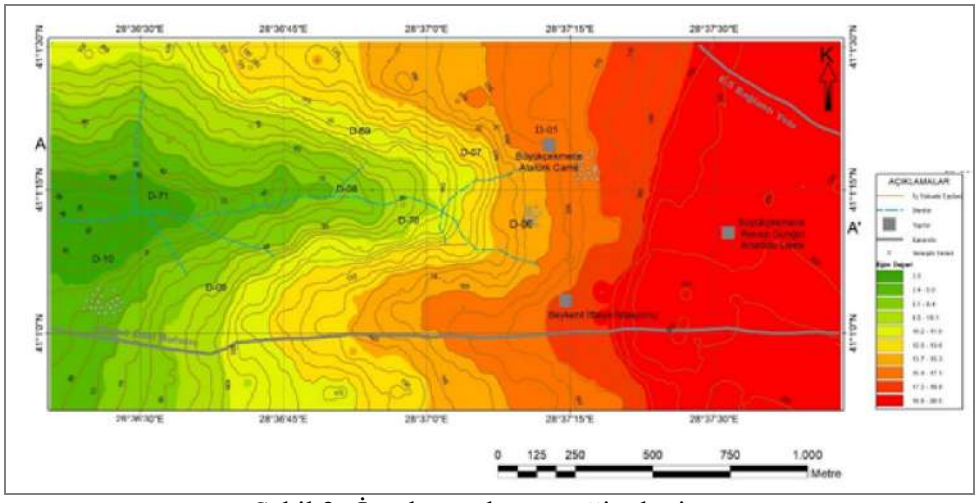


Şekil 1. Küçükçekmece-Büyükçekmece gölleri arasının jeoloji haritası (Gündüz, 2006)

3. YAMAÇ DURAYLILIĞINI ETKİLEYEN SINIR KOŞULLARI

3.1. Heyelan Morfolojisi

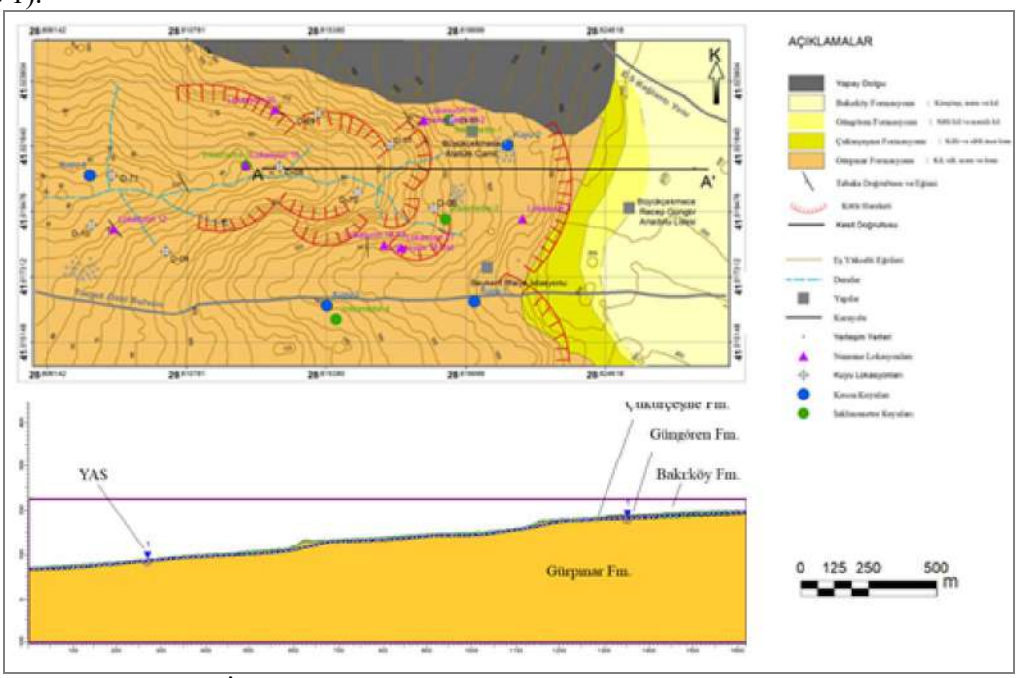
İnceleme alanında saptanan heyelanlar başlıca B–D doğrultulu yamaçlarda gelişmiştir. Heyelan morfolojisinin taç kısımları çoğunlukla ayırt edilebilirken, topuk kısımları yüzeysel sular tarafından aşındırıldığı için çoğu yerde gözlenememektedir. Heyelanların büyük bir kısmının hilal biçiminde gelişmiş ayna ile önünde iç içe eğimli çukurluk, bazı heyelanlardaki kabarmış topuk gibi morfolojik özellikleri heyelanların genç olduklarını göstermektedir (Ercan, 1990, Dalgıç vd. 2010a, 2010b). Bölgede arazi eğim değerlerinin yüksek olduğu kesimlerin başında vadi yamaçları gelmektedir (Şekil 2). Eğim diğer koşulların elverişli olması durumunda kütle hareketlerini tetikleyen bir parametredir. Dik, çok dik ve sarp arazilerin Büyükçekmece ilçe yüz ölçümünün yaklaşık %19'unu oluşturduğu bilinmektedir.



Şekil 2. İnceleme alanının eğim haritası

3.2. Jeomekanik - Mühendislik Jeolojisi

İnceleme alanını oluşturan Kemerdere vadisinin kuzey, güney ve doğu yamaçlarının 1/5000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası Şekil 3'te sunulmuştur. Söz konusu mühendislik jeolojisi haritasında Miyosen yaşlı kırıntılı kayaçların dokanakları ile sınırlı sayıda gözlemlenen mostralarda tabaka konumları, araştırma nokta ve kuyularının koordinatları ölçülmüş ve heyelan morfolojileri gösterilmiştir. Mühendislik jeolojisi haritasından Kemerdere vadisinin kuzey ve güney yamaçları ile doğusunda Beylikdüzü yükseltisinden ayrılarak Büyükçekmece yönünde hareket eden heyelan morfolojileri (ayrılma yüzeyleri) gösterilmiştir. Doğudaki büyük heyelan kütlesinin üzerinde iki katlı konutlardan oluşan bir yerleşim mahallesi bulunmaktadır.
Stabilite analizlerine yönelik olarak jeolojik birimlerin; birim hacim ağırlık, elastisite modülü, poisson oranı, doruk ve rezidüel kohezyon ve içsel sürtünme açıları ile yeraltı suyu seviyeleri önemli hesap parametrelerini oluşturmaktadır. Birimlerin; zemin sınıfları bu çalışma kapsamında laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Mekanik özellikler; kohezyon ve içsel sürtünme açılarının doruk ve kalıcı değerleri ile poisson oranı ve elastisite modülü değerleri ise önceki çalışmalardan derlenmiştir (Çizelge 1).



Şekil 3. İnceleme alanının mühendislik jeolojisi haritası ve kesiti.

Çizelge 1. Jeolojik birimlerin mekanik özellikleri (Zarif, 1996; Şans vd. 2020).

Formasyon	Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Rezidüel kohezyon (c) (kPa)	Rezidüel içsel sütünme açısı (Ø)	Poisson oranı (μ)	Elastisite modülü (kPa)
Bakırköy	18	75	20	0.3	3800
Güngören	19	130	25	0.3	40000
Çukurçeşme	20	100	38	0.3	50000
Gürpınar	21	200	25	0.27	70000

3.3. Yeraltı Suyu Durumu

İnceleme alanında temel araştırma, inklinometre, piyezometre ve rasat kuyularında farklı zamanlarda yeraltısuyu seviyeleri ölçülmüştür. İnceleme alanında yeraltı suyunun yüzeyden derinlikleri 1.20 ile 4 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Yeraltı suyu kotu stabilite analizlerine yönelik olarak hazırlanan hesap kesiti üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4).

3.4. Sismik Etki

İnceleme alanı ve yakın çevresinin yamaçlarının dinamik durumda davranışlarını belirlemek amacıyla Arıoğlu (2001) tarafından yapılan sismik araştırma bulgularından yararlanılmış olup, senaryo depremlere uzaklık ve zemin durumları dikkate alınarak; stabilite analizleri için ivme bileşenleri yatay 0.21g ve düşey 0.05g değerleri seçilmiştir.

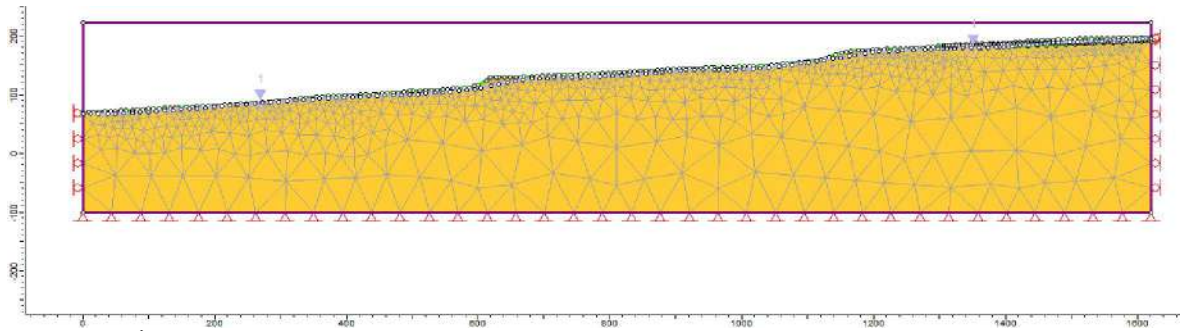
4. Duraylılık Analizi

Analiz için kullanılan kesit doğrultusu, mevcut hareketin yönü dikkate alınarak, arazi, laboratuvar ve önceki çalışmalardan elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek seçilmiştir. Analiz edilen jeolojik kesit Şekil 4'te verilmiştir. Analiz edilen geometrik model düşeyde 297 m, yatayda 1620 m uzunluğa sahiptir.

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sayısal model, 2 farklı senaryo baz alınarak, İTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya Yapıları Mekaniği Laboratuvarı'ndaki lisanslı sonlu elemanlar yazılımı RocScience RS2 2020 yardımıyla analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar (Shear Strength Reduce: SSR) ile şev stabilite analizi tekniği, bir şevi yenilme sınırına getiren bir dayanım azaltma faktörü (SRF) için sistematik bir analizi içeren basit bir yaklaşımdır (Hammah ve diğ, 2004).

Analiz senaryoları; Senaryo 1: Yamacın doğal hali - statik durumu ve Senaryo 2: Yamacın doğal hali - dinamik durumu temsil etmektedir. Sonlu elemanlar yöntemine göre analizler için kavramsal hesap kesiti hazırlanmıştır. Şekil 4'te verilen geometrik modelde, analizler sırasında düşey sınırlar serbest, model tabanı ise sabit tutulmuştur.

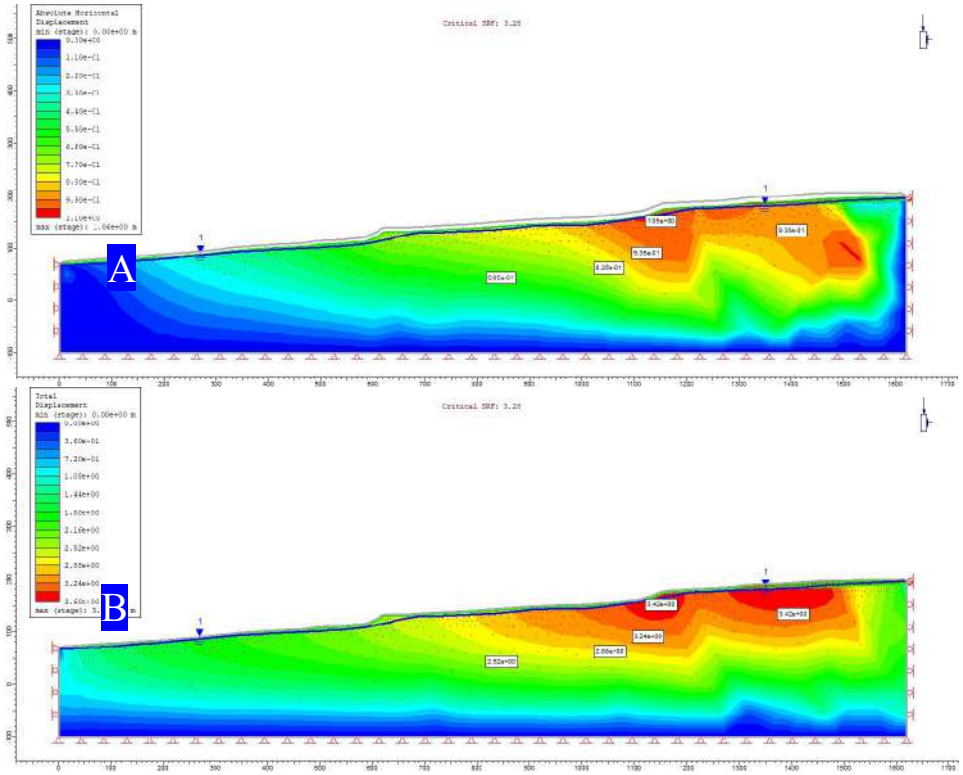


Şekil 4. İki boyutlu sayısal modelin geometrik model üzerinde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.

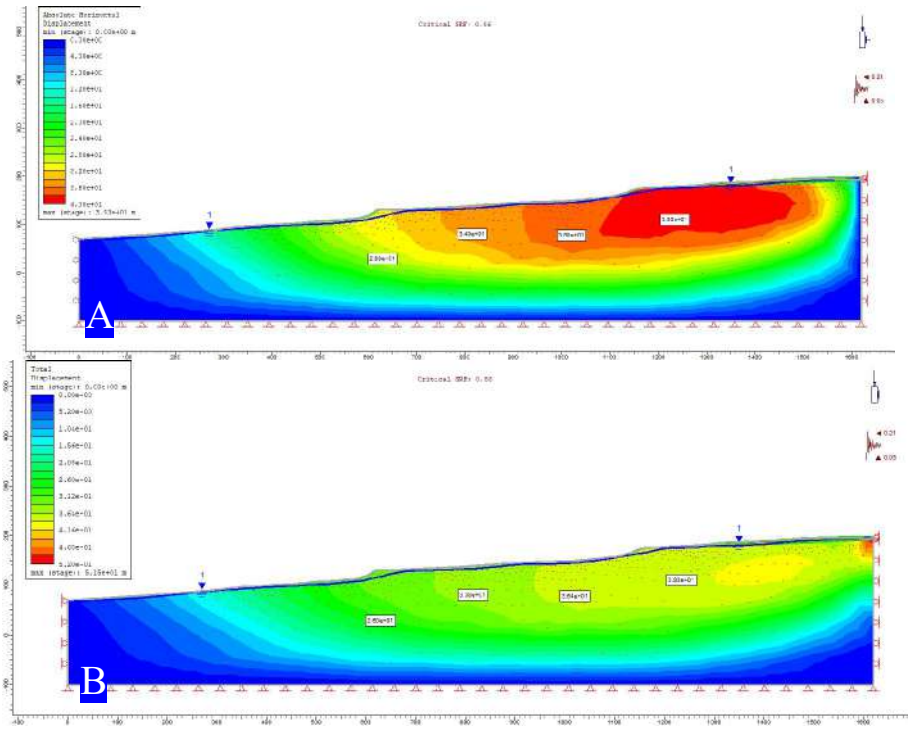
İncelenen alanın paleo-heyelan yapısından dolayı mevcut haliyle stabil olmadığını, zaman zaman yüzeysel akma türünden duraysızlıklar olduğu, tetikleyici bir etmenin hareketi hızlandırma tehlikesinin olduğunu gösterir.

Senaryo 1: Statik durum analizine göre yamacın üst yapısız ve önlemsiz (doğal) halinde kritik 'Dayanım Azaltma Faktörü (SRF)'nün 3.28 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5A-B). Yatay yer değiştirmeler incelendiğinde sistemde lokal oturmalar ve yüzeyde akma şeklinde hareket görülmektedir. Bu hareketin miktarı derinliğe bağlı olarak azalmaktadır. Senaryo 1'de bulanan SRF değeri yamacın mevcut (statik) durumda güvenli olduğunu göstermektedir.

Senaryo 2: Sismik tetikleme analiz; Kuzey Anadolu Fayının etki alanında bulunan inceleme alanında statik durum için hazırlanan hesap kesiti sismik yükler altında da analiz edilmiştir. Sismik durum analizinde ivme bileşenleri yatayda 0.21g ve düşeyde 0.05g olarak seçilmiştir (Arıoğlu, 2001). Yamacın yapısız ve önlemsiz (doğal) halinin dinamik durumda kritik Dayanım Azaltma Faktörü SRF<1 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6A-B).



Şekil 5. Senaryo-1 için A) yatay yer değiştirme, B) toplam yer değiştirmeler

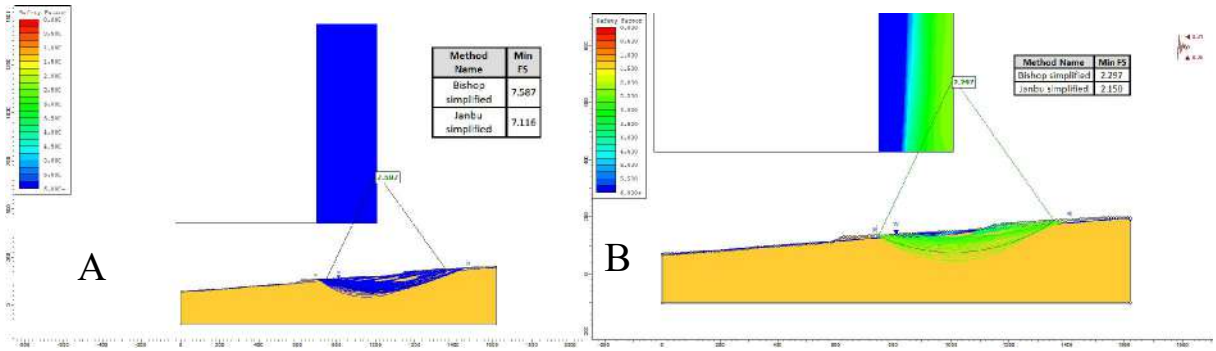


Şekil 6. Senaryo-2 için A) yatay yer değiştirme, B) toplam yer değiştirmeler.

Olası bir depremde, incelenen yamacın SRF değeri 0.86'ya düştüğü görülmüştür (Şekil 5 ve 6). Bu dinamik yükler altında yapılan analizlerde yer değiştirme miktarlarının yamacın üst kısımlarına doğru artacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca, yüzeyde akma şeklinde görülen yatay yer değiştirmenin yüzeyden derinlere doğru azalan miktarlarda 150 m ye kadar etkili olması beklenmektedir.

4.2. Limit Denge Analizleri

Stabilite analizlerinde Senaryo-1 depremsiz (statik) koşullarda, Basitleştirilmiş Bishop yöntemine göre Güvenlik Faktörü, Fs=7.587 ve Janbu yöntemine göre Güvenlik Faktörü, Fs=7.116 bulunmuştur (Şekil 7A). Senaryo-2 depremli (dinamik) koşullarda Basitleştirilmiş Bishop yöntemine göre, Güvenlik Faktörü, Fs=2.297, Janbu yöntemine göre, Güvenlik Faktörü, Fs=2.150 olarak bulunmuştur (Şekil 7B). Bu sonuçlara göre yamaçta statik ve sismik tetikleme durumunda yamaçta stabilite sorununun bulunmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil. 7. Bishop (1955) ve Janbu (1973) yöntemlerine göre hesaplanmış güvenlik sayıları; A) Senaryo 1 ve B) Senaryo 2.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi Kemerdere mevkiinde yerleşim açısından sorun teşkil eden heyelanlı bölgenin duraylılığı incelenmiştir. Yapılan saha çalışmalarından elde edilen verilerle inceleme alanının sınır koşulları belirlenmiştir. Bu sınır koşulları ArcGIS, Autocad, Phase2 ve Slide yazılımları kullanılarak sayısallaştırıp çözümlenmiştir.

Sayısal model, 2 farklı senaryo baz alınarak, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan sayısal analizlerde; doğal arazi koşullarında; Senaryo-1 statik ve Senaryo-2 dinamik durumlar için analiz edilmiştir. SRF değerleri; Statik durumda 3.28 ve dinamik durum için ise 0.86 bulunmuştur. Analiz sonuçları seçilen yamacın; statik durumlarda güvenli, dinamik durumda ise heyelan tehlikesine işaret etmektedir.

Limit denge analizleri statik ve dinamik durumlar için; basitleştirilmiş Bishop ve Janbu yöntemlerine göre hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarında her iki yönteme göre yapılan stabilite analizlerinde güvenlik katsayısı; statik durumda Fs>7 ve dinamik durumda Fs değerleri sırasıyla 2.2 ve 2.1 bulunmuştur.

İncelen yamaçta, koşulların oluşması halinde hem yatay hem de toplam yer değiştirmelerin; yüzeye yakın kesimlerde akma türü bir hareketin derine doğru azalan miktarda ve 170 m derinliği kadar etkili bir mekanizma ile gerçekleşeceği anlaşılmaktadır.

6. KAYNAKLAR

Arıç, C., 1955. Geology of Haliç-Küçükçekmece lake. İstanbul Technical University, Doctora thesis (In Turkish)

Arıoğlu, E., 2001. Doğu Marmara depreminin yer ivme değerleri açısından değerlendirilmesi. Beton Prefabrikasyon Sayı 57-58. 5-15 pp.

Arpat, E., 1999. Büyükçekmece ile Küçükçekmece (İstanbul) heyelanlarının genel özellikleri ve yarattıkları başlıca sorunlar, 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiriler Kitabı, Ankara,10-12 Mayıs, s.17-23.

Bishop, A:W., 1955, The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes, Geotechnique

Dalgıç, S., Turgut, M., & Kuşku, İ., (2010a). Büyükçekmece ile Küçükçekmece Arasındaki Heyelanların Oluşumunda Hazırlayıcı ve Tetikleyici Parametrelerin Değerlendirilmesi. Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, cilt.9, 67-73.

Dalgıç, S., Turgut, M., Kuşku, İ., (2010b). Büyükçekmece ile Küçükçekmece Arasındaki Heyelanların Oluşumunda Hazırlayıcı ve Tetikleyici Parametrelerin Değerlendirilmesi. Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, Sayı: 2 (Ekim-Kasım), ss.57-58.

Ercan, A., (1990). Gürpınar Beldesi Yer Mühendislik Projesi, Yeraltı Aramacılık Bilimsel Araştırma Kuruluşu, Cilt 1-2, İstanbul.

Gündüz, A., (2006). İstanbul Büyükçekmece-Küçükçekmece Göller Arası Bölge'de Yerleşime Uygunluk. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hammah, R. E., Curran H, J., Yacoub, T., & Corkum, B., (2004). Stability analysis of rock slopes using the finite element method.

İBB (2020)., İstanbul ili, Beylikdüzü, Büyükçekmece ve Esenyurt İlçeleri Heyelan Farkındalık Kitapçığı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.

Janbu, N., (1973), Stability analysis of slope with dimensionless parameters, D.Sc Thesis, Harward university

MTA, 2005, Türkiye Heyelan Envanter Haritası, 1/500 000 ölçekli İstanbul Paftası, Ankara

Şans, G., Karagüzel, R., Mahmutoğlu, M, 2020, İstanbul Büyükçekmece Heyelanının Mühendislik Jeolojisi ve Sismik Tetikleme Duraylılıklarının İncelenmesi, 73.Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara

Tübitak MAM YDBE, (2016). Beylikdüzü ve Büyükçekmece İlçelerindeki Muhtelif Heyelan Sahalarının Araştırılması, İncelenmesi ve İzlenmesi Projesi. Kocaeli (yayımlanmamış teknik rapor)

Zarif (1996), "Küçükçekmece Ve Büyükçekmece Gölleri Arasındaki Alanın Yamaç Stabilitesi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (doktora Tezi), İstanbul

Kohezyonsuz Zeminlerde Yamaç Stabilitesi – Yeraltısuyu Seviyesi İlişkisi

Relation Between Slope Stability and Groundwater Level for Noncohessive Soils

E. Bozkurtoğlu[1,*], G. Şans[1], R. Eyüboğlu[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Ayazağa Yerleşkesi, Maslak, İstanbul*
*(*erkan@itu.edu.tr)*

ÖZ: Kohezyonsuz zeminler, bünyesel özellikleri nedeniyle boşluk hacminde su tutma ve iletmeye imkân tanırlar. Akifer özelliği sergileyen içeriği kum ağırlıklı zeminlerin bünyelerinde yeraltısuyu (YAS) seviyesinin yükselip statik su seviyesi derinliğinin azalması durumunda stabilite sorunları oluşabilir. Çalışmada, kohezyonsuz zeminlerde yeraltısuyu seviyesi ve yamaç stabilitesi ilişkisini araştırmak için İstanbul'un önemli kum akiferi olan Çukurçeşme formasyonu seçilmiştir. Yamaçların dengesini olumsuz etkileyecek eğim açısı ile yeraltı suyu (YAS) ilişkisi yamaca paralel farklı kayma yüzeyleri için sonsuz yamaç modeli analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Kumun yüzeylediği yamaçlarda kritik yamaç açısının sonsuz yamaç modeline göre yeraltısuyu yüzeyde (statik su seviyesi derinliği = 0 m) iken $\beta = 16°$ olduğu belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan model çözümlerde $\beta = 10°$ eğimli yamaçlarda YAS' nin değişimine bağlı deformasyonun 1.0 cm den düşük olacağı ve $\beta \geq 20°$ eğimli yamaçlarda ise deformasyonların YAS kontrolünde gelişeceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çukurçeşme formasyonu, kohezyonsuz zemin, kritik yamaç açısı, analitik çözüm, sonlu elemanlar yöntemi, yeraltısuyu.

ABSTRACT: *Cohesionless soils allow water retention and transmission in the void volume due to their index properties. Slope stability problems may occur in the case of sandy soils content, exhibit aquifer characteristics, due to the groundwater level (GWL) rises and the static water level depth decreases. In this study, Çukurçeşme formation, which is an important sand aquifer of Istanbul, is chosen to investigate the relationship between groundwater level and slope stability in cohesionless soils. The relationship between the slope angle, which will negatively affect the slope stability, and the groundwater level (GWL) has been investigated using the infinite slope model, both analytical and finite element methods for various slip surfaces parallel to the slope. It was determined that the critical slope angle on the sand slope is $\beta = 16^{\circ}$ for the groundwater is at the surface (static water level depth = 0 m) according to infinite slope analyses. It has been determined that the deformation due to the change of GWL on $\beta = 10^{\circ}$ slope angle will be less than 1.0 cm and the deformations will occur under the control of GWL on $\beta \geq 20^{\circ}$ slope angle according to finite element analyses.*

Keywords: *Çukurçeşme formation, non-cohesive soils, critical slope angle, analytic slope stability solution, finite element analyses, groundwater.*

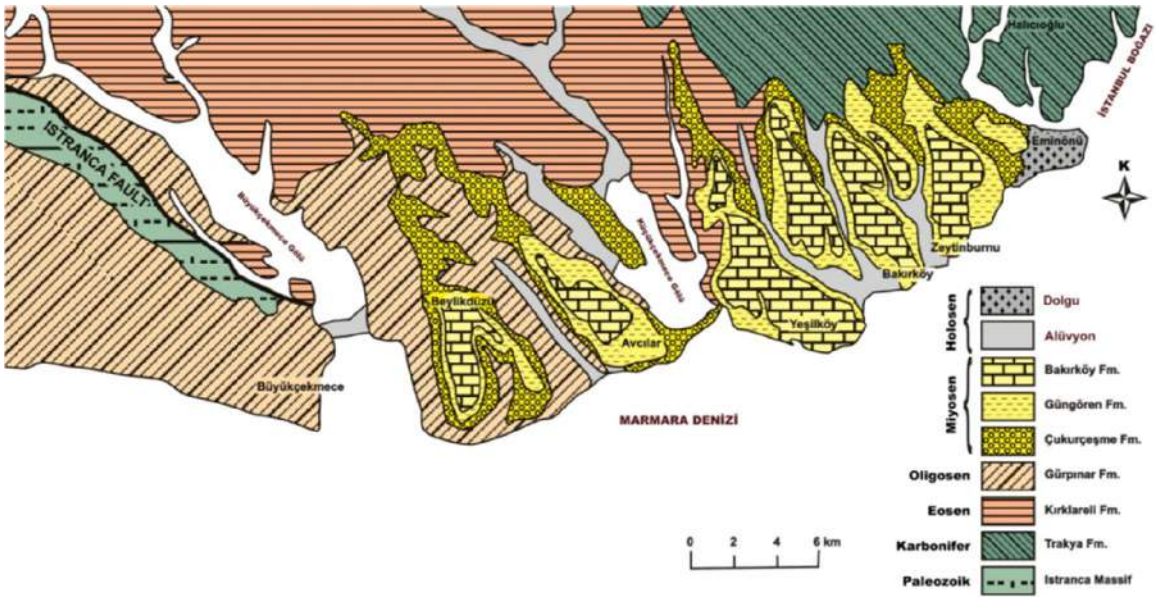
1. GİRİŞ

Zeminler kohezyon özelliklerine göre kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler olarak ikiye ayrılırlar. Kohezyonsuz zeminler, kum ve çakıl bileşenlerinin ayrı ayrı veya bir arada bulunduğu oluşumlardır. Kohezyonlu zeminlerde zemin danelerini birbirine bağlayan fiziksel etken bulunmaz ve bu tür zeminlerde yapı yüklerinden kaynaklanan sonuç oturma (çökme) nın büyük bir kısmı yüklemeyi izleyen az bir sürede gerçekleşir. Bu tür zeminler, bünyesel özellikleri nedeniyle boşluk hacminde su tutma ve iletmeye imkân tanırlar. Bu nedenle hem iyi bir akifer ortam hem de drenaj sorununun yaşanmayacağı, genleşmenin olmayacağı ve emniyet gerilmelerinin su içeriğine göre değişmeyeceği ortamlar olarak kabul edilirler. Akifer özelliği sergileyen kum ağırlıklı zeminlerin bünyelerinde olası kayma yüzeyi üzerindeki doygun zon yüksekliğinin artması ve statik su seviyesi derinliğinin azalması durumunda stabilite sorunları oluşabilir. Çalışmada, kohezyonsuz zeminlerde yeraltısuyu (YAS) seviyesi ve yamaç stabilitesi ilişkisini araştırmak için İstanbul'un önemli kum akiferi olan Çukurçeşme formasyonu seçilmiştir. Çukurçeşme formasyonunun jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik özelliklerine ait ayrıntılı bilgiler literatürde bulunmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde yamaç güvenliğini tanımlayan yamaç açısı β ile sürtünme açısı ϕ ilişkisi (güvenlik sayısı, GS = 1 için $\beta = \phi$) önemlidir. Yamaçların

dengesini olumsuz etkileyecek yamaç açısı -YAS etkileşimi yamaca paralel farklı kayma yüzeyleri için araştırılmıştır. Çukurçeşme formasyonunun yüzeylediği alanlardaki yamaçlarda kritik güvenlik sayısının $\beta = 16°$ eğimli yamaçlarda yeraltısuyu yüzeyde (suya tam doygun ortam, statik su seviyesi derinliği = 0 m) iken oluşacağı belirlenmiştir.

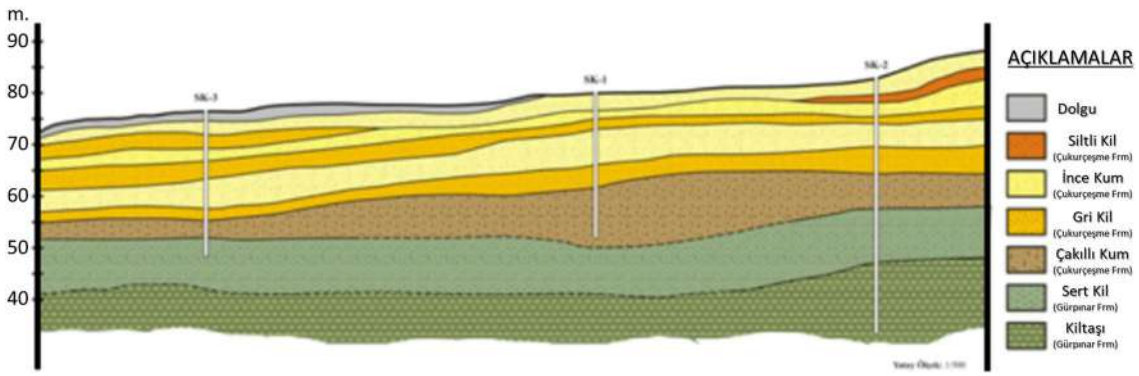
2. JEOLOJİ

Kohezyonsuz zemin için seçilen Çukurçeşme formasyonu İstanbul'un Avrupa yakasında yaygın yayılımlıdır (Şekil 1). Bu alan içinde temel birim Paleozoyik yaşlı Istranca masifidir. Birim üzerinde değişik doğrultularda süreksizlikler (fay, kıvrım, kırık, çatlak) içeren kireçtaşı mercekli, andezit ve diyabaz daykları ile kesilmiş, 1000 m den fazla kalınlıklı kumtaşı, silttaşı, kiltaşı ardalanmalı Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu bulunur.



Şekil 1. İstanbul'un batı yakasının genel jeoloji haritası (Dalgıç, vd. 2009).

Trakya formasyonu üzerine orta-kalın tabakalı mikritik, karstik boşluklu bol fosilli kireçtaşı, marn ve karbonatlı kiltaşından oluşan yaklaşık 150 m kalınlıklı Eosen yaşlı Kırklareli formasyonu açısal uyumsuzlukla gelir. Kırklareli formasyonu üzerinde kalınlığı 700 m den fazla olan Oligosen yaşlı sıkı kum-kumtaşı mercekli sert kil-kiltaşı içeren Gürpınar formasyonu gözlenir. Gürpınar formasyonunu Miyosen yaşlı birimler uyumlu olarak üzerler.



Şekil 2. Çukurçeşme formasyonunun Haramidere dolayındaki litolojik ilişkisi (Dalgıç, vd. 2009).

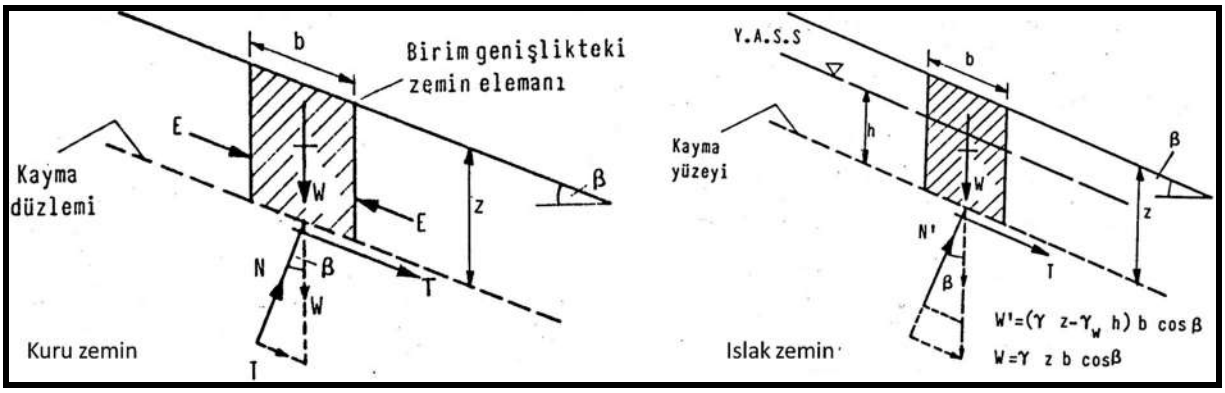
Miyosen yaşlı birimlerin tabanını ortalama 25 m kalınlıklı çoğunlukla çimentosuz-zayıf çimentolu, elle dağılan, seyrek çakıllı, çoğunlukla 1 m den az kalınlıkta kil ara katmanları içeren Çukurçeşme formasyonu oluşturur (Şekil 2). Bu birim Gürpınar formasyonu üzerinde uyumlu olarak gözlenir. Çukurçeşme formasyonunu, geçişli olarak yeşilimsi gri, açık kahve, ince kum mercekli kil olan Güngören formasyonu üzerler. Güngören formasyonu, Miyosen yaşlı istifin üst birimi olan 20 m kalınlıktaki beyaz, ince-orta tabakalı, yeşilimsi gri kil ara katmanlı marn ve kireçtaşı olan Bakırköy formasyonunca uyumlu üzerlenir. İstif, Holosen yaşlı alüvyon ve güncel dolgu ile sonlanır (Şekil 1).

3. ÇUKURÇEŞME FORMASYONUNUN JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

Çukurçeşme formasyonu inceleme alanında 1.0 m ile 40.0 m arasında kalınlıkta olup gözenekliliği %20 - %35, özgül verimi 0.5 l/s/m – 1 l/s/m arasındadır (Zarif, 1996). Yaygın ve yüksek beslenimli serbest akifer özelliği sergileyen Çukurçeşme formasyonunun yayılım sunduğu alanlarda (Şekil 1) alınmış 74 adet deney verisine göre dane dağımı %2.02 çakıl, %49.49 kum, %48.48 silt+kil olarak tanımlanır (Dalgıç vd., 2009). Formasyonun su içeriği %17 – %39, birim hacim ağırlığı 17.7 kN/m^3 – 18.1 kN/m^3 arasında değişir (Ercan, 1990; Ertürk, 2015), sürtünme açısı 25° – 40° (Ertürk, 2015) dir. Çukurçeşme formasyonu bünyesinde yer alan birimlerin ilişkisi (Şekil 2) ve kum seviyelerine ait literatür değerlerinden hareketle çalışma konusuna yönelik hesaplamalarda jeoteknik parametre değerleri için birim hacim ağırlık (γ) 18 kN/m^3, kayma direnci (ϕ) 32° alınmış ve yamaç yüzeyinden 5 m, 7.5 m, 10 m aşağıda verilen kayma yüzeyleri için yeraltısuyu seviyesi değişimine bağlı yamaç güvenliği, şev açısı β = 10° - 30° için irdelenmiştir.

4. KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE SONSUZ YAMAÇ MODELİ STABİLİTE ANALİZİ

Sonsuz şev modelinde yenilme yüzeysel akma şeklinde oluşur (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005). Kayan kütlenin uzunluğu ve genişliği, derinliğine göre çok fazla olup kayma; şevi oluşturan malzemenin homojen olması durumunda malzeme içinde gelişirken heterojen malzeme durumunda şev yüzeyine paralel tabakalarda gelişebilir. Sonsuz şevde yeraltı suyu (YAS) bulunması veya bulunmaması durumunda zemine etkiyen kuvvetler Şekil 3 de gösterilmiştir (Özüdoğru vd., 2001).



Şekil 3. Sonsuz şevde yeraltı suyu durumuna bağlı olarak zemine etkiyen kuvvetler (Özüdoğru vd., 2001).

Şekil 3' de z yüksekliğinde ve b genişliğinde kuru zemine etkiyen kuvvetler ağırlık (W), normal kuvvet (N) ve kayma kuvveti (T) olup, bu kuvvetler; W = γzbcosβ, N = Wcosβ ve T = Wsinβ eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Özüdoğru vd., 2001). Zeminin yan yüzeylerine etkiyen -E- kuvvetlerinin birbirine eşit olduğu kabulü ile birbirini etkisizleştirmesi durumunda kohezyonsuz zeminde kayma direnci (τ_f); $\tau_f = \sigma_n \tan\phi$ eşitliği ile hesaplanır. Bu durumda T = bτ_f ve N = bσ_n olacaktır. Böylece, b = T/τ_f = N/σ_n dikkate alındığında T =N$\tan\phi$ elde edilir. Bu eşitlikte N ve T

değerleri yerine konulursa; $W\sin\beta = W\cos\beta\tan\phi$ ve buradan $\tan\phi = (\sin\beta/\cos\beta)$ elde edilir. Buradan $\tan\phi = \tan\beta$ elde edilir (Özüdoğru vd., 2001). Böylece kohezyonsuz zeminlerde şevin eğim açısının (β) hiçbir zaman kayma direnci açısından (ϕ) büyük olamayacağı ($\beta = \phi$) anlaşılır. Sonuçta, kaymaya karşı güvenlik sayısı (GS); GS = $\tan\phi/\tan\beta$ eşitliği ile hesaplanır (eşitlik efektif gerilme olarak GS = $\tan\phi'/\tan\beta$ olacaktır). Şekil 3' de yeraltı suyu bulunduran zemin için efektif normal kuvvet (N′); $N' = W'\cos\beta = (\gamma z b\cos\beta - \gamma_w h b\cos\beta)\cos\beta = (\gamma z - \gamma_w h)b\cos^2\beta$ ve kaydırmaya çalışan kuvvet (T); $T = W\sin\beta = \gamma z b\sin\beta\cos\beta$ elde edilir. Kaymaya karşı güvenlik sayısı (GS); $GS = (N'\tan\phi')/T = [(\gamma z - \gamma_w h)b\cos^2\beta\tan\phi']/\gamma z b\sin\beta\cos\beta$ dan hareketle $GS = [1-(y_w h/\gamma z)]/(\tan\phi/\tan\beta)$ elde edilir (Özüdoğru vd., 2001). Yeraltı suyunun yamaçta akışa geçmesi durumunda (h = z) $GS = (\gamma_A\tan\phi')/(\gamma\tan\beta)$ elde edilir.

Çalışma kapsamında Çukurçeşme formasyonu birim ağırlığı (γ) 18 kN/m^3, kayma direnci açısı (ϕ) 32° olarak alınmış ve yamaç eğimi (β) nin 10° ile 30° arasında değişmesi durumunda yamaç yüzeyinden 5 m, 7.5 m, 10 m aşağıda oluşacak bir kayma yüzeyinde yeraltı su seviyesi değişimine (statik su seviyesi değişimi, StSvy = 0 – 15 m) bağlı yamaç güvenliği hesaplanmıştır (Çizelge 1). Çizelge 1'de verilen yamaç eğimi-statik su seviyesi ve kayma yüzeyi derinliğine göre güvenlik sayılarının değişimini hesaplamayı sağlayacak eşitlikler Şekil 4 de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Çukurçeşme formasyonu yamaç eğimi-YAS- kritik kayma yüzeyi ilişkisi.

Yamaç Açısı (β,°)	Kayma Yüzeyi Derinliği (m)	Statik Seviye (m)	Güvenlik Sayısı	Eşitlik
10	5	0 → 15	1.61 → 7.41	GS = 0.3865x(StSvy)+1.611, R^2 = 1
	7.5		1.61 → 5.48	GS = 0.2578x(StSvy)+1.611, R^2 = 1
	10		1.61 → 4.51	GS = 0.1932x(StSvy)+1.6117, R^2 = 1
20	5		0.78 → 3.59	GS = 0.1871x(StSvy)+0.7818, R^2 = 1
	7.5		0.78 → 2.65	GS = 0.1246x(StSvy)+0.7816, R^2 = 1
	10		0.78 → 2.18	GS = 0.0935x(StSvy)+0.7813, R^2 = 1
30	5		0.49 → 2.26	GS = 0.118x(StSvy)+0.4922, R^2 = 1
	7.5		0.49 → 1.67	GS = 0.0785x(StSvy)+0.4928, R^2 = 0.9999
	10		0.49 → 1.38	GS = 0.0591x(StSvy)+0.4921, R^2 = 0.9999

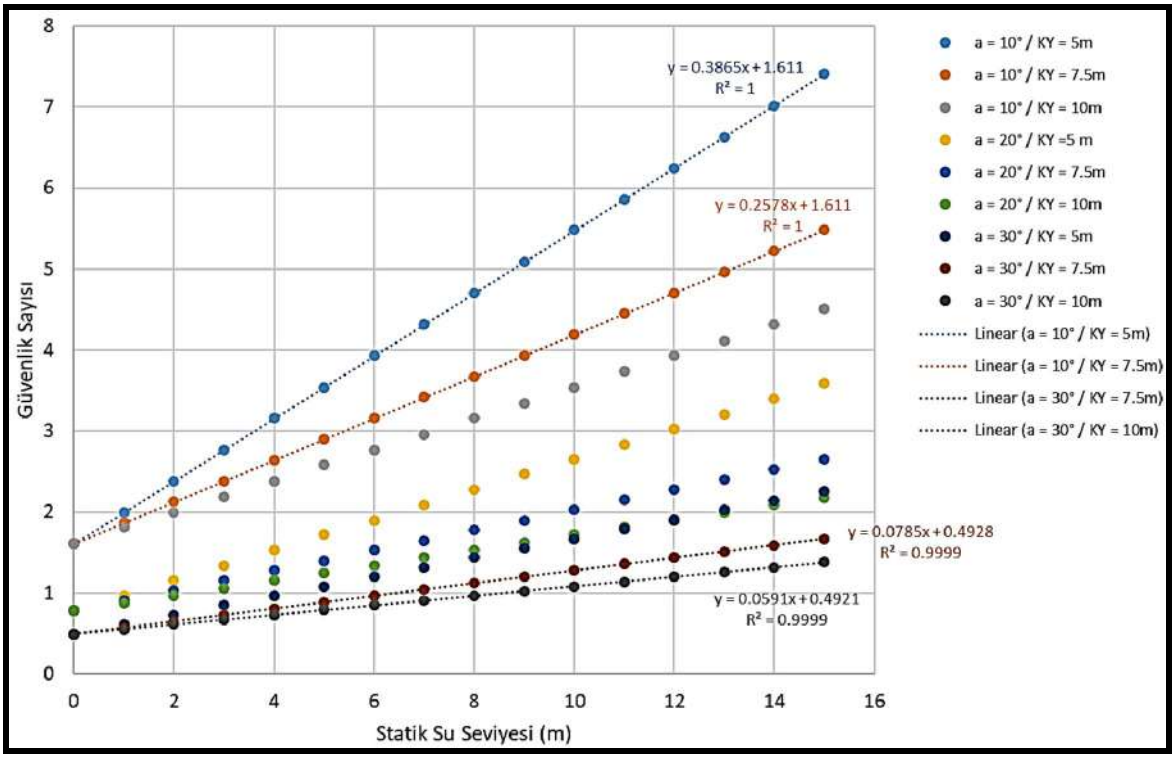
Çizelge 1 incelendiğinde Çukurçeşme formasyonunun, 10° eğimli yamaçlarda yeraltı su seviyesinin yüzeye ulaşması (statik su seviyesi = 0 m) durumunda bile yamacın güvenli olacağı anlaşılmaktadır. Yeraltı su seviyesinin yüzeye ulaşması durumunda kritik denge konumu (GS =1) β=16° için gerçekleşmektedir.

Yamaç eğimi ile statik seviye ilişkisi irdelendiğinde;

- Yamaç eğim açısının 20° olması durumunda kritik denge durumuna (GS = 1);
  - kritik kayma düzlemi topografya yüzeyinden 5 m derinde iken statik su seviyesi 1 m de,
  - kritik kayma düzlemi topografya yüzeyinden 7.5 m derinde iken statik su seviyesi 2 m de,
  - kritik kayma düzlemi topografya yüzeyinden 10 m derinde iken statik su seviyesi 3 m de ulaşılacaktır.
- Yamaç eğim açısının 30° olması durumunda kritik denge durumuna (GS = 1);
  - kritik kayma düzlemi topografya yüzeyinden 5 m derinde iken statik su seviyesi 4 m de,
  - kritik kayma düzlemi topografya yüzeyinden 7.5 m derinde iken statik su seviyesi 6 m de,
  - kritik kayma düzlemi topografya yüzeyinden 10 m de iken statik su seviyesi 9 m de ulaşması beklenmektedir.

Hesaplamalar, yüksek açılı yamaçların olduğu kesimlerde statik su seviyesinin dikkatle takip edilmesi gerektiğini göstermektedir. Çukurçeşme formasyonunun yüzeylediği alanlarda (Şekil 1) yoğun yapılaşmanın olması, beklenen İstanbul depremi vb. nedenlerle drenaj kanallarının boyutlandırılması,

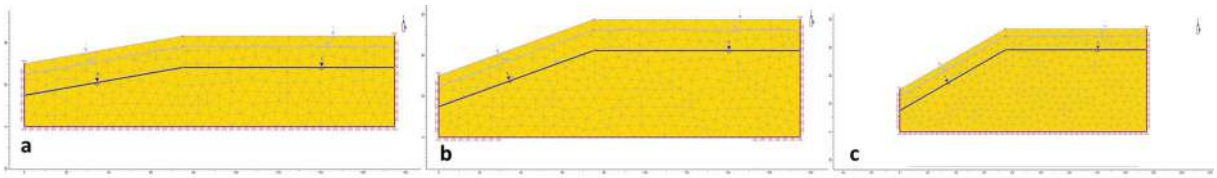
su seviyesindeki yükselime bağlı otomatik devreye giren pompaj kuyularının açılması önemlidir. Böylece yamaçlarda su seviyesindeki yükselime bağlı stabilite bozulmalarının engellenmesi sağlanacaktır.



Şekil 4. Sonsuz yamaçta eğim (a) ile statik su seviyesi ilişkisi ve kayma yüzeyi (KY) derinliğine göre güvenlik sayılarının değişimi.

5. KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDEN OUŞAN SONSUZ YAMAÇTA STABİLİTESİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Kohezyonsuz zeminlerde yamaç stabilitesini etkileyen yamaç eğimi ve statik su seviyesi arasındaki ilişkiyi incelemek amacı ile sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmıştır. modelde Şekil 5 de görüldüğü gibi şev açısı 10˚, 20˚, 30˚ ve yeraltısuyu derinliği için de 0.5 m ve 15 m için analizler yapılmıştır.



Şekil 5. Şev açısının 10˚ (a), 20˚ (b), 30˚ (c) ve yeraltısuyu derinliğinin 0.5 m ve 15 m kabulü için sonlu elemanlar analiz modeli.

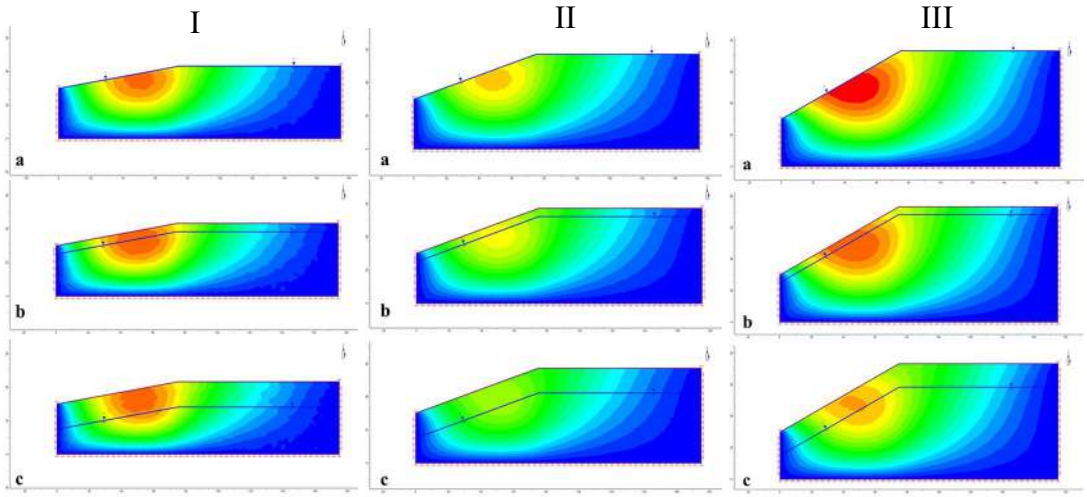
Analitik çözümlerin doğrulamaları için aynı koşulları yansıtan jeoteknik parametreler kullanılarak (Çizelge 2) sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 2 de sunulduğu gibi jeoteknik parametreler farklı yamaç eğimi ve statik su seviyeleri için kabul edilmiştir. Model çalışmalarında RocScience Phase2 v. 7.013 yazılımı kullanılmıştır.

Mesh özellikleri dereceli ve 6 düğüm noktalı üçgen model olarak kullanılmıştır. Arazi yük koşulları olarak yerçekiminin etkidiği jeolojik yük kabul edilmiştir. Sayısal modelin arazi yatay ve düşey gerilme oranı, Poisson oranı ile bağıntılı olarak, 0.32 seçilmiştir.

Çizelge 2. Sonlu Elemanlar Modellerine ait yamaç eğimi ve statik su seviyesi aşamaları ile Çukurçeşme formasyonuna ait idealleştirilmiş jeoteknik ve hidrolik parametreler.

Yamaç Eğimi β (˚)	Statik Su Seviyesi (m)	Jeoteknik-Hidrolik Parametreler					
		Birim Ağırlık γ (kN/m^3)	Elastisite Modülü E (kPa)	Poisson Oranı ν	İçsel Sürtünme Açısı ϕ (˚)	Kohezyon c (kPa)	Boşluk Suyu Basıncı r_u (kPa)
10	0	18	12000	0.32	32	0	0.3
	5						
	15						
20	0						
	5						
	15						
30	0						
	5						
	15						

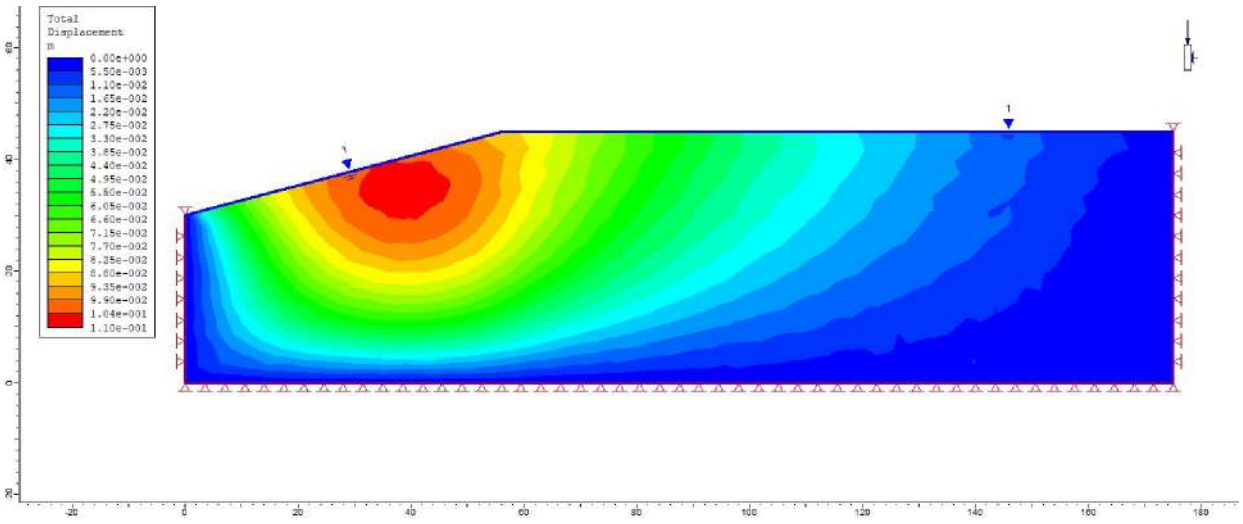
Analiz sonuçlarına göre elde edilen toplam yer değiştirmeler Şekil 6 da üç şev açısı için sunulmuştur.



Şekil 6: I: Şev açısı 10˚, yeraltı su derinliği 0 m (a), 5 m (b), 15 m (c); toplam deformasyonlar.
II: Şev açısı 20˚, yeraltı su derinliği 0 m (a), 5 m (b), 15 m (c); toplam deformasyonlar.
III: Şev açısı 30˚, yeraltı su derinliği 0 m (a), 5 m (b), 15 m (c); toplam deformasyonlar.

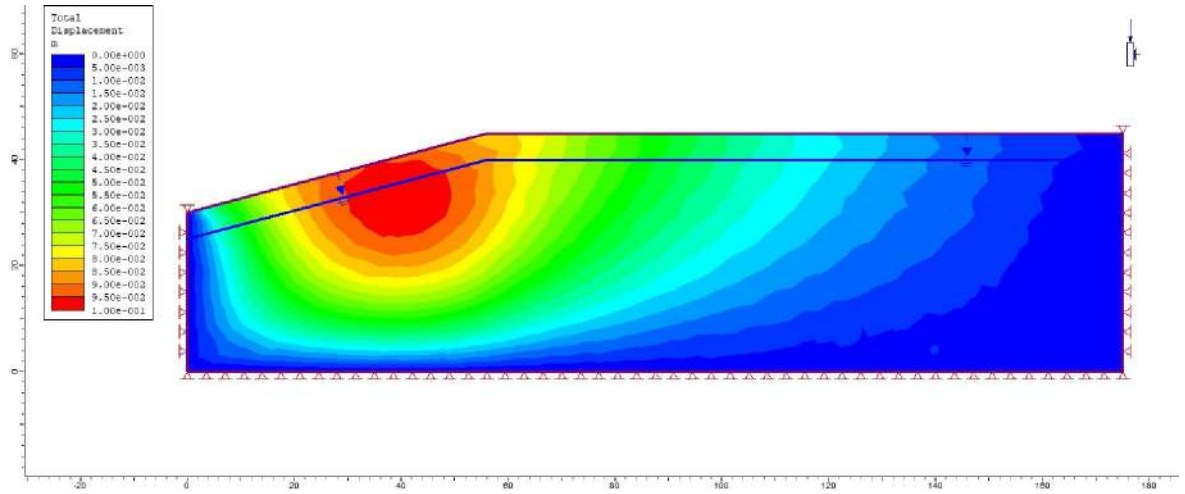
Şekil 7, 8 ve 9 ile sunulan sonlu elemanlar çözümleri yamaç eğimi 16˚ olan yamaçlardaki yeraltısu seviyesinin yüzeyde (Şekil 7), 5 m (Şekil 8) ve 15 m (Şekil 9) derinde olması durumlarına ait toplam deformasyonların dağılımlarını göstermektedir. Sayısal hesap çözümleri analitik çözümle uyumlu sonuçlar vermiştir. Yeraltısuyunun yüzeyde olması durumunda, tamamen su altındaki ortam için kritik denge yamaç eğim açısı 16˚ dir. Kritik denge durumunu belirten 16˚ şev açısı arttırıldığında kayma meydana gelmektedir. Sunulan toplam deformasyon gösterimleri 0.1 ile 1 cm arasında değişmektedir.

Çalışmada, yamaçların dengesini olumsuz etkileyecek yamaç açısı-YAS etkileşimi yamaca paralel farklı kayma yüzeyleri için araştırılmış ve çözümlemeler hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Çukurçeşme formasyonunun yüzeylediği alanlardaki yamaçlarda kritik güvenlik sayısının analitik çözüm ile yeraltısuyu yüzeyde (statik su seviyesi derinliği = 0 m) iken β = 16° eğimli yamaçlarda oluşacağı belirlenmiştir.



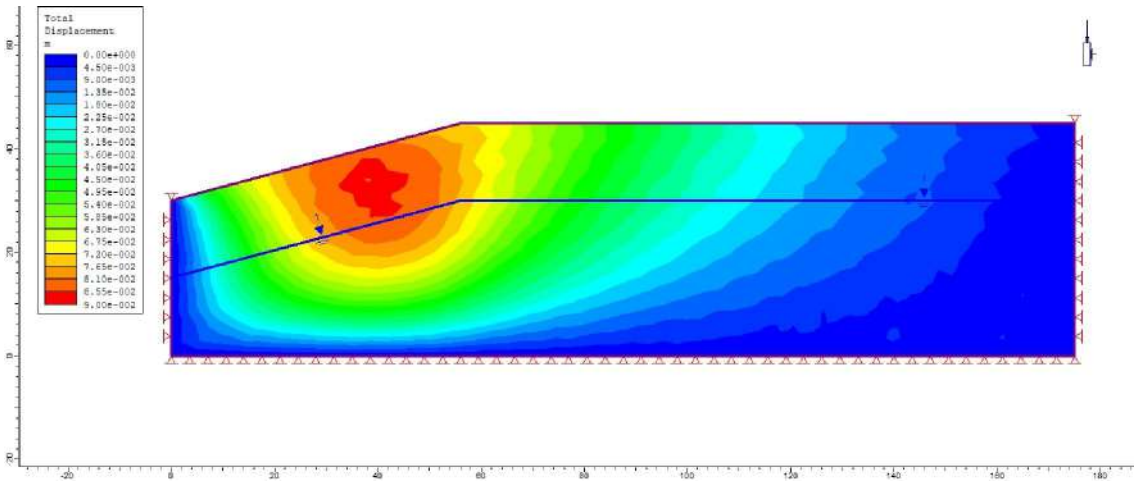
Şekil 7: Kritik denge konumu gerçekleşen 16˚ şev açısı sonlu elemanlar modeli, yeraltısuyu seviyesi derinliği 0 m için toplam deformasyonların gösterimi.

Şekil 7 de yeraltısuyunun şev yüzeyinde olması durumunda 16˚ şev açılı düzlemde oluşacak toplam deformasyonların değişim aralıkları görülmektedir.



Şekil 8: Kritik denge konumu gerçekleşen 16˚ şev açısı sonlu elemanlar modeli, yeraltısuyu seviyesi derinliği 5 m için toplam deformasyonların gösterimi.

Şekil 8 ve Şekil 9 ile yine 16˚ şev açısında yeraltısuyu seviyesi derinliği 5 m ve 15 m olması durumunda toplam deformasyonların dağılımı görülmektedir.



Şekil 9: Kritik denge konumu gerçekleşen 16˚ şev açısı sonlu elemanlar modeli, yeraltısu derinliği 15 m için toplam deformasyonların gösterimi.

Sonlu eleman yöntemi ile yapılan model çözümler β = 10° eğimli yamaçlarda YAS' nin değişimine bağlı deformasyon değerlerinin kabul edilebilir değerlerde (1.0 cm den az) olduğu, β ≥ 20° eğimli yamaçlarda ise deformasyonların YAS kontrolünde gelişeceği görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Akifer özelliği sergileyen kum ağırlıklı zeminlerin içerisinde yeraltı suyu seviyesinin yükselip statik su seviyesi derinliğinin azalması durumunda stabilite sorunları oluşabilir. Çalışmada, yamaçların dengesini olumsuz etkileyecek yamaç açısı-YAS etkileşimi yamaca paralel farklı kayma yüzeyleri için araştırılmış ve çözümlemeler hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Çukurçeşme formasyonunun yüzeylediği alanlardaki yamaçlarda kritik güvenlik sayısının analitik çözüm ile yeraltısuyu yüzeyde (statik su seviyesi derinliği = 0 m) iken β = 15° eğimli yamaçlarda oluşacağı belirlenmiştir. Sonlu eleman yöntemi ile yapılan model çözümler β = 10° eğimli yamaçlarda YAS'nin değişimine bağlı deformasyon değerlerinin değişmeyeceği, β ≥ 20° eğimli yamaçlarda ise deformasyonların YAS kontrolünde gelişeceği elde edilmiştir.

7. KAYNAKLAR

Arıoğlu, E., Tokgöz, N (2005). Çözümlü Problemlerle Şev Stabilitesi Analizi. Evrim Yayınevi, 417 sayfa. İstanbul.

Dalgıç, S., Turgut, M., Kuşku, İ., Coşkun, Ç., Coşgun, T., 2009. İstanbul'un Avrupa yakasındaki zemin ve kaya koşullarının bina temellerine etkisi. Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, Sayı: 2 (Ekim-Kasım 2009), ss.47-70.

Ercan, A., 1990. Gürpınar Beldesi yer mühendislik projesi, Yeraltı Aramacılık Bilimsel Araştırma Kuruluşu, Cilt 1-2, İstanbul.

Ertürk, Z., 2015. İstanbul Avrupa yakası güneyindeki zeminlerin geotekniği (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özüdoğru, K., Tan, O., Aksoy, İH (2001). Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, 160 sayfa. İstanbul.

RocScience Phase2 v. 7.013, 2021. RocScience Inc., Toronto, Ontorio, Canada.

Zarif, İ.H., 1996. Küçükçekmece-Büyükçekmece gölleri arasındaki alanın yamaç stabilitesi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Doktora tezi), İstanbul.

Ereğli-Ulukışla Arası Demiryolu Hattındaki Derin Kazı Çalışmaları ve Şev Duraylılık İncelemesi

Investigation of Deep Excavation Slopes and Stability on the Ereğli-Ulukışla Railway Line

S. Yaprak[1,*], S. Türkmen[2]

[1]Devlet Demiryolları 6. Bölge Md.lüğü ADANA
[2]Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fak. Jeoloji Mühendisliği Bölümü. ADANA
*(*selahattinyaprak@tcdd.gov.tr)*

ÖZ: Çalışma, Devlet Demiryolları tarafından yapımı sürdürülen Eregli – Ulukışla demiryolu güzergâhında Çakmak - Ulukışla İstasyonları arasında yeralan 9 km'lik güzergahtaki derin kazı çalışmalarını ve bu kazılarından dolayı oluşabilecek duraylılık sorunlarının araştırılmasını amaçlamaktadır. İnceleme alanında yeralan litolojik birimler, literatürde İnsuyu ve Cihanbeyli formasyonu olarak adlandırılan Pliyosen yaşlı karasal çökellerden meydana gelmektedir, Bu litolojik birimler başta silttaşı – marn - kiltaşı ardalanmasından oluşmakta, yüzeyde ise ayrışmadan dolayı kalın bir kil ve silt örtü yeralmaktadır. Proje kriterlerine göre kazı şevlerinin durağan durumda güvenlik sayısı >1.50 ve depremli durumda ise güvenlik sayısı >1.10 koşullarını sağlaması öngörülmüştür. Çalışma alanındaki en derin kazının olduğu 3 farklı bölgede 2/3 (yatay/düşey) eğimli şevlerin yapılan duraylılık analizlerinde hem durağan durumda hem de deprem durumunda proje koşullarını sağlamadığı saptanmıştır. Aynı şevlerin, şev açıları 1/1 (yatay/düşey) ve 3/2 (yatay/düşey) olarak değiştirildiğinde yapılan analizlerinde duraylılık koşulunu sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu, Ereğli,Ulukışla, Güvenlik Sayısı, Şev duraylılığı.

ABSTRACT: *This study aims to investigate stability problems that may occur due to deep excavations on the 9 km route between Cakmak - Ulukışla Stations on the railway route between Eregli - Ulukışla, which is under construction by the State Railways. The lithological units, where the study area is located, consist of Pliocene aged terrestrial sediments, which are called Insuyu and Cihanbeyli formations in the literature. These lithological units consist mainly of siltstone - marl - clay stone alternation, and a thick clay and silt covers these units. According to the project criteria, it is envisaged that the cut slopes will meet the conditions of safety factor > 1.50 in the static condition and of safety factor > 1.10 in the earthquake condition. In the stability analyses conducted in 3 different regions which were the deepest excavations in the study area, in cut slopes with a slope of 2(horizontal): 3(vertical) the safety factor required was not met in both static and earthquake conditions. When the slope angles of the same cut slopes are decreased to 1/1 and 3/2 the stability analysis shows that the cut slopes are stable.*

Keywords: *Railway, Ereğli-Ulukışla, Factor of Safety, Slope stability.*

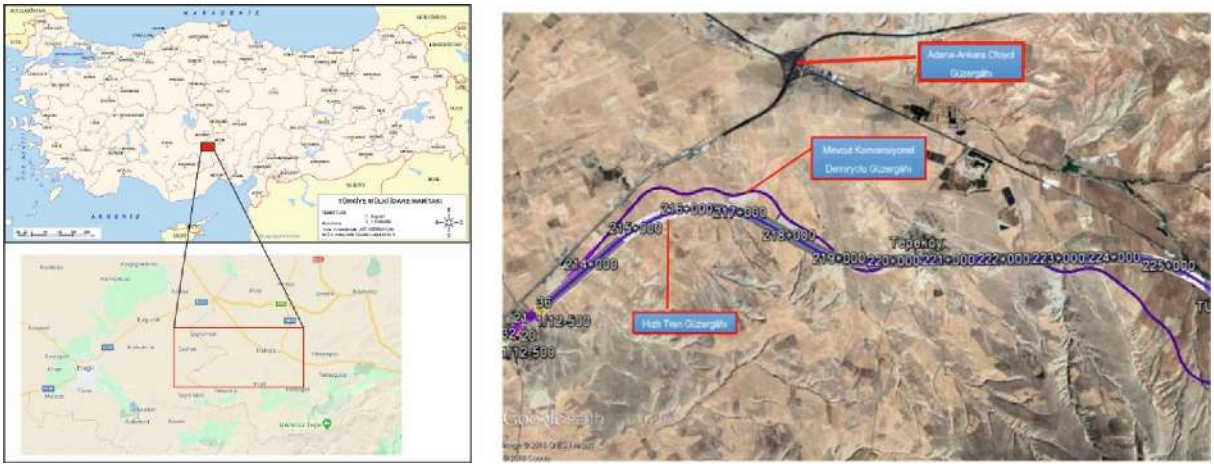
1. GİRİŞ

Devlet Demiryolları tarafından yapımı sürdürülen Çakmak-Ulukışla İstasyonları Km:217+000-226+000 arasında yer alan demiryolu güzergâhında derin yarma kazılarından dolayı oluşabilecek duraylılık sorunlarının araştırılmasıdır. Proje, Karaman İli ile Niğde İli Ulukışla İlçesini birbirine bağlayarak 200 km/saat ile hizmet verecek, karayolu taşımacılığı için gerekli yaklaşık 2,5 saatlik sürenin 40 dakikaya indirilmesi öngörülmüştür. Karaman ili ve Ulukışla ilçesi İç Anadolu bölgesinde olup, iki şehir Akdeniz ve Mersin Liman bağlantısının İç Anadolu demiryolu bağlantısı üzerinde olmakla birlikte daha önce T.C Devlet Demiryolları tarafından yapılan Karaman-Konya-Ankara-Eskişehir-İstanbul yüksek hızlı tren hatları ile de entegre olacaktır (Şekil 1ve Şekil 2). Akdeniz üzerinden Mersin Limanına gelen yük taşımacılığının İç Anadolu bölgesine aktarılmasında karayolu taşımacılığının yükünü büyük ölçüde azaltacak ve yolcu taşımacılığında daha konforlu ve güvenli bir ulaşım imkânı sunacaktır. Karaman-Ulukışla hızlı tren projesi altyapı ve üstyapım işi toplam 2x130

km uzunluğunda demiryolu projesidir. Projenin Çakmak ve Ulukışla İstasyonları arasındaki kısmı yaklaşık 11 km' dir. Bu bölgenin Mühendislik Jeolojisi özelliklerinin değerlendirilmesi ve derin kazı şevlerinin duraylılığının incelenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Çalışılan bölgede daha önce yapılan bilimsel araştırmalar, haritalama çalışmaları, sondajlar, araştırma çukuru ve laboratuvar deneyi verileri bu amaca yönelik olarak değerlendirilmiştir (Demirtaşlı ve diğ. 1973, TCDD 2015 ve TCDD 2017).

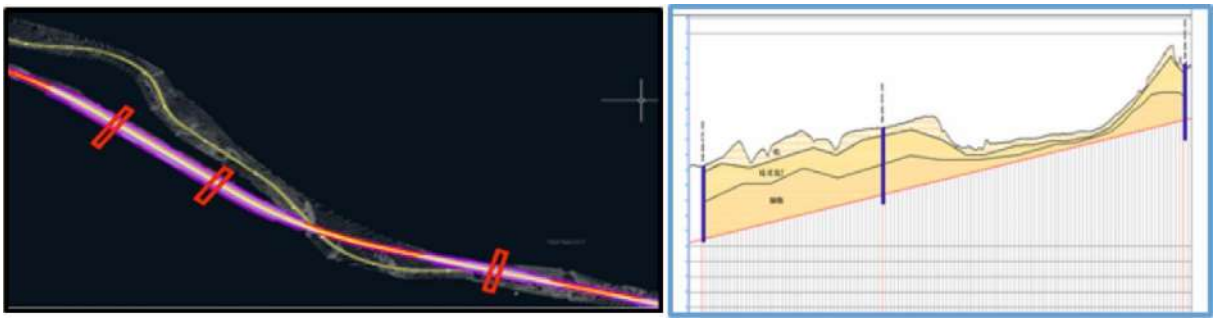
Çalışma bölgesinde marn-kiltaşı ardalanmasından oluşan Üst Miyosen -Pliyosen yaşlı karasal çökeller ile yüzeyde oluşan ayrışma ürünü kalın kil ve silt bir örtü bulunmaktadır. Km:217+000-226+000 arası derin yarma bölgelerinde formasyonların ve tabakaların benzerlik göstermesinden dolayı 3 farklı kritik kesit noktası belirlenmiş ve bu 3 farklı kritik kesitin duraylılık analizleri yapılmıştır, (Şekil 3 ve Şekil 4).

Km:217+000 – 226+000 arası güzergâh üzerinde yapılan 17 adet sondaj ve alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonrasında mühendislik jeolojisi parametreleri ortaya konmuş ve elde edilen değerler sonrasında büro çalışmaları kapsamında bilgisayar destekli yazılımlar sayesinde duraylılık analizleri yapılmıştır. Proje kriterlerine göre (TCDD 2015), yarma şevlerinin statik durumda güvenlik sayısı > 1.50 ve depremli durumda ise güvenlik sayısı >1.10 koşullarını sağlaması öngörülmüştür.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası ve Güzergâhın Uygu Görüntüsü.

Bu çalışma kapsamında en derin kazının yer aldığı 3 farklı bölgede seçilen kesit hatlarında 2/3 (yatay/düşey), 1/1 (yatay/düşey) ve 3/2 (yatay/düşey) eğimlerde kazı yapılacağı varsayılarak limit denge analizi ile duraylılık analizi yapılmıştır (Şekil 3 ve 4). Yapılan analizlerde hem statik durumda hem de deprem durumunda şevlerin istenilen güvenlik sayısı değerini sağlamadığı tespit edilmiştir. Farklı şev eğimlerinde yapılan analizler sonucunda, aynı şevlerin şev açıları 1/1 (yatay/düşey) ve 3/2 (yatay/düşey) olarak değiştirildiğinde şevlerin proje kriterlerini sağladığı ve duraylı olduğu saptanmıştır. Projede yaklaşık 11 km uzunluğundaki güzergâhta kazı derinlikleri 25 m – 40 m arasında değişmektedir. Derin şevlerde duraylılık için değişik destekleme yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler, fore kazık, istinat duvarı, şevleri çelik hasır ve betonla kaplama, taş pere kaplama, zemin çivileri, şev açılarını değiştirme, bir veya birden fazla palyeli kazı gibi alternatif uygulamalar şeklinde sıralanabilir. Bu amaçla projelerde jeolojik – Jeoteknik koşullar, maliyet ve imalat kolaylığı göz önüne alınarak en uygun yöntem seçilmelidir.



Şekil 2. Km:217+600-220+000 arası analiz edilen derin yarmaların plan ve jeolojik boy kesitteki yerleri.

2. İNCELEME ALANININ JEOLOJİSİ

Ereğli-Ulukışla Havzası'nın doğu sınırını Aladağlar ve Ecemiş fayı, batı sınırını Bor hattında görülen Niğde masifi, güney sınırını ise Bolkar dağları oluşturmaktadır (Demirtaşlı ve diğ. 1973, Ketin ve Akarsu 1965).

İnceleme alanının bulunduğu bölgenin en yaşlı birimlerini, Alt Paleozoyik yaşlı Niğde Masifi'nin metamorfik kayaları oluşturur. Bölgede temel birimlerin üzerinde, Paleosen- Eosen yaşında Ulukışla-Çamardı Grubu yer alır (Ayhan ve diğ. 1986). Ulukışla-Çamardı Grubu, volkanikler, aglomera, yastık lav, tüf, dasit, siyenit, traki andezit ile temsil edilmekte olup, yer yer kireçtaşı bloklarından oluşur. Bölge Tersiyer başında, içinde volkanik bir ada yayının gelişmekte olduğu kapanan bir okyanus durumundadır. Kapanma, kuzeyden güneye ilerleyen Kıta-Ada yayı-Kıta çarpışması şeklinde gelişmiştir (Oktay 1982).

Bölgenin okyanusal niteliği Lütesiyen sonlarında sona ermiş ve Üst Eosen-Alt Miyosen zaman süreci içinde gelişen çukurlarda önce evaporitik, sonra tatlı su ve karasal kırıntılar depolanmıştır. Orta Miyosen'de bölge orojenik hareketlerle yeniden şekillenmiştir. Yörede Üst Miyosen-Pliyosen'de düşey hareketler ve iklim değişmesi ile akarsu-göl koşullarında yeni bir tortul devre gelişmiştir. Bu evrede kırıntılı ve karbonatlı sedimanlar çökelmiştir (Şekil 5). Birimler, Pliyosen sonlarında etkin düşey hareketlere bağlı olarak kuzeybatıya doğru eğilme ve açık kıvrım oluşturacak şekilde çok hafif bir deformasyon geçirmişlerdir (Deloğlu ve Akarsu 1986).

İnceleme alanındaki Neojen birimler değişik araştırmacılar tarafından farklı formasyon adları ile tanımlanmıştır (Oktay 1982, Deloğlu ve Akarsu 1986, Sonel ve Sarı 2004 ve Özdemir 2006). Bu çalışmada inceleme alanında yaygın olan Miyosen-Pliyosen yaşlı birimler İnsuyu formasyonu (Kadınkız ve diğ. 2017) ve Pliyosen yaşlı Cihanbeyli formasyonu adlandırmaları uygun görülmüştür (Şekil 3, MTA 2002).

2.1. İnsuyu Formasyonu

Bu formasyon güzergah boyunca 3 üye ile temsil edilmektedir. Bunlar;
-Beştepeler Üyesi: Killi kireçtaşı, çakıltaşı, şeyl
-Katrandedetepe Üyesi: Marn, kireçtaşı, kumtaşı, silttaşı
-Kızılbayır Üyesi: Çakıllı kil, kumtaşı, çakıltaşı, marn, kireçtaşı, şeyl.

Proje sonunda yer alan Ulukışla İstasyonu civarı Km:216+000-230+000 arasında gözlemlenmektedir. Çakmak istasyonundan sonra başlayan derin yarma bölgesinin güneyine doğru Tepeköy mahallesi ile Ulukışla arasında mostralar görülebilmektedir. Tepeköy civarında ise tabakalanmalar görülebilmektedir.

Tepeköy mahallesi civarı formasyonun belirgin mostra verdiği yerlerden olup, yamaçların doğu cephesinde formasyonun birimlerini görmek mümkündür. Formasyon birimleri içinde bulunan kayaçların dayanımı genel olarak düşük ve orta derecededir.

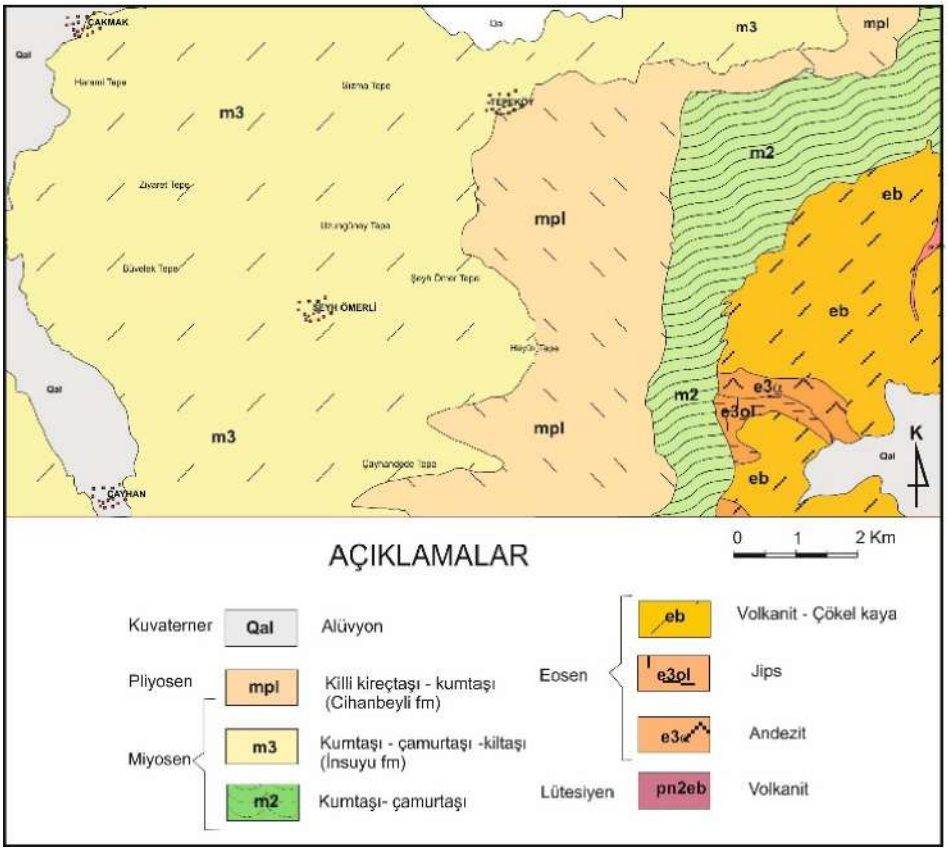
2.2. Cihanbeyli Formasyonu

Ereğli-Ulukışla havzası ile Tuz Gölü havzası'nın birimleri üzerinde geniş bir yayılım gösteren formasyon Cihanbeyli Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu formasyonu oluşturan litolojik birimler başta silttaşı – marn - kiltaşı ardalanmasından oluşmakta, yüzeyde ise ayrışmadan dolayı kalın kil ve silt bir örtü yeralmaktadır. Formasyon kendisinden yaşlı diğer formasyonlar üzerine açısal uyumsuzlukla gelmektedir (Deloğlu ve Akarsu 1986).

Formasyon Pliyosen yaşlı olup, karasal kırıntılardan meydana gelmektedir. Formasyon içinde marn ve kiltaşı tabakalarında ekonomik değeri olmayan linyit damarları görülmektedir. Üste doğru giderek tane boyu küçülmekte marn ve killi kireçtaşlarına geçmektedir (Deloğlu ve Akarsu 1986). Formasyondaki büyük ölçekli çapraz katmanlanma ile kırıntılılardaki merceklenmeler akarsu ortamını, kireçtaşı ile bitümlü marnlar ise gölsel bir ortamın varlığını işaret etmektedir (Sonel ve Sarı 2004). Bazı araştırıcılar bu birimi Altaylar, Ulukışla, Beştepeler adı altında formasyon derecesinde değerlendirmişlerdir (Oktay 1982).

2.3. Alüvyon

Gevşek çimentolu veya çimentosuz çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşları genç çökelleri oluşturmakta olup, Kızıltepe civarında görülen traverten oluşumları bulunmaktadır. Ayrıca, yuvarlanmış gevşek çimentolu farklı birimlere ait çakıllar içeren çakıltaşı-kumtaşlarından meydana gelen taraça bulunmaktadır. Metamorfik kayaçlara ait köşeli çakılların birikimi ile görülen yamaç molozları ihtiva etmektedir. Bu birimler Kuvaterner yaşlıdır.

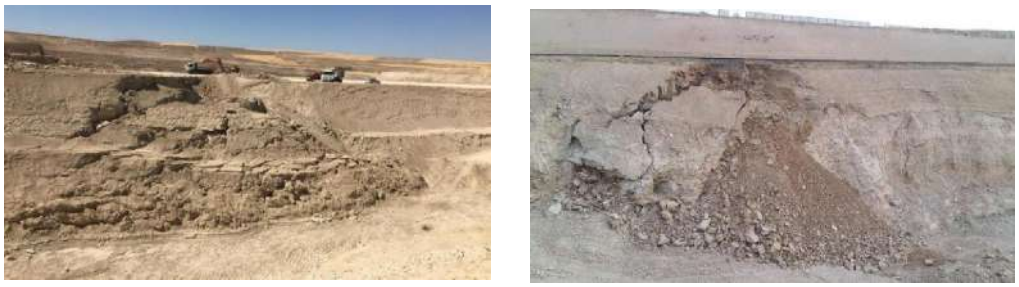


Şekil 3. İnceleme Alanı ve Çevresinin Jeoloji Haritası (MTA, 2002'den alınmıştır).

3. METOD

İnceleme; arazi öncesi çalışmalar, arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve büro çalışmaları olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışması kapsamında; TCDD Yolları tarafından proje çalışmalarında hazırlanan raporlar ve jeoteknik amaçla yapılan sondajlardan ve laboratuvar deneylerinden yararlanılmıştır (TCDD 2015 ve TCDD 2017).

Kayma yüzeyinin stabilite analizlerinde Bishop, Janbu, Spencer, Sarma, Morgenstern-Price (GLE) vb. gibi yaygın limit denge metotları bulunmaktadır. Bu metotlarla Slide 2D yazılımı yardımıyla kaya ve/veya zeminden oluşan şevlerde güvenlik faktörü hesabı, dairesel ve dairesel olmayan yenilme yüzeylerin tespiti yapılabilmektedir. İnceleme alanı ve çevresinde yapılan kazı şevlerinde gözlenen kaymaların, ayrışmaya bağlı olarak dairesel şekilde geliştiği gözlenmiştir (Şekil 4). Bu gözleme dayalı olarak analizler, dairesel kayma olacak şekilde düşünülmüştür. Şev duraylılık analizleri Slide 2D bilgisayar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Önce incelenen şev kesitleri ve gerekli veriler yazılımlara tanıtılıp analizlere başlanmıştır. Litolojik birimlere ait kayma parametreleri ve arazi koşulları da eklenerek analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda birkaç farklı senaryo üzerinde durulmuş ve bunlara yönelik iyileştirme çalışmaları önerilmiştir.



Şekil 4. Çalışma alanında izlenen dairesel kayma örnekleri.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Mühendislik Özellikleri

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla inceleme alanından alınan numeneler üzerinde laboratuvar ortamında kıvam limitleri, elek analiz, su muhtevası, üç eksenli basınç deneyi, doğal birim hacim ağrılık deneyi ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır (ASTM 1994).

Kil ve Silt birimlerinde yapılan kıvam limitleri deneyi sonrası likit limit (LL) %28,2-67,7, plastik limit (PL) %16,3-27,1 ve plastisite indisi (PI) %15,5-40,6 aralığında bulunmuştur. Elek analizi ve atterberg limitleri deneyi sonucunda Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına Göre zemin sınıfı "CH-CL" (Yüksek Plastiseli Kil-Düşük Plastisiteli Kil) olarak belirtilmiştir. İnceleme alanında alınan örselenmemiş örneklerden konsolidasyon deneyi yapılarak, birimlerin şişme potansiyeli belirlenmiştir. İnceleme bölgesinde yapılan sondajlar sonrası laboratuvar deneylerinden üç eksenli basınç deneyi yapılarak, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri elde edilmiştir. Laboratuvar deney sonuçları Çizelge 1 ve 2' de verilmiştir.

Çizelge 1. Laboratuvar deneyleri sonuçları ve şev duraylılığı analizlerinde kullanılacak parametreler.

LİTOLOJİ	γ kuru (kN/m^3)	γ doygun (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	Ru
Kil	18,0	19,0	10,0	30	40 x 10^3	0,15
Marn	24,0	24,0	93,0	29	195 x 10^3	0,15
Zayıf Marn	23,0	23,0	67,0	24	95 x 10^3	0,15
Marn	230, 0	23,00	77,00	26	132 x 103	0.15

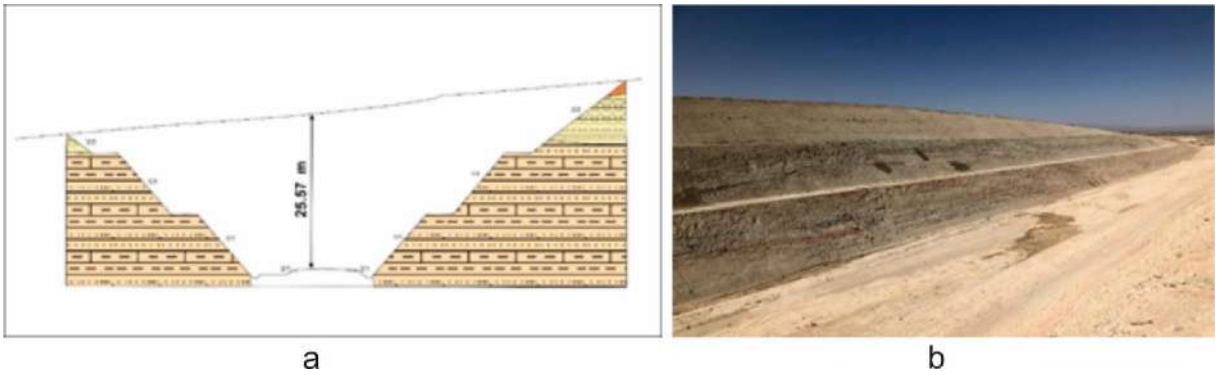
Çizelge 2. Laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen değerler.

Sondaj No	Numune Derinliği (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık γ n (kN/m^3)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Elastise Modülü (MPa)	Poisson Oranı v	Kayada Üç Eksenli c (MPa)	ϕ (°)
SK-275	19-22	24,75	42,8	10,95	0.278	-	-
SK-275	22-25	23,99	-	-	-	5,8	36
SK-284	18-21	24,38	32	9,61	0,285	-	-
SK-284	21-24	-	-	-	-	4,7	34
SK-285	10,5-13	24,12	30,9	7,82	0,289	-	-
SK-285	13,5-16	-	-	-	-	4,9	35

4.2. Şev Duraylılık Analizleri

4.2.1.Km:217+600 Slide 2D Şev Stabilite Analizi

İlk çalışma bölgesinin (Km: 217+600) birinci senaryosunda projenin şev eğimleri 2/3 (yatay/düşey) olarak tasarlanmış, ikinci senaryosunda ise alt palyelerin şev eğimleri 1/1 (yatay/düşey) üst palye şev eğimi ise 3/2 (yatay/düşey) olarak depremli ve depremsiz durum için analizler yapılmıştır.



Şekil 6. a) Km:217+600 Yan şevlerin kesiti ve tabakaların gösterimi (geometrik model),
b) Km:217+600 kesitinde güney şevin görünümü

Uzun dönem statik durumda ve depremli durumda 2/3 eğimli analizi tamamlanan şevlerin proje kriterlerini sağlamadığı görülmüştür. Uzun dönem statik durumda ve depremli durumda 1/1 ve 3/2 eğimli analizi tamamlanan şevlerin proje kriterlerini sağladığı ve şevlerin duraylı olduğu görülmüştür (Şekil 6).

4.2.2. Km:218+500 Slide 2D Şev Stabilite Analizi

İkinci çalışma bölgesi Km:218+500' ün birinci senaryosunda projenin şev eğimleri 2/3 (yatay/düşey) olarak tasarlanmış, ikinci senaryosunda ise alt palyelerin şev eğimleri 1/1 (yatay/düşey) üst palye şev eğimi ise 3/2 (yatay/düşey) olarak depremli ve depremsiz analizler yapılmıştır. Uzun dönem statik durumda ve depremli durumda 2/3 eğimli analizi tamamlanan şevlerin proje kriterlerini sağlamadığı ancak 1/1 ve 3/2 eğimli analizi tamamlanan şevlerin proje kriterlerini sağladığı görülmüştür (Şekil 7).

Şekil 7. a) Km:218+500 bölgesi killi birim ile marn arasındaki dokanak
b) Km:218-500-219+00 civarı şev çalışma bölgesi ve aç kapa sanat yapısı görüntüsü

2.2.3. Km:220+000 Slide 2D Şev Stabilite Analizi

Üçüncü çalışma bölgesi olan Km:220+000'de birinci senaryoda projenin şev eğimleri 2/3 (yatay/düşey) olarak tasarlanmış, ikinci senaryoda ise alt palyelerin şev eğimleri 1/1 (yatay/düşey) üst palye şev eğimi ise 3/2 (yatay/düşey) olarak depremli ve depremsiz analizler yapılmıştır.

Uzun dönem statik durumda ve depremli durumda 2/3 eğimli analizi tamamlanan şevlerin proje kriterlerini sağlamadığı, ancak 1/1 ve 3/2 eğimli analizi tamamlanan şevlerin proje kriterlerini sağladığı görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnceleme alanında, km: 217+600 kritik kesitinin birinci senaryosunda bütün şev açıları 2/3 (yatay/düşey), ikinci senaryoda ise alt şevler 1/1 (yatay/düşey), üst şev ise 3/2 (yatay/düşey) olacak şekilde öncelikle statik daha sonra depremli durum için analiz yapılmıştır. Km: 217+600 kritik kesitinin birinci senaryosunda şev analizleri uzun dönem statik koşulda en küçük GK:1.002 uzun dönem deprem durumunda ise en küçük GK:0.918 olarak hesaplanmıştır. Depremli GK<1.10 olduğu için şevlerde proje koşulu sağlanamamıştır. Km:217+600 kritik kesitinin ikinci senaryosunda uzun dönem statik koşulda en küçük GK:1.77, deprem durumunda ise en düşük GK:1.61 olarak bulunmuştur. Uzun dönem depremli GK>1.10 uzun dönem statik GK>1.50 olduğu için şevlerde duraysızlık söz konusu olamayıp, proje koşulu sağlanmaktadır.

Km:218+500 kritik kesitinin birinci senaryosunda bütün şev açıları 2/3 (yatay/düşey), ikinci senaryosunda ise alt şevler 1/1 (yatay/düşey), üst şev ise 3/2 (yatay/düşey) olacak şekilde öncelikle statik daha sonra depremli şekilde analiz yapılmıştır. Km:218+500 kritik kesitinin birinci senaryosunda şev analizleri uzun dönem statik koşulda en küçük GK:1.13 uzun dönem deprem durumunda ise en küçük GK:1.06 olarak hesaplanmıştır. Uzun dönem depremli GK<1.10 ve uzun dönem statik GK<1.50 olduğu için şevlerde proje koşulu sağlanamamaktadır. Km:218+500 kritik kesitinin ikinci senaryosunda şev analizi uzun dönem statik koşulda en küçük GK:1.65 uzun dönem deprem durumunda ise en küçük GK:1.496 olarak hesaplanmıştır. Uzun dönem depremli GK>1.10 ve uzun dönem statik GK>1.50 olduğu için şevlerde duraysızlık söz konusu değildir.

Km: 220+000 kritik kesitinin birinci senaryosunda bütün şev açıları 2/3 (yatay/düşey), ikinci senaryoda ise alt şev 1/1 (yatay/düşey), üst şev ise 3/2 (yatay/düşey) olacak şekilde öncelikle uzun dönem statik daha sonra uzun dönem depremli şekilde analiz yapılmıştır. Km:217+600 kritik kesitinde birinci senaryonun uzun dönem statik koşulda en küçük GK:0.91 uzun dönem deprem durumunda ise en küçük GK: 0.83 olarak hesaplanmıştır. Uzun dönem depremli GK<1.10 ve uzun dönem statik GK<1.50 olduğu için şevlerde duraysızlık söz konusudur. Km: 220+000 kritik kesiti ikinci senaryosunda uzun dönem statik koşulda en küçük GK:1.60 uzun dönem deprem durumunda ise en

küçük GK: 1.45 olarak hesaplanmıştır. Uzun dönem depremli GK>1.10 ve uzun dönem statik GK>1.50 olduğu için şevlerde duraysızlık söz konusu değildir.

Günümüzde derin kazı şevlerinde iyileştirme seçenekleri olarak fore kazık, istinat duvarı, şevleri çelik hasır ve betonla kaplama, taş pere kaplama, zemin çivileri, şev açılarını değiştirme gibi farklı iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. İnceleme kapsamında çalışılan bölgelerde bulunan yarmalar 25 m – 40 m arası derinlikte, iki ve daha fazla palyelerden oluşmakta ve yaklaşık 11 km uzunluğundadır. Gözlemlenen bu durumlar dikkate alındığında şev duraylılığı açısından derin kazıların alt şevler 1/1 (yatay/düşey), üst şevler ise 3/2 (yatay/düşey) olacak şekilde yatırılması, diğer iyileştirme yöntemleri içinde imalat kolaylığı, kısa zamanda yapılması, ekonomik olması gibi nedenlerden dolayı en uygun alternatif imalat yöntemi olarak görülmektedir.

5. KAYNAKLAR

Ayhan, A., Sevin, M., Altun, İ.E. 1986. Karapınar-Ereğli (Konya)-Ulukışla (Niğde) civarının Jeolojisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Derleme No: 8090 (yayımlanmamış).

ASTM, 1994. Annual Book of ASTM Standarts-Section 4, Construction, V. 0408 Soil and Rock; Building Stones. ASTM Publication..

Dellaloğlu, A. A. ve Aksu, R. 1986. Ereğli (Konya)-Ulukışla-Çiftehan-Çamardı (Niğde) dolayının jeolojisi ve petrol olanakları. TPAO. Rapor no: 2205. Ankara.

Demirtaşlı, E., Bilgin, A. Z., Erenler, F., Işılar, S., Sanlı, D., Selim, N. ve Turhan, N. 1973. Bolkardağlarının Jeolojisi. Cumhuriyetin 50. yılı Yerbilimleri Kongresi, Tebliğler, MTA Yayını, Ankara, 608 s. Ankara.

Kadınkız, G., Pekgöz, M., Karakaş, M., ve Murat, A. 2017. Tersiyer (Üst Miyosen-Pliyosen) Katrandedetepe Formasyonunda Sodyum Sülfat (Globerit-Blödit) – Halit Birlikteliği, Ereğli-Bor Havzasi, Türkiye. MTA Dergisi 154:137-158, Ankara.

Ketin, İ. ve Akarsu, R. 1965. Ulukışla Tersiyer Havzasının jeolojik etüdü hakkında rapor. TPAO, no: 339.

MTA, 2002. 1/500 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası (Adana Bölümü), MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.

Oktay F. 1982. Ulukışla ve çevresinin stratigrafisi ve jeolojik evrimi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, C. 25, 15-23. Ankara.

Özdemir A., 2006. Ereğli-Ulukışla Havzası Güney Formasyonunun Jeolojisi ve Petrol Hazne Kaya Özelliklerinin İncelenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s94.

Sonel, N., Sarı, A., 2004. Ereğli-Ulukışla (Konya-Niğde) Havzasının Hidrokarbon Potansiyelinin İncelenmesi., Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19(4):393-403.

TCDD, 2015. Demiryolu Güzergah Jeolojik-Jeoteknik-Geoteknik Etütlerinin Yapılmasına Ait Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesi, s25, Ankara.

TCDD, 2017. Karaman-Ulukışla İstasyonları Arası hızlı tren projesi, Yarma Şevleri Geoteknik Değerlendirme Raporu. s90-94 , Ankara.

Yeraltı Açıklıklarında Mühendislik Jeolojisi / *Engineering Geology and Geotechnics in Underground Spaces*

Kırkdilim-Laçin T3 Tüneli Yüksek Deplasmanlara Neden Olan Yerinde Gerilme Oranının (k) 3 Boyutlu Geri Analiz ile Belirlenmesi

The Effect of Horizontal-Vertical Stress Ratio on the Deformation of T3 Tunnel (Çorum, Turkey)

A. Atakan[1,*] , M. Yılmaz[1], B. Arslan[2], C. Samur[2]

[1] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul
[2] ARS Geoteknik Mühendislik Müşavirlik San.Tic.Ltd.Şti., İçerenköy Mah., Ataşehir, İstanbul
*(*anilatakaan@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, Karadeniz bölgesini İç Anadolu'ya bağlayan en önemli güzergâhlarından biri olan Kırkdilim-Laçin hattındaki T3 tüneli giriş kısmı incelenmiştir. Tünel kazısı sırasında tespit edilen konverjans ölçüm değerlerini sağlayan yerinde gerilme oranının (k), geri analiz modellemeleri ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak çalışma alanının jeolojisi incelenmiş ve ortamın yapısal özellikleri ortaya konmuştur. Saha çalışmalarından elde edilen veri ve gözlemlerin yanı sıra yapılan yatay-düşey sondajların laboratuvar testlerinden elde edilen veriler kullanılarak, çalışma alanındaki jeolojik malzemelerin girdi parametreleri belirlenmiştir. Bu bağlamda elde edilen veriler dikkate alındığında yüksek deplasman değerlerine çalışma alanına yakın konumda bulunan doğrultu atımlı karakterdeki ana fayın, ters ve doğrultu atımlı fay bileşenlerinin oluşturduğu yüksek yatay gerilmelerin (k>1) sebep olduğu düşünülmektedir. Yüksek deformasyon değerlerinin nedeni olduğu düşünülen ve çalışma alanının yapısal karakterine uygun yerinde gerilme oranını (k) belirleyebilmek amacıyla Midas GTS NX yazılımında 3 boyutlu nümerik modeller oluşturularak geri analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda belirlenen yerinde gerilme oranı, literatürde mevcut olan ampirik yöntemler ile elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, tektonik hareketlerin oluşturduğu saha gerilmelerinin tünelde meydana getirdiği deformasyonlara ve bu koşulları sağlayan yerinde gerilme oranına nümerik analizler yardımıyla ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yatay gerilme (k_h), konverjans, fay sistemi, geri analiz, 3D nümerik analiz

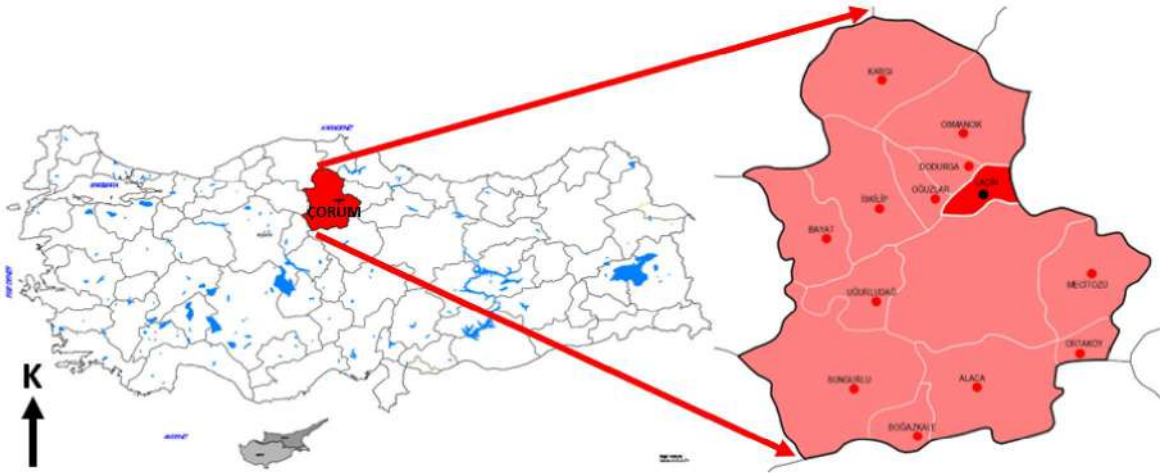
ABSTRACT: *In this study, the entrance of T3 tunnel was examined where is located on Kırkdilim-Laçin line which is one of the most substantial routes connecting the Black Sea region to Central Anatolia, is examined. The aim of the study is to determine the value of in-situ stress obtained from the convergence measurements during tunnel excavation via back analysis. First of all, the geology of project area is investigated to reveal structural properties. In addition, parameters of geological materials are determined through the field discontinuity measurements and observations. Besides, the data of vertical and horizontal borehole samples and lab test results are used as some parameters for determination process. Moreover, when acquired data taking into consideration, the high-horizontal deformations could be happened cause of strong-horizontal stress where thrust or strike-slip faults of strike-slip charactered main fault located close to study area. The authors have thought, the high-horizontal deformations could be happened by substantial horizontal stresses which caused through thrust or strike-slip faults of which are components of strike-slip charactered main fault. There were carried out several 3D numerical back-analyses to determine in-situ stress ratio proper to structural conditions which possible reason of horizontal deformations by Midas GTS NX software. The calculated in-situ ratio values were compared with some empirical equations. Eventually, the in-situ stress ratio is specified by numerical analyses which provide geological circumstances and measured convergence displacement occurred with tectonic activities.*

Keywords: *Horizontal stress (k_h), convergence, fault system, back analysis, 3D numerical analysis*

1. GİRİŞ

Türkiye'nin en tehlikeli yollarından biri olarak bilinen ve adını güzergâh üzerindeki 40 virajdan alan Kırkdilim-Çorum'daki (Şekil 1) proje alanında, büyük bölümü sarp kayalıklar ve uçurumlar nedeniyle

heyelan ve kaya düşmeleri açısından yüksek riskli olan dağlık yol güzergâhını daha güvenli ve konforlu hale getirmek amacıyla 3 karayolu tünelinin de yer aldığı proje çalışmaları yürütülmektedir. Yapımına devam edilen üç tünelden biri olan T3 tüneli, "Çorum-Laçin İl Yolu Kırkdilim Geçidi Km:22+00 – 24+500'de Stabilite Problemli Alanlarının Islahı ve Özel Sanat Yapıları Projelerinin Hazırlanması" projesi kapsamında sağ hattı 1527,76 metre ve sol hattı 1578,26 metre olacak şekilde çift tüp olarak tasarlanmıştır. Çalışma alanı jeolojisi kristalize kireçtaşı ve milonitik grafit şist birimlerinden oluşmakta olup, tektonik açıdan oldukça aktif fayların yer aldığı bir bölgededir. Faylar genel itibariyle sağ yönlü doğrultu atımlı karakterde olup ortamdaki gerilmeyi, özellikle de yatay gerilmeyi artırmaktadır. Tünel kazısı sırasında kaydedilen konverjans ölçümlerinde yüksek yanal deplasmanlar ile karşılaşılmasına da bu durumun neden olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada, T3 tüneli kazısı sırasında yüksek deformasyonların kaydedildiği birim geçişinin ve faylanmanın gözlendiği zonlarda bu deplasmanlara neden olduğu düşünülen yatay-düşey gerilme oranının (k) kestirilebilmesi amacıyla Midas GTS NX yazılımında 3 boyutlu geri analiz yaklaşımı uygulanmış ve literatürdeki ampirik eşitlikler ile hesaplanan değerler karşılaştırılarak sonuçları irdelenmiştir.

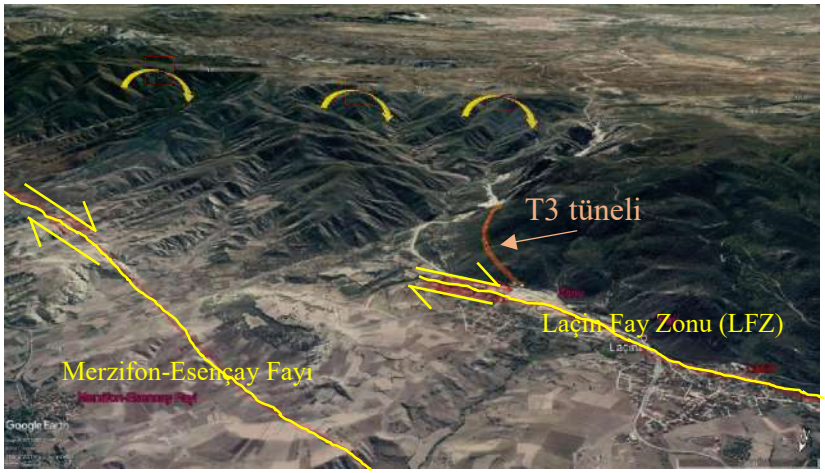


Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.

2. JEOLOJİ

İnceleme alanı, İzmir Ankara Erzincan Süturu (İAES) olarak da bilinen Kuzey Neotetis kenedi ile Kırşehir Masifi kuzeyinde, İç Pontid Süturu ile ayrılan İstanbul Zonu doğusunda, Orta Pontidler içerisinde yer almaktadır. Tünel güzergâhının jeolojisi, Pontidler ile İzmir Ankara Erzincan okyanusunun (kuzey neotetis) bir araya geldiği aktif kıta kenarındaki Devoniyen-Üst Triyas yaşlı magmatik, metamorfik ve sedimanter kayalar içeren kaotik kaya topluluğu olan Karakaya karmaşığının (TR_k) milonitik grafit şist birimi ile Variskan orojenezi şiddetli tektonizmanın sona erdiğinin de bir belirteci olan ve karmaşığı uyumsuz olarak örten Jura-Kretase yaşlı kristalize Bilecik kireçtaşından (JK_b) oluşmaktadır.

Tünelin yaklaşık 2 km kuzeyinde sağ yönlü doğrultu atımlı karakterdeki Merzifon-Esençay fayı (Arpat ve Şaroğlu, 1975) ve onun bileşeni olan 1 km'den az mesafede kuzeyinde doğrultu atımlı oblik karakterdeki Laçin segmenti, yaklaşık 40 km kuzeyinde ise Tortoniyen'de Arap platformunun Anadolu levhası altına dalması ile başlayan, Kuzey Anadolu'yu boylu boyunca kesen, Neotektonik dönemde oluşan sağ yönlü doğrultu atımlı karakterdeki Kuzey Anadolu fayı (KAF) (Ketin, 1948) yer almaktadır. Oldukça aktif bir tektonik ortamda yer alan proje alanında, saha çalışmaları sırasında yüzeyde fay gözlenmemesine karşın tünel kazıları sırasında aynalarda genç kristalize kireçtaşı biriminin yer yer şist birimini üzerlediği gözlenmiştir (Şekil 3). Ayrıca bölgede etkili olan K-G yönlü sıkışmaların oluşturduğu etki ile K-G ve D-B yönlü sürüklenme yapıları gelişmiştir. İnceleme alanı çevresini gösteren uydu görüntüsünden üzerlemeleri işaret eden sürüklenme yapıları açıkça görülmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. T3 tüneli çevresinde topoğrafyada gözlenen sürüklenme yapıları (sarı oklar ile sürüklenme yapıları ve yönleri gösterilmektedir).

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

Karakaya karmaşığı şist birimi, yeşil-yeşilimsi siyah renkli, zayıf-çok zayıf dayanımlı, yapraklanmaları el ile kolaylıkla ayrılan, orta-çok ayrışmış, ezik zonlarda tamamen ayrışmış özelliktedir. Birimdeki süreksizlikler ayrışma etkisi ile genel olarak izlenememekte olup, gözlenen süreksizlikler ise açık, mat renkte, kaygan, demiroksit (FeO) boyamalı, kalsit ve yer yer kil dolguludur.

Bölgenin temel birimini açısal uyumsuzlukla örten ve yer yer tektonik olarak üzerleyen mikritik özellikteki Bilecik kireçtaşı bej ,beyaz-pembemsi beyaz renkli, taze kırık yüzeyi süt beyaz renkli, genelde kristalize, yer yer rekristalize masif görünümde olup tektonizmanın etkili olduğu zonlarda kırık-çatlaklı, tabaka sunan mostralarda orta-kalın tabakalı, süreksizlikleri açık, mat, pürüzlü-çok pürüzlü, kalsit ve kuvars dolgulu, yer yer demiroksit boyalı ve kil dolgulu, yüksek basınç etkisi ile yer yer mermerleşmiş, az-orta ayrışmış, zayıf-orta dayanımlıdır. Yüzeyde karstik boşlukların gözlendiği kireçtaşı birimi, yeraltı suyu dolaşımı açısından geçirimli özelliktedir. Bu erime boşluklarında uvala, dolin, lapya gibi karst şekillerinin oluştuğu (Alp, 1972) tarafından belirtilmiştir.

Mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özelliklerinin ortaya konması amacıyla güzergâh boyunca düşey ve yatay sondajlar, yerinde ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ile arazi gözlemleri değerlendirilerek birimlerin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 1). Bu veriler Rocdata (5.012) yazılımında girdi parametresi olarak kullanılmış, inceleme alanındaki en yüksek örtü kalınlığı (85m) göz önüne alınarak Hoek & Brown kırılma kriteri ile yapılacak olacak analizlerin doruk ve rezidüel değerleri belirlenmiştir (Çizelge 2). Birimlerin jeolojik dayanım indeksi (GSI) değerleri, deneyler ve arazi gözlemleri değerlendirilerek belirlenmiş olup, rezidüel GSI değerleri ise (Cai vd., 2007) tarafından önerilen Eşitlik (1) ($GSI_r = GSIxe^{-0.0134GSI}$) ile hesaplanmıştır.

İnceleme alanında gözlenen milonitik dokulu grafit şist ile kristalize kireçtaşı birimlerinin RMR puanları sırasıyla 18 (çok zayıf kaya) ve 45 (orta kaya); Q kütle sınıflamasına göre ise sırasıyla 0,01 (aşırı derecede zayıf) ve 0,78 (çok zayıf)'dır.

Çizelge 1: Şist ve kireçtaşı birimleri doruk ve rezidüel jeoteknik girdi parametreleri

Birimler	Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Örselenme faktörü	Elastisite modülü	Birim ağırlık
	σci (MPa)	GSI	mi	D	E_i (GPa)	γ (kN/m^3)
Şist	15	30	9	0.5 ve 0	10,0	24,0
Şist*	15	20	9	0,5 ve 0	10,0	24,0
Kireçtaşı	40	50	12	0.5 ve 0	27,0	28,3
Kireçtaşı*	40	26	12	0,5 ve 0	27,0	28,3

**Rezidüel değerleri ifade etmektedir.*

Çizelge 2: Şist ve kireçtaşı birimleri doruk ve rezidüel jeoteknik analiz parametreleri

Birimler	Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel sürtünme açısı	Deformasyon modülü	Hoek – Brown Ölçütleri		
	D	c	Ø	E_m	mb	s	a
		(kPa)	(°)	(GPa)			
Şist	0	220	34	0.810	0.739	0.0004	0.522
Şist	0,5	159	27	0.440	0.321	0.0001	0.522
Şist*	0	168	30	0,450	0,517	0,0001	0,544
Şist	0,5	114	22	0,300	0,199	0,000002	0,544
Kireçtaşı	0	577	49	8.290	2.012	0.0039	0.506
Kireçtaşı	0,5	443	45	3.970	1.110	0.0013	0.506
Kireçtaşı*	0	323	42	1,710	0,854	0,0003	0,529
Kireçtaşı*	0,5	232	34	0,995	0,354	0,0001	0,529

**Rezidüel değerleri ifade etmektedir.*

4. YERİNDE GERİLMELER VE 3D GERİ ANALİZ

Bir kaya kütlesi, başka kuvvetlerin etkisi altında olmasa bile, üzerine gelen malzemenin ağırlığından çevre basıncından ve geçmişte maruz kaldığı koşullardan dolayı bir şekilde sıfır olmayan yatay ve düşey gerilme bileşenine sahiptir (Goodman, 1980). Ortamda yer alan bu yatay gerilmelerin düşey gerilemelere oran oranı 'k' ile ifade edilir ve Eşitlik (2) ile hesaplanmaktadır.

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2)$$

Burada; σ_h yatay gerilme (MPa), σ_v ise düşey gerilmedir (MPa).

Yerinde gerilmelerin birbirine dik veya belirli açılarda olan üç bileşenli olduğu kabul edilmektedir. Bu gerilmeleri tespit etmek veya kestirebilmek için birçok metot bulunmakta olup her birinin kendine özgü avantaj ve sınırlamaları bulunmaktadır. (Stephansson ve Zang, 2012) tarafından yapılan çalışmada ISRM için kaya stres tahmininde önerilen metotlar sınıflandırılarak belirtilmiştir. Bu çalışmada da geri analiz yöntemi tercih edilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. (Eberhardt ve Stead, 2011) tarafından yapılan çalışmada, geri analiz yöntemi ile yerinde gerilmelerin kestirilmesi yönteminin avantajları kazı sırasında elde edilen veriler kullanılarak direkt sonuca ulaşılabilmesi, büyük kaya hacmi nedeniyle yüksek kesinlikte sonuçlar sunması ve düşük maliyetli olması iken, dezavantajı ise teorik bir metot olması nedeniyle özgün bir yöntem olmaması olarak belirtilmektedir.

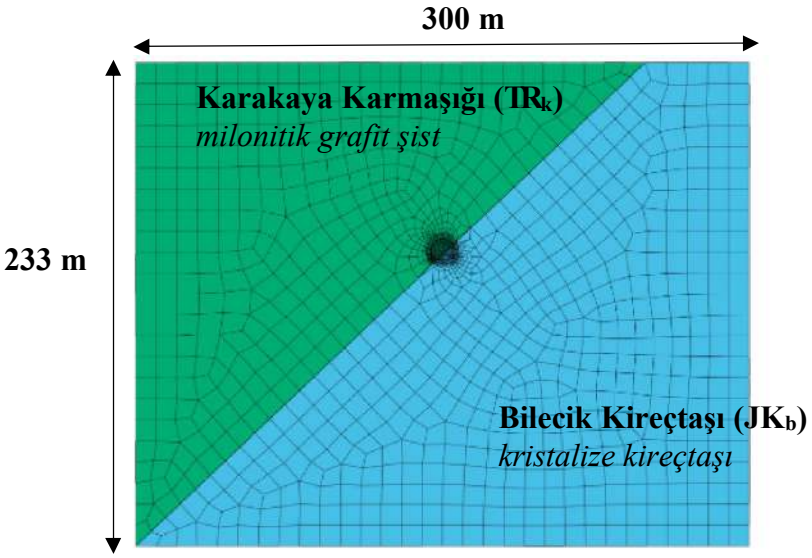
Kaya veya zeminlerde bulunan bu gerilmelerin büyük bir kısmı bölgede hâkim olan tektonik rejime bağlı olsa da yerel olarak özel koşullarda farklılıklar gösterebilmektedir. Mühendislik çalışmalarında, özellikle de yeraltı kazılarında çalışma alanındaki stres durumu ve yönelimleri gibi bilinmezlikleri en

aza indirmek amacıyla yapıların daha güvenli ve dayanıklı olması ve yaşanabilecek muhtemel sorunlara önlem alınarak daha uzun yıllar hizmet edebilmesi açısından oldukça önemlidir. Özellikle de Türkiye gibi deprem kuşağında yer alan ülkeler açısından daha da önem arz etmektedir.

Bu çalışma kapsamında incelenen T3 tüneli kazısı sırasında konverjans ölçümlerinde 20 cm mertebelerinde deplasmanlar tespit edilmiş olup, bu deformasyonlara çalışma alanı ve çevresinde bulunan aktif faylar kaynaklı yüksek yatay gerilmelerin sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durumda gerilme oranının (k>1) olması beklenmektedir. İnceleme alanı ve dolaylarındaki doğrultu atımlı faylar ve ters atım bileşenlerinin varlığı bu beklentiyi desteklemektedir.

Şekil 3.Kristalize kireçtaşı ve milonitik grafit şist tektonik sınırı (KM: 4+520)

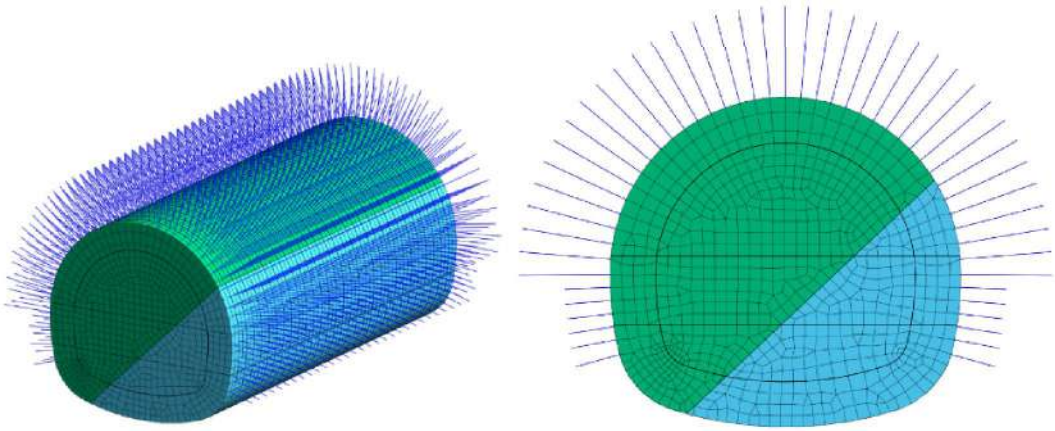
Bu durumu incelemek için sahadaki koşulları gerçeğe yakın modeller oluşturabilmek amacıyla 3 boyutlu modellemeye imkân veren Midas GTS NX yazılımı kullanılmıştır. Oluşturulan modellerdeki jeolojik birimlere ait parametreler Mühendislik jeolojisi başlığında belirlenmiş olup, Başlık 3'te sunulmuştur. Jeolojik modeller 300 m genişlikte, 233 m yükseklik ve 30 m derinlikte olacak şekilde oluşturulmuştur. Jeolojik malzeme dört yüzeyli piramit ve altı yüzeyli çokgen ile birlikte tanımlamaya imkân veren 'hybrid mesh' (126712 sonlu eleman, 80787 düğüm) ile oluşturulmuştur (Şekil 4). Analizlerdeki kazı aşamaları üst yarı, alt yarı ve taban olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4: Midas GTS-NX ile oluşturulan 3D jeolojik modeli

İncelenen kesitte proje firması tarafından Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrasına göre 'Baskılı' kaya kütlesi olarak adlandırılan, orta derecede fakat belirgin olarak uzun süren ve yavaş son bulan deplasmanların gözlendiği, derine inen plastik zonların ve davranışların gözlendiği kaya kütleleri için önerilen C2 destek sistemi belirlenmiş ve uygulanmıştır.

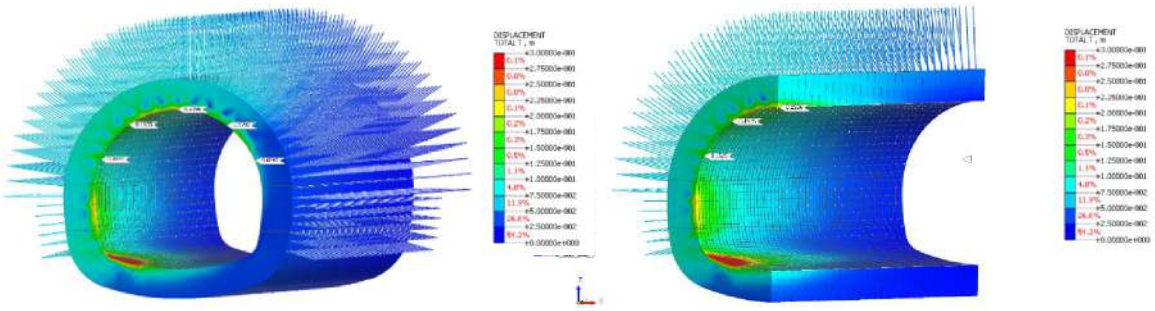
T3 tünelinde kazı çalışmaları sırasında düzenli olarak kaydedilen konverjans ölçümlerindeki deformasyon değerleri, ortamdaki 3 boyutlu gerilme durumunun tünele etkilerini belirleyebilmek adına deplasman değerlerini sağlayan k değeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayna fotoğrafları ve haritaları ile birlikte tünel imalat aşamaları (kazı, bulon, süren yerleşimi gibi) sırasında karşılaşılan şist ve kireçtaşı birim sınırı dikkate alınarak, güzergahı temsil eden jeolojik modeller hazırlanmış (Şekil 5) ve farklı k değerlerindeki analizlerde elde edilen deplasman değerleri Çizelge 3'da sunulmuştur. Analiz edilen modellerden elde edilen sonuçlarda k:2.0 gerilme oranı değerinin (Şekil 6), sahadaki deformasyonlara (sol:0,210 m, tavan:0,070 m, sağ: 0,080 m) en yakın sonuçları verdiği (sol:0,153 m, tavan:0,234 m, sağ: 0,080 m) bulunmuştur (Şekil 7).



Şekil 5: T3 tüneli C2 destek sistemi ile oluşturulan model

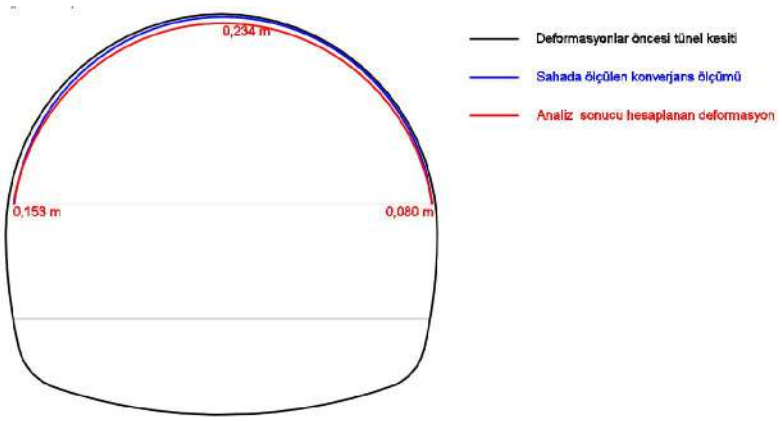
Çizelge 3:Saha Deformasyonları – Analiz Deformasyonları karşılaştırması

Deformasyonlar	**Sol** *(metre)*	**Eksen** *(metre)*	**Sağ** *(metre)*
Sahada Okunan Deformasyonlar	0.210	0.070	0.080
Hesaplanan Deformasyonlar – k:0,5	0,017	0,004	0,003
Hesaplanan Deformasyonlar – k:1,0	0,019	0,007	0,002
Hesaplanan Deformasyonlar – k:1,5	0,038	0,099	0,024
Hesaplanan Deformasyonlar – k:1,6	0,040	0,078	0,033
Hesaplanan Deformasyonlar – k:1,7	0,073	0,103	0,040
Hesaplanan Deformasyonlar – k:1,8	0,100	0,140	0,059
Hesaplanan Deformasyonlar – k:1,9	0,103	0,204	0,075
Hesaplanan Deformasyonlar – k:2,0	0,153	0,234	0,080
Hesaplanan Deformasyonlar – k:2,2	0,097	0,219	0,098
Hesaplanan Deformasyonlar – k:2,5	0,709	0,190	0,153
Hesaplanan Deformasyonlar – k:3,0	0,213	0,269	0,109



Şekil 6: (k:2.0) gerilme oranında analizler sonucu elde edilen deplasman değerleri.

Literatürde mevcut olan ampirik yöntemlerden bazıları (Zhang, 2017) kullanılarak hesaplanan değerler ile geri analizler sonucunda belirlenen k:2.0 değeri ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4).



Şekil 7: Yerinde gerilme oranının (k:2.0) verildiği durumda elde edilen deplasman değerleri

Çizelge 4: Ampirik ve nümerik analiz gerilme oranı değerlerinin karşılaştırılması

Referans	Eşitlik	Hesaplanan k değeri	Geri analiz k değeri
Van Heerden (1976)	k=0.448+248/z	3,37	2,00
Hoek ve Brown (1980)	k_{min}=0.3+100/z < k < 0.5+1500/z	1,48	2,00
	k_{max}=0.3+100/z < k < 0.5+1500/z	18,15	2,00
Li (1986)	σ_{have}=0.72+0.041*z	1,83	2,00
Rummel (1986)	k_{max}=0.98+250/z	1,71	2,00
	k_{min}=0.5+150/z	0,99	2,00
Haimson (1977)	σ_{hmax}=(4.6+0.025*z)	2,93	2,00
	σ_{hmin}=(1.4+0.018*z)	1,28	2,00
Herget (1986)	k=1.25+267/z	4,39	2,00
	k_{max}=1.46+357/z	2,47	2,00
	k_{min}=1.10+167/z	1,34	2,00
Hast (1958)	σh_{max}=9.1+0.0724*z	6,65	2,00
	σh_{min}=5.3+0.0542*z	4,32	2,00
Lim ve Lee (1995)	σ_{have}=1.858+0.018*z	1,48	2,00
	σ_{have}=2.657+0.032*z	2,34	2,00
Kang et al. (2010)	k=0.7+116.5/z	2,07	2,00
Xu vd. (2015)	σh_{max}=2.0*γ*z	2,00	2,00
	σh_{min}=1.30*γ*z	1,30	2,00
Stephansson (1993)	σh_{max}=2.8+0.0399*z	2,70	2,00
	σh_{min}=2.2+0.0240*z	1,85	2,00
Terzaghi ve Richard (1952)	k_{min}=100/z + 0.30 < k < 1500/z + 0.50	1,48	2,00
	k_{max}=100/z + 0.30 < k < 1500/z + 0.50	18,15	2,00
Sheorey (1994)	k=0.33+9.50*E_h*(0.001+1/z)	3,60	2,00

5. SONUÇLAR

T3 tüneli güzergâhı boyunca yapılmış olan sondaj, jeofizik ölçümler, yerinde ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak şist ve kireçtaşı birimlerinin Hoek-Brown yenilme kriterine göre malzeme parametreleri ve kaya kütle sınıfları belirlenmiştir. Kazı çalışmaları sırasında tespit edilen konverjans ölçümlerinde yüksek deplasman değerleri belirlenmiş olup, çalışma alanındaki gerilme oranını (k) kestirebilmek adına ISRM tarafından (Stephansson ve Zang,2012) önerilen yöntemlerden biri olan nümerik geri analiz yöntemi tercih edilmiştir. Bu metot ile yerinde gerilmelerin kestirilmesine ilişkin (Eberhardt ve Stead, 2011) tarafından yapılan çalışmada yöntemin avantajlarının kazı sırasında elde edilen verilerin kullanılarak direkt sonuca ulaşılabilmesi, büyük kaya hacmi nedeniyle yüksek kesinlikte sonuçlar olması ve düşük maliyetli olması iken, dezavantajı olarak teorik

bir metot olması nedeniyle özgün olmadığı belirtilmiştir. İnceleme alanının jeolojik koşullarına uygun, farklı k değerlerindeki modeller analiz edilmiş ve sahadaki deformasyonlara en yakın sonuçları veren gerileme oranı (k:2.0) tespit edilmiştir. Literatürde mevcut olan ampirik eşitlikler ile analizler sonucu hesaplanan gerilme oranı değerleri karşılaştırılmış ve genel olarak analiz sonuçlarında. ISRM tarafından önerilen yerinde gerilme ölçümü deneylerinin uygulanması, daha kesin ve güvenli sonuçlar elde edilmesi açısından daha uygun metotlardır.

6. KATKI BELİRTME

Yazarlar, Midas GTS NX yazılımının öğrenilmesinde ve model kurulumundaki desteklerinden ötürü İnşaat mühendisi Ayşegül ÇETİN'e teşekkürü borç bilir.

7. KAYNAKLAR

Alp, D. (1972). Amasya yöresinin jeolojisi. *İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Monografileri*(22), 10.

Arpat, E., & Şaroğlu, F. (1975). Türkiye'deki bazı önemli genç tektonik olaylar. *Türkiye Jeoloji Kurumu (TJK) Bülteni (1973) - sözlü bildiri*, (s. 91-101).

Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., & Minami, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*(44), 247-265. doi:DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.07.005

Eberhardt, E., & Stead, D. (2011). Geotechnical Instrumentation. P. Darling (Dü.) içinde, *SME Mining Engineering Handbook* (Cilt 3, s. 551-572). Society for Mining, Metallurgy & Exploration.

Goodman, R. E. (1980). *Introduction to Rock Mechanics.* Wiley, New York.

Haimson, B. C. (1977). Recent in-situ stress measurements using the hydrofracturing technique. *The 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS).* Colorado: Johnson Publisher.

Harrison, J., & Freng, J. (1997). Chapter-3: Stresses, Chapter-4: In-situ rock stress. *Engineering rock mechanics: Part2* (s. 27-37, 39-56). içinde

Herget, G. (1987). Stress assumption for underground excavation in the Canadian shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 24*, 95-97.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground Rock Mechanics.* London, UK: Instution of Mining and Metallurgy.

Kang, H., Zhang, X., Si, L., Wu, Y., & Gao, F. (2010). In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China. *Engineering Geology, 116*, 333-345.

Karayolları Genel Müdürlüğü;. (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi - Yol altyapısı, Sanat yapıları, köprü ve Tüneller, Üstyapı ve çeşitli işler.* Karayolları Genel Müdürlüğü.

Ketin, İ. (1948). Die grossen anatolischen Erdbeben in den letzten zehn Jahren. Urania,. *Geol. Rund., Band. 36.*

Li, F. (1986). In-situ stress measurements, stress state in the upper crust and their application to rock engineering. *Proceedings International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements* (s. 69-77). Stockholm: Centek Publishers, Lulea.

Lim, H. U., & Lee, C. I. (1995). Fifteen years experience on rock stress measurements in South Korea. *Proceedings: International Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth*, (s. 7-12). Tokyo, Japan.

Rummel, F. (1986). Stresses and tectonics of the upper continental crust - a review. *Proceedings International Symposium on Rock Stress Rock Stress Measurements* (s. 177-186). Stockholm: Centek Publishers, Lulea.

Sheorey , P. R. (1994). A theory for in-situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 31*, 23-34.

Stephansson, O. (1993). Rock stress in the Fennoscandian shield. J. Hudson içinde, *Comprehensive Rock Engineering - Priciple, Practice & Projects* (Cilt 3, s. 445-459). Oxford, UK: Pergamon.

Stephansson, O., & Zang, A. (2012). ISRM Suggested Methods for Rock Stress for Rock Stress Estimation - Part-5: Establihing a Model for the In Situ Stress at a Given Site. *Rock Mech. Rock Eng.*(45), 955-969. doi:10.1007/s00603-012-0270-x

Terzaghi, K., & Richart, F. E. (1952). Stresses in rock about cavities. *Geotechnique, 3*(2), 57-90. doi:doi.org/10.1680/geot.1952.3.2.57

Van Heerden, W. L. (1976). Practical application of the CSIR triaxial strain cell for rock stress measurements. *Proceedings ISRM Symposium on Investigation of Stress in Rock, Advances in Stress Measurement* (s. 1-6). Sydney: The Instution of Engineers, Australia.

Xu, T., Han, X., & Yin, J. (2015). Arrangement of grouns stress test and the evaluation of the stress in long highway tunnel . *Proceedings 2015 Academic Annual Meeting of the NAtional Highway Tunnel* (s. 136-141). Chongqing University Press.

Zhang, L. (2017). Chapter 2: In-situ stresses. L. Zhang içinde, *Engineering Properties of Rocks* (s. 19-38).

Yeraltı Boşlukları Etrafındaki Yüklenme Mekanizmasının Statikten Dinamik Davranışa Doğru Etkileşiminin Değerlendirilmesi

Historical Evolution of the Loading Mechanism Around Underground Cavities Based on Static and Dynamic Behaviors

H.O. Dönmez[1,*], H. Tunçdemir[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul*
*(*donmezhu@itu.edu.tr)*

ÖZ: Yeraltında herhangi bir amaçla açılacak boşluk için bilinmesi gereken en önemli parametreler açılacak boşluğa etkiyecek yüklerin ve buna karşılık oluşan yer değiştirmelerin tayinidir. Tavan yükünün tayiniyle ilgili yapılan ilk çalışmalar bundan 90 yıl öncesine dayanmaktadır Yıllar içerisinde araştırmacılar bu konu üzerinde çalışarak gerçeğe yakın tavan yüklerinin tahmin edilmesine katkı sağlayan statik teoriler geliştirmişlerdir. Bunlar deterministik olarak genellikle yer altı boşluğunun geometrisine ve kaya yapılarına göre önerilmiş yaklaşımlardır. Ancak tarihsel gelişim içerisinde tavan yüklenme mekanizmasının zamana bağlı olarak değişen dinamik bir hareket mekanizması içinde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu çalışmanın amacı tavan yükünün tahmininde kullanılan statik teorilerle son 20 yılda gelişen dinamik teoriler arasındaki ilişkinin ortaya konulması ve mekanik parametreler arasındaki ilişkinin aynı tahkimat kullanılan ve farklı yükleme koşulları altındaki arazi gerilmeleri bulunan ortamlar açısından irdelenmesidir.

Anahtar Kelimeler: Tavan yükü, yeraltı madenciliği, tünelcilik

ABSTRACT: *The most important characteristic features of the cavity to be opened for any purpose underground are the determination of the loads affecting the space perimeter to be opened and the displacements occurring in return. The first studies on the determination of loads date back 90 years. Over the years, researchers have worked on this topic and developed some of the static theories contributing to the estimation of roof loads that are close to reality. These theories are approaches that have been proposed deterministically, generally according to the geometry of the underground space and rock structures. However, in the historical development, it has been understood that the roof loading mechanism was realized in a dynamic movement mechanism that changes depending on time. The aim of this study is to reveal the relationship between the static theories used in the prediction of the roof load and the dynamic theories developed in the last 20 years and to examine the relationship between the mechanical parameters in terms of environments where the same reinforcement is used and ground stresses under different loading conditions.*

Keywords: *Roof load, underground mining, tunneling*

1. GİRİŞ

Bir yeraltı mühendislik yapısında arzu edilen en önemli husus yapının kullanım ömrü boyunca güvenli bir şekilde ayakta kalmasını sağlamaktır. Bu bağlamda planlama aşamasında doğru tahkimat sisteminin seçimi büyük önem arz etmektedir. Seçilecek tahkimat sistemi taşıyıcılık ve ekonomiklik olmak üzere iki ana şartı birlikte sağlamalıdır. Doğru tahkimat sisteminin seçilebilmesi ve boyutlandırılabilmesi için öncelikle tahkimat sistemine etkiyecek yüklerin belli bir yakınsaklıkla ortaya konulması gerekmektedir.

Tavan yüküne ait geliştirilen ilk teoriler bu alanda çalışan mühendislerin tecrübelerine dayanıyordu. Zaman içerisinde mühendisler bu tecrübelerini sayısal verilere dönüştürdü ve birçok araştırmacı bu verilerden yola çıkarak tavan yüklerini hesaplayan teoriler geliştirdi. Yapılan ilk çalışmalarda (Protodyokanov, 1926 ve Terzaghi, 1946) çalışılan kaya ortamı için sabit bir yük değerinin belirlenmesini sağlayan bağıntılar yer almaktadır. Bu yaklaşımlara göre açılacak yeraltı boşluğunun üzerinde oluşan yük sabit olarak değerlendirilmekte ve tahkimat tarafından taşınması gereken yük

miktarı buna eşit olarak kabul edilmektedir. İkinci bölümde özetlenen ve yıllar içinde bu yayında ele alınan konuyla ilgili temel çalışmalar sonucunda kayanın yüklenme mekanizmasının dinamik bir karakter içerdiği ortaya konulmuştur (Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000, Taghizadeh vd. 2020).

Bu çalışmada kaya yükü teorilerinin yıllar içerisindeki gelişimi incelenerek, aynı ortam için geliştirilen statik ve dinamik teorilerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki ortaya konulmuştur. Kaya yükü belirlenirken dikkate alınan mekanik parametreler belirlenmiş ve bunların birbirleriyle olan ilişkileri incelenmiştir.

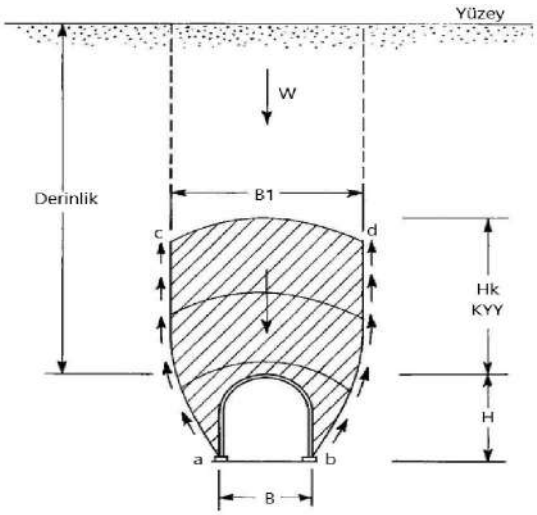
2. TAVAN YÜKÜ TEORİLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Tavan yükü kazı ile açılmış bir yer altı boşluğu çevresindeki boşluğa doğru etkiyen yük olarak tanımlanmaktadır. Protodyokanov 1926'da bu yükü trapez şekilli yerleştirilmiş ağaç tahkimatlarla donatılmış yer altı boşluklarının tavanında oluşan yükler olarak tanımlamış ve bu yükün trapez taşıyıcı üst elamanı boyunca (aynı zamanda tavan boyunca etki altında kalan galeri açıklığı da denebilir) etkiyen bir yayılı yük olduğu ve galerinin üzerinde oluşan bir parabolik domun tahkimatı yük altına aldığını ifade etmiştir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalarda (Protodyokanov, 1926 ve Terzaghi, 1946) kazı sırasında gevşeyen ve tahkimat tarafından desteklenecek kaya kütlesinin tünel tavanından yukarı doğru olan yüksekliğini tespit etmek amaçlanmıştır. Böylece birim metrekarede etkiyen yükleme zonunun hacmi belirlenerek tahkimata etkiyen yükler tespit edilerek bir güvenlik katsayısı ile uygun taşıyıcılığa sahip tahkimat elemanları tesis edilebilmektedir. 1946'da Terzaghi tarafından bu amaçla yapılan çalışmada Alplerde incelenen çelik bağ tahkimatlı tünellerden elde edilen veriler derlenerek "Kaya Yükü Yüksekliği" (KYY, Hk) kavramı ortaya atılmıştır. Terzaghi gözleme dayalı olarak yaptığı incelemeler sonucunda oluşturduğu 9 kaya kütlesi sınıfı için minimum ve maksimum kaya yükü yüksekliğini belirleyerek (Çizelge 1) ve oluşturduğu modeli (Şekil 1) kullanarak tahkimata etkiyecek kaya yükünü tanımlamıştır. Burada önemli olan nokta tünel geometrik boyutlarının (B: genişlik, H: yükseklik) belirleyici faktörler olarak ele alınmasıdır. Tünel tavanındaki kaya sert ve sağlamsa Hk ile oluşmuş desteklenmesi gereken yükün aslında hiç olmadığı (kaya ortamının kendi kendini tutabildiği, bu yüzden de herhangi bir tahkimata bile gerek duyulmayabileceği), ancak kaya içerisindeki örselenmeler (tabakalanma, eklemlenme, bozunma, aşırı gerilmelerle ezilme vb.) başladığında Hk mesafesinin tünel geometrik boyutlarının belirli bir oranda katı ile artmaya başladığı anlaşılmaktadır. Aslında Protodyokanov (1926)'nın parabol olarak tanımladığı bu zonun kaya yapısı ile dramatik bir değişiklik göstererek artabileceği Terzaghi (1946) tarafından vurgulanmıştır. Bugünkü dinamik yükleme mekanizmaları tarafından da doğrulanan bir teori olarak önemle irdelenmesi gereken bir yaklaşım olmayı sürdürmektedir.

Çizelge 1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması (Terzaghi, 1946).

Kaya kütlesi sınıfı	Kaya yükü yüksekliği (Hk)	
1. Sert ve sağlam	0	
2. Sert, tabakalı	0 - 0.5 B	
3. Orta derece eklemli	0 - 0.25 B	
4. Orta derece eklemli ve bloklu	0.25 B - 0.35 (B+H)	Yeraltı suyu seviyesi galeri tavanından aşağıda ise önerilen Hk değerinin yarısı alınır.
5. Çok bloklu ve damarlı	(0.35 - 1.1) (B+H)	
6. Tamamen ufalanmış, atmosferik bozunma yok	1.1 (B+H)	
7. Sıkışan ezilmiş kaya	(1.1 - 2.1) (B+H)	Orta derinlik
8. Sıkışan ezilmiş kaya	(2.1 -4.5) (B+H)	Büyük derinlik
9. Şişen, kabaran, killi kaya ve zemin	75 metreye kadar	B ve H'den bağımsız

Bu yaklaşım diğer araştırmacılar tarafından da kabul görmüş ve tavan yük yaklaşımları genellikle tünel geometrik boyutları, daha sonraki ampirik tavan basıncı hesaplamalarında da etkin parametreler olarak ele alınmıştır. Örneğin, Stini tarafından (1950) yaklaşık 5 metre açıklıklı galeri veya tüneller için kaya yükü yükseklikleri belirlenmiştir. Ayrıca açıklığı 5 metreden farklı olan galeri veya tüneller için de kaya yükü yüksekliğini hesaplayabilecek bir bağıntı önermiştir.



Şekil 1. Terzaghi'nin kaya yükü kavramının basitleştirilmiş bir açıklaması (Terzaghi, 1946).

Aynı tarihlerde Rabrewicz (1948)'de patentini de aldığı Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (YATAY)'ın da temellerini attığı çalışmalarında tavan yüklerini açılan boşluk çevresinde oluşan birincil (doğal, ilkel), ikincil (kazı sebebiyle değişen gerilmeler ve pslödoplastikleşme) ve üçüncül gerilmeler (servis yükleri) cinsinden açıklamış ve tünel çeperinde destekleme ve sağlamlaştırma elemanları ile gerilme kemerlenmesi oluşturulduğunda ancak ortamın kendi kendini taşımasının mümkün olduğu aksi taktirde doğa tarafından iletilen bu gerilmeler sonucu oluşan yükleri taşımanın mümkün olamayacağı, gevşeyen zonun belirli bir sınırı aşmadan mümkün olan kısa zaman içinde desteklenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Müller (1978)'de YATAY ilkelerini listelediği çalışmasında hem sistemin o zamana kadarki gelişimini gözler önüne sermiş hem de bu felsefeyi ayrıntıları ile açıklayan çalışmasında tünel çevresinde oluşan gerilme yer değiştirme mekanizmasının gelişimini incelemiş ve bugünkü dinamik yöntemlerin esaslarının geliştirilmesinde temel alınan bir kaynak oluşturmuştur. Aynı zaman aralığında, Deere tarafından 1964 yılında değiştirilmiş karot verimi prosedürüne dayanan, sayısal bir indeksleme olan ve kendi başına bir kaya sınıflama sistemi olarak da kabul edilen kaya kalitesi göstergesi (RQD) geliştirilmiştir.1969 yılında Deere ve arkadaşları RQD indeksini kullanarak çapı 6-12 m arasında değişen tüneller için Terzaghi'nin KYY yaklaşımında kullanılacak değerlerde değişiklikler önermişlerdir.

Bu noktadan sonra tavan yükü belirlenmesinde kaya ortamı sınıflamasının da etkin rol oynadığını düşünen Wickham ve Tiedemann 1972-1974 yılları arasında inceledikleri 53 farklı tünel projesine ait 200'e yakın yapısal bölgeden yola çıkarak kaya yapısı puanı (RSR) sınıflandırma sistemini geliştirmiş ve tahkimat basıncını tünel çapı ve RSR'den faydalanarak tahmin eden bir bağıntı elde etmişlerdir. Sert kayalarda kazılan 200'den fazla yeraltı yapısını inceleyen Barton vd. (1974) tünel kaplamasına etki eden dikey ve yatay basınca dayalı bir ilişki tahmin edilebileceğini öne sürmüştür. Aynı zaman aralığı içerisinde, Bieniawski tarafından 1973 yılında geliştirilen jeomekanik kaya kütlesi sınıflandırma sistemi (RMR) ile yeraltı kömür açıklıklarındaki kaya yükünü hesaplamak için daha sonradan Ünal (1983) RMR, özgül ağırlık ve tünel açıklığına dayalı bir denklem önermiştir. Goel ve Jethwa (1991), Ünal tarafından önerilen ilişkiyi farklı koşullarda incelemişler ve çözümün kaya tünelleri için işlevsel olmadığı sonucuna varmışlardır. Elde edilen yüklerin, her koşulda, sıkışma alanlarında bulunan durumlar için uygunsuz ve güvensiz olduğunu açıklamışlardır. Terzaghi'nin teorisine dayanarak, Singh vd. (1995) hem dikey hem de yatay gerilmeleri dikkate alan kendi kaya yükü teorilerini önerdiler. Bhasin ve Grimstad (1996), zayıf kayalarda kaya yükü elde etmek için bir yöntem önermiştir. Osgoui ve Ünal (2009), destek basıncı ile jeolojik dayanım indisi (GSI) arasında bir ilişki olduğunu gösteren bir yayın yapmıştır.

Son on yılı da içine alan çalışmalardan Dehkordi vd. (2011), sıkışmayan bir zemin tarafından gevşetilen kaya yükünü tahmin etmek için yeni bir görgül yöntem geliştirmiştir. Bu kavrama dayanarak, Dehkordi vd. (2013) daha sonra sıkışan ortamlardaki kaya yükünü tahmin etmek için bir

ayrı bir yöntem önermiştir. Dwivedi vd. (2014) aynı durumda kaya yükü elde etmek için görgül bir çözüm önermiştir. Araştırmacılar elde edilen sonuçların, Q sınıflandırma sistemine göre önerilen denklemlerin sonuçlarıyla tutarlı olduğu sonucuna varmışlardır. Afshar vd. (2014) kaya yüküne etki eden parametreleri araştırmıştır. GSI değerinden hesaplanan örselenme faktörlerin ve kaya kütlesi niteliklerinin kaya yükü büyüklüğünü kontrol ettiğini belirtmişlerdir. Dehkordi vd. (2015) sıkıştırılmayan bir zeminde kaya yükü tahmini için kaya kütlesinin göçme sonrası özelliklerini kullanmışlardır. Araştırmacılar Kaya yükü ve düşme modülünü ilişkilendirerek, gevşemiş kaya yüklerini doğru bir şekilde değerlendirmek için kayaların düşme modüllerine göre sınıflandırılması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Bahsi geçen çalışmalarda yeraltında açılacak boşluğa etkiyen yükün sabit ve zamanla değişmediği varsayılmıştır. Halbuki tünel duvarı yer değiştirmelerinin izlenmesi ve ölçülmesi, deformasyonun kazı sırasında başladığını ve tünel inşaatı tamamlandıktan sonra bile uzun süre devam edebileceğini göstermiştir. Konverjans olarak da bilinen bu tünel duvarı hareketi hem tünel aynası ilerlemesinin hem de kaya kütlesinin zamana bağlı davranışının sonucudur. Birçok araştırmacı (Fenner, 1938; Parcher, 1964; Lombardi, 1975; Brown ve diğerleri 1983; Corbetta ve diğerleri 1991; Duncan-Fama, 1993; Panet, 1993, 1995; Peila ve Oreste, 1995; Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000; Alejano ve diğerleri 2009; Vrakas ve Anagnostou, 2014; Cai vd. 2015; Cui ve diğerleri 2015 vb.) bu konuda çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalardan en yaygın olarak kullanılanı konverjans sınırlama yöntemidir. Taghizadeh vd. 2020'de tavan yükünü ampirik, analitik ve nümerik yöntemler olarak sınıflamış ve konverjans sınırlama yöntemi ile tavan yükü belirleme yöntemini irdelemiştir.

Dinamik hareket mekanizmasının daha iyi anlaşılmaya başladığı Carranza-Torres ve Fairhurst (2000) tarafından önerilen konverjans sınırlama yöntemi (Convergence-Confinement Method) arazi ve tahkimat etkileşim analizi için kullanılan basitleştirilmiş bir yöntemdir. Konverjans sınırlama yöntemi tünel aynası gerisinde kalan açılmış tünel boşluğunu desteklemek için yapılacak tahkimata etkiyecek yükleri tahmin eden bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Kazı aynasında hemen kurulan tahkimat arın çevresinde oluşan tüm yükleri taşımayacaktır. Burada aslında kazılmamış ayna taşıyıcı bir dayanak gibi görev yapmaktadır. Bu da gerek ayna gerekse kazı çeperi için kazı çevresinde oluşan yüklerin bir kısmının kazılmamış kaya kütlesi tarafından taşındığını göstermektedir. Tahkimatın kurulması ve arın ilerlemesinden sonra arın etkisi azalacaktır. Arın tarafından taşınan toplam yükün bir bölümü ancak tahkimat tarafından taşınacaktır. Tahkimat tarafından taşınan bu yük tahkimat tasarım yükü olacaktır (Carranza-Torres ve Fairhurst 2000). Bu davranışın izlerini aslında "kaya tünelleri için arazi tepkime eğrisinin" tanımlandığı Brown vd.'nin 1983'te yayınlamış olduğu yayında da görmek mümkündür. Bu çalışmada teorik olarak homojen ve izotrop bir ortamda açılmış olan dairesel bir tünel çevresinde oluşan daralma olarak tanımlanan konverjans ile tahkimat basıncı arasındaki ilişki irdelenmiş ve yer değiştirmelerin tünel çevresinde halihazırda bulunan yerindeki (in-situ) arazi basıncının tünel boşluğuna doğru baskısı sonucu oluşan bir daralma olduğu öne sürülmüştür. Bir geometrik boyut olarak tünel yarıçapı ve bu daralmanın yarıçapa oranının konverjans olarak tanımlandığı çalışmada oluşturulan "arazi tepkime eğrisi" bu toplam konverjans değeri ile doğal yerinde arazi gerilmesi arasındaki ters orantılı ilişki olarak tanımlanmış ve arazi gerilmeleri sıfırlanana kadar bu davranışın devam ettiği ifade edilmiştir (Fiziksel olarak tanım; azalarak etkimeye devam eden yük sıfırlanıp ortadan kalkana kadar yer değiştirmenin devam ettiği; bu yükün ancak sıfırlandığında nihai toplam yer değiştirme oluştuğu savunulmaktadır).

Yapılan tüm bu çalışmalar ve bu yayının kapsamında değinilemeyen diğer bazı çalışmalar göstermiştir ki kazı sonucu oluşan boşluk çevresindeki yüklenme mekanizmasını "kazı öncesi", "kazı sırasında destekleme öncesi", "kazı sırasında destekleme ve sağlamlaştırma sonrası" ve "uzun zamana bağlı destekleme sonrası" gibi evrelere bölmek daha doğru olup bu aşamalar aslında statik yükleme durumu ile dinamik yüklenme durumu arasındaki geçişi de ifade etmektedir. Bu yüklenme mekanizmalarının da ayrı ayrı incelenerek yeraltı açıklığının tasarımlandırılması ise mantık dahilinde olan bir mühendislik davranışı olacaktır. Bu çalışmada ise statik yükleme (tek bir yük değerine göre yapılan) tasarımlar ile dinamik yükleme (ortamda gerilmeye bağlı oluşan deformasyonlar sonucu oluşan

gevşeme ile gerilmelerde de azalma olması ve bunun iteratif bir şekilde yukarıda tırnak içinde verilen aşamalar boyunca devam etmesi) ile ilgili bir analiz denemesi yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

3. YAPILAN ANALİZLER

Bu çalışma kapsamında ele alınan homojen ve izotrop bir kaya ortamı için statik ve dinamik teorilerden yola çıkılarak çeşitli analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır. Kaya ortamı için kullanılan mekanik parametreler Çizelge 2'de verilmiştir. Aynı kaya ortamı için belirlenen parametrelerden sadece tünel derinliğinin değiştirilmesi ile statik ve dinamik teorilerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sadece tünel derinliğinin değiştirilmesinin sebebi ise yerindeki gerilmeler değiştiğinde aynı geometrik boyuttaki bir tünel çevresinde oluşan konverjans sınırlama davranışının nasıl tepki vereceğini görmek buna karşılık oluşan arazi tepkime eğrisindeki değişiklikler ve kullanılan aynı tip tahkimat karşısında tünel tasarım parametrelerinden olan tahkimat basıncı, güvenlik faktörü ve plastik bölge yarıçapındaki değişikliklerin irdelenmek istenmesidir. Aynı yöntemle elde edilen ve tahkimata üzerine gelen hareketli tahkimat basıncı ile de statik yöntemlerden elde edilen tahkimat yükleriyle oluşan basınçlar da karşılaştırılacaktır.

Çizelge 2. Kaya ortamı ve çözüm için kullanılan parametreler.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Tünel çapı (m)	5	Birim hacim ağırlığı (MN/m^3)	0,027
Tünel derinliği (m)	25, 50, 75, 100, 125, 150	Çözüm yöntemi	Carranza-Torres (2000)
Young modulü (MPa)	446	Analiz tipi	Deterministik
Poisson oranı	0,3		

3.1. Statik Yöntem Analizleri

Tahkimat tarafından desteklenmesi gereken yükün zamana bağlı olarak değişmediğini kabul eden teorilerde galeri veya tünelin yüksekliği ve genişliğinden yola çıkarak açıklığın çevresinde gevşetilen kaya miktarı ortaya konulmaya çalışılmış ve bu gevşeyen kaya miktarının oluşturacağı yükün tahminine dayalı formüller üretilmiştir. Çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen bu bağıntılar aynı kaya ortamı için uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Bazı statik sonuç veren teorilerden elde edilen sonuçlar.

Araştırmacı	Parametreler	Formül	Hesaplamalar	Sonuç (MPa)
Protodyakonov (1926)	σ_b, L, γ	$P = K.L.\gamma$ $K = \sigma_b/100$	$P = (50/100)*10*2.7$	0,135
Terzaghi (1946)	RQD, L, γ	$P = n.L.\gamma$ $n = 2.81.e^{-0.0281xRQD}$	$P = (2.81*e^{-0.0281*50})*10*2.7$	0,187
Deere (1969)	L, h, γ	$P = 0.2\sim0.6(L+h).\gamma$	$P = 0.4*(10+5)*2.7$	0,162
Birön -Arıoğlu (1985)	α, γ, L	$P = \alpha.L.\gamma$	$P = 0.5*10*2.7$	0,135
Ünal (1983)	RMR, L, γ	$P = ((100-RMR)/100).\gamma.L$	$P = ((100-50)/100)*2.7*10$	0,197

σ_b: Laboratuvar tek eksenli basınç dayanımı (kg/cm^2), L: Kazı açıklığı (m), γ: Kaya yoğunluğu (t/m^3), RQD: Kaya kalite değeri, h: Yükseklik (m), K: Gevşeme yüksekliği katsayısı, n: Yük veren yükseklik faktörü, α: Yükleme faktörü, RMR: Kaya kütle puanı

3.2. Dinamik Yöntem Analizi

Dinamik analiz için seçilen yöntem Carranza-Torres vd. (2000) tarafından önerilen konverjans sınırlama yöntemidir. Konverjans sınırlama yöntemi, tünellerde kaya-tahkimat etkileşimini desteklediği için üç boyutlu problemleri simüle etmek için kullanılabilen iki boyutlu basitleştirilmiş bir yaklaşımdır. Daha spesifik olarak, konverjans sınırlama yöntemi, önerilen destek sisteminin gerekli yük kapasitesini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Paraskevopoulou vd., 2017). Yöntem esas olarak arazi tepkime (reaksiyon) eğrisi ile tahkimat karakteristik eğrilerini bir arada

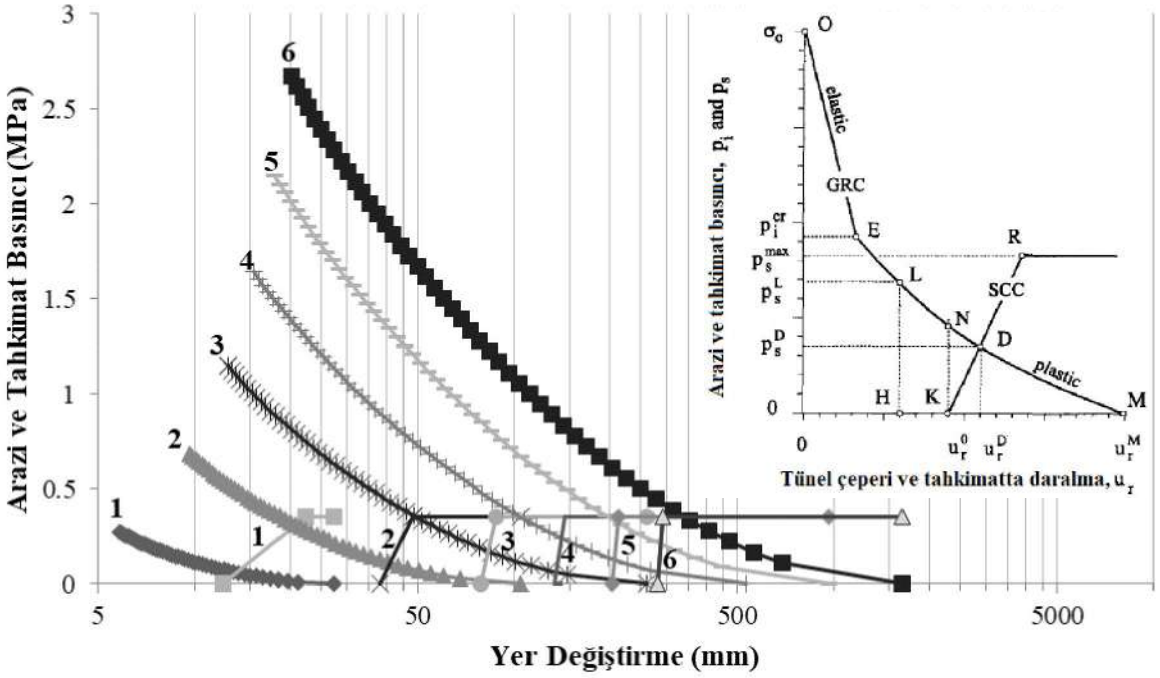
inceleyip kayanın dinamik yüklenme mekanizmasını ortaya koyarak, toplam yer değiştirme miktarını ve tahkimata etkiyecek yük miktarını tahmin etmektedir. Ancak çalışılan kaya ortamı büyük olasılıkla heterojen bir yapıya sahip olacağından homojen (her noktasında aynı özellik gösteren) ve izotrop (yön bağımlı olmayan) ortamlar için yapılan bu çözümlerin fikir vermesi için ve dikkatle kullanılmasının gerektiği burada önemle vurgulanmalıdır.

Aynı ortam için artan derinlikler ve buna bağlı olarak artan arazi basıncı altında analizler yapılmış, artan derinliğin tahkimat üzerinde oluşturduğu yük ortaya konulmuştur. Aslında buradaki hedef her ne kadar derinlik ile birincil arazi gerilmelerinin artması sonucu oluşan sonraki yer değiştirmeleri ele alınan yöntemle belirlemek olsa da arazi gerilmeleri sadece derinlik ile değil kaya çevresinde oluşan örselenme zonları tarafından da artabileceğinden her iki durumunda incelemesi olarak düşünülmelidir. Analizlerde tünelin dairesel olduğu, bu tünele hidrostatik (her yönde aynı değerde) gerilmelerin etkidiği ve kaya kütlesinin homojen-izotrop olduğu varsayımları kabul edilmiş, Carranza-Torres vd. (2000) tarafından önerilen konverjans sınırlama yöntemini esas alan RocSupport yazılımından yararlanılmıştır. İlgili yayında ele alınan parametreler ve önemli noktalar Şekil 2'de gösterilmiş ve aşağıda listelenmiştir.

RocSupport yazılımında 5 metre yarıçaplı bir tünel için 25, 50, 75, 100, 125 ve 150 metre derinliklerde 1 metre aralıklarla 3 metre uzunluğunda aynadan 2 metre geride yerleştirilen kaya bulonları kullanılarak oluşturulan arazi reaksiyon eğrileri (GRC) karşılaştırılmıştır (Şekil 2). Eğrilerden elde edilen veriler Çizelge 3'te özetlenmiştir. Bunun yanında güvenlik katsayısındaki değişimleri sayısallaştırmak için aynı tip sağlamlaştırma elemanı (Çapı: 34 mm, boyu: 3 m, taşıyıcılığı : 0.354 MN) kullanıldığında nasıl bir yer değiştirme mekanizması ile karşılaşıldığı Şekil 2'de görselleştirilmiştir. Burada şekil üzerine işaretlenmiş 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaraları bu paragrafın ilk satırında belirtilen derinliklerde oluşan ilgili yerinde arazi gerilmeleri (σ0, O noktası) sonucu meydana gelen "arazi tepkime (karakteristik) eğrilerini (ground reaction curve (GRC))" ve yer değiştirmeyi (u) sınırlamak için buna karşılık yerleştirilen sağlamlaştırma elamanı saplamaların "tahkimat tepkime (karakteristik) eğrilerini (support characteristic curve (SCC)) (aslında pratikte doğru olarak çizilirler)" göstermektedir.

Şekil 2'de x ekseni; seçilen tüm gerilme-yer değiştirme koşullarını aynı grafikte gösterebilmek (büyük yer değiştirme değerleri ile küçük olanları birlikte göstermek) için logaritmik olarak ayarlanmıştır. Bu yüzden de arazi tepkime eğrileri sıfır yer değiştirme değeri olan yerinde arazi gerilmeleri (σ0, O noktası) (Çizelge 4'teki arazi gerilmesi kolonundaki değerler) değerinin bulunduğu y eksenindeki noktalara kadar uzanmamaktadır. Şekil 2 de u_r^0; tahkimat yerleştirildiği andaki (K noktası (tahkimat yerleştirildiğinde üzerinde herhangi bir yük yoktur, K noktası y ekseni ordinat değeri bu nedenle sıfır)) tünel çeperindeki kazı ile tahkimat yerleştirilene kadar geçen zaman içerisindeki daralmayı göstermektedir. Tahkimat yapılmamış olsaydı tünel M noktasındaki u_r^M maksimum yer değiştirme noktasına kadar daralacaktı (Bu noktada yer değiştirmeye yol açan açıklık çevresindeki gerilme sıfıra yakınsamış olacağından artık yer değiştirme olamaz ve tünel daralması en yüksek değerine ulaşmış olur). u_r^D ise tahkimat yapıldığında D noktasında, denge durumundaki tahkimat tarafından sınırlanarak daha fazla yer değiştirmeye izin verilmeyen yer değiştirme değerini göstermektedir. Yani tünel çeperi boyunca yerleştirilen tahkimat (saplama) ters yönde bir direnç göstererek ve etkilenme zonunu (Çizelge 4'te verilen plastik bölge yarı çapı ile anılan parametre) sıkıştırarak açıklık çevresinin tünel içerisine doğru daralmasını engelleyen tünel çeperindeki kaya ortamını içine alan bir kemer oluşturur ve bu plastik zonun daraltılmasına da yardımcı olur. Ancak kullanılan tahkimat malzemesinin rijitliği (esnekliği), tipi (nokta tutuşlu, tam boy sürtünmeli vb), cinsi (saplama, püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa veya kombinasyonları) de bu noktanın grafik içerisinde sağa doğru kaymasına (D denge noktasındaki yer değiştirme miktarının artıp artmamasına) etki eden unsurlardır. D denge noktasında y ekseninden okunan basınç (p_s^D) ise tahkimat basıncı olup denge durumundaki tahkimatın üzerine gelen halihazırdaki yük olarak tanımlanmalıdır. Bu da tasarımda kullanılması gereken yükü oluşturan basınç olarak düşünülmeli ve Çizelge 3'teki statik yöntemlerle hesaplanan birim alana düşen yüklerle karşılaştırılabilir olan bir tahkimat basıncı olarak anlaşılmalıdır (Çizelge 4'te tahkimat basıncı kolonu

değişik arazi basınçları altında denge noktasındaki tahkimat basıncı değerlerini (y eksenindeki karşılık gelen değerleri) göstermektedir).



Şekil 2. Farklı derinlikler için arazi reaksiyon eğrileri ve "konverjans sınırlama yöntemi" tanımları.

Çizelge 4. Farklı derinlikler için elde edilen veriler.

Ortam no	Derinlik (m)	Arazi gerilmesi (MPa)	Yer değiştirme (mm)	Yer değiştirme genliği (%)	Güvenlik katsayısı	Plastik bölge yarıçapı (m)	Tahkimat basıncı (MPa)	Daralma miktarı (%)
1	25	0.675	13.87	50.52	6.32	7.29	0.06	0.28
2	50	1.35	41.22	39.31	3.2	9.46	0.11	0.82
3	75	2.025	83.3	32.03	2.06	11.48	0.17	1.67
4	100	2.7	140.42	26.43	1.46	13.38	0.24	2.81
5	125	3.375	211.51	21.83	1.1	15.15	0.32	4.23
6	150	4.05	338.59	20.67	0.85	17.9	0.35	6.77

Şekil 2'de bahsi geçen R noktasının ordinatı ise kullanılan tahkimatın maksimum taşıyıcılığını göstermektedir (Her ne kadar Carranza Torres, 2000'de bahsi geçmese de bu noktanın apsisi de tahkimat elemanının hiçbir zaman tam rijit olamayacağı için denge noktasından sonra tahkimat esnekliği sebebiyle oluşan yer değiştirme miktarını gösteriyor denilebilir). Zaten R noktasındaki tahkimat maksimum taşıyıcılık değeri ile tahkimat basıncı arasındaki oran da Çizelge 4'te verilen güvenlik katsayısının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu yayın kapsamında önerilen ve önemli olduğu düşünülen; Çizelge 4'te, "yer değiştirme genliği" olarak adlandırılan parametre ise daha önce ele alınarak irdelenmemiş ilgi çekici bir parametredir. Bu parametre Şekil 2'de görselleştirilen arazi karakteristik eğrilerindeki maksimum yer değiştirme noktalarının (M noktasındaki 6 değişik u_r^M değeri) denge durumundaki yer değiştirme değerlerine (K noktasındaki 6 değişik u_r^D değeri) bölünmesi ile bulunan değişimin yüzdesel gösterimidir. Bunun ele alınmasının sebebi ise farklı yüklenme ortamlarında aynı tahkimat elemanının ne kadarlık bir yer değiştirmeyi yüzdesel olarak engellediğini göstermek içindir. Dikkat çekici olan şey ise Çizelge 4'te görüldüğü gibi ortam çevresindeki yüklenme

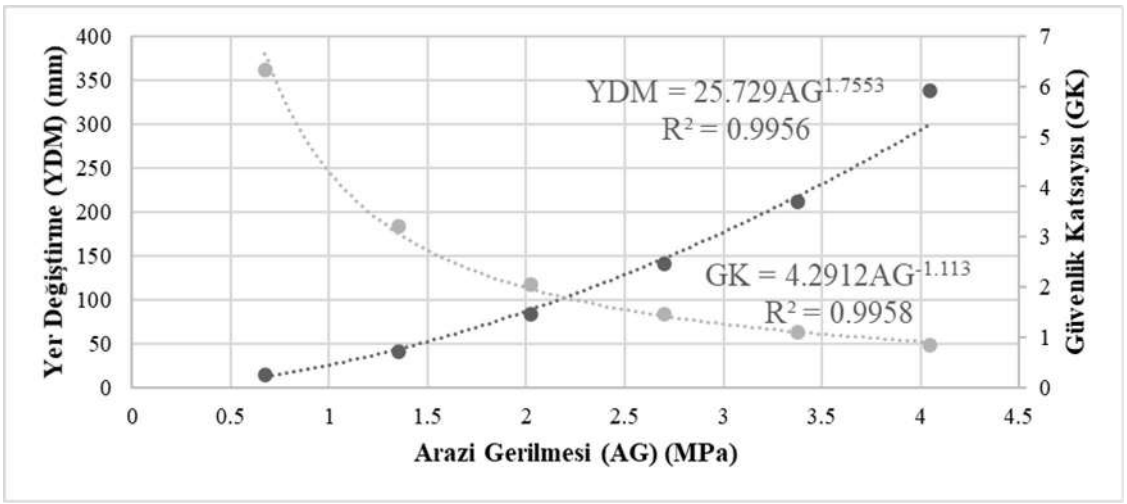
değeri arttıkça bu yer değiştirme genliğinin azalmasıdır. Başka bir deyişle ortam çevresindeki gerilme sonucu oluşan yüklenme değerleri arttıkça aynı tip tahkimat, yer değiştirmeyi -kendi yer değiştirme sınırları içerisinde- daha az sınırlayabilmektedir.

Şekil 2 ve Çizelge 4'ten de görülebileceği gibi 1 nolu ortamda güvenlik katsayısı çok yüksek (6,32) ve 2 nolu ortamda yüksek olduğundan aşırı boyutlandırma yapılmış gözükmekte, 3 ve 4 nolu ortamların uygun tasarımlandırma ile yapılmış olduğu anlaşılmakta, 5 nolu ortama güvenlik katsayısı denge durumuna çok yakın olduğu için dikkatle yaklaşılması gerektiğine ve 6 nolu ortam için ise güvenlik katsayısının yetersiz olduğu ve daha sağlam bir saplama elemanı seçilmesi, saplamalar arası mesafenin düşürülmesi ya da daha değişik sağlamlaştırma ve destekleme elemanlarının bir kombinasyonunun kullanılması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

3.3. Genel Değerlendirme

Analizlerde ortamdaki tüm jeomekanik parametreler sabit tutularak sadece derinliğe bağlı arazi basıncı artışı modellenmiştir. Ancak gerilme sonucu oluşan bu yük artışları kayanın jeomekanik özelliklerinin kötüleşmesi sonucu da oluşabilirdi. Yani çeşitli jeomekanik özelliklerin değişimi ile açıklık çevresinde oluşan basıncın da artabileceği göz önünde bulundurulduğunda Şekil 2'de oluşan arazi karakteristik eğrileri ile karşılaşmak mümkün olabilirdi.

Yer değiştirme genliği olarak ifade edilen değerler tahkimat yapılması halinde gerçekleşecek yer değiştirme miktarının tahkimatsız durumda oluşacak maksimum yer değiştirme miktarına oranını vermektedir. Bu durumda artan arazi basıncı altında azalan yer değiştirme genliği, gerçekleşecek yer değiştirme miktarının uygulanan tahkimat sistemi ile hangi oranda önleneceğini ortaya koymaktadır. Buna göre jeomekanik parametrelerin kötüleşmesi olsun ya da tünelin derinleşmesi sonucu olsun açıklık çevresindeki gerilmelerin artması ile yer değiştirme karakteristiğinin (arazi tepkime eğrisinin) değişim aralığı artmakta burada bahsi geçen yer değiştirme genliği değeri de gittikçe azalmaktadır. Bu da daha yüksek gerilmeli ortamlarda tesis edilen saplamaların daha az miktarda yer değiştirmeyi sınırlandırabildiği sonucunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Yer değiştirme ve güvenlik katsayısının artan arazi basıncı altında değişimi.

Çizelge 4'te verilen güvenlik katsayısı (GK) , denge noktasındaki yer değiştirme miktarı (YDM= u_r^p) ve arazi gerilmesi (AG) değerleri birlikte değerlendirildiğinde arazi gerilmesi arttıkça güvenlik katsayısının üssel olarak azaldığını ve denge noktasındaki yer değiştirme miktarının da üssel olarak arttığını göstermektedir (Şekil 3). Güvenlik katsayısının artan basınç altında azalması ve sabit olarak tutulan tahkimatın yetersiz kalması beklenen bir sonuçtur. Bu durumda 6 nolu arazi tepkime eğrisinin bulunduğu ortama kaya bulonlarına ilave olarak 1 m aralıklarla çelik iksa uygulandığında 1'in altındaki güvenlik katsayısının 2'nin üzerine çıkarılmış olması değişik kombinasyonlardaki tahkimatın

sistemi güvenli hale getirebileceğini de göstermektedir. Ancak sistemin teknik şartnamelerde belirtilen en fazla izin verilen yer değiştirme sınırlarının da altında olması gerekmektedir. Bugün şehir içinde açılan herhangi bir tünelin izin verilen en yüksek yer değiştirme değeri 100 mm olmalıdır. Bu durumda bahsi geçen ortamda her ne kadar güvenlik katsayısı 2 değerine çıkarılmış olsa da yer değiştirme miktarlarının 100 mm altına düşürülmesi için daha başka kombinasyonların kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Madenlerdeki tünellerde ise malzeme, üretim nakliyatın aksatacak bir şekilde kesit daralması olmadığında tüneldeki bu yer değiştirmeler kabul edilebilir seviyelerdedir. Bu durumda yapılan projeden uygulayıcıların beklentileri dahi tahkimat tasarımlandırmada bir kıstas olarak karşımıza çıkabilmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada geleneksel statik yöntemlerle (geometrik boyutlara göre tahkimatın üzerine gelecek yüklerin deterministik olarak belirlendiği) konverjans sınırlama yöntemini temel alan dinamik bir yöntem sonucu oluşan yüklenme mekanizması aynı ortam için karşılaştırılmıştır. Buna göre teorik olarak aynı tahkimat yerleştirildiği düşünülen değişik arazi gerilmeleri bulunan ortamlarda arazi gerilmeleri arttıkça yer değiştirme sınırlama karakteristiğini ortaya koyan "yer değiştirme genliğinin" ve güvenlik katsayısının azaldığı; denge durumundaki yer değiştirme değerlerinin ve en yüksek tahkimatsız yer değiştirme miktarı, plastik bölge yarıçapı, tahkimat basıncı ve daralma miktarının arttığı görülmüştür. Statik yöntemlerle konverjans sınırlama yöntemi aynı ortam için karşılaştırıldığında statik yöntemlerden elde edilen yük değerleri ile konverjans sınırlama yöntemine göre elde edilen tahkimat basıncı sonucu oluşan yük değerlerinin uyum içinde olduğu ve yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Her ne kadar statik yöntemler dinamik yöntemlerden çok önceleri önerilmiş olsa da tahkimat basıncı belirlenmesi açısından birbirlerinin hala alternatifi olabileceği sonucunu ortaya koymaktadır. Konverjans sınırlama yöntemi kullanıcıya ortam hakkında fikir verir. Tek başına tasarımlandırma yöntemi olarak kullanılmamalıdır. Bu çalışma da bu yöntemin irdelenmesi amacıyla yapılandırılmış olup, sonlu ve sınırlı elemanlar yöntemini kullanan sayısal analiz yöntemleriyle tünel çevresindeki yer değiştirme mekanizmasını ortaya çıkararak buradaki sonuçlarla birlikte değerlendirmek daha tutarlı bir uygulayıcı davranışı olacaktır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma; İTÜ BAP Birimi yüksek lisans tezi destekleme projeleri 43070 nolu projedeki çalışmaların bir bölümünü kapsamaktadır. Yazarlar İTÜ BAP birimine verilen destek için teşekkür eder.

6. KAYNAKLAR

Afshar T, Sharifzadeh M, Rostami J (2014) Estimation of rock load for tunnels with different disturbance factors. In: 15th Australian Tunneling Conference

Alejano, L.R., Rodríguez-Dono, A., Alonso, E., Fdez-Manín, G., 2009. Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behavior. Tunnel. Undergr. Space Technol. 24 (6), 689–705.

Barton N, Lien R, Lunde J (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech 6:189–236. https://doi.org/10.1007/BF01239496

Bhasin R, Grimstad E (1996) The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability. Tunn Undergr Sp Technol 11:93–98. https://doi.org/10.1016/0886-7798(95)00047-X

Birön., C., Arıoğlu, A. (1985). Madenlerde tahkimat işleri ve tasarımı, Birsen Kitabevi, İstanbul ss.360.

Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B., Hoek, E., 1983. Ground response curves for rock tunnels. ASCE J. Geotech. Eng. 109 (1), 15–39.

Cai, Y., Jiang, Yujing., Djamaluddin, Ibrahim., Iura, Tomomi., Esaki, Tetsuro., 2015. An analytical model considering interaction behavior of grouted rock bolts for convergence–confinement method in tunneling design. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 76, 112–126.

Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criteria. Tunn. Undergr. Space Technol. 15 (2), 187–213.

Corbetta, F., Bernaud, D., Nguyen-Minh, D., 1991. Contribution a la methode convergence–confinement par le principle de la similitude. Rev. Fr. Geotech. 54, 5–11.

Cui, Lan., Zheng, J.-Jie., Zhang, Ro.-Jun., Lai, H.-Jiang., 2015. A numerical procedure for the fictitious support pressure in the application of the convergence–confinement method for circular tunnel design. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 78, 336–349.

Dehkordi MS, Lazemi HA, Shahriar K, Dehkordi MS (2015) Estimation of the rock load in non-squeezing ground condition using the post failure properties of rock mass. Geotech Geol Eng 33(4):1115–1128. https://doi.org/10.1007/s10706-015-9891-7

Dehkordi MS, Shahriar K, Moarefvand P, Gharouninik M (2011) Application of the strain energy to estimate the rock load in non-squeezing ground condition. Arch Min Sci 56:551–566

Dehkordi MS, Shahriar K, Moarefvand P, Gharouninik M (2013) Application of the strain energy to estimate the rock load in squeezing ground condition of Emamzade Hashem tunnel in Iran. Arab J Geosci 6:1241–1248. https://doi.org/10.1007/s12517-011-0417-1

Duncan-Fama, M.E. 1993. Numerical modelling of yield zones in weak rocks. In: Hudson, J.A. (Ed.), Comprehensive Rock Engineering, vol. 2, Pergamon Press, Oxford, pp. 49–75.

Dwivedi R, Singh M, Viladkar MN, Goel RK (2014) Estimation of support pressure during tunneling through squeezing grounds. Eng Geol 168:9–22. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.020

Fenner, R. 1938. Untersuchungen zur Erkenntis des Gebirgsdruckes bluckauf. 74 (671–695), 705-715.

Goel RK, Jethwa JL (1991) Prediction of support pressure using RMR classification. In: Proceeding of the indian geotechnical conference

Lombardi, G., 1975. Qualche aspetto particolare della statica delle cavita sotterranee. Rivista Italiana di Geotecnica 2, 187–206.

Panet, M., 1993. Understanding deformations in tunnels. In: In: Hudson, J.A., Brown, E.T., Fairhurst, C., Hoek, E. (Eds.), Proc. of the Comprehensive Rock Engineering, vol. 1. Pergamon, London, pp. 663–690.

Panet, M., 1995. Calcul des Tunnels par la Methode de Convergence-Confinement. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chausse'es, Paris 178 pages.

Paraskevopoulou, C., Diederichs, M., 2018. Analysis of time-dependent deformation in tunnels using the Convergence-Confinement Method. Tunn. Undergr. Space Technol. 71, 62–80.

Parcher, F., 1964, Deformationsmessung in Versuchstollen als Mittel zur Erforeschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemmessung des Ausbaues. Felsmechanik und Ingenieurgeologie Supplementun, IV, pp. 149–161.

Peila, D., Oreste, P.P., 1995. Axisymmetric analysis on ground reinforcing in tunnelling design. Comput. Geotech. 17, 253–274.

Protodyakonov, M., 1926. Materials for output regulations in mining works - compliled by order of the central committe of the Donetz State Coal Trust 'Donugol'.

Singh B, Viladkar MN, Samadhiya NK (1995) A semi empirical method for the design of support systems in underground openings. Tunn Undergr Sp Technol 10:375–383. https://doi.org/10.1016/0886-7798(95)00016-R

Terzaghi K (1946) Rock defects and loads on Tunnel Supports. In: Introduction to rock tunnelling with steel support, RV Proctor and TC White, Youngstown, Ohio, USA

Taghizadeh, H., Zare, S. & Mazraehli, M. (2020). Analysis of Rock Load for Tunnel Lining Design. Geotech Geol Eng 38, 2989–3005.

Unal E (1983) Development of design guidelines and roof control standards for coal-mine roofs. Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University, US

von Rabcewicz, L.: Patentschrift. Österreichisches Patent Nr. 165573, 1948.

Vrakas, A., Anagnostou, G., 2014. A finite strain closed-form solution for the elastoplastic ground response curve in tunnelling. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 38 (11), 1131–1148.

Yerinde Gerilme Oranının Yeraltı Kazılarında Destek Boyutlandırmadaki Etkisi

The Effect of In-Situ Stress Ratio on Support Sizing in Underground Excavations

D. Erik[1,*], M. Mutlutürk[2]

[1] *KGM 16. BL. Md. SİVAS*
[2]*SDÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ISPARTA*
*(*derik@kgm.gov.tr)*

ÖZ: Yeraltı kazılarında ilksel gerilmeler kazı sonrası değişmekte ve destek tasarımında ilksel gerilmelerin bu değişimi belirleyicidir. Kazı sonrası oluşacak bu gerilmelerin kestirimi, buna bağlı destek sisteminin de doğru boyutlandırılması imalatın sağlıklı bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Yerinde gerilmeler, yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı ya da "k" katsayısı olarak da tanımlanan bir yaklaşım ile teorik ya da uygulaması nispeten zor olan saha deneyleri ile belirlenmektedir. Uygulamada k katsayısı bazı yaklaşımlar ile hesapsal olarak belirlense de çoğunlukla tecrübeye dayalı olarak seçilmektedir. Bu çalışmada örnek bir proje üzerinde k katsayısının değişiminin destek sistemleri üzerine etkileri ve destek boyutlarının yeterlilikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma ile, özellikle günümüzde kullanılan bilgisayar programlarında basit bir katsayı olarak görülen k katsayısındaki küçük değişimlerin destek basıncı üzerinde oldukça etkili olduğu ve değişik k katsayılarının kullanılmasının yetersiz ya da aşırı güvenli destek tasarımlarına neden olabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Arazi gerilmesi, destek tasarımı, yeraltı kazısı

ABSTRACT: *In underground excavations, the primary stresses change after the excavation and this change of the primary stresses is determinant in the support design. The estimation of these stresses that will occur after the excavation and the correct dimensioning of the support system accordingly ensure the proper execution of the production. The in-situ stresses are determined by theoretical or field tests, which are relatively difficult to apply, using an approach that is also defined as the ratio of horizontal stresses to vertical stresses or the "k" coefficient. Although the coefficient k is determined empirically with some approaches in practice, it is mostly chosen based on experience. In this study, the effects of the change of k coefficient on support systems and the adequacy of support dimensions on a sample project were examined. With the study, it has been observed that small changes in k coefficient, which is seen as a simple coefficient especially in computer programs used today, are quite effective on the support pressure and the use of different k coefficients may cause insufficient or overly secure support designs.*

Keywords: *In situ stresses, support design, underground excavation*

1. GİRİŞ

Herhangi bir derinlikteki kaya kütlesi, üzerindeki örtü yükünden gelen yük ve maruz kaldığı tektonik hareketler sonucu içinde bulunduğu kuvvetlerin etkisi ile denge durumundadır. Yeraltı kazıları sırasında bu denge durumu bozulan kaya kütlesi yeniden denge durumuna gelmeye çalışır. Üç asal yöndeki bu gerilmelerin durumunun kazı öncesinde bilinmesi yeraltı kazılarında tavan ve duvar üzerine gelecek olan basınç farklılıklarının tespiti ve buna göre destek seçiminde bulunulması yönünden oldukça önemlidir. Literatürde yerinde gerilmeler "k" sabiti ile gösterilmekte olup Yatay gerilmeler/Düşey Gerilmeler şeklinde basitleştirilmektedir.

Özellikle yeraltı kazılarında kaya kütleleri günümüzde yaygın bir şekilde RMR (Bieniawski, 1989), Q (Barton, 1974), RMQR (Aydan ve diğ. 2013), GSI (Hoek ve, diğ., 1995) gibi kaya kütlesi sınıflama sistemleri ile sınıflandırılmakta ve elde edilen sonuçlara göre kazı-destek önerilerinde bulunulmaktadır. Kaya kütlesinin ortam modellemesini belirlemeye çalışan bu kaya kütlesi sınıflama

sistemleri, aynı zamanda bir takım ampirik eşitlikler ile kütle dayanım parametrelerini kullanarak destek basınçlarının tahmininde de kullanılmaktadır. Destek seçimi ve tasarımında önemli bir parametre olan destek basıncının arazi gerilmelerine bağlı olarak belirlenmesi gerekirken sadece kaya sınıflamalarına bağlı olarak belirlenmesi, projelendirmede önemli bir eksikliği oluşturmaktadır. Ayrıca genel bir yaklaşım olarak kaya kütlesinin genel özelliklerine bakılarak yapılan ve bir tünel açma yöntemi olan NATM (Rabcewicz, 1964) ile destek sınıflarına ÖNORM B2203(1994) kullanılarak karar verilmektedir. Bu şekilde belirlenen destek sistemlerinin de kazı sırasında gözlemler ile revizyonunun yapılması önerilmektedir.

Arazi gerilmeleri, ilksel gerilmeler ya da birincil gerilmeler olarak adlandırılan gerilmelerin belirlenmesi, arazi ve laboratuvar deneyleri ile bazı yaklaşımlar kullanılarak yapılmaktadır. ISRM (Kim ve Franklin, 1987) arazi gerilmelerinin ölçülmesinde, yassı kriko, hidrolik çatlatma teknikleri, USBM, CSIR ya da CSIRO tipi, (Sugawara ve Obara, 1998) sondajlarda konik uçlu deformasyon ölçerler kullanılmasını önermektedir. Tuncay vd. (2002)'de akustik emisyon tekniği kullanarak laboratuvarda karot örnekleri üzerinde arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme yapmışlardır. Hoek ve Brown (1980), dünyanın değişik yerlerde yapılmış ölçümleri değerlendirerek arazi gerilmelerinin belirlenmesinde bazı yaklaşımlar önermektedir. Sheorey (1994), arazi gerilmelerinin belirlenmesinde matematiksel çözümleri içeren teorik yaklaşımlarda bulunmuştur.

Türkiye'de çok fazla sayıda yapılan yeraltı kazılarında arazi gerilme ölçümleri yapılmamaktadır. Uygulamada k katsayısı bazı yaklaşımlar ile hesapsal olarak belirlense de çoğunlukla tecrübeye dayalı olarak seçilmektedir. Bu çalışmada örnek olarak seçilen projede de k=1.5 olarak önerilmiştir. Dolayısı ile bu çalışmada k katsayısının nasıl belirlendiği değil seçilen k katsayısının destek tasarımına olan etkilerinin incelenmesi ele alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında örnek olarak seçilmiş olan Zara-Suşehri Yolu projesi kapsamında yapımı tamamlanmış olan Km:25+760'ta yer alan Geminbeli tüneline ait veriler kullanılmıştır (Limit, 2015). Volkanik seri içerisinde açılacak olan bu tünele ait bir kesitte yapılan kaya kütlesi sınıflama sistemi ve buna bağlı destek önerileri incelenmiştir. Destek önerileri tünel kesitine bağlı olarak sonlu elemanlar yöntemini kullanan Phase2 v.8. yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Hesaplamada projede önerilmiş olan k değeri kullanılmıştır. Ayrıca bütün değerler sabit kalmak koşulu ile proje kapsamında kullanılan ve farklı k değerlerinde gerilme deformasyon analizleri yapılarak, uygulanan destek sistemi üzerine etki eden gerilmeler belirlenmiş ve destek sistemleri kesit kontrolleri yapılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. KAYA KÜTLE ÖZELLİKLERİ VE KAZI-DESTEK PARAMETRELERİ

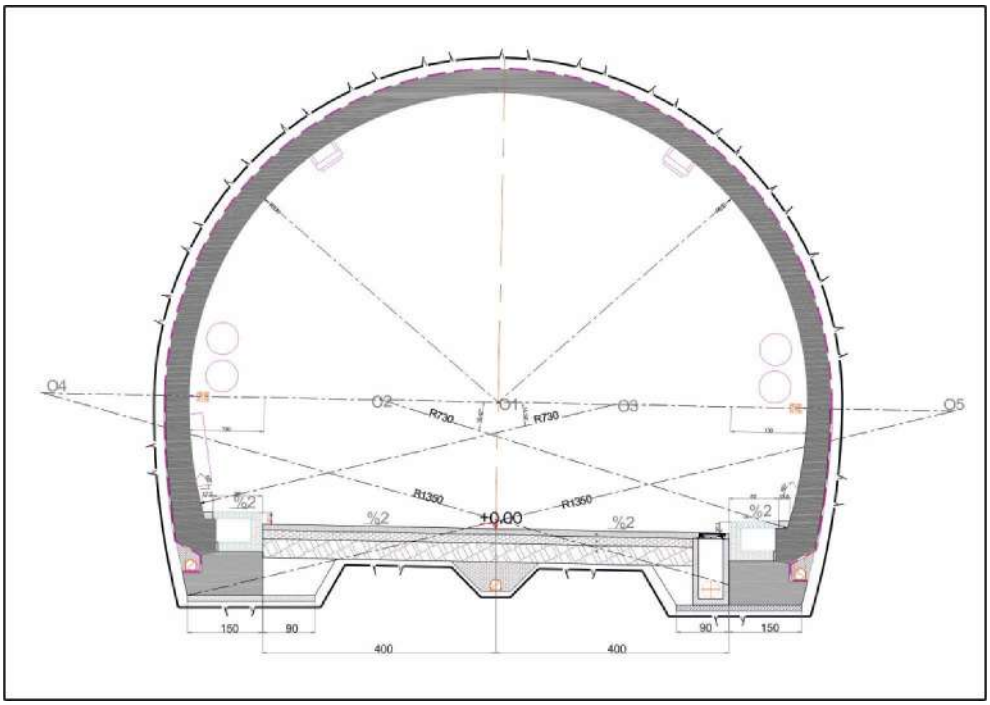
Bu çalışma kapsamında ele alınmış olan yapımı tamamlanmış tünel Km:25+760'e ait kaya kütlesi sınıflama sonuçları Çizelge 1'de, Kütle sınıflamaları Çizelge 2' de görüldüğü gibidir.

Çizelge 1. Geminbeli Tüneli km: 25+760 kaya kütlesine ait mühendislik özellikleri

Lokasyon	Litoloji	TEB MPa	Sür. Seti	Pürüzlülük	Bozunma	Dolgu	Aralık	Açıklık	Devamlılık	Su
25+760	Dasit-Dasitik Tüf	55.6	4 Yada daha fazla eklem takımı	Orta Pürüzlü	Orta Bozunmuş	Kuvars dolgu >5mm	6-20cm	>5mm	<1m	Su akışı

Çizelge 2. Geminbeli Tüneli km: 25+760 kaya kütle indeksleri sınıfları

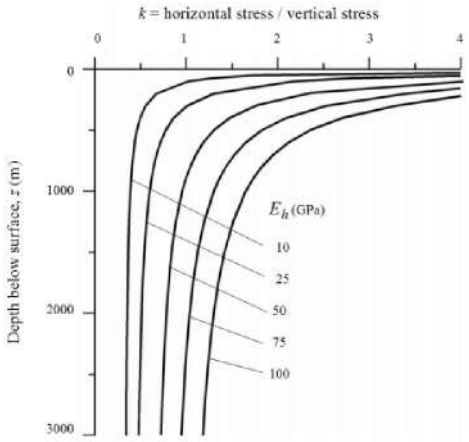
GSI	RMR	Q	ÖNORM B 2203
34	29	0.22	B3



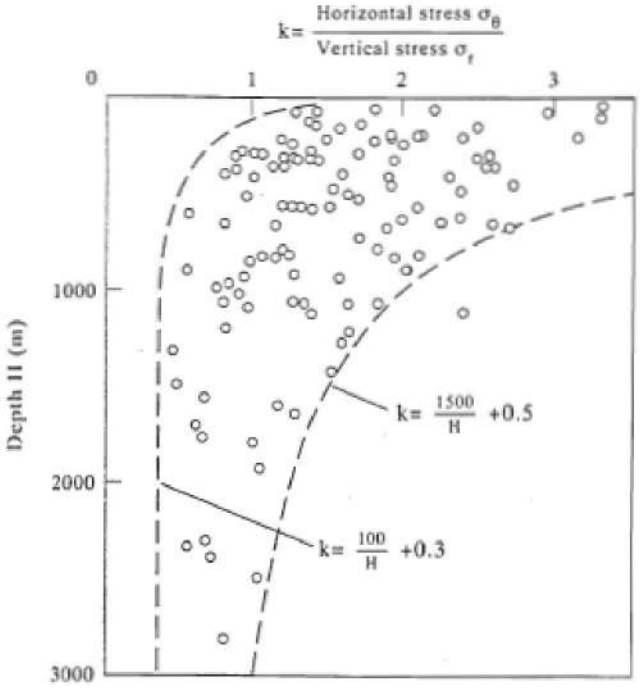
Şekil 1.Geminbeli Tüneli tip kesiti (Limit, 2015)

3. ARAZİ GERİLMELERİ VE SEÇİMİ

Arazi gerilmeleri seçiminde öncelikli olarak kazı derinliğine ve ortam özelliklerine bağlı olarak k değerinin belirlenmesi ile başlanmaktadır. Ülkemizde birçok projede ilksel gerilmeler sahada ölçülemediği için hesaplamada bazı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu projede kullanılan k değeri herhangi bir hesaplama yapılmadan tecrübeye dayalı olarak 1.5 seçilmiştir. Bu çalışmada da bir karşılaştırma yapabilmek amacı ile Sheorey (1994) (Şekil 2) ve Hoek ve Brown (1980) (Şekil 3) tarafından önerilen derinlik ve k değeri grafiklerini dikkate alınarak projede alınan k=1.50 değerini de kapsayacak şekilde k değeri sırası ile 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 ve 3.00 seçilmiştir.



Şekil 2. Sheorey'e göre derinliğe bağlı değişen k oranları (Sheorey, 1994)



Şekil 3. Yatay-düşey yerinde gerilme oranının derinlikle değişimi (Hoek ve Brown 1980)

4. ANALİZ YÖNTEMİ VE KAPASİTE HESAPLARI

Bu çalışma kapsamında, Zara-Suşehri Yolu projesi kapsamında yapımı tamamlanmış olan Geminbeli tünelinin giriş bölgesine yakın bir kesimi için farklı *k* değerlerine göre gerilme deformasyon analizleri Rocscience Phase2 v.8 yazılımı kullanılarak yapılmış, seçilen destek elemanları üzerine etki eden gerilmeler ve kesit yeterlilikleri incelenmiştir. Kaya kütlesi modellenmesinde yenilme kriteri olarak genelleştirilmiş Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü kullanılmıştır. Bu ölçüte göre hesaplanan ve modellemede kullanılan kaya kütle sabitleri Çizelge 3 'de görülmektedir.

Çizelge 3. Geminbeli Tüneli Km: 25+760 kütle parametreleri

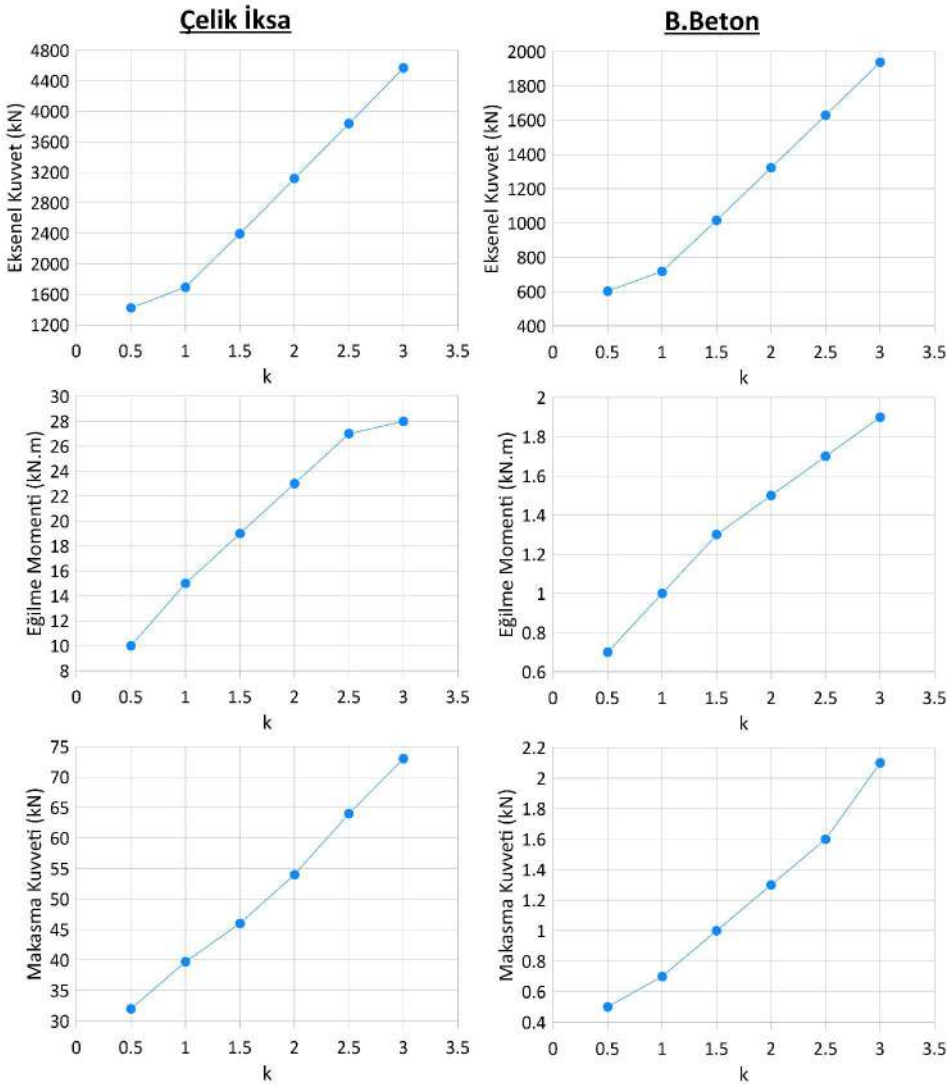
$TEB_{İR}$ (MPa)	E_{RM} (MPa)	v	mb	s	a
54.5	628.7	0.3	0.66	0.00015	0.517

Bu proje kapsamında projeci tarafından belirlenen ve tünel açılması esnasında kullanılan ön destek elemanları ve boyutları Çizelge 4 de görülmektedir.

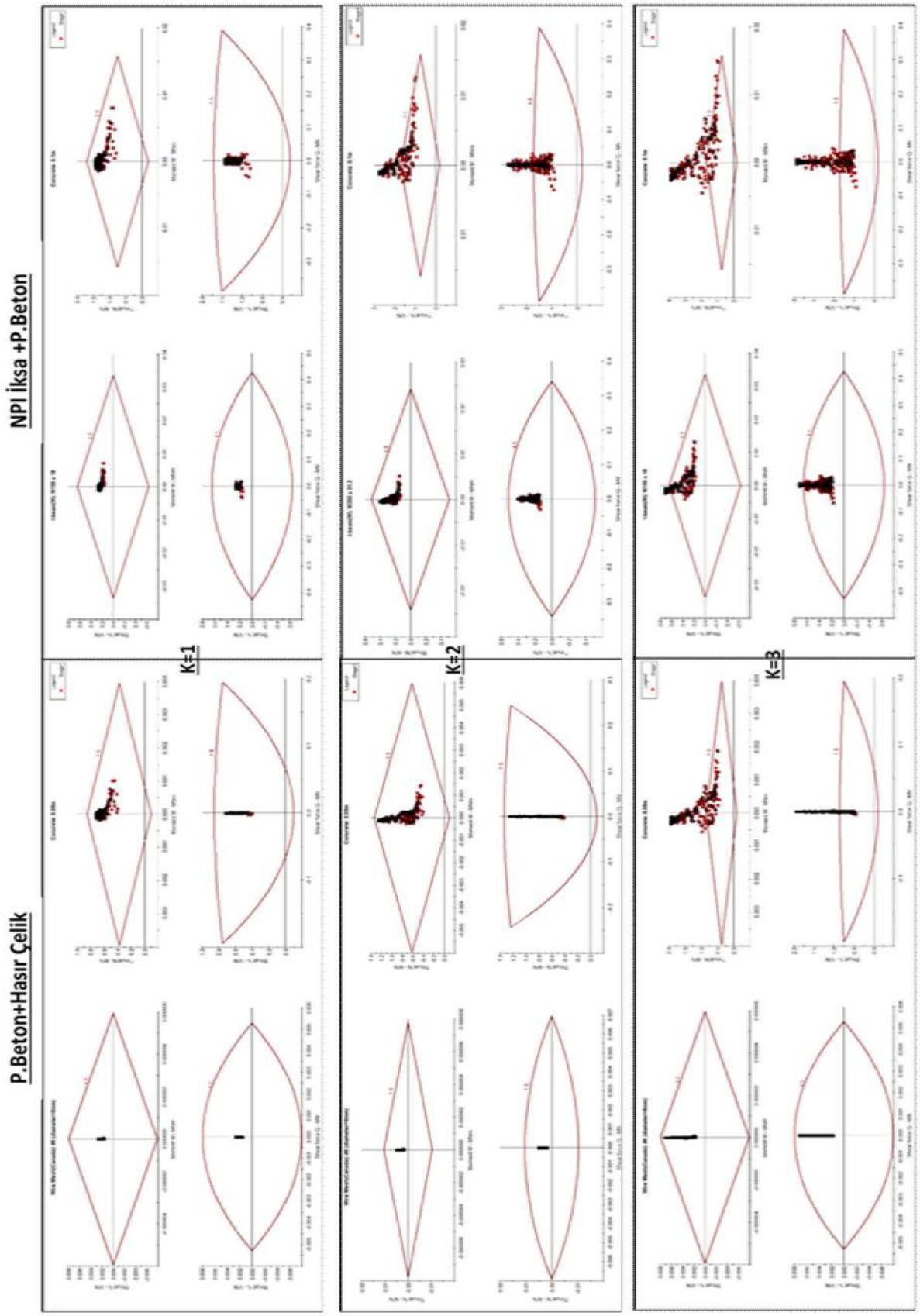
Çizelge 4. Geminbeli Tüneli Km: 25+760 projede belirlenen ön destek elemanları ve boyutları

Destek Tipi	İksa	P. Beton	Hasır Çelik	Bulon
Boyutu	140 NPI	20 cm C30	Q221*221	6m SN 28 mm

Uygulamada kullanılan destek sistemleri kullanılarak farklı k değerleri için gerilme-deformasyon analizleri yapılarak destek elemanlarının kesit yeterlikleri ölçülmüştür. Analizler projede seçilen k değerini de kapsayacak şekilde 0.5-3.0 aralığında 6 adımda yapılmıştır. Şekil 4'te destek elemanlarına etki eden eksenel ve makaslama kuvvetleri ile eğilme momentlerinin farlı k değerlerine bağlı olarak değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.Farklı k değerlerinde destek elemanlarına etki eden kuvvetler



Şekil 5. Püskürtme beton, çelik hasır ve NP iksa destek elemanlarının farklı değerlendirme kapasitelerinin yeterliliği

Şekil 5'te ise k'nın 1.0, 2.0 ve 3.0 değerleri için çizilmiş kapasite diyagramları görülmektedir. Özellikle k=>2.0 koşulunda kapasite diyagramlarında desteklerin yetersiz oldukları açık bir şekilde görülmektedir. Bu ise k değerinin 2.0'den daha küçük seçilmesi koşulunda destek tasarımının aşırı, büyük olması koşulunda ise yetersiz olabileceğini göstermektedir.

5- SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında proje tasarımında basit bir katsayı gibi görülen k değerinin destek tasarımına etkisi araştırılmıştır. Seçilen örnek bir projede kullanılan k değeri ile bu k değerinden küçük ve büyük değerler kullanılarak yapılan destek elemanlarının kapasite değerlendirmelerinde, 2.0'dan büyük k değerinde destek kapasitesinin yetersiz olduğu görülmüştür. Genel olarak k değerinin bir yeraltı kazısı boyunca aynı olmadığı, sığ derinliklerde arttığı, dolayısı ile k değerindeki bu değişim ile destek üzerine etkiyen kuvvetlerin de değiştiği görülmektedir. Sonlu elemanlar gibi bilgisayar programları ile yapılan çözümlemelerde küçük bir girdi parametresi olarak görülen ve tecrübelere dayanarak seçildiği ifade edilen k değerinin doğru bir şekilde belirlenmesinin, yeraltı kazılarının doğru modellenmesi ve kazı/destek seçiminin ekonomik ve sağlıklı belirlenmesinde önemli rol oynadığı, sonucuna varılmıştır.

6- KATKI BELİRTME

Yazalar yaptıkları çalışmada verilerin kullanılması konusunda göstermiş oldukları yardımlardan dolayı, LİMİT Teknik A.Ş. teşekkür eder.

7- KAYNAKLAR

Aydan Ö., Ulusay R. Tokashiki N., 2013. A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses. Rock Mech.and Rock Eng., 47:1255-1276.

Barton,N.,Lien,R. And Lunde J.,1974, Engineering Classificition of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mech., V. 6, pp 189-236.

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley and Sons, 237 pp.

Erik, D. (2004). Boğsak Karayolu Tünelleri (Taşucu-Mersin) Jeoteknik Tasarımı, Doktora Tezi, SDÜ. Fen Bil Enstitüsü, 203 s. (Yayınlanmamış)

Hoek, E., ve Brown, E. T., 1980. Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 527pp.

Hoek, E., Kaiser, P.K., ve Bawden, W.F., 1995. Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema, roterdam, 214 pp.

Kim, K., and Franklin, J. A., 1987. Suggested methhods for rock stress determination. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanic Abstracts, 24(1), 53-74.

Limit, 2015. Zara-Suşehri yolu, Gemin beli tüneli kesin proje jeolojik - jeoteknik etüt raporu, 195 S, Ankara (Yayınlanmamış)

ÖNORM B 2203 (1994). Untertagebauarbeiten, Werkvertragnorm, Entwurf, 1. März,

Rabcewicz, L., 1964. The New Austrian Tunnelling Method, Part one, Water Power, November 1964, 453-457, Part two, Water Power, December 1964, 511–515.

Sheorey, P.R. 1994. A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31(1), p.23-34.

Sugawara, K., and Obara, Y., 1999. Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36, 307-322.

Tuncay, E., Ulusay, R., Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö., and Yüzer, E., 2002. Akustik Emisyon (AE) tekniği: 2- AE tekniğiyle Türkiye'de arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme. Yerbilimleri, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 83-98.

Zayıf Kayaçta Örselenmenin Oturma Teknesi Genişlik Parametresi Üzerindeki Etkileri

Effects of Disturbance on Settlement Trough Wide Parameter in Weak Rock

C. Topal[1,*], Y. Mahmutoğlu[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü-İstanbul*
*(*candastopal@yahoo.com)*

ÖZ: Sığ derinliklerde, zayıf jeolojik ortamlarda yapılan kentiçi yeraltı kazıları altyapı ve binalarda hasarla sonuçlanan sorunlara neden olmaktadır. Bu çalışmada Kirazlı-Başakşehir (İstanbul) Metro Hattı'nın Km 4+360 – Km 4+470 arasında açılan ve biri diğerini arkadan takip eden ikiz metro tüneli kazılarının neden olduğu oturma teknesindeki değişimler değerlendirilmiştir. Miyosen yaşlı Çukurçeşme ve Güngören Formasyonundan oluşan bölgede, tünel eksenleri arasındaki mesafe yaklaşık 15 m ve ortalama eksen derinlikleri 20 m'dir. İzleme verileri ve arazinin sayısal mühendislik jeolojisi modeli kullanılarak yapılan analiz sonuçları karşılaştırılarak, önde ilerletilen tüpün neden olduğu oturma profilinde, aynı kesitten ikinci tüpün geçmesi sırasında oluşan değişiklikler farklı en kesitler için irdelenmiştir. İkinci tünelin kazısından sonra oluşan oturma eğrisi dönüm noktasının tünel ekseninin sağ ve sol tarafında farklılaştığı, önde ilerletilen tünel tarafında genişlediği ve maksimum oturmanın ikinci tünel üzerinde geliştiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç, birbirine yakın ve sığ kazılarda oturma teknesi genişlik parametresinin (*K*) kazı bütünlüğü dikkate alındığında metro hattının her iki tarafında farklı değerler alabileceğini ve oturma teknesi enine profilinin asimetrik form kazanabileceği anlamındadır. Kentiçi çoklu kazıların tasarımı, izleme projelerinin hazırlanması, hat üzerinde ve yakınındaki yapı stoğunun risk analizinin doğru yapılması açılarında bu sonucun pratik açıdan önemli olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İkiz tünel, İstanbul Metrosu, Jeoteknik izleme, Oturma teknesi.

ABSTRACT *Urban underground excavations at shallow depths and weak geological strata cause problems resulting in damage to infrastructure and buildings. In this study, the change in the settlement trough caused by the excavations of the twin subway tunnels opened between Km 4+360 – Km 4+470 of the Kirazlı-Basakşehir (Istanbul) Metro Line and following one after the other was investigated. The distance between the tunnel axes is approximately 15 m and the average axis depth is 20 m in the region consisting of Miocene aged Çukurçeşme and Güngören Formations. By comparing the results of analysis using the monitoring data and the numerical engineering geology model of the field, the changes in the settlement profile caused by the forward tube, while the second tube passes through the same section, are examined for different cross-sections. It has been concluded that the settlement trough inflexion point formed after the excavation of the second tunnel differs on the right and left sides of the tunnel axis, extends on the side of the tunnel advanced forward, and the maximum settlement develops on the second tunnel. This result means that in close and shallow excavations, the width parameter (K) of the settlement trough can take different values on both sides of the subway line when the excavation integrity is taken into account, and the transverse profile of the settlement trough can acquire an asymmetrical form. This result is considered to be of practical importance in terms of the design of multiple excavations in the city, the preparation of monitoring projects, and the accurate risk analysis of the building stock on and near the line.*

Keywords: *Twin tunnel, Istanbul Metro, Geotechnical monitoring, Settlement trough*

1. GİRİŞ

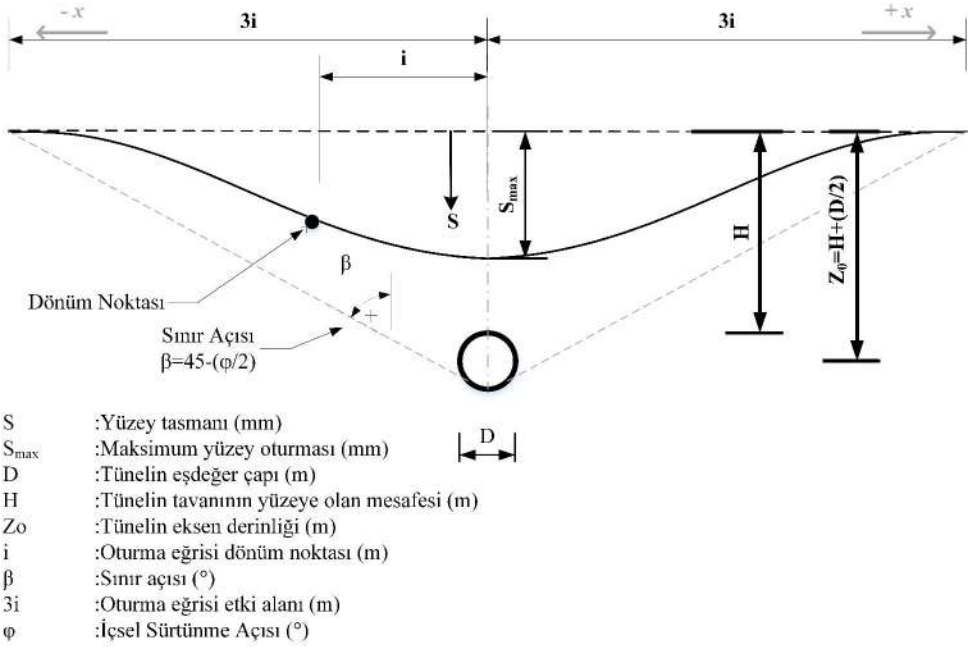
Artan kent nüfuslarının, kentlerdeki ulaşım problemleri üzerinde büyük etkisi olduğu açıktır. Bu durumu çözebilmek için pek çok gelişmiş kentte toplu ulaşım çözümleri yeraltına taşınmaktadır. Bu sayede daha fazla kişi uzak mesafelere hızlı ve ekonomik olarak kent trafiğini zorlamadan taşınırken ulaşım konforu da beraberinde arttırılmaktadır. Ancak, metro hatlarının inşaatı sırasında birbirine yakın çoklu kazıların yapılması kaçınılmaz hale gelmektedir.

Özellikle sığ derinliklerde zayıf ortam koşullarında açılan kentiçi yeraltı kazıları, kent altyapısında ve yüzeydeki yapılarda hasarla sonuçlanan sorunlara neden olabilmektedir. Bu sorunlar, proje maliyeti ve çevre sağlığı ve güvenliği açılarından ciddi yükleri de beraberinde getirmektedir. Bu riskleri en aza indirmek amacıyla, son yıllarda modern teknolojik imkanlar kullanılarak, kazı aynasında ve kazı çeperindeki örtü yükünü dengeleyen makinalı (*EPB-TBM*) kazılar yapılmakta, kazıların yüzeye yansıyabilecek olumsuz etkileri önceden belirlenen noktalarda yapılan periyodik ölçümlerle denetlenmektedir.

Kazı bağımlı oluşan düşey deformasyonların, tekil kazılar ile olan ilişkisi değişik jeolojik ortamlar için literatürde geniş olarak ele alınmıştır ve konuyla ilgili ampirik ve analitik çözümler önerilmiştir. Ancak uygulamada kent içi ulaşımına yönelik çift hatlı, birbirine paralel (özellikle metro tünelleri) ve yakın mesafelerde açılmakta olan aşamalı yeraltı kazıları için, bilinen yaklaşımların geçerli olmayabileceği sıkça yaşanan vakalardan anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul ili sınırları içerisinde kazılan Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattının Km 4+360 – Km 4+470 arasında *EPB* makinaları (Earth Pressure Balanced Machine) kullanılarak, aynı hat üzerinde birbirine yakın ve sıralı olarak açılan ikiz tünel kazılarının yüzeyde neden olduğu oturmaların zamanla ve kazı aşamasıyla ilişkisi değerlendirilmiştir.

Art arda, aynı kotta açılan, yatayda birbirine yakın tünel kazıları sırasında, önde ilerletilen tüpün kazısı jeolojik ortamda geçerli sınır koşullarında kötüleşmeye neden olduğu, dolayısıyla arkadan gelen ikinci tünelin önde ilerletilen tünelin örselenmiş olduğu ortamla etkileştiği belirlenmiştir (Mahmutoğlu, 2011; Wang vd., 2018). Bu nedenle, birinci tüpün oluşturduğu maksimum yüzey oturmasının, aynı çap ve kazı geometrisine sahip ikinci tüpün geçişi sonrasında arttığı ve oturma teknesinin ikinci tünelin üzerine doğru asimetrik olarak kaydığı görülmüştür. Araştırma bulguları maksimum oturmanın ikinci tünelin üzerinde geliştiğini, oturma teknesinin ise kayda değer oranda büyüdüğünü ortaya koymuştur. Martos (1958), maden kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonlarının oturma formunun Gauss Eğrisi (normal dağılım) ile tanımlanabileceğini önermiştir. Schmidt ve Peck (1969)'da aynı formun tek tüpten oluşan tünel kazıları üzerinde oluşabileceğini belirtmiştir. O'Reilly ve New (1982) Gauss modelini geliştirerek tek tüplü tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma profilinin Şekil 1'de gösterilen biçimde gelişeceğini belirtmiş, oturma (S) miktarının kestirimi için Eşitlik 1'de verilen bağıntıyı önermiştir. Eşitlikte, S_{maks} maksimum yüzey oturmasına, x yataydaki mesafeye, i oturma eğrisi dönüm noktasına karşılık gelmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Yeraltı kazılarına bağlı gelişen enine oturma teknesine ait tanımlamalar.

$$S - S_{maks}.e^{\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)} \quad (1)$$

Burada; $i = K.Z_0$ oturma eğrisinin dönüm noktası, K ise zemin türüne ve özelliklerine bağlı oturma teknesi genişlik parametresi olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle projelendirmede yeraltı kazılarının yüzeyde etkileyeceği alanın genişliğinin önceden kestirilmesi açısından K parametresinin doğru seçilmesi önem kazanmaktadır. Çizelge 1'de önceki bazı çalışmalarda farklı zemin türleri için önerilmiş olan K değerleri belirtilmiştir.

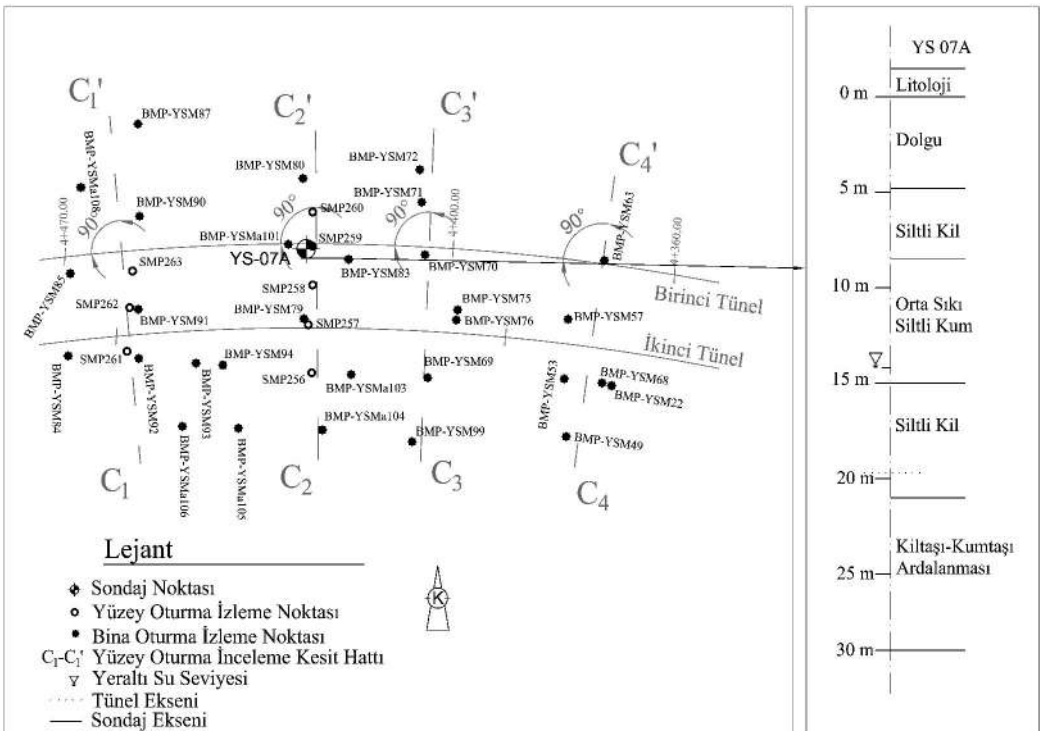
Çizelge 1: Farklı zemin türleri için önerilen K parametresi değerleri.

Zemin Türü	K	Kaynak
Katı Killer	*0.4*	O'Reilly ve New, 1982
Kumlu Katı Killer	*0.38- 0,51* *(0.82- 0.86)**	Mahmutoğlu, 2011
Yumuşak Siltli Killer	*0.7*	Glossop, 1978
Kil ve Granüler Karışık Zeminler	*0.2-0.3*	Rankin, 1988
Bütün Zeminler Ortalama	*0.5*	O'Reilly ve New, 1982, Glossop, 1978

** İkinci tüpün geçişinden sonra elde edilen değer*

1. KAZI ORTAMI VE TÜNEL AÇIM YÖNTEMİ

Hattın bu kesiminin plan görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir. İncelenen bölgede tünel eksenleri arası mesafe 14.8 m ve ortalama tünel eksen derinlikleri 20.0 m'dir. Tünel kazıları başlamadan önce açılan araştırma sondajlarında, yeraltı suyunun yüzeyden derinliği 14.2 m olarak ölçülmüştür. Analiz edilen kesitlerin (Km 4+360.00 - Km 4+470.00) ve izleme noktalarının konumları ile tünel eksenleri bu şekilde verilen plan üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2. Km 4+360-4+470 arasında izleme verilerinin karşılaştırılması için kesit hatları.

Hattın bu kesiminden (Km 4+300.00 - Km 4+500.00) eski ve küçük bir akarsu yatağı geçmektedir. Tünel üzerindeki örtüyü Miyosen yaşlı Çukurçeşme ve Güngören Formasyonlarına ait sıkı kum ve sert kil birimleri ile Güncel yapay dolgu oluşturmaktadır. İncelenen lokasyonlardaki tünel kazıları, çapı 6.5 m olan Herrenknecht ve Lovat marka *EPB* tip *TBM* makineleri ile gerçekleştirilmiştir. Kazı sırasında örtü basıncını dengelemek ve aynayı desteklemek amacıyla 300 kPa'lık ayna basıncı uygulanmıştır. Kalıcı destek makinayı koruyan ve çevredeki zeminini destekleyen kalkan içerisinden yerleştirilen, 30 cm kalınlığındaki betonarme segmentlerle sağlanmıştır.

Aşırı oturmalar ile karşılaşılan bu bölgedeki tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma teknesi formları dört kesit üzerinden değerlendirilmiştir

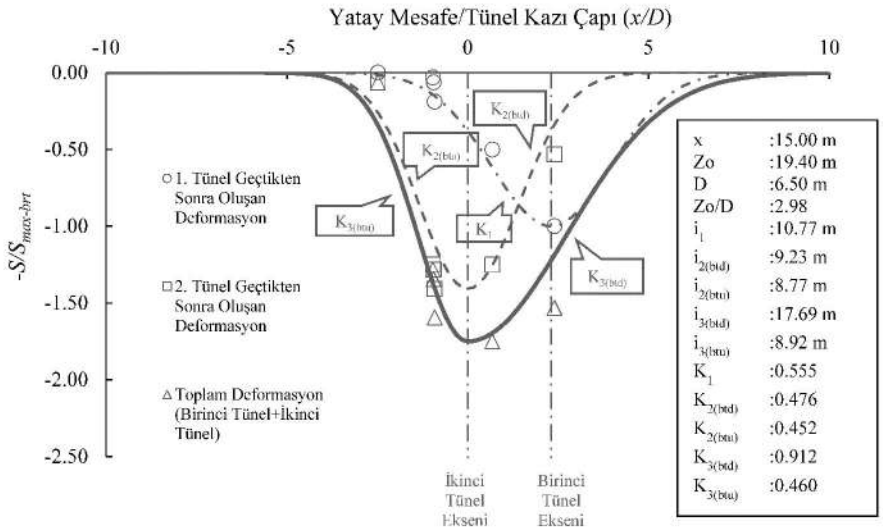
Bölgede gerçekleştirilen tünelcilik faaliyetleri neticesinde, projede öngörülen maksimum oturma değerinin (İşveren teknik şartnamelerine göre kabul edilebilir limit değer <25 mm) çok üzerinde yüzey oturmaları ile karşılaşılmıştır. Oturma bağımlı hasarları sınırlandırmak için inceleme bölgesinde derinliği 15-25 m arasında değişen 248 adet zemin iyileştirme amaçlı enjeksiyon sondajı açılmıştır. Bu sondajlarda su/çimento oranı 1 olan çimento enjeksiyonu 2 barlık basınç altında uygulanmış olup, iki aya yakın zaman alan uygulamada toplam 135.2 ton çimento kullanılmıştır (Güven, 2008).

Bölgede gerçekleştirilen kazılarda, birinci tünel ikinci tünelin yaklaşık 80 m önünde ilerletilmiştir. İncelenen kesitlerden önce birinci tünel, yaklaşık 15 gün sonra ise ikinci tünel geçişini tamamlamıştır.

2. ÖRSELENME NEDENİYLE OTURMA TEKNESİ PROFİLİNDE OLUŞAN DEĞİŞİMLER

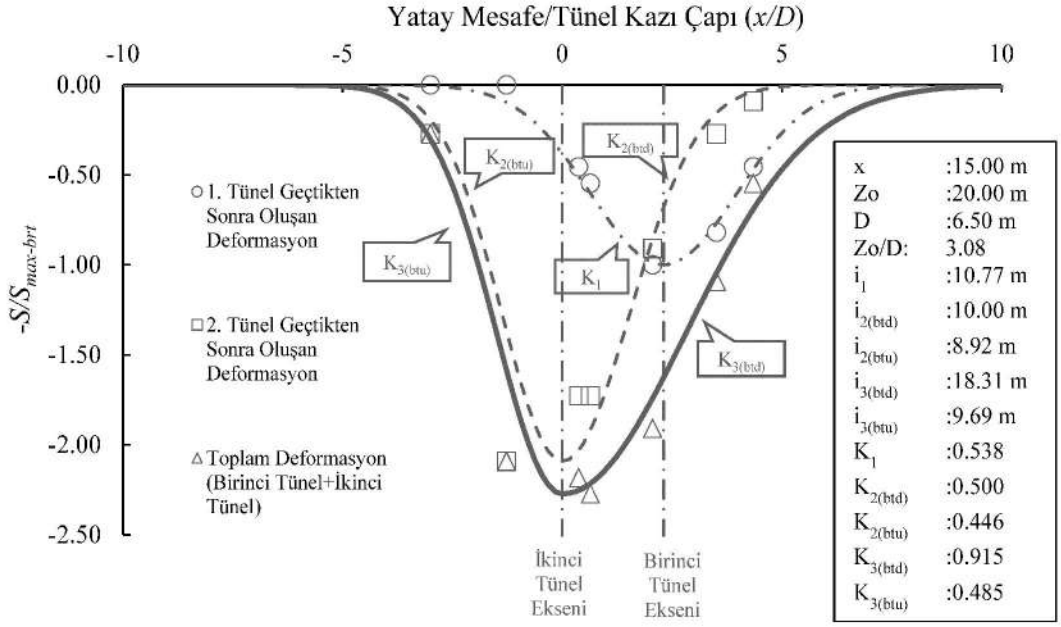
Metro tünellerinin açımı sırasında yüzeyde oluşturulan ölçüm ağına ait yüzey izleme noktalarının konumu periyodik olarak ölçülmüştür. Ölçümlerden elde edilen oturma değerleri (S), analiz edilen kesitlerdeki birinci tünellerin oluşturduğu maksimum oturma değerine ($S_{max\text{-}brt}$) göre normalize edilmiştir ($S/S_{max\text{-}brt}$). Normalizasyon işlemi, tünel ekenleri arasındaki yatay mesafeler'in (x) tünel kazı çaplarına (D) göre normalize edilmesi (x/D) ile tamamlanmış ve grafikler üzerinde elde edilen değerler belirtilmiştir.

Şekil 3'de C_4-C_4' kesit hattı üzerinde oluşan oturma teknesi profili belirtilmiştir. Profil incelendiğinde, birinci tünelin geçişi sonrası oluşan oturma eğrisinin dönüm noktasının (i_1) 10.77 m'ye ulaştığı gözlenmiştir. Aynı kesit hattından, ikinci tünelin geçişi sonrası oluşan eğride, eğrinin sol kanadında dönüm noktası değerinin ($i_{3(btu)}$) 8.92 m'ye önde ilerletilen birinci tünel tarafında ($i_{3(btd)}$) ise 17.69 m düzeyine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu kesitte, önde ilerletilen birinci tünel kazısı için K_1 parametresi 0.555 olarak belirlenmiştir. Ancak, oturma teknesi şeklinin ikinci tünel geçişi sırasında değiştiği görülmüştür.

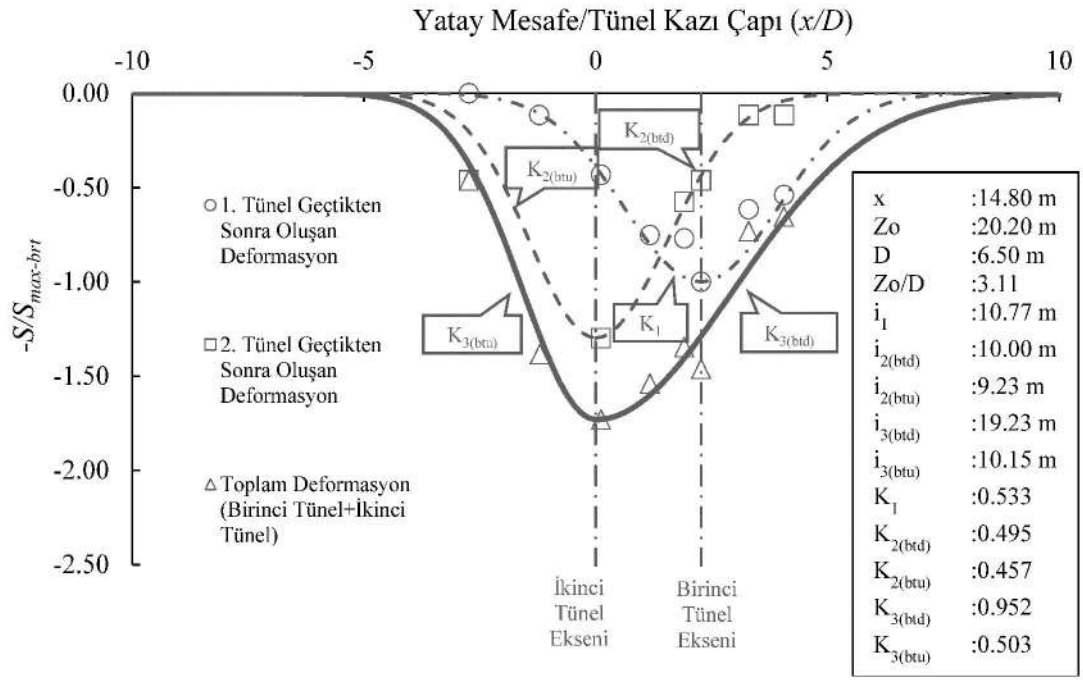


Şekil 3. C_4-C_4' en kesitinde ikiz tünel kazılarına bağlı oluşan oturma teknesi profil değişimi.

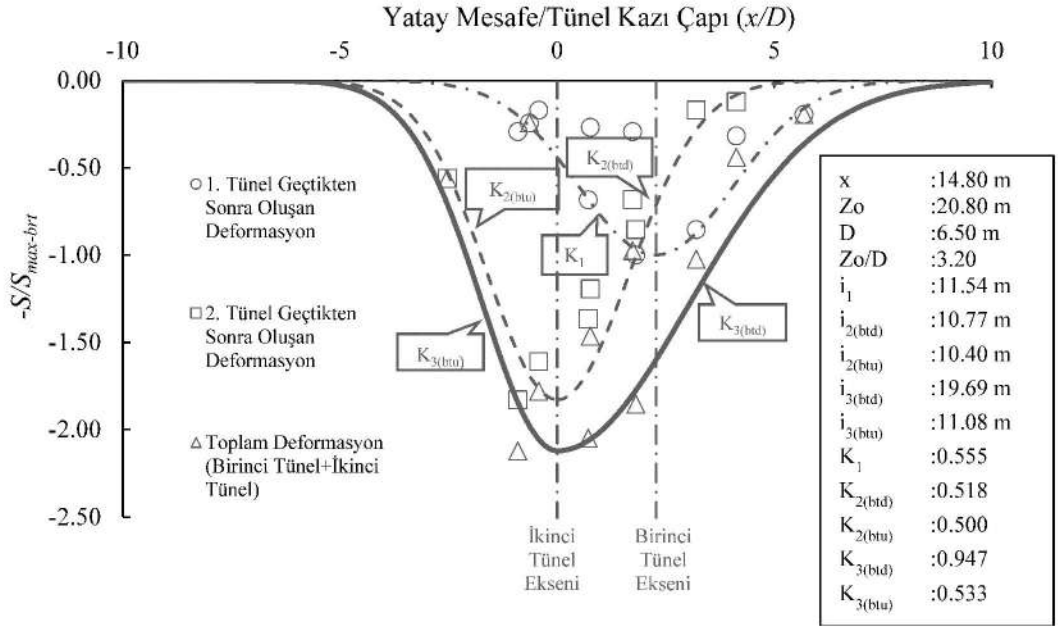
İkinci tüpün aynı kesitten geçişi sırasında, oturma eğrisinin sağ kanadı ($K_{3(btd)}$) için bu değer 0.912, sol kanadı ($K_{3(btu)}$) için ise 0.460 olarak hesaplanmıştır. Oturma eğrisinin önde ilerletilen tüp tarafında yatık olması, her iki tünelin etkileşim alanının kesişmesi ve zemindeki örselenme ile açıklanabilmektedir. C_3-C_3', C_2-C_2' ve C_1-C_1' kesitleri için yapılan benzer değerlendirmelerin sonuçları, sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 4. C3-C3' en kesitinde ikiz tünel kazılarına bağlı oluşan oturma teknesi profil değişimi.



Şekil 5. C2-C2' en kesitinde ikiz tünel kazılarına bağlı oluşan oturma teknesi profil değişimi.



Şekil 6. C1-C1' en kesitinde ikiz tünel kazılarına bağlı oluşan oturma teknesi profil değişimi.

3. SONUÇLAR

Çoklu yeraltı kazıları neticesinde gelişen yüzey oturma teknesi formunun, özellikle ikinci tünelin geçişinden sonra asimetrik hal aldığı belirlenmiştir. Oturma teknesinin formunu ve genişliğini temsil eden ve zemin türüne göre farklılık gösteren malzeme parametresinin (K) çoklu kazıların etkilediği bölgelerin girişim yapması nedeniyle kayda değer oranda arttığı görülmüştür. Aynı kesitten ikinci tünelin geçişi sonrası, oturma eğrisi dönüm noktasının (i) tünel ekseninden uzaklaştığı, dolayısıyla yüzeyde etkilediği alanın büyüdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumun önde ilerletilen kazının jeolojik ortamda neden olduğu örselenme ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Araştırma kapsamında incelenen kesitlerde hakim olan, zayıf jeolojik ortam olarak tanımlanabilecek killi kumlu birimler, tünel kazılarının oluşturduğu örselenmeleri yüzeye ve çevre kayaçlara daha büyük oranlarda yansıtmaktadır.

Bu nedenle, özellikle kentiçi yeraltı kazılarının tasarımı, hasar riski taşıyan etkileme bölgelerinin tanımlanması ve yüzeyde oluşturulacak izleme ağının belirlenmesinde bu sonucun göz önünde tutulmasının yararlı olacağı önerilmektedir.

4. KATKI BELİRTME

Yüzey deformasyonu izleme verilerinin temini konusunda katkı sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Gülermak-Doğuş Adi Ortaklığı'na teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR

Glossop, N.H., 1978. Soil Deformation Caused by Soft Ground Tunneling, PhD Thesis, University of Durham.

Güven, G. (2008). İstanbul Metrosu Otogar-Kirazlı 1 Arasının Mühendislik Jeolojisi Ve Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Deformasyonların Değerlendirilmesi,Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Mahmutoğlu, Y., 2011. Surface subsidence induced by twin subway tunneling in soft ground conditions in Istanbul. Bull Eng Geol Environ (2011) 70:115–131 DOI 10.1007/s10064-010-0289-8

Martos, F., 1958. Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. In: International Strata Control Congress, Leipzig. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Section fur Bergbau. Berlin, pp 191–205

O'Reilly, M. P., New, B. M., 1982. Settlements above tunnels in the UK—Their magnitude and prediction." Proc., Tunnelling'82, IMM, London, 173–181.

Peck, R. B. (1969). Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 7(3).

Rankin, W.J., 1998. Ground Movements Resulting from Urban Tunneling,: Prediction and Effects, Eng. Geology of Underground Movements, Eds (F G Ball ve Ark.) Geological Society Publication, No.5.

Schmidt, B. (1969). Settlements and ground movements associated with tunnelling in soil. PhD Thesis.

Wang, Z., Yao, W., Cai, Y., Xu, B., Fu, Y., Wei, G., 2018. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a largediameter shallow-buried twin-tunnel in soft ground Tunnelling and Underground Space Technology

A Study on the Effect of Overlying Limestone Layer in the Deformation Response of Twin Tunnels in Shimajiri Formation

Shimajiri Formasyonunda Açılan İkiz Tünnelerin Deformayon Davranışına Üstteki Kireçtaşı Tabakasının Etkisi Üzerine Bir Çalışma

M. Tamashiro[1], T. Ito[1], Ö. Aydan[1], N. Tokashiki[1]

*[1]Dept. of Civil Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa, Japan (*k208472@eve.u-ryukyu.ac.jp)*

ABSTRACT: In recent years, there has been an increasing number of examples for the construction of twin tunnels on the Shimajiri formation in Okinawa. Generally, the Shimajiri formation exists underneath the Ryukyu limestone. However, even when the Ryukyu limestone is at the top, its mechanical properties are treated as soil ground so that its effect on the deformation behavior of the tunnel is not evaluated. Therefore, in this study, its effect on the deformation behavior of the twin tunnels was investigated based on the FEM analyses and the presence or absence of the Ryukyu limestone as top layer has been quantitatively evaluated. It was found that the maximum shear and horizontal stresses differ greatly when Ryukyu limestone is taken into account.

Keywords: Twin tunnels, Shimajiri Formation, Ryukyu limestone, deformation behaviour.

ÖZ: *Son yıllarda Japonya'nın Okinawa Vilayeti'nde Shimajiri diye bilinen sedimenter kaya grubu içinde ikiz tüneli inşası artmaktadır. Bölgede Ryukyu kireçtaşı diye bilinen kaya gurubu bulunmakta ve bu kaya kütlesi genellikle Shimajiri sedimenter kaya grubunun üzerinde yer almaktadır. Kireçtaşında boşlukların bulunma olasılığı yüksek olduğu için tüneller genelde Shimajiri sedimanter kütle içinde açılmaktadır. Bu çalışmada kireçtaşının olup olmamasına bağlı olarak ikiz tünellerin deformayon durumu ve gerilme ortamı incelenmiş ve tartışılmıştır. Kireştaşının varlığı tünellerin deformayonunu ve gerilme ortamını etkilediği görülmüştür.*

Anahtar Kelimeler: *İkiz tünel, Shimajiri Formasyonu, Ryukyu Kireçtaşı, Deformasyon davranışı.*

1. INTRODUCTION

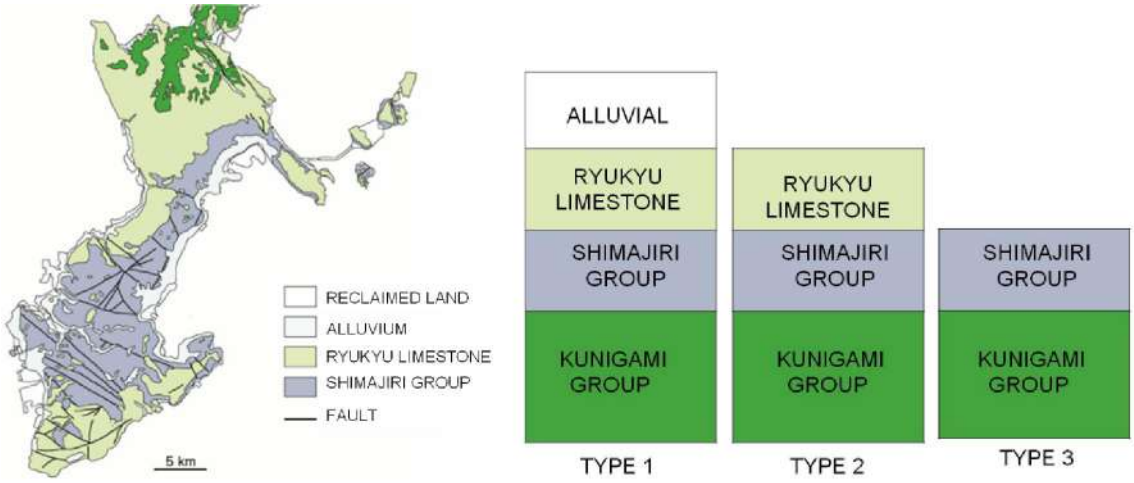
Compared other parts of Japan, construction of many infra-structures has been increased in recent years. As a part of rehabilitation of existing roadways and expressways, some new tunnels have been constructed. Due to the restriction of construction space and environmental conditions, there are many recently constructed twin tunnels with shallow overburden. Figure 1 shows locations of twin tunnels and a view of Shikina tunnel during the construction stage. The pillars between twin tunnels are generally too narrow and generally less than 0.5D. Furthermore, the areas are generally urbanized and there are many buildings and/or other structures, which impose on some restrictions on the excavation procedure and working hours.

(a) Location of twin tunnels (b) Shikina Tunnel

Figure 1. Location of twin tunnels and a view of Shikina Tunnel during construction.

2. GEOGRAPHY AND GEOLOGY OF OKINAWA ISLANDS

Okinawa island is more than 100 km long Island within the Ryukyu Archipelago. The southern part is relatively flat and covered with Ryukyu Limestone and Shimajiri sedimentary soft rock group. On the other hand, the northern part beyond Ishikawa and Katsuren is hillier and the geology consists of hard sedimentary rocks, phyllite and Paleozoic limestone. Although it is often wrongly called Shimajiri mudstone. Shimajiri sedimentary soft rock group generally consists of mudstone, sandstone siltstone and sometimes tuff. It is very prone to weathering and it contains many major and minor faults. Possible ground conditions for the stability assessments are illustrated in Figure 2b. Figure 3 shows some views of common rock units.



(a) (b)

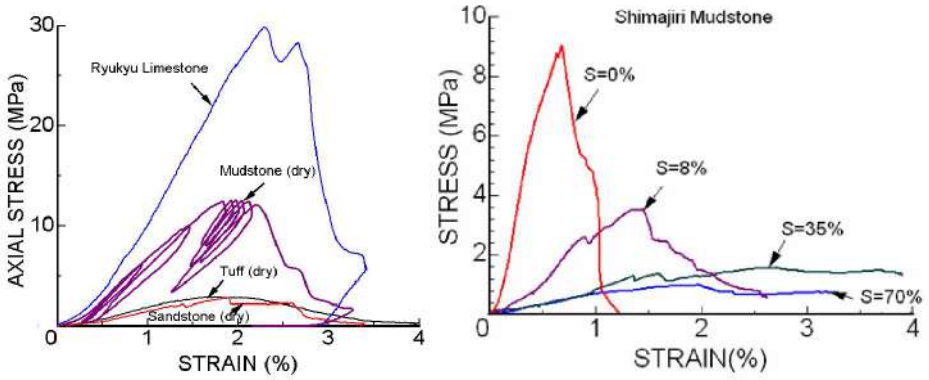
Figure 2: (a) Geology of the site and (b) Ground conditions (e.g. Shinjo 2014; Tokashiki, 2010)

(a) Ryukyu limestone (b) Mudstone (c) Shimajiri group at Minami-Uebaru

Figure 3. Views of rock groups.

3. CHARACTERIZATION OF ROCK UNITS USING RMQR ROCK CLASSIFICATION

The mechanical properties of Ryukyu limestone and Shimajiri soft rock groups have been tested by the authors and other researchers (e.g., Tokashiki 2010; Tokashiki and Aydan 2003, 2010; Aydan and Tokashiki 2007, 2017; Shinjo and Komiya 1978). Figure 4 shows strain-stress relations of Ryukyu limestone and soft rocks belonging Shimajiri group. Particularly, mudstone is very prone to water content variations and its uniaxial compressive strength decreases as the water content increases as shown in Figure 4b.



(a) Strain-stress relations (b) effect of water content on mudstone

Figure 4. Stress-strain relations of Ryukyu limestone and rocks belonging Shimajiri group and the effect of saturation (S)on strain-stress relation of mudstone (from Aydan & Tokashiki, 2017).

Ryukyu limestone is relatively young rock. However, some fracturing took place due to tectonic movements. Particularly normal faulting is wide spread and some cavities are formed in relation to the faulting events as such zone allows the permeation of ground water leading to the solution of Ryukyu limestone. Aydan et al. (2014) proposed a new rock classification system called "Rock Mass Quality Rating – RMQR". This system has been widely used in Ryukyu Archipelago. The rating of typical rock mass conditions according to RMQR is given in Table 1. These values decrease if the rock mass has some porous and/or fractured structure. This classification system has been also applied to Shimajiri group in relation to some projects and the results are given in Table 2.

Table 1. Rating according tp RMQR rock classification system

RMQR Parameter	Rate
R_{DD} (Degradation Degree)	6-9
R_{DSN} (Discontinuity Set Number)	12-16
R_{DS} (Discontinuity Spacing	8-12
R_{DC} (Discontinuity Condition)	22
R_{GWSC} (Groundwater Seepage Condition)	7
R_{GWAC}(Groundwater absorption condition)	4
Total RMQR*	59-70

RMQR= R_{DD} + R_{DSN} + R_{DS} + R_{DC} + R_{GWSC} + R_{GWAC}

Table 2. Rock classification of Ryukyu limestone and Shimajiri group.

Location	Rock Group	RMR	Q	RMQR
Minatogawa	Ryukyu limestone	28 - 61	0.66 – 3.75	28 - 56
Wakariji	Ryukyu limestone	60 - 66	3.3 – 3.5	57 - 65
Kita-uebaru	Shimajiri G.	32-38	0..9-2.1	22-28
Shikina	Shimajiri G.	39-44	2.7-5.5	28-35

4. MODELLING OF ROCKMASS AND TWIN TUNNELS

Figure 5 shows the geometry of the twin tunnel analyses. This is a classical size of twin tunnels adopted in Okinawa. However, the width of the tunnel can be up to 18 m as was the case in the recently constructed Maeda tunnel. The support system of the tunnel was assumed to be consisted of shotcrete, concrete liner and invert. Rockbolts are not taken into account.

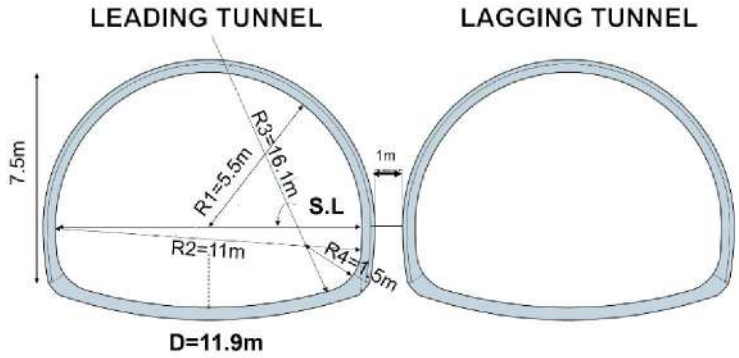
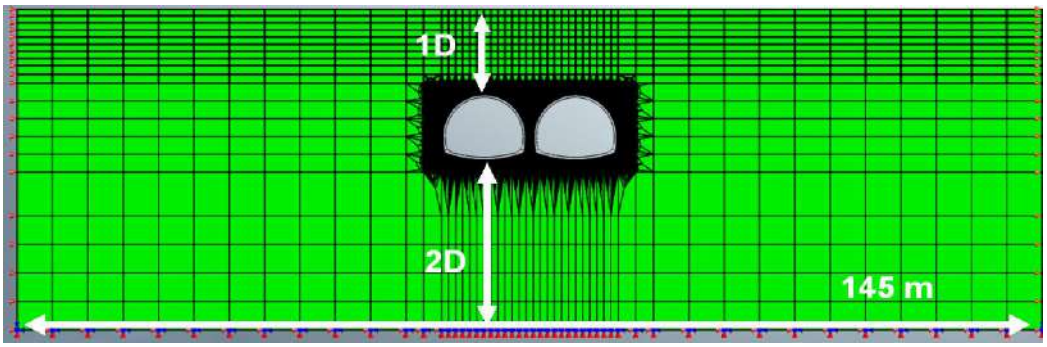
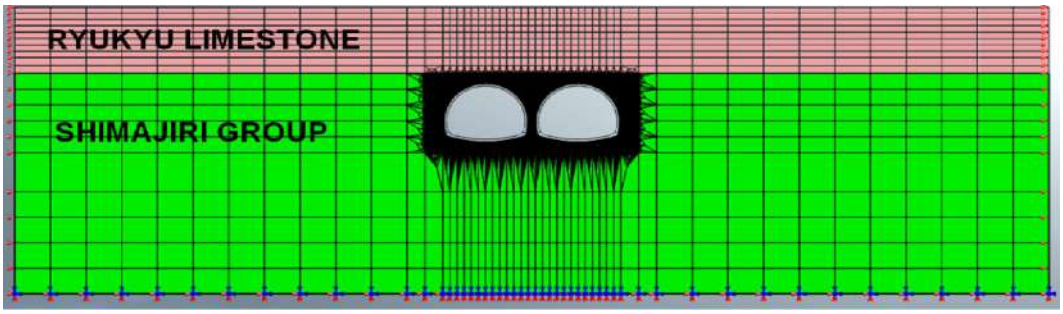


Figure 5. The geometry and support system of the twin tunnels analyzed.

Finite element method has been chosen for stability analyses. Although the FEM code is capable of elasto-plastic analyses, the elastic analyses are only reported in this study. Table 3 gives the mechanical properties adopted in numerical analyses. The twin tunnel was assumed to be excavated in Shimajiri mudstone while the top layer was mudstone for CASE 1 and Ryukyu limestone for CASE 2 in order to investigate the effect of its rigidity on the deformation and stress distributions of the tunnels and on the ground surface settlement (Figure 6). The support system was assumed to be introduced in the last 30 % of the excavation force as the analyses were two-dimensional. Furthermore, the excavation of leading and lagging tunnels were simulated.



(a) CASE 1: Uniform ground consisting of Shimajiri mudstone only



(b) CASE 2: Ground consists of Ryukyu limestone at top and Shimajiri mudstone below

Figure 6. Illustration of ground conditions together with FEM meshes.

Table 3. Physical and mechanical properties of ground and support system

Material	Unit weight (kN/m^3)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Ryukyu Limestone	21.5	18	0.23
Shimajiri mudstone	18	0.2	0.3
Shotcrete, concrete	24	5	0.3

5. RESULTS OF ANALYSES AND DISCUSSIONS

2.1. Deformation and Settlement Responses

Figure 7 shows the settlement of the ground surface and tunnel crown during excavation for the two cases. When the ground consists of Shimajiri mudstone only, the settlement is quite large and it is 2.3 times the settlement for the top layer is Ryukyu limestone. This clearly illustrates the effect of hard rock at the top of the soft mudstone layer on the deformation behavior of the tunnels. Figure 8 shows the vertical displacement of the domain for both cases.

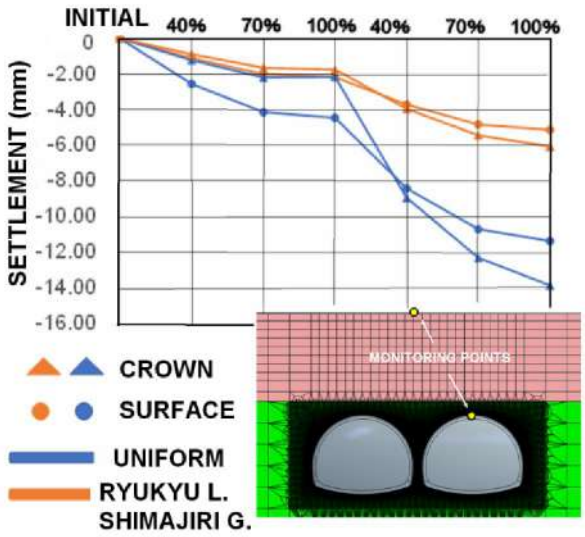
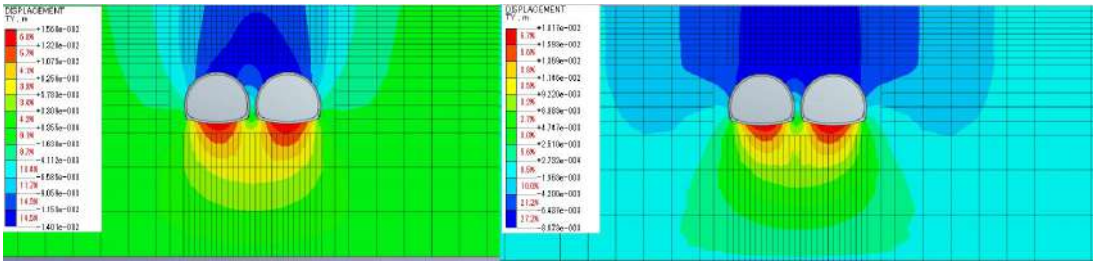


Figure 7. Settlement response of selected points in relation to the excavation stages.

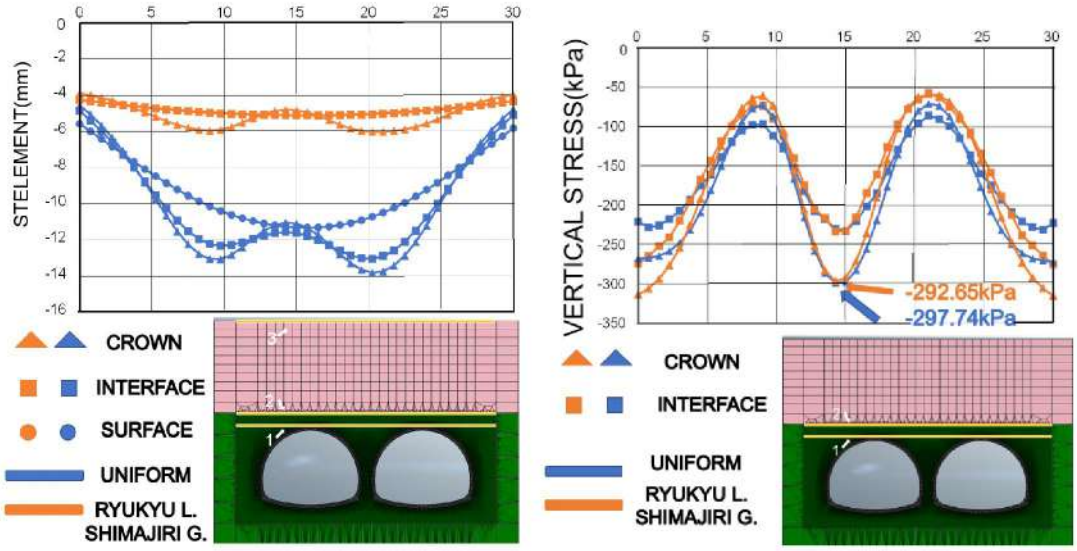
Figure 9a shows the settlement (vertical displacement) along three levels, namely, crown (Line 1), interface (Line 2) and ground surface (Line 3). As also noted in Figures 7 and 8, the settlement is greately reduced due to the existence of Ryukyu limestone. This has a great implication on the necessity of properly evaluating rock mass properties of Ryukyu limestone for a meaningful evaluation of deformation response and stability of the twin tunnels. In other words, the exploration

and evaluation of rock mass conditions of Ryukyu limestone in Ryukyu Archipelago must be implemented for economic design and safe construction of structures.



(a) CASE 1: Mudstone (b) CASE 2: Mudstone and Ryukyu limestone

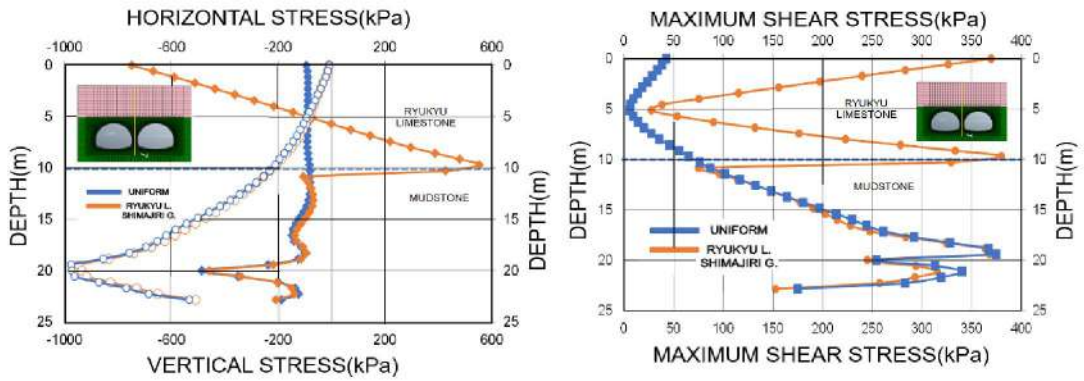
Figure 8. Vertical displacement response of the twin tunnels and



(a) Settlement (b) Vertical stresses

Figure 9. (a) settlement and (b) distribution of vertical stresses at selected levels for CASE and CASE 2.

Next, the stress states just above the tunnel at two levels are evaluated. Figure 9b shows the vertical stress at two levels. As noted on the figure, the vertical stresses at the center of the pillar is the same for both CASE 1 and CASE 2. However, the stresses are slightly higher for CASE 2. This might be due to arching action developed in Ryukyu limestone layer.



(a) Vertical and horizontal stresses (b) Maximum shear stress

Figure 10. Variation of vertical, horizontal and maximum shear stresses with depth for CASE 1 and CASE 2.

The central pillar, which is only 1 m wide in these analyses, sustains high stresses when it behaves elastically. Figure 10 shows horizontal, vertical and maximum shear stress distribution with depth. As the Ryukyu limestone rigidity is almost 90 times that of mudstone layer, the stress distribution in Ryukyu limestone is quite different. As said previously, the Ryukyu-limestone layer acts like a stiff beam above the mudstone base and bending stresses develop within the Ryukyu limestone layer. This situation is clearly noted from the distribution of the horizontal and maximum shear stresses acting in the central line. Ryukyu limestone layer sustains large horizontal stress near ground surface while its value becomes almost very small near the interface with mudstone layer. However, it should be noted that the stress distribution may be different if the yielding of materials is allowed and some separation should occur at the interface between mudstone and Ryukyu limestone layer.

Figure 11 shows the distribution of vertical stress component for when leading tunnel excavated first and then lagging tunnel is excavated next. As noted from the distributions, the vertical stresses on both sides of the leading tunnel are high as expected and they are symmetric with respect to the center line of the leading tunnel. However, when the lagging tunnel is excavated so that the stress distribution becomes entirely different. The stresses in the central pillar become higher than at those at other sides of the tunnels. These results clearly show that the stresses acting on the central pillar will be high irrespective of whether the support system exists or not provided that the surrounding rock mass behave elastically. However, it should be noted there are discontinuities in Shimajiri group as seen in Figure 3 and it is very likely that narrow central pillar would yield and this may lead to entirely different situation and the effect of support system would be undoubtedly necessary. Figure 12 shows such a situation, which has been seen in some recently excavated tunnels in Okinawa Prefecture

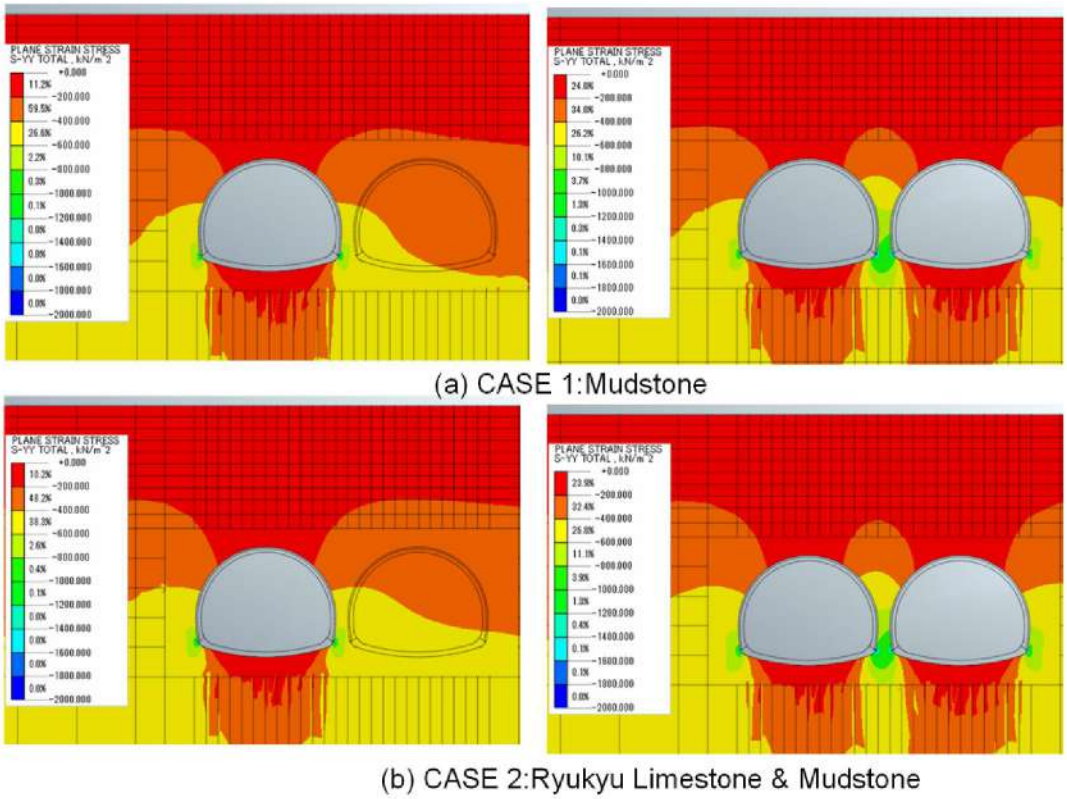


Figure 11. Vertical stress distributions for CASE 1 and CASE 2 in relation to the excavation stages of leading and lagging tunnels.

6. CONCLUSIONS

The construction of twin tunnels with shallow overburden and narrow central pillar is quite common in Ryukyu Archipelago. Furthermore, Ryukyu limestone and Shimajiri soft rock group are widely

distributed. Ryukyu limestone is generally found to be over Shimajiri group. In this study, the authors analyzed the effect of Ryukyu limestone layer on the deformation response and stress states of the twin tunnels. It is shown that the existence of Ryukyu limestone layer on the deformation response and stress state has a serious effect. As the required evaluation of properties of Ryukyu limestone on the principles of rock mechanics and rock engineering is generally ignored, the supporting effect of Ryukyu limestone layer is not properly assessed. This study clearly demonstrated the tremendous effect of Ryukyu limestone on the deformation response and stress state around twin tunnels. This implied that careful considerations should be given to a proper evaluation of rock mass properties of Ryukyu limestone.

Figure 12. A view of yielding in the central pillar of a tunnel excavated in Shimajiri Group.

7. REFERENCES

Aydan, Ö. and Tokashiki, N. 2007. Some damage observations in Ryukyu Limestone Caves of Ishigaki and Miyako islands and their possible relations to the 1771 Meiwa Earthquake. J. of The School of Marine Sci. and Tech., Tokai University, 5(1), pp. 23-39.

Aydan, Ö. and Tokashiki, N. 2017. Geotechnical issues in Ryukyu Archipelago and their solutions. KISOKO No 5, 34-42 (in Japanese).

Aydan, Ö. Ulusay, R. and Tokashiki, N., 2014. A New Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses Rock Mechanics and Rock Engineering., 47, 1255-1276.

Shinjo, R. 2014. Geology and its development of the Ryukyu Island Arc: An example of geology of Okinawa Island, Central Ryukyus. J. of App. Mech., JSCE, 70(2), I, 3-11 (in Japanese)

Shinjo, T. and Komiya, Y. 1978. On the strength decrease of Shimajiri Mudstone due to alternate drying and wetting as physical weathering. The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture. University of the Ryukyus, Dept. of Agricultural Engineering, No.25, 307-323 (in Japanese).

Tokashiki, N., 2010. Study on the Engineering Properties of *Ryukyu Limestone* and the Evaluation of the Stability of its Rock Mass and Masonry Structures. PhD Thesis, Waseda University, Tokyo (in Japanese).

Tokashiki, N. and Aydan, Ö., 2003, Characteristics of Ryukyu Limestone and its utilization as a building stone in historical and modern structures, International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul, pp. 311-318.

Tokashiki, N. and Ö. Aydan, 2010. The stability assessment of overhanging Ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of Rock Mass. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, Vol. 66, No. 2, 397-406.

Kent ve Çevre Jeolojisi / *Urban and Environmental Geology*

Manyas Gölü Havzası Yeraltısuyu Kirlilik Potansiyelinin AHS-DRASTIC Yöntemlerinin Entegrasyonu ile Değerlendirilmesi

Assessment of the Groundwater Pollution Potential of Lake Manyas Basin by Integration of AHS-DRASTIC Methods

H. Alan[1,*], R. Karagüzel[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul*
*(*hazel.alan@itu.edu.tr)*

ÖZ: Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini sağlayabilmek amacıyla yüzey ve yeraltısularının kalite parametrelerinin çoklu ölçüt karar analizleri kullanılarak değerlendirilmesi sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Manyas Gölü Havzası'nda, yeraltısularının kirlenme potansiyelini ortaya koymak amacıyla yapılan bu çalışmada DRASTIC ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemlerinin entegrasyonu ile Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı analizi yapılarak yeraltısuyu hassasiyet haritası hazırlanmıştır. Hidrojeolojik sistemlerin kirlenme potansiyelinin belirlenmesinde etkili olan 7 adet parametrenin AHS yönteminden yararlanılarak ağırlık ve reyting katsayıları belirlenmiştir. Hazırlanan haritadan, özellikle Manyas Gölü yakın çevresinin kirlenmeye karşı en hassas alanlar olduğu görülmüştür. Kirlenme potansiyeli yüksek ve çok yüksek olan alanlarda; tarımsal üretim, hayvancılık, yerleşimler ve tarıma dayalı sanayi kuruluşlarının katı ve sıvı atıkları ile gübre ve zirai mücadele ilaçlarının yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Hazırlanan yeraltısuyu hassasiyet haritasının doğruluğu sahadaki yeraltısuyu örneklemesi çalışmaları ve kimyasal analiz sonuçları ile sınanmıştır. Bu alanlardan alınan yeraltısuyu örneklerinde, nitrat, arsenik vb., değerleri, özellikle içme-kullanma suyu standartlarının üzerinde bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Analitik hiyerarşi süreci (AHS), DRASTIC, Manyas Gölü, Yeraltısuyu Hassasiyet Haritası, CBS

ABSTRACT: *In order to ensure the sustainable management of water resources, evaluation of the quality parameter of surface and groundwater with multi-criteria decision analysis is among the commonly used methods. In this study, which was carried out in order to reveal the pollution potential of groundwater in the Lake Manyas Basin, a groundwater vulnerability map was prepared by intergrating DRASTIC and Analytic Hierarchy Process (AHS) methods and performing Geographic Information System (GIS) based analyses. The weight and rating coefficients of 7 parameters that are effective in designating the pollution potential of hydrogeological systems were determined using AHS method. It was seen from the prepared map that especially the vicinity of Lake Manyas are the most vulnerable areas against pollution. It has been determined that in addition to the solid and liquid wastes of agricultural production, animal husbandry, settlements and agricultural-based industrial establishments, fertilizers and pesticides are widely used in highly vulnerable areas. The accuracy of the created groundwater vulnerability map was tested by groundwater sampling studies in the field and chemical analysis results.. In groundwater samples taken from these areas, nitrate, arsenic, etc. were observed higher than the drinking-utility water standards.*

Keywords: *Analytic hierarchy process (AHP), DRASTIC, Lake Manyas, Groundwater Vulnerability Map, GIS*

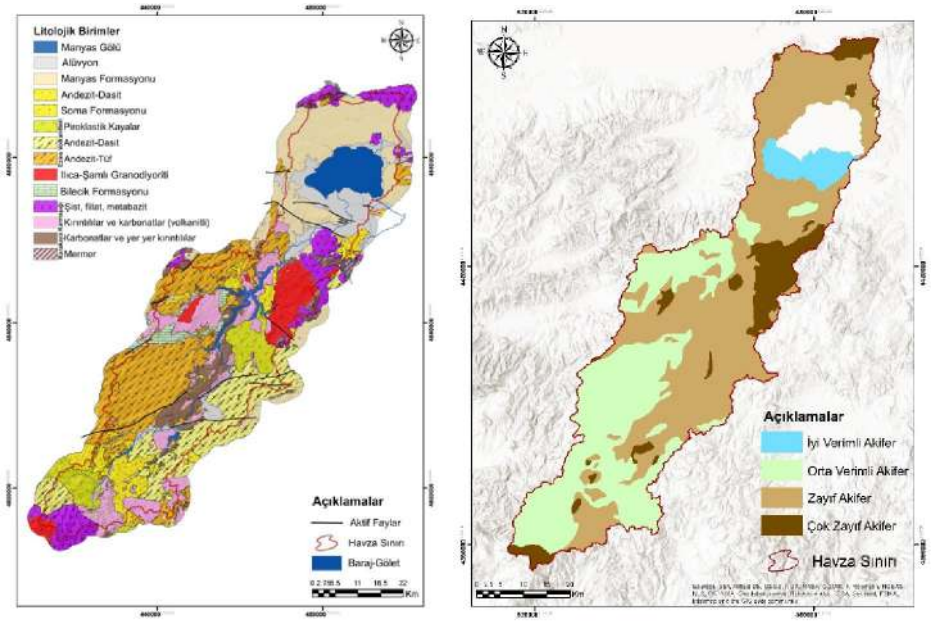
1. GİRİŞ

Su kaynaklarının kirlilik potansiyelinin günden güne artmaya devam ettiği günümüz koşullarında, özellikle yeraltısularının içme ve kullanma suyu olarak kullanıldığı havzalarda yeraltısuyu kirlenme potansiyelinin ortaya konulması giderek yaygınlaşmaktadır. Artan nüfus ve küresel iklim değişikliği ile birlikte su kaynaklarına duyulan ihtiyacın da artmasıyla özellikle yeraltısularının çoğunlukla içme suyu olarak kullanıldığı havzalarda yeraltısuyu hassasiyet analizleri yapılarak, su kaynaklarının

sürdürülebilirliği için koruma kuşaklarının belirlenmesi kritik önem taşımaktadır (Karagüzel vd, 2006; Şener vd. 2012; Erdoğan vd, 2016; Demiroğlu vd, 2017). Bu çalışmada, Manyas Gölü Havzası'nın yeraltısuyu hassasiyet haritası oluşturularak, havzadaki yeraltısuyu kirlenebilirlik potansiyelinin ortaya konulması amaçlanmıştır. İnceleme alanı, Susurluk Nehir Havzası'nda, Balıkesir ili sınırları içerisinde bulunmakta olup 2.993 km^2'lik yüz ölçümüne sahiptir. Çalışma amacına yönelik olarak, Manyas Gölü Havzası'nın jeolojik, hidrolojik ve hidrojeolojik özellikleri incelenerek, yeraltısularının kirlenme potansiyeli oluşturulan yeraltısuyu hassasiyet haritası ile bütünleşik olarak değerlendirilmiştir.

2. İNCELEME ALANININ JEOLOJİSİ

Manyas Gölü Havzası, Sakarya zonu ile tektonizma sonrası oluşan birimlerin üzerinde konumlanarak iki farklı tektonik birliğin bulunduğu bölgede yer almaktadır (Akyüz, 1995). Manyas Gölü Havzası'ndaki litolojik birimler geçmiş çalışmalarda kullanılan formasyon isimleri düzenlenerek Mesozoyik-Tersiyer yaşlı volkano-sedimenter kayalardan oluşan Karakaya Karmaşığı, Üst Jura-Alt Kretase yaşlı kireçtaşlarından oluşan Bilecik Formasyonu, Geç Oligosen-Erken Miyosen yaşlı Ilıca-Şamlı Granodiyoriti, Orta-Üst Miyosen kırıntılı ve kimyasal kayalardan oluşmuş genç karasal çökellerin meydana getirdiği Soma Formasyonu, Orta-Üst Miyosen yaşlı pembe-mor, masif andezitler, alacalı andezitik bloklardan oluşmuş volkanik breş, lav ve beyaz tüflerden oluşan Ezine Volkanitleri, Pliyosen-Pleyistosen yaşlı karasal birimlerden oluşan Manyas Formasyonu ve Kuvaterner alüvyonlar olarak haritalanmıştır (Şekil 1a).



Şekil 1. Manyas Gölü Havzası a) jeoloji haritası ve b) hidrojeoloji haritası

3. HİDROLOJİ

Çalışma alanında yapılan hidrolojik çalışmalar kapsamında Bandırma, Manyas, Akçaldede, Gönen ve Bergama meteoroloji istasyonlarına ait veriler kullanılarak ortalama yağış, buharlaşma, akış ve süzülme hesaplamaları yapılarak meteorolojik su bilançosu hesaplanmıştır. Manyas Gölü Havzası'nda, ortalama yıllık yağış değeri 673,67 mm, toplam alana düşen yağış miktarı ise 2.016.295.310 m^3 /yıl olarak hesaplanmıştır. Penman yöntemi ile 5 adet meteoroloji istasyonuna ait veriler kullanılarak havzadaki gerçek buharlaşma değeri 405,051 mm ve toplam alana düşen buharlaşma değeri 1.212.318.640 m^3/yıl olarak hesaplanmıştır. Karadere akım gözlem istasyonu (AGİ) regülatörü'ne ait veriler kullanılarak havza dışına boşalım 430.000.000 m^3/yıl hesaplanmış ve gölden buharlaşma ise 118.000.000 m^3/yıl olarak hesaplanmıştır.

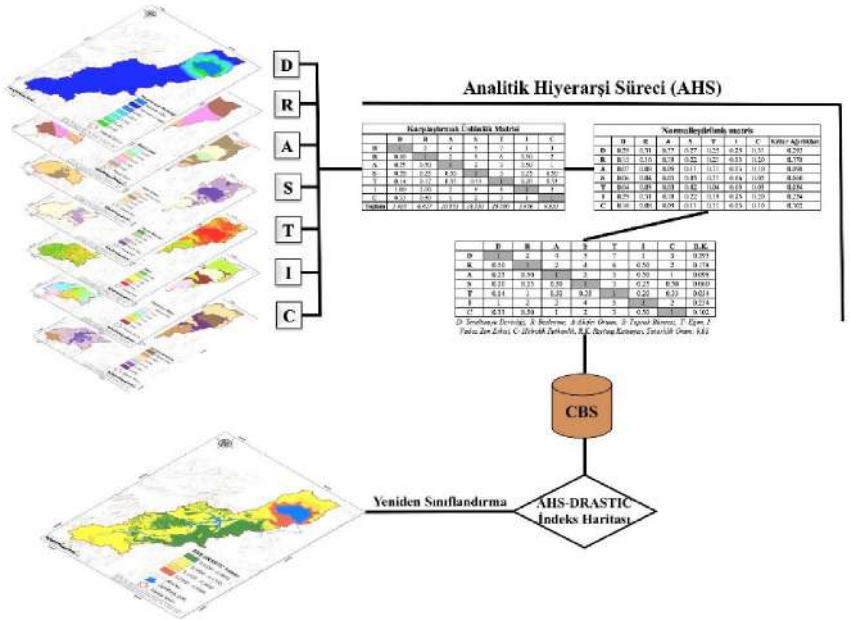
Buradan, yapılan meteorolojik su bilançosuna göre toplam beslenme ile toplam boşalım arasındaki fark olan 256 milyon m^3 suyun havzada yüzey/göl ve yeraltısuyu olarak depolandığı anlaşılmaktadır. Havzada depolanan yüzey ve yeraltısuları tarımsal sulama, sanayi, içme kullanma vb. amaçlara yönelik olarak kullanılmaktadır. Yeraltısuyu bilançosu ise bu bildiri kapsamı dışında tutulmuştur.

4. HİDROJEOLOJİ

Çalışma alanındaki litolojik birimlerin hidrojeolojik özelliklerini tanımlamak amacıyla 1/25:000 ölçekli hidrojeoloji haritası düzenlenerek, litolojik birimler Pekişmiş Formasyonlar ve Pekişmemiş Formasyonlar olarak sınıflanmıştır. Havzadaki Pekişmemiş Formasyonlar Yaygın ve Zengin (iyi verimli) Akiferler, Pekişmiş Formasyonlar ise Bölgesel-İlişkisiz(orta verimli) Akiferler, Zayıf Akiferler ve Çok Zayıf Akiferler olarak gruplandırılmıştır. Havzadaki alüvyonlar yaygın ve zengin akiferi; Ezine volkanitlere ait ayrılmamış volkanitler ve piroklastik kayalar, Bilecik Formasyonu ve Soma Formasyonu orta verimli akiferi; Manyas Formasyonu, Ezine volkanitlerine ait Orta Üst Miyosen ayrılmamış volkanitler ile Karaya Karmaşığına ait Permo-Triyas yaşlı kırıntılılar ve karbonatlar ve Permiyen yaşlı karbonatlar kırıntılılar zayıf akiferi; Ilıca-Şamlı Granodiyoriti ve Karakaya karmaşığının Paleozoyik yaşlı şistler ve Permiyen yaşlı mermerler ise çok zayıf akiferi oluşturan litolojik birimlerdir (Şekil 1b).

5. YERALTISULARININ KİRLİLİĞE KARŞI HASSASİYET ANALİZİ

Yeraltısularının kirlenebilirlik potansiyeli çoğunlukla yeraltısuyu hassasiyeti kavramı ile de ifade edilmektedir. Yeraltısularında hassasiyet kavramını ifade etmek amacıyla pek çok tanım yapılmıştır. Yeraltısularında hassasiyet kavramı Margat (1968) tarafından, yeraltısularının bulunduğu doğal ortamın yeraltısularının kalitesini etkileyen kirletecilere karşı yeraltısularının korunmasına yönelik farklı derecelere göre sınıflandırılabilmesi olarak tanımlamıştır. Manyas Gölü Havzası'nın yeraltısuyu kirlenebilirlik potansiyelini değerlendirmek amacıyla DRASTIC yöntem seçilmiştir. Yöntemin uygulanmasında belirleyici olan 7 adet parametrenin DRASTIC sınıf değeri ve ağırlık katsayısı Analitik Hiyerarşi süreci (AHS) yöntemi kullanılarak ve çalışma alanının özellikleri göz önünde bulundurularak tekrar hesaplanmıştır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemine göre "Reyting Katsayıları" ve AHS toplam "Ağırlık Katsayıları" hesaplanan parametreler ile DRASTIC yöntem entegre edilmiş ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak Manyas Gölü Havzası'nın yeraltısuyu hassasiyet haritası hazırlanmıştır (Şekil 2 ve Çizelge 8).



Şekil 2. AHS-DRASTIC Entegrasyonu ile yeraltısuyu hassasiyet haritasının oluşturulmasına ilişkin akış diyagramı

Yeraltısuyu Derinliği (D)

Yeraltı suyu derinliği, yüzeyden yeraltısuyu seviyesine kadar olan mesafeyi ifade etmekte ve kirleticilerin akifere ulaşana kadar kat ettiği yol olarak tanımlanmaktadır (Aller vd, 1987). Manyas Gölü Havzası'nda yağışlı dönem (Haziran 2019) arazi çalışmaları kapsamında ölçülen statik su seviyeleri 1.5 m ile 25 m arasında değişmektedir. Havza genelinde sadece göl çevresine ait yeraltısuyu seviye ölçümleri mevcut olduğundan, ölçüm yapılmayan alanlarda yeraltısuyu parametresi ihmal edilmiştir. Çalışma alanında ölçülen yeraltısuyu derinlikleri 0-2 m, 2-5 m, 5-10 m, 10-20 m ve >20 m olmak üzere 5 sınıfa ayrılmış, ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak göreceli öncelik değerlerine göre reyting katsayıları hesaplanmıştır (Çizelge 1). DRASTIC-AHS yöntemlerinin entegrasyonu ile yeraltısuyu derinliği parametresi için hesaplanan reyting katsayılarına göre Manyas Gölü Havzası'nın yeraltısuyu derinlik haritası oluşturulmuştur (Şekil 3a).

Çizelge 1.Yeraltısuyu derinliği (D) parametresine ilişkin ikili karşılaştırma matrisi ve reyting katsayıları

	A	B	C	D	E	R.K.
A	1	2	4	7	8	0.480
B	0.50	1	2	4	6	0.267
C	0.25	0.50	1	2	3	0.133
D	0.14	0.25	0.50	1	2	0.073
E	0.13	0.17	0.33	0.50	1	0.046

A- 0-2 m, B- 2-5 m, C- 5-10 m, D- 10-20 m, E- >20 m, R.K. Reyting Katsayısı, Tutarlılık Oranı: 0,01

Net Beslenim (R)

Yeraltısuyu beslenme miktarının yüksek olduğu alanlarda yeraltısuyu kirlililik potansiyelinin yüksek olduğu kabul edilmektedir (Aller ve diğ, 1987). Çalışma alanında Bandırma, Manyas, Gönen, Akçaldede Radar ve Bergama meteoroloji istasyonları için Penman yöntemi meteorolojik su bilançosu ile hesaplanan akış değerleri kullanılarak ArcGIS yazılımında mesafe ile ters ağırlıklı IDW (Inverse distance weighted) interpolasyon yöntemi ile Manyas Gölü Havzası beslenim haritası oluşturulmuştur. Beslenme miktarları 220-234.78 mm, 234.78-251.77 mm, 251.77-269.14 mm, 269.14-287.61 mm ve 287.61-314.22 mm olmak üzere 5 sınıfa ayrılmış, ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak göreceli öncelik değerlerine göre reyting katsayıları hesaplanıp, Manyas Gölü Havzası'nın beslenim haritası oluşturulmuştur (Çizelge 2 ve Şekil 3b).

Çizelge 2. Net Beslenim (R) parametresine ilişkin ikili karşılaştırma matrisi ve reyting katsayıları.

	A	B	C	D	E	R.K.
A	1	0,50	0,33	0,20	0,14	0,051
B	2	1	0,50	0,25	0,17	0,078
C	3	2	1	0,50	0,25	0,138
D	5	4	2	1	0,50	0,265
E	7	6	4	2	1	0,467

A- 220-235 mm, B- 235-252 mm, C- 252-269 mm, D- 269-288 mm, E- 288-314 mm, R.K. Reyting Katsayısı, Tutarlılık Oranı:0,01

Akifer Ortam (A)

Litolojik birimlerin dane boylarının büyük olması ve boşlukların birbirleri ile ilişkili olmasından kaynaklanan permeabilitesinin yüksekliği, akiferlerin kirlenebilirlik potansiyelini arttırmaktadır (Aller vd, 1987). Manyas Gölü Havzasındaki alüvyonlar yaygın ve zengin akiferi; Ezine volkanitlerine ait ayrılmamış volkanitler ve piroklastik kayalar, Bilecik Formasyonu ile Soma Formasyonu orta verimli akiferi; Manyas Formasyonu, Ezine volkanitlerine ait orta-üst miyosen ayrılmamış volkanitler ile Karaya Karmaşığına ait Permo-Triyas yaşlı kırıntılılar ve karbonatlar ve Permiyen yaşlı karbonatlar kırıntılılar zayıf akiferi; Ilıca-Şamlı Granodiyoriti ve Karakaya karmaşığının Paleozoyik yaşlı şistler ve Permiyen yaşlı mermerler ise çok zayıf akiferi oluşturan litolojik birimlerdir. Çalışma alanını temsil eden akifer ortamlar 4 sınıfa ayrılmış, ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak göreceli öncelik değerlerine göre reyting katsayıları hesaplanıp, Manyas Gölü Havzası'nın akifer ortam haritası oluşturulmuştur (Çizelge 3 ve Şekil 3c).

Çizelge 3. Akifer Ortam (A) parametresine ilişkin ikili karşılaştırma matrisi ve reyting katsayıları

	A	B	C	D	R.K.
A	1	3	5	7	0.558
B	0.33	1	3	5	0.263
C	0.20	0.33	1	3	0.122
D	0.14	0.20	0.33	1	0.057

A- Verimli, B- Orta verimli akifer, C- Zayıf akifer, D- Çok zayıf akifer, R.K. Reyting Katsayısı, Tutarlılık Oranı: 0,04

Toprak Bünyesi (S)

Manyas Gölü havzası topraklarının % 67,05'i Orta bünyeli tekstüre sahip Topraklarda oluşmaktadır. Kahverengi Orman Toprakları ve Kireçsiz Kahverengi Orman Topraklarının yayılım gösterdiği alanlar çoğunlukla kaba tekstüre sahiptir. Havzanın kuzeyinde konumlanan Manyas gölü çevresini saran alanda İnce bünyeye sahip topraklar yayılım göstermektir. Bu alanlar Alüvyal ve Vertisol Büyük Toprak grubuna denk gelmektedir. Havzanın Batı ve Güneybatı kenarı boyuna uzanan alanlarda da İnce bünyeli topraklar yoğun yayılım alanına sahiptir (TÜBİTAK, 2019). Çalışma alanındaki toprak bünyesi özellikleri kaba kum/çakıl, ince kum, silt ve kil olmak üzere 4 sınıfa ayrılmış, ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak göreceli öncelik değerlerine göre reyting katsayıları hesaplanmış, Manyas Gölü Havzası'nın toprak bünyesi haritası oluşturulmuştur (Çizelge 4 ve Şekil 3d).

Çizelge 4. Toprak Bünyesi (S) parametresine ilişkin ikili karşılaştırma matrisi ve reyting katsayılar

	A	B	C	D	R.K.
A	1	2	3	5	0.476
B	0.50	1	2	4	0.288
C	0.33	0.50	1	2	0.154
D	0.20	0.25	0.50	1	0.081

A- Kaba kum/Çakıl, B- İnce kum, C- Silt, D- Kil, R.K. Reyting Katsayısı, Tutarlılık Oranı: 0,01

Eğim (T)

Manyas Gölü Havzasının eğim özelliklerini ortaya koymak amacıyla havzasının topoğrafik haritaları sayısallaştırılarak havzanın dijital yükseklik modeli (DEM) elde edilmiştir. 4x4 m'lik çözünürlüğe sahip olan dijital yükseklik modeli kullanılarak havzanın eğim haritası oluşturulmuştur. Eğim parametresi %0-2, %2-6, %6-12, %12-18 ve >%18 olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. İkili karşılaştırma matrisleri kullanılarak göreceli öncelik değerlerine göre reyting katsayıları hesaplanarak Manyas Gölü Havzası'nın eğim haritası oluşturulmuştur (Çizelge 5 ve Şekl 3e).

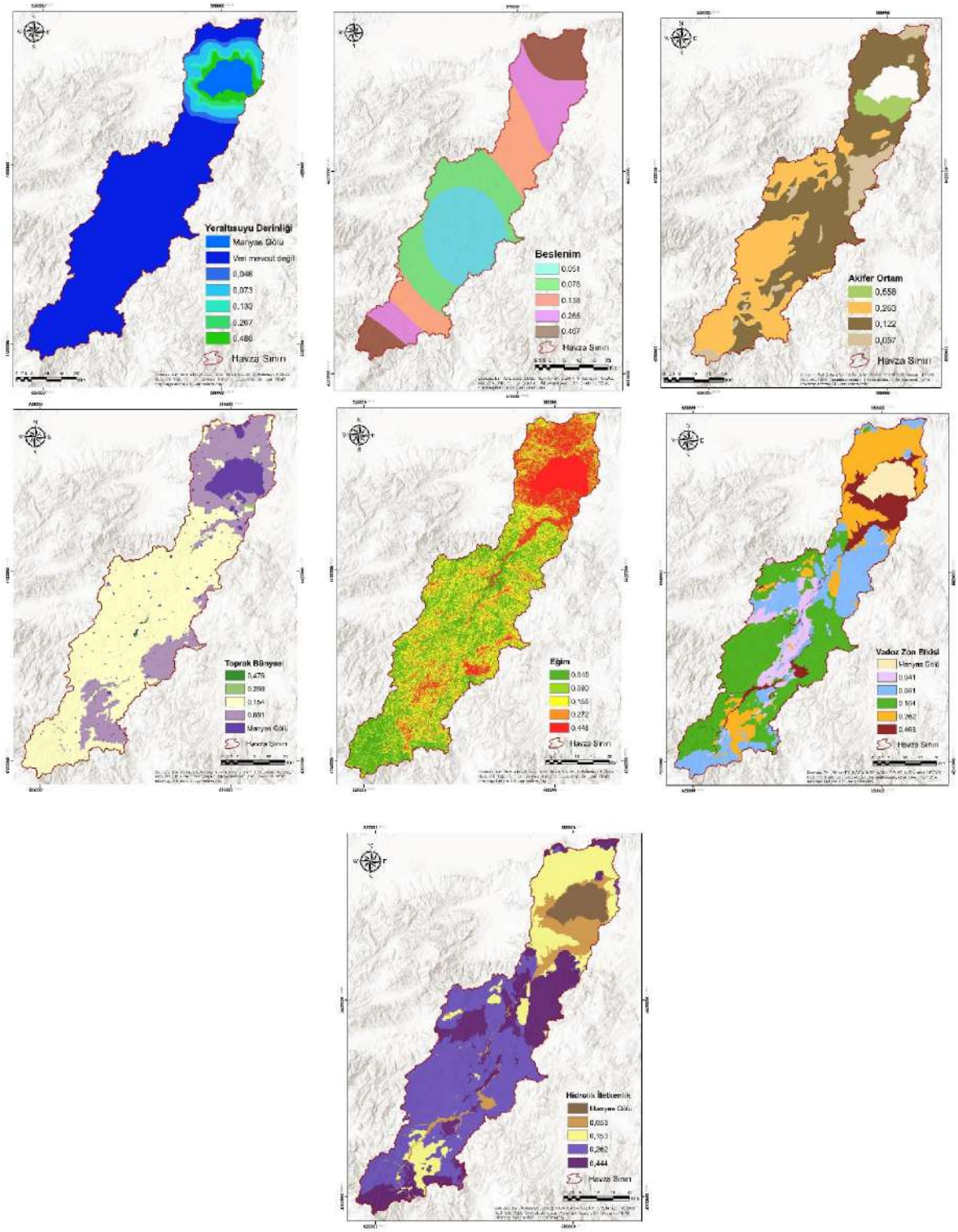
Çizelge 5. Eğim (T) parametresine ilişkin ikili karşılaştırma matrisi ve reyting katsayıları

	A	B	C	D	E	R.K.
A	1	2	4	5	7	0.448
B	0.50	1	2	4	6	0.272
C	0.25	0.50	1	2	5	0.155
D	0.20	0.25	0.50	1	2	0.080
E	0.14	0.17	0.20	0.50	1	0.045

A- % 0-2, B- % 2-6, C- % 6-12, D- % 12-18, E- % >18, R.K. Reyting Katsayısı, Tutarlılık Oranı: 0,02

Vadoz Zon Etkisi (I)

Suya doygun olmayan bölgenin kalınlığı ve yapısal özellikleri yeraltısularının kirlilik potansiyelini önemli ölçüde etkilemektedir (Aller ve diğ, 1987). Manyas Gölü Havzası'nın vadoz zon etkisi parametresi, DRASTIC sınıf değerleri ile karşılaştırılarak alüvyon, kireçtaşı, kumtaşı-kiltaşı-çakıltaşı-çamurtaşı, magmatik/metamorfikler ve volkanik kayaçlar olmak üzere 5 sınıf olarak gruplandırılarak ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak göreceli öncelik değerlerine göre reyting katsayıları hesaplanmış, (Çizelge 6). DRASTIC-AHS yöntemlerinin entegrasyonu ile vadoz zon etkisi parametresi için hesaplanan reyting katsayılarına göre Manyas Gölü Havzası'nın vadoz zon etkisi haritası oluşturulmuştur (Şekil 3f).



Şekil 3. AHS-DRASTIC entegrasyonu ile elde edilen reyting katsayılarına göre oluşturulan a) yeraltısuyu derinlik, b) net beslenim, c) akifer ortam, d) toprak bünyesi, e) eğim, f) vadoz zon etkisi ve g) hidrolik iletkenlik haritaları.

Çizelge 6. Vadoz Zon Etkisi (I) parametresine ilişkin ikili karşılaştırma matrisi ve reyting katsayıları

	A	B	C	D	E	R.K.
A	1	3	4	5	7	0.463
B	0.33	1	3	4	6	0.262
C	0.25	0.50	1	3	5	0.154
D	0.20	0.25	0.33	1	3	0.081
E	0.14	0.17	0.20	0.33	1	0.041

A- Alüvyon, B- Kireçtaşı, C- Kumtaşı-Çamurtaşı-Çakıltaşı-Kiltaşı, D- Volkanitler, E- Magmatik ve Metamorfikler, R.K. Reyting Katsayısı, Tutarlılık Oranı: 0,06

Hidrolik İletkenlik (C)

Akifer ortamına ulaşan kirletici parametrelerin taşınım süreçlerinde etkili olan hidrolik iletkenlik, yeraltısularının kirlilik potansiyelinin yüksek olduğu alanların tespit edilebilmesi için önemli bir parametredir. Manyas Gölü Havzası'ndaki litolojik birimlerin hidrolik iletkenlik değerleri bölgede yapılan önceki çalışmalara ve literatür verilerine göre, 10^{-3} - 10^{-4} m/s, 10^{-4} - 10^{-5} m/s,10^{-5} - 10^{-6} m/s, 10^{-6} - 10^{-7} m/s, >10^{-7} m/s olmak üzere 5 sınıfa ayrılmış, ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak göreceli öncelik değerlerine göre reyting katsayıları hesaplanmıştır (Çizelge 7). DRASTIC-AHS yöntemlerinin entegrasyonu ile hidrolik iletkenlik parametresi için hesaplanan reyting katsayılarına göre Manyas Gölü Havzası'nın hidrolik iletkenlik haritası oluşturulmuştur (Şekil 3g).

Çizelge 7. Hidrolik İletkenlik (C, m/s) parametresine ilişkin ikili karşılaştırma matrisi ve reyting katsayıları.

	A	B	C	D	E	R.K.
A	1	0.50	0.33	0.20	0.14	0.053
B	2	1	0.50	0.33	0.20	0.089
C	3	2	1	0.50	0.33	0.153
D	5	3	2	1	0.50	0.262
E	7	5	3	2	1	0.444

A- 10^{-7} , B- 10^{-6} - 10^{-7} , C- 10^{-5} - 10^{-6}, D- 10^{-4} - 10^{-5}, E- > 10^{-3} - 10^{-4} , R.K. Reyting Katsayısı, Tutarlılık Oranı: 0,01

Çizelge 8. Manyas Gölü Havzası hidrojeolojik parametrelerin analitik hiyerarşı süreci yöntemi ile hesaplanan ağırlık ve reyting katsayıları.

Parametre	Alt Parametre	AHS Ağırlık Katsayısı	AHS Reyting Katsayısı	Toplam AHS Ağırlık
Yeraltısuyu Derinliği (m)	0-2	0.293	0.4799	0.1406
	2-5		0.2669	0.0782
	5-10		0.1334	0.0391
	10-20		0.0735	0.0215
	>20		0.0463	0.0136
Beslenme (mm)	220-235	0.178	0.0510	0.0091
	235-252		0.0786	0.0140
	252-269		0.1381	0.0246
	269-288		0.2651	0.0472
	288-314		0.4672	0.0832
Akifer Ortamı	Yaygın ve zengin akifer	0.098	0.5579	0.0547
	Orta verimli akifer		0.2633	0.0258
	Zayıf akifer		0.1219	0.0119
	Çok zayıf akifer		0.0569	0.0056
Toprak Bünyesi	Kaba kum	0.060	0.4758	0.0286
	İnce kum		0.2884	0.0173
	Silt		0.1544	0.0093
	Kil		0.0813	0.0049

Çizelge 8'in devamı

Eğim (%)	0 - 2	0.034	0.4483	0.0152
	2 - 6		0.2719	0.0092
	6 - 12		0.1550	0.0053
	12 - 18		0.0799	0.0027
	>18		0.0449	0.0015
Vadoz Zon Etkisi	Alüvyon	0.234	0.4625	0.1082
	Kumtaşı-Çamurtaşı-Çakıltaşı		0.2616	0.0612
	Volkanitler		0.1539	0.0360
	Magmatik ve Metamorfikler		0.0814	0.0190
	Kireçtaşı		0.0406	0.0095
Hidrolik İletkenlik (m/s)	10^{-3} - 10^{-4}	0.102	0.0526	0.0054
	10^{-4} - 10^{-5}		0.0892	0.0091
	10^{-5} - 10^{-6}		0.1528	0.0156
	10^{-6} - 10^{-7}		0.2618	0.0267
	> 10^{-7}		0.4436	0.0452

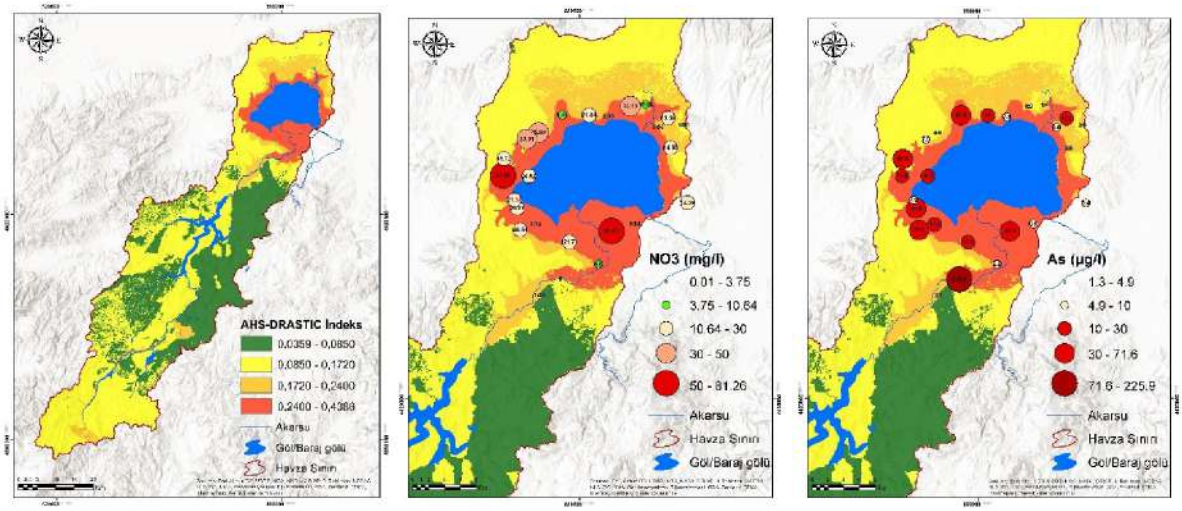
6. SONUÇLAR

DRASTIC yöntemde kullanılan yedi adet parametrenin analitik hiyerarşi süreci (AHS) yöntemi ile entegrasyonu yapılarak, Manyas Gölü havzasının yeraltısuyu hassasiyet haritası oluşturularak, havzada kirlenme potansiyeli yüksek olan alanlar belirlenmiştir. Manyas Gölü Havzası için elde edilen ve 0,0359 ile 0,4386 arasında değişen AHS-DRASTIC indeks değerleri 4 sınıfa ayrılmıştır (Çizelge 9). Kirlenme potansiyelinin en yüksek olduğu bölgelerdeki AHS-DRASTIC indeks aralığı 0,2400 ile 0,4386 arasında değişmektedir. Kirlenebilirlik potansiyelinin ve yeraltısuyu hassasiyetinin en yüksek olarak tanımlandığı alanlar, Manyas Gölü Havzası'nın Kuvaterner yaşlı alüvyonlarla kaplı olduğu kesimleridir. Orta derecede kirlenme potansiyeline sahip olan alanlar ise karbonatlı birimlerin oluştuğu bölgelerden oluşmaktadır. Yeraltısuyu hassasiyetinin en düşük ve kirlenme potansiyelinin en az olduğu alanlar ise havzadaki geçirimsiz birimlerin oluşturduğu magmatik, metamorfik ve killi birimlerin kapladığı alanlardır (Şekil 4a).

Suda çözünme özelliği yüksek olan nitratlı gübrelerin yaygın olarak kullanıldığı göl çevresinde, elde edilen hassasiyet haritası ile nitrat konsantrasyonlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Yağışlı dönemde alınan yeraltısuyu numunelerinin nitrat (NO_3^-) konsantrasyonlarının konumsal dağılım haritası incelendiğinde, TSE-266'ya göre limit değeri aşan ve limit değere yakın olan yüksek NO_3^- konsantrasyonlarının kirlenme potansiyeli yüksek olduğu alanlarda ölçüldüğü tespit edilmiştir (Şekil 4b ve Çizelge 10). Ayrıca kirlenme potansiyeli yüksek olan alanlardaki su numunelerinin Arsenik (As) konsantrasyonlarının da TSE-266'ya göre 10 µg/l olan limit değeri aştığı gözlemlenmiştir (Şekil 4c ve Çizelge 10).

Çizelge 9. AHS-DRASTIC entegrasyonuna ilişkin indeks değerleri ve potansiyel kirlenebilirlik sınıfları

AHS-DRASTIC İndeks Aralıkları	**AHS-DRASTIC Potansiyel Kirlenebilirlik Sınıfları**
0,0359 - 0,0850	Düşük
0,0850 - 0,1720	Orta
0,1720 - 0,2400	Yüksek
0,2400 - 0,4386	Çok Yüksek



Şekil 4. Manyas Gölü Havzası a) AHS-DRASTIC entegrasyonu ile oluşturulan yeraltısuyu hassasiyet haritası b) NO_3^- konsantrasyonlarının c) As konsantrasyonlarının konumsal dağılımı

Çizelge 10. Manyas Gölü Havzası alansal yeraltısuyu kirlenme potansiyeli, NO_3^- ve As konsantrasyonlarına ilişkin veriler

Numune Kodu	Yeraltusuyu Kirlenme Potansiyeli	NO_3^- (mg/l)	As (µg/l)
SK1	Çok yüksek	0.85	6.6
SK2	Yüksek	13.32	**11.7**
Y1	Orta	0.71	2.3
SK3	Orta	14.39	6.4
SK4	Çok yüksek	14.57	2.8
SK5	Yüksek	10.64	1.4
SK6	Yüksek	**33.13**	1.3
SK7	Çok yüksek	3.75	7.4
SK8	Yüksek	**21.84**	**18**
SK9	Çok yüksek	6.48	**63.6**
SK10	Orta	**45.09**	4.9
K1	Orta	**33.01**	7.5
SK11	Yüksek	**24.82**	**16.3**
SK12	Çok yüksek	**81.26**	**15.8**
K2	Orta	15.72	**47.6**
T1	Çok yüksek	**21.57**	**7.9**
SK13	Çok yüksek	**26.87**	**44.8**
SK14	Yüksek	**26.54**	**71.6**
SK15	Çok yüksek	2.74	**17.6**
SK16	Çok yüksek	**21.7**	**19.2**
SK17	Çok yüksek	0.53	**8.6**
SK18	Çok yüksek	**50.97**	**41.9**
N21	Yüksek	6.8	6.2
N22	Orta	0.001	**225.9**
K3	Düşük	1.25	3.1

7. KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın kaynağını oluşturan 'Manyas Gölü Havzası'nın Yönetimi İçin Bütünleşik Ekosistem Modelleme Odaklı Karar Destek Sisteminin Oluşturulması" isimli 116Y407 numaralı Tübitak projesi

kapsamında emeği geçen İstanbul Üniversitesi ekibi, İTÜ ekibi, ODTÜ ekibi ve TÜBİTAK MAM ekibine teşekkürü borç biliriz

8. KAYNAKLAR

Akyüz, H.S, 1995. Manyas-Susurluk-Kepsut (Balıkesir) Civarının Jeolojisi (Doktora Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. and H. Petty, R., R. J, 1987. A Standartized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, U.S.EPA Report 600/2-85/018.

Demiroğlu, M., Karagüzel R., Mutlutürk, M. Yaltırak, C. Yalçın, T. and Aktuna, Z., 2017. Surface runoff and carbonates-based definition of protection zones for Eğirdir Lake in western Turkey. Springer Nature-Carbonates Evaporates, 34 (67-82).

Erdoğan M., ve Karagüzel, R., 2016, A new hydrogeologically based approach to determining protected areas in drinking water supply reservoirs a case study in the Aglasun sub basin Burdur Turkey.Environmental Earth Sciences, Vol. 75, No. 2, ISSN: 1866-6280

Karaguzel, R., Davraz, A., Soyaslan, I. Seyman, F. Sener, S. and Sener, E, 2006. Assessment of the Antalya water basins on pollution, Antalya drinking water and problems symposium proceedings, Antalya,pp 113–120.

Margat, J, 1968. Groundwater Vulnerability to Contamination (in French). Bases de al Cartographie, (Doc.) BRGM, 68 SGC 198 HYD, Orleans, France

TÜBİTAK, 2019. Manyas Gölü Havzası'nın Yönetimi İçin Bütünleşik Ekosistem Modelleme Odaklı Karar Destek Sisteminin Oluşturulması isimli 116Y407 Numaralı Projesi (Yayımlanmamış Rapor)

Türk Standartları Enstitüsü (TS266), 2005. Sular - İnsanî Tüketim Amaçlı Sular, Standart. Ankara, Türkiye.

WHO, 1971. International standarts for drinking water, 3 rd ed. Geneva

Coğrafi Bilgi Sistemleriyle Erdemli (Mersin) Kentsel Yerleşim Alanının Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi

Determination of Liquefaction Potential of Erdemli (Mersin) Urban Settlement Area with Geographical Information Systems

S. Erdoğan[1,*], H.Tağa[2]

[1] Mersin Büyükşehir Belediyesi, Çankaya/Mersin
[2] Mersin Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampusu, 33343 Mersin
*(*serdarerdogan25@hotmail.com)*

ÖZ: Bu çalışma ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak Erdemli (Mersin) kentsel yerleşim alanındaki alüvyonlu zeminlerin olası bir deprem anında sıvılaşma potansiyelleri değerlendirilmiştir. Bu amaçla kentsel yerleşim alanında homojen dağılım sunan 325 mekânsal noktadaki zemin profilleri ile yeraltı su seviyeleri ve deprem durumu (bölgenin içinde olan aktif fayların tarihsel dönemde etkileri araştırılarak) değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bölgenin jeolojisi, aktif faylara uzaklık, yeraltı suyu durumu, zeminlerin fiziksel özellikleri ve standart penetrasyon testinden (SPT) elde edilen zemin davranışları ile farklı büyüklüklerdeki deprem senaryosuna göre sıvılaşma değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen noktasal veriler CBS ile değerlendirilerek 1,5 m, 3 m, 5 m, 7 m ve 9 m derinliklerde oluşacak sıvılaşma alanları belirlenmiştir. 7 ve 6,2 büyüklüğünde gerçekleşecek olası bir deprem anında Erdemli kentsel yerleşim alanındaki geniş yayılım gösteren suya doygun siltli kum birimlerinin bulunduğu alanlarda zemin sıvılaşmasının gerçekleşeceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin Sıvılaşması, Aktif Fay, Zemin Özellikleri, Yeraltı Su Seviyesi, CBS, Yerleşim Alanı, SPT.

ABSTRACT: *In this study, liquefaction potentials of alluvial soils in the urban settlement area of Erdemli (Mersin) in the event of an earthquake were evaluated using Geographical Information Systems (GIS). For this purpose, soil profiles at 325 spatial points that present a homogeneous distribution in the urban settlement area, groundwater levels and earthquake conditions (by investigating the effects of active faults in the region in the historical period) were tried to be evaluated. The geology of the region, the distance to active faults, groundwater condition, physical properties of soils and soil behavior obtained from the standard penetration test (SPT), and liquefaction assessment according to different magnitude earthquake scenarios were made. The obtained point data were evaluated with GIS and liquefaction areas at 1.5 m, 3 m, 5 m, 7 m and 9 m depths were determined. It has been determined that in the event of a potential earthquake of 7 and 6.2 magnitude, soil liquefaction will occur in areas where there are water-saturated silty sand units that show a wide spread in the urban settlement area of Erdemli.*

Keywords: *Soil Liquefaction, Active Fault, Soil Properties, Groundwater Level, GIS, Settlement Area, SPT.*

1. GİRİŞ

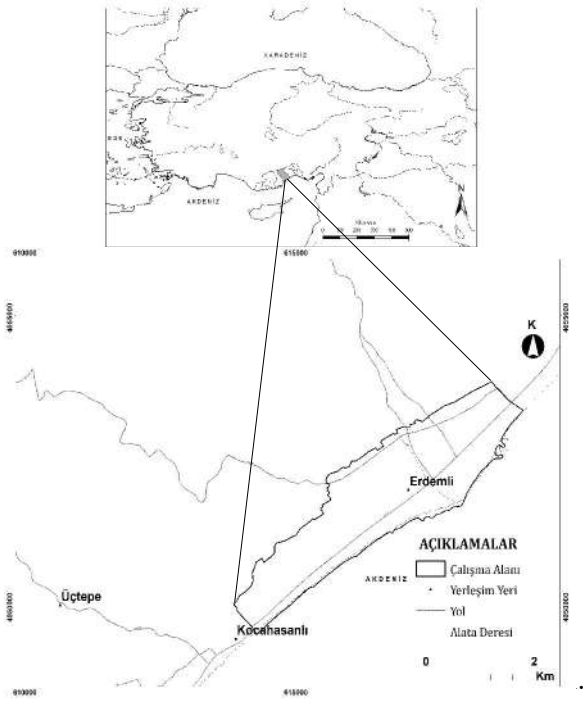
Depremler ve bu depremlerden kaynaklı zemin davranış biçimi olan sıvılaşma doğal afetlerden olup bu çalışma ile Erdemli (Mersin) ilçesinin kentsel yerleşim alanındaki zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri değerlendirilmiştir. Erdemli ilçesi, deprem üreten ve geçmişte birçok tarihsel büyük depremlerin olduğu Kıbrıs yayı ile Doğu Akdeniz bölgesi kuşağında yer alan aktif faylara yakın olması, yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın sığ konumda bulunması, kentsel yerleşimin alüvyonal çökelleri üzerinde olması nedeniyle sıvılaşma riskinin olduğu düşünülmüştür. Bu kapsamda Erdemli ilçesi kentsel yerleşim alanının jeolojisi, kentsel yerleşim alanı ve çevresinin sıvılaşma analizlerine girdi parametresi olarak kullanılan zemin özellikleri (özgül ağırlık, rölatif sıkılık tane boyu dağılımı), deprem durumu, aktif fayların çalışma alanına göre konumları, sıvılaşmaya etki eden yeraltı su seviyesi ile ilgili veriler değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede çalışma alanın 325 noktasında yapılan jeoteknik amaçlı sondaj verilerinden homojen dağılım gösterecek şekilde 50 tanesi kullanılmıştır. Kentsel yerleşim alanındaki değerlendirmede kullanılan 50 sondaj noktasındaki her

1,5-9 m arasındaki Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonuçları SPT(N) düzeltmeleri ile hesaplanmıştır. Deprem büyüklüğü ve sıvılaşmaların görüldüğü en uzak mesafe arasındaki ilişki dikkate alınarak, Erdemli kentsel yerleşim alanına olan uzak depremin episantrından 100 km çaplı alanda 5 ve 5'in üzerinde geçmişte olan ve gelecekte olma potansiyeli olan depremlere bağlı aktif faylar ele alınmıştır. İki farklı deprem büyüklüğüne göre deprem senaryosu tasarlanmış, depremin büyüklüğü (M) ve yatay yer ivmesi (a_{max}) hesaplanmıştır. Sıvılaşma analiz programı Prosıvı'ya (Molamahmutoğlu vd, 2006) aktarılan veriler, SPT sonuçlarına göre sıvılaşma analizi yapılmıştır. Her bir kuyuda 1.5, 3, 5, 7 ve 9 m derinliklerde Mw=7 ve Mw=6,2 büyüklüğündeki deprem senaryolarına göre yapılan analizlere göre sıvılaşma için EF (Sıvılaşma emniyet faktörü) hesaplanmış, EF<1 ise "sıvılaşacak alanlar", 1≤ EF <1.2 ise "sıvılaşma potansiyeli taşıyan alanlar" ile EF>1,2 ise "sıvılaşma beklenmeyen alanlar" olarak tanımlanmıştır ve CBS'ye aktarılarak EF değerleri ile sıvılaşma haritaları oluşturulmuştur.

2. Yapılan Çalışmalar

2.1.Çalışma Alanının Tanıtılması

Erdemli ilçesi, 2279 km²'lik alanı ile Mersin ilçelerinin içinde üçüncü büyük yüz ölçümüne sahiptir (HGK,2019). KB'da Ayrancı (Karaman), G'de Akdeniz, GD'da Mezitli ve Toroslar (Mersin) ilçeleri ile GB'da Silifke (Mersin) ilçesi ile sınırlanmaktadır. Adana – Mersin- Antalya ve Konya ulaşımını sağlayan D-400 karayolu üzerindedir. Şehir yerleşiminin yoğun olduğu kent merkezinin kıyı sahili yaklaşık 40 km'dir. Kentsel yerleşim alanında sıvılaşma potansiyelinin incelediği bölge ise ilçenin kıyıya bitişik doğu-batı uzanımlı 7,5 km²'lik alana sahiptir (Şekil 1).

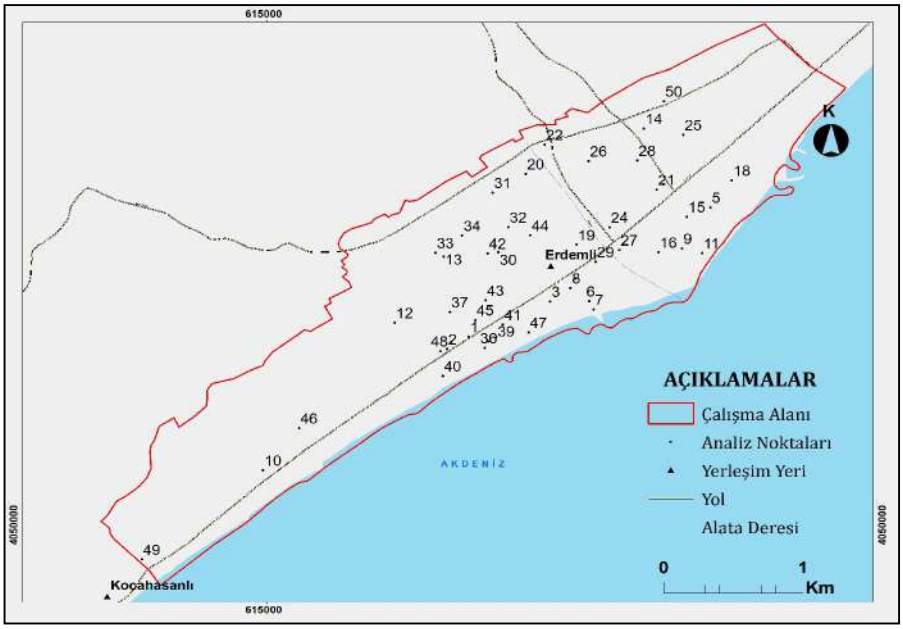


Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.

2.2. Sıvılaşma Analizi

Çalışma sahasında jeoteknik çalışmalar ile elde edilen ve toplam 50 adet sondaj kuyusunda (Şekil 2.) sahada SPT deneyleri yapılmış, kuyulardan alınan örnekler üzerinde laboratuvarda zemin indeks özellikleri belirlenmiştir. Veri seti hazırlanarak öncelikle 1,5 m, 3 m, 5 m, 7 m ve 9 m derinliklerdeki SPT verileri belirlenmiş, elek analizi deneyinden elde edilen İnce Tane Oranı % olarak (İTO) bulunmuş, daha sonra tane çapı dağılımı eğrisinden D_{50} mm karşılık gelen çap hesaplanmıştır. Her

sondaj kuyusuna ait elde edilen numunelerin birim hacim ağırlıkları hesaplanarak zeminin tane çapı sınıflamasından zemin sınıfları belirlenmiştir.



Şekil 2. Çalışma alanında sıvılaşma analizi yapılan sondaj noktalarının dağılımı

Bir deprem nedeniyle zeminde etkili olan devirsel gerilme oranının (DGO, deprem yükü) hesaplanması yapılmıştır. SPT verileri kullanılarak devirsel direnç oranı (DDO, zeminin dayanımı) bulunmuştur. Emniyet Faktörünün hesaplanması ile sıvılaşmanın oluşup oluşmayacağı belirlenmiştir. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verileri kullanılarak, Seed ve Idriss (1971) göre hesaplama yöntemleri ile sıvılaşma analizleri hesaplanmıştır. SPT veriler kullanılarak hem DGO ve DDO değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada DGO bulunması için Seed ve Idriss (1971) yöntemine göre ve eşitlik 1.'de ki formüle göre hesaplama yapılmıştır.

$$DGO = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v_0}} = 0.65 r_d \left(\frac{\sigma_{v_0}}{\sigma' v_0}\right)\left(\frac{\text{amax}}{g}\right) \quad (1)$$

Burada, DGO: Boyutsuz devirsel gerilme oranı, a $_{max}$: Zemin yüzeyindeki deprem kaynaklı oluşacak maksimum yatay ivme, g: yerçekimi ivmesi, σ_{vo}: Sıvılaşma analizinin gerçekleştirildiği derinlikteki toplam düşey gerilme, $\sigma^1{}_{vo}$: Sıvılaşma analizinin gerçekleştirildiği derinlikteki efektif düşey gerilme, r_d: Derinlik azaltma faktörü r_d , derinlik azaltma faktörünün bulunması için Youd vd. (2001) tarafından önerilen eşitlik 2'deki formül yardımıyla hesaplanmıştır (Mollamahmutoğlu vd, 2006).

$$r_d = \frac{1{,}0 - 0{,}4113\, z^{0{,}5} + 0{,}04052\, z + 0{,}001753\, z^{1{,}5}}{1{,}0 - 0{,}4177\, z^{0{,}5} + 0{,}05729 z - 0{,}006205\, z^{1{,}5} + 0{,}00121\, z^2} \quad (2)$$

Burada, (z) m cinsinden derinliktir. Ayrıca zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesi (a_{max}) değeri eşitlik 9'da verilen hesaplama yöntemleri açıklanmıştır.
DDO zeminin sıvılaşmaya karşı direncini ifade eder. İlk olarak SPT darbe sayısı çizelge 1.'de verilen katsayılara göre aşağıdaki eşitlik 3 formülü ile düzeltilmiştir.

$$(N_1)_{60} = N\, C_N\, C_E\, C_B\, C_R\, C_S \quad (3)$$

Burada;
N =ölçülen SPT darbe sayısı
C_N = üst tabaka yükü düzeltme katsayısı
C_E = enerji oranı düzeltme katsayısı
C_B = kuyu çapı düzeltme katsayısı
C_R = tij boyu düzeltme katsayısı

C_S = numune alma metodu düzeltme katsayısı

Çizelge 1. SPT düzeltmeleri (Mollamahmutoğlu vd, 2006)

Faktör	Alet değişkeni	Terim	Düzeltme
Üst Tabaka Yükü	-----	C_N	$(\rho_a / \sigma'_{v0})^{0.5}$
Üst Tabaka Yükü	-----	C_N	$C_N \leq 1.7$
Şahmerdan enerji oranı	Donut (makaralı) tipi şahmerdan	C_E	0.5 – 1.0
Şahmerdan enerji oranı	Güvenli şahmerdan	C_E	0.7 – 1.2
Şahmerdan enerji oranı	Otomatik- Donut (makara) tipi şahmerdan	C_E	0.8 – 1.3
Kuyu çapı	65-115 mm	C_B	1.0
Kuyu çapı	150 mm	C_B	1.05
Kuyu çapı	200 mm	C_B	1.15
Tij boyu	<3 m	C_R	0.75
Tij boyu	3-4 m	C_R	0.8
Tij boyu	4-6 m	C_R	0.85
Tij boyu	6-10 m	C_R	0.95
Tij boyu	10-30 m	C_R	1.0
Numune alma yöntemi	Standart numune alıcı (kılıflı)	C_S	1.0
Numune alma yöntemi	Kılıfsız numune alıcı	C_S	1.1 – 1.3

İnce tane oranının düzeltilmesi için sıvılaşma analizi için geliştirilen denklemler, temiz kumlar için hesaplanmıştır. Killi ve siltli zeminlerde bu eğriler ve denklemlerin kullanılabilmesi için SPT deneyinde ölçülen darbe sayılarının temiz kumlara göre düzeltilmesi gerekmektedir. Seed vd. (1985) ince tane oranının artmasıyla sıvılaşma direncinde önemli bir artış olduğunu ortaya koymuşlardır (Molamahmutoğlu vd, 2006). Bu çalışmada İTO düzeltilmesi için kullanılan analiz yönteminde Youd vd. (2001) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik 4 kullanılmıştır.

$$(N_1)_{60tk} = \alpha + \boldsymbol{\beta}\,(N_1)_{60} \quad (4)$$

α ve $\boldsymbol{\beta}$ katsayılardır ve aşağıdaki eşitliklerden tanımlanmışlardır.

$\alpha = 0$; İTO ≤ %5
$\alpha = \exp[1.76 - (190/\text{İTO}^2)]$; %5 <İTO<%35
$\alpha = 5.0$; İTO ≥ %35

$\boldsymbol{\beta} = 1.0$; İTO ≤ %5
$\boldsymbol{\beta} = [0.99+(\text{İTO}^{1.5}/1000)]$; %5<İTO<%35
$\boldsymbol{\beta} = 1.2$; İTO ≥ %35

Düzeltmelerden sonra DDO hesaplanması aşağıdaki eşitlik 5'den bulunur. Seed ve Idriss (1971) yönteminde devirsel direnç oranı grafiksel olarak bulunmuştur. Fakat Youd vd (2001) önce bu grafikteki eğirileri modifiye etmiş ve devirsel direnç oranını veren denklem geliştirmişlerdir. Mw=7.5 büyüklüğündeki depremler için devirsel direnç oranı eşitlik 5 formülü kullanılarak hesaplanmıştır (Molamahmutoğlu vd, 2006).

$$DDO_{7.5} = \left[\frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{(10(N_1)_{60}+45)^2} - \frac{1}{200}\right] \quad (5)$$

Burada; $(N_1)_{60}$ eşitlik eşitlik 3'den hesaplanır. Sıvılaşma, deprem yüklerinin sıvılaşma direncini aştığı derinliklerde oluşur. Yukarıda hesaplanan ve eşitlik 5'de 7,5 büyüklükteki depremler için geliştirilen DDO hesaplamasının yanında farklı büyüklükteki depremlerin etkisi magnitüd düzeltme faktörü kullanılarak hesaba katılır. Bu durumda sıvılaşma emniyet faktörü eşitlik 6'da ki formülden hesaplanmıştır.

$$EF = \left(\frac{DDO_{75}}{DGO}\right) MDF \quad (6)$$

Burada DGO = deprem nedeniyle oluşan devirsel gerilme oranı, $DDO_{7.5}$ = 7.5 büyüklüğündeki deprem için devirsel direnç oranı, MDF = Magnitüd düzeltme faktörü, Magnitüd düzeltme faktörü ise yani MDF aşağıdaki eşitlik 7 formülü ile hesaplanır.

$$MDF= 10^{2.24} / M^{2.56} \quad (7)$$

Burada M söz konusu depremin büyüklüğüdür. Sonuç olarak, EF değerine göre zeminlerin sıvılaşma durumu aşağıdaki gibidir (Day, 2002).

EF <1	ise;	sıvılaşma var.
1≤ EF <1.2	ise;	sıvılaşma riski var.
EF ≥ 1.2	ise;	sıvılaşma yok.

Bazı araştırmalar neticesinde sıvılaşmanın oluşması için eşik bir sarsıntı değerinin olduğu tahmin edilmektedir (Molamahmutoğlu vd, 2006). Bu eşik değerler, maksimum yatay yer ivmesinin (a_{max}) 0.10 g ve yerel büyüklük M_L için 5'dir (Ishihara, 1985). Bu kapsamda 0.10 g'den daha küçük maksimum yer ivmesinin veya 5'den daha küçük bir yerel büyüklüğün söz konusu olduğu yerlerde sıvılaşma analizleri yapmaya gerek yoktur. Sıvılaşma analizinde DGO oranının hesaplanmasında eşitlik 1'de a_{max} yatay yer ivmesinin bulunması hesaplanması gerekmektedir. Bunun yanında DGO hesaplamasında ise Magnitüd düzeltme faktörünün hesaplanırken deprem büyüklük değerinin (M) hesaplanarak sonucun bulunması sağlanır. Aşağıda eşitliklerde M ve a_{max} değerlerini hesaplama formülleri gösterilmiştir. Buna göre tasarım depreminin moment büyüklüğü deterministik yönteme göre "yüzey kırığı uzunluğu ve deprem büyüklüğü ilişkisi", Wells ve Coopersmith geliştirdiği (Ateş, 2016) ve aşağıda eşitlik 8'de gösterilen hesaplama yöntemiyle açıklanmıştır.

$$M = 4{,}86+1{,}32 \text{ Log } L \quad (8)$$

Burada;
M=Moment büyüklüğü,
L =fay uzunluğu (km).

Yatay deprem ivmesi ise, literatürde farklı deprem atenasyon ilişkileri ile hesaplanabilmesi mümkün iken bu çalışmada Türkiye'deki depremleri esas alan Ulusay vd. (2004), Türkiye (fay zonları) için geliştirilen azalım ilişkisi (Ateş vd, 2011) kullanılarak aşağıdaki eşitlik 9'da gösterildiği şekliyle hesaplanır.

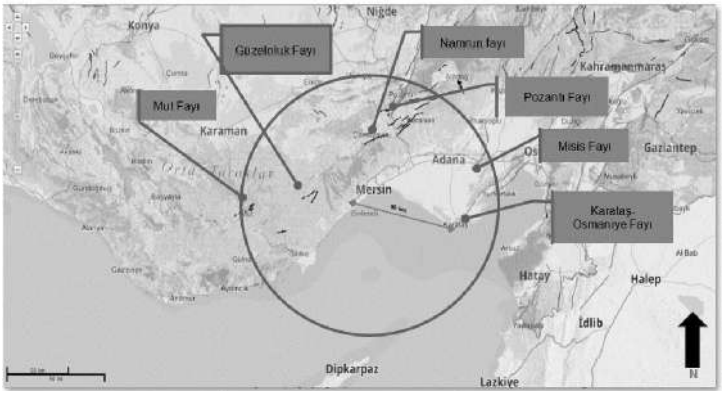
$$PGA = 2.18e^{0.0218\,(\,33.3M_W - R_e + 7.8427\,S_A + 18.9282\,S_B)} \quad (9)$$

Burada; S_A=0, S_B=1 alınır (yumuşak zeminler için),
Re = yerleşim alanından ilgili fay zonuna en yakın dikey mesafedir,
Mw = Deprem büyüklüğüdür.

2.3.Deprem Tasarımı

Bu çalışmada iki deprem senaryosu geliştirilerek sıvılaşma hesaplamaları yapılmıştır. İlki bölgede diri aktif fayların oluşturduğu deprem büyüklüğünü veya tahmin edilen deprem büyüklüğünün esas alarak depremin büyüklüğü (M) ve yatay yer ivmesi (a_{max}) hesaplanmıştır. Bu kapsamda Erdemli ilçesinin merkez alındığı noktadan 100 km yarıçaplı bir daire çizilerek daire içinde kalan aktif sismik kaynaklara (fay zonu) dik çizilerek bu fay zonunun çalışma sahasına en kısa mesafesi kilometre (km) cinsinden ölçülmüştür. İkinci senaryoda ise Erdemli ilçesine en yakın aktif diri fayın üretebileceği deprem senaryosu üzerine etki eden sıvılaşma hesaplamaları yapılmıştır. Çalışma sahasına 100 km yarıçaplı çizilen ve şekil 3'de gösterildiği şekilde 27 Haziran 1998 Ceyhan depreminin oluştuğu Osmaniye Karataş fayı ve Misis fayı 89 km uzaklıktadır. 76 km uzaklıkta Pozantı fayı, 49 km uzaklıkta Tarsus Namrun fayı, 70 km uzaklıkta Mut fayı ve 25 km uzaklıktaki Namrun fayının uzantısı olan Güzeloluk -Güneyli ve Eseli fayları yer almaktadır. 22 Ocak 1997 Hatay ve 27 Haziran 1998 Ceyhan-Misis depremleri, Doğu Anadolu fayının gelecek yüzyıl içerisinde oldukça aktif olabileceğini gösterirken bu deprem kırıklarına komşu olan Misis fayı ve özellikle Osmaniye-Karataş fayının önemli stres yüklenmelerine maruz kaldıklarını ve bu yüzden oldukça yüksek deprem potansiyellerine

sahip olduklarını ve en az 7 büyüklüğünde bir depremin oluşabileceği vurgulanmaktadır (Demirtaş, 1998).

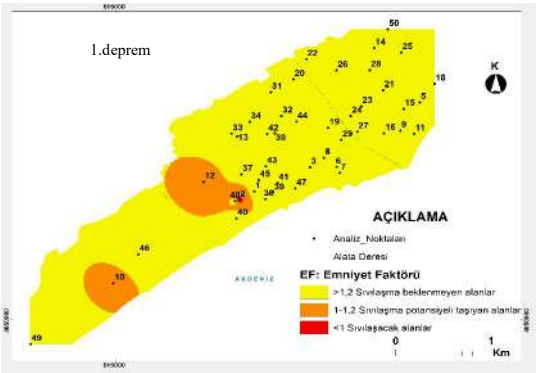


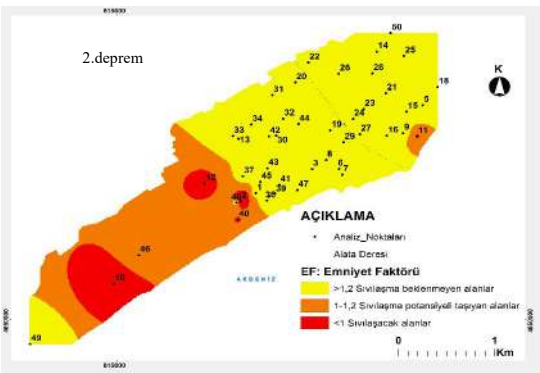
Şekil 3. Erdemli merkezli 100 km yarıçap çap içinde bulunan sismik kaynakların gösterimi (MTA,2019)

Buna göre yakın dönemde deprem üreten Karataş- Osmaniye fayında beklenen veya tahmin edilen deprem büyüklüğü Mw= 7 olarak alınmıştır. Karataş- Osmaniye fay zonuna en yakın mesafe Re= 89 km'dir. Eşitlik 90 formülünde hesaplanan PGA= 0.07g dir. Buna göre 1. Deprem senaryosunda a_{max}=0.07 g olarak hesaplanmıştır. 2. Deprem senaryosunda ise Erdemli kent merkezine 25 km uzaklıkta Mezitli ilçesinde yer alan Soli antik kenti ve Erdemli kent merkezine 22 km uzaklıkta yer alan Kızkalesi (Krykos) antik kenti tarihsel dönemlerde yıkılmış (Karagöz, 2005) ve önemli kayıpların olduğu belirtilmiştir (Soysal vd, 1981), (Yolsal vd, 2007). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının (AFAD) interaktif web sayfasında yer alan ve deprem yönetmeliği dikkate alınarak hazırlanan Türkiye deprem tehlike haritasında (AFAD, 2019) deprem görülme olasılığının %50 değeri için, Deprem Yer Hareketi Düzeyi DD-2, Yerel zemin sınıfı ZE seçildiğinde Erdemli için olası en büyük yatay yer ivmesinin (Peak Ground Accleration, PGA) 475 değerleri için PGA= 0.125g olarak hesaplanmıştır. Ayrıca tarihsel deprem kataloğunda ve kaynaklarda Soli kentinin ve Korykos kentinin yıkılması önemli deprem olaylarındandır. Bu iki deprem oluşumunun Mercali Şiddet Ölçeğinde şiddeti VIII'dir. Bunun deprem büyüklüğü karşılığı ise M= 6.2 karşılık gelmektedir. İkinci deprem senaryosuna göre en büyük yatay yer ivmesi a_{max}=0.128 g, deprem büyüklüğü ise Mw= 6.2 olarak hesaplanmıştır.

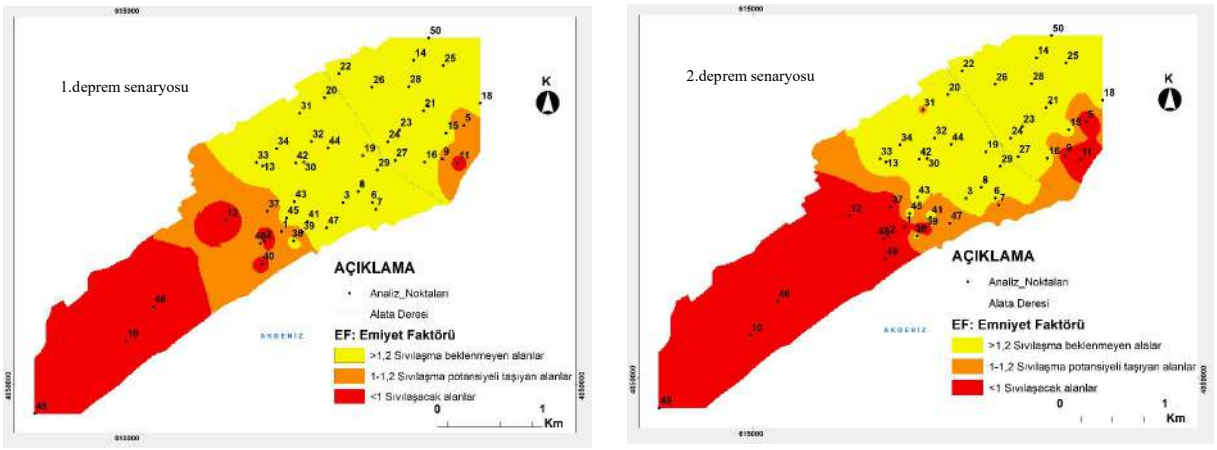
3. SONUÇLAR

Analiz yöntemlerinin hesaplanmasında kullandığımız Visual Basic 6.0 programlama dili kullanılarak yazılmış olan PRO SIVI (Mollamahmutoğlu vd, 2006) programına yukarıda hesaplanan veriler girilmiştir. Her iki deprem senaryosuna göre sonuçlara bakıldığında aktif faya yakınlık sıvılaşmanın daha geniş alanda oluşacağını ortaya koymuştur. İkinci deprem senaryosunda kent merkezine yakın fay üzerinde tasarlanan deprem senaryosuna göre kent merkezinin kıyıya yakın bölgelerinde ve yeraltı suyunun yüzeye yakın olan kısımlarında ve suya doygun kumlu seviyelerde sıvılaşmanın arttığı belirlenmiştir.

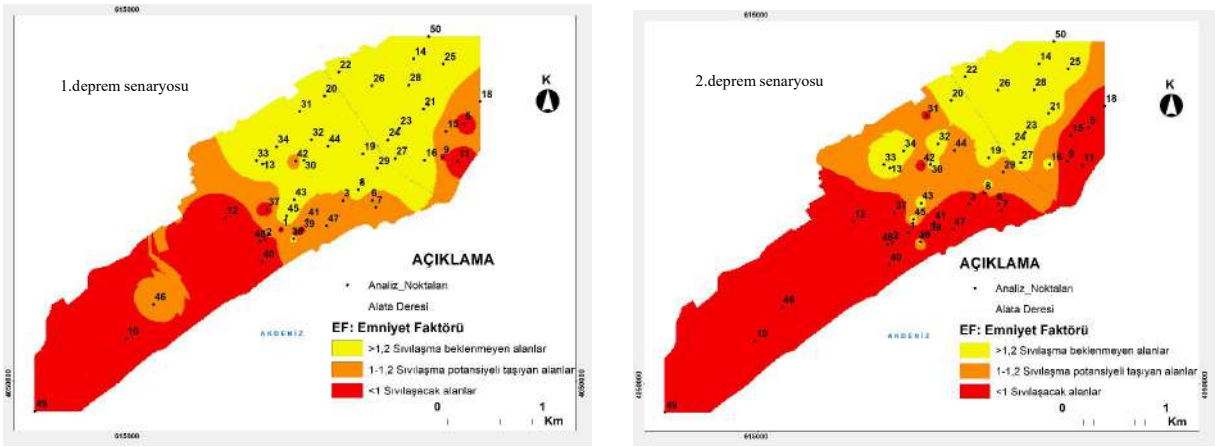




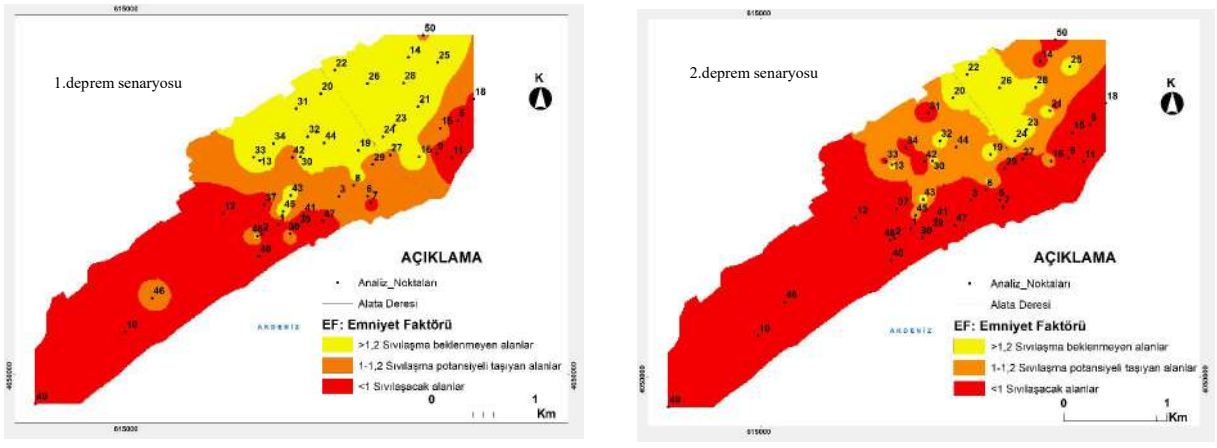
Şekil 4. 1.5 m derinlikteki sıvılaşma potansiyeli haritası.



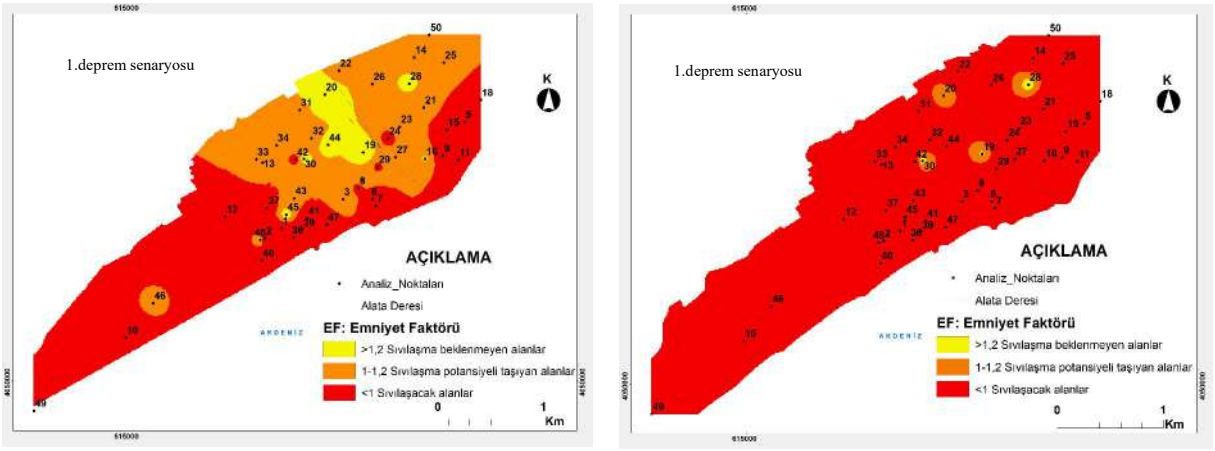
Şekil 5. 3 m derinlikteki sıvılaşma potansiyeli haritası.



Şekil 6. 5 m derinlikteki sıvılaşma potansiyeli haritası.



Şekil 7. 7 m derinlikteki sıvılaşma potansiyeli haritası.



Şekil 8. 9 m derinlikteki sıvılaşma potansiyeli haritası.

4. KAYNAKLAR

Ateş, A., Standart penetrasyon deneyi (SPT) ile kartepe (İzmit) deniz hava üs komutanlığı hangar inşaat alanı zemininin sıvılaşma potansiyelinin araştırılması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg., **2016**, 4, 376–387.

Ateş, A., Özdemir, A., Standard penetrasyon deneyi (SPT) ile küçükkuyu (Çanakkale) trafik gözetleme istasyonu zemininin sıvılaşma potansiyelinin araştırılması. Selçuk-Teknik Derg., **2011**, 2–10, 184–201.

Day, R. W., Geotechnical Earthquake Engineering Handbook; McGraw-Hill: USA, 2002.

Demirtaş, R., 27 Haziran 1998 ceyhan-misis, 22 ocak 1997 Hatay depremleri: Doğu anadolu fayı yakın bir deprem serisinin hazırlık evresinde mi; Ankara, 1998.

Deprem Tehlike Haritası, https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml.(16.04.2019)

Harita Genel Komutanlığı İnteraktif web sitesi, İlçe Sınırları, https://www.hgk.msb.gov.tr/images/urun/il_ilce_alanlari.pdf (12.04.2019).

Karagöz, Ş. , Eskiçağda Depremler, 1. BASKI.; İstanbul, 2005.

Ishihara, K., Stability of natural deposits during earthquakes. Içinde *Proceedings of the Eleventh Internatıonal Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*; San Francisco, 1985; ss 321–376.

Mollamahmutoğlu, M., Babuşcu. F., Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, 1. Baskı.; Gazi Kitabevi: Ankara, 2006.

MTA, yerbilimleri harita görüntüleyici ve çizim editörü http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx.(16.05.2019).

Yolsal S., Taymaz, T., Yalçıner, A. C., Hellenik ve kıbrıs yayı depremlerinin kaynak parametreleri ve tarihsel depremlerle ilişkili tsunami simülasyonları. Içinde 6.Ulusal Kıyı Mühendislik Sempozyumu; 2007; ss 509–516.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, L., Harder, L. F., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Liquefaction resistance of soils – Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. J. Geotech. Geoenvironmental Eng., 2001, 127, No:4, 297–313.

Seed, H., B., Idriss, M. I., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 1971, *97*, 1249–1273.

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, F., Chung, R. M., Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *J. Geotech. Eng.*, 1985, *111*, 1425–1445.

Seed, H. B.; Idriss, I. M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 1971, *97* (9), 1249–1273.

Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., Altınok, Y., Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu (M.Ö. 2100-M.S. 1900); TÜBİTAK Yayınları No:563: İstanbul, 1981.

Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Eng. Geol.*, 2004, *74*, 265–292.

Mersin İli (Mezitli-Davultepe-Tece) Sahil Kesiminlerindeki Sıvılaşabilen Zeminlerin Coğrafi Bilgi Sistemi Kullanarak Değerlendirilmesi

Evaluation of Liquefiable Soils in the Coastal Areas of Mersin City (Mezitli-Davultepe-Tece) Using Geographic Information System

Ö. Beytekin[1], U. Özhan[1], K. Zorlu[1,*]

[1] *Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampüsü (*kivancgeo@mersin.edu.tr)*

ÖZ: Depremlerde, yapıların ağır hasar görmelerinin en önemli nedenlerinden biri yapının oturduğu zeminin dayanımını kaybetmesi yani zemin sıvılaşmasıdır. Bu çalışmada Mersin ili sahil kesiminin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma bölgesinde 71 adet sondajdan elde edilen SPT sonuçları ve araziden alınan örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmış ve sıvılaşma analizleri için girdi parametreleri oluşturulmuştur Ayrıca Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından hazırlanan Türkiye sismik bölgeleme haritasına göre çalışma alanının maksimum yer ivmesi (amax) 0,132 g olarak tanımlanmıştır. Bölgenin sıvılaşma potansiyeli, PROSIVI programı kullanılarak Seed ve Idriss yöntemine göre 5 m sabit derinlik ve 3 farklı deprem senaryosu (Mw = 6,0-6.5-7.0) ile hesaplanmıştır. Çalışma bölgesinin sıvılaşma potansiyeli haritaları Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı, Ters Mesafe Ağırlık Enterpolasyon (IDW) yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Sıvılaşma potansiyeli haritalarına ek olarak, bölgenin yeraltı su seviyesi haritaları da oluşturulmuş ve kıyı kesimlerde 2 ile 5 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Zeminlerin sıvılaşabilirlik analizlerine göre çalışma bölgesinin kıyı kesimlerinin göreceli olarak daha yüksek sıvılaşma riski taşıdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüvyon, CBS, deprem, IDW, Mersin, sıvılaşma.

ABSTRACT: *During earthquakes, one of the most important reasons for buildings to be heavily damaged is due to liquefaction that is the loss of strength of the soils on which the building settled. This research has aimed to determine the potential of soil liquefaction, coastal area of Mersin city. The SPT results that were collected from 71 drillings used in laboratory testing's and there,input parameters were determined for the analysis. Considering with Turkey's Earthquake Maps that were created by the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), the potential maximum ground acceleration was calculated (a_{max}) and determined to be 0,135 g. According to the compiled data, the potential risk for the liquefaction of the area was calculated by using the Prosıvı liquefaction analysis program and taken into account Seed &Idirss method and it was done in 5 meters depth with three different earthquake scenarios (Mw= 6,0-6,5-7,0). The liquefaction maps of study area has been created by Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW) method using Geographical Information System (GIS) environment. In addition to the liquefaction maps, the groundwater level maps was created and the groundwater level changes between 3 to 5 metres around the coastal areas According to maps constructed of the study area, particularly coastal areas have a high liquefaction risk.*

Keywords: *Alluvium, GIS, earthquake, IDW, Mersin, liquefaction*

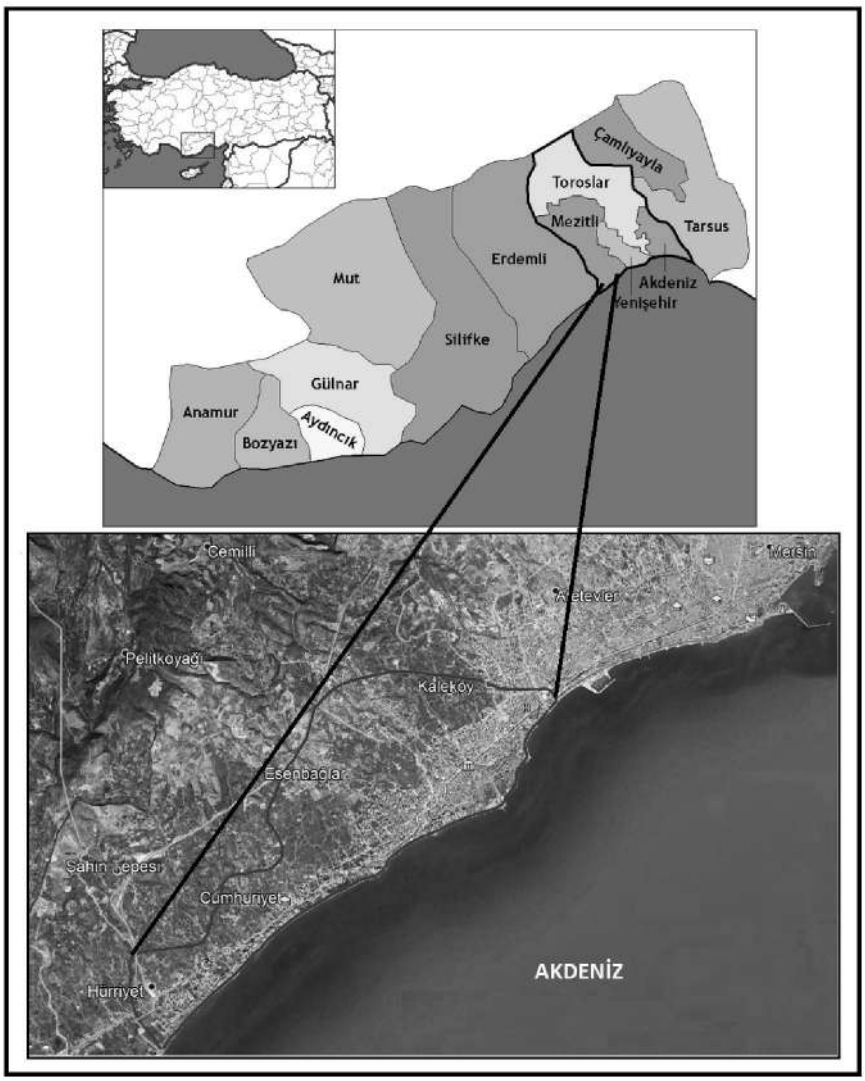
1. GİRİŞ

Doğal afetler insan hayatını ve çevresini olumsuz yönde etkileyen can ve mal kaybına neden olan doğa olaylarıdır. Doğal afetler arasında insan hayatını en fazla etkileyen, arkasında bıraktığı hasarlar itibariyle en tehlikeli olanı hiç şüphesiz depremlerdir. Türkiye en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Bu kuşakta deprem potansiyeli oldukça yüksek fay hatları bulunmaktadır. Bu kuşağın Türkiye sınırları içerisindeki fay hatları; Doğu Anadolu Fay Hattı, Batı Anadolu Fay Hattı ve Kuzey Anadolu Fay Hattıdır. Türkiye'nin yüz ölçümünün yaklaşık % 93'ü deprem bölgesi içinde, % 42'si 1. derece deprem bölgesi içinde yer almaktadır.

Depremin neden olduğu olgulardan biri de sıvılaşmadır. 1964 yılında Alaska ve Japonya'da meydana gelen depremlerde sıvılaşmadan kaynaklı büyük yıkımlara kadar zemin davranışlarının yapılar üzerindeki etkisi çok önemsenmemekteydi. 29 Nisan 1964'de Alaska, Good Friday, (MS=9,2) ve 16 Haziran 1964'te Japonya, Niigata, (MS=7,5) depremleri yaşandıktan sonra sıvılaşma kavramı da tartışılmaya başlanmıştır. Bu depremlerde binaların birçoğunda, temel zemininin taşıma gücünü yitirmesinden dolayı yan yatmalar, batmalar veya devrilmeler gözlemlenmiştir. Günümüzde sıvılaşma olayı ve sıvılaşma potansiyeline sahip toprak zeminlerin tanımlanması, ayrıca sıvılaşma analiz yöntemlerinin kullanılması ile oluşturulan haritalar deprem zararlarını en aza indirmek bakımından oldukça büyük bir önem arz etmektedir.

2. ÇALIŞMA BÖLGESİNİN TANITIMI

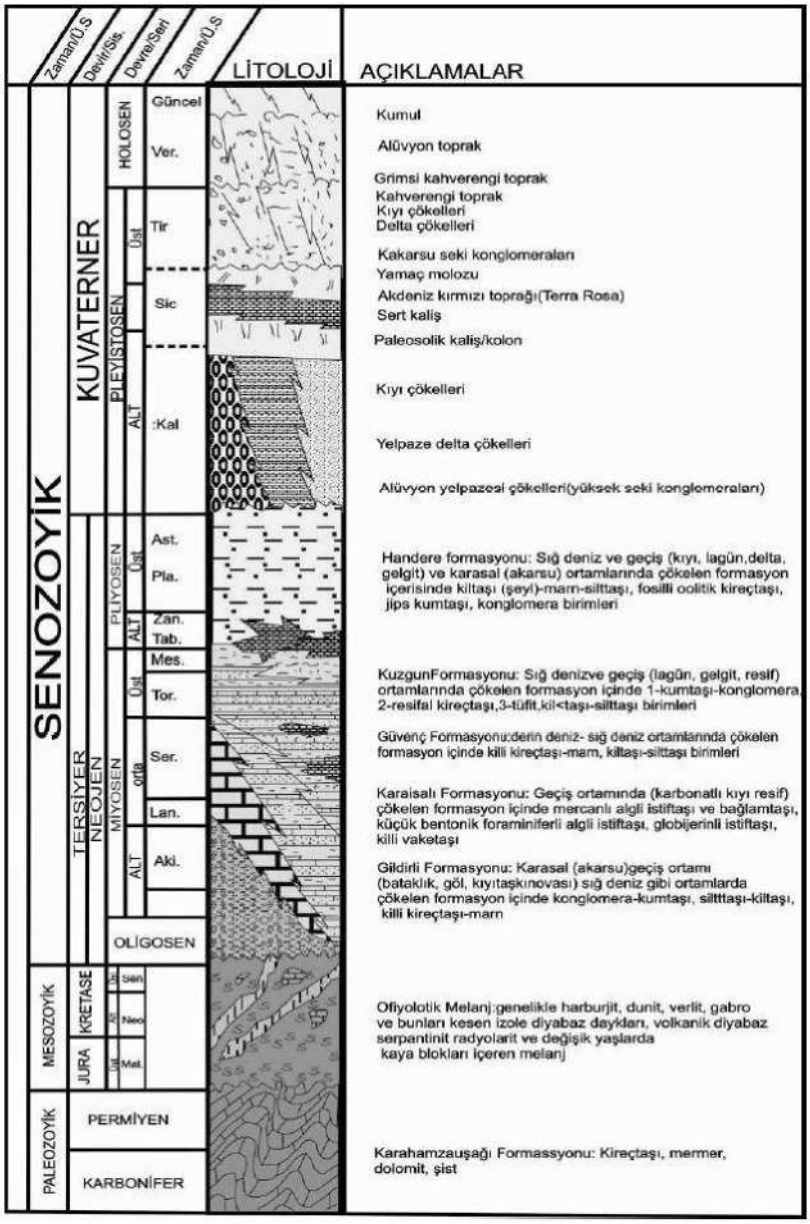
Bu çalışmada, Mersin ili kıyı kesiminde yer alan Mezitli ilçesi ile bu ilçeye bağlı, Davultepe ve Tece yerleşim alanlarında (Şekil 1) yer alan zeminlerin mühendislik özelliklerini ortaya koymak ve zeminlerin deprem sırasında gösterdiği dinamik davranışlardan biri olan sıvılaşma durumunu farklı deprem senaryoları ile ortaya koymak amaçlanmıştır. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için bölgenin depremselliği, jeolojisi, tektonik özellikleri gibi birçok değişkenin bilinmesi gerekmektedir. Sıvılaşma daha çok alüvyon zeminlerin silt-kum tane boyuna sahip malzemeleri üzerinde gelişmekle birlikte, yeraltı suyu derinliği de sıvılaşmanın oluşmasında büyük bir öneme sahiptir.



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.

2.1. Çalışma Alanının Jeolojisi

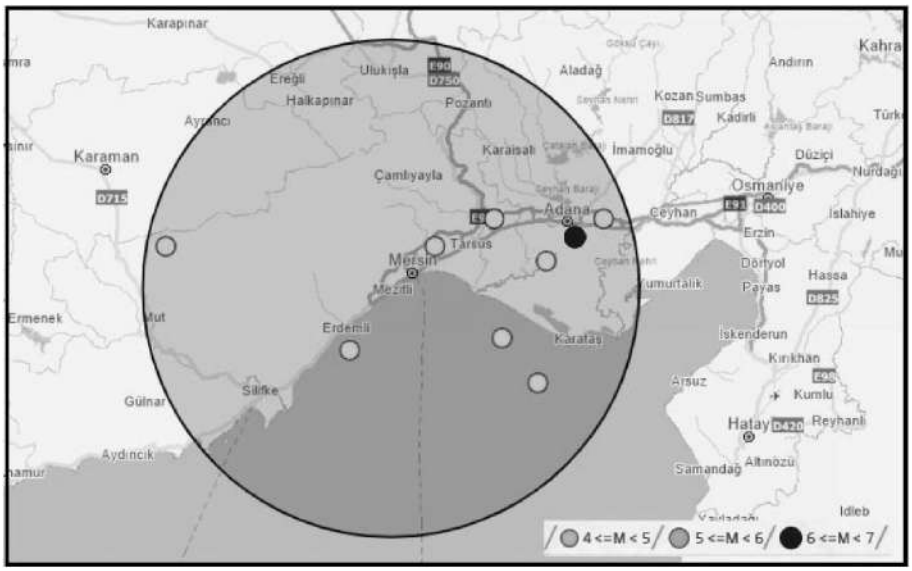
Tarsus-Mersin bölgesi kıyı akifer sistemi ve bu akifer sisteminin drenaj bölgesinde bulunan jeolojik birimler, Toros Dağ Oluşum Kuşağı içerisinde yer alan Ecemiş Fay Hattı'nın GD bölümünde bulunmakta ve bu bölgenin jeolojik özelliklerini taşımaktadır. Paleozoik yaşlı metamorfikler, Üst Kretase zamanında bölgeye yerleşen ofiyolitik melanj, Oligosen Miyosen, Pliyosen döneminde karasal, geçiş ve denizel ortam çökelleri, Kuvaterner yaşlı karasal ve geçiş ortamı çökelleri bölgenin daha çok G ve D kısımlarında görülmektedir. Birimlerin yaşlıdan gence yayılımları kuzeyden güneye doğrudur. Çalışma bölgesinde temel kaya olarak yer alan Handere Formasyonu, Yalçın ve Görür (1984) tarafından Adana bölgesinde Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı birim olan Adana grubunun en üst katmanında görülen birim olarak ayırtlanmış olup bölgenin G kesimlerinde ve Mersin havzasına kadar geniş bir uzanıma sahiptir. Çalışma sahası içerisinde bulunan Handere Formasyonu içerisinde; kum, kumtaşı, kireçtaşı ve marn birimleri gözlenmektedir. Bölgenin K kesimlerinde tipik olan kaliş birimi kurak yağışlı iklim koşullarında oluşan karasal bir oluşum olarak tanımlanmaktadır. Alüvyonal birimler ise inceleme alanında yer alan ve genellikle K'den G'e doğru akışını boşaltan akarsuların, morfolojinin yataya yakın eğim sunduğu kesimlerde, denize ulaştığı düz alanlardaki çakıl, kum, kil boyutundaki malzemeden oluşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma bölgesinin genelleştirilmiş dikme kesiti (Şenol ve diğ., 1998).

2.2. Çalışma Alanının Depremselliği

Mersin bölgesi ve çevresi için deprem konusunda en büyük tehlikeyi bölgede bulunan aktif faylar ile bu faylara olan mesafeler oluşturmaktadır (Şekil 3). Mersin'de deprem oluşturabilecek faylar; K'de Çamardı ile Gülek Boğazı arasındaki doğrultu atımlı Ecemiş Fayı, Gülek Boğazı ile Karsantı-Karaisalı arasında uzanan Karsantı-Karaisalı Fay Zonu, Gülek Boğazı ile Anamur arasında uzanan doğrultu atımlı Namrun Fay Zonu, 1998 Ceyhan depremine neden olan Yumurtalık-Karataş Fayı, Akdeniz'den geçip Kıbrıs'a uzanan kırık hattı, Mut civarında Mut Fayı, Ovacık-Silifke arasında Ovacık Fayı'dır



Şekil 3. Mersin ili merkezli 100 km yarı çaplı 10<M>5 aralığında aletsel dönem için (1900-2020) günümüze kadar gelen depremler (AFAD, 2020).

3. ÇALIŞMANIN TANITIMI

3.1. Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmalarında, sıvılaşma analizlerinde girdi parametrelerinden biri olan SPT-N parametresinin belirlenmesine yönelik olarak açılan 71 sondaj kuyusunda Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) yapılmıştır (Şekil 3). Çalışma sahasında yapılan sondajlarda ve gözlemlerde Kuvaterner yaşlı Alüvyonun kil-silt-kum-çakıl boyutundaki birimlerden oluştuğu belirlenmiştir. İnceleme alanında açılan sondaj kuyularından alınan örnekler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması'na (Wagner, 1957) kullanılarak isimlendirilmiş ve sınıflandırılmıştır. Çalışma alanının B sınırına yakın bölümlerindeki kıyıya yakın yerlerde gözlenen çökellerin tane boyunun genellikle kum olduğu ve yer yer yumuşak kıvamlı killi birim tabakalarına rastlandığı, buna karşın kıyıdan uzak kuzey bölümlerde ise kil, silt ve çakıl boyutunda malzemelerin ağırlık kazandığı belirlenmiştir. Sondajlar sırasında ayrıca geçilen birimlerin tanımlanmış ve yeraltı suyu seviyesi de ölçülmüştür. Çizelge 1'de sondajlardan elde edilen verilerin bir kısmı görülmektedir.

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar çalışmalarında, sondajlardan alınan zemin örnekleri üzerinde sıvılaşma girdi parametrelerini oluşturmak amacıyla deneyler yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri sırasıyla; elek analizleri, atterberg limitleri, doğal birim hacim ağırlık, özgül ağırlık su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık deneyleridir.

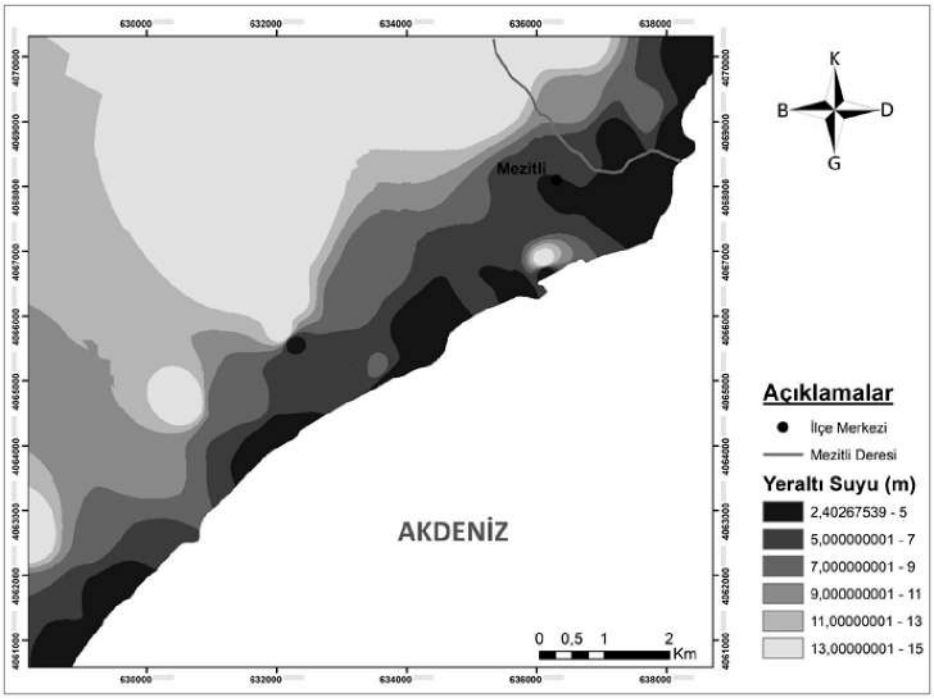
Şekil. 3. Arazide açılan sondajların lokasyonları.

Çizelge 1. Sondaj kuyularına ait derinlik, litoloji ve formasyon verileri.

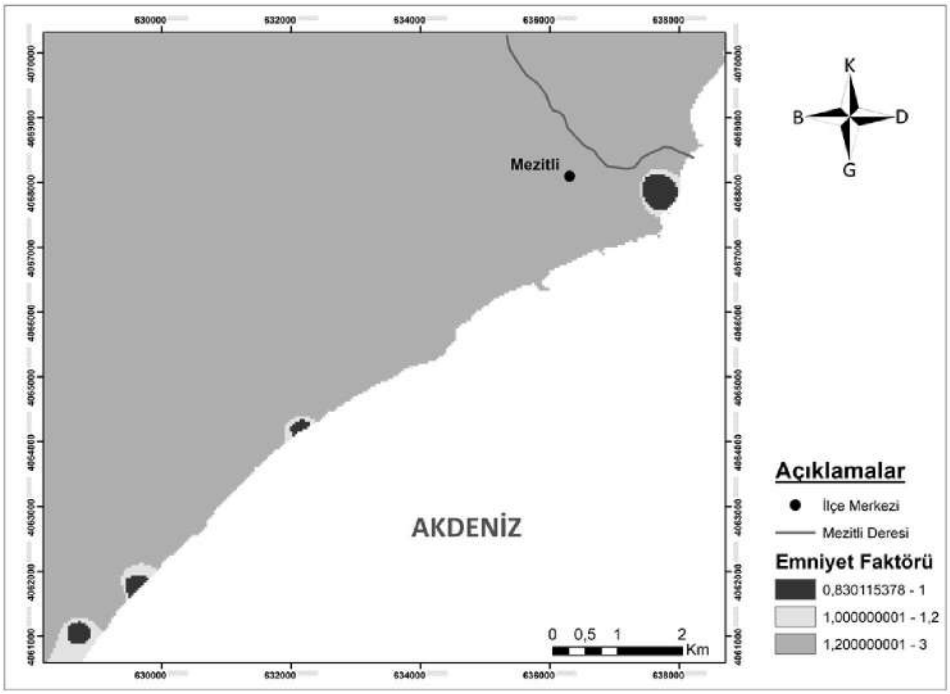
Sondaj No	**Derinlik(m)**	**Litoloji**	**Formasyon**
SK-12 (15,00m)	0,00 - 0,50	Dolgu Malzemesi	
	0,50 - 1,00	Sert Kaliş	Qk
	1,00 - 15,00	Çakıllı, Kumlu Kil	Alüvyon (Qal)
SK-19 (15,00 m)	0,00-0,70	Bitkisel Toprak	
	0,70-6,00	Çakıllı, Kumlu Kil	Alüvyon (Qal)
	6,00-15,00	Killi, Kumlu Çakıl	
SK-23 (15,00 m)	0,00-1,00	Sert Kaliş	Qk
	1,00-4,00	Kaliş Girişimli Çakıl	Alüvyon (Qal)
	4,00-15,00	Çakıllı, Kumlu Kil	
SK-25 (15,00 m)	0,00-2,00	Bitkisel Toprak	
	2,00-15,00	Killi, Kumlu Çakıl	Alüvyon (Qal)
SK-26 (15,00 m)	0,00-1,00	Dolgu Malzemesi	
	1,00-5,00	Çakıllı, Kumlu Kil	Alüvyon (Qal)
	5,00-15,00	Killi, Kumlu Çakıl	
SK-29 (15,00 m)	0,00-0,50	Bitkisel Toprak	
	0,50-4,00	Çakıllı, Kumlu Kil	Alüvyon (Qal)
	4,00-15,00	Killi, Kumlu Çakıl	
SK-30 (15,00 m)	0,00-1,00	Sert Kaliş	Qk
	1,00-15,00	Kaliş Girişimli Çakıl	Alüvyon (Qal)
SK-32 (15,00 m)	0,00-0,50	Dolgu Malzeme	
	0,50-3,00	Çakıllı, Kumlu Kil	Alüvyon (Qal)
	3,00-5,00	Killi, Kumlu Çakıl	
	5,00-7,00	Çakıllı, Kumlu Kil	
	7,00-15,00	Killi, Kumlu Çakıl	

4. SIVILAŞABİLEN ZEMİNLERİN BELİRLENMESİ

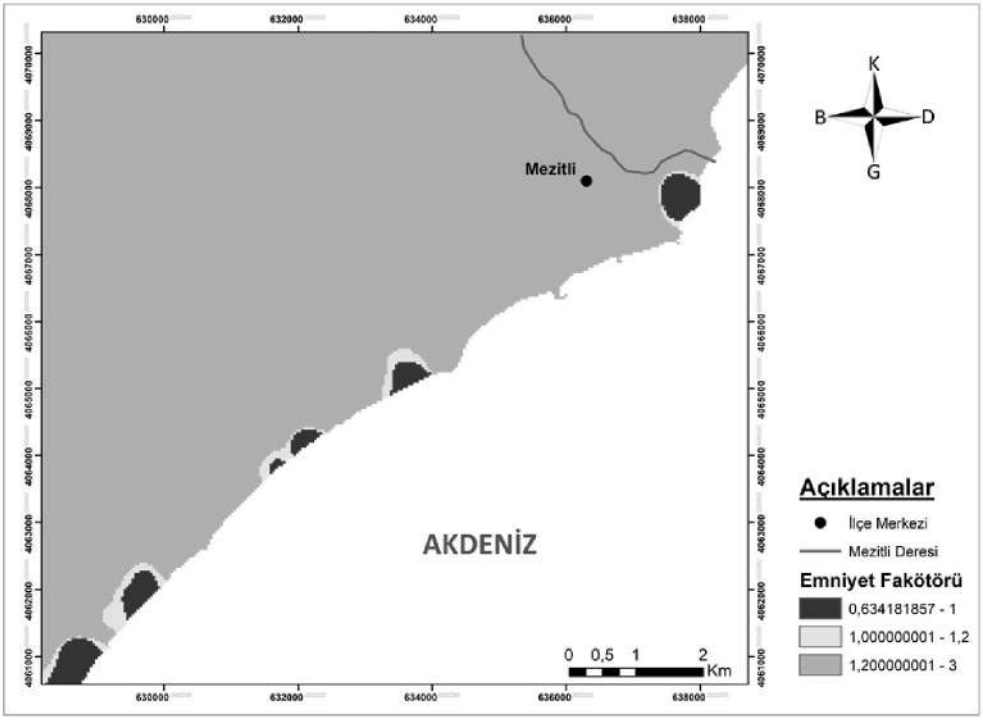
Sıvılaşabilir zeminleri belirlemeye yönelik yaplan analizler Seed ve Idriss'e (1971) ait sıvılaşma analiz yöntemine göre yapılmış ve ProSıvı (Babutçu, 2002) yazılımı ile deprem büyüklükleri M_w = 6,0 - 6,5 - 7,0 olan üç farklı deprem senaryosunda 5 m sabit derinlik değerlerinde çalışma bölgesinin sıvılaşabilir zeminleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında sıvılaşma emniyet faktörü hesaplanıp çalışma alanının yeraltı su seviyesi haritası (Şekil 4) ve sıvılaşma potansiyeli haritaları (Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7), ArcGIS 10.1 (ESRİ, 2002) programı ile Ters Mesafe Ağırlıklı Entepolasyon (IDW) yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır.



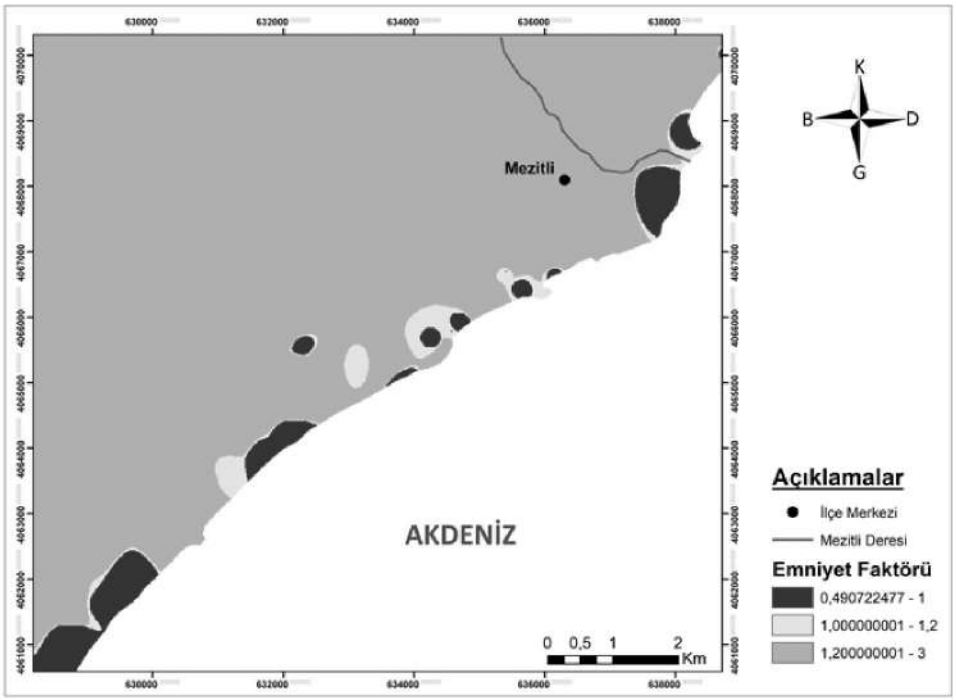
Şekil 4. Çalışma alanı yeraltı su seviyesi haritası.



Şekil 5. Büyüklüğü 6 olan deprem senaryosunun sıvılaşabilir zeminlerinin haritası.



Şekil 6. Büyüklüğü 6,5 olan deprem senaryosunun sıvılaşabilir zeminlerinin haritası.



Şekil 7. Büyüklüğü 7 olan deprem senaryosunun sıvılaşabilir zeminlerinin haritası.

5. SONUÇLAR

Çalışma sonuçları incelendiğinde; sıvılaşmanın sahil bölgelerinde etkin olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, sahil bölgelerinde yeraltısu seviyesinin zemin yüzeyine daha yakın olduğu ve alüvyonal gevşek kumlu zeminlerin bulunmasıdır. Bunun yanı sıra ince tane oranına sahip killi seviyelerde sıvılaşma riski gözlenmemiştir.

Çalışma alanında yeraltısuyu büyük risk oluşturmakta ve sıvılaşma için tehlike arz etmektedir. Özellikle sahil bölgelerine yapılacak olan yapılarda deprem tehlikesi göz ardı edilmemelidir. Buna göre yapının temeli yeraltısu tablasının altında ve sert zemin üzerinde olmalıdır. Ayrıca zemin araştırmaları yapılırken, SPT deneylerinde darbe sayılarının, zemin içindeki çakılların varlığından dolayı normalden yüksek değerler verdiği görülmüştür. Bu nedenle SPT'ye dayanan saha çalışmalarında dikkatli davranılması ve SPT sonuçları laboratuvar deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca bölgede açılan sondajların sıvılaşma analizleri için yetersiz olduğu düşünülmekte olup daha ayrıntılı sıvılaşma analizleri için sondaj sayısının arttırılması ve sahil hattı boyunca daha sık aralıklarla sondajların yapılması gerektiği sağlıklı sonuçlar vermesi açısından bu konuda daha sonra çalışma yapacak olan araştırmacılara önerilmektedir.

6. KATKI BELİRTME

Bu çalışmayı 2020-1-TP2-3845 ve 2020-1-TP2-3846 proje no'ları ile destekleyen Mersin Üniversitesi BAP koordinasyon birimine teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

AFAD (2020). Türkiye deprem katalogu. 25 Şubat 2020 tarihinde https://deprem.afad.gov.tr/depremkatalogu adresinden erişildi.

Babuçcu, F. (2002). Zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin ve sıvılaşma sonucu oturmanın spt ve cpt verilerine dayalı analiz yöntemleri üzerine bilgisayar yazılımı, yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Seed, H. B. ve Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, 97, 9.

Şenol, M., Şahin, Ş. ve Duman T.Y. (1998). Adana-Mersin dolayının jeoloji etüd raporu. M.T.A., Ankara, 46 s (yayımlanmamış).

Yalçın, N. M. ve Görür, N.U. (1984). Sedimentological evolution of the Adana Basin, International Symposium on the Geology of the Taurus Belt, 165- 172, Ankara.

Wagner, A. A. (1957). The use of the Unified Soil Classification System by the Bureau of Reclamation: Proceedings, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (London), Vol. 1, p. 125.

https://www.esri.com/en-us/home

Mühendislik Jeolojisinde Jeofizik Yöntemler / *Geophysical Methods in Engineering Geology*

Elazığ İlinde Kuvaterner Birimler Üzerinde Mikrotremor Çalışmaları

Microtremor Studies on Quaternary Units in Elazig Province

F.A. Yüksel[1,*], S. Er[2], Z. Boyraz[2], K. Avcı[1]

[1] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Jeofizik Mühendisliği Bölümü
[2] İnönü Üniversitesi, Coğrafya Bölümü
*(*fayuksel@iuc.edu.tr)*

ÖZ: Elazığ Türkiye'nin aktif faylarının olduğu bir bölgede bulunmaktadırlar. 24 Ocak 2020 tarihindeki Sivrice depreminde can kayıpları ve maddi hasarlar meydana gelmiştir. Hasarın olduğu yerler incelendiğinde genelde kuvaterner birimleri üzerinde olan yapılar olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın amacı da Elazığ ve çevresinde bulunan kuvaterner birimleri mikrotremor yöntemi ile inceleyerek zemin özelliklerini ortaya koymaktır. Bu amaçla bölgenin jeolojisi araştırılmış ve uygun bulunan yerlerde mikrotremor çalışmaları yapılmıştır. 2 faklı bölgede ve 8 noktada ölçümler yapılarak baskın titreşim frekansı (Hz.), baskın titreşim periyodu (Sn), H/V oranı (Ao) ve Hasar olasılık indeksi (Kg) verileri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çalışma sahasında 5 farklı alanda yüksek hasar olasılığı olan yerlerin varlığı saptanmıştır. Bu alanların yerleşmeye kapatılması ve daha güvenli alanlarda yapılaşma yapılması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrotremor, Elazığ, Sivrice Depremi

ABSTRACT: *Elazig Turkey are located in an area where there are active faults. Loss of lives and material damage occurred in the Sivrice earthquake on January 24, 2020. When the places of destruction are examined, it is seen that there are generally buildings on the quaternary units. The aim of this study is to examine the quaternary units in and around Elazığ by microtremor method and reveal their soil properties. For this purpose, the geology of the region was researched and microtremor studies were carried out where appropriate. The data of dominant vibration frequency (Hz.), Dominant vibration period (Sn), H / V ratio (Ao) and Damage probability index (Kg) were found by making measurements in 2 different regions and at 8 points. When the obtained results were evaluated, the presence of places with high probability of damage was determined at 5 different points in the study area. It has been suggested that these areas be closed to settlement and rebuildig in safer areas.*

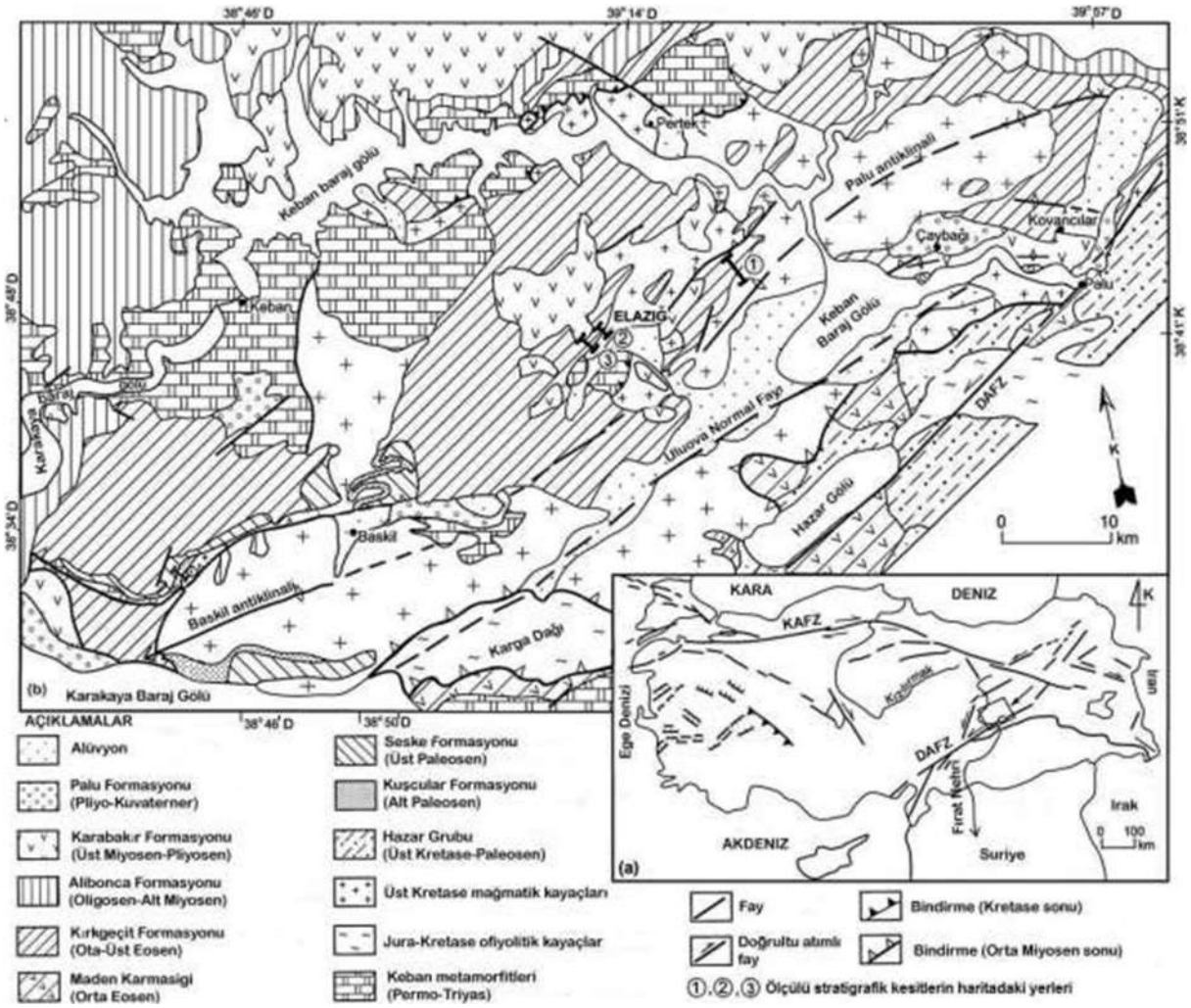
Keywords: *Microtremor, Elazığ, Earthque of Sivrice*

1. GİRİŞ

Mikrotremor, farklı kaynaklardan yayılan yeryüzündeki sürekli titreşimlerdir. Bu mikro sarsıntıların kaynağı da çeşitlilik gösterir. Yerkürenin belli bir eksende dönmesi, gelgit etkisi, jeotermal aktiviteler, yeraltındaki sismik aktiviteler, atmosfer etkileri, rüzgâr ve kültürel gürültüler (trafik, endüstriyel aktiviteler ve diğer bazı insan kaynaklı etkiler), yeryüzünde titreşim olarak algılanabilir. Bu titreşimlerin genlikleri 0,01 mikron ile 1 mikron, periyotları ise 0,05 saniye ve 2 saniye arasında değişmektedir (Kanai ve Tanaka, 1961). Son yıllarda ülkemizde bir deprem anında meydana gelebilecek can ve mal kaybını önlemek ya da en aza indirmek için yapılan çalışmalar daha da önem kazanmıştır. Bu çalışmaların amacı, yüzey tabakalarının dinamik özelliklerini tespit etmektir. Bu parametreler doğru belirlendiğinde üretilecek deprem senaryoları gerçeğe yakın olacaktır. Kanai ve Tanaka (1961) tarafından geliştirilen yöntemle mikrotremorlar ile depremler arasında yakın bir ilişkinin olduğunu; depremler sırasındaki yerin baskın dönemlerinin, mikrotremor ölçümlerinden elde edilen yerin baskın dönemiyle yakın bir ilişki içerisinde olduğunu, özellikle yerin yalın ve tekdüze olması durumunda bu benzerliğin daha çok olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmanın amacı da Elazığ ili ve çevresinde kuvaterner birimleri üzerinde mikrotremor çalışmaları yapılarak olası bir deprem esnasında hasar olabilecek yerleri tespit etmektir. Bu amaçla öncelikle bölgenin jeolojisi çalışılmış ve uygun bulanan yerlerde mikrotremor çalışmaları yapılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ

Çalışma alanının temelini Permo-Triyas yaşlı Keban metamorfikleri ve bu birimin üzerine Jura-kretase yaşlı ofiyolitik (Guleman) birimi gelmektedir. Bu birimlerin üzerine uyumsuz olarak Üst Kretase yaşlı mağmatikler (Elazığ mağmatikleri) bulunmaktadır. Bu birimlerin üzerine Hazar Grubu gelmektedir. Hazar Grubu ise Üst Kretase-Paleosen yaşlı altta kırıntılı kayaçlar üste doğru ise karbonatlı kayaçları içermektedir (Aktaş ve Robertson, 1984). Bu birimlerin üzerine uyumsuz olarak Alt Paleosen yaşlı, çamurtaşı, kumtaşı ve konglomera içeren Kuşçular formasyonu gelmektedir (Turan ve Türkmen, 1996). Bu birimin üzerine stratigrafik uyumsuz olarak gelen Seske formasyonu kireçtaşları ile temsil edilmektedir ve Üst Paleosen yaşlıdır (Turan ve Bingöl, 1991). Orta -Üst Eosen yaşlı Kırkgeçit formasyonu konglomera, kireçtaşı ve marnlardan oluşmaktadır (Avşar, 1996). Bu birim üzerine gelen Alibonca Formasyonu genellikle kireçtaşı ile temsil edilir ve Alt Miyosen yaşlıdır. Akarsu-göl çökelleri ve volkanik kayaçlardan oluşan Karabakır Formasyonu Geç-Miyosen-Pliyosen yaşlıdır (Turan ve Bingöl, 1991). Bu birimlerin üzerine ise Pliyo-kuvaterner yaşlı Palu formasyonu gelmektedir (Aksoy vd. 1996).



Şekil 1. Elazığ bölgesinin jeoloji haritası (İbilioğlu, 2008; Aksoy ve ark, 2005'ten)

3.MİKROTREMOR ÇALIŞMALARI

Çalışma, 2020 yılı Elazığ depremi sonrası, Elazığ ve çevresi içerisinde; I. Bölge olarak Sivrice ve Gezin arasında, II. Bölge olarak Elazığ ili şehir merkezinde 2 ayrı bölgede, toplam 8 adet tek istasyon mikrotremör (MT) ölçümü alınmıştır. Ölçümler sırasında Güralp CMG-6TD hız-ölçer sismometre, 12V

akü ve taşınabilir bilgisayar sistemi kullanılmıştır. Ölçüm noktalarında Scream yazılımı ile 30-60 dakikalık üç bileşenli kayıtlar alınmıştır. (Düşey (z), K-G ve D-B) Kayıtlar, Geopsy programı ile değerlendirilmiştir. Veri işlem ve analiz çalışmaları sonrası yerin, baskın titreşim frekansı (Hz.), baskın titreşim periyodu (Sn.), H/V oranı (Ao), Hasar olasılık indeksi (Kg) ve anakayaya göre yatay genlik oranları hesaplanarak, zemin mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

I.Bölge

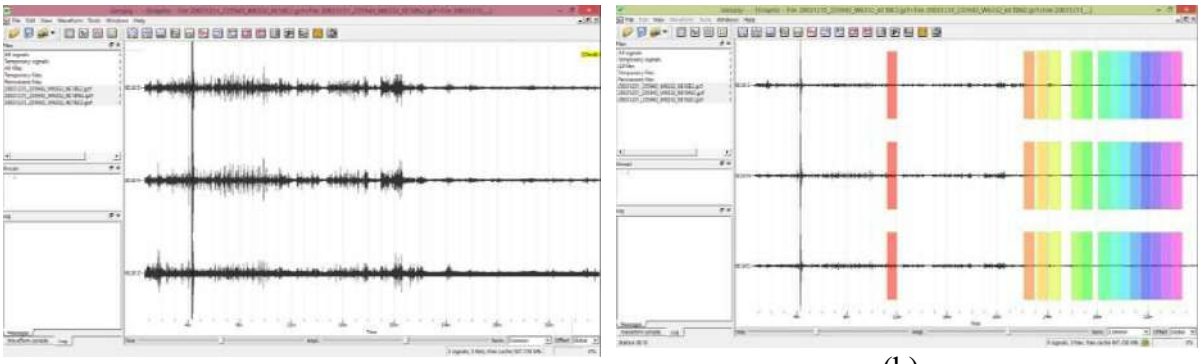
Sivrice ve Gezin lokasyonlarında gerçekleştirilen 2 adet mikrotremor ölçüm çalışmaları Bölge I alanını oluşturmaktadır. Aşağıdaki Şekil 2'de ölçüm noktalarının yerleri görülmektedir. Genellikle kuvaterner yaşlı dolgu alanlarında lokalize olmuş noktalarda ölçümler alınmıştır. Analizler neticesinde I. Bölge içerisinden örnek bir Mikrotremor analiz sonuçları Şekil 3, 4 ve 5 de ve Çizelge 2 de yer almaktadır.

Şekil 2. İnceleme Alanı I.Bölge (Sivrice ve Gezin) Yer Bulduru haritası. (Referans: Google earth)

Çizelge 1. Mikrotremor Ölçüm Sonuçları (I.Bölge).

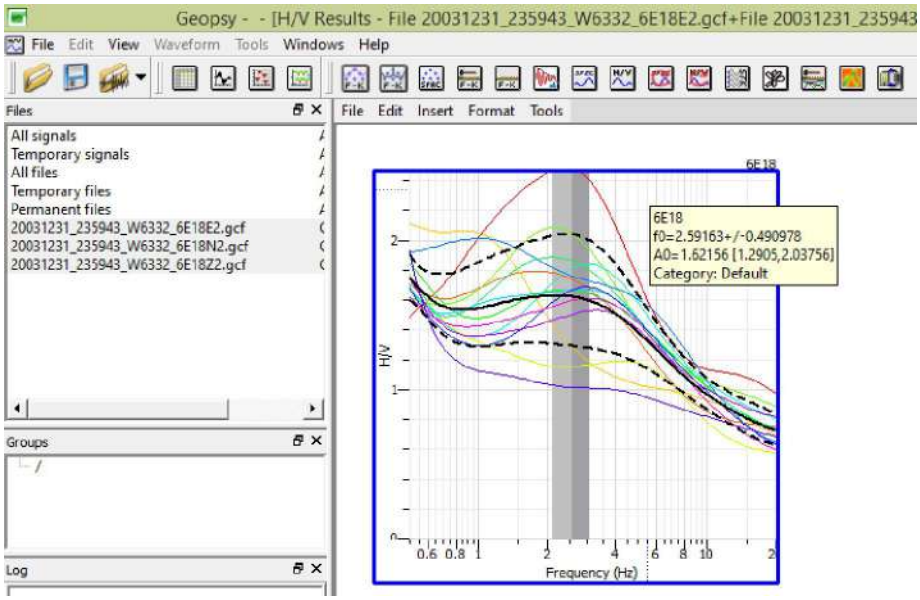
Nokta No	Kuzey	Doğu	Rakım (m.)	Baskın Frekans (Hz.)	Baskın Periyot (Sn.)	H/V Oranı Ao	Hasar Olasılığı İndeksi Kg
M11	38^0 26' 53''	39o 18' 40''	1270	2.59	0.39	1.62	1.01
M12	38^0 31' 8''	39o 30' 60''	1270	1.68	0.60	2.86	4.87

Şekil 3. Mikrotremor (M11) ölçüm çalışması.



(a) (b)

Şekil 4. Mikrotremor arazi verisi a) Subtract Value Düzeltmesi ile Verilerin Eşit Başlangıç Genlik Seviyelerine Taşındıktan Sonraki Görünümü b) 50 sn. lik Pencerelenmiş Veri (14 Adet)



Şekil 5. Mikrotremor Ölçü Noktasına Ait H/V Oranı

Çizelge 2: M11 Noktası Sonuçları

NOKTA NO	BASKIN FREKANS (Hz)	BASKIN PERİYOT (sn.)	H/V ORANI
M-11	2,59	0,39	1,62

II.Bölge

Elazığ ili şehir merkezinde, Abdullahpaşa, Yenimahalle, Mustafapaşa, Sürsürü, Kesrik ve *Cumhuriyet mahallesi* İbrahim Bozkurt sokak lokasyonlarında gerçekleştirilen 6 adet mikrotremor ölçüm çalışmaları II. Bölge alanını oluşturmaktadır. Genellikle kuvaterner yaşlı dolgu alanlarında lokalize olmuş noktalarda ve bir adet de kaya üzerinde ölçümler alınmıştır. Aşağıdaki Şekil 6 da ölçüm noktalarının yerleri görülmektedir. 6 adet ölçüm çalışmalarından örnek bir resim, Resim 4 de yer almakta, diğer ölçüm resimleri eklerde yer almaktadır. Analizler neticesinde Bölge 4 içerisinden örnek bir Mikrotremor analiz sonuçları Şekil 6-9 da ve Çizelge 4 de yer almaktadır.

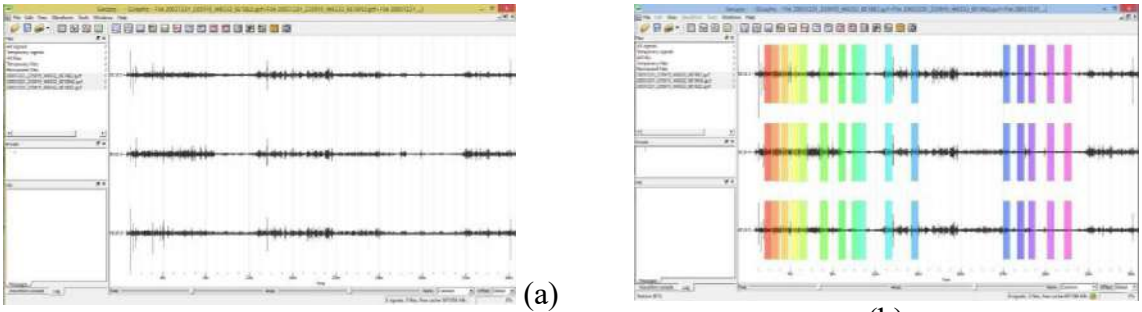
Şekil 6. İnceleme Alanı (Elazığ Merkez) Yer Bulduru haritası. (Google earth)

Çizelge 3. Mikrotremor Ölçüm Sonuçları (II.Bölge).

Nokta No	Kuzey	Doğu	Rakım (m.)	Baskın Frekans (Hz.)	Baskın Periyot (Sn.)	H/V Oranı Ao	HOİ Kg	AYGO
M17	38^0 39'22''	39^0 9' 3''	1080	0.87	1.15	3.18	11.62	21
M18	38^0 40'35''	39^0 13' 1''	1070	1.33	0.75	1.50	1.69	31
M19	38^0 40'23''	39^0 14' 10''	1050	0.54	1.85	4.18	32.36	625
M20	38^0 40'10''	39^0 11' 12''	1070	0.57	1.75	4.68	38.43	49
M21	38^0 39'37''	39^0 14' 43''	1010	1.50	0.67	5.66	21.36	25
M22	38^0 40'21''	39^0 9' 27''	1206	11.67	0.09	1.88	0.30	-

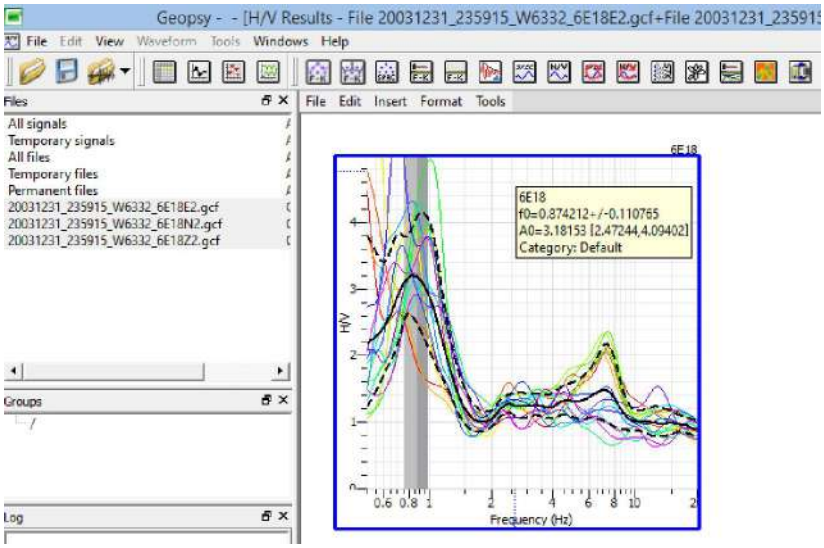
HOİ : Hasar Olasılığı İndeksi
AYGO : Anakaya Yatay Genlik Oranı

Şekil 7. Mikrotremor (M17) ölçüm çalışması.



(a) (b)

Şekil 8. Mikrotremor arazi verisi a) Subtract Value Düzeltmesi ile Verilerin Eşit Başlangıç Genlik Seviyelerine Taşındıktan Sonraki Görünümü b) 50 sn. lik Pencerelenmiş Veri (16 Adet)



Şekil 9. Mikrotremor Ölçü Noktasına Ait H/V Oran

Çizelge 4. M17 Noktası Sonuçları

NOKTA NO	BASKIN FREKANS (Hz)	BASKIN PERİYOT (sn.)	H/V ORANI
M-17	0,87	1,15	3,18

5. SONUÇLAR

Çalışmalar sonucunda I. Bölge de M11 ve M12 noktalarında elde edilen parametreler çok zayıf zemin birimlerini temsil etmemekle birlikte ölçüm yerlerinde ağır hasarların oluştuğu bilinmektedir. Nispeten göreceli olarak M12 ölçüm yerinde zemin yapısı M11 lokasyonuna göre daha zayıf denilebilir. II. Bölge verileri hesaplanan parametreler 6 ölçüm noktası içerisinde M22 noktası anakaya üzerinde (Cumhuriyet Mah. İbrahim Bozkurt sokak) yer almakta olup, bu noktada çok düşük Ao ve hasar dağılımı indeksi hesaplanmışken, diğer tüm noktalarda çok yüksek hakim periyot, çok yüksek Ao, çok yüksek hasar dağılım indeksi değerleri belirlenmiştir. Çok yüksek değerlerin ölçümlendiği bu lokasyonlar ağır hasarlı yapıların olduğu görülmekte ve elde edilen sonuçlarla hasar dağılımı uyum göstermektedir.

6. KATKI BELİRTME

Araştırmacılar olarak katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Üniversitesi rektörlerine teşekkür ederiz

7. KAYNAKLAR

Aksoy, E., Turan, M., Türkmen, İ., Özkul, M., 1996, "Elazığ Havzası'nın Tersiyer'deki Evrimi" , Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü 30. Yıl Sempozyumu, Trabzon, 293-310.

Aksoy, E., Türkmen, İ., Turan, M., 2005, "Tectonics and Sedimentation In Convergent Margin Basins: An Example From The Tertiary Elazıg Basin, Eastern Turkey" , Journal of Asian Earth Sciences, 25, 459-472.

Aktaş, G., ve Robertson, A. H. F., 1984. The Maden Complex, SE Turkey: Evolution of the a Neo-Tethyen Active Magrin, In: Dixon, J.E., Robertson, A.H.F. (Eds.). The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 375-402.

Avşar, N., 1996, "Inner Platform with Praebullalveolina afyonica Sirel and Acar around Elazığ Region (E. Turkey)", Mineral Res. Expl. Bull., 118, 9-14.

İbilioğlu, D., 2008. Elazığ havzası Paleojen istifinin mikropaleontolojik (Planktonik foraminifer ve ostrakodlarının) incelenmesi ve ortamsal yorumu. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 189s.

Kanai, K. ve Tanaka, T., 1961. On microtremors. *8. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 39*, 97-114.

Turan, M., ve Bingöl, A. F., 1991, "Kovancılar-Baskil (Elazığ) Arası Bölgenin Tektono-Stratigrafik Özellikleri" , Ahmet Acar Jeoloji Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 212-227.

Turan, M,. ve Türkmen, İ., 1996, "Kuşcular Formasyonu'nun (Erken Paleosen) Stratigrafisi ve Sedimantoojik Özellikleri" , Turkish Journal of Eart Science, 5, 109-121.

Sıvılaşma Analizinde Standart Penetrasyon Testi ve Kesme Dalgası Hızlarının Birlikte Kullanılması: Çanakkale Örneği

Combined use of Standard Penetration Test and Shear Wave Velocities in Liquefaction Analysis: A Case Study in Canakkale

O. Eyisüren[1,2,*], Ö. Karaca[3], A. Büyüksaraç[4]

[1]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Doktora Öğrencisi
[2] Çanakkale Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü
[3]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
[4]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan Meslek Yüksek Okulu
*(*onureyisuren@gmail.com)*

ÖZ: Çanakkale Merkez yerleşiminin sıvılaşma potansiyelini araştırmak amacıyla 151 adet sondaj, SPT, örselenmiş örnekler üzerinde yapılan 1027 adet sınıflama deneyi ve kayma dalgası hızının (Vs) belirlenmesi amacı ile yapılan 110 adet yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (MASW) ile belirlenen V_s değerleri ve yeraltı su seviyesi bilgileri kullanılmıştır. Çanakkale yerleşim alanı için daha önce SPT-N'ye dayalı basitleştirilmiş yöntem kullanılarak yapılmış olan çalışmalardan farklı olarak yine standart penetrasyon testine (SPT) ve ayrıca V_s parametrelerine bağlı sıvılaşma potansiyeli indeksi (I_L) ve sıvılaşma riski indeksi (I_R) haritaları ayrı ayrı oluşturulmuştur. Sarıçay'ın etrafından başlayarak şehir merkezinin büyük bir kısmında çok yüksek I_L ve I_R değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda SPT darbe adedi düzeltme faktörlerinden enerji katsayısının analizlere etkisini araştırmak amacı ile farklı enerji düzeyleri için analizler tekrarlanmıştır. Tüm analizler sonucunda SPT'de aktarılan enerji düzeyinin, sonuçları önemli derece etkilediği, bu anlamda kesme dalgası hızının (V_s) bu tür bir düzeltmeye gerek duymaması nedeniyle SPT-N değerlerine bir referans olarak analizlerde kullanılması arazi deneylerindeki belirsizliklerden kaynaklanabilecek olumsuzlukları azaltacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, SPT, Vs, Zemin, Deprem

ABSTRACT: *In order to investigate the liquefaction potential of Çanakkale residential area, 151 boreholes, standard penetration test (SPT), 1027 classification tests performed on disturbed samples and 110 V_s values determined by multi-channel analysis (MASW) of surface waves to determine the shear wave velocity (V_s) and groundwater level data has been used. Unlike the previous studies, which was made using a simplified method based on SPT-N, liquefaction potential index (I_L) and liquefaction risk (I_R) maps based on SPT-N and also V_s parameters were created separately for Çanakkale settlement area. Very high I_L and I_R values were obtained in a large part of the city center starting around Saricay. At the same time, the analyzes were repeated for different energy levels in order to investigate the effect of the energy coefficient, one of the SPT-N correction factors, on the analysis. As a result of all analyzes, it is thought that the energy level transferred in the SPT significantly affects the results, and in this sense, since the shear wave velocity (Vs) does not need such a correction, using SPT-N values as a reference in the analyzes will reduce the negative effects that may arise from the uncertainties in the field tests.*

Keywords: *Liquefaction, SPT, Vs, Soil, Earthquake*

1. GİRİŞ

Kayma dayanımının kaybından kaynaklanan sıvılaşma kaynaklı zemin sorunu, deprem sırasında meydana gelen hasarın başlıca nedenlerinden biridir. Sıvılaşma duyarlığı ilk olarak Youd ve Perkins (1978) tarafından zeminin sıvılaşmaya olan doğal direncinin bir ölçüsü olarak ortaya atılmış ve duyarsızdan yüksek derecede duyarlılığa kadar değişen ölçeklendirme yapılmıştır. Başlıca zemin özellikleri arasında tane boyutu, ince tane içeriği, yoğunluk, doygunluk derecesi, yeraltısuyu düzeyi ve çökelin yaşı yer alır. Sıvılaşma duyarlılık haritaları, sıvılaşma tehlikesi haritalamasının en temel seviyesidir. Seed and Idriss (1971), Iwasaki vd. (1982), Tokimatsu ve Nakamura (1986), Robertson ve Wride (1998) gibi araştırmacılar deprem yüklemesi sırasında zemin sıvılaşması olgusunu incelemiş ve

sıvılaşma tehlikesinin değerlendirilmesi için farklı yöntemler önermişlerdir. Sıvılaşma duyarlılığının değerlendirilmesi, zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncine ilişkin bir ön fikir sağlar. Tsuchida (1970), tane boyutu dağılımı eğrilerini kullanarak sıvılaşma duyarlılığının tanımlanmasını sağlamıştır. Yerinde deneylerin uygulanmasıyla, sıvılaşma potansiyelinin sayısal değerlendirmesi yaygın bir yaklaşımdır. Zeminlerin sıvılaşma direncinin değerlendirilmesi (Seed vd., 1985; Youd ve Carter, 2005), tekrarlı gerilme oranı (CSR) ve tekrarlı direnç oranının (CRR) belirlenmesini gerektirir. Standart Penetrasyon Testi (SPT), kohezyonsuz zeminlerin penetrasyon direncini araştırmak için ekonomik, hızlı ve kullanışlı bir yöntem olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş prosedür, başlangıçta döngüsel yüklemeye maruz kalan zeminlerin davranışına ilişkin kapsamlı laboratuvar çalışmalarına dayanarak geliştirilmiş ve daha sonra doğrulanmış ve saha vaka geçmişleriyle desteklenmiştir. Bu prosedür, büyüklük ağırlıklı eşdeğer tekdüze döngüsel gerilim oranı olarak ifade edilen, SPT N değeri ile döngüsel yükleme yoğunluğu arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Bir sonraki adım, düzeltilmiş SPT değerine göre zeminin sıvılaşma direncini belirler. Kayma dalgası hızı (V_s), tepki analizinde zeminlerin temel mühendislik özelliğidir ve kayma modülü ile doğrudan ilişkilidir. Yüzey dalgası hızı ölçüm teknikleri kullanılarak, sondaj olmaksızın bir kayma dalgası hızı profili oluşturulabilir. Kayma dalgası hızı, yerinde ölçülebilmesi ile sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. V_s'nin sıvılaşma direncinin bir alan indeksi olarak kullanılması sağlam temellere dayanmaktadır. Çünkü hem V_s hem de sıvılaşma direnci benzer şekilde, boşluk oranı, etkin yanal gerilmeler, gerilme geçmişi ve jeolojik yaştan etkilenir. Kayma dalgası hızına dayalı yöntemin avantajları Idriss ve Boulanger (2004) ile Ishihara ve Yasuda (1972) tarafından belirtilmiştir. Son 20 yılda, V_s ile sıvılaşma direnci arasındaki ilişkiyi araştırmak için çok sayıda çalışma (Andrus ve Stokoe, 2000; Tokimatsu ve Nakamura, 1986; Uyanık ve Taktak, 2009; Uyanık, 2020) yapılmıştır. Ancak V_s tabanlı prosedürlerin ayrıntılı incelemeleri Andrus ve Stokoe (2000) tarafından sunulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Çanakkale Şehri barındırdığı tarihi ve kültürel yapıları, son yıllarda artan önemli mühendislik yapıları ve Marmara'yı Ege'ye bağlaması sebebiyle önemli bir konumda yer almaktadır. Çanakkale ve çevresinde Kuzey Anadolu fay zonu ve uzantıları devam etmektedir. Aynı zamanda Çanakkale Şehri, Ganos fayı, Etili fayı, Çan-Biga fay kuşağı ve Yenice-Gönen fayı meydana getirdikleri depremler nedeni ile aktif oldukları bilinen bir bölge içerisinde yer almaktadır. Sağ yanal doğrultu atımlı olan Saroz-Gaziköy fayında 1912 tarihinde 7.3 büyüklüğünde Mürefte-Şarköy olarak bilinen bir deprem meydana gelmiştir. 1935 tarihinde 6.3 büyüklüğünde depremin yaşandığı Çan-Biga fay kuşağı, kuzeydoğu-güneybatı yönelimli birçok fay segmentinden oluşmaktadır. Tarihte 1953 Yenice-Gönen depremi olarak bilinen 7.2 büyüklüğünde bir depreme neden olan, Yenice-Gönen fayıdır. Yakın tarihlerde ise 2014 yılında Gökçeada açıkları Ege Denizi'nde Ml=6.5 büyüklüğünde ve 2017 yılında Ayvacık ilçesinde en büyüğü Mw=5.3 ölçülen bir çok deprem meydana gelmiştir. Tunusluoğlu ve Karaca (2018), Çanakkale şehir merkezi için SPT verisine dayalı sıvılaşma şiddeti haritaları üretmişlerdir. Şehir merkezinde sığ yeraltı suyu seviyesinin bulunduğu ve sismik özellikleri bakımından aktif olan bölgede Kuvaterner yaşlı alüvyon birimlerin sıvılaşması ile bina ve altyapılarda önemli hasarlar oluşabileceği belirtilmiştir.

Çalışma alanının özellikle şehrin tam ortasından geçip doğu-batı yönünde akan Sarıçay'ın etrafı olmak üzere önemli bir bölümü suya doygun kum zeminlerden oluşmaktadır. Kum zeminler SPT-N değerlerine dayanarak genellikle gevşek ve orta sıkı olarak tanımlanmıştır. Yapılmış olan sondajlardan en derini 30 m, çoğunluğu ise 20 m'dir. Bu derinlikler içerisinde gevşek ve orta-sıkı kum zeminlerin araştırma derinliği boyunca devamlılığı gözlenmiştir. Kum, siltli kum, killi kum olarak tanımlanmış olan kohezyonlu zeminlerde $N_{1,60}$ değerleri 2-25 arasında değişmekte ve ince dane oranları %10'un altındadır. Çalışma alanının kuzey ve güney kesimlerinde yer alan Alçıtepe ve Gazhanedere formasyonlarında ise ağırlıklı olarak katı, çok katı ve sert kil zeminler ağırlıklı olarak gözlenmektedir. Çalışma alanının büyük kısmını oluşturan Alüvyondaki yeraltı suyunun yüzeyden derinliği 0.6-9.9 m arasında değişmektedir. Alçıtepe ve Gazhanedere formasyonlarının kapsadığı alanlarda yeraltı suyu, genel olarak ya ilk 10 m'de rastlanmış ya da araştırma derinliği içerisinde gözlenmemiştir.

Zeminlerin sıvılaşma analizleri değerlendirilirken Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esas alınmış, AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından deprem tekrarlama periyodu 475 yıl seçilerek çalışma alanı için ortalama pik yatay ivme (a_{max}) 0.3 g olarak belirlenmiştir. Çalışma alanının merkezinden itibaren 100 km yarıçap içinde üç ana fay bulunmaktadır. Bunlar; sırasıyla Saroz-Gaziköy fayı, Yenice-Gönen fayı ve Edremit fayı 125, 70 ve 125 km mesafelerde yer almaktadır. Bu fayların üretebileceği deprem büyüklükleri incelendiğinde Mw=7.5 seçilmiştir.

Şekil 1. Çanakkale ve çevresindeki diri faylar ve deprem (M≥5.0) dış odak dağılımları (AFAD, 2021)

2.2. Arazi Verisi

Çanakkale şehir merkezinde Büyüksaraç vd. (2013) tarafından yapılmış olan 151 adet sondaj kuyundaki SPT-N değerleri, 110 profilde uygulanmış olan MASW ölçülerinden elde edilen V_s değerleri ve tüm sondajlardan alınan toplam 1027 adet sınıflama deneyi verileri bu çalışmanın arazi ve laboratuvar verilerini oluşturmaktadır. Yapılmış olan arazi deneylerinin sahadaki dağılımı Şekil 2'de verilmiştir. Sondaj derinlikleri hemen hemen tüm noktalarda yüzeyden itibaren 20 m derinliğe kadar sıvılaşma analizine veri sağlayacak niteliktedir. MASW ölçümlerinde de bu koşul sağlanmaktadır. V_s'ye göre yapılan analizlerde zemine ait fiziksel özellikler ölçümün bulunduğu noktadaki sondaj kuyusundan elde edilen numuneler üzerinde yapılan sınıflama deneylerinden yararlanılmıştır.

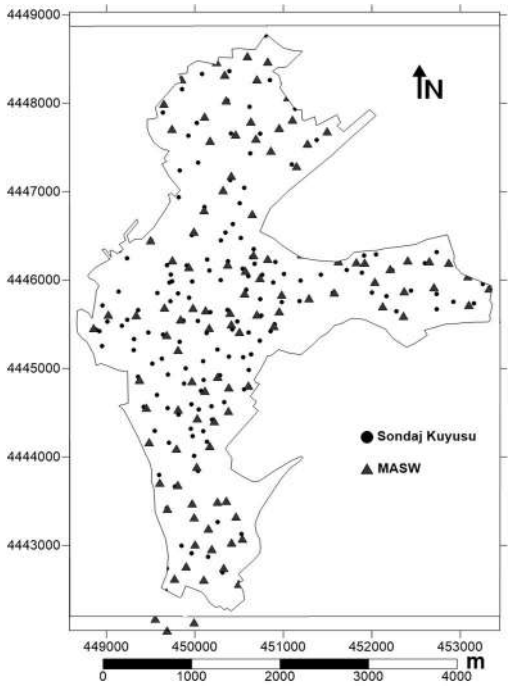
2.2.1. SPT-N ile Sıvılaşma Analizi

Sahanın sıvılaşma potansiyeli, SPT-N dikkate alınarak literatürde yaygın olarak kullanılan Youd vd. (2001) tarafından önerilen yaklaşım ile sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı belirlenmiştir (Eş.1).

$$FS = CSR_{7.5}/CRR \quad (1)$$

Burada; FS sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı, $CSR_{7.5}$ moment magnitüd 7.5 olan bir deprem için tekrarlı gerilme oranı, CRR zeminin tekrarlı direnç oranıdır. CSR, Seed ve Idriss (1971)'in önerdiği bağıntı ile belirlenmiştir (Eş.2).

$$CSR = 0.65(a_{max}/g)(\sigma_v/\sigma'_v)r_d \quad (2)$$



Şekil 2. Arazi deneylerinin lokasyon haritası

Burada; a_{max} en büyük yatay yer ivmesi, g yerçekimi ivmesi (m/sn^2), σ_v toplam gerilme (kPa), σ'_v efektif gerilme (kPa), r_d gerilme azaltma katsayısıdır. Gerilme azaltma katsayısı zeminin gerçek kayma gerilmesi ile tahmin edilen kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Mühendislik çalışmalarında Youd vd. (2001) tarafında Eş. 3 ile hesaplanarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

$$r_d = \frac{(1.000-0.4113z^{0.5}+0.04052z+0.001753z^{1.5})}{(1.000-0.4177z^{0.5}+0.05729z-0.006205z^{1.5}+0.001210z^2)} \quad (3)$$

Burada z; yüzeyden itibaren derinliği (m) ifade etmektedir. Zeminin tekrarlı direnç oranı (CRR) ise, ince içeriği %5'ten az olan kumlar için arazide uygulanan SPT-N'in %60 enerji oranına göre düzeltilmesi ile $(N_1)_{60}$ büyüklüğü 7.5 olan bir deprem için Eş. 4 ile belirlenebilir (Youd vd., 2001). Eşitliğin $(N_1)_{60}$<30 olan zeminler için uygun olduğu $(N_1)_{60}$>=30 olan temiz kum zeminlerin sıkı olduğu ve sıvılaşmayan zemin sınıfına gireceği belirtilmektedir.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60}+45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

Kum zemin içerisindeki ince dane içeriğinin (FC) artması CRR'yi arttıracağından $(N_1)_{60}$ değerlerinin Eş. 6'ya göre düzeltilmesi gerekmektedir (Seed vd. 1985). SPT-N değerlerine uygulanması gereken düzeltmeler Eş. 5'te verilmiştir. Anbazhagan vd. (2016) sıvılaşma değerlendirmesinde enerji düzeltmesinin kritik bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Burada öne çıkan husus serbest düşen ağırlığın uyguladığı enerji transferinin yüzdesinin doğruya yakın tahmin edilmesidir. Her sahada, enerji düzeltmesi (CE) SPT-N değerinin doğru tahmin edilmesinde çok önemli rol oynamaktadır (Anbazhagan vd., 2016). Enerji düzeltmesi için %60 birçok koşulda standart kabul edilmesinin yanında farklı şartnameler aynı şahmerdan ve sistem için farklı enerji seviyeleri tanımlamışlardır. Bu durum çoğunlukla ekipmana, yerel saha etkilerine, operatörün becerisine bağlıdır ve bu yüzden bir kişi ya da şartnameden gelen tek bir değerin doğru enerji düzeltmesi olmasını elverişsiz kılmaktadır (Howie vd., 2003). Bu nedenlerle deney sırasında aktarılan enerji oranının ölçülmesi önem taşımaktadır.

$$(N_1)_{60} = NC_N C_R C_S C_B C_E \quad (5)$$

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (6)$$

Burada; α ve β FC'ye göre düzeltme katsayılarıdır ve Eş. 7 ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha = 0\ için\ FC \leq 5\% \quad \alpha = e^{[1.76-(190/FC^2)]}\ için\ 5\% < FC < 35\% \quad \alpha = 5\ için\ FC \geq 35\% \quad (7a)$$

$$\beta = 1 \text{ için } FC \leq 5\%; \beta = [0.99 + (\mathrm{FC}^{1.5}/1{,}000)] \text{ için } 5\% < \mathrm{FC} < 35\%; \beta = 1.2 \text{ için } \mathrm{FC} \geq 35\% \quad (7b)$$

2.2.2. Vs ile Sıvılaşma Analizi

Kayma dalgası hızları (V_s) belirlenmesi amacı ile çok kanallı yüzey dalgası analizi (MASW) yöntemi kullanılmıştır. Genel olarak balyoz, ağırlık düşürme vb. kaynakların kullanıldığı sığ mühendislik çalışmalarında kullanılan yüzey dalgası analizi yöntemidir. Yöntem, yer içine gönderilen sinyalin oluşturduğu Rayleigh dalgalarını kaydederek, bu dalgaların dispersif (frekans bağımlı faz hızı) özelliğinden faydalanarak Rayleigh dalgalarında baskın etkisi olan V_s'nin hesaplanmasıdır. Temel modda S dalgası hızı baskın bir özellik gösterdiği için, bu hız değerleri Rayleigh dalgası dispersiyon verisinden kolaylıkla elde edilebilmektedir (Xia vd., 1999). Rayleigh dalgası dispersiyonunun ters çözümü ile de S dalgasının 1-Boyutlu modelinin hesaplanması mümkündür. Sıvılaşma potansiyelinin V_s değerlerine göre belirlenebilmesi amacıyla Andrus ve Stokoe (2000) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Temel farklılık zeminin tekrarlı kayma direncinin (CSR) hesaplanması için efektif gerilmeye göre düzeltişmiş V_s'nin (V_{s1}) kullanılması fikridir. V_{s1} Eş. 8'e göre (Robertson vd., 1992), CRR ise Eş. 9'a göre hesaplanabilmektedir (Andrus ve Stokoe, 2000). Burada V^*_{s1} sıvılaşmanın oluşabileceği en büyük V_s değerinin sınırıdır. α ve b parametreleri eğriye uygun parametreler olup zeminin ince dane içeriğine göre belirlenmektedir.

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{(P_a)}{\sigma'_v}\right)^{0.25} \quad (8)$$

$$CRR = \left\{a \frac{{V_{s1}}^2}{100} + b \left(\frac{1}{V^*_{s1} - V_{s1}} - \frac{1}{V^*_{s1}}\right)\right\} MSF \quad (9)$$

$$V^*_{s1} = 215\ m/sn\ için\ FC \leq 5\% \quad (10a)$$

$$V^*_{s1} = 215 - 0.5(FC - 5)\ m/sn\ için\ 5\% < FC < 35\% \quad (10b)$$

$$V^*_{s1} = 200\ m/sn\ için\ FC \geq 35\% \quad (10c)$$

2.3. Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (I_L) ve Sıvılaşma Riski İndeksi (I_R)

Basitleştirilmiş sıvılaşma analizi yöntemleri zeminin sıvılaşmaya yatkınlığını belirli bir derinlik için değerlendirir ancak sıvılaşmadan kaynaklanabilecek yer yüzeyindeki hasar postansiyeli ile daha ilişkili olan sıvılaşma şiddetini tahmin etmezler (Maurer vd., 2014). Ishihara (1985) sıvılaşmaya bağlı yüzey yenilmesi potansiyelinin, sıvılaşmış zemin katmanları ile sıvılaşmamış zemin katmanlarının kalınlıkları ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Eğer bir sahada sıvılaşmış bir zemin tabakasının üstünde yer alan sıvılaşmamış ince bir zemin tabakası varsa yüzey yenilmesi oluşabilecektir. Bu zemin tabakasının kalınlığı, en büyük yatay yer ivmesine bağlı bir eşik değerden fazla ise yüzey yenilmesi meydana gelmeyecektir. Iwasaki vd. (1982) yüzey yenilmesi riskini değerlendirmek için sıvılaşma potansiyeli indeksi (I_L) olarak tanımladıkları, Eş. 11'deki şekilde hesaplanan bağıntıyı önermişlerdir. Eşitlikte F_1, sıvılaşma analizindeki sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısına (FS) bağlı, $W(z)$ ise derinliğe bağlı bir fonksiyondur.

$$I_L = \sum_0^{20} F_1 W(z) dz \quad (11)$$

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad (12)$$

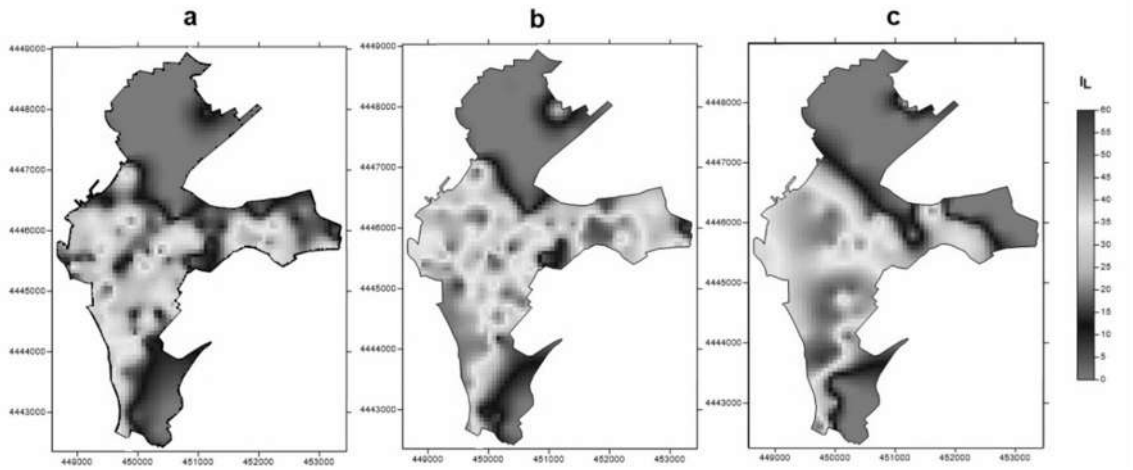
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Iwasaki vd. (1982)'ne göre hesaplanan I_L değerinin sıvılaşmaya bağlı yüzey yenilmesi riski açısından değerlendirilmesi Çizelge 1'e göre yapılabilmektedir.

Çizelge 1. Sıvılaşma potansiyeli indeksi (I_L)

I_L	Sıvılaşmaya Bağlı Yüzey Yenilmesi Riski
$I_L = 0$	Çok düşük
$0 < I_L \leq 5$	Düşük
$5 < I_L \leq 15$	Yüksek
$I_L > 15$	Çok Yüksek

Çizelge 1'e göre her sondaj ve MASW ölçüm noktokası için belirlenen I_L değerlerinin dağılımını görebilmek amacı ile sonuçlar haritanmıştır (Şekil 3). Sıvılaşma potansiyeli indeksi (I_L) araştırma derinliği içerisinde her analiz seviyesinde FS değerine bağlı olarak hesaplanmakta ve sadece FS <1 olduğu durumları kapsamaktadır. Farklı sıvılaşma analizi yaklaşımlarından elde edilen FS değerleri farklı anlamlar içerebilmekte ve buna ek olarak sıvılaşma potansiyeli FS ile doğrulu orantılı değil sıvılaşma olasılığı ile doğru orantılıdır (Lee vd., 2004). Bu nedenle sıvılaşma olasılığını da içeren sıvılaşma risk indeksi (I_R) tanımlanmıştır ve Eş. 13 ile hesaplanabilmektedir.



Şekil 3. a) SPT-N %45 enerji oranına, b) SPT-N %60 enerji oranına ve c) V_s ile hesaplanmış sıvılaşma potansiyeli indeksi

$$I_R = \sum_0^{20} P_L W(z) dz \tag{13}$$

Burada; P_L sıvılaşma olasılığıdır ve Eş. 14 ile hesaplanmaktadır.

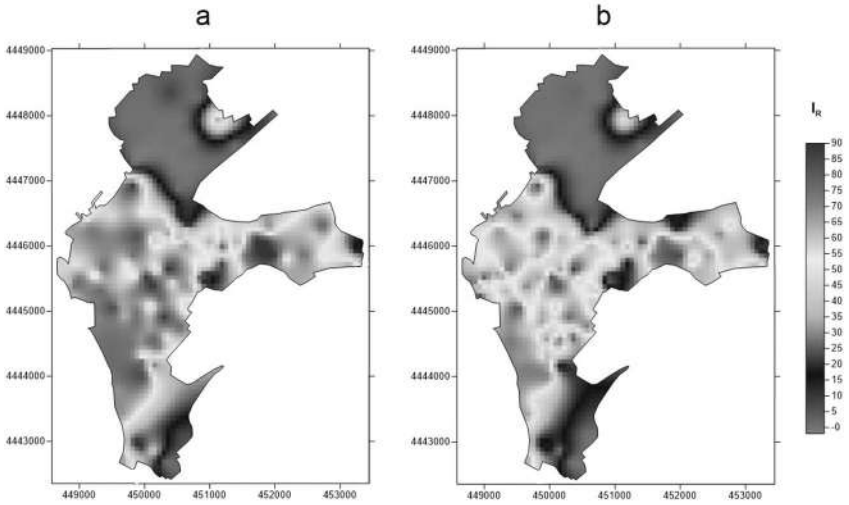
$$P_L = \frac{1}{1+(FS/0.96)^{4.5}} \tag{14}$$

Hesaplanan I_R değerinin sıvılaşmaya bağlı yüzey yenilmesi riski açısından değerlendirilmesi I_L'ye benzer bir şekilde Çizelge 2'ye göre yapılabilmektedir.

Çizelge 2. Sıvılaşma riski indeksi (I_R)

I_R	*Sıvılaşmaya Bağlı Yüzey Yenilmesi Riski*
$I_R < 20$	*Düşük*
$20 < I_R \leq 30$	*Yüksek*
$30 \leq I_R$	*Çok Yüksek*

Çizelge 2'ye göre her sondaj noktası için belirlenen I_R değerlerinin dağılımını görebilmek amacı ile sonuçlar haritanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. a) %45 enerji oranına göre, b) %60 enerji oranına göre hesaplanmış sıvılaşma riski indeksi

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Çanakkale şehir merkezinde SPT-N'ye bağlı sıvılaşma risk haritaları oluşturulmuş ve SPT-N sayılarını kritik bir şekilde etkileyen C_E katsayısının özellikle sıvılaşma analizlerine olan etkisi araştırılmıştır. AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından deprem tekrarlama periyodu 475 yıl seçilerek, ortalama pik yatay ivme (a_{max}) 0.3 g olarak belirlenmiş ve çalışma alanı çevresinde yer alan Saroz-Gaziköy fayı, Yenice-Gönen fayı ve Edremit fayları için üretebileceği deprem büyüklüğü Mw=7.5 seçilmiştir. Analiz sonuçları ve özellikle orta sıkı–sıkı arasında geçişli olarak yerleşmiş kumlu zeminlerde C_E'nin sonuçlara ciddi bir etkisi olduğu görülmektedir. Gevşek–orta sıkı yerleşimli kumlu zeminlerde sıvılaşmaya bağlı yüzey yenilmesinin mertebesinin tayini ve hacimsel deformasyonların ölçüsü bakımından farklar oluştuğu görülmektedir. Örneğin, harita incelendiğinde bazı noktalarda sıvılaşmaya bağlı yüzey hasarı beklenmezken aynı noktada yüksek hasar potansiyeli beklentisi olabilmektedir. C_E'nin deney sırasında ölçülmesi ile bu belirsizliğin önüne geçilmesi büyük oranda mümkün olmasına karşın arazi uygulamalarında ne yazık ki neredeyse hiç karşılaşılmamaktadır. Bu nedenle zeminlerin sıvılaşma analizinin yapılabileceği diğer bir parametre olan V_s ile değerlendirme yapılmış ve elde edilen sonuçların SPT-N ile yapılan analizlerdekine benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Yüzey sismiği ile elde edilen V_s ölçümlerinde numune almanın mümkün olmaması sebebi ile yine sondaj kuyusuna ihtiyaç duyulmaktadır. SPT-N ve V_s verileri ile ayrı ayrı yapılacak analizler, her iki yöntemden kaynaklanan eksiklikleri azaltabileceği ve kontrol amacı ile de kullanılabileceği düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

Andrus, R.D., Stokoe II, K.H., 2000. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 126 (11), 1015–1025.

Anbazhagan, P., Ayush, a., Prakash, D., 2016. Effect of energy efficiency of hammer on liquefaction potentİal of soil. Indian Geotechnical Conference IGC2016.

Büyüksaraç, A., Tunusluoğlu, C., Bekler, T., Yalçıner C.Ç., Karaca, Ö., Ekinci, Y.L., Demirci, A., Dinç, Ş.Ö., 2013. Çanakkale Belediyesi İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Projesi. Çanakkale.

Howie, J. A., Daniel, C.R., Jackson, R.S., and, Walker, B.. 2003. Comparison of energy measurement methods in the standard penetration test. technical report, U.S.: The University of British Columbia

Idriss, I.M., Boulanger, R.W., 2004. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proceedings, the 3rd International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE), pp. 32–56. Stallion Press, Singapore.

Ishihara, K., Yasuda S., 1972. Sand Liquefaction Due to Irregular Excitation, Soils and Foundations, 12 (4), 65-77.

Ishihara, K., 1985. Stability of natural deposits during earthquakes. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 321–376.

Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K., 1982. Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, UK, 925–939.

Lee, D.H., Ku, C.S., Yuan, H., 2004. A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan. Engineering Geology 71, 97–117.

Maurer, B.W., Green, R.A., Cubrinovski M., B. Bradley, A., 2014. Evaluation of the liquefaction potential index for assessing liquefaction hazard in Christchurch, New Zealand J. Geotechn. Geoenviron. Eng., 140 (7), p. 04014032

Robertson, P.K., Woeller, D.J., Finn, W.D.L., 1992. Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading. Can. Geotech. J. Ottawa 29, 686–695.

Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal 35 (3), 442–459.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 97, 1249–1273.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. earthquake Engineering Research Institute Berkeley, California.

Seed, H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., Chung R., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111, 12, 1425-1445.

Tokimatsu K., Nakamura K., 1986. A liquefaction test without membrane penetration effects, Soils and Foundations, 26, 4, 127-138.

Tsuchida, H., 1970. Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. Seminar in the Port and Harbor Research Institute, 3.1- 3.33.

Tunusluoglu, M.C., Karaca, O., 2018. Liquefaction severity mapping based on SPT data: a case study in Canakkale city (NW Turkey). Environmental Earth Sciences , 77-422

Uyanık, O., Taktak, A.G., 2009. A new method for liquefaction analysis from shear wave velocity and predominant resonance period. Süleyman Demirel Univ. J. Nat. Appl. Sci. 13 (1), 74–81.

Uyanık, O., 2020. Soil liquefaction analysis based on soil and earthquake parameters. Journal of Applied Geophysics, 176, 104004.

Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of rayleigh waves, Geophysics 64-3, 691-700

Youd, T., Perkins, D., 1978. Mapping liquefaction-induced ground failure potential. ASCE J Geotech Eng Div. 104. 433-446. 10.1061/AJGEB6.0000612.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe II, K.H., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 127, 817–833.

Youd, T., Carter, B., 2005. Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 131. 10.1061/(ASCE)1090-0241131:7(811).

Elektrokinetik Yöntemde Kullanılan Elektrotlarda Arıtma Etkinliği ve Tahribat Düzeylerinin Karşılaştırılması

Comparison of removal Efficiency and Destruction Level in Electrodes Used in Electrokinetic Method

B. Özentürk[1], Ö. Karaca[2,*], E.U. Ulugergerli[3]

[1] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitütsü, Jeoloji Mühendisliği ABD
[2] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye
[3] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye
*(*oznurkaraca@comu.edu.tr)*

ÖZ: Artan nüfusa bağlı olarak yükselen tarım kökenli gıda talebinin karşılanmasında ortaya çıkan çevre sorunlarından bazıları izleyen biçimde sıralanabilir; verimliliği arttırmak için aşırı kimyasal (gübre vb) kullanımı, aşırı sulama ve kıyı bölgelerinde aşırı yeraltı suyu çekimi nedeniyle deniz suyu girişimi. Bu nedenlerle aralarında Türkiye'nin de bulunduğu birçok ülkede özellikle yarı kurak bölgelerde hem tarımsal verimin düşmesi hem de ağır metal yığışması içeren gıda ürünlerine bağlı sağlık sorunlarını beraberinde getirmektedir. Kirliliklerin arıtımı üzerine pek çok yöntem bulunmakla birlikte elektrokinetik yöntem uygulamasında daha hızlı sonuçlar alınmaktadır. Çalışmada, Çanakkale ili, Dardanos Mahallesi'nden alınan tuzlu toprakların elektrokinetik arıtım yöntemiyle iyileştirilmesi çalışmasında çeşitli elektrotların kullanılabilirliği denenmiştir. Çalışma alanından alınan siltli tarım toprağının pH değeri 8.33, elektriksel iletkenliği (EC) 1282 µs/cm ve NaCl eşdeğeri %0.45'tir. Deneylerde plastik kap içerisine ikişerli üç sıra elektrot yerleştirilmiştir. Elektrot türüne göre bakırda %13.5 galvaniz kaplı çelik %19.4 ve alüminyum levhada %44 oranında elektriksel iletkenlikte düşme gözlenmiş, ancak tüm elektrotlarda tahrip edici bir korozyon meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tuzlu toprak, kirlilik, elektrokinetik iyileştirme, elektrot, korozyon

ABSTRACT: *Some of the environmental problems that arise in meeting the increasing demand for agricultural-based food due to the increasing population can be outlined as excessive usage of chemicals (fertilizers, etc.) to increase productivity, Over-irrigation, and saltwater intrusion due to uncontrolled pumping out of groundwater in coastal areas. For these reasons, in many countries including Turkey, particularly on semi-arid regions, bring about both the decline in agricultural productivity and health problems related to food products containing the heavy metal accumulation. Although there are many methods on the treatment of polution, faster results are obtained in the application of the electrokinetic method. In the study, for the electrokinetic treatment method, the usability of various electrodes was tested to remove salinity from the soil samples taken from Dardanos District of Çanakkale province. The sample taken from the study area is silty agricultural soil. Its pH value is 8.33, electrical conductivity (EC) is 1282 µs / cm and NaCl equivalent is 0.45%.In the experiments, three rows of electrode pairs were placed in the plastic container. Electrical conductivity variations depending on the type of electrode were as follows; 13.5% in copper, 19.4% in galvanized steel and 44% in aluminum plate, yet a destructive corrosion occurred in all electrodes.*

Keywords: *Salinity soil, pollution, electrokinetic remediation, electrode, corosion*

1. GİRİŞ

Doğal dengenin bozulmasıyla birlikte meydana gelen iklim değişiklikleri kurak dönemlerin artmasına neden olmuştur. Küresel boyuttaki bu değişim tüm canlıları olumsuz yönde etkilerken tarım alanlarında ise kuraklık ve tuzluluk sorunlarını tetiklemektedir. Özellikle kurak ve yarı kurak iklimin etkin olduğu drenaj problemlerinin sık görüldüğü bölgelerdeki tarım arazilerinde, toprak tuzluluğu sorunları göze çarpmaktadır. Artan nüfusun tetiklediği gıda ihtiyacı dikkatlerin tarım alanlarına çevrilmesine neden olmuştur. Bu alanlarda gereğinden fazla veya yanlış gübre ve su kullanımları, tarım ilaçları ve denize

yakın olan bölgelerden aşırı su çekimleri, dolayısıyla topraklarda tuzluluğa neden olmaktadır. Bu durum topraktaki mineral dengenin bozulmasına, arazinin verimsizleşmesine ve bitkilerin gelişmesinde olumsuzluklara neden olarak mahsul veriminde düşüşe neden olabilmektedir. Tarımsal faaliyetlerden dolayı tuzluluk sorununun yaşandığı ülkeler arasında ABD, Kanada, Tayland, Güney Afrika, Hindistan ve Türkiye yer almaktadır (Pannell ve Ewing, 2006). Son yapılan araştırmalar, bu tehlikenin endişe verici boyutunu öngörmektedir. 2050'de dünyanın ekilebilir verimli alanlarının % 50'ye yakınının tuzluluktan ciddi şekilde etkileneceği vurgulanmaktadır (Shrivastava ve Kumar 2015; Machado ve Serralheiro 2017). Toprak tuzluluğunda en yaygın görülen ve içerdikleri miktara göre toksik kabul edilen tuzlar sodyum (Na^+), klorür (Cl^-), nitrat (NO^{3-}), sülfat (SO_4^{2-}), kalsiyum (Ca^{2+}), potasyum (K^+) ve magnezyumdur (Mg^{2+}) (Simmons, 2012; Bessaim vd., 2020). Tarım alanlarındaki etkisinin yanında gözenekli ortam içindeki yüksek oranda serbest tuz türleri, toprak erozyonuna, geçirgenliğin azalmasına, zayıf taşıma kapasitesine, düşük kesme mukavemetine ve yüzey kabuklanmasına yol açarak katı matrisin yapısı üzerinde zararlı etkilere neden olmaktadır (Jayasekera ve Hall, 2007). Tuzlu topraklar üzerine inşa edilen yapılar ve otoyollar için yapılan çalışmalar; bu topraklarda çatlama, çukur oluşumu, stabilizasyon ve mukavemet gibi farklı jeoteknik sorunlara da neden olduğunu göstermektedir (Kim vd., 2010; Ziaie-Moayed vd., 2011).

Topraktaki kirleticilerin arıtımı üzerine; kirli toprağın yer değiştirmesi, kontrollü sulama, kimyasal iyileştirme yöntemleri ve halofitik bitkilerin yetiştirilmesi gibi pek çok yöntem geliştirilmiştir (Choi vd., 2016). Fakat bu klasik yöntemler genellikle daha pahalıdır ve iyileştirme üzerinde daha az etkili olmaktadır. Bu yöntemler sadece yüzeysel tuzları ortadan kaldırarak toksik tuzların çoğunu toprak ortamına hapsetmektedir (Choi vd., 2012). Elektrokinetik iyileştirme (Electrokinetic Remediation-EKR), bu zorlukların üstesinden gelebilecek yenilikçi, düşük maliyetli ve çevre dostu bir tekniktir (Reddy ve Cameselle, 2009; Figueroa vd., 2016; Vizcaíno vd., 2018). Farklı ortamlardaki (su ya da toprak) organik ve inorganik olmak üzere farklı kirleticilerin iyileştirilmesinde kullanılabilmektedir (Reddy ve Cameselle, 2009; Karaca vd., 2017; Cameselle ve Gouveia, 2018; Karaca vd., 2019). Toprak içerisine yerleştirilen elektrotlara düşük voltajda doğru akım verilmesi ilkesine dayanan bu yöntemde kirleticiler iyon yüklerine göre elektrotlara doğru hareket ederler. Kirleticiler elektromigrasyon (yüklü iyonların halindeki hareket), elektroforez (yüklü parçalar halindeki hareket) ve elektroozmoz (anottan katota suyun hareketi) ile taşınmaktadır. Arıtım esnasında yükseltgenme-indirgenme, çözünme ve çökelme tepkimeleri meydana gelmektedir (Nasim vd., 2012). Baskın reaksiyon ise suyun elektrolizidir (Virkuyte vd., 2002). Doğru akımın uygulanmasından dolayı elektrolize bağlı olarak oksijen gazı ve hidrojen iyonları anot tarafında üretilirken katot bölgesinde hidrojen gazı ve hidroksit iyonları üretilmektedir (Chung ve Kang, 1999). Bu durum anotta pH'ın düşüşüne katotta ise yükselmesine neden olmaktadır. Yöntemin uygulanması sırasında elektrokimyasal reaksiyonlar elektrotlarda korozyona neden olabilmektedir. Bu durum arıtım oranını düşürürken elektrik direncini artırmaktadır (Mendez vd., 2012).

Çalışma alanı olan Çanakkale Dardanos Mevkii'nden alınan tuzlu toprak örnekleri üzerinde, elektrokinetik yöntemle çeşitli elektrotların kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapılmıştır. Her bir testte altı adet elektrota sabit doğru akım uygulanmıştır. Yapılan deneylerin sonunda, kullanılan elektrot çeşitlerinde hasar meydana gelmiştir.

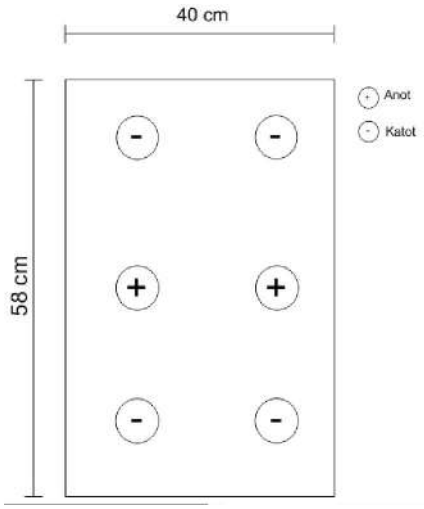
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma alanından alınan toprak örneğinin zemin sınıfı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (Unified Soil Classification System-USCS) göre belirlenmiştir. Ayrıca örneğin nem içeriği, pH değeri, elektrik iletkenliği (EC) ve tuzluluk (NaCl eşdeğeri) değerleri belirlenmiştir (Çizelge 1). Bu bölgede yapılan önceki çalışmada tuz iyonlarının konsantrasyonları belirlenmiştir. Buna göre zararlı olduğu düşünülen katyonlar arasında, Ca^{2+} konsantrasyonu en yüksek (60.300 mg/kg) olup bunu sırasıyla Mg^{2+} (16.000 mg/kg), K^+ (13.800 mg/kg) ve Na^+ iyonları (12.600 mg/kg) takip etmiştir. Anyonik tuz kontaminantlarının konsantrasyonları da Cl^- ve SO_4^{2-} iyonları için sırasıyla 674 ve 118 mg/kg idi (Bessaim vd., 2020).

Çizelge 1. Çalışma bölgesinden alınan örneğin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

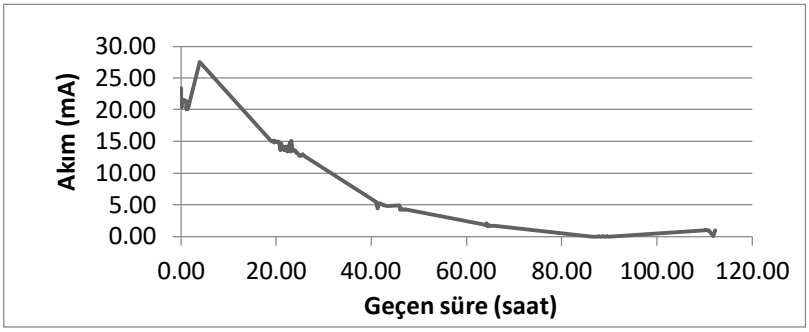
Zemin Sınıfı (USCS)	Su Muhtevası (%)	pH	Elektrik iletkenliği (EC) µs/cm	Tuzluluk (NaCl eşdeğeri) %
CL	19.28	8.33	1282	0.45

Elektrotlar, elektrolitler ve akım yoğunluğu gibi parametreler, elektrokinetik iyileştirmenin verimliliğini etkilemektedir. Bu araştırma kapsamında, çalışma alanındaki topraklardaki tuzların giderimi için elektrokinetik deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında, arazi uygulamasına göre ölçeklendirilmiş bir örnek oluşturması için 40x58x15 cm boyutlarında plastik bir kap kullanılmıştır (Şekil 1). Bu yöntemde kullanılabilecek elektrotların uygunluğunu araştırmak için çalışma boyunca bakır elektrot (160 mm uzunluğunda ve 0.5 mm çapında), galvaniz çelik elektrot (58 mm uzunluğunda 1.5 mm çapında) ve alüminyum levhalar (92 mm x 65 mm x 1 mm boyutlarında) kullanılmıştır (Şekil 5). Elektrotların dizilimi çift sıra halinde katot-anot-katot olarak düzenlenmiştir (Şekil 1).

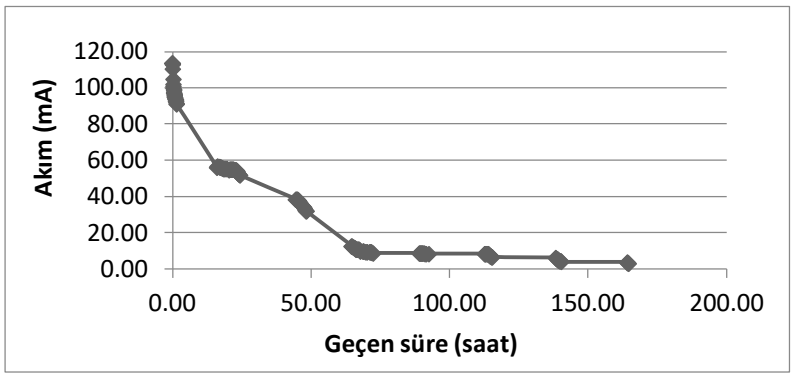


Şekil 1. Deneylerin tamamında kullanılan elektrot dizilimi.

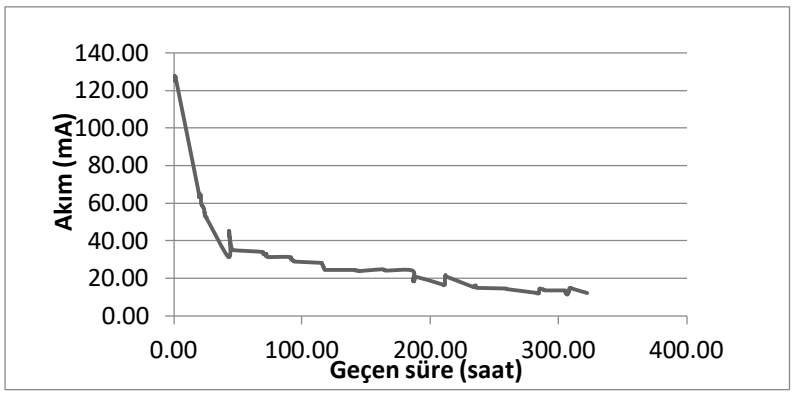
Deneyler anot-katot arasındaki mesafe dikkate alınarak 1 VDC/cm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bakır elektrotlar ile yapılan çalışmada anot-katot arası mesafe 11.6 cm olduğu için 11.6 V uygulanmıştır. Anot- anot ve katot-katot arası mesafe ise 13 cm'dir. Deney süresi boyunca ölçülen akım değerleri zamanla azalmıştır. İyonların toprak içinde yer değiştirmesi ve elektrotlar etrafında toplanmasına bağlı olarak akım değerleri sıfıra yaklaştığında ise deney sonlandırılmıştır. Örnek olarak bakır elektrotlarla yapılan deneyde, akımın ölçülemeyecek değerlere inmesiyle 6. gün sonunda deney tamamlanmıştır (Şekil 2). Galvanizli çelik elektrot ile yapılan deneyde 10 V sabit akım altında 8. gün (Şekil 3), alüminyum levha ile 19 V akım uygulanarak 15. gün deneyler sonlandırılmıştır (Şekil 4). Grafiklerde görülen elektrik akımı profilleri toprağın, akımı iletmek için önemli miktarda iyon içerdiğini göstermektedir. Ancak deney boyunca bu iyonlar anoda veya katoda doğru taşındığından elektrik akımının da azaldığı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2. Bakır elektrotla yapılan çalışmada akım ve geçen sürenin ilişkilendirilmesi.



Şekil 3. Galvanizli çelik elektrotla yapılan çalışmada akım ve geçen sürenin ilişkilendirilmesi.



Şekil 4. Alüminyum plakayla yapılan çalışmada akım ve geçen sürenin ilişkilendirilmesi.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

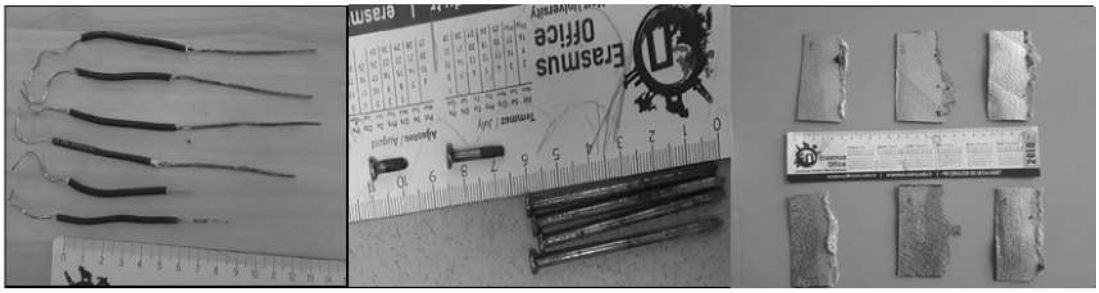
Toprak içerisinde Cl^-, NaO_3^-, SO^{-2}_4 anyonları ile Ca^{2+}, K^+, Na^+ ve Mg^+'dan oluşan katyonlar bileşik oluşturarak tuzluluğa neden olurlar (Kim vd., 2011). Kirleticiler elektrik alanı içerisinde iyon yüklerine göre anot veya katot etrafında birikirler. Anot çevresinde kalsiyum iyonu üretimi tuzluluğun artışına katottaki kalsiyum hidroksit çökelimi nedeniyle bu değerin düşüşüne neden olmaktadır (Jayasekera ve Hall, 2007). Aynı zamanda anottaki sodyum iyonu üretimiyle ilişkili olarak katotta elektriksel iletkenlik (EC) azalmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, tuzluluğun (NaCl eşdeğeri) anot bölgesinde yoğun ve EC değerinin de yüksek olduğu görülmüştür (Çizelge 2).

Çizelge 2. Arıtım sonrası toprağın nem (%), pH, EC (µs/cm) ve tuzluluk (%) değerleri.

Test sonrası (ortalama)	Bakır elektrot		Galvanize çelik elektrot		Alüminyum levha	
	Anot	Katot	Anot	Katot	Anot	Katot
Nem oranı (%)	13.62	17.21	14.28	16.69	12.97	24.58
pH	6.21	9.50	6.53	8.59	6.40	9.78
EC (µS/cm)	328	146	320	178	4050	540
Tuzluluk (%)	0.5	0.2	0.5	0.3	2.8	0.1

Elektrotlardaki pH farklılıkları suyun elektroliziyle ilgilidir. Anotta üretilen oksijen ve hidrojen iyonları bu bölgede asidik, katotta üretilen hidrojen ve hidroksit iyonları bazik bir ortam oluşturur. Bir diğer

ifadeyle anot bölgesinde pH değeri düşük katot bölgesinde yüksektir. Aynı zamanda suyun elektroliziyle ilişkili olarak topraktaki nem içeriği farklılığı açıklanabilir. Benzer bir durum suyun oksidasyonuyla anotlardaki korozyona atfedilebilir (Barker vd., 2004). Bunun yanında arıtım sırasındaki diğer elektrokimyasal reaksiyonların da etkili olabileceği söylenebilir. Yapılan çalışmada tuzluluk giderimi sağlanmış olmasına rağmen elektrotlarda korozyona neden olmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Sırasıyla deforme olan bakır, galvanize çelik ve alüminyum plaka elektrotlar.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, genel olarak EC değerlerinde düşme elde edilmiştir. Buna karşılık aşırı elektrot tahribatı oluşmuştur. Elektrokinetik üzerine yapılan benzer arıtım çalışmalarındaki elektrot korozyonları toprak kirliliği olarak nitelendilirken bazı çalışmacılar bu durumun azımsanacak nitelikte olduğunu belirtmişlerdir. Bununla ilgili bir başka sorun ise yöntemin temelini oluşturan elektrik akımı aktarımında kesikliklere neden olmasıdır. Bu durumun sonucunda ise arıtımdaki verimlilik düşmektedir. Tüm bu problemlere yönelik çözümlerden biri dışarıdan ekstra çözeltilerin eklenmesidir. Özellikle metal arıtımında etkili olan bu yöntem kirleticilerin çözünmelerine ve daha fazla arıtımın elde edilmesinde etkilidir. Aynı zamanda bu şekilde pH değerlerinin dengelenmesi ve korozyonun kısmen de olsa azaltılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Bir diğer çözüm ise sabit doğru akım uygulaması yerine darbeli akımın uygulanmasıdır. Deney sırasında belirli aralıklarla kesintiye uğratılan elektrik akımı darbeli akım olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntemle yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda arıtımda kısmen düşüşün olduğu belirtilse de elektrotların daha az hasara uğradığı açıklanmıştır.

4. SONUÇLAR

Tuzlu topraklar, biyolojik çeşitliliği, insan sağlığını ve inşaat mühendisliği altyapısını etkileyen kritik çevresel bir sorundur. Bu çalışmada, organik ve/veya inorganik kirleticilerle kirlenmiş olan toprakların elektrokinetik yöntemle iyileştirilmesinde kullanılan elektrotların arıtma etkinliği incelenmiş, aynı zamanda deney sırasında oluşan ve bu yöntemin önemli problemlerinden biri olan korozyon düzeyleri araştırılmıştır. Bu amaçla bakır, galvanize çelik ve alüminyum plaka olmak üzere üç farklı elektrot denenmiştir. Deneyler tuzlu topraklar üzerinde gerçekleştirilmiş olup deney süresince topraklara 1 V/cm doğru akım uygulanmıştır.

Elektrokinetik iyileştirme sonrasında üç deneyde de toprakların pH değerleri anotta hafifçe düşmüş ve katotta artmıştır. Yine tüm deneylerde elektrokinetik yöntemle iyonların uzaklaştırılmasına bağlı olarak EC'de net bir düşüş gözlenmiş ancak, kaydedilen alkali pH nedeniyle katot bölgesindeki düşüş daha dikkat çekicidir. Çalışmadaki pH değerleri göz önüne alındığında ve oluşan tahribat nedeniyle tercih edilen elektrotların arıtım için uygun olmadığı söylenebilir. Tahribatı azaltmak için korozyon önleyici ve güçlendirici katkı maddelerinin kullanılmasının yanında, akım uygulama tekniğinin değiştirilmesi ya da aşınmaya karşı dayanıklı elektrot türlerinin kullanılması gibi farklı yöntemler uygulanabilir.

5. KAYNAKLAR

Barker, J.E., Rogers, C.D.F., Boardman, D.I., Peterson, J., 2004. Electrokinetic stabilisation: an overview and case study. Ground Improvement, 8(2),47-58.

Bessaim, M.M., Karaca, Ö., Missoum, H., Bendani, K., Laredj, N. ve Bekkouche, M.S., 2020. Effect of imposed electrical gradient on removal of toxic salt contaminants from alkali-saline low permeable soil during electrokinetic remediation. Arabian Journal of Geosciences, 13, 1-12. Doi: 10.1007/s12517-020-05654-7.

Cameselle, C., Gouveia, S., 2018. Electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils. Current Opinion in Electrochemistry, 11, 41-47.

Choi, J.H., Lee, Y.J., Lee, H.G., Ha, T.H., Bae, J.H. 2012. Removal characteristics of salts of greenhouse in field test by in situ electrokinetic process. Electrochim Acta 86:63–71.

Choi, J.H., Lee, Y.J., Maruthamuthu, S., Lee, H.G., Ha, T.H., 2016. Restoration of saline greenhouse soil and its effect on crop's growth through in situ field-scale electrokinetic technology. Seperation Science Technology 51(7):1227–1237.

Chung, H.I., Kang, B.H., 1999. Lead removal from contaminated marine clay by electrokinetic soil decontamination. Engineering Geology, 53,139-150.

Figueroa, A., Cameselle, C., Gouveia, S., Hansen, H.K., 2016. Electrokinetic treatment of an agricultural soil contaminated with heavy metals. Journal of Environmental Science and Health, Part A 51(9):691–700.

Jayasekera, S., Hall, S., 2007. Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments. Geotech Geology Engineering 25:1–10.

Karaca, O., Cameselle, C., Reddy, K.R., 2017. Acid pond sediment and mine tailings contaminated with metals: physicochemical characterization and electrokinetic remediation. Environment Earth Science, 76, 408.

Karaca, Ö., Cameselle, C. ve Bozcu, M. (2019). Opportunities of electrokinetics for the remediation of mining sites in Biga peninsula, Turkey. Chemosphere, 227, 606-613.

Kim, K.J., Cho, J.M., Baek, K., Yang, J.S., Ko, S.H., 2010. Electrokinetic removal of chloride and sodium from tidelands. Journal of Applied Electrochemistry 40(6): 1139–1144.

Kim, G.N., Shon, D.B., Park, H.M., Lee, K.W., Chung, U.S., 2011.Development of pilot-scale electrokinetic remediation technology for uranium removal. Separation and Purfication Technology, 80, 67-72.

Mendez, E., Perez, M., Romero, O., Beltran, E.D., Castro, S., Corona, J.L., Corona, A., Cuevas, M.C., Bustos, E., 2012. Effects of electrode material on the efficiency of hydrocarbon removal by an electrokinetic remediation process. Electrochimica Acta, 86, 148-156.

Nasim, M., Erwin, O., Gary, C., 2012. Review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils. International GEOMATE, 2, 266-272.

Pannell, D.J., Ewing, M.A., 2006. Managing secondary dryland salinity: option and challenges. Agricultural Water Management, 80,41-56.

Reddy, K.R., Cameselle, C., 2009. Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater. Wiley, Hoboken.

Simmons J.A., 2012. Toxicity of major cations and anions (Na+, K+, Ca2+, Cl-, and SO4(2-)) to a macrophyte and an alga. Environmetal Toxicology Chemistry, 31(6):1370-4. doi: 10.1002/etc.1819. Epub 2012 Apr 27. PMID: 22447356.

Virkuyte, J., Sillanpaa, M., Latostenmaa, P., 2002. Electrokinetic soil remediation-critical overview. The Science of the Total Environment, 289, 97-121.

Vizcaíno, R.L., Yustres, A., Asensio, L., Saez, C., Cañizares, P., Rodrigo, M.A., Navarro, V., 2018. Enhanced electrokinetic remediation of polluted soils by anolyte pH conditioning. Chemosphere. 199: 477–485.

Ziaie-Moayed, R., Samimifar, M., Kamalzare, M., 2011. Improvement of shear strenght characteristics of saline soil using cement and polymer. International Journal of Geotechnical Engineering, 5(3), 307-314.

Jeoteknik Ölçüm ve İzleme Teknikleri / *Geotechnical Measurements and Monitoring Techniques*

Laser Scanning Technology and Its Applications in Rock Engineering

Lazer Tarama Teknolojisi ve Kaya Yapılarına Uygulanması

N. Okabe[1,*], T. Miyagi[1], K. Suzuki[2], Ö. Aydan[3]

[1]Okabe Maintenance Co., Naha, Japan
[2]Green Earth, NPO, Nishihara, Japan
[3]University of the Ryukyus, Dept. of Civil Engineering, Nishihara, Okinawa, Japan
*(*n-okabe0524@okabe-m.jp)*

ABSTRACT: Laser scanning technology is quite advanced recently, and they are now utilized for assessing the damage and size of collapses. The monitoring of rock engineering structures in long-term may also be another important field of applications of laser scanning technology. The authors have been utilizing laser scanning technology for evaluating the pre-post configurations of failed structures, tsunami boulders, and the long-term monitoring of masonry castles, bridges and tunnels. The authors explain briefly the principles of the method and several engineering applications. It is shown that this new technology could be a very powerful tool in assessing the state of man-made and natural structures as well as their short and long-term monitoring.

Keywords: *laser scanning technology, monitoring, maintenance, tsunami boulder.*

ÖZ: *Son yıllarda lazer tarama teknolojisi oldukça gelişmiş olup hasar ve yıkılma göçük gibi olguların hızlı bir şekilde belirlenmesinde yaygınca kullanılmaya başlamıştır. Yapıların uzun süreli davranışlarının izlenmesi konusu da lazer tarama teknolojisinin bir başka uygulama alanıdır. Yazarlar yapıların yenilme öncesi ve sonrası şekilleri, doğal kaya yapılar, tsunami kayaların durumu ve konumu, tarihi kaleler, tünel ve köprülerin uzun süreli davranışlarının izlenmesinde lazer tarama teknolojisini kullanmaktadır. Bu yazıda yazarlar lazer tarama teknolojisinin ana ilkeleri ve bazı uygulamaları konusunu anlatmaktadır. Bu yeni teknolojiin doğal ve insan oğlunun yaptığı yapıların durumunun belirlenmesi ve uzun süreli davranışlarının izlenmesinde oldukça yararlı bir araç olabileceği gösterilmiştir.*

Anahtar Kelimeler: *lazer tarama teknolojisi, izleme, bakım, tsunami blokları.*

1. INTRODUCTION

Laser scanning technology has become quite advanced and it has been now extensively used for assessing the geometry of structures as well as the monitoring of engineering structures. The recent applications involve three-dimensional scanning of existing or newly constructed structures. They provide digital data on the structure, which can be used for different purposes such as checking the construction geometry with designed geometry, for carrying out numerical computations for the performance under static and dynamic conditions.

The short-term and long-term monitoring of man-made structures as well as natural structures is another possibility of the utilization of laser-technology in civil engineering. Furthermore, it can be used to monitor open-pit mines and underground excavations. It is also possible to quickly evaluate excavation advances of open-pits, slopes and underground cavities and tunnels. The authors utilized laser scanning technology for evaluating the pre-post configurations of failed structures, tsunami boulders, natural and man-made slopes and the long-term monitoring of masonry castles, bridges and tunnels. The authors explain briefly the principles of the method and several applications in rock engineering. It is shown that this new technology could be a very powerful tool in rock engineering.

2. LASER TECHNOLOGY

The basic principle is based on the emission of a light signal (Laser) by a transmitter and receiving the return signal by a receiver. The scanner uses different techniques for distance calculation that distinguish

the type of instrument in the receiving phase. The distance is computed from the time elapsed between the emission of the laser and the reception of the return signal or phase shift based when the computation is carried out by comparing the phases of the output and return signals. The laser scanner devices operate by rotating a pulsed laser light at high speed and measuring reflected pulses with a sensor (Figure 1). The scanner automatically rotates around its vertical axis and an oscillating mirror moves the beam up and down. The scanner calculates the distance of a measured point together with its angular parameters. The measured points constitute a set of points called cloud points, which are used to quantify the geometry of the structure or surface in 3D. Laser scanners can be ground-based or air-borne. As they are somewhat heavy, unmanned aerial vehicles (UAV) should be capable of lifting off and scanning under stable conditions. These days unmanned helicopters for this purpose as present drones cannot handle the heavy laser scanning equipment.

(a) Ground-based (b) Hand-held (c) Air-borne

Figure 1: Views of the utilization of laser scanners in Ryukyu Archipelago

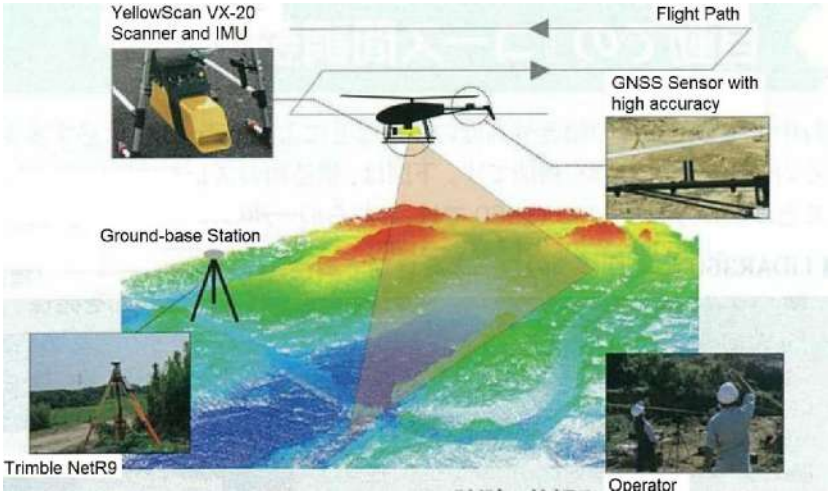


Figure 2. Principles and system of helicopter-based laser scanning.

3. UTILIZATION OF LASER TECHNOLOGY FOR UNDERGROUND STRUCTURES

As an application of laser technology for monitoring underground structures, the authors have tried to evaluate the performance of a tunnel and a large-scale arch structure in Okinawa prefecture. Figure 2 shows a digital image of the tunnel during the construction phase. As the tunnels have concrete liners at the final stage of construction, it would be quite practical to evaluate the configuration of the tunnel in a 3D digital form and check its geometrical changes every five years period. This type evaluation would provide a quick evaluation of the state of the tunnel and possible locations where some degradation of support systems may occur and some unusual fracturing or deformed configurations of the liners resulting from large deformation or fracturing of the surrounding ground may be assessed. The concept described in the previous structures could be also utilized for the maintenance and long-term deformation monitoring of rock engineering structures such as tunnels, slopes, underground power houses.

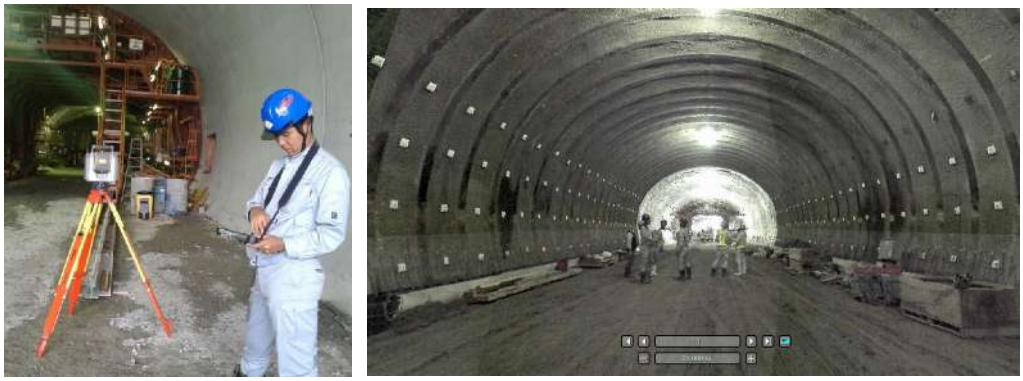


Figure 2: Laser scanner and a digital image of a tunnel under construction obtained from laser scanning.

Sometimes underground structures may be built in blocks in order to allow relatively large displacements and move independently from each other due to ground conditions (Figure 3). The evaluation of relative displacement between two reinforced concrete arch structures was implemented for the structure shown in Figure 3. This type evaluation can be useful how the blocks moved relative to each other and they can be used to evaluate the long-term relative motions between the blocks of the reinforced concrete arch structure. Furthermore, the cracking of concrete liners due to thermal contraction or other causes may occur. The high-resolution laser-scanning technology should also allow us if the crack propagation is taking place or not.

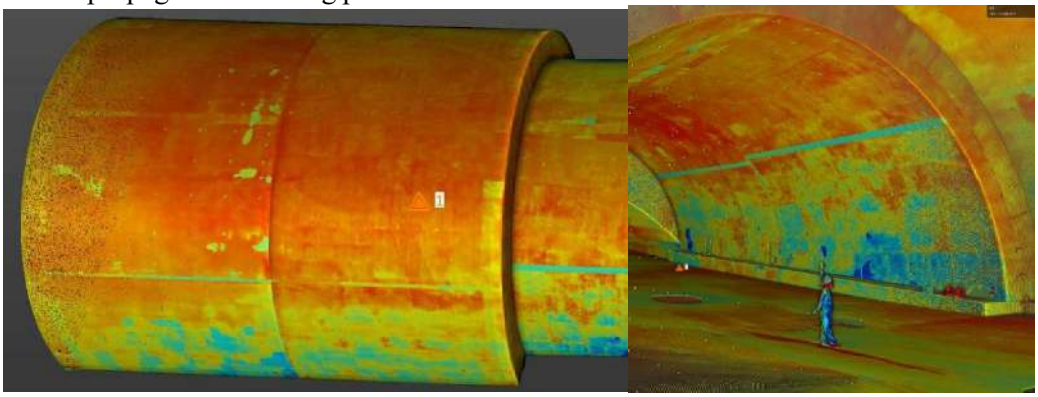
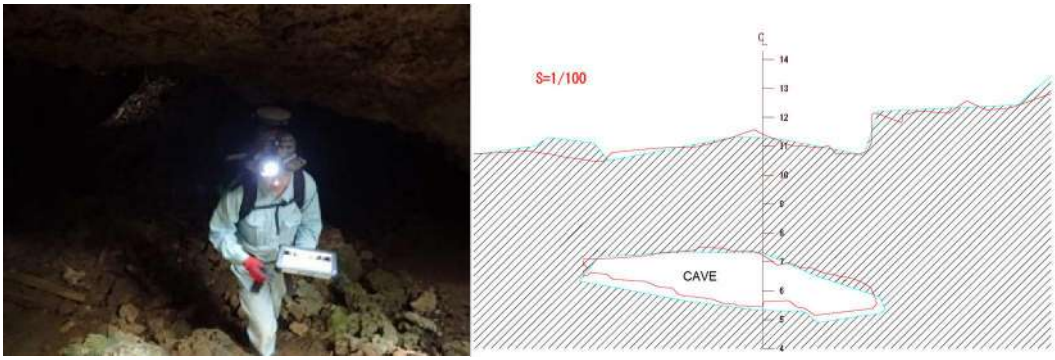


Figure 3. A 3D scanned images of an underground structure.

The measurement of the geometry of natural caves is also important for the assessment of their stability if people are allowed to visit them. There are many natural caves in Ryukyu limestone formation in Ryukyu Archipelago and some of them can be visited for touristic as well as peace-education purposes. Furthermore, some natural caves may exist beneath roadways. Figure 4 shows one example laser scanning of a natural cave in Ishigaki Island.



(a) Laser scanning (b) Scanned cross-section of the cave

Figure 4. Laser scanning of a natural cave.

4 GROUND SUBSIDENCE EVALUATION AND INTEGRATED MONITORING SYSTEM

Laser Technology together with contact type instrumentation as well as other remote sensing monitoring technologies such as SAR or DInSAR is desirable in monitoring structures for small and large movements. At one site in Okinawa Island, the laser measurements were done, and it was found that about 100 mm settlement took place since it was built in 1999. However, the settlement rate was quite high in recent years. For example, the contact type displacement was 8 mm during the period of January and December, 2019 (Figure 5).

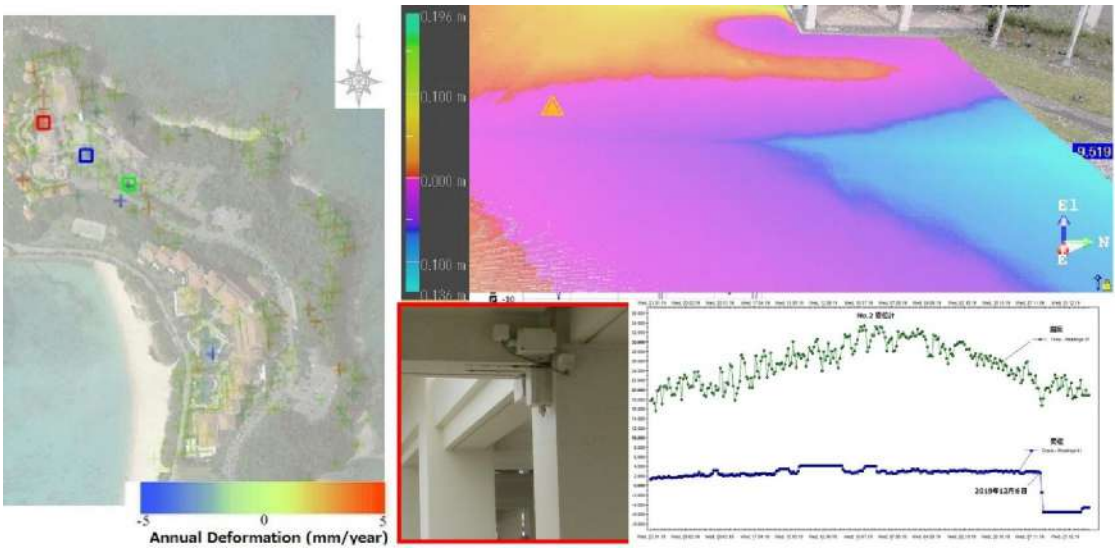


Figure 5. The integrated utilization of DInSAR, laser and contact type monitoring technologies at a settlement site (from Ito et al. 2022).

In this site, the Sentinel SAR images, laser technology and contact type monitoring were utilized in integrated manner (Figure 5; Ito et al. 2022). One of the important merits of the DInSAR technology is that there is fundamentally no necessity to install instruments at the site. At this site, the SAR images taken between the period of April, 2016 and September 2019 were utilized for settlement evaluation. As noted from this example, the integrated utilization of DInSAR, laser and contact type monitoring technologies are quite promising.

5 TSUNAMI BOULDERS AND THEIR IMPLICATIONS ON PALEO-MEGA EARTHQUAKES

There are many giant tsunami boulders in major islands of Ryukyu Archipelago (Aydan and Tokashiki, 2019; Aydan, 2018). The largest tsunami boulder in the world is probably the one in Shimoji Island near the Shimoji Airport. The quantification of the geometry and position of these boulders are of great importance to assess the paleo mega earthquake and tsunami events in a given region. Both drones based on aerial photogrammetry technique and ground and airborne laser scanning technique were used to evaluate the tsunami boulders in Okinawa Island and Shimoji Island.

As mentioned previously, there is the Shimoji Airport with a 4 km long runway near this tsunami boulder. As drones could not fly nearby the airports due to restriction, which is automatically imposed on the drones, the laser scanning technique was used. Figure 6(a) shows the actual tsunami boulder and Figure 6(b) shows the laser scanned image of the boulder from the same angle. Although the laser scanning technique can evaluate the geometry of the tsunami boulder, it is somewhat affected by the existence trees and bushes. In other words, the existence of trees and bushes disturb the digital data for a proper evaluation of the geometry of the tsunami boulders.

(a) (b)

Figure 6. (a) A view of the tsunami boulder in Shimoji Island, (b) A digital laser scanned image of the tsunami boulder in Shimoji Island.

Aydan and Tokashiki (2019) developed a method to infer the magnitude of paleo-mega earthquakes from the tsunami boulders. The data on tsunami boulders observed in Okinawa, Ishigaki Miyakojima and Shimoji Islands were utilized to infer paleo-mega earthquakes and it was compared with the results from other independent studies. It is found that mega earthquake with a magnitude greater than 9 is likely in the vicinity of Ryukyu Archipelago. The moment magnitude of mega-earthquakes estimated from the tsunami boulders may range between 8.6 to 9.7.

There are many tsunami boulders along the shore of Ishigaki Island. However, it is sometimes difficult to differentiate from those fallen boulders onto the reefs due to toe-erosion induced by sea waves. Among them, the boulder at Ohama district of Ishigaki Island at an elevated terrace is definitely upthrown over the terrace by a paleo mega-tsunami in the past (Figure 7). The situation of this tsunami boulder was also evaluated using the laser-scanning technology.

Figure 7. Aerial view of Ohama District and views of the tsunami boulder and its original location

6 THE ASSESSMENT OF GIANT ROCK FALLS IN MIYAGIJIMA

Miyagi Island is in the east of Okinawa Island and connected through bridges to the main island. The geology consists of Ryukyu limestone on top and intercalated sedimentary rocks such as sandstone, mudstone and mudstone beneath. Particularly the mudstone and sandstone layer is prone to weathering and there are many overhanging Ryukyu limestone cliffs due to differential weathering of mudstone layer (Figure 8a). Furthermore, the Miyagi Island is shaped by normal faults and it has a triangular shape in plane (Figure 8b).

(a) Differential weathering (b) Miyagi Island

Figure 8. Differential weathering and satellite view of Miyagi Island.

DInSAR analyses clearly shown that some movements along the cliff have been occurring (Ito et al. 2022). Furthermore, there are many giant rock boulders in the village of Miyagijima Island (Figure 9). The site investigation showed that there are open cracks with a separation of more than 150 cm at the crest of the cliff (Özcan et al., 2021). The estimated thickness of Ryukyu limestone formation is about 18-22 m at the site. The cracks are now mapped using a portable GPS device with a support of a RTK station in the ground of the University of the Ryukyus.

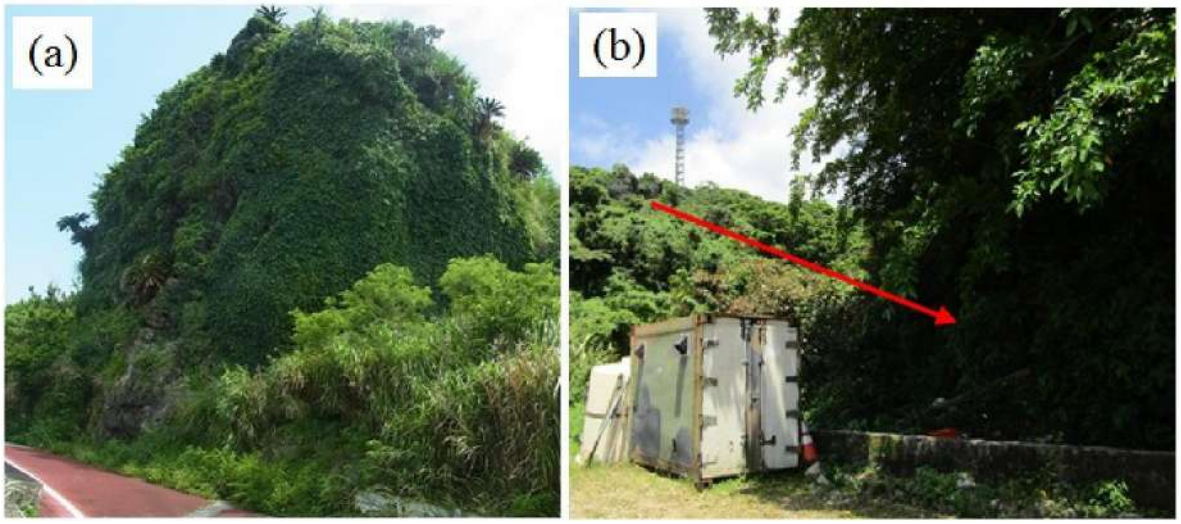


Figure 9. Views of boulders in the Miyagijima Village

Figure 10 shows a 3D and cross section of another site in Miyagijima Island, scanned by using an unmanned helicopter scanner where the enlargement of roadway is planned. As also noted from this figure, the cliff and slope beneath the limestone layer are clearly evaluated, which may be used for stability assessments.

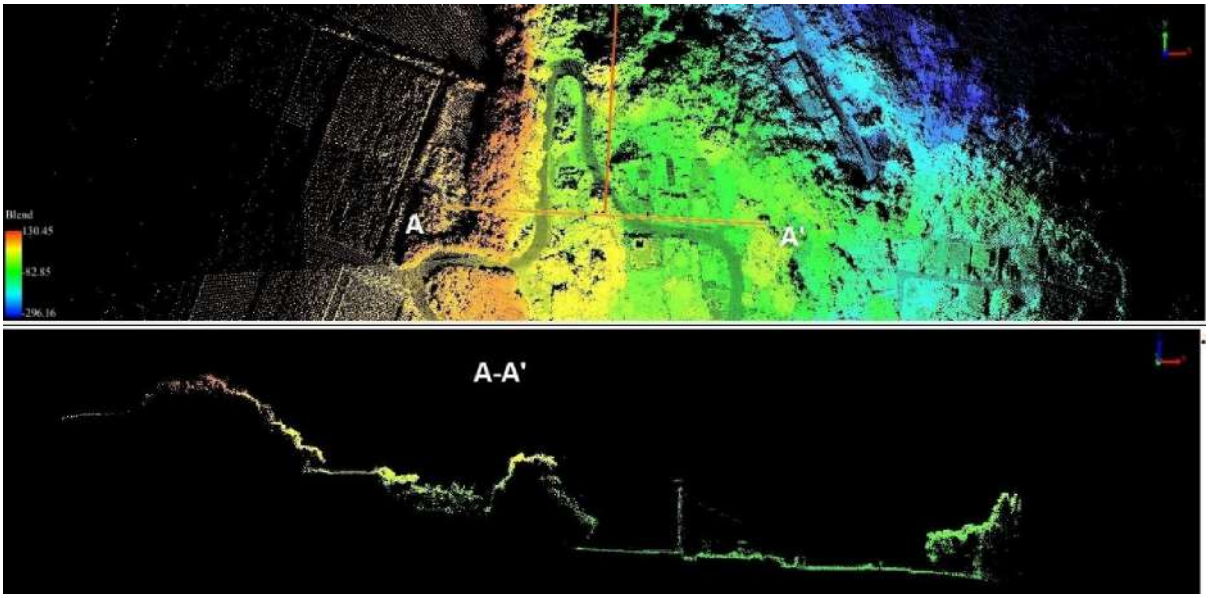


Figure 10. Image of the cliff by un-maned helicopter-based scanning device and its cross-section.

6. CONCLUSIONS

Some of the conclusions from this study concerning the utilization of DInSAR, Drone and Laser technologies in rock engineering and natural disaster management and prevention are as follow:
1) The quantitative evaluation of post-failure state of failed structures such as slopes, cliffs and masonry structures can be easily and quickly evaluated.
2) It can be easily used in locations, where the human-based measurements may be unsafe.
3) Long-term monitoring of structures is possible, and they provide better assessment and evaluation of deformation response of structures as compared with point-like measurements.

7. REFERENCES

Aydan, Ö. 2018. Some Thoughts on the Risk of Natural Disasters in Ryukyu Archipelago. International Journal of Environmental Science and Development, 9(10), 282-289.

Aydan, Ö., Tokashiki, N. 2019. Tsunami Boulders and Their Implications on the Mega Earthquake Potential along Ryukyu Archipelago, Japan. Bull. of Eng. Geol. and Env., 78, 3917–3925.

Ito, T., Aydan, Ö. Tokashiki N. 2022. DInSAR Technique and Laser Scanning Technology and Their Utilizations in Rock Engineering and Natural Disaster Management and Prevention. Journal of Research Institute for Islands and Sustainability (RIIS) (in Press).

Özcan, Tunar, N., Aydan, Ö., Murayama, Y., Horiuchi, K., Ulusay, R. 2021. A study on model experiments and numerical simulations on rockfalls and its utilization to assess the rockfall hazards in Miyagi Island (Japan) and Cappadocia (Turkey). IACMAG, Torino, 482-490.

Tokashiki, N. Aydan, Ö. (2010): The stability assessment of overhanging Ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of Rock Mass. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 66(2), 397-406.

3-Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinde TLS ve İHA ile Oluşturulan Sayısal Yüzey Modellerinin Kullanımı

Use of Digital Surface Models Generated by TLS and UAV in 3-Dimensional Rockfall Analyses

M. Akın[1,*], İ. Dinçer[1], A.Ö. Ok[2], A. Orhan[1], M.K. Akın[3], T. Topal[4]

[1] *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Kapadokya Jeolojik Miras ve Kaya Oyma Yapıları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nevşehir*
[2] *Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Ankara*
[3] *Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri*
[4] *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara*
*(*mutluhanakin@nevsehir.edu.tr)*

ÖZ: Yersel Lazer Tarama (TLS) ve İnsansız Hava Aracı (İHA) ile elde edilen belirli bir Dünya koordinat sistemindeki nokta bulutları sayısal yüzey/arazi modellerinin oluşturulmasında kullanılan iki yaygın yöntemdir. TLS yönteminde nokta bulutu verisi bir yersel lazer tarayıcı yardımıyla toplanmaktadır. İHA ölçümlerinde ise İHA platformundaki bir hava lazer tarayıcı veya yüksek çözünürlüklü RGB kameralardan elde edilen görüntülerden fotogrametrik görüntü işleme yöntemleriyle nokta bulutu verisi üretilmektedir. Bu çalışmada, Şahinefendi (Ürgüp-Nevşehir) yerleşim alanı içinde 3-boyutlu sayısal yüzey modelleri İHA ve TLS ile elde edilen yaklaşık 3 cm yersel çözünürlüklü nokta bulutlarından oluşturulmuştur. 3-boyutlu kaya düşme analizleri iki farklı sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına etki eden en önemli unsurun yerleşimi kaya düşmelerinden korumak için yapılan kaya tutma hendeği olduğu belirlenmiştir. İHA sayısal yüzey modelinde kaya tutma hendeği gözlenebilirken, TLS sayısal yüzey modeline kaya tutma hendeği aktarılamamıştır. Bu sonuçlar, farklı sayısal yüzey modelleri üzerinde gerçekleştirilen kaya düşme analizlerinden belirlenen parametreler arasında kritik seviyede farklılıklar olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, Şahinefendi köyünün yamaca yakın kesimlerinin ve köyün hemen üstünden geçen karayolunun da kaya düşme tehlikesi altında olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kaya düşmesi, sayısal yüzey modeli, İHA, TLS, nokta bulutu.

ABSTRACT: *Point clouds in a particular Earth coordinate system obtained by Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) are a couple of common methods used to create digital surface/terrain models. In TLS method, point cloud data are collected by means of a terrestrial laser scanner. In UAV measurements, point cloud data are produced by photogrammetric image processing methods from images obtained from high-resolution RGB cameras or directly by an aerial laser scanner on the UAV platform. In this study, 3-dimensional digital surface models in Şahinefendi (Ürgüp-Nevşehir) settlement area were created from 3 cm spatial resolution point clouds obtained by UAV and TLS. 3-dimensional rockfall analyses were carried out on two different digital surface models. It was determined that the most important factor affecting the results of the analyses is the rockfall catchment ditch built to protect the settlement from rockfalls. Although rockfall ditch can be observed in the UAV digital surface model, it can not be transferred to the TLS digital surface model. These results indicate that there may be critical differences between the parameters determined from the rockfall analyses performed on different digital surface models. Furthermore, it is revealed that the parts of Şahinefendi village close to the slope and the road passing just above the village are also in rockfall danger zone.*

Keywords: *Rockfall, digital surface model, UAV, TLS, point cloud.*

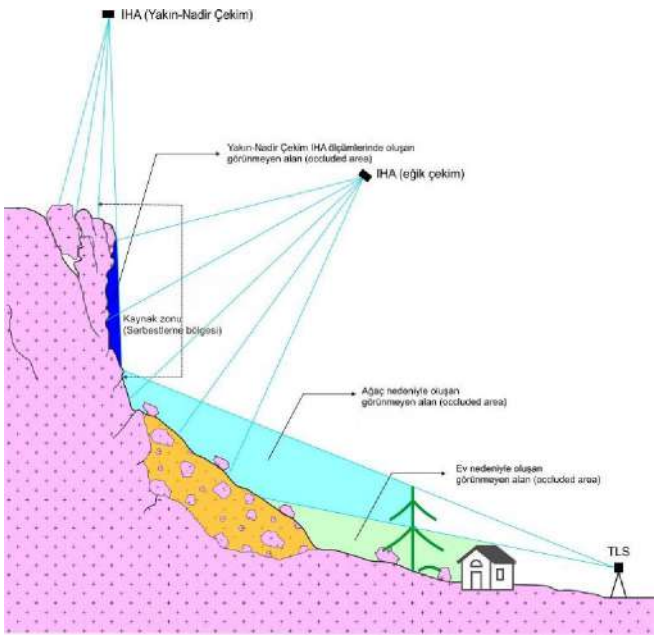
1. GİRİŞ

Kaya düşmesi modellemelerinde 3-boyutlu (3-B) analizler son yıllarda daha yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Topoğrafik düzensizlik ve blok şekli etkisinin kaya düşme yuvarlanma hattı ve hareketi üzerindeki etkisi 3-B kaya düşme simülasyonları ile oldukça gerçekçi şekilde yansıtılabilmektedir (Bonneau vd., 2019; Sala vd., 2019; Di Luzio vd., 2020, Akın vd., 2021). 3-B kaya

düşmesi modellemelerinde 3-boyutlu sayısal yüzey modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu 3-boyutlu topoğrafyanın oluşturulabilmesi için çoğu zaman farklı ölçeklerdeki (1/25000-1/1000) topoğrafik haritalardan üretilen sayısal arazi modelinden yararlanılmaktadır. Ancak, topoğrafik haritalardan elde edilen arazi modelleri, özellikle yerleşimin yoğun olduğu alanlarda arazi üzerindeki detaylarını (örn. bina, ağaç vb.) içermemektedir. Bu nedenle, 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi için detay sayısal yüzey modelleri kullanılmalıdır (Lan vd., 2010; Chen vd., 2013).

Son 20 yıl içerisinde 3-boyutlu kaya düşme analiz yazılımlarındaki gelişime paralel olarak, bu yazılımlarda kullanılacak girdi sayısal yüzey modellerinin oluşturulması için kullanılabilecek yöntemlerde de önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Buna göre, Yersel Lazer Tarama (TLS) ve İnsansız Hava Araçları (İHA) ile elde edilen belirli bir Dünya koordinat sistemindeki nokta bulutlarından hazırlanan yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modelleri 3-boyutlu kaya düşme analizleri için en önemli ve hassas yüzey verisini oluşturmaktadır. TLS yönteminde nokta bulutu verisi bir yersel lazer tarayıcı (yersel LiDAR) ile toplanırken, İHA ile yapılan uçuşlar sırasında İHA platformuna yerleştirilmiş bir hava lazer tarayıcı (hava LiDAR) yardımıyla nokta bulutları doğrudan oluşturulabilmektedir. Bununla birlikte yine İHA üzerine yerleştirilen yüksek çözünürlüklü RGB kameralardan elde edilen görüntülerden de fotogrametrik görüntü işleme yöntemleriyle incelenen sahaya ait nokta bulutu verisi başarıyla üretilebilmektedir (Chaulya ve Prasad, 2016).

TLS ve İHA yöntemleri karşılaştırıldığında birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar söz konusu olabilmektedir. Örneğin, TLS ile temin edilen nokta bulutu kümelerinde kaotik yapıya sahip, düşey yöndeki düzensizliklerin ve hendek türü yapıların olduğu sahalarda veya ağaçlık alanlarda görülemeyen zonlar (occlusion zone) oluşabilmektedir (Şekil 1). Bu durum, sayısal yüzey modelinde bazı kritik öneme sahip olabilecek bölgelerin istenilen detayda oluşturulamamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, TLS ölçümlerinde sayısal yüzey modeli üzerindeki bu hataların giderilmesi için ters açıdan veya farklı açılardan ilave ölçümlerin sağlanması gerekmektedir. Bu durum zaman ve iş gücü açısından dezavantajlar doğurmaktadır. Bunun yanında İHA ile yapılan düşey (nadir çekim) ölçümlerde dikey topoğrafya üzerindeki girintili yapılar da görülemeyen zonların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durumda İHA ile nadir çekimin yanı sıra, oblik (eğik) çekim de yapılarak bu sorun ortadan kaldırılabilmektedir (Şekil 1). İHA ile elde edilen fotogrametrik görüntülerdeki olumsuz bir durum ise güneşin konumu veya atmosferik etkiler sebebiyle görüntü işleme tekniği ile elde edilen nokta bulutlarının doğruluğunun arzu edilen kaliteye ulaşamamasıdır. TLS yöntemi dar alanlarda ve düzenli topoğrafyaya sahip arazilerde başarılı sonuç verirken, İHA hızlı ve pratik olması açısından önemli avantajlara sahiptir.



Şekil 1. TLS ve İHA ölçümlerinde engellerin oluşturduğu görülemeyen alanlar (Akın vd., 2020).

Bu çalışma kapsamında kaya düşmelerinin yoğun şekilde gözlendiği Nevşehir ilinin Ürgüp ilçesine bağlı olan Şahinefendi Köyü için 3-B kaya düşme analizleri RocPro3D yazılımı (RocPro3D, 2014) ile gerçekleştirilerek, düşebilecek kaya bloklarının ulaşabilecekleri en uzak mesafeler belirlenmiştir. 3-B kaya düşme analizleri sırasında kullanılan sayısal yüzey modellerinin elde edilmesinde hem TLS hem de İHA ile alınan yaklaşık 3 cm yersel çözünürlüğe sahip nokta bulutu verisinden faydalanılmıştır. Kaya düşme analizlerinde kullanılan geri verme katsayıları, sahada daha önceden düşen kaya bloklarının geri analizleri ile ortaya konmuştur. Kaya düşmelerinin halen gözlendiği bu sahada, yerleşimi kaya düşmelerinden korumak için kaya düşmesi kaynak zonunun alt kesiminde yaklaşık 70 cm derinliğinde, 6-8 m genişliğinde ve 750 m uzunluğunda yer yer iki sıra olmak üzere bir kaya tutma hendeği kazılmıştır. Söz konusu kaya tutma hendeği İHA ile elde edilen nokta bulutundan elde edilen sayısal yüzey modelinde net bir şekilde gözlenebilirken, TLS ile farklı noktalardan ve ters açılardan dahil olmak üzere yapılan ölçümlere rağmen sayısal yüzey modeline dahil edilememiştir. Buna bağlı olarak, iki farklı yöntemle (TLS ve İHA) elde edilen sayısal yüzey modeli üzerinde 3-B kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiş ve topoğrafik detayların sonuçlar üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANININ TANITIMI

2.1. Jeomorfolojik Yapı

Şahinefendi Köyü, geniş bir vadinin güney yamacında volkanosedimanter birimler üzerinde kurulmuştur (Şekil 2-a). Yamacın üst kotlarında bulunan ignimbiritler kaya düşmesi kaynak zonunu oluşturmaktadır. Kaynak zonundaki dik yamaç eğimine sahip ignimbiritlerin altında kumtaşı, kiltaşı, tüf ve tüfit ardalanmasından oluşan volkanosedimanter birim bulunmaktadır. Kaynak zondaki süreksizlikler boyunca ayrılan iyi derecede kaynaşmış ignimbirit blokları yaklaşık 45˚ yamaç eğimine sahip volkanosedimanter birimler üzerinde hareket ederek yerleşime kadar ulaşabilmektedir. Bununla birlikte, yerleşim yerinin hemen üzerinden geçen karayolu da kaya düşme tehlikesi altındadır. Şahinefendi Köyü'nde 2000'li yılların başlarında kaya düşme olaylarının meydana geldiği ifade edilmektedir. Yamaç boyunca yuvarlanan bloklar köyün üst kotlarına kadar ulaşmış olup, düşen kaya blokları halen gözlenebilmektedir (Şekil 2-b).

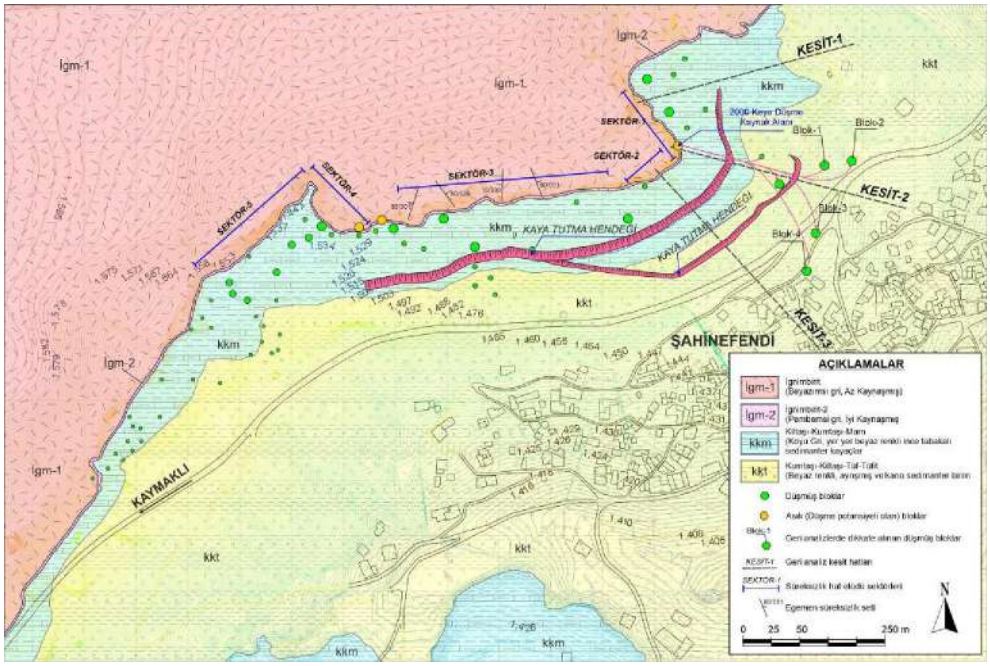
Şekil 2. İnceleme alanının genel görünümü (a), düşen bir kaya bloğu (b), yerleşim yeri üzerinde inşa edilmiş iki sıra kaya tutma hendeği (c).

İnceleme alanında gözlenen kaya düşme olaylarından sonra, düşen kaya bloklarının köye ulaşmasını önlemek için yerleşimin üst kotlarına yaklaşık 70 cm derinliğinde iki sıra kaya tutma hendeği kazılmıştır (Şekil 2-c). Bu kaya tutma hendeklerinin herhangi bir tasarım esasına göre projelendirilmediği belirlenmiş olup, özellikle üst kottaki hendek içerisinde çok sayıda blok biriktiği gözlenmiştir.

2.2. Mühendislik Jeolojisi

Çalışma alanında gerçekleştirilen arazi çalışmaları sonucunda en üst kotta yer alan ignimbiritler az ve iyi kaynaşmış ignimbiritler olmak üzere iki ayrı seviyeye ayırtlanmıştır. İgnimbiritlerin hemen altında kiltaşı-kumtaşı-marn ve kumtaşı-kiltaşı-tüf-tüfit ardalanmalarından oluşan farklı volkanosedimanter birimler tespit edilmiştir. Buna göre, çalışma sahasındaki jeolojik birimleri, daha önceden düşmüş olan

blokların yerlerini, süreksizlik incelemelerinin gerçekleştirildiği sektörleri, kaya düşmesi geri analizlerine ait kesit hatlarını ve yerleşimi gösteren mühendislik jeolojisi haritası Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 3. İnceleme alanına ait mühendislik jeolojisi haritası (Buz, 2019'dan değiştirilerek).

Şahinefendi Köyü'nün kuzeybatısında geniş bir alanda dike yakın yamaçta gözlenen beyazımsı gri renkli az kaynaşmış ignimbirit seviyesi (İgm-1) kaya düşmesi olayları için kaynak bölge konumundadır. Kaya düşmesi kaynak zonunun yüksekliği 30 metre civarındadır ve İgm-2 olarak ayırtlanan pembemsi gri renkli iyi kaynaşmış ignimbiritler de kaya düşmesi kaynak zonu içerisinde yer almaktadır. Kaya düşmesi kaynak zonunu oluşturan ignimbiritlerin alt kesimlerinde kiltaşı, kumtaşı, marn ardalanması (kkm) ile beyazımsı renkli kumtaşı, kiltaşı, tüf, tüfit (kkt) olarak tanımlanmış volkanosedimanter seviyeler yer almaktadır. Söz konusu zayıf dayanıma sahip volkanosedimanter seviyelerde meydana gelen farklı ayrışma nedeniyle görece daha yüksek dayanıma sahip ignimbiritlerin alt seviyeleri boşalmakta ve ignimbirit bloklarının kaynak zondan düşmesine neden olmaktadır.

Çalışma kapsamında süreksizlik özellikleri farklı sektörler boyunca incelenerek sahadaki duraysızlık mekanizması ortaya konmuştur. Kaya düşmesi kaynak zonunda genelde soğuma çatlakları egemendir. Bunun yanı sıra, ignimbiritlerde yataya yakın tabaka düzlemleri de gözlenmektedir. Buna göre, egemen süreksizliklerin eğim/eğim yönü 85/301, 80/029, 80/051 ve 10/290'dır. Kaynak zonda devrilme en yaygın yenilme türüdür. İgnimbiritlerdeki süreksizlikler ISRM (2007) önerileri doğrultusunda incelenmiş olup, farklı sektörlerde yapılan süreksizlik incelemeleri sonucunda geniş-çok geniş aralıklı olarak tanımlanmıştır. Çalışma alanında gözlenen süreksizlikler devamlılık açısından orta-yüksek devamlılığa sahiptir. İgnimbiritler için eklem yüzey pürüzlülük katsayısı (JRC) telli profilometre yardımıyla 8 olarak tanımlanmıştır. İnceleme alanında gözlenen süreksizlik açıklıkları açık yapılar olarak sınıflandırılmıştır. Süreksizlik yüzey dayanımı arazide Schmidt çekici kullanılarak belirlenmiştir. Arazide süreksizlik yüzeylerinden elde edilen ölçümlere göre ortalama Schmidt geri sıçrama değeri 20'dir. Çalışma alanında gözlenen süreksizlerde herhangi bir dolgu malzemesi ve su varlığı tespit edilmemiştir.

İnceleme alanındaki ignimbiritlerde kaya mekaniği laboratuvar deneyleri ISRM (1981) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Az kaynaşmış ignimbiritlerin (İgm-1) ortalama kuru birim hacim ağırlığı 13.98 kN/m^3, doygun birim hacim ağırlığı 16.40 kN/m^3 iken, iyi kaynaşmış ignimbiritlerin (İgm-2) ortalama kuru birim hacim ağırlığı 18.44 kN/m^3, ortalama doygun birim hacim ağırlığı da 19.37

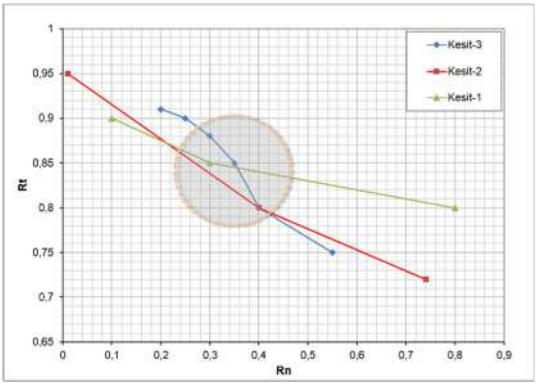
kN/m^3 olarak tespit edilmiştir. Kaynak zonundaki ignimbiritler, görünür gözeneklilik değerleri (%26-%39) dikkate alındığında NBG (1985)'e göre çok yüksek gözenekli kaya sınıfına girmektedir. İnceleme alanında az kaynaşmış ve iyi kaynaşmış ignimbiritin ortalama tek eksenli basınç dayanımları sırasıyla 3.3 ve 15.9 MPa'dır. Buna göre, kaya düşmesi kaynak zonundaki ignimbiritler çok düşük-düşük dayanıma sahip kayaçlar olarak tanımlanabilirler (ISRM, 1981).

3. KAYA DÜŞME ANALİZLERİ

3.1. Kaya Düşmesi Geri Verme Katsayılarının Geri Analizlerle Belirlenmesi

Kaya düşme analizlerinde düşen bloğun kontrol eden en önemli parametreler, normal (R_n) ve teğetsel (R_t) geri verme katsayılarıdır. Farklı kaya türleri için literatürde farklı geri verme katsayıları önerilmiş olmakla birlikte, bu parametrelerin sahaya özgü olarak daha önceden düşen kaya bloklarının yerleri dikkate alınarak geri analizlerle belirlenmesi daha doğru sonuçlar vermektedir. Buna bağlı olarak, Şahinefendi yerleşiminde daha önce düşmüş olan blokların konumları baz alınarak Şekil 3'te sunulan harita üzerinde gösterilen 3 farklı kesit hattı üzerinde 2-B kaya düşme analizleri ile RocFall 6.0 (Rocscience Inc., 2018) yazılımı kullanılarak geriye dönük analizler gerçekleştirilmiş ve çalışma alanındaki birimlere ait geri verme sayıları belirlenmiştir.

3 farklı kesit hattı üzerinde gerçekleştirilen kaya düşmesi geri analizleri sonucunda, sahada önceden düşmüş olan blokların o noktaya ulaşmasını sağlayan R_n ve R_t katsayıları belirlenmiş olup, bu değerler Şekil 4'te sunulan grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte farklı kesit hatları için gerçekleştirilen geri analizler sonucunda belirlenen geri verme katsayılarının her üç kesit hattı için belirli bir değer aralığında kesiştiği gözlenmektedir. Buna göre, kesit hatlarına ait sonuçların yaklaşık kesişim noktası baz alınarak, volkanosedimanter birimlerden oluşan yuvarlanma zonu için R_n ve R_t katsayılarının sırasıyla 0.35 ve 0.85 olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Sürtünme katsayısı ise 0.6 olarak dikkate aşınmıştır. Kaynak zonunu oluşturan dik ignimbirit biriminde düşen bloklar çoğunlukla serbest düşme hareketi gösterecektir. Bu nedenle düşen blok ile ignimbirit yüzeyi üzerindeki temas oldukça sınırlı olacaktır. Söz konusu ignimbirit seviyesi için geri verme katsayıları 0.45 (R_n) ve 0.85 (R_t) olarak atanmıştır. Bunun yanı sıra, yerleşimin hemen üst kotundan geçen asfalt karayolu için R_n ve R_t değerleri literatürden 0.4 ve 0.9, sürtünme katsayısı ise 0.3 seçilmiştir (Rocscience Inc., 2018).

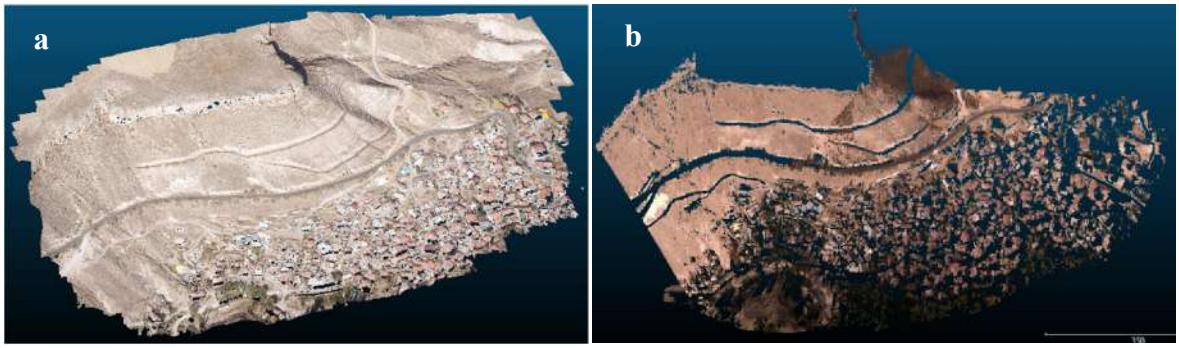


Şekil 4. Şahinefendi (Ürgüp) yerleşimi için gerçekleştirilen kaya düşmesi geri analiz sonuçları.

3.2. 3-B Kaya Düşme Simülasyonları

İnceleme alanında 3-B kaya düşme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan sayısal yüzey modeli hem TLS hem de İHA ile elde edilmiş olup, İHA yöntemi ile elde edilmiş olan nokta bulutu dağılımı Şekil 5-a'da, TLS ölçümleri sonucunda hazırlanmış nokta bulutu ise Şekil 5-b'de gösterilmektedir. Her iki nokta bulutu dağılımı dikkatli bir şekilde incelendiğinde, özellikle TLS ölçümleri ile hazırlanmış nokta bulutunda yamaç üzerindeki iki sıra kaya tutma hendeğine ait nokta bulutu verisi bulunmadığı ve bu bölgenin ters açılardan da ölçüm yapılmasına rağmen görülemeyen zon

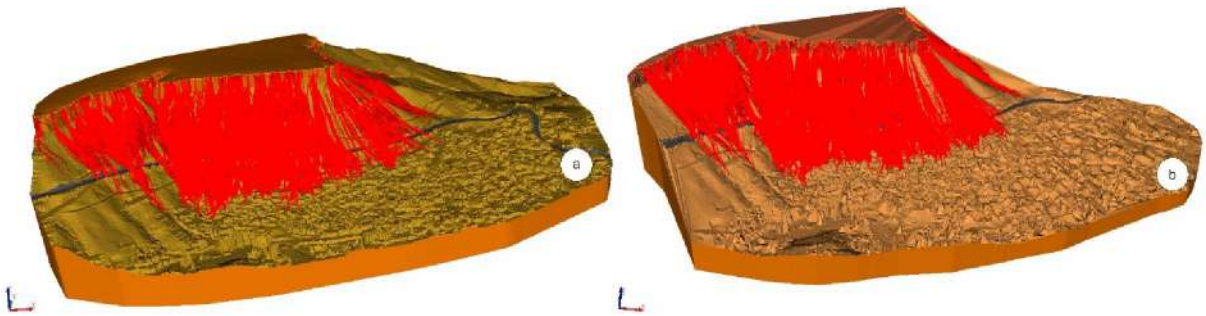
içinde kaldığı sonucuna varılmaktadır. Öte yandan, İHA ile yapılan ölçümlerde kaya düşmesi kaynak zonunu da içine alacak şekilde tüm yuvarlanma zonu ve bu zon üzerindeki kaya tutma hendekleri net bir şekilde gözlenmiş ve nokta bulutu verisi alınabilmiştir (Şekil 5-a).



Şekil 5. İnceleme alanına ait nokta bulutu verisi, İHA yöntemi (a), TLS yöntemi (b).

İnceleme sahası için RocPro3D yazılımında gerçekleştirilen olasılıksal (probabilistik) 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde arazide daha önceden düşen blok boyutları da dikkate alınarak katı cisim (rigid body) modeli ile 0.75 m çapındaki ve kısmen doygun koşul kabul edilerek 14.5 kN/m^3 birim hacim ağırlığındaki 200.000 adet blok kaynak zonun en üst seviyesinden düşürülmüştür. Olasılıksal yöntemle yapılan kaya düşme analizlerinde düşürülen blok sayısının fazla seçilmesi sonuçların gerçekçiliği açısından önemli olduğundan kaynak zonu uzunluğu da dikkate alınarak 200.000 adet blok düşmesi dikkate alınmıştır. Buna göre, inceleme alanı için TLS ve İHA ile elde edilmiş iki ayrı nokta bulutundan hazırlanan sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilen 3-B kaya düşme analizlerinde belirlenen kaya düşmesi yuvarlanma hatları Şekil 6'da gösterilmektedir. 3-B kaya düşme analiz sonuçları incelendiğinde yamacın en üst kotlarından düşebilecek blokların önemli bir bölümünün karayoluna kadar geldiği, hatta karayolunu geçerek yerleşim yerinin üst kotlarına kadar ulaşabildiği görülmektedir. Arazi incelemeleri sırasında da belirtilen lokasyonlarda daha önceden düşmüş olan bloklar göze çarpmaktadır.

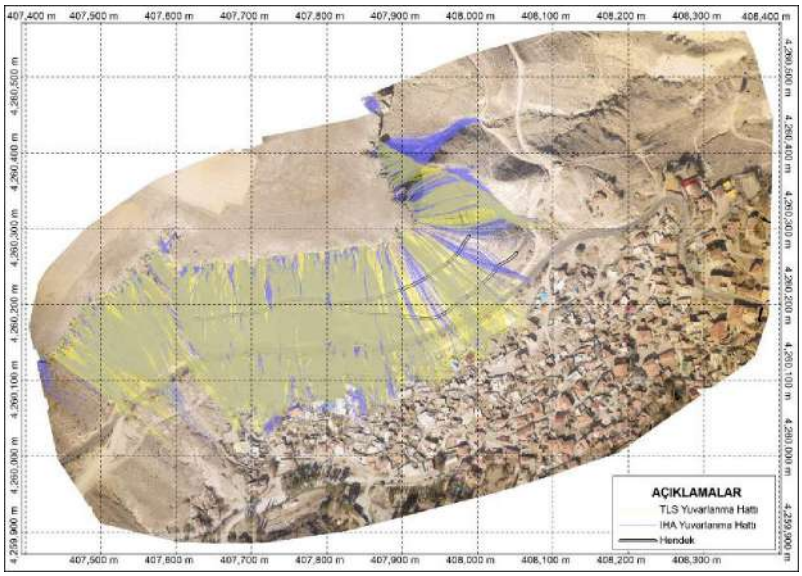
Kaya tutma hendeği, kaya düşmelerini yerleşim yerlerine veya ulaşım hatlarına ulaşmadan önce enerjilerini uygun derinlikte kazılan çukurlar içerisinde sönümleyerek durdurmaya yarayan ve ekonomik bir kaya düşmesi koruma yöntemidir (Akın vd., 2019). Gerçekleştirilen 3-B kaya düşme analizleri, kaya düşmelerinin önlenmesi amacıyla açılan 70 cm derinliğindeki ve 6-8 m genişliğindeki kaya tutma hendeklerinin görevini yerine getiremediğini ve kaynak zonundan kopan kaya bloklarının çok büyük bir bölümünün kaya tutma hendeklerini aşabildiğini işaret etmektedir. Öte yandan, İHA'dan ve TLS'den elde edilen nokta bulutlarından hazırlanan sayısal yüzey modellerinin kaya düşme analiz sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek için, her iki modele ait kaya düşmesi yuvarlanma hatları inceleme alanına ait gerçek ortofoto görüntüsü üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. İnceleme alanına ait 3-B kaya düşme analiz sonuçları, İHA modeli (a), TLS modeli (b).

Şekil 7 incelendiğinde, farklı yöntemler ile oluşturulan sayısal yüzey modelleri üzerinde yapılan 3-B kaya düşme analizlerinden belirlenen yuvarlanma hatlarının genel olarak birbirine benzer olduğu

görülmektedir. Ancak, bazı bölümlerde İHA modeline ait yuvarlanma hatları daha uzundur. Bunun en önemli nedeninin, derinliği çok az olan hendeğin yuvarlanan kaya bloklarının sıçramasına ve sıçramanın etkisiyle yuvarlanma mesafelerinin bir miktar artmasına neden olması olduğu sonucuna varılmıştır. Oysa nokta bulutu verisi olmayan ve düz olarak algılanan TLS verisine ait yüzey modelinde, hendeklerin olduğu kısım eğim değerinin azalmasına bağlı olarak düşen kaya bloklarını yavaşlatıcı yönde rol oynamaktadır. Bu durum, 3-B kaya düşme analizlerinde gerçekçi sonuçlara ulaşılabilmesi için kullanılacak sayısal yüzey modelinin topoğrafyayı en doğru şekilde yansıtması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7. İHA ve TLS verisinden elde edilen sayısal yüzey modellerine ait kaya düşme yuvarlanma hatlarının ortofoto üzerinde gösterimi.

4. SONUÇLAR

Son yıllarda kaya düşme modellemelerinde 3-B analizler yaygınlaşmaya başlamıştır. 2-B kaya düşme analizleri bir kesit hattı boyunca gerçekleştirilirken, 3-B analizlerde kaya düşmelerinin meydana geldiği topoğrafya gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmekte ve düşen kaya bloğunun yanal yöndeki sapmaları da dikkate alınabilmektedir. 3-B kaya düşme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için en önemli verilerden bir tanesi kaya düşme sahalarına ait detaylı sayısal yüzey modelleridir. Gelişen teknolojiye bağlı olarak sayısal yüzey modellerinin oluşturulmasında farklı tekniklerden yararlanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında kaya düşmelerinin gözlendiği bir yerleşim alanında TLS ve İHA ile elde edilmiş nokta bulutlarından oluşturulmuş iki farklı yüzey modeli üzerinde olasılıksal 3-B kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiş ve sayısal yüzey modellerindeki farklılıkların analiz sonuçları üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Buna göre, TLS ile alınan nokta bulutu kümelerinde Kapadokya gibi kaya düşmelerinin ve kaya oyma yapıların iç içe girdiği kaotik yapı, engebeli topoğrafya, kaya tutma hendeği gibi düşey düzensizlikler ve ağaçlık alanlarda görülemeyen zonlar oluşabilmektedir. Bu tür nokta bulutu verisindeki eksiklikler, 3-B kaya düşme analizlerinde kullanılan sayısal yüzey modeli üzerinde sonuçları etkileyebilecek hataların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi, sayısal yüzey modelinde kaya tutma hendeğinin modele yansıtılamaması, kaya düşmesi yuvarlanma mesafelerine etki edebilmektedir. Bu nedenle, yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modelleri üzerinde kaya düşme hareketi gerçekçi şekilde ortaya konabileceğinden, sayısal yüzey modelinin oluşturulacağı nokta bulutu verisinin elde edilmesinde sahaya en uygun yöntemin seçilmesi ve kaya düşme hareketine etki edebilecek tüm doğal ve yapay unsurların modele yansıtılması önem kazanmaktadır.

Çalışmanın gerçekleştirildiği Şahinefendi yerleşimi için yapılan 3-B kaya düşmesi analizleri, köyün yamaca yakın kesimlerinin ve köyün hemen üstünden geçen karayolunun kaya düşme tehlikesi altında

olduğunu göstermektedir. Öte yandan, kaya düşmelerinin köye ulaşmasını önlemek amacıyla inşa edilmiş olan yaklaşık 70 cm derinliğindeki ve 6-8 m genişliğindeki iki sıra kaya tutma hendeğinin de kaya düşmelerini önlemede yeterli olamayacağı 3-B kaya düşme analizleri ile net bir şekilde ortaya konmuştur. Hatta oldukça sığ olarak inşa edilmiş bu hendekler, İHA ile belirlenen geometrileri dikkate alındığında, 3-B kaya düşme analizlerinde gözlenebildiği gibi düşen blokların daha çok sıçramasına neden olmakta ve kinetik enerjileri artan blokların yuvarlanma mesafelerini artırmaktadır.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, UDAP-G-16-03 numaralı proje ile Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) Başkanlığı'nca desteklenmiştir. Projeyi destekleyen kuruma yazarlar olarak teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A.Ö., Orhan, A., Akın, M.K., Topal, T., 2019. Kaya tutma hendek performansının 3-boyutlu kaya düşme analizleriyle değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) örneği. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 43(2), 211-232.

Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A.Ö., Orhan, A., Akın, M.K., Topal, T., 2020. Kapadokya (Nevşehir) Bölgesindeki Kaya Düşmelerinin Arazi Lazer Taraması (TLS) Yardımıyla 3-Boyutlu (3-D) Analizi ve Kaya Düşme Tehlike Haritalarının Oluşturulması. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP), UDAP-G-16-03 Nolu Proje Sonuç Raporu, 191 sf.

Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A.Ö., Orhan, A., Akın, M.K., Topal, T., 2021. Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing. Engineering Geology, 283, 106001.

Bonneau, D.A., Hutchinson, D.J., Difrancesco, P. M, Coombs, M., Sala, Z., 2019. 3-Dimensional rockfall shape back-analysis: methods and implications. Natural Hazards Earth System Sciences, 19, 2745–2765.

Buz, R., 2019. Şahinefendi (Nevşehir) ve Yakın Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97 sf.

Chaulya, S.K., Prasad, G.M., 2016. Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas: Monitoring and Prediction Technologies, Elsevier, Netherlands, 403 sf.

Chen, G., Zheng, L., Zhang, Y., Wu, J., 2013. Numerical simulation in rockfall analysis: A close comparison of 2-D and 3-D DDA. Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(3), 527–541.

Di Luzio, E., Mazzanti, P., Brunetti, A., Baleani, M., 2020. Assessment of tectonic-controlled rock fall processes threatening the ancient Appia route at the Aurunci Mountain pass (central Italy). Natural Hazards, 102, 909–937.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring. International Society of Rock Mechanics Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, p. 211.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), Testing and Monitoring: 1974-2006. p. 628.

Lan, H., Martin, D., Zhou, C., Lim, C., 2010. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. Geomorphology, 118, 213–223.

NBG, 1985. Norwegian Group of Rock Mechanics: Handbook in Engineering Geology - Rock. Norwegian Rock Mechanics Group (NBG), 140 p.

RocPro3D, 2014. RocPro3D software. http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php.

Rocscience Inc., 2018. https://www.rocscience.com/help/rocfall/ Erişim tarihi: 14.12.2018.

Sala, Z., Hutchinson, D.J., Harrap, R., 2019. Simulation of fragmental rockfalls detected using terrestrial laser scans from rock slopes in south-central British Columbia, Canada. Natural Hazards Earth System Sciences, 19, 2385–2404.

Tufanbeyli Enerjisa Termik Santrali Linyit Sahası ve İç Döküm Şevlerinin Yersel Radar Sistemi ile İzlenmesi

Monitoring Tufanbeyli Enerjisa Thermal Power Plant Lignite Field and Internal Casting Slopes with Terrestrial Radar System

A. Aydın[*1], N.S. Çağan[1], F.T. Akbaş[1], E. Çörekçioğlu[1], T. Çan[2]

[1] Enerjisa Enerji Üretim A.Ş., Tufanbeyli Termik Santrali, Kayarcık Mevkii, Tufanbeyli/Adana
[2] Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Sarıçam, Adana
*(*arif.aydin@enerjisauretim.com)*

ÖZ: Adana ili, Tufanbeyli ilçesinde 2016 yılında devreye alınan, 450 MW kapasiteli Tufanbeyli Termik Santralinin yakıt ihtiyacı için günlük 20000 tondan fazla linyit kullanılmaktadır. Bu nedenle, oldukça dinamik bir yapıya sahip madencilik faaliyetleri içerisinde, linyit sahası işletme ve iç döküm şevlerinin izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yersel Yapay Açıklıklı Radar (Ground Based Synthetic Aperture Radar) sistemi ile dekapaj, kömür işletme ve iç döküm şevleri, hareketin olduğu belirli alt bölgelere ayrılarak izlenmektedir. Her bir bölgede geri yansıyan elektromanyetik dalganın genliği (dB), yer değiştirme miktarı (mm) ve hareketin hızı (mm/saat) 4 dakika aralıklarla sürekli olarak ölçülerek kayda alınmaktadır. Radar cihazının son lokasyonundan alınan verilere göre dekapaj, kömür işletme ve iç döküm şevlerinde toplam yer değiştirme miktarları sırasıyla 220, 5 ve 85 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre maden sahasındaki şevlerin oldukça duraylı yapıda olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yersel Yapay Açıklıklı Radar Sistemi, şev izleme, yer değiştirme, linyit açık maden ocağı, Tufanbeyli.

ABSTRACT: *More than 20000 tons of lignite is used daily for the fuel requirement of the 450 MW Tufanbeyli Thermal Power Plant, which was commissioned in the Tufanbeyli district of Adana in 2016. For this reason, it is of great importance to monitor the lignite open pit and waste dump slopes within the very dynamic mining activities. With the Radar (SAR) system, stripping, lignite, and waste dump slopes slopes are divided into certain sub-regions where movement is observed. The amplitude (dB) of each retroreflected electromagnetic wave, the amount of displacement (mm) and the speed of movement (mm / hour) are continuously measured and recorded at 4-minute intervals. According to the data given from the last location of the radar device, the total displacement amounts in overburden, lignite, and waste dump slopes are* 220, 5 ve 85 *mm respectively. Accordingly, it is understood that the slopes in the mine field are quite stable.*

Keywords: *Ground Based Synthetic Aperture Radar System, slope monitoring, displacement, lignite open pit mine, Tufanbeyli.*

1. GİRİŞ

Açık maden sahası şevlerinin tasarımı ve izlenmesi, güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir bir işletme sürecinin her aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardır. Ancak genel tasarım süreçlerinde jeoteknik modellemelerde tamamıyla tespit edilemeyen yersel farklılıklar, madencilik faaliyetlerini önemli ölçüde aksatacak şev duraysızlıklarına ve iş güvenliği risklerine yol açabilmektedir. Genel olarak açık ocak işletme şevlerinde risk yönetiminin stabilite açısından etkin bir şekilde yapılabilmesi için şev stabilitesi tasarımlarının dayandığı jeoteknik modelin doğruluğu, şev tasarımlarının performans değerlendirmesi ve her türlü şev hareketinin alansal büyüklüğü, hızı ve hareket yönünün tespit edilmesi ve ölçümü için şev izleme sisteminin oluşturulması gerekmektedir.

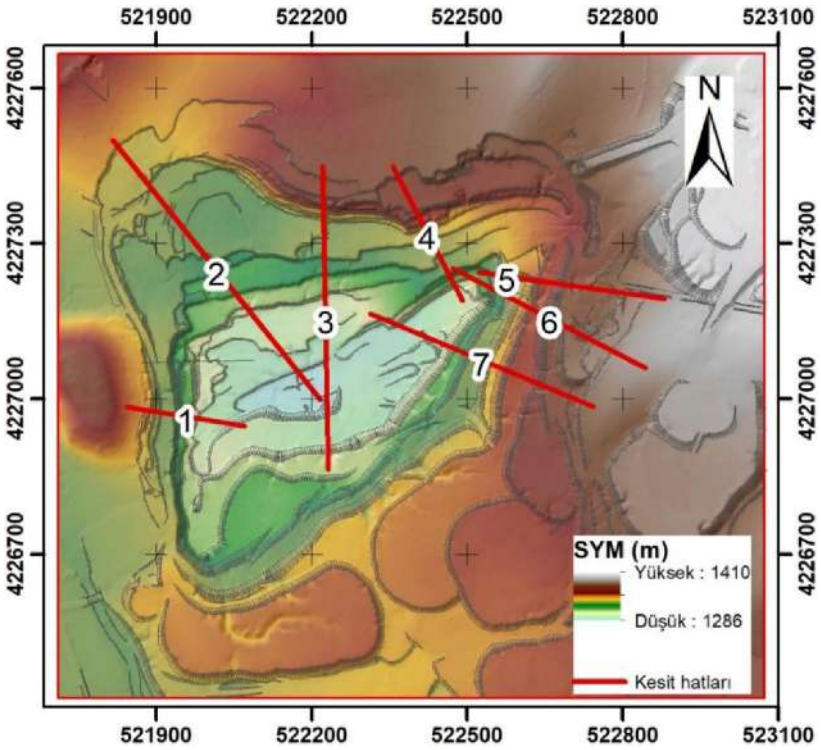
Şevlerde meydana gelen deformasyonlar yerüstü ve yeraltı izleme teknikleri olarak iki ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlardan yüzeyden yapılan şev izleme teknikleri noktasal olarak ekstansometreler, elektronik mesafe ölçerler, total station gibi jeodezik ölçüm teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda açık maden işletme şevleri ve heyelanlar, yersel radar ve lazer tarayıcı sistemlerle daha

geniş alanlarda ise uydu bazlı radar sistemleri ile şev deformasyonlarının izlenmesi giderek artmaktadır (Pieraccini ve Miccinesi, 2019; Eberhardt vd., 2020).
Tufanbeyli Enerjisa Termik Santrali Linyit Açık Maden Sahası ve İç Döküm Şevlerinin stabilite değerlendirmeleri, deterministik yaklaşımlarla her ay düzenli olarak değerlendirilmektedir. Yersel Radar Sistemi ile şevlerin performansı sürekli olarak gözlenmekte, deformasyon miktarı ve hızları değerlendirilerek erken uyarı sistemi ve tehlike haritaları hazırlanmaktadır. Bu çalışmada yersel radar sisteminin çalışma prensibi ve 17 Mart - 02 Temmuz 2021 tarihleri arası yapılan ölçümler değerlendirilmiştir.

2. TUFANBEYLİ ENERJİSA LİNYİT SAHASI GENEL ÖZELLİKLERİ

Tufanbeyli bölgesi Orta Toroslar içerisinde yer almakta ve yükseklik değerleri 2000 metrenin üzerine çıkmaktadır. Karasal iklim özelliklerine sahip bölgede yazlar serin ve kurak, kışlar soğuk ve kar yağışlıdır. Ortalama yıllık yağış miktarı 560 mm, ortalama kar yağışlı gün sayısı 33 gün olup, yağışlar kışın kar, ilkbaharda ise yağmur şeklindedir. Yıllık ortalama sıcaklık 10°C olup, minimum ve maksimum sıcaklık değerleri -35°C ve 37°C arasında değişmektedir.

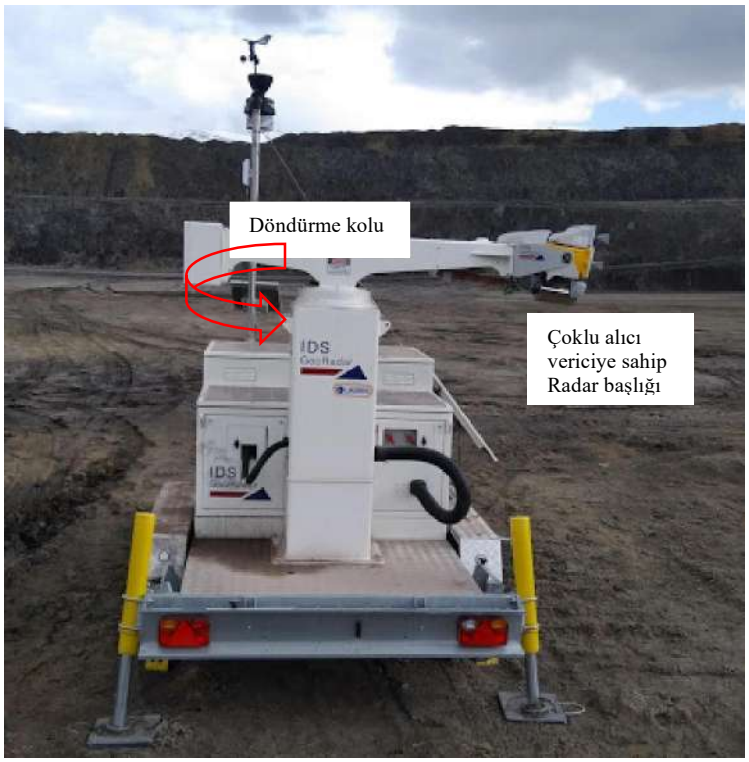
Tufanbeyli Enerjisa Termik Santrali Linyit Maden Sahası yakın çevresinde, temelde kumtaşı ve şeyl birimlerinden oluşan Alt Devoniyen Ayıtepesi Formasyonu (Özgül ve diğ., 1973) ve başlıça kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşlarından oluşan, Orta Devoniyen Şafaktepe (Demirtaşlı, 1967) ve Üst Devoniyen Gümüşali Formasyonları (Demiştaşlı,1967) yüzeylemektedir. Temel birimler üzerinde, açısal uyumsuzlukla, linyit havzasını oluşturan Pliyosen-Pleyistosen yaşlı Evciköy Formasyonu (Özgül ve diğ., 1973) ile Kuvaterner çökelleri yer almaktadır. Evciköy Formasyonunun alt seviyelerinde bulunan taban kili üzerine, üç farklı Linyit seviyesinden oluşan (A, B ve C Linyit seviyeleri) Linyitli Gidya kompleksi gelmektedir. En üstte ise kil ve marnlı seviyelerden oluşan tavan seviyesi ve Kuvaterner birimleri bulunmaktadır. Linyitli Gidya kompleksinin kalınlığı güneyden kuzeye doğru gittikçe kalınlaşarak 200 m'ye ulaşmaktadır (Vattenfall, 2012). Linyit sahası yükseklik değerleri 1285 m ile 1410 m arasında değişmektedir (Şekil 1). Linyit sahası şev stabilitesi değerlendirmeleri, her ay düzenli olarak belirli sayıda kesit hatları üzerinden, statik ve psödostatik koşullar altında, deterministik yaklaşımlarla yapılmaktadır. Şev stabilitesi analizlerinde jeolojik yapı, sondajlardan elde edilen üç boyutlu sayısal jeolojik model kullanılarak oluşturulmaktadır.



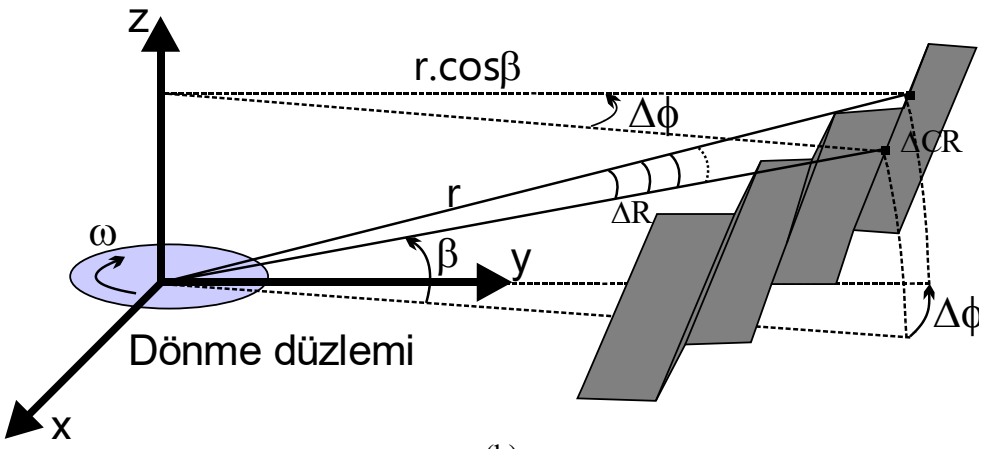
Şekil 1. Linyit sahası ve çevresinin sayısal yükseklik modeli (SYM).

3. IDS IBIS-ArcSAR Lite YERSEL RADAR SİSTEMİNİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

IDS IBIS-ArcSAR Lite Yersel Radar sistemi 360 derece dönebilen bir mekanizma üzerine yerleştirilmiş, MIMO (Multiple Input Multiple Output) radar sistemi olarak bilinen, iki verici (VX) ve iki alıcı (AX) anten ile tarama yapmaktadır (Şekil 2).



(a)



(b)

Şekil 2. Yersel radar sistemi (a) ve izleme geometrisi (b) (Vivani vd., 2018'den değiştirilerek).

Şekil 2b'de şematik olarak verilen görüntüleme sistemi parametreleri;

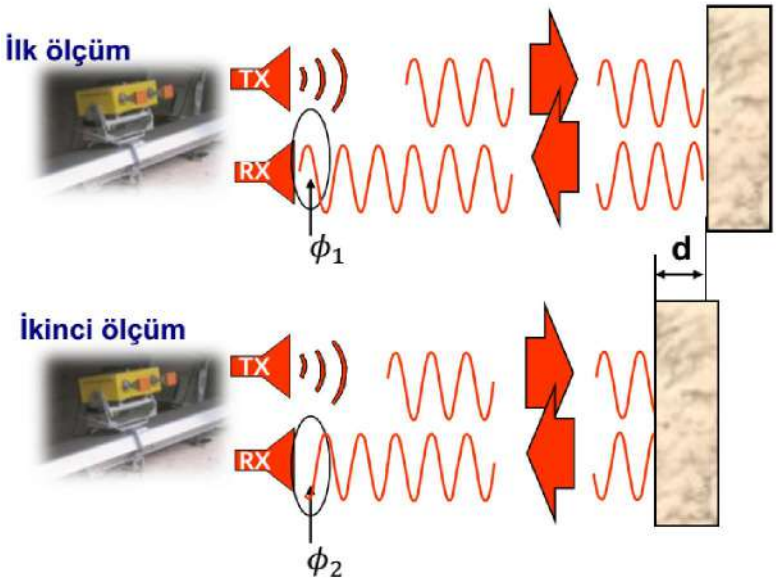
ω dönme *açısal hızı*;
r eğim aralığı, dönme merkezine göre aynı seviyede olmayan iki nokta arasındaki eğim yönü boyunca görüş hattı mesafesi;
β dönme düzlemine göre ölçülen bir noktanın düşey düzleme göre *yükseklik açısı*;

$\Delta\phi$ azimut açı çözünürlüğü;
ΔR menzil çözünürlüğü,
ΔCR çapraz menzil çözünürlüğüdür.

Radar sisteminin ölçüm yapabildiği maksimum mesafe 2.5 km, yatay ve düşey kapsama alanı ise sırasıyla 360° ve 60° dir. Menzil çözünürlüğü 0.75 m, çapraz menzil çözünürlüğü ise 0.57°'dir. Sistemde deformasyon ölçümleri, herbir radar pikseli için genlik ve faz bilgisini içeren iki ardışık radar ölçümünün arasındaki faz farkının interferometri tekniği ile hesaplanması ile yapılmaktadır (Eş.1) (Şekil 3). Dalga boyu, λ =17.2 mm olup, radar sisteminin iki ölçüm arasındaki ölçülebilen maksimum deformasyon miktarı ± 4.38mm'dir. 4 dakika olan, iki ölçüm arasında, bu değeri aşan deformasyonlarda faz belirsizliği meydana gelerek ölçüm yapılamamaktadır. Maksimum deformasyon değerine göre ölçülebilir maksimum hız değeri ise 131.4 mm/s'dir.

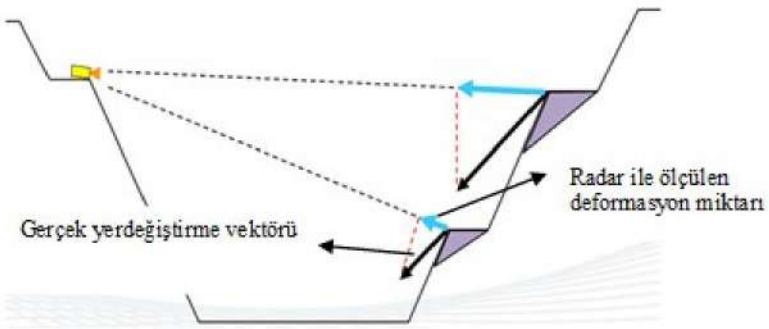
$$d = -\frac{\lambda}{4\pi}(\phi_2 - \phi_{1)} \qquad (1)$$

Burada λ, dalga boyu (17.2 mm), ϕ_1 ve ϕ_2 [-π;π] aralığında değişen faz açılarıdır.



Şekil 3. Yersel radar sistemi ile faz farkına bağlı olarak ölçülen deformasyonlar.

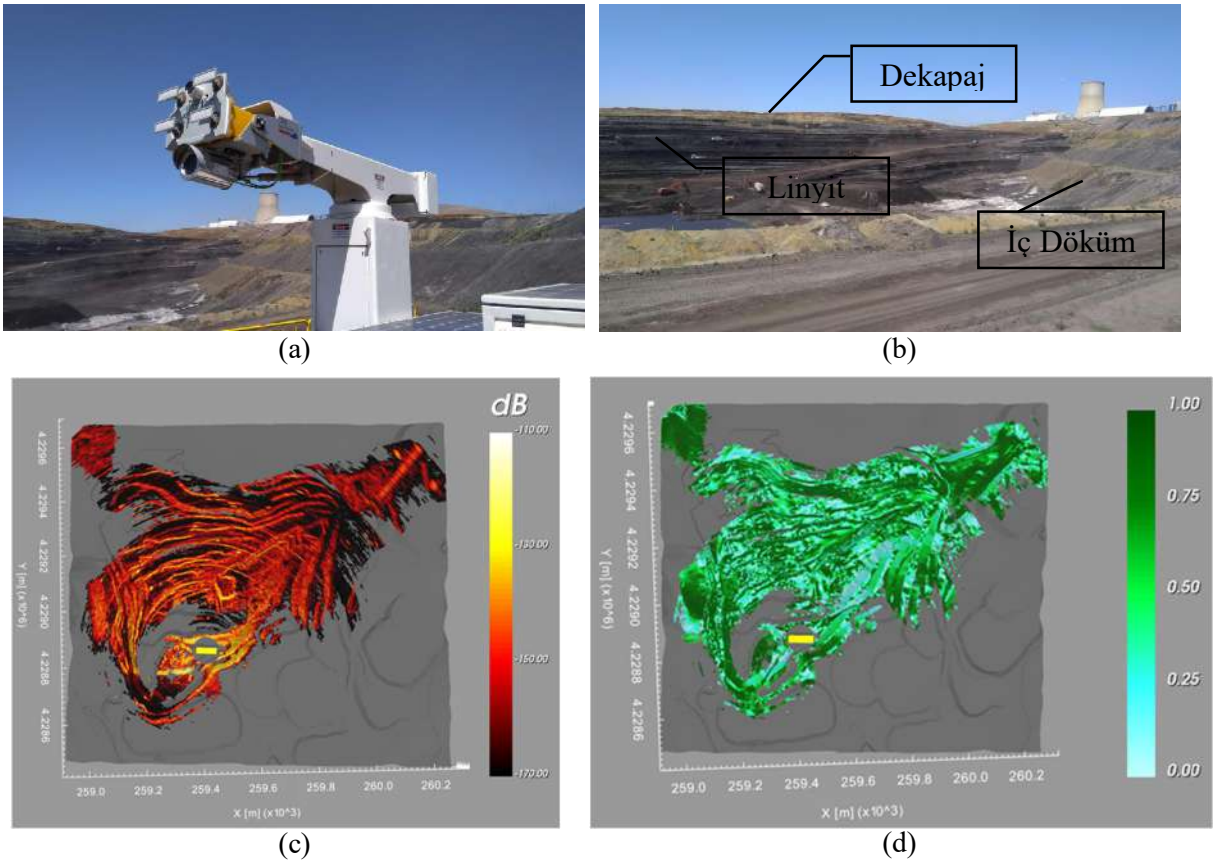
Deformasyonlar radar sisteminin bakış açısına (Line of Sight=LOS) bağlı olarak ölçülmektedir (Şekil 4). Gerçek deformasyon vektörleri için ilave jeodezik ölçümler gerekmektedir.



Şekil 4. Bakış açısına bağlı olarak ölçülen deformasyon vektörleri.

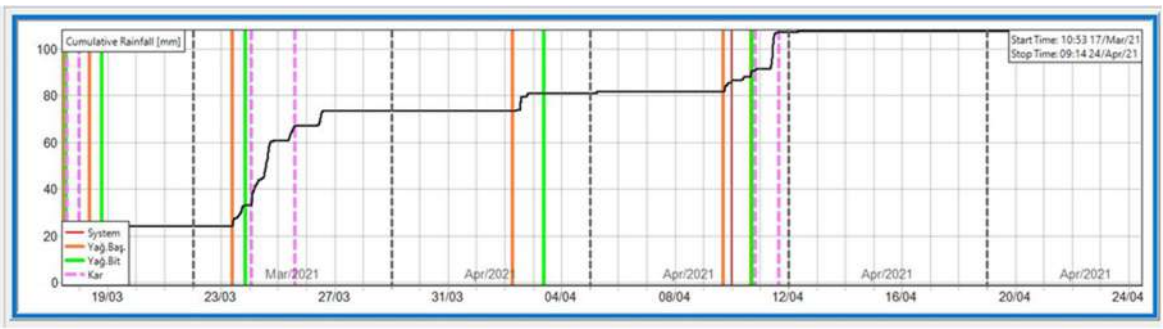
4. YERSEL RADAR SİSTEMİ İLE ŞEV DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ

Yersel radar sistemi, linyit açık ocak sahası içerisinde dekapaj, linyit işletme ve aktif iç döküm şevlerinin izlenebildiği bir alana yerleştirilmiştir (Şekil 5a,b). Söz konusu lokasyonda radar sistemi sinyalinin gücünün gösterildiği genlik haritası (Şekil 5c) ve radar bakış açısının beklenen hareket yönüne göre ne kadar iyi olduğunu gösteren hassasiyet haritaları (Şekil 5d) hazırlanmıştır. Genlik değerlerinin yüksek olduğu yerler geri saçılan sinyalin güç ve kalitesinin iyi, hassasiyetin yüksek olduğu bölgeler ise radar ölçümünün gerçek yer değiştirmeye daha yakın olduğu bölgeleri göstermektedir.

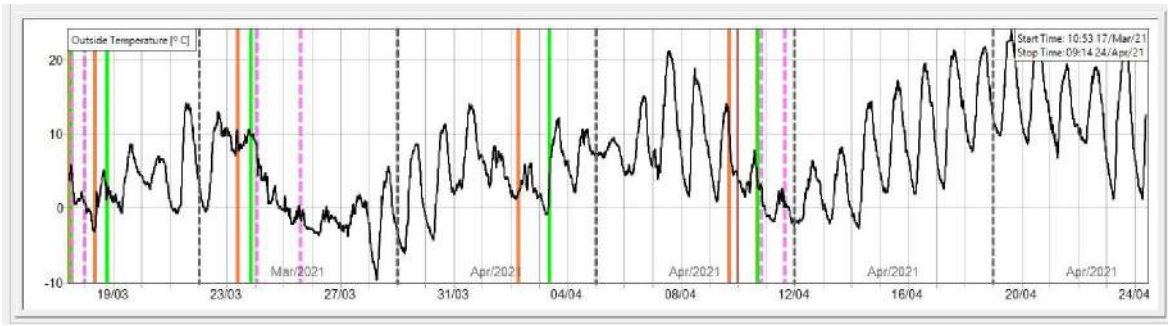


Şekil 5. Radar anteni (a), linyit, dekapaj ve iç döküm şevlerinin genel görünümü (b), radar lokasyonundan elde edilen genlik (c) ve hassasiyet (d) haritaları.

Radar sistemi üzerinde bulunan meteoroloji istasyonu ile sıcaklık, nem, rüzgar, yağmur ve kar yağış verileri anlık olarak kaydedilmektedir. Buna göre yağışlı döneme ait 17 Mart - 24 Nisan 2021 tarihleri arasında kümülatif yağış değerinin 110 mm'ye ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 6). Aynı dönemde sıcaklık değerleri ise -10°C ile 25°C arasında değişmekte olup gece ve gündüz sıcaklık farkının 20°C'ye ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 7).

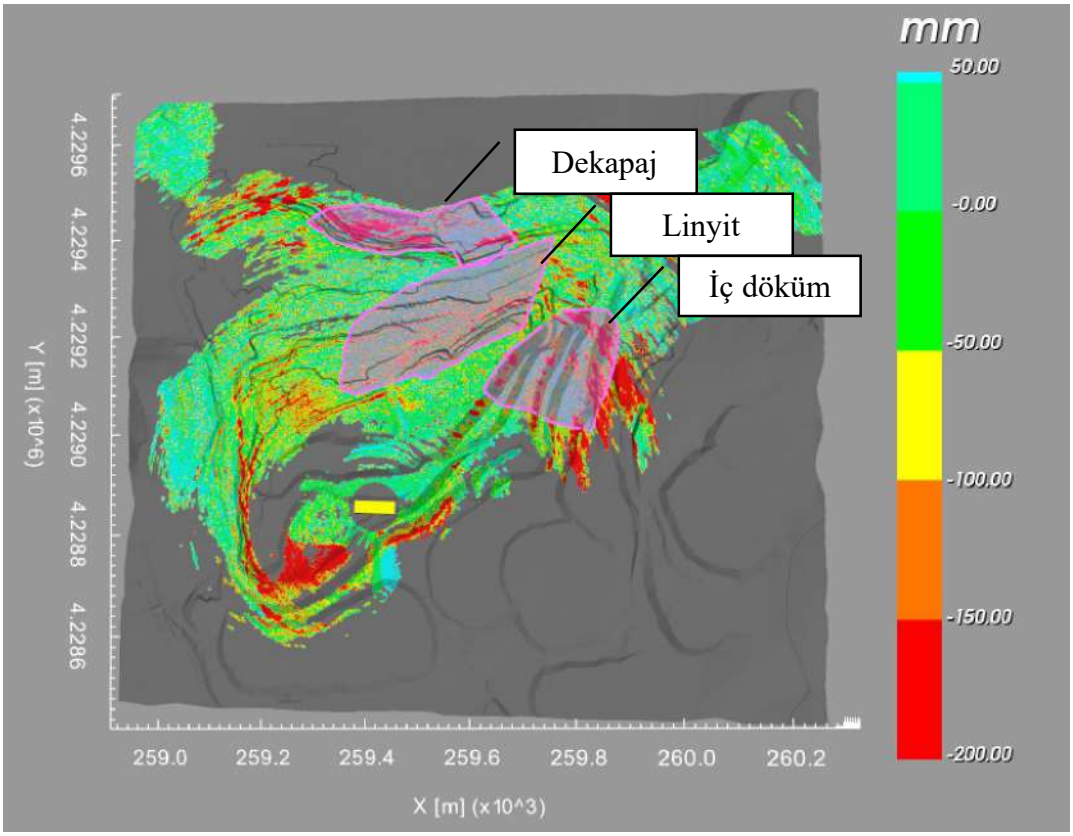


Şekil 6. 17 Mart - 24 Nisan 2021 tarihleri arasındaki kümülatif yağış değerleri.

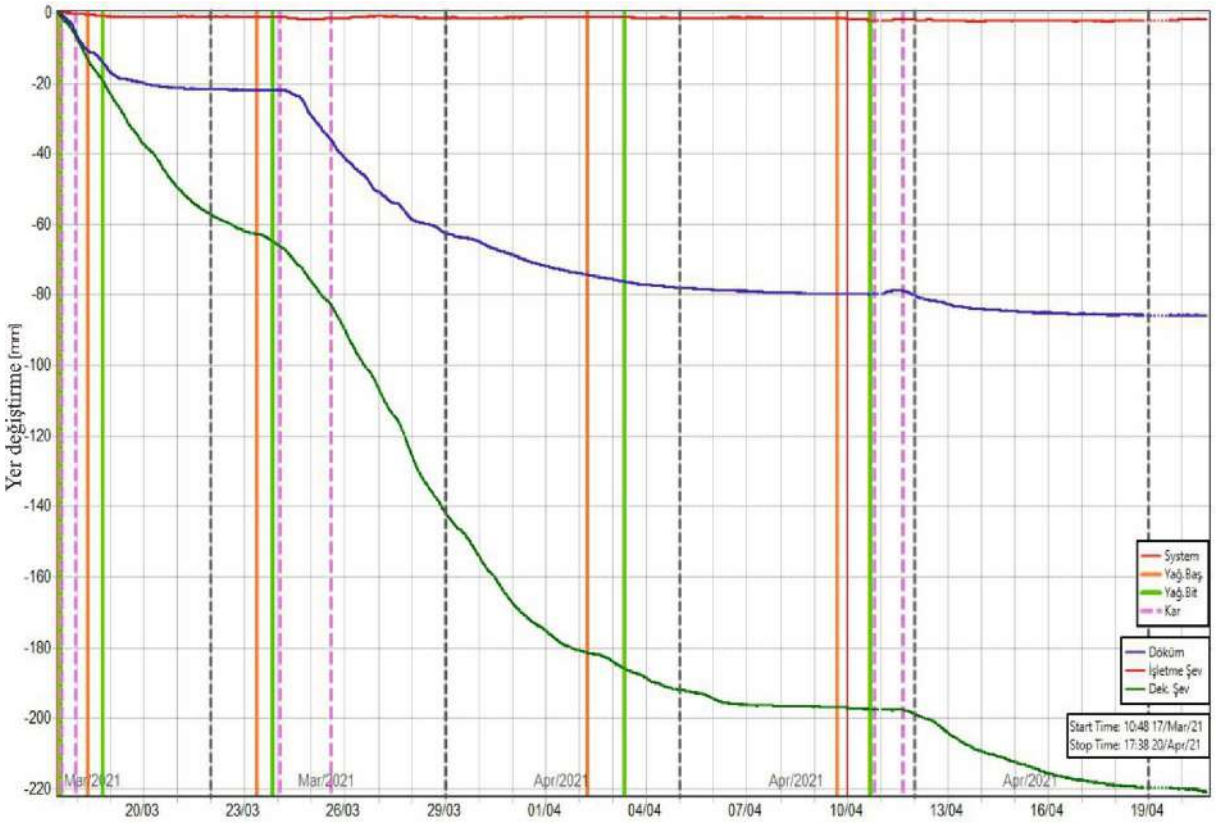


Şekil 7. 17 Mart - 24 Nisan 2021 tarihleri arasında sıcaklık değerlerinin değişimi.

17 Mart- 02 Temmuz tarihleri arasında saha genelinde gözlenen kümülatif deformasyon miktarı maksimum 150-200 mm dolaylarında genel olarak iç döküm ve dekapaj şevlerinde gözlenmiştir. Deformasyon miktarları nokta veya alan bazlı olarak alt bölümlere ayrılarak değerlendirilmiştir (Şekil 8). Saha içerisinde progresif yenilme gözlenmemektedir. Diğer taraftan dekapaj, linyit işletme ve iç döküm sahalarında belli alt bölgeler belirlenerek deformasyon miktarları izlenmiştir. Deformasyon değerleri yağışlara bağlı olarak artmakta, daha sonra sönümlenmektedir. Şekil 9'da, belirtilen alanlarda 17 Mart -20 Nisan tarihleri arasında ölçülen zamana bağlı deformasyon değerlerinin değişimi verilmiştir. Buna göre linyit işletme şevlerinde belirgin bir deformasyon gözlenmemektedir. İç döküm şevlerinde ortalama kümülatif deformasyon 85 mm olup en fazla deformasyon 220 mm ile dekapaj şevlerinde gözlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 8. 17 Mart- 02 Temmuz tarihleri arasında saha genelinde gözlenen kümülatif deformasyon haritası.(X-Y Ekseni ED50 36N Projeksiyon Sistemine göredir.)



Şekil 9. 17 Mart -20 Nisan tarihleri arasında dekapaj, linyit işletme ve iç döküm şevlerinde ölçülen zamana bağlı deformasyon değerlerinin değişimi.

Dekapaj kazıları linyit üretim şevlerinin oldukça gerisinde kaldığından dolayı bu şevlerde meydana gelen ve nispeten sınırlı deformasyonlar, şev stabilitesi açısından herhangi bir olası tehlike oluşturmamaktadır.

5. SONUÇLAR

Yersel Radar Sistemi ile Tufanbeyli Termik Santrali Linyit Sahası dekapaj, işletme ve iç döküm şevleri başarılı bir şekilde izlenmektedir. Mevcut durumda şu ana kadar yapılan ölçümlerde progresif yenilme türü deformasyonlar gözlenmemiştir. Sahada gözlenen şev deformasyonları bölgede meydana gelen yağışlara bağlı olarak bir miktar artış göstermekte ve daha sonra durağanlaşmaktadır. İşletme şevlerinde 17 Mart-24 Nisan tarihlerinde yağışlı dönemde yapılan ölçümlerde işletme şevlerindeki kümülatif deformasyon miktarı 5 mm, iç döküm şevlerinde 85 mm, dekapaj şevlerinde ise 220 mm olarak ölçülmüştür. En fazla kümülatif deformasyon miktarının ölçüldüğü dekapaj şevlerinde kazı çalışmaları, kömür işletme şevlerinin çok gerisinde ve yağışlı günler haricinde yapılmaktadır. Bu nedenle meydana gelen hareketler linyit üretimi ve iş güvenliği açısından herhangi bir sorun oluşturmamaktadır. Yapılan ölçümlerde şev stabilitesi açısından tehlike oluşturabilecek herhangi bir durum yaşanmamıştır. Yapılan bu çalışma ile deterministik şev stabilitesi çalışmaları ve yersel radar sistemi ile şev stabilitesi risk yönetiminin etkin bir şekilde yapıldığı görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

Eberhardt, E., Ness, M., Noon, D., Schwarz, E., Stacey, P., 2020. Overview of slope monitoring. Chapter 2, pp 7-16. In Guidelines for slope Performance Monitoring. Editors: Sharon R. & Eberhardt E. CSIRO publishing, CRC Press.

Pieraccini, M., Miccinesi, L., 2019. Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review. Remote Sensing, 11, 1-22, doi:10.3390/rs11091029.

Vattenfall Europe Mining AG, 2012. Tufanbeyli Kömür Madeni ve Kireçtaşı Ocakları İçin Maden Geliştirme Planı, Final Raporu 322s.

Vivani, F., Michelini, A., Mayer, L., Coppi, F., 2018. IBIS-ArcSAR: an Innovative Ground-Based SAR System for Slope Monitoring. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Valencia, Spain, 1348-1351.

The Monitoring of Long-term Deformation of Babadağ Landslide in Denizli, Turkey by DInSAR Technique

Denizli (Türkiye) Babadağ Heyelanı Uzun Dönem Hareketinin DInSAR Yöntemi ile Değerlendirilmesi

N. Iwata[1,*], K. Kanose[1], Ö. Aydan[2], H. Kumsar[3]

[1]Chuden Engineering Consultants Co., Ltd, Hiroshima, Japan
[2] University of the Ryukyus, Dept. of Civil Engineering, Nishihara, Okinawa, Japan
[3]Pamukkale University, Dept. of Geological Engineering, Denizli, Turkey
*(*n.iwata@cecnet.co.jp)*

ABSTRACT: A creep-like landslide in the Gündoğdu district of Babadağ town in Denizli (Turkey), where about 2000 people lived in the damaged houses, has been moving with a velocity of 4-14 cm/year since 1940s. Kumsar et al. (2016) investigated the Babadağ-Gündoğdu creep-like landslide through an integrated study involving geomechanical characterization, multi-parameter monitoring and analyses. The DInSAR is an efficient remote sensing technique to evaluate ground deformation resulting from earthquakes, landslides and subsidence due to groundwater withdrawal, mining or tunnelling. This technique is applied to Babadağ-Gündoğdu creep-like landslide to evaluate deformation response due to landslide and the results are compared with aerial photogrammetry and in-situ monitoring studies.

Keywords: *Babadağ-Gündoğdu, Landslide, DInSAR, SBAS, Ground movement monitoring.*

ÖZ: *Denizli (Türkiye) ilinde Babadağ kasabasının Gündoğdu mahallesinde 2000 kişinin yaşadığı yerleşim birimlerini hasara uğratan 1940 yılından krip benzeri bir heyelan yıllık hızı 4-14 cm olarak hareket halindedir. Kumsar vd. (2016) krip benzeri Babadağ-Gündoğdu heyelanını çok parametreli izleme, jeomekanik özelliklerin belirlenmesi ve sayısal analiz gibi farklı yöntemler kullanarak bu heyelanı detaylı olarak incelemişlerdir. DInSAR yöntemi deprem, heyelan ve su çekmesi, madencilik veya tünel kazısı nedeniyle meydana gelen oturma hareketlerini izlemek üzere kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmada yazarlar bu yöntemi krip benzeri Babadağ-Gündoğdu heyelanına uygulamakta ve elde edilen sonuçları hava fotoğrafları yöntemi ile yerinde hareket izleme yönteminden elde edilen sonuçları karşılaştırmakta ve irdelemektedirler.*

Anahtar Kelimeler: *Babadağ-Gündoğdu, heyelan, DInSAR, SBAS, yer hareketi izlenmesi,*

1. INTRODUCTION

Slope failures may be caused as a result of various triggering factors; such as geological conditions, topography, time-dependent variation of physical and mechanical properties of discontinuities, geomechanical characteristics of geo-materials constituting the slope, groundwater, dynamic forces from natural and artificial sources and surface loading. Babadağ town of Denizli, which is located in western Turkey (Figure 1a) and founded on a hilly ground, is one of the oldest settlements. The Gündoğdu district of the town is under the threat of a creep-like landslide (Figure 1b) for more than 70 years and this instability resulted in a high risk for about 2000 people living in this part of the town (Önay, 1946; Özpınar et al. 1999, 2007). This landslide was investigated by Kumsar et al. (2016) using field measurements, in-situ geotechnical tests, laboratory geomechanical tests on slope forming materials and their discontinuities, multi-parameter monitoring techniques, stability analysis based on conventional limiting equilibrium methods and modified discrete finite element method (DFEM) (Aydan 2003; Aydan et al. 2003; Çelik 2011; Çevik & Ulusay 2003). This was a unique case history to implement the integrated study of geomechanical investigations, laboratory and in-situ tests, continuous multi-parameter monitoring and analytical and numerical analyses into practice in saving life of about 2000 people living in an active creep like landslide area before a disastrous event which may be caused

continuous heavy rainfalls and/or an earthquake with a magnitude larger than 6 in the close vicinity of Babadağ town (Aydan 2003; Aydan and Kumsar 2015).

(a) (b)

Figure 1. Location of Babadağ.

In this study, we conducted a time-series analysis using Sentinel (C-band) and ALOS (L-Band) with different wavelengths to evaluate the deformation range and amount of deformation, and verified the applicability by comparing it with the measurement data. Furthermore, the site-investigation clearly confirmed the movement was continuing.

2. GEOLOGY AND SEISMOTECTONICS OF BABADAĞ

In Babadağ and its surroundings, the Paleozoic-Mesozoic aged metamorphic rocks form the bedrock which are unconformably overlain by the Cenozoic aged sedimentary rocks. The bedrock, called Ortaköy formation (Öngür 1971; Çevik and Ulusay 2003), is mainly composed of mica schist, mica and quartz schist, *graphite schist, garnet* schist, amphibolite schist and occasionally marble. It extends towards higher altitudes at the south (Figure 2) and southern part of Babadağ town is located on the schists of this formation. In the study area, Cenozoic aged sedimentary rocks are represented by the Kolonkaya formation which consists of four members called Ahıllı marl, Babadağ sandstone-marl, Manastır conglomerate and Mollaahmetler conglomerate. The youngest sedimentary sequence in the study area is the Pliyo-Quaternary aged Kelleci conglomerate member of the Asartepe formation.

Babadağ town partly located on the Babadağ sandstone-marl member and is surrounded by Ahıllı marl member from its north and west (Figures 2 and 3). The Ahıllı marl member mainly consists of creamy white coloured marl and claystone with occasional limestone layers. The Babadağ sandstone-marl member conformably overlaying the Ahıllı marl member is observed in the town centre and in the Gündoğdu landslide area and consists of the alternation of light yellowish marl and sandstone. The sandstone layers are very weak and include sands of metamorphic origin, which are mainly micas. Their thicknesses vary from a few mm to 15 cm (Figure 3).

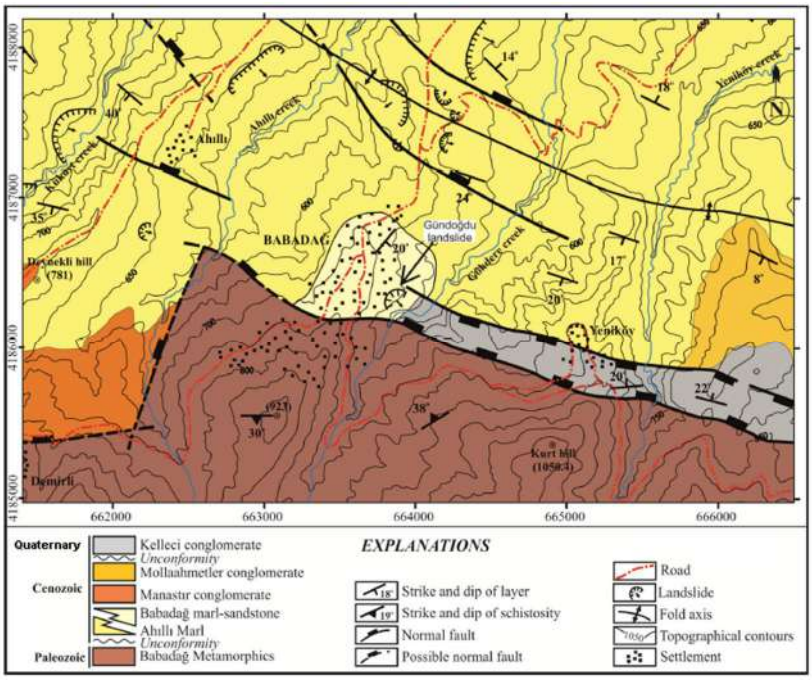


Figure 2. Geology of Babadağ and its close vicinity (from Kumsar et al. 2016).

Babadağ is located in the Büyük Menderes Graben of the West Anatolian Fault System of Turkey (Aydan and Kumsar 2015) and the Babadağ horst consists of listric normal faults dipping towards north as seen in Figure 2. The Babadağ fault, one of the faults in the site, forms the boundary between the metamorphic basement rocks and Cenozoic aged formations, and passes approximately through the middle of Babadağ town. Where it runs towards east in SE direction, the fault forms the boundary between the Quaternary and metamorphic basement and due to this, the fault is considered as an active fault.

(a) (b)

Figure 3. (a) A view of Babadağ-Gündoğdu landslide in 2003, and (b) Intercalated marl and sandstone (modified from Kumsar et al. 2016).

The Denizli basin is one of the most seismically active regions of Turkey (e.g. Eyidogan et al. 1971; Hançer 2013). The seismicity of the Denizli basin is divided into two broad groups, namely, historical seismicity and instrumental seismicity. Some antique cities in Denizli Province, Karacasu (Aydin Province), Büyük Menderes and Küçük Menderes basins were repeatedly destroyed by historical strong earthquakes (Aydan and Kumsar 2015). Therefore, it is most likely that the region can produce very large earthquakes in due time. The magnitudes of the earthquakes are less than 6.0 and their epicenters are located along the active fault zones in the basin (Kumsar et al. 2004). In addition, based on the assessments by Aydan (2003) possible future earthquakes with magnitudes of about 6 or higher can be anticipated in this region, which is within the 1st degree earthquake hazard zone according to the Earthquake Zonation Map of Turkey.

3. DEFORMATION AND MONITORING

3.1. Deformation Measurements by Aerial Photogrammetry

In this study, long-term ground deformation of a landslide through the use of aerial photogrammetry technique was first time applied to Gündoğdu district of Babadağ town (Figure 4a). The aerial photogrammetry was used to obtain ground strain, which was computed by using an interpolation technique of finite element method (Atak et al. 2003). A series of aerial photographs of Babadağ and its close vicinity taken by the General Command of Mapping of Turkey between 1960 and 2001 (1960, 1972, 1988, 1993 and 2001) were used to determine ground deformations for a period of 41 years. The base mesh of the area is shown in Figure 4b.

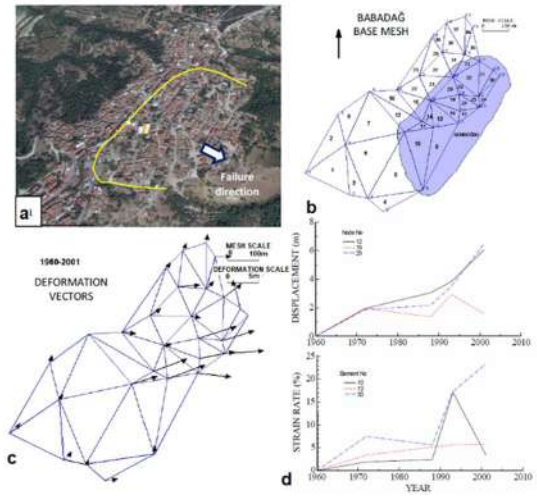


Figure 4. Aerial photogrammetry measurements (Modified from Kumsar et al. 2016).

Figure 5. Relative monitoring system (from Kumsar et al. 2016).

Figure 4c shows that the deformation rate of the Gündoğdu district is quite high between 1988 and 1993 and it seems increased when compared to the other date intervals of the measurement (Figure 8a). The computed tensile strains (Figure 4d) are consistent with ground cracks and damages of the houses in the Gündoğdu district (Atak et al. 2003; Kumsar et al. 2004; Tano et al. 2003, 2006). Although the deformation is within the accelerated creep stage, general tendency of the points 12 and 29 are alarming. The overall deformation rate ranges between 40 mm/year and 140 mm/year which are quite consistent with the deformation measurements using the relative displacement monitoring system.

3.2. Relative displacement monitoring system

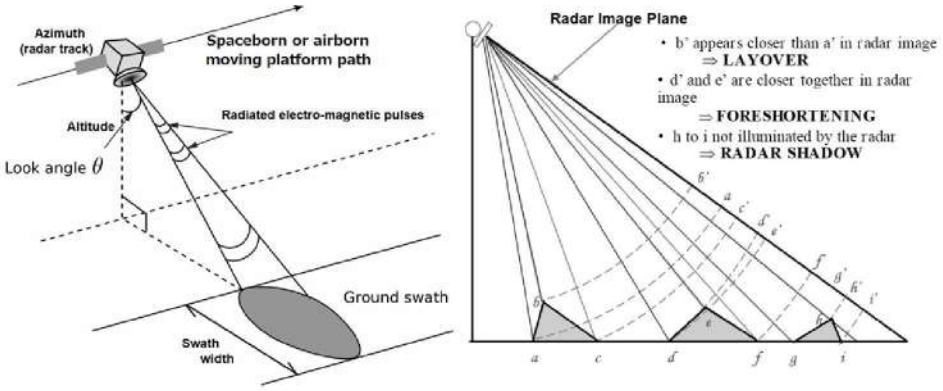
Tano et al. (2003, 2006) established an integrated monitoring system consisting of relative displacement, groundwater fluctuations, in-situ acoustic emissions and climatic conditions and this monitoring continued until 2014. The relative displacements were obtained from the variation of distances between structures on stable and unstable parts of the town along the perimeter of the unstable area using a portable laser-meter (weight: 800 g, allowable distance: 0.3-40 m, accuracy of distance: 1.5 mm, size: 5×8×20 cm). The points located at the boundary between the stable and unstable parts of the town are called base and target points, respectively (Figure 5), and three target points were marked at each base point.

The ground surface of Babadağ is covered by different pavement materials, and therefore, direct observations on the ground surface are difficult. The measurements by laser-meter were taken at 30 locations (Figure 5) between a base point to three target points, which were marked with water resistant painting and fixed to a metal plate. Sometimes these points were destroyed by humans mistakenly due to renovation works for the houses. The measurements were taken between 2005 and 2012 at six-month intervals (Tano et al. 2003, 2006; Kumsar et al. 2004, 2016).

4. SAR INTERFEROMETRY FOR LANDSLIDE ACTIVITY

4.1. Overview of SAR

A synthetic-aperture radar (SAR) is an imaging radar mounted on a airborn or spaceborn moving platform (Figure 5(a)). It transmits EMs sequentially and the echoes are collected and digitized and stored for processing. As transmission and reception of EMs occur at different times, they are mapped to different positions. The well ordered combination of the received signals results in a virtual aperture. It is therefore called "synthetic aperture" of an imaging radar. The range direction is parallel to the flight track and perpendicular to the azimuth direction. SAR utilizes the amplitude and the absolute phase of the backscattered radar signal. A SAR system transmits electromagnetic waves at a wavelength that can range from a few millimeters to tens of centimeters. The amplitude image records yields information on the terrain slope and surface roughness, while the phase image records are the information on the distance between the satellite and the Earth's surface. As the reflected signals of electromagnetic waves affected by the topography and objects on the ground surface, foreshortening and shadow occurs in reflected signals (Figure 5(b)). **Layover** occurs when the radar beam reaches the top of a tall feature before it reaches the base. **Layover effects** on a radar image is very similar to the effects resulting from foreshortening.



(a) (b)

Figure 5. (a) Main concept of the moving platform radar, and (b) Geometric distortions in radar imaging.

4.2 Concept of SAR Interferometry

Interferometry Synthetic-Aperture Radar (InSAR) utilizes the differential phase of two or more SAR images along the same trajectory. It is used to identify surface movements through time and it is radar technique for geodesy and remote sensing. The technique can measure milimetre-scale changes in deformation over spans of days to years. It has been applied for monitoring of natural hazards, such as earthquakes, volcanoes and landslides, and in structural engineering, in particular monitoring of subsidence and structural stability. InSAR has the potential to detect ground surface motion phenomena with the accuracy of a small fraction of the radar wavelength, usually from 3 (X-band) to 24 cm (L-band) on large areas. In general, detection accuracy is estimated to be 1/10 to 1/15 of the wavelength. There are some limitations, such as the size and geometry of the monitoring area and the vegetation that covers the site. The ascending and descending tracks observe a slope movement that is not facing N or S. The vegetation causes temporal decorrelation and thus inability to distinguish between a local slope movement and a vegetation movement. Low frequency SAR systems can overcome this limitation to some extent (e.g. L-band SAR satellites such as Japanese ALOS-2) by its penetration capacity. However, observations by ALOS-2 in the same mode are performed only about four times a year, and acquisition data are expensive. Satellites with shorter wavelengths (e.g. C-band SAR satellites such as Sentinel-1A (S-1A)) overcome the decorrelation due to vegetation growth by a frequent revisit time. S-1A revisit a track every 12 days and offers a good opportunity for monitoring ground surface displacements as S-1A provides free and open access data at a high spatial resolution (10m×10m).

Differential interferometry synthetic aperture radar (DInSAR) utilizes two SAR images of the same area acquired at different times. If the distance between the ground and satellite changes between the two acquisitions due to surface movement, a phase shift occurs. DInSAR is a tool to identify progressing movement. Differential interferometry or DInSAR is interferometry itself. The only difference is that topographic effects are compensated by using a Digital Elevation Model (DEM) of the area of interest, creating what is referred to as a differential interferogram.

4.3 Small Baseline Subset Method

SAR data are sometimes severely affected by noises. To improve the accuracy of the DInSAR results, Small Baseline Subset (SBAS) technique (Berardino et al. 2002) is one of the most extensively used techniques. SBAS technique is a DInSAR approach allowing us to generate the mean deformation velocity patterns and deformation time series for each coherent pixel. The features of the SBAS technique are its ability reduce the decorrelation effect caused by the noises and errors from many interferograms and its capacity to isolate only the phases that were contributed by the deformation. In order to reduce the noises, the interferogram multi-looks operation is conducted using the interferograms with small orbital baselines for time-series analyses. Generally, a minimum of 15 SAR images are needed to perform SBAS process, and the more SAR images are better. The absolute phase, spatial deformation, is calculated by phase unwrapping process for eac interferogram. h Though interferogram processing is affected by the noises in the low-coherence area (Raucoules et al. 2007), the coherence threshold is set at 0.2, which means the pixels with coherence of less than 0.2 are not involved in the calculation and are removed. SBAS method is employed in this study along with the quadratic model (Berardino et. al. 2002), which is implemented using the software ENVI SARscape 5.5.1 (Sarmap 2020).

5. APPLICATIONS TO BABADAĞ-GÜNDOĞDU LANDSLIDE

5.1. Sentinel-1A data availability

A total of 60 SAR images of S-1A were used to conduct a time-series analysis by SBAS. The acquisition dates were 10 December 2017 to 12 December 2019. The SAR data were taken during the ascending passage and in a right-looking direction. Figure 6 shows a direction of landslide movement and the satellite path. Since the surface ground is relatively flat and the movement of the landslide is the same as the east-west direction perpendicular to the orbit of the satellite, the extraction accuracy is expected to be high. Therefore, there are layover and shadow effects. Figure 7 shows the S-1A images at their particular acquisition date and their relations among each other to create interferometric pairs. The yellow and green dots in these figures represent the super master and the slave of the SAR data, respectively. The black lines represent the interferograms that pass the SBAS minimal requirements. The maximum allowable perpendicular and temporal baselines of the interferogram are 200 m and 60 days, respectively. Accordingly, 198 interferograms were generated for SBAS technique.

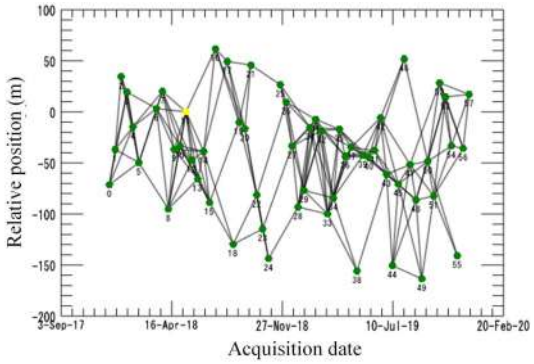


Figure 6. Landslide direction and the satellite path. Figure 7. Baseline-time plot of the S-1A data.

Figure 8 shows the coherence distribution map (with a threshold of 0.2) related to the pair of 10 December 2017 and 12 December 2019. The image pixel was selected as 15m × 15m. The phase noise can be estimated from the interferometric SAR pair by means of the local coherence. The coherence value ranges from 0 (the interferometric phase is just noise) to 1 (complete absence of phase noise). The low-coherence shows temporal and spatial decorrelation, resulting from changes in shape and moisture content of the earth surface and dense vegetation coverage. The uncolored pixels in the eastern half means the pixels with coherence of less than 0.2 caused by dense vegetation coverage. The landslide area inside yellow line corresponds to low-coherence area, and the surface state change can be evaluated from this coherence map. Figure 9 shows the mean deformation velocity map from 10 December 2017 to 12 December 2019 using the SBAS technique of DInSAR. The negative values refer to an increase of sensor- of sensor-to-ground distance. The uncolored area in the eastern half means that no results were obtained due to the low coherence of the interferogram. Despite the coherence of SAR data is poor, the maximum amount of absolute deformation is estimated to be about 60-80 mm/year. The overall deformation rates by aerial photogrammetry measurements reported by Kumsar et al. (2016) ranged between 40 mm/year and 140 mm/year for a period of 40 years. The relative displacement measurements reported by Tano et al. (2003, 2006) was up to 50 mm/year. to-ground distance and the positive values indicate a decrease.

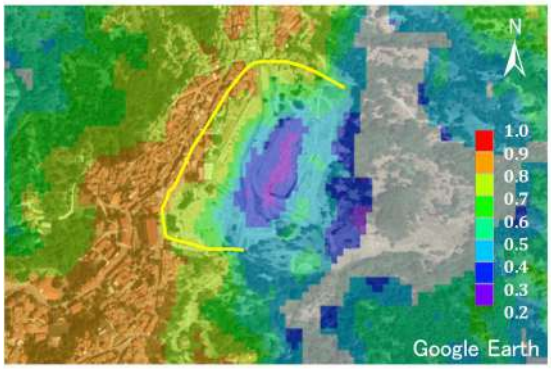


Figure 8. Coherence distribution map.

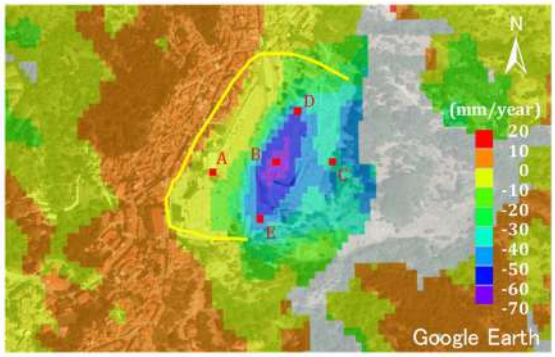


Figure 9. Mean velocity map by SBAS analysis.

Figure 10 shows the time-series of landslide deformation for the selected points in Figure 9. At all points, the deformation continues monotonically. The seasonal variation due to the difference in rainfall is not well pronounced as that reported by Tano et al. [8],[9] and Kumsar et al. [4],[18]. The maximum deformation is 130 mm at point B, center of landslide, although it becomes 70 to 100 mm at the edge of the landslide. All points are moving similarly, so it is clear that the deformation is not local and the landslide is moving uniformly over the time.

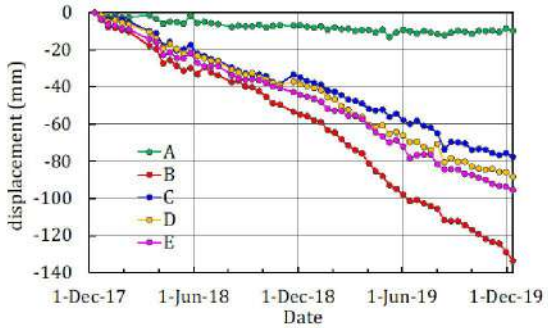


Figure 10. Time-series of landslide deformation for the selected points in Figure 10

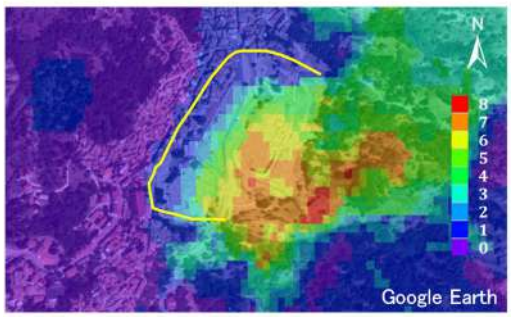


Figure 11. A distribution map of the number of times in total 11 interferences, which exceeds the measurement accuracy, 2cm.

5.2. ALOS-2 data availability

As only 12 SAR images of ALOS-2 were acquired in four and a half years, 30 November 2014 to 31 March 2019, it is not possible to perform time-series analysis using the SBAS technique. The number of interferences with displacements greater than the measurement accuracy was counted, taking

advantage of the characteristics of the L-band on ALOS-2 that are not susceptible to noise such as vegetation and land surface changes. The measurement accuracy is generally said to be 1/10 to 1/15 of the wavelength, and the measurement accuracy was 2cm. The image pixel was selected as 15m × 15m. Figure 12 shows a distribution map of the number of times in total 11 interferences, which exceeds the measurement accuracy. More than five regions are distributed inside the landslide region indicated by the yellow line, and this method can also be used to estimate the landslide area. In the results of analysis using S-1A data, deformation was concentrated near the middle of the landslide. However, the deformation area analyzed using ALOS-2 data spread to the east and are wider than that of S-1A. Furthermore, there is a slight difference in evaluation, such as no deformation near the westside boundary of the landslide.

6. RECENT IN-SITU OBSERVATIONS

Two of the authors have visited the landslide area several times after the demolition of the building and structures in the landslide area. The area was re-habilitated as an open-space for open-bazar and parking area as seen in Figure 12. Some reinforced concrete retaning-walls were constructed in the original landslide area. We recently visited the area in September, 2019 and noticed that some recently built structures were deformed and the structures near the boundary between moving and stable parts were still continuiting to deform as a result of continuing landslide movement as seen in Figure 13 and 14. Figure 13a shows the present situation of the building nearby No.1 monitoring station (see Figure 5 for location). The largest opening type of movement was observed by Tano et al. (2003, 2006) and Kumsar et al. (2016). A long reinforced concrete wall clearly display the effects of landslide induced deformation. Depending upon the location, tilting of the wall, opening or shearing of joints between reatining wall blocks are observed as seen in Figure 14.

Figure 12. A view of rehabilitated landslide area in September 2019

(a) Building near No.1 Station (b) Utility pole

Figure 13. Views of structures in the vicinity of south boundary of the landslide (see also Figure 5 for location)

(a) Tilting (b) Shearing (c) Opening

Figure 14. A view of the reinforced concrete retaning-wall and some indications of landslide induced movements.

6. CONCLUSIONS

A creep-like landslide has negatively affected the life of people living in the Gündoğdu district of Babadağ town for more than seventy years. The authors presented an application of the DInSAR technique using the SAR data of Sentinel-1 (C-Band) and ALOS-2 (L-Band) to the landslide area for the first time. Despite the coherence is poor, the deformation area analyzed by InSAR are in accordance with those measured by Kumsar et al. (2016) and Tano et al. (2003, 2006). Furthermore, the results of the SBAS analyses of the DInSAR data are consistent with monitoring results reported by Kumsar et al. (2016).

7. REFERENCES

Atak O, Aksu O, Aydan Ö, Çevik Y. "The evaluation of long-term ground deformation of the landslide area of Babadağ through aerial photogrammetry technique". *An International Colloquium on the Instrumentation and Monitoring of Landslides and Earthquakes in Japan and Turke*y, Koriyama, Japan, 133-142, 2003.

Aydan Ö. "The mechanism of the long-term landslide at Babadağ". An International Colloquium on The Instrumentation and Monitoring of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey, Koriyama, Japan, 39-50, 2003.

Aydan Ö, Kumsar H. "Assessment of the earthquake potential of the west Aegean region of Turkey based on seismicity, tectonics, crustal deformation and geo-archaeological evidence and its geotechnical aspects". *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 74, 1037–1055, 2015.

Aydan Ö, Ulusay R, Kumsar H, Çevik Y. "Laboratory and in-situ tests on rocks and bedding planes and machinery induced vibrations of Babadağ landslide area". *An International Colloquium on the Instrumentation and Monitoring of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey*, Koriyama, Japan, 91-100, 2003.

Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383, 2002.

Çelik SB, Kumsar H, Aydan Ö. "The investigation of the mechanism of Babadağ Gündoğdu landslide through static and dynamic physical model tests". *ROCMEC'2011-Xth Regional Rock Mechanics Symposium*, Ankara, Turkey, 196-170, 2011 (in Turkish).

Çevik YS, Ulusay R. "An overview of Babadağ (Turkey) landslide". An International Colloquium on the Instrumentation and Monitoring of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey, Koriyama, Japan, 17-26, 2003.

Eyidoğan H, Güçlü U, Utku Z, Değirmenci E. "Macro-seismic catalogues of large Turksih earthquakes (1900-1988)". *Faculty of Mines*, *ITU*, İstanbul, Turkey, 1991 (in Turkish).

Hançer M. "Study of the structural evolution of the Babadağ-Honaz and Pamukkale Fault zones and the related earthquake risk potential of the Buldan region in SW Anatolia, East of the Mediterranean". *Journal of Earth Science*, 24 (3), 397-409, 2013.

Kumsar H, Aydan Ö, Tano H, Atak O. "An investigation of a long-term landslide of Babadağ (Denizli) from a rock mechanics point of view". *ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*, Sivas, Turkey, 277-287, 2004 (in Turkish).

Kumsar H, Aydan Ö, Tano H, Çelik S.B., Ulusay R. "An Integrated Geomechanical Investigation, Multi-Parameter Monitoring and Analyses of Babadağ-Gündoğdu Creep-like Landslide". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 2277-2299, 2016.

Önay TS. "Landslides in the vicinity of Babadağ". *Bulletin of Mineral Research and Exploration*, 36, 300-304, 1946 (in Turkish).

Öngür T. "Geological investigation and geothermal potential of Denizli-Babadağ and surrounding". MTA, Ankara, Turkey, *MTA Report,* 4689, 1971 (in Turkish).

Özpınar Y, Köseoğlu M, Çobanoğlu İ, Ok R, Sabaz Ü. "Mass movements and their classification around Babadağ (Denizli) and its surrounding". *1st Symposium on Babadağ,* Denizli, Turkey, 24-38 (in Turkish), 1999.

Özpınar Y, Köseoğlu M, Çobanoğlu İ, Ok R. "Gündoğdu landslide of Babadağ (Denizli) town center". *1st Symposium on Babadağ*, Denizli, Turkey, 39-50, 1999 (In Turkish).

Raucoules, D. Colesanti, C, Carnec, C. **"**Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence**".** *Comptes Rendus Geoscience*, 339(5), 289-302, 2007.

Sarmap. "Getting started with SARscape for Windows". http://www.sarmap.ch/ (10.03.2020)

Tano H, Abe T, Aydan Ö, Kumsar H, Kaya M, Çelik SB, Ulusay R. "Long-term monitoring of Babadağ landslide through an integrated monitoring system with an emphasis on AE responses and ground straining". *Symposium on Recent Applications in Engineering Geology*, Denizli, Turkey, 131-141, 2006 (in Turkish).

Tano H, Kumsar H, Aydan Ö, Ulusay R. "The assessment of the Babadağ landslide behavior by a simple field measurement system". *An International Colloquium on the Instrumentation and Monitoring of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey*, Koriyama, Japan, 1-9, 2003.

Mermerlerde Isıl Etkiyle Oluşan Bozunma Düzeyinin Laboratuvarda Yersel Lazer Taraması ile Belirlenmesi

Determination of Degree of Deterioration in Thermally Treated Marble by LIDAR in The Laboratory

D. Karapınar[1,*], R.A. Kucak[2], Y. Mahmutoğlu[1]

[1] İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
[2] İTÜ İnşaat Fakültesi Geomatik Mühendisliği Bölümü
*(*dilekkarapinar@itu.edu.tr)*

ÖZ: Sıcaklık değişimleri mermerin bozunmasında en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle, eski tarihi yapılarda kullanılan mermerin fiziksel ve mekanik özellikleri zamandan olumsuz etkilenmektedir. Diğer taraftan, restorasyon çalışmalarının planlanması için yapı taşlarının bazı özellikleri bilinmelidir. Koruma veya onarım çalışmalarını değerlendirmek için taşların karakterizasyonu, özelliklerini ölçmek için yaygın olarak yapılan bazı deneyler vardır. Bununla birlikte, çoğu durumda, tarihi binalardan örnek almak mümkün değildir. Bu nedenle, yapı taşlarının bozunma derecesinin tahmini için tahribatsız deney yöntemleri önerilmektedir. Benzer amaçlar için en pratik yöntemlerden biri, kolayca yapılabilen ultrasonik hızı ölçümüdür. Bu çalışmada, ısıl işlemle daha önce bozulmuş mermerlerin yoğunluğunu ölçmek için terrastrial lasser tarayıcı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar Muğla mermerinin fiziksel özelliklerinin LIDAR tarafından elde edilen ultrasonik hızları ve yoğunluğu ile güvenilir bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mermer, Ultrasonik hız, Isıl hasar, Lazer Yoğunluk, Yersel Lidar.

ABSTRACT: *Thermal fluctuation is one of the most important agents on deteriorations of marble. Therefore, physical and mechanical properties of marble used in old historical structures are adversely affected by time. On the other hand, some properties of building stones are always required for decision of rehabilitation works. Several kinds of conventional tests have been suggested for characterization of stones, to measure their properties or to evaluate conservation or repair works. However, in most cases, sampling from historical buildings is not possible. Therefore, nondestructive testing methods are often suggested for the prediction of weathering grade of building stones. One of the most practical methods for similar purposes is ultrasonic pulse velocity measurement, which can be performed easily. In this study, terrastrial lasser scanner has been employed to measure the instensity of marble previously deteriorated by thermal treatment. The experimental results indicated that physical properties of Muğla marble can be reliably estimated by ultrasonic pulse velocities and intensity obtained by LIDAR.*

Keywords: *Marble, Pulse velocity, Thermal treatment, Laser Intensity, LIDAR.*

1. GİRİŞ

Mermer, tarihsel dönemde mimari elemanların yapımında en yaygın kullanılan taş türüdür. Ancak atmosferik etkenlere hassas olup, sınırlı dayanıklılığa sahiptir. Yağmur, kar, periyodik sıcaklık değişimi rüzgar ve kirletici gibi etkenler, bu tür yapı taşlarının yapısal sağlamlığı ve görünümünde olumsuz etkiler oluşturur. Sıcaklık, bozunma hızını ve taş içerisinde tuz göçünün paternini etkileyebilmektedir. Yüksek sıcaklık kimyasal değişim hızında artış, düşük sıcaklık donma-çözülme problemine, ani sıcaklık değişimi ise farklı genleşmeden dolayı iç gerilmeye neden olmaktadır (Mahmutoğlu, 2017). Mineral bileşiminden dolayı, atmosfer sıcaklığındaki periyodik değişim mermerlerin bozunmasında çok büyük öneme sahiptir. Birçok farklı neden ileri sürülsede, genel görüş termal salınımın olayın esas kaynağını oluşturduğu yönündedir. Isıl etki nedeniyle mermerlerde şekerlenme problemi oluşmaktadır. Genellikle antik ve modern yapıların dış elemanlarında görülen mermerin şekerlenmesi bu tür bir bozunma olayıdır. Ancak, pratikte laboratuvar deneyleri için antik yapılardan ve tarihi eserlerden örnek alınması mümkün olmadığından, kullanılan taşların mühendislik özellikleri çoğu zaman geleneksel deneylerle kolayca belirlenememektedir. Bu nedenle, yapı elemanlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yerinde uygulanabilen hasarsız deney teknikleri tercih edilmektedir.

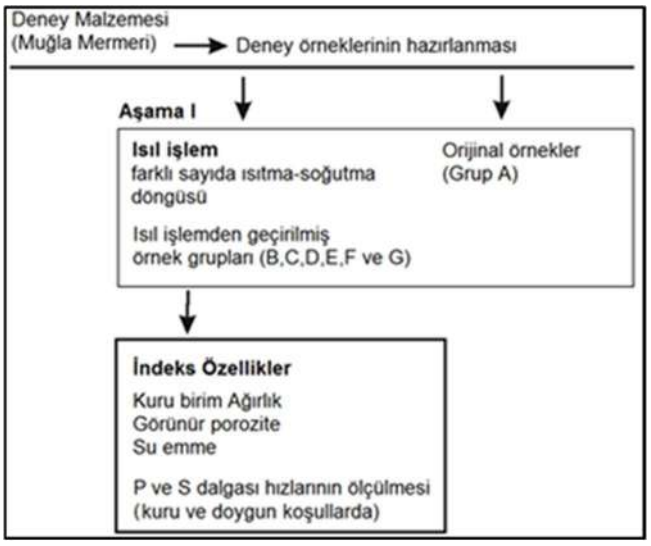
Tarihi eserler ve antik yapıların 3B modelleme çalışmaları, başta Geomatik mühendisleri, mimarlar olmak üzere diğer mühendislik dalları için de çok önemli çalışmalardır. Bu yapıların belgelenme ve modelleme çalışmaları için birçok jeodezik ve fotogrametrik yöntem kullanılmaktadır. Bunlar arasından en çok tercih edilenlerden biri olarak yersel Lidar (Light Detection And Ranging) sistemleri öne çıkmaktadır. Lidar sistemleri bir yapının x,y,z koordinat değerlerinin yanı sıra, lazer ışınlarını yansıtma yoğunluğu (intensity) değerini de ölçmektedir. Bu değer Geomatik Mühendisliğinin birçok uygulamasında (Kent Bilgi Sistemleri, Röleve Çalışmaları, 3B Modelleme) sınıflandırma amaçlı tercih edilmektedir. Yer bilimlerinde iseson dönemlerde lidar teknolojisi kullanılarak arazide farklı jeolojik birimleri ayırmak, yüzeyde gözlenen renk farklılıkların tespitinde, sayısal yüzey modellemesi, yüzey pürüzlülüğü tespitinde kullanılan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (örn: Bellian vd. 2005, Franceschi vd. 2009, Lee ve Jeon 2017). Lazer intensity değerlerinin kayanın birçok parametresinden etkilenebileceği ve dolayısıyla kaya sınıflama çalışmalarında kullanılabilecek bir yöntem olduğunu gösteren bazı çalışmalarda mevcuttur (Burton vd. 2011). Bu çalışmada da yersel lazer tarayıcı (Leica Scan Station C10 by Leica GeoSystems) ile farklı düzeylerde ısıl işlem görmüş Muğla mermer numuneleri taranmıştır ve intensity değerleri ile deneysel olarak belirlenen fiziksel özellikler arasındaki ilişki irdelenmiştir.

2. KULLANILAN MALZEME VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada, numuneler ısıl işleme tabi tutulmuş ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca yersel lazer tarayıcıyla intensity değerleri her bir numune grubu için belirlenmiştir.

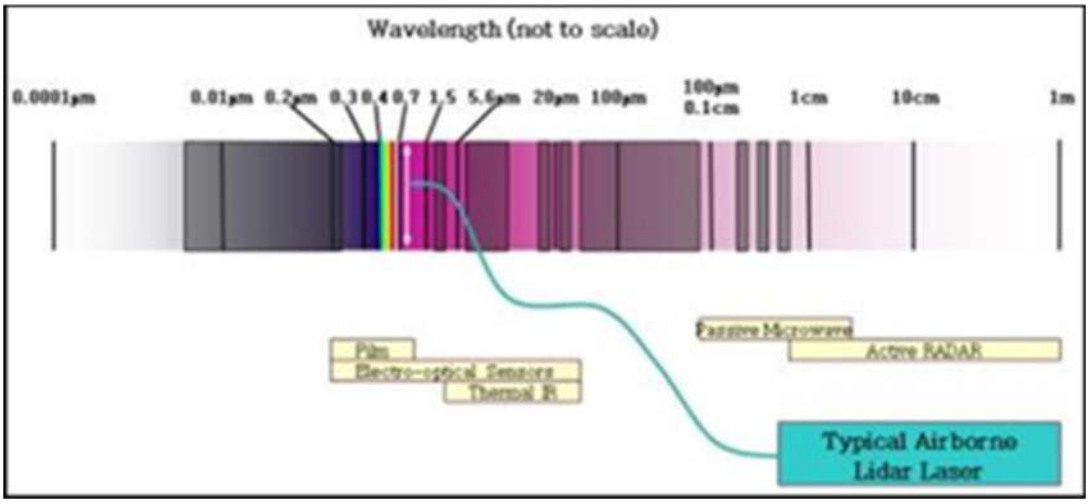
2.1. Deney Örneklerinin Hazırlanması ve Isıl İşlem Yöntemi

Deney malzemesi olarak olabildiğince homojen ve izotrop özelliklere yakın Muğla Kavaklı Dere bölgesinde işletilmekte olan iri kristalli mermer seçilmiştir. Genellikle düzgün şekilli taneleri düz ve hafif eğrilikte olup kayaç homoblastik dokuya sahiptir. Mikroskopta incelenen kesitlerde tane boyunun genellikle 0.5-2 mm arasında değiştiği, kimyasal olarak ise % 99 $CaCO_3$'den oluştuğu belirlenmiştir. Isıl işlem periyodunun sayısına bağlı olarak kalsit taneleri arasındaki örselenme ve açılmanın arttığı, malzemenin tane sınırları boyunca kohezyonun kısmen kaybolduğu saptanmıştır (Mahmutoğlu 2006). Deneylerde, ISRM 2007 tarafından önerilen şartlar göz önünde tutularak hazırlanan, çapı 54mm ve boy/çap oranı en az 2-2.5 olan silindirik numuneler kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan 42 adet örnek tek bir bloktan, aynı yönde alınmıştır. Daha sonra 6'şar numuneden oluşan 7 gruba rastgele ayrılmıştır. Her bir örnek grubundan beş numune deneylerde kullanılmış, geriye kalan bir numune ise yedek olarak tutulmuştur. Örnek gruplarından biri dışında (A grubu), diğerleri farklı sayıda ısıtma soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Isıtma işlemi kalsit kristalinin kimyasal özellikleri değişmeden sadece kalsit taneleri arasındaki örselenme ve açılmanın sağlandığı, malzemenin tane sınırları boyunca kohezyonun kısmen kaybolduğu 400°C, soğutma ise 20°C' sıcaklıkla sınırlandırılmıştır. Isıl işlem aşamasında (Şekil 1),



Şekil 1.Örnek hazırlama, ısıl işlem aşamaları ve deneysel çalışmaları gösteren akım şeması.

G grubuna giren örnekler bir kez 12 saat süreyle, diğer D, B, C, E, F örnek grupları ise art arda 24 saatlik sürelerle sırasıyla 1, 2, 3, 4, 8 ısıtma soğutma döngüsüne tabi tutulmuştur. Bu aşamanın sonunda örneklerin tümünün birim hacim ağırlığı, görünür porozitesi, su emmesi, kuru ve doygun haldeki P ve S dalgalarının hızları (Vpd, Vps, Vsd ve Vss) ölçülmüştür Bu deneysel çalışmalar (ASTM D2845-08, 2008) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



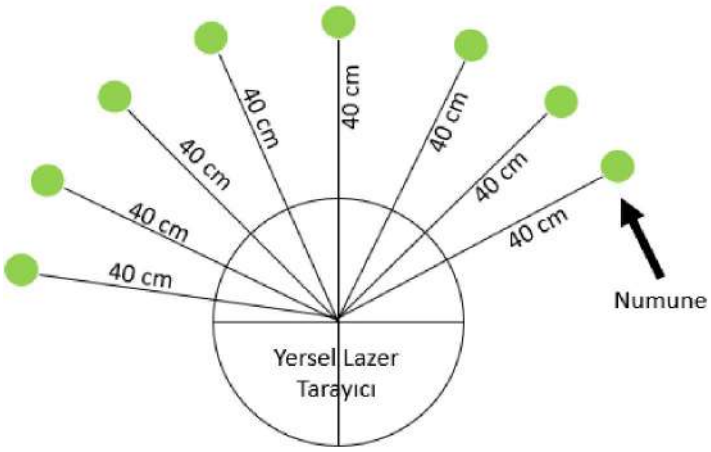
Şekil 2. Lazer Işını Dalga Boyu (URL 1)

Yersel lazer tarayıcılar yatay ve düşey yönde dönebilen bir mekanizmaya sahiptir. Modüle edilen lazer ışını aletin elektronik biriminden çıkar ve büyük bir hızla dönen optik kısma çarpar ve özel bir açı ile aletten çıkar. Lazer tarayıcı bu açıyı elde ettikten hemen sonra bir sonraki açıyı elde etmek için düşey eksen etrafında çok küçük bir açı ile döner (Vozikis vd., 2004). Bu işlem periyodik olarak tarama işlemi bitene kadar devam eder. Taramalar esnasında büyük bir nokta bulutu elde edilir ve bu noktalar kümesindeki her bir nokta kutupsal koordinatlarla ifade edilir. Bu nokta bulutunun içinde "intensity" olarak ifade edilen lazer ışığının yüzeyden yansıma enerjisi her bir nokta için kaydedilir. Bunun yanında, yüksek çözünürlüklü kamera sistemlerine sahip lazer tarayıcılar sayesinde, fotoğraflar da kayıt edilmekte ve bu fotoğraflar sayesinde renkli nokta bulutları elde edilebilmektedir. (Kuçak 2014)

Yersel Lidar sistemleri ölçme yöntemine ya da teknik özelliklerine göre sınıflandırılır. Bütün uygulamalarda kullanılabilen bir yersel lazer tarayıcı tanımlamak oldukça zordur. Kapalı mekânlar ve orta mesafelerde farklı yersel lazer tarayıcılar, açık mekânlarda ve daha uzun mesafelerde farklı lidar sistemleri kullanılır. Bu nedenle uygulamaya bağlı olarak en uygun yersel lazer tarayıcının seçilmesi önemlidir (Kuçak 2014).

Yersel lazer uygulaması sırasında doğal güneş ışığın olması, laboratuvar veya başka bir ışık kaynağından etkilenmemesi ölçümlerde önemli etkenlerden biridir. Bu yüzden, laboratuvar koşullarında doğal güneş ışıkları ile aydınlanmış bir ortamda ölçümler yapılmıştır. Fakat, lazer ışığı bulunduğu ortam dolayısıyla farklı ışıklardan etkilense dahi, intensity değerinin aynı ortamda ve aynı malzemeye sahip yapılar için eşit yansıma koşullarından etkileneceği düşünüldüğünde, değerlendirme aşamasında bir problem olmayacaktır. Aynı malzemenin intensity değeri farklı zamanlarda bir ölçüm yapılması durumunda farklı intensity değerleri olarak ölçülecektir. Bu çalışmada Şekil 4a ve 4b aynı örneklerin farklı zamanda ve farklı açıdan ölçülen intensity değerlerinin farklılığını göstermektedir. Ölçümlerin ortam ışığına bağlılığı yöntemin sınırlamasını oluşturmaktadır. Dolayısıyla bulunan değerler aynı koşullarda yapılmış ise birbirine göre göreceli olarak değerlendirilmelidir.

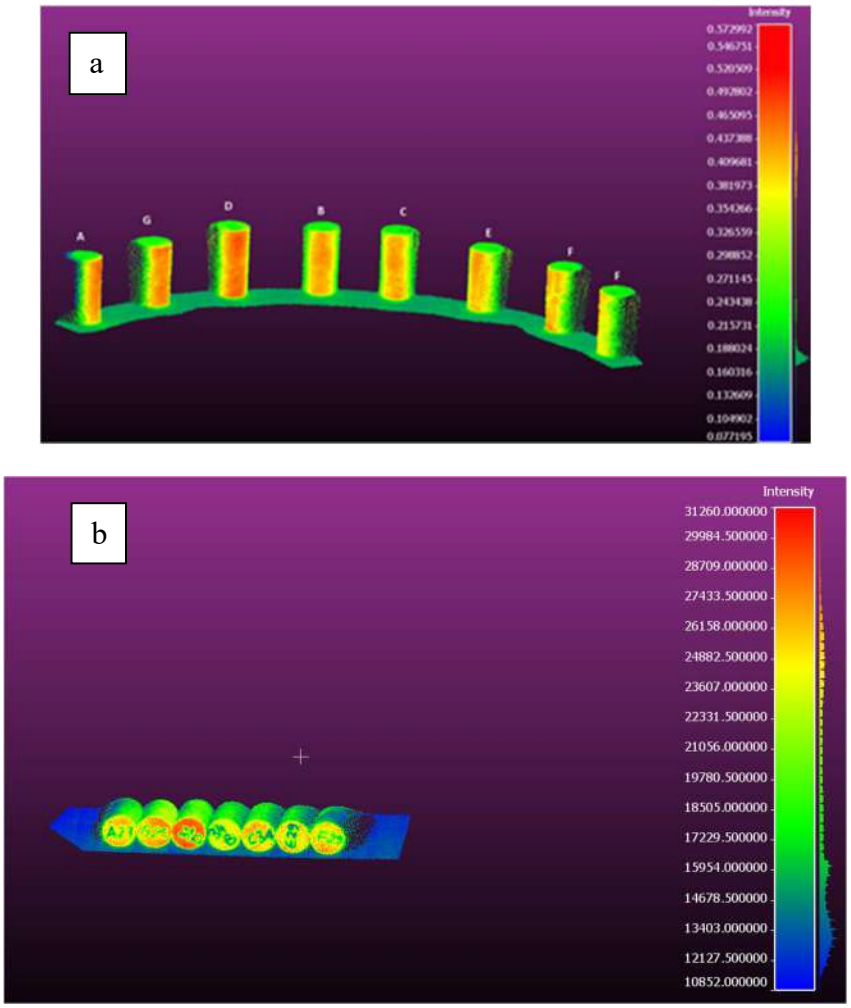
Bu çalışma da seçilen alet, Leica Scan station C10, 532 nm dalga boyuna sahip, 50 metrede 6 mm nokta konum doğruluğuna sahiptir. Leica C10 ile Şekil 2'de belirtildiği gibi numuneler 40 cm uzaklığa yaklaşık 15 grad açı aralığıyla yerleştirilmiştir ve bütün numuneler tek seferde medium tarama sıklığı ile aynı mesafeden taranmıştır (Şekil 3). Bu tarama sonucunda Cloud Compare açık kaynak kodlu yazılımı kullanılarak numunelerin intensity değerleri basit regresyon analizleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Yersel lazer ile numunelerin taranması.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada "Leica C10" Yersel Laser tarayıcısı ile 7 farklı ısıl işlem görmüş mermer numunesi üzerinden bir çalışma yapılarak. Lazer intensity (Yoğunluk) değerinin değişimi incelenmiştir (Şekil 4).



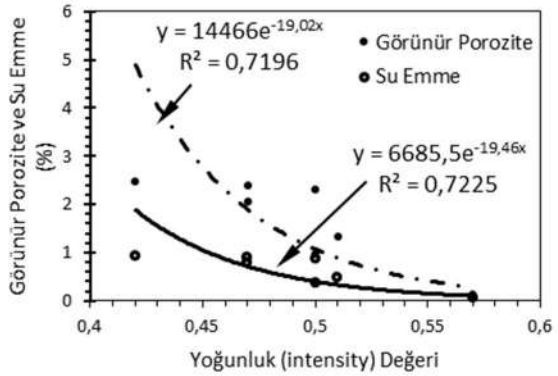
Şekil 4. Lazer ışını intensity(yoğunluk) değerleri, boydan ölçüm (a) çaptan ölçüm (b).

Yapılan ölçümler neticesinde en az 5 ısıl işlem gören numune ile en çok ısıl işlem gören mermer numuneleri arasında önemli farklar belirlenmiştir. Isıl işlem gördükçe intensity değerinin azaldığı görülmüştür. Fakat, Şekil 4 de D ve C numuneleri azalma trendini bozan etkiler belirlenmiştir. Bu değişimlerde numunelerin hazırlanması sırasında oluşabilecek farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

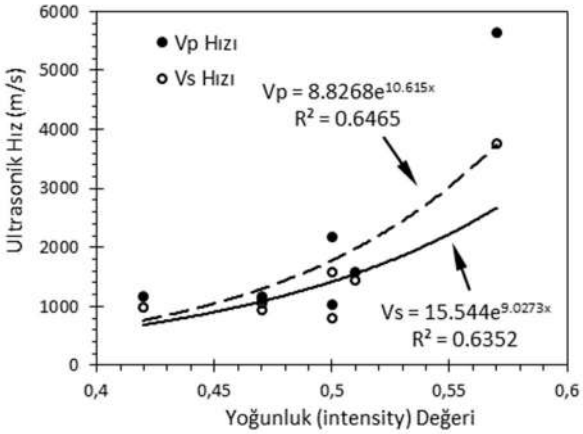
Deneysel olarak elde edilen fiziksel özellikler ile lazer taraması sonucunda boydan ölçümlerle elde edilen intensity değerleri karşılaştırıldığında basit regresyon analizlerinde korele edilebilir oldukları belirlenmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6). Şekillerden de görüldüğü üzere görünür porozite-intensity değeri arasında R^2=0.7196, su emme-intensity arasında R^2=0.7225 ilişkileri görülmektedir. Ultrasonik dalga hızları-intensity değerleri ise R^2=0.6465 ve 0.6352 korelasyon katsayıları tanımlanmıştır.

Çizelge 1. Deneye tabi tutulan örnek kategorilerinin fiziksel özellikleri ve lazer ışınını yansıtma yoğunluğu (instensity).

Örnek Kategorisi	Isıl İşlem Sayısı	γ_d (kN/m^3)	n_a (%)	a_w (%)	Vp (m/s)	Vs	I_{ort}	I_{max}
A	0	27.10	0.14	0.05	5636	3759	0.39	0.57
G	1/2	26.90	0.96	0.36	2182	1576	0.39	0.50
D	1	26.76	1.32	0.49	1583	1445	0.40	0.51
B	2	26.49	2.07	0.78	1160	949	0.38	0.47
C	3	26.43	2.31	0.87	1027	808	0.37	0.50
E	4	26.34	2.39	0.91	1111	1044	0.37	0.47
F	8	26.32	2.47	0.94	1170	981	0.34	0.42



Şekil 5. Deney örneklerinin görünür porozitesi, su emmesi ve lazer ışınlarını yansıtma yoğunluğu (intensity) arasındaki ilişki.



Şekil 6. Deney örneklerinin ultrasonik hızları ile lazer ışınlarını yansıtma yoğunluğu (intensity) arasındaki ilişkiler.

4. KAYNAKLAR

Bellian, J.A., Kerans, C. and Jennette, D.C., 2005. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning LIDAR technology in stratigraphic modeling. Journal of Sedimentary Research, 75(2), 166-176.

Burton, D., Dunlap, D. B., Wood, L. J., & Flaig, P. P. (2011). Lidar intensity as a remote sensor of rock properties. Journal of Sedimentary Research, 81(5), 339-347.

Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A. and Girardi, S., 2009. Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6), 522-528.

Kuçak, R.A., 2012. Almanya Karlsruhe Şehrinde bulunan Tarihi Çin Çay Evi Chinese Tea House Binasının Yersel Lazer Tarama Yöntemi ile 3 Boyutlu Dokümantasyonu. 6. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Afyon.

Lee, S.D. and Jeon, S.W., 2017. A Study on the Roughness Measurement for Joints in Rock Mass Using LIDAR. Tunnel and Underground Space, 27(1), 58-68. (in Korean)

Mahmutoglu, Y., 2006. The effects of strain rate and saturation on a micro-cracked marble. Eng.Geol. 82, pp. 137–144.

Mahmutoglu, Y., 2017. Prediction of weathering by thermal degration of a coarse-grained marble using ultrasonic pulse velocity. Environ. Earth Sci. 76;435.

Vozikis, G., Haring, A., Vozikis E., and Kraus, K., 2004, Laser Scanning: A New Method for Recording and Documentation in Archaeology, FIG Working Week May 22-27 2004 Athens, Greece.

URL 1: E-education, Lidar, https://www.e-education.psu.edu/lidar/book/export/html /1798, 10.02.2013.

Basınçlı Su Testlerinin Maden Hidrojeolojisi Çalışmalarında Kullanımı ve Karşılaşılan Sorunlar

Use of Water Pressure Tests in Mining Hydrogeological Works and Encountered Problems

D. Tayyar[1,*], M. Ekmekçi[1], H. Yazıcıgil[2]

[1]Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü Beytepe/Ankara
[2]Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Çankaya/Ankara
([*]d.tayyar@gmail.com)

ÖZ: Maden işletmelerinde, işletme verimi ve güvenliğini etkileyen yeraltısuyuna bağlı sorunların etkin çözümü, litolojik ortamın hidrolik karakteristiklerinin sağlıklı ve temsil edici bir şekilde belirlenmesini gerektirir. Bu kapsamda ortamda yeraltısuyu akış hızını ve miktarını kontrol eden parametrelerin başında hidrolik iletkenlik katsayısı gelmektedir. Arazi ve/veya laboratuvar deneyleri ile belirlenebilen hidrolik iletkenlik katsayısının heterojen ortamlarda düşey yöndeki değişiminin elde edilmesi özellikle nümerik modelleme çalışmaları açısından büyük bir önem taşımaktadır. Basınçlı su testi, geçirgenliği düşük olan kaya kütlelerinin hidrolik iletkenlik katsayılarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Test, kuyunun izole edilmiş belirli bir kısmında, farklı basınç kademeleri altında belirli bir süre su basılması ve bu sürede oluşan su kayıplarının takibi ile gerçekleştirilir. Test sonuçları Lugeon (Lu) değeri ve hidrolik iletkenlik katsayısı (K) olarak ifade edilmektedir. Sunulan bildiride, bir açık ocak işletmesinde cevher çıkarılan metamorfik ve magmatik birimlerin hidrolik iletkenlik katsayısını derinlikle değişimini belirlemeye yönelik yapılan basınçlı su testlerinin gerçekleştirilmesinde izlenen yöntem ve yöntemin uygulanmasında yapılan hatalar ile testlerin sonuçlarını değerlendirme yaklaşımları tartışılmıştır. Çalışma sahasında, belirlenen kritik kesitler boyunca açılan 11 adet dar çaplı (PQ) kuyuda, 882 basınçlı su testi uygulanmıştır. Basınçlı su testlerinden elde edilen sonuçlar metasediment ve diyorit birimlerinin benzer hidrojeolojik özellik gösterdiği kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik İletkenlik Katsayısı, Basınçlı Su Testi, Lugeon Değeri, geçirgenlik, Hidrolik Karakteristik

ABSTRACT: *Effective solution of groundwater related problems affecting operational efficiency and safety in mining facilities requires determination of the hydraulic characteristics of the lithological environment in a healthy and representative manner. In this context, the hydraulic conductivity comes first among parameters controlling the groundwater flow rate and amount in the hydrogeologic environment. Obtaining the vertical variation of the hydraulic conductivity, which can be determined by field and/or laboratory tests in heterogeneous environments, has great importance especially for numerical modeling studies. Packer test is one of the commonly used methods for determining the hydraulic conductivity of rock masses with low permeability. The test is carried out by water injected into a certain isolated part of the well under different pressure levels for a certain period of time and measuring the water losses that occur during this period. Test results are given in terms of Lugeon (Lu) value and hydraulic conductivity (K). In this paper, to determine the variation of the hydraulic conductivity with depth of the metamorphic and magmatic units from which ore is extracted in an open pit mine, packer test method and common mistakes in the implementation of packer tests and the approaches to evaluate the results of the tests were discussed. In the study area, 882 packer tests were conducted in 11 small diameter (PQ) wells drilled along the pre-determined critical sections. Although the results obtained from the packer tests showed that the metasediment and diorite units have similar hydrogeological properties and these units can be considered as a single hydrostratigraphic unit.*

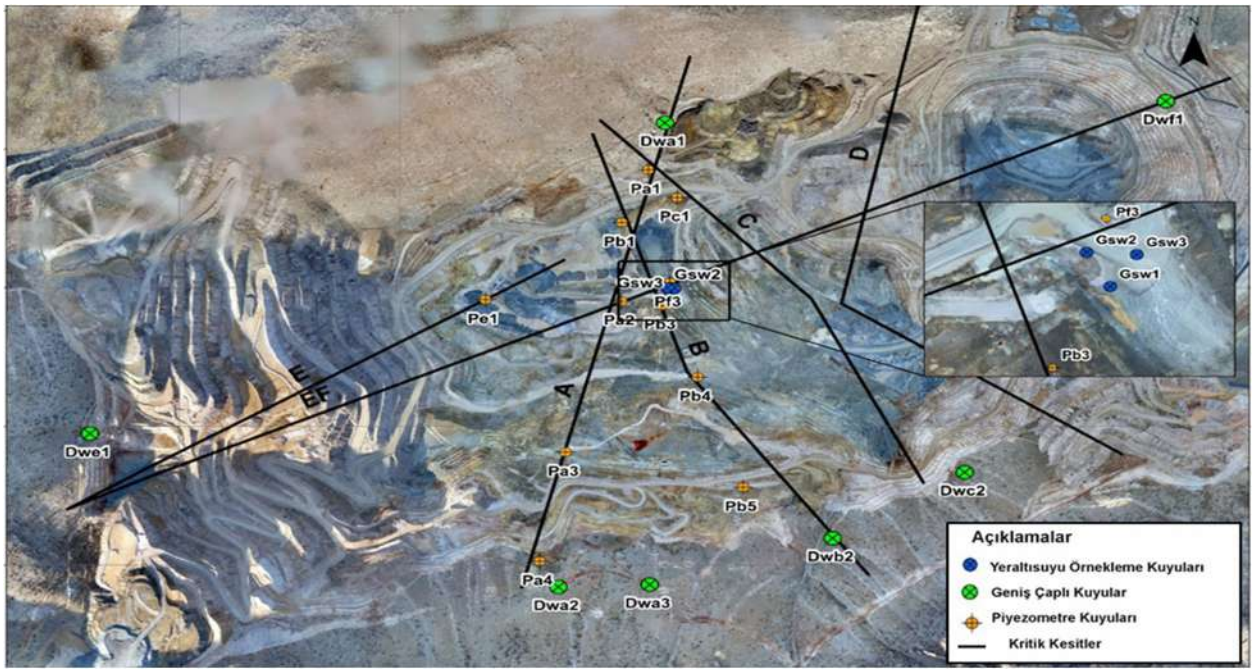
Keywords*: Hydraulic Conductivity, Packer Test, Lugeon Value, Permeability, Hydraulic Characteristic*

1. GİRİŞ

Maden sahalarında yeraltısuyunun varlığı, potansiyel olarak madencilik faaliyetlerinde işletme verimini ve güvenliğini etkileyen sorunlara yol açmaktadır. Sahadaki madencilik faaliyetlerini tehdit edebilecek

yeraltısuyu ile ilgili sorunların öngörülmesi ve ardından çözüm önerilerinin geliştirilmesi, hidrojeolojik ortamın tasarım/planlama ve işletme aşamalarında ihtiyaç duyulan parametrelerin elde edildiği karakterizasyonu gerektirir. Bu kapsamda, litolojik ortamın hidrolik karakteristiklerinin sağlıklı ve temsil edici bir şekilde ortaya konması için özellikle yeraltısuyu akış hızı ve miktarını kontrol eden parametrelerin başında gelen hidrolik iletkenlik katsayısının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, ortamın hidrolik iletkenlik katsayısının belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmış olup sunulan bildiride geçirimliliği düşük olan kaya kütlelerinde sıklıkla kullanılan basınçlı su testi uygulamasına ve değerlendirmelerine yer verilmiştir.

Çalışma alanı, Erzincan ili sınırları içinde bulunan bir açık ocak işletmesidir. Maden sahasında farklı derecelerde alterasyona uğramış farklı litolojik birimlerde yeraltısuyu sızıntıları, fayların kesiştiği makaslama zonlarında ileri derecede altere olmuş kesimlerde yoğunlaşmıştır. Bu durum, öncelikle cevher çıkarılan metamorfik ve magmatik birimlerde detaylı bir hidrojeolojik kavramsallaştırma ve karakterizasyonu zorunlu kılmıştır. Çalışma kapsamında, duraysızlık analizi amaçlı tanımlanan kesitler üzerinde 11 adet dar çaplı (PQ) kuyu ve 10 adet geniş çaplı kuyu açılmıştır (Şekil 1). Basınçlı su testleri 11 adet dar çaplı kuyuda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Kritik kesitler boyunca açılan geniş ve dar çaplı kuyuların konumları.

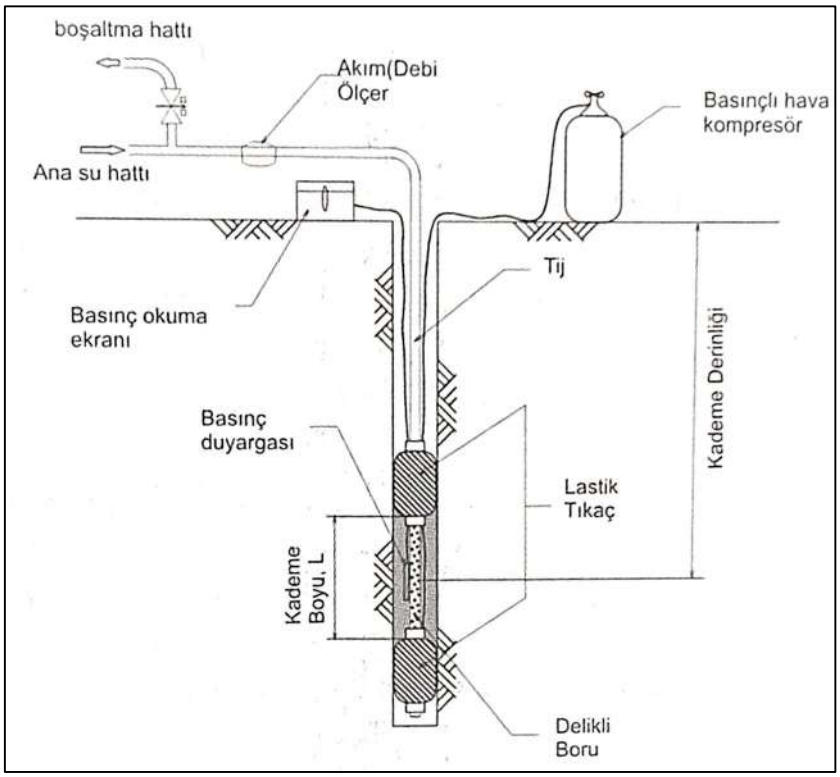
2. BASINÇLI SU TESTİ (BST)

2.1. Amaç, Yöntem ve Değerlendirme

Basınçlı su testi (BST), kaya kütlesinin enjeksiyon karışımı alabilme kapasitesinin belirlenmesine yönelik olarak sahada uygulanan hidrolik test yöntemlerinden biridir. Uygulamalar arttıkça, test sonuçlarının kaya kütlesinin geçirimliliği açısından da yorumlanabileceği ortaya konmuştur. Test sonuçları günümüzde, kırıklı kaya kütlesinin hidrolik iletkenlik katsayısını belirlemek için de kullanılır hale gelmiştir. BST, tek bir lastik tıkaç (paker) veya iki tıkacın şişirilerek kuyunun izole edilmiş bir test bölümüne, farklı basınç kademeleri altında belirli bir süre su basılması ve bu sürede oluşan su kayıplarının kaydedilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Test sonuçları Lugeon (Lu) değeri ve bu değerden belirli bir varsayımla hesaplanan hidrolik iletkenlik katsayısı (K) cinsinden ifade edilir. Test, özellikle heterojen ortamlarda hidrolik iletkenlik katsayısının düşey yöndeki değişiminin elde edilmesinde sıklıkla tercih edilen yöntemlerdendir (Ekmekçi, 2012).

BST, belirli kademe aralıklarında (genellikle 2 veya 5 m), 2,4,6,8 ve 10 bar basınç altında, her bir test kademesi 10'ar dakika olacak şekilde gerçekleştirilir. Sonuçların akış rejimini dikkate alarak değerlendirilebilmesi açısından testin "geri dönüşlü" yapılması gerekmektedir (Ekmekçi, 2012). Örnek olarak, 2-4-6-8-10 bar ile yapılan test ardından 10-8-6-4-2 bar kademeleri ile tekrar yapılmalıdır. Standartlaştırılmış basınçlı su testi tasarımı Şekil 2'de gösterilmiştir.

UNESCO (1984), kuyudaki akışın genel olarak radyal ve düzlemsel olduğu için testin analizinin silindirik akış yaklaşımı ile yapılabileceğini belirtmiştir. Silindirik akış için basitleştirilmiş formül Eşitlik (1)'de verilmiştir.



Şekil 2. Basınçlı su testi tasarımı (Quinonez-Roso,2010).

$$K = \frac{Q}{2\pi L \Delta h} ln \frac{R}{r} \quad (1)$$

Burada,
K: kuyu eksenine dik yöndeki (yatay) hidrolik iletkenlik katsayısı (m/s)
Q: test sırasındaki su kaybı (m^3/s)
L: testin yapıldığı kademe boyu (m)
Δh: su kaybına neden olan hidrolik yük farkı (m)
R: etki yarıçapı (m)
r: test kuyusunun yarı çapı (m)

UNESCO (1984)'e göre ln [R / r] değerinin etki yarıçapına bağlı değişimi küçüldüğünden Eşitlik (2)'de olduğu gibi bu değerin "7"e yaklaştığı kabul edilebilir. Eşitlik (1)'de birim test uzunluğu başına su kaybını temsil eden Q/L, 1 dakika boyunca meydana gelen su kaybı l/dak/m cinsinden verilirse Eşitlik (3) elde edilir.

$$ln \frac{R}{r} \cong 7 \quad (2)$$

$$K\,(cm/s) = 1.85x10^{-5}\ \frac{Q/L}{\Delta h} \quad (3)$$

BST sonuçları genellikle geçirgenlik birimi olan "Lugeon" (Lu) olarak ifade edilir. 1 Lugeon birimi (Lu), 10 atmosfer basınç altında 1 m kademe boyundan 1 dakikada meydana gelen su kaybı olarak Eşitlik (4)'deki gibi tanımlanmıştır (Houlsby,1976).

$$Lu = 100\ \frac{Q/L}{\Delta h} \tag{4}$$

Eşitlik (3) ve Eşitlik (4) kullanılarak cm/s cinsinden hidrolik iletkenlik katsayısı (K) ile Lugeon (Lu) birimi ilişkisi Eşitlik (5)'de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$K\ (cm/s) = 1.85x10^{-7}\ Lu \tag{5}$$

2.2. Basınçlı Su Testi Uygulamasında Karşılaşılan Sorunlar

Ekmekçi (2012), basınçlı su testlerinde karşılaşılan sorunları iki ana başlık altında incelemiştir. Bunlar: a) testin yapılış aşamasında karşılaşılan sorunlar ve b) sonuçların değerlendirme sürecinde yapılan hatalar. Basınçlı su testi sonuçlarının doğruluğu, test uygulamasının ne kadar dikkatli ve özenli yapıldığı ile yakından ilişkilidir. Uygulama aşamasında takip edilmesi gereken en önemli iki değişken net basınç ve test süresince oluşan su kayıplarıdır. Net basınç hesabında yaşanan temel sorunlar, boru ve lastik tıkaçlardan dolayı oluşan kayıplar ve manometrede basıncın okunmasında yapılan hatalardır. Test kademesinin üst ve alt sınırlarına basınç duyargalarının yerleştirilmesi, net basınç hesaplamalarında yapılan hataların azalmasını sağlayacaktır (Ekmekçi, 2012). BST uygulamalarında karşılaşılan diğer bir sıkıntı ise kademede meydana gelen su kaybının ölçülmesinde yaşanan sorunlardır. Su kaybını ölçmede duyarlılığı yüksek akımölçer ve su sayacının kullanılması yapılabilecek hataların önüne geçebilmektedir. Akımölçer, kararlı akım koşullarının belirlemesinde oldukça önemlidir (Ekmekçi, 2012).

Basınçlı su testleri genel olarak 5 basınç aşamasında (2,4,6,8,10 bar) yapılır. Litostatik basıncın uygulanan basınçtan daha küçük olduğu sığ derinliklerde bu basınç değerlerinin uygulanması, test kademesinde yerel geçirgenliğin artmasına sebep olacak yeni kırık sistemlerinin oluşmasına sebep olabilmektedir. Ekmekçi (2012), test kademelerinde uygulanacak en büyük basıncın, testin yapıldığı derinlikteki en küçük asal gerilmeden daha küçük olması gerektiğini vurgulamıştır. Her kademe için uygulanması gereken en büyük basınç değeri Eşitlik (6)'da verilmiştir (Houlsby, 1976). Testin gerçekleştirildiği kaya kütlesinin birim hacım ağırlığının 2700 kN/m3 olduğu varsayımıyla,

$$P_{max} = 0.226\ x\ D \tag{6}$$

eşitliği ile elde edilebilir.

Burada, P_{max} bar cinsinden uygulanması gereken en büyük basınç, D ise m cinsinden test kademesi merkezinin derinliğidir. P_{max}'ın belirlenmesinden sonra, diğer aşamaların basınçları şu şekilde belirlenmelidir (Houlsby, 1976; Roeper vd., 1992; Quinones-Rozo, 2010): I. Aşama= 0.4 P_{max}; II. Aşama= 0.7 P_{max}; III. Aşama= P_{max}; IV. Aşama= 0.7 P_{max}; V. Aşama=0.4 P_{max}

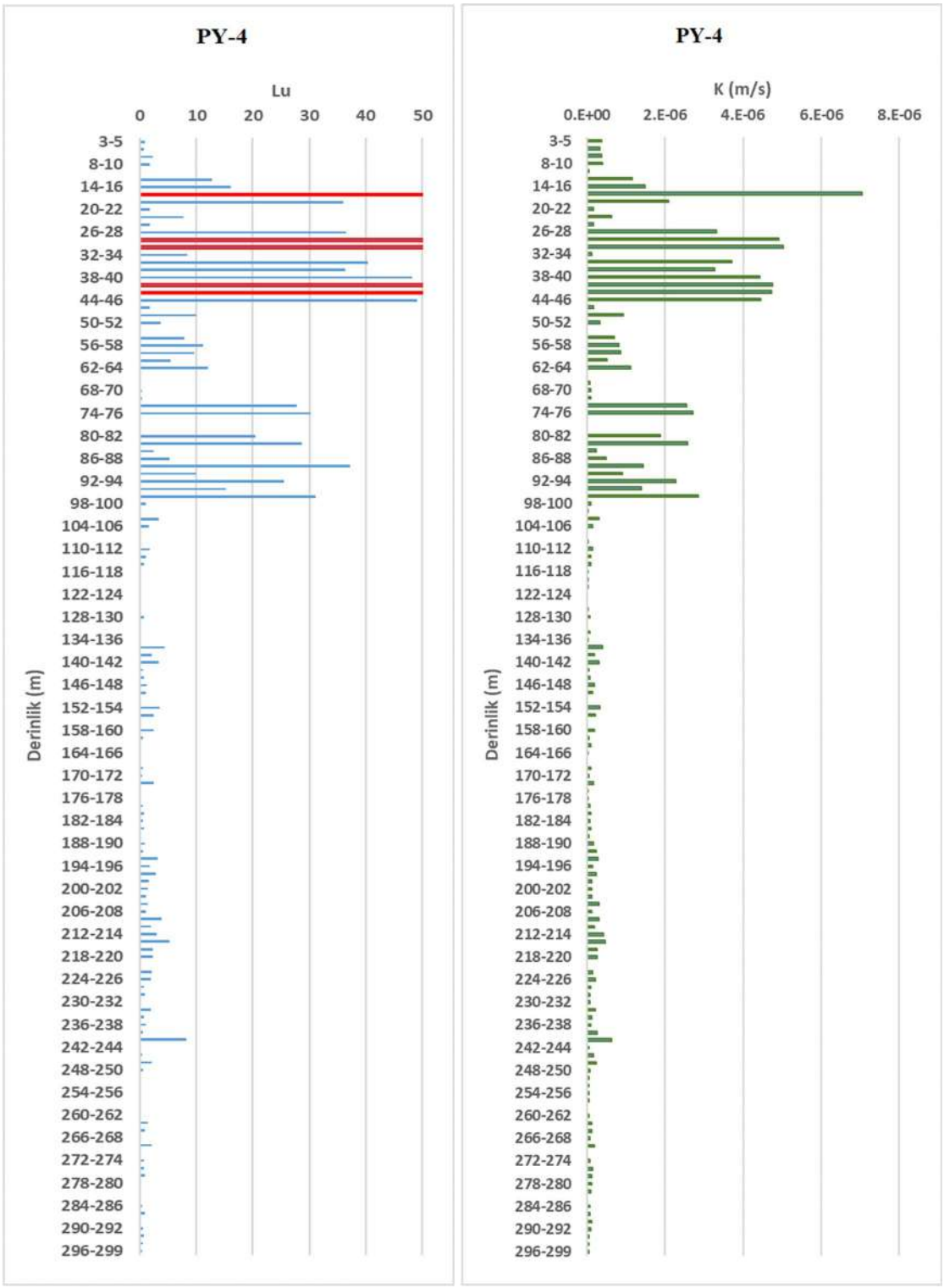
Basınçlı su testlerinde karşılaşılan temel sorunlardan bir diğeri ise sonuçları değerlendirme aşamasında yapılan hatalardır. Geçirgenliği yüksek olan ortamlarda yapılan basınçlı su testlerinde bazı basınç aşamalarında basıncın yükselmemesi ve bu durumda hidrolik iletkenlik/geçirimlilik hesaplamalarının basıncın yükseldiği aşamalardaki su kaybına göre yapılması, ortamın geçirgenliğinden daha düşük geçirgenlik değerlerinin hesaplanmasına yol açacaktır. Sonuçları değerlendirmede yaygın bir şekilde yapılan bir diğer hata ise hidrojeolojik ve enjeksiyon amaçlı değerlendirmeler farklı akış rejimleri dikkate alınarak yapılmaması ve enjeksiyon amaçlı değerlendirmelerden elde edilen geçirgenlik değerlerinin hidrojeolojik çalışmalarda kullanılmasıdır.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışma alanında, 11 dar çaplı (PQ) kuyuda 882 basınçlı su testi yapılmıştır. Yüksek çözünürlüklü bir karakterizasyon elde etmek için test aralığı 2 m'ye ayarlanmıştır. Testler, bildirinin önceki kısımlarında anlatıldığı gibi kurgulanmış ve uygulanmıştır. Her test aralığında en az 10 dakika süreyle beş basınç aşaması uygulanmış ve su kayıpları her 5 dakikada bir kaydedilmiştir. Su kaybı kayıtlarında önemli bir farklılık olduğu durumlarda, kararlı durum koşullarını elde etmek için test 5 dakika daha uzatılmıştır. Sonuçlar Lugeon (Lu) geçirgenlik değerlerini elde etmek için değerlendirilmiştir. Geçirgenlik (Lu) değerleri, sabit bir etki yarıçapı varsayılarak hidrolik iletkenlik (m/s) değerlerine dönüştürülmüştür. Hesaplanan geçirgenlik değerleri, ortamı karakterize etmek için kritik kesitlerde değerlendirilmiştir. Sonuçların histogramları, kuyulardaki geçirgenliğin düşey yöndeki değişimini göstermiştir. Örnek olarak çalışma alanındaki dar çaplı bir kuyunun BST sonuçlarını gösteren histogramlar Şekil 3'de sunulmuştur. 50 Lu'dan büyük değerler dikkatle değerlendirilmiş ve histogramlarda kırmızıyla işaretlenmiştir.

BST sonuçlarının litolojilere göre değerlendirilmesi sonucunda, metamorfik ve magmatik birimlerin benzer değerler gösterdikleri ortaya konmuştur. Bununla birlikte test sonuçları, bu birimlerin düşeyde, geçirgenlik açısından farklı davranışlar gösterebildikleri, fay ve makaslama zonlarında bu değişkenliğin önemli düzeyde arttığını göstermiştir. Çalışma kapsamında, her kuyu için gerçekleştirilen BST sonuçlarının istatistikleri Tablo 1'de verilmiştir. Maden sahasında titreşen telli piyezometre ölçümlerinin gösterdiği düşey yönde bir hidrolik gradyanın yaygın olduğu gerçeği dikkate alınarak, hidrojeolojik açıdan değerlendirilen test sonuçlarının aritmetik, geometrik ve harmonik ortalamaları hesaplanmıştır (Çizelge 1). Kavramsal ve sayısal modelde tanımlanan katmanları ve düşey yönde akımı karakterize etmek için harmonik ortalamalar kullanılmıştır. Her bir kuyu için hesaplanan varyasyon katsayısı çok yüksektir, bu da ortamın yüksek derecede heterojen olduğunu göstermektedir.

Genel olarak geçirgenliğin derinlikle azaldığı görülmektedir. Yüzeyden ilk 30-50 m yüksek geçirgenlik, yaklaşık 50-120 m arası orta-düşük geçirgenlik ve 120 m'den derin kesimlerde ise düşük-çok düşük geçirgenlik olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 3. PY-4 kuyusunun geçirgenlik (Lu) ve hidrolik iletkenlik katsayısı (m/s) histogramları

Çizelge 1. Her bir kuyu için a) Lu ve b) m/s birimlerinde elde edilen geçirgenlik değerlerinin temel istatistiklerinin özeti

Lu Değerlerinin Temel İstatistikleri							
Piyezometre ID	Min.	Maks.	Aritmetik Ort.	Geometrik Ort.	Harmonik Ort.	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
PY-1	0.001	358.55	61.76	5.85	0.02	75.07	121.6
PY-2	0.001	160.43	10.89	1.14	0.03	34.19	314.1
PY-3	0.001	136.77	20.26	3.32	0.01	38.18	188.4
PY-4	0.001	76.46	6.97	0.91	0.02	14.13	202.7
PY-5	0.029	1.71	0.66	0.53	0.36	0.37	56.5
PY-6	0.001	3.71	0.71	0.32	0.04	0.79	111
PY-7	0.03	521.64	17.59	0.8	0.42	90.99	517.4
PY-8	0.427	3.15	1.41	1.33	1.26	0.51	36.1
PY-9	0.001	150.05	4.66	0.12	0	21.65	464.7
PY-10	0.001	52.96	2.22	0.62	0.01	7.17	322.8
PY-11	0.187	104.55	12.28	5.46	2.14	16.44	133.9

(a)

K (m / s) Değerlerinin Temel İstatistikleri							
Piyezometre ID	Min.	Maks.	Aritmetik Ort.	Geometrik Ort.	Harmonik Ort.	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
PY-1	1.00E-10	2.02E-05	5.21E-06	5.08E-07	1.82E-09	6.18E-06	118.7
PY-2	1.00E-10	1.48E-05	1.07E-06	1.03E-07	3.25E-09	3.31E-06	310.3
PY-3	1.00E-10	1.21E-05	1.80E-06	2.92E-07	1.15E-09	3.24E-06	180
PY-4	1.00E-10	7.05E-06	6.28E-07	1.18E-07	1.55E-09	1.25E-06	199.2
PY-5	1.32E-08	1.44E-07	6.06E-08	5.18E-08	4.28E-08	3.22E-08	53.1
PY-6	1.00E-10	3.39E-07	6.54E-08	3.34E-08	4.77E-09	7.03E-08	107.5
PY-7	3.70E-09	5.10E-05	1.77E-06	7.33E-08	4.02E-08	9.14E-06	518
PY-8	3.82E-08	2.71E-07	1.28E-07	1.22E-07	1.15E-07	4.22E-08	33
PY-9	1.00E-10	1.37E-05	4.27E-07	1.38E-08	4.68E-10	1.96E-06	458.3
PY-10	1.00E-10	8.05E-06	2.89E-07	6.36E-08	1.35E-09	1.10E-06	378.7
PY-11	2.42E-08	9.64E-06	8.28E-07	3.93E-07	1.91E-07	1.34E-06	162.1

(b)

4. SONUÇLAR

Basınçlı su testi, geçirgenliği düşük kaya ortamlarında hidrolik iletkenlik ve geçirgenlik değerlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Uygulamada yapılan bazı temel hatalar, hesaplanan geçirgenlik değerlerinin hidrojeolojik çalışmalarda doğrudan kullanılamamasına yol açmaktadır. Yapılan başlıca hatalar, uygulama aşamasında yapılan ve değerlendirme aşamasında yapılan hatalar olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Bu kapsamda uygulamada yapılan temel hataları gidermek adına testlerin kademeye yerleştirilecek basınç duyargaları ile yapılması ve su kaybı ölçümlerinin su sayaçları ve akımölçer yardımı ile kaydedilmesi gerekmektedir. Testlerde uygulanacak maksimum basıncın kademe derinliğine göre belirlenmesi ve her bir basınç kademesinin uygulanacak maksimum basıncın belirli oranlarına göre ayarlanması sağlıklı sonuç elde etmek açısından oldukça önemlidir. Sonuçlar değerlendirilirken hidrojeolojik ve enjeksiyon amaçlı değerlendirmeler için farklı akış rejimleri dikkate alınarak yapılmaması ve enjeksiyon amaçlı değerlendirmelerden elde edilen geçirgenlik değerlerinin hidrojeolojik çalışmalarda kullanılması yapılan temel hatalardandır.

Çalışma alanında, 11 adet piyezometre kuyusunda basınçlı su testleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek çözünürlüklü geçirgenlik karakterizasyonu elde etmek amacıyla test aralığı 2 m olarak ayarlanmıştır. BST sonuçlarına göre metasediment ve diyoritlerin benzer hidrojeolojik özellik gösterdikleri ortaya konmuştur. Bu nedenle, bu iki birimin maden sahasında tek bir hidrostratigrafik birim oluşturduğu kabul edilmiştir. Bu birimin basınçlı su testlerinden elde edilen düşey geçirgenlik profilleri ortamın farklı hidrolik iletkenlik değerlerine sahip katmanlara bölündüğünü göstermiştir. Bu alt bölünmeler ve sonuçların temel istatistikleri, metasediment-diyorit biriminin yüksek derecede heterojen bir yapıya sahip olduğunu kanıtlamıştır.

5. KATKI BELİRTME

Yazarlar, Ferhat Kalkan, Çidem Argunhan Atalay, Engin Günay ve Otgonbayar Namkhai'ye destekleri ve değerli katkıları için teşekkür eder.

6. KAYNAKLAR

Ekmekçi, M. 2012. Basınçlı Su Testleri ve Kaya Akifer Ortamlarının Karakterizasyonunda Kullanım Olanakları, 65. Yıl Mahir Vardar Jeomekanik, Tünelcilik ve Kaya Yapılarının Tasarımı Özel Oturumu, 526-532.

Houlsby, A.C.1976. Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test. Quarterly Journal of Engineering Geology, 9:303-313.

Quinones-Rozo, C. 2010. Lugeon Test Interpretation, Revisited. Abstract, 30th Annual Conference 494olüme, "Collaborative Management of Integrated Watersheds", US Society of Dams, 405-414.

Roeper, T.R., Soukup, W. G & O'Neill, R. L. 1992. The Applicability of the Lugeon Methods of Packer Test Analysis to Hydrogeologic Investigation. Focus Conference on Eastern Regional Groundwater Issue, National Groundwater Association, Dublin, 8(3):29-36

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) 1984. Guide to the hydrology of carbonate rocks, place de Fonteny, 75700 Paris, France, 345.

Su Tutma Yapıları / *Water Retaining Structures*

An Experimental Study on the Waves Induced by Rock Slope Failures in Dam Reservoirs

Baraj Rezervuarlarında Kaya Şev Duraysızlıkları Sonucu Dalga Oluşumu Üzerine Deneysel Bir Çalışma

Y. Murayama[1], N.T. Özcan[2], Ö. Aydan[1], T. Ito[1]

[1]Dept. of Civil Engineering, Faulty of Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, 903-0213, Okinawa, Japan
[2]Dept. of Geological Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey
*(*k208482@eve.u-ryukyu.ac.jp)*

ABSTRACT: The stability of rock blocks and rock slopes adjacent to dam reservoirs, lakes and sea inlets under both subaerial and submerged conditions is of great concern in relation to their failure as they may cause catastrophic tsunami-like events (impulse wave instead) as observed in Vaiont Dam Reservoir in Italy in 1963. There are different causes of such failures. The causes would be the rise of water level, which result in weakening of rocks and/or structural discontinuities and the reduction of effective stress and seismic loads. The authors carried out some model tests on the waves induced by rock blocks whose failure modes are sliding, toppling or sliding-toppling and planar failures of rock slopes into reservoirs. The blocks and slopes were made of Ryukyu limestone. In this study, the authors present the outcomes of these experimental studies and present the characteristics of waves induced in the reservoirs upon the failure of blocks or slopes.

Keywords: *Slope failure, planar sliding, reservoir, model tests, waves*.

ÖZ: *1963'te Vajont Baraj Gölü'nde meydana gelen şev kayması sonucu oluşan tsunami büyük can ve mal kaybına neden olmuştur. Baraj rezervuar alanı, deniz girintisi ve göl gibi alanlarda oluşabilecek şev kaymaları sonucunda gelişebilecek tsunamiler oldukça önem arz ettiğinden bu konuda araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Yenilmelerin oluşum nedenleri oldukça farklıdır. Vaiont Baraj Rezervuarında olduğu gibi su seviyesinde yükselme sonucu etkin gerilmenin azalması ve malzemenin zayıflaması sonucu yenilmeler meydana gelebilmektedir. Bu çalışmada yazarlar şev duraysızlığı (örneğin düzlemsel kayma, devrilme veya birleşik kaya ve devrilme) sonucu rezervuarlar da meydana gelen dalgalar ve özelliklerini incelemek üzere model deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde Ryukyu kireçtaşı ve aluminyum bloklar kullanılmış, bu deneysel çalışmada, oluşan dalgalar ve özellikleri konusunda elde edilen sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır.*

Anahtar Kelimeler: *Şev duraysızlığı, düzlemsel kayma, rezervuar, model deneyi, dalga.*

1. INTRODUCTION

In Vaiont Dam, the failure of the adjacent slope and subsequent slip into the reservoir caused great disaster and killed more than 2000 people (Figure 1(a)). Since then, the stability of rock blocks and rock slopes adjacent to dam reservoirs, lakes and sea inlets under both non-immersed and immersed conditions has become a great concern. There are different causes of such failures. The causes would be the rise of water level, which result in weakening of rocks and/or structural discontinuities and the reduction of effective stress and seismic loads. Earthquake-induced slope failures next to reservoirs are also another concern with the generation of tsunami-like waves in reservoirs. Figure 1(b) shows numerous slope failures into the reservoir of Zipingpu Dam by the 2008 Wenchuan earthquake with a magnitude of 7.9.

(a) A view of the failed slope at Vaiont (b) Slope failures adjacent to Zipingpu Dam reservoir

Figure 1. Views of slope failures into dam reservoirs.

The 2008 Iwate-Miyagi intra-plate earthquake also caused a huge landslide resulting in a small-scale tsunami in the reservoir of Aratozawa Dam as seen in Figure 2. The induced tsunami in the reservoir caused the collapse of a small bridge.

Figure 2. A small-scale tsunami induced by the landslide in Aratozawa Dam induced by the 2008 Iwate-Miyagi intraplate earthquake and associated damage to a bridge (Aydan 2015).

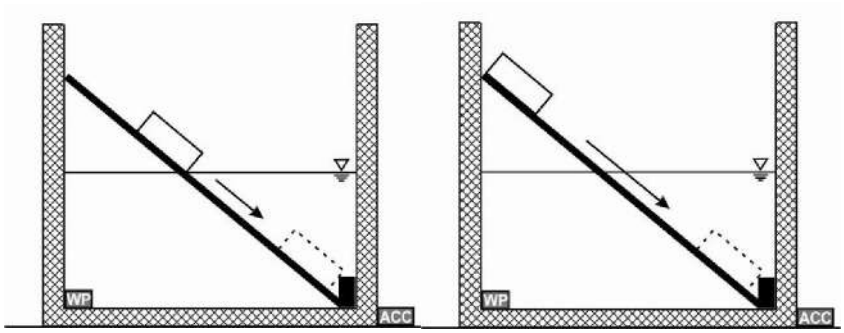
Regarding this very important issue, the authors performed some model tests on the waves induced by rock blocks moving into into reservoirs. The failure modes of rock blocks were sliding, toppling or sliding-toppling and planar failures of rock slopes. Furthermore, The effect of initial velocity of blocks was investigated by changing the location of the blocks. The blocks and slopes were made of Ryukyu limestone or aluminum . In this study, the outcomes of these experimental studies are presented and the characteristics of waves induced in the reservoirs upon the failure of blocks or model slopes and their implications in Rock Mechanics and Rock Engineering are discussed.

2. MODEL TEST SET-UP AND MODEL MATERIALS

2.2. Model Test Set-ups

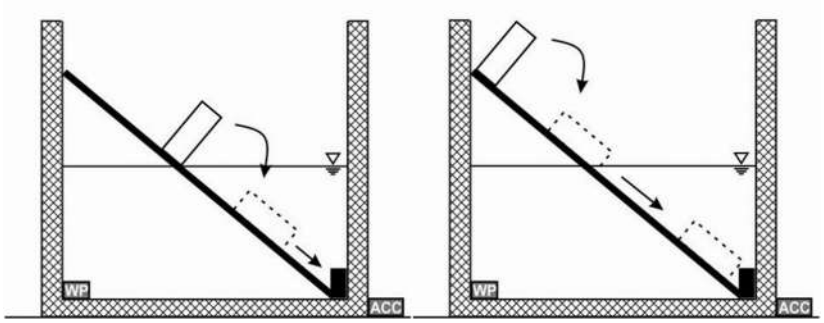
2.2.1 Set-up 1: Falling and/or Sliding Block into Reservoirs

Some tests were carried out to see the effect of rock movements into reservoirs on the water level variations and waves. For this purpose, the configurations shown in Figure 3 and 4 are utilized and the inclination of the base plate was 39 degrees. The size of the block was 40x80x100 mm and it results in 2.5 mm water level change when it is fully immersed in the reservoir. The velocity of the sliding block can be easily evaluated from the geometry and frictional characteristics. However, the velocity of the toppling block is slightly complicated as it involves toppling and subsequent sliding.



(a) Sliding with no initial velocity (b) Sliding with initial velocity

Figure 3: Model test set-ups for sliding mode

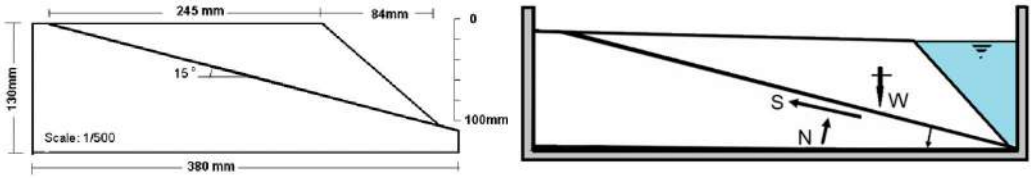


(a) Toppling with no initial velocity (b) Toppling with initial velocity

Figure 4: Model test set-ups for toppling mode

2.2.2 Set-up 2: Planar Sliding of Monolithic Block into Reservoirs

Some model tests for planar sliding failure mode on the effect of water level changes were carried out using the model set-up shown Figure 5. Monolithic block prone to planar sliding and base block were made of Ryukyu limestone, which are coral and sandy limestone. Nevertheless, their frictional properties are quite similar to each other. As the plane is inclined at an angle of 15 degrees, the monolithic block is stable under gravitational conditions. It is also stable under fully saturated conditions as expected from the findings of Aydan (1998). The failure could be induced by either tilting or vibration applied to the base of the model frame. In the experiments to be presented in the next section, the planar sliding was induced by applying shock waves to the base of the model frame.



(a) Geometry of planar sliding body (b) Set-up for immersed planar sliding test

Figure 5. Geometry and set-up for immersed planar sliding test.

2.2.3 Set-up 3: Planar Sliding or Columnar Toppling Slope Models into Reservoirs

In addition to experiments utilizing Ryukyu limestone blocks, some experiments on model slopes with different discontinuity orientations were carried out. The models were made of aluminum blocks and large scale sliding and toppling failure slope failures could be induced using an experimental set-up as shown in Figure 6. The size of the acrylic box was 1000 mm long, 52 mm wide and 250 mm high. A block of marble was also put at a distance of 200 mm of model slope with a height of 250 mm and the water level was set at a depth 100 mm as seen in Figure 6. Besides monitoring the water level fluctuations, the effect of shock loads due to failed body of the model slopes on marble block was

monitored. The model blocks are such that model slopes having orthogonal continuous, intermittent and hexagonal discontinuity patterns with different orientations can be created and tested.

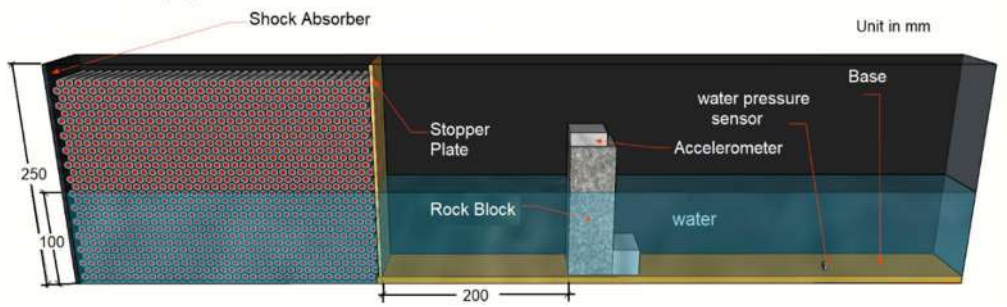


Figure 6. Set-up utilized for water level fluctuation by failing model slopes of rock mass.

2.3 Model Materials and Frictional Characteristics

The prismatic blocks were made of Ryukyu limestone with an average unit weight of 22.9 kN/m^3. The friction angle of saw-cut surfaces was determined from tilting tests as given in Table 1. Despite some scattering of experimental results, the average value is about 27 degrees. The friction angle remains the same under saturated condition (Aydan 1999, 2016). When shock loads can cause a base acceleration of 245-250 gals, it would be possible to induce the sliding failure of rock block put on a base with an inclination of 15 degrees. Similarly tilting tests were carried out on rectangular prismatic and hexagonal aluminum blocks. Table 2 summarizes experimental results. As noted from the table, static friction angle ranges between 15 to 15.9 degrees while the kinetic friction angle ranges between 14.1 and 14.54 degrees.

Table 1. Friction angle of saw-cut interface (dry)

Surface	Minimum	Maximum	Average
Sawcut	24	32	27

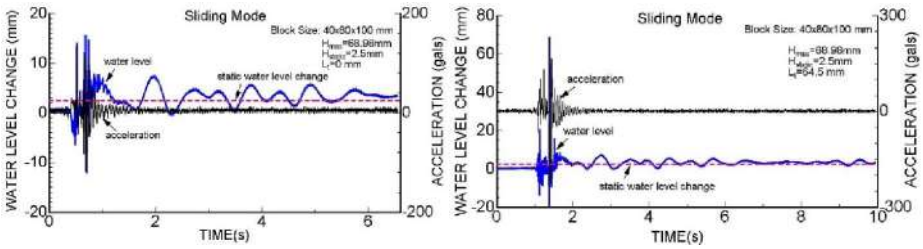
Table 2. Frictional characteristics of aluminum block interfaces

Friction	Minimum	Maximum	Average
Static	15.0	15.9	15.53
Kinetic	14.1	14.54	14.29

3 EXPERIMENTS

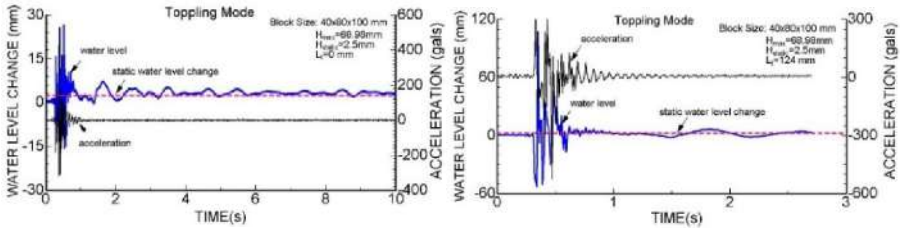
3.1 Water Level Fluctuations in Reservoirs due to Falling and/or Sliding Block Tests

Figures 7 and 8 show the acceleration and water level changes measured for each model test setup. Although Fourier Spectra of induced waves are not presented here, the measured responses provide fundamental wave characteristics. As seen in the figures, the water level changes induced by blocks having initial velocity and moving into reservoirs are quite high compared with the responses of those blocks without initial velocity. It should be noted that the block, which fails due to toppling, has an angular velocity and it is converted to a translational velocity upon failure. Another important conclusion from these experiments is that the blocks failing by toppling would induce much higher water level fluctuations, which may have important implications for evaluating the risk of block movements into the reservoirs of dams in practice. The translation failure induces wave height almost half of the block height while the toppling failure with an initial velocity induces a wave height of 1.5 times the block height when it enters into the water reservoir.



(a) Sliding with no initial velocity (b) Sliding with initial velocity

Figure 7. Water level and acceleration responses for the set-ups for sliding mode.

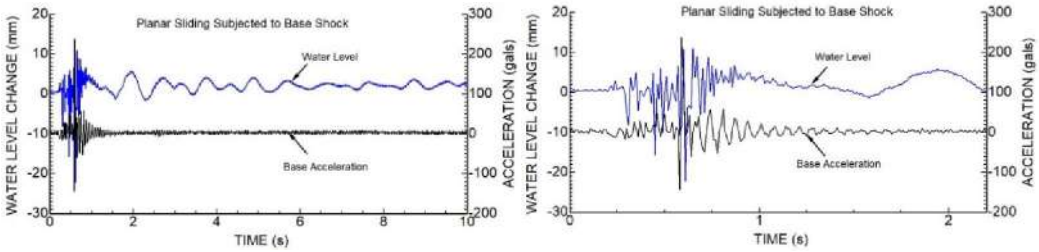


(a) Toppling with no initial velocity (b) Toppling with initial velocity

Figure 8. Water level and acceleration responses for the set-ups for toppling mode.

3.2 Water Level Fluctuations in Reservoirs due to Planar Sliding of Monolithic Block

The planar sliding failure of the monolithic block shown in Figure 5 was induced by applying a shock load at the base of the model. In view of frictional properties of sliding plane, the base acceleration greater than 245-250 gals would be sufficient to induce planar sliding. As there is a stopper, the planar sliding was terminated after a relative slip of about 10-12 mm. Figure 9(a) shows the water level fluctuations and applied base acceleration during a test while Figure 9(b) shows an expanded plot of the first 2.1 seconds. It is interesting to note that the fluctuations of water level continue to occur for a considerable period of time with a diminishing amplitude while the sliding was terminated within 1 seconds. The static water level change at the end of this particular experiment was 2 mm while the initial wave height was 7.5 times the static water level change.



(a) (b)

Figure 9. Water level and base acceleration responses during the planar sliding test.

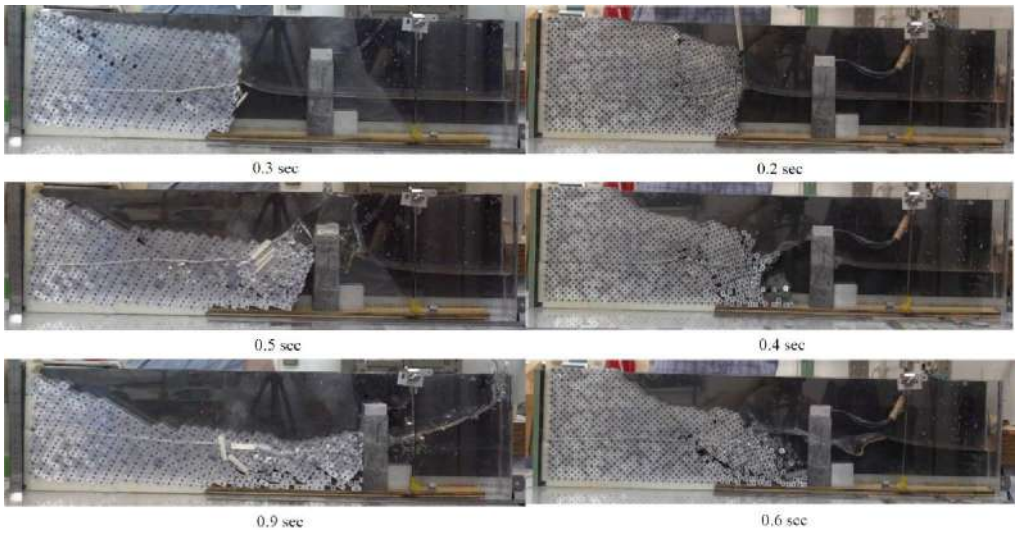
3.3 Water Level Fluctuations in Reservoirs due to Model Slope Failures

We present some of experimental results carried out by Horiuchi (2020) and more detailed results can be found in the master thesis of Horiuchi (2020).

3.3.1 Cross Continuous pattern

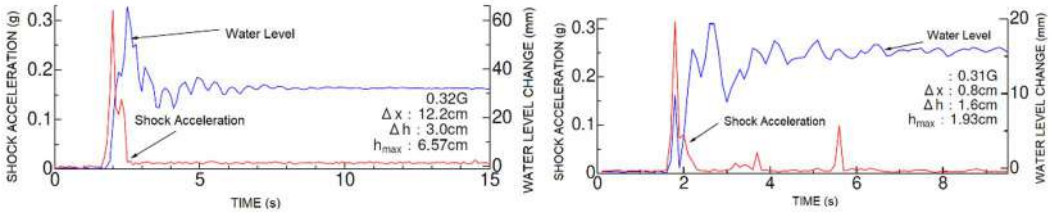
The throughgoing discontinuity inclinations were 30(120), 45(135), 60(150) degrees and the sizes of block were 10x10mm and 10x20mm with a length of 50mm. We present two experiments of 30 degrees (10x20mm) and 45 degrees (10x10mm) as shown in Figure 10(a,b). The water level fluctuation and acceleration of the block subjected to shock waves by the failed body are shown in Figure 11(a,b). In

each figure maximum water level change and static water change are also shown. As noted, the water level change depends upon the failure volume.



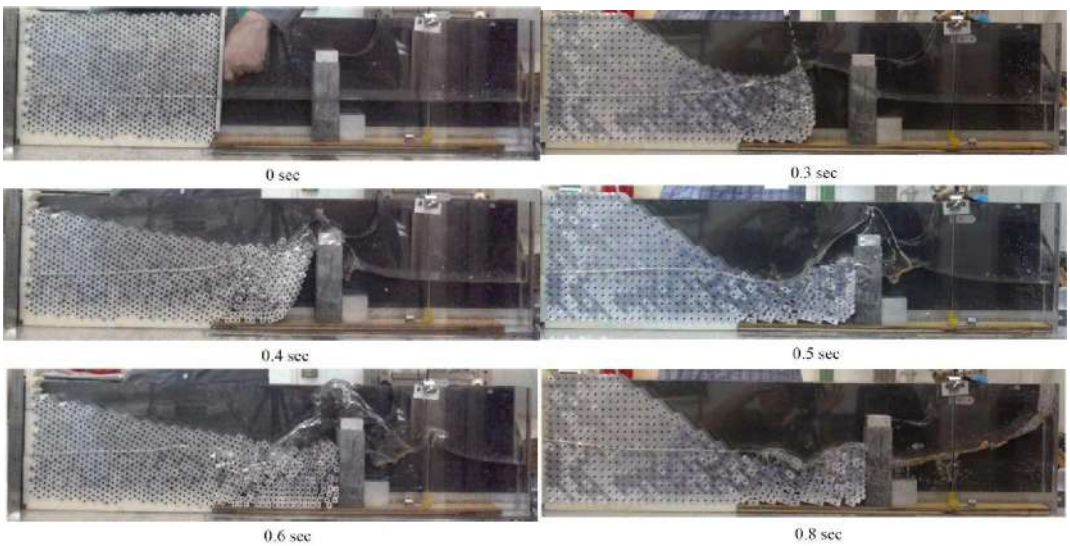
(a) Views at different time steps (30°) (b) Views at different time steps (45°)

Figure 10. Views of failing model slopes with cross-continuous pattern.



(a) Water level and acceleration responses (30°) (b) Water level and acceleration responses (45°)

Figure 11. Water level and acceleration responses of model slopes.

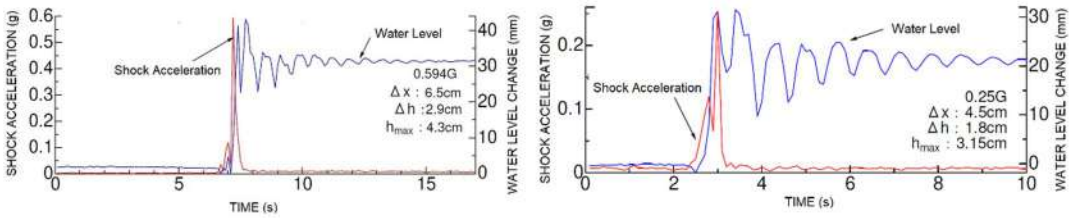


(a) Views at different time steps (30°) (b) Views at different time steps (45°)

Figure 12. Views of failing model slopes with intermittent pattern.

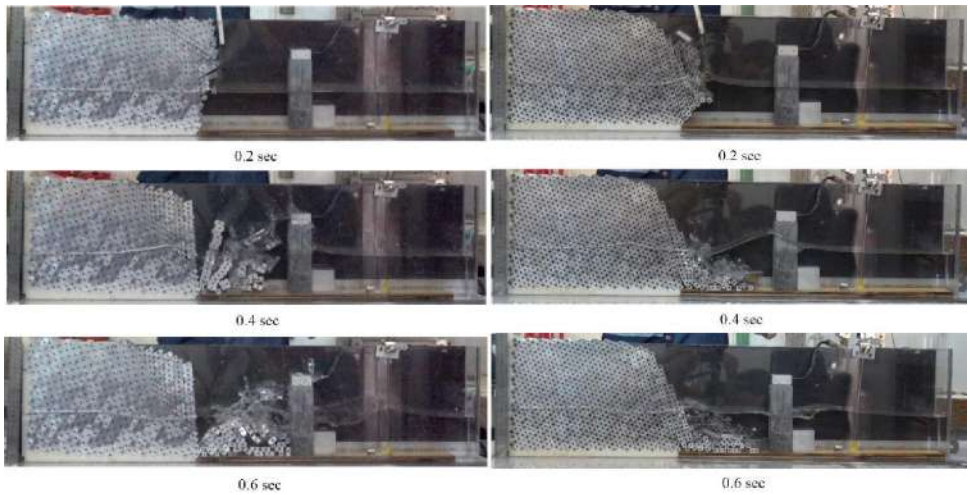
3.3.2 Intermittent Pattern

The throughgoing discontinuity inclinations were 30,45,60,120, 135, 150 degrees and the sizes of block were 10x10 mm and 10x20 mm with a length of 50mm. We present four experiments for 30 and 145 degrees (10x10 mm) and 45 and 120 degrees (10x20mm) as shown in Figures 12(a,b), and 14(a,b). The water level fluctuation and acceleration of the block subjected to shock waves induced by the failed body are shown in Figures 13(a,b) and 15(a,b) for two cases. In each figure maximum water level change and static water change are also shown. As noted, the maximum water level change depends upon the failure volume and mode of failure. Slopes with intermittent patterns with thoroughgoing discontinuity 30º and 45º fail in sliding mode while slopes with intermittent patterns with thoroughgoing discontinuity 120º and 135º fail in toppling mode.



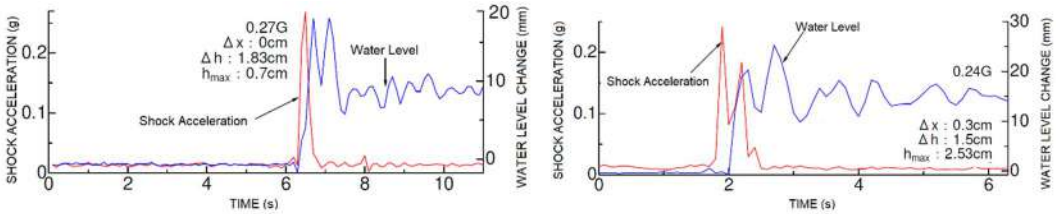
(a) Water level and acceleration responses (30º) (b) Water level and acceleration responses (45º)

Figure 13. Water level and acceleration responses of model slopes.



(a) Water level and acceleration responses (120º) (b) Water level and acceleration responses (135º)

Figure 14. Views of failing model slopes with intermittent pattern.



(a) Water level and acceleration responses (120º) (b) Water level and acceleration responses (135º)

Figure 15. Water level and acceleration responses of model slopes.

Final example is concerned with slopes with hexagonal discontinuity pattern. Results are shown in Figure 16. Fundamentally the results similar to previous examples except the region of failure differs and the failure mode is a combined sliding and toppling. Figure 17 compares the water level variations as a function of throughgoing discontinuity inclination. As noted from the figure, if the throughgoing

discontinuity plane is 30° and slope is 90°, the water level fluctuation is maximum and it may be the most critical condition for discontinuous rock slopes.

4 CONCLUSIONS

Some model tests on the waves induced by rock blocks, whose failure modes are sliding, toppling or sliding-toppling and planar failures of rock slopes, are presented. The blocks and slopes were made of Ryukyu limestone or aluminum. The results clearly showed that the characteristics of waves induced in the reservoirs depend upon the failure modes and volume of blocks or slopes. If the initial velocity and the volume of the failed body is high, maximum wave height increases and clearly shows the tremendous effect on the water reservoirs. Particularly this situation could be quite critical when dams are located in seismic areas next to steep slopes. Although the characteristics of induced waves in relation to initial velocity blocks size and failure mode could not be presented due to lack of space, it would be desirable to study these aspects in the following studies.

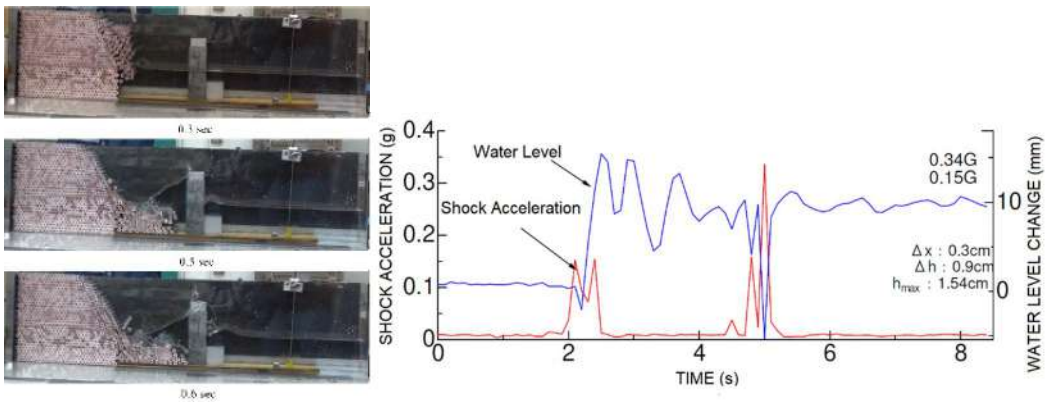


Figure 16. Views and responses of rock slope with hexagonal pattern.

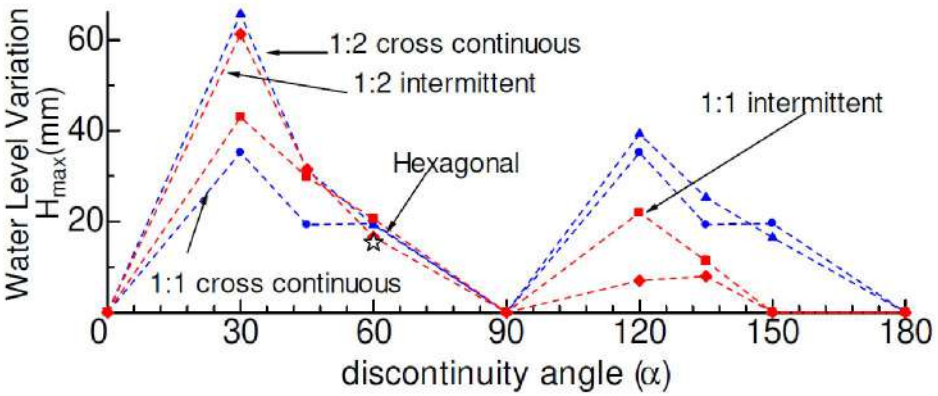


Figure 17. Water level variation as a function of throughgoing discontinuity inclination.

5 REFERENCES

Aydan, Ö., 1998. Simple tests on the validation of the effective stress law for rock discontinuities. Poromechanics, Louvain-la-Neuve, 539-544.

Aydan, Ö., 2015. Some considerations on a large landslide at the left bank of the Aratozawa Dam caused by the 2008 Iwate-Miyagi intraplate earthquake, Rock Mechanics and Rock Engineering, Special Issue on Deep-seated Landslides, Volume 49, No.6, 2525–2539.

Aydan, Ö., 2016. Time dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering, CRC Press, ISRM Book Series 2, 246p.

Horiuchi, K., 2020. A fundamental study on the post-failure motion of discontinuous rock slopes and their effects on important structures. A thesis for M. Eng., Civil Engineering and Architecture Course of Graduate School of Eng. and Sci., University of the Ryukyus, 251p.

Beton Baraj Temellerinde Laboratuvar ve Arazi Deneyleriyle Elde Edilen Kaya Kütle Parametrelerinin Karşılaştırılması: Akçalı-1 Göleti, Adıyaman

Comparison of Rock Mass Parameters Obtained by Laboratory and Field Experiments on Concrete Dam Foundations: Akçalı-1 Pond, Adıyaman

C. Yıldız[1,*]

[1] *DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Daire Başkanlığı*
*(*cemalyildiz@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada ülkemizde son zamanlarda oldukça sık olarak inşaa edilen Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajların (SSB) gövde duraylılığı hesapları için istenilen kaya kütle parametrelerinin yerinde deneylerle doğrudan elde edilmesi ve sondajlardan elde edilen numunelerle laboratuvar deneyleri yaparak tahmin edilmesi konu alınmıştır. Baraj temeline ait kaya kütle parametreleri elde edilirken temele en fazla yük gelen, deformasyonların en fazla olacağı öngörülen bölgelerde, sondajlar açılıp laboratuvar deneyleri ile arazi çalışmaları yapılarak bir bütün halinde değerlendirilmesi güvenli inşaa için önemli bir husustur. Yapılan çalışmada laboratuvar deneyleri ile tek eksenli sıkışma dayanımı – elastisite modülü deneyleri yapılmış ve arazi çalışmasında eklem ve süreksizlikler ölçülerek Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) puanı elde edilmiştir. Ayrıca laboratuvardan elde edilen kaya malzemesine ait elastisite modülünden kütle deformasyon modülünün tahmininin yapılması için temel açılırken yapılan örselenme miktarına göre bir (D) örselenme faktörü belirlenmiştir ve bu veriler kullanılarak Rocdata programında Genelleştirilmiş Hoek ve Diederich (2006) formülü ile temele ait kütle deformasyon modülü görgül olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca baraj temelinde açılan sondajlarda yükleme – boşaltma evreli deneyler ile kütle deformasyon modülünün yerinde tespiti sağlanmıştır. Yükleme – Boşaltma programı baraj temeline gelecek yükler kullanılarak hazırlanmıştır. Laboratuvar ve yerinde yapılan deneylerle elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucunda kaya malzemesine ait elastisite modülünden görgül yöntemlerle elde edilen kaya kütlesi deformasyon modülünün, arazi deneyleriyle elde edilen kaya kütlesi deformasyon modülüne göre yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu durumun farklı kaya türlerinde eklemlenme, faylanma, tektonizma etkisiyle değişkenlik göstereceği düşünülmekte olup baraj gövdesi projelendirilirken özellikle görgül yöntemlerle elde edilen kütle deformasyon modülünün tahmininde kullanılan parametrelerin titizlikle seçilmesi ve arazi deneylerinde deney yapılan seviyelere ve yapılan yükleme – boşaltma programına dikkat edilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Beton Baraj, Elastisite modülü, Deformasyon modülü, Örselenme faktörü, GSI.

ABSTRACT: *In this study, it is the subject of obtaining the desired rock mass parameters for the body stability calculations of Roller Compacted Concrete Dams (RCC), which have been built quite frequently recently in our country, by in-situ experiments and estimating them by performing laboratory experiments with the samples obtained from the drillings. While obtaining the rock mass parameters of the dam foundation, it is an important issue for safe construction to be evaluated as a whole by drillings, laboratory tests and field studies in the regions where the most body load is placed on the foundation and where deformations are expected to be the highest. In the study, uniaxial compressive strength – modulus of elasticity tests was performed with laboratory tests, and the Geological Strength Index (GSI) score was obtained by measuring joints and discontinuities in the field study. In addition, in order to estimate the mass deformation module from the elasticity module of the rock material obtained from the laboratory, a disturbance factor (D) was determined according to the amount of disturbance made while the foundation excavation was made, and using these data, the mass deformation module of the foundation was determined empirically with the Generalized Hoek and Diederich (2006) formula in the Rocdata program. In addition, drillings were performed on the foundation of the dam, in-situ determination of the mass deformation module was obtained by the experiments with loading-unloading phase. Loading – Unloading program has been prepared by using loads that will come to the dam foundation. As a result of the comparison of the data obtained from laboratory and in-situ experiments, it was seen that the rock mass deformation modulus obtained by empirical methods from the elasticity modulus of the rock material was at higher levels than the rock mass deformation modulus obtained by field experiments. It is thought that this situation will vary with the effects of jointing, faulting, and*

tectonism in different rock types, and it is recommended that the parameters used in the estimation of the mass deformation modulus obtained by empirical methods should be meticulously chosen while designing the dam body, and attention should be paid to the levels at which the tests were performed and the loading-unloading program made in field tests.

Keywords: *Concrete Dam, Elasticity Modulus, Deformation Modulus, Disturbance factor, GSI.*

1. GİRİŞ

Beton barajlar diğer dolgu barajlara oranla daha rijit özellikler sergilemeleri nedeniyle bu tip baraj temelleri için daha hassas çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda oldukça sık şekilde inşaa edilen Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) gövdeye sahip beton baraj ve göletlerin temel kayalarında açılan sondajlarda laboratuvar deneyleri ve gözlemsel verilere dayalı malzeme verilerinden kütle deformasyon modülü tahmini ve yerinde yapılan deneylerle kütle deformasyon modülü hesaplamaları proje yüküne göre zamana bağlı olarak yapılmakta olup bu çalışmada DSİ Genel Müdürlüğü Kahramanmaraş 20. Bölge Müdürlüğü projelerinden olan Adıyaman – Merkez Akçalı -1 Göleti yerinde yapılan çalışmalar kullanılarak laboratuvar ve arazi deneylerine ait sonuçlar irdelenmiştir (Ertug ,2020). Çalışmada gövde altında yapılan sondajlardan alınan numunelerden tek eksenli sıkışma dayanımı – elastisite modülü deneyleri yapılmış ve Hoek – Diederich (2006) metodu kullanılarak kütle deformasyon modülü tahminine gidilmiştir. Ayrıca açılan sondajlarda Kaya presiyometresi deneyleri yapılmış bu deneyler yapılırken proje yükü altında temel kayasının davranışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda her iki yönteme göre yapılan deformasyon modülü değerleri karşılaştırılmıştır.

2. PROJE HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1. İncelemenin Amacı

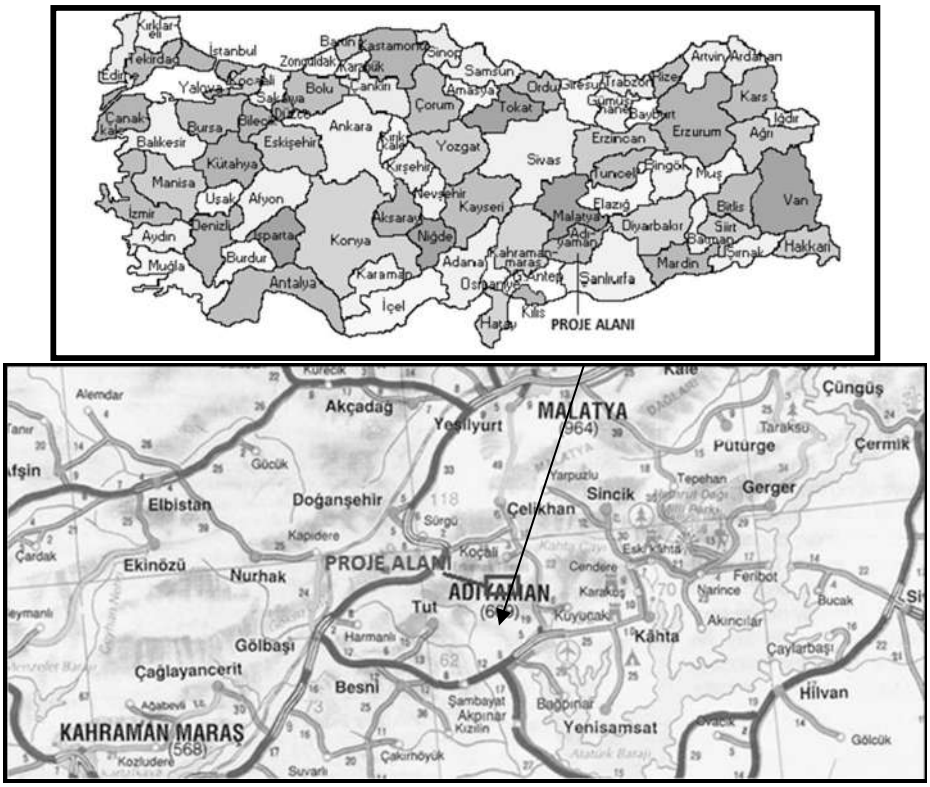
Adıyaman – Merkez Akçalı - 1 Göleti kapsamında, Adıyaman-Merkez Akçalı köyü sınırları içerisinde Sağın deresi üzerinde yapımı planlanan Akçalı-1 Göleti için zeminin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Gölet Gövdesi temelden 43.4 m yüksekliğinde, kret uzunluğu 291.86 m ve genişliği 10 m olarak silindirle sıkıştırılmış beton gövde tipinde planlanmıştır. Bu çalışmada gölet gövde temelinin oturacağı ana kayanın kaya kütle parametrelerinin (deformasyon modülü, elastisite modülü) yerinde tespit edilmesi ve laboratuvar değerleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2.2. Proje Alanının Yeri ve Ulaşım

Akçalı-1 Gölet yeri, Adıyaman ili Akçalı köyü sınırları içerisinde Sağın deresi üzerindedir. Gölet yeri, Adıyaman il merkezinin 15 km KB'da bulunmaktadır. Gölet yeri Akçalı köyünün yaklaşık 800 m KB'dadır. Gölet sahasına, mevcut yol ile ağır kış koşulları dışında her mevsim ulaşım mümkündür (Şekil 1).

3. GENEL JEOLOJİ

İnceleme alanının K ve KD kesimlerinde Koçali Formasyonu geniş bir alanda yayılım göstermektedir. Aks yeri ve göl alanı da bu karmaşık serinin üzerinde bulunmaktadır. Serpantinleşmiş peridotit, kireçtaşı, spilit, bazalt, spilitik bazalt gibi volkanitler, radyolarit, kiltaşı ve şeyl ile temsil edilmektedir. Serpantinleşmiş ultrabazik kayaçlar yeşil, gri, yeşilimsi gri renkli, oldukça parçalı kırıklı ve ayrışmış bir yapıdadır. Kireçtaşları, pembemsi, krem renkli, silisifiye olmuş, oldukça parçalı kırıklı, aşırı deforme olmuş, yer yer çörtlü, volkanitlerle ardalanmalı, yer yer mercek ve bantlar şeklindedir. Bazalt, spilit, spilitik bazalt gibi volkanit kayaçlar ise gri, siyah, yeşilimsi gri renkli, çatlaklı, kırıklı, sert bir yapıdadır. Radyolaritler, bordo, boz renkli, yer yer sert, yer yer dağılgan bir yapıdadır. Şeyl ve kiltaşı seviyeleri ile ardalanmalıdır. Şeyl ve kiltaşı birimleri ise kırmızı, bordo renkli, radyolaritlerle ardalanmalı, yer yer tamamen silisleşmiştir. Genellikle parçalı kırıklı ve dağılgan bir yapıdadır. Karmaşık seri Üst Triyas-Alt Kretase yaşlıdır.



Şekil 1. Proje alanı yer bulduru haritası

3.1 Jeoloji

İnceleme alanında sağ sahilde yapılan GSK -1 numaralı sondaj kuyusunda; 0.00 – 24.00 m arası grimsi-yeşilimsi renkli, az-orta derecede ayrışmış, çok kırıklı-çatlaklı yer yer ayrışmış zayıf-orta kaya niteliğinde Serpantin birimi geçilmiştir.
Sol Sahilde yapılan GSK -2 numaralı sondaj kuyusunda; 0.00-5.00 m arasında Alüvyon, 5,00-10,00 m arasında kızıl renkli, az-orta derecede ayrışmış çok kırıklı-çatlaklı zayıf kaya niteliğinde Radyolarit, 10.00-19.00 m arasında grimsi-yeşilimsi renkli, az-orta derecede ayrışmış, çok kırıklı-çatlaklı zayıf-orta kaya niteliğinde Serpantin, 19.00-21.00 m arasında kızıl renkli, az-orta derecede ayrışmış çok kırıklı-çatlaklı zayıf kaya niteliğinde Radyolarit, 21.00-26.50 m arasında grimsi-yeşilimsi renkli, az ayrışmış, çok kırıklı-çatlaklı zayıf-orta kaya niteliğinde Serpantin, 26,50-30,00 m arasında kızıl renkli, az-orta derecede ayrışmış çok kırıklı-çatlaklı zayıf kaya niteliğinde Radyolarit birimi geçilmiştir.
Talvegde açılan GSK -3 numaralı sondaj kuyusunda ise; 0.00-8.50 m arasında kızıl-gri renkli, tamamen ayrışmış, parçalanmış çok zayıf kaya niteliğinde Radyolarit, 8.50-21.00 m arasında orta derecede ayrışmış, az-orta kırıklı-çatlaklı Radyolarit - Serpantin ardalanması geçilmiştir.

4. İNCELEME ALANINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

İnceleme alanında sol sahil, sağ sahil ve aks yerinde olmak üzere jeoteknik parametrelerin belirlenmesi için 3 adet kuyuda Probex Kaya Presiyometresi deneyi gerçekleştirilmiştir. Aks yerinde bulunan GSK -3 numaralı kuyuda 29 m derinliğe kadar 5 adet, sol sahilde yer alan GSK-3 numaralı kuyuda 21 m derinliğe kadar 5 adet ve sağ sahilde yer alan GSK-1 numaralı kuyuda 21 m derinliğe kadar 7 adet deney yapılmıştır.

Şekil 2. İnceleme alanı sol sahilden görünüm

Probex kaya presiyometresi deney ekipmanları 30 MPa basınç verebilen bir hidrolik kriko, okuma ünitesi, iletim kabloları ve radyal olarak genişleyebilen ısıl işlem görmüş, paslanmaz çelik uçlara monte edilmiş esnek malzemeden yapılmış bir membran içerir. Çelik uçlar dâhil membranın toplam uzunluğu 749 mm'dir. Genişleyebilen membranın uzunluğu 457 mm ve çapı 73.7 mm'dir. (Şekil 3.)

Şekil 3. Probex Kaya Presiyometre Deney Ekipmanları

4.1. Deneyin Yapılışı

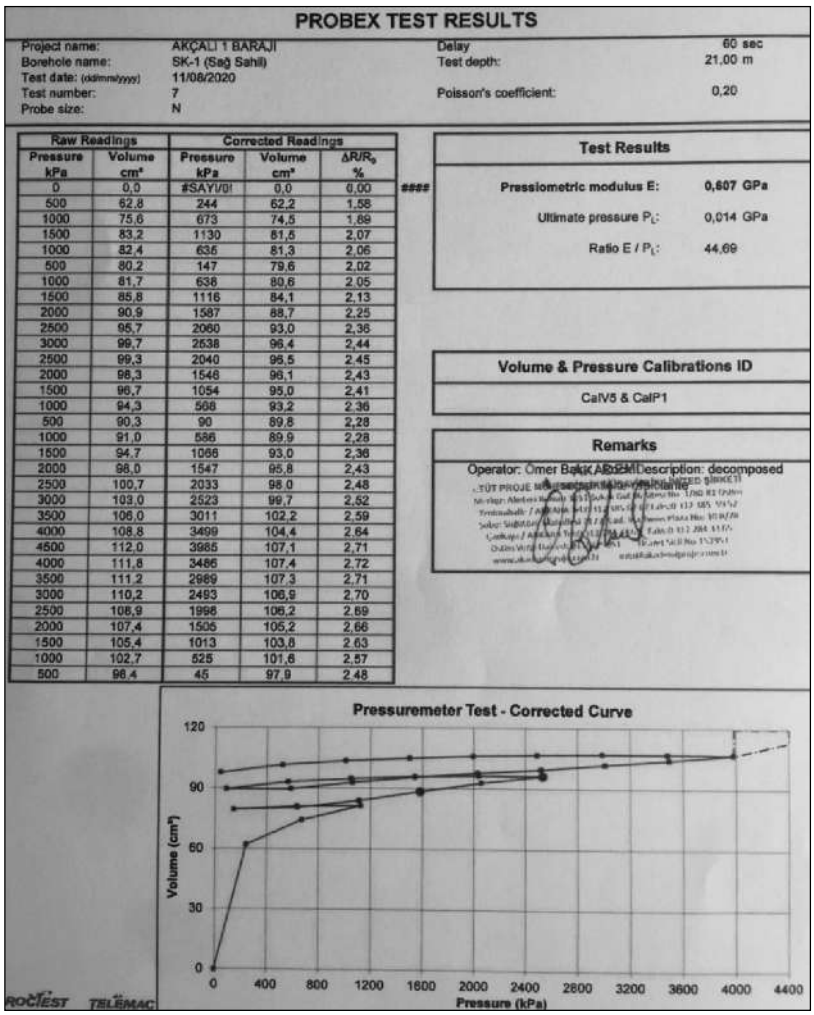
Probex kaya presiyometresi deneyi yapılırken radyal genişlemeye elverişli dilatometre probu istenilen test seviyesine indirilir ve deney programına göre yükleme ve boşaltma döngüleri uygulanır. Uygulanan her basınç kademesinde oluşan hacim değerleri kaydedilir. Modül değerleri, seçilen basınç-deformasyon noktaları arasındaki basınç ve deformasyon farkları referans alınarak hesaplanır. Deney yapılırken uygulanan program dahilinde 3 yükleme boşaltma döngüsü gerçekleştirilir, her yükleme ve boşaltma adımında basınçlar uygulanırken 1 dk. süre ile beklenilir ve hacim okumaları alınır. Maksimum basınçlarda zamana bağlı deformasyonları görebilmek için 10 dk. süre ile beklenir ve hacim okumaları kaydedilir. Her yükleme ve boşaltma evresi en az 5 adımda gerçekleştirilmelidir. Maksimum yüklerde eğer deformasyon devam ederse deformasyonlar tamamlanana kadar beklenir. (ISRM, 1987).

Akçalı -1 Göleti 43.4 m yüksekliğinde ve SSB olarak projelendirilmiş olup proje yükünün su yükü ile beraber yaklaşık 3 MPa civarında olabileceği proje firması tarafından öngörülmüş ve yükleme programı buna göre hazırlanmıştır. Deney programı 3 yükleme, 3 boşaltma evresi olarak gerçekleştirilmekle beraber, 1. yükleme evresinde kademeli olarak 5' er adımda 1,5 MPa yük verilmiş ve geri alınmış olup

toplam 18 dk sürmüştür, 2. yükleme evresinde 5' er adımda 3 MPa yük verilmiş ve geri alınmış olup 28 dakika sürmüştür, 3. Yükleme evresinde 8' er adımda 4,5 MPa basınca çıkılmış ve verilen yükler geri alınmış olup 28 dakika sürmüştür. 1 seviye için toplam deney süresi 74 dakika sürmüştür.

4.2. Hesaplamalar

Deney sonuçları arazi formuna kaydedildikten sonra her bir seviye için kalibrasyonlardan elde edilen hacim ve basınç farkları düşülerek düzeltilmiş hacim ve basınç değeleri elde edilmiş ve bu değerlere ait hacim – basınç grafikleri çizilmiştir. Çizilen bu eğride her bir yükleme evresi için çıkılan maksimum değer ile deney başlangıcındaki deformasyon farklarından deformasyon modülü değeri hesaplanmıştır. (Marcil L., Green R. and Baures T. and Boyle R.F. (2013), The PROBEX: Over 25 Years of Experience in Measuring Deformability of Rock)



PROBEX TEST RESULTS

Project name:	AKÇALI 1 BARAJI	Delay	60 sec
Borehole name:	SK-1 (Sağ Sahil)	Test depth:	21,00 m
Test date: (dd/mm/yyyy)	11/08/2020		
Test number:	7	Poisson's coefficient:	0,20
Probe size:	N		

Raw Readings Pressure kPa	Raw Readings Volume cm³	Corrected Readings Pressure kPa	Corrected Readings Volume cm³	Corrected Readings ΔR/R₀ %
0	0,0	#SAYI/0!	0,0	0,00
500	62,8	244	62,2	1,58
1000	75,6	673	74,5	1,89
1500	83,2	1130	81,5	2,07
1000	82,4	635	81,3	2,06
500	80,2	147	79,6	2,02
1000	81,7	638	80,6	2,05
1500	85,8	1116	84,1	2,13
2000	90,9	1587	88,7	2,25
2500	95,7	2060	93,0	2,36
3000	99,7	2538	96,4	2,44
2500	99,3	2040	95,5	2,45
2000	98,3	1548	96,1	2,43
1500	96,7	1054	95,0	2,41
1000	94,3	568	93,2	2,36
500	90,3	90	89,8	2,28
1000	91,0	586	89,9	2,28
1500	94,7	1066	93,0	2,36
2000	98,0	1547	95,8	2,43
2500	100,7	2033	98,0	2,48
3000	103,0	2523	99,7	2,52
3500	106,0	3011	102,2	2,59
4000	108,8	3499	104,4	2,64
4500	112,0	3985	107,1	2,71
4000	111,8	3486	107,4	2,72
3500	111,2	2989	107,3	2,71
3000	110,2	2493	106,9	2,70
2500	108,9	1998	106,2	2,69
2000	107,4	1505	105,2	2,66
1500	105,4	1013	103,8	2,63
1000	102,7	525	101,6	2,57
500	98,4	45	97,9	2,48

Test Results

Pressiometric modulus E:	0,607 GPa
Ultimate pressure P_L:	0,014 GPa
Ratio E / P_L:	44,69

Volume & Pressure Calibrations ID

CalV5 & CalP1

Remarks

Operator: Ömer Bakır Abdi Description: decomposed

Şekil 4. SK-1 Sondaj kuyusu 21.00 m' de yapılan deney okumaları ve düzeltilmiş hacim değişim eğrisi

Probex kaya presiyometresinde deformasyon modülü hesapları için aşağıdaki bağlantıyı önermiştir;

$$\boldsymbol{Em = 2(1+v)(V_0 + V_m)(\frac{\Delta P}{\Delta V})} \quad (1)$$

Burada;

Em = Probex deformasyon modülü v = Poisson oranı (varsayılan olarak 0,2)

V_0 = Söndürülmüş sondanın ölçüm bölümünün teorik hacmi

V_m =Hacim artışının merkezinde ΔP artışı

ΔP = P_1 ve P_2 basınçları arasındaki düzeltilmiş basınç artışı

ΔV = P_1 ve P_2 basınçları arasındaki düzeltilmiş hacim artışı

Deneyler tamamlandıktan sonra bütün seviyeler için kaya kütlesi deformasyon modülü değerleri hesaplanmış olup bu çalışmada karşılaştırma yapabilmek için arazi ve laboratuvar deneylerinin aynı noktaya karşılık geldiği bölgelerin sonuçlarına yer verilmiştir.

Çizelge 1. Serpantinit birimi için kaya presiyometresinden elde edilen deformasyon modülü değerleri

	Kaya Presiyometresi Yükleme Evresi	Deformasyon Modülü (Arazi) (GPa)
GSK -1 (Serpantinit) 6 - 6,5 m	1. Yükleme	0,04
	2. Yükleme	0,61
	3. Yükleme	1,46

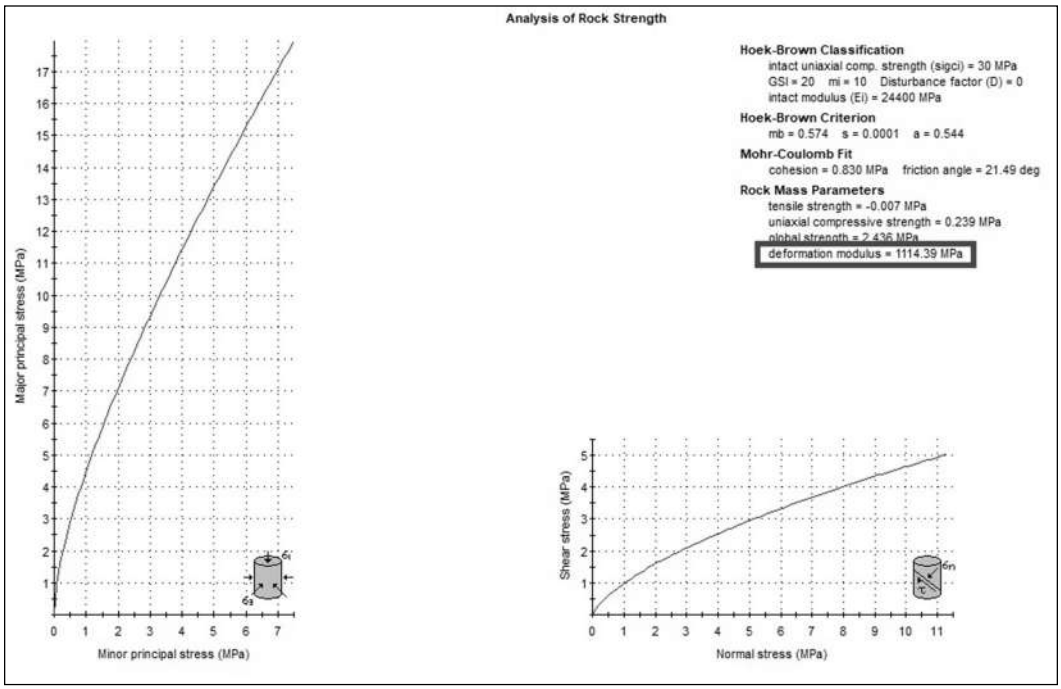
Çizelge 2. Radyolarit birimi için kaya presiyometresinden elde edilen deformasyon modülü değerleri

	Kaya Presiyometresi Yükleme Evresi	Deformasyon Modülü (Arazi) (GPa)
GSK -3 (Radyolarit) 20,50 - 21 m	1. Yükleme	0,01
	2. Yükleme	0,44
	3. Yükleme	0,62

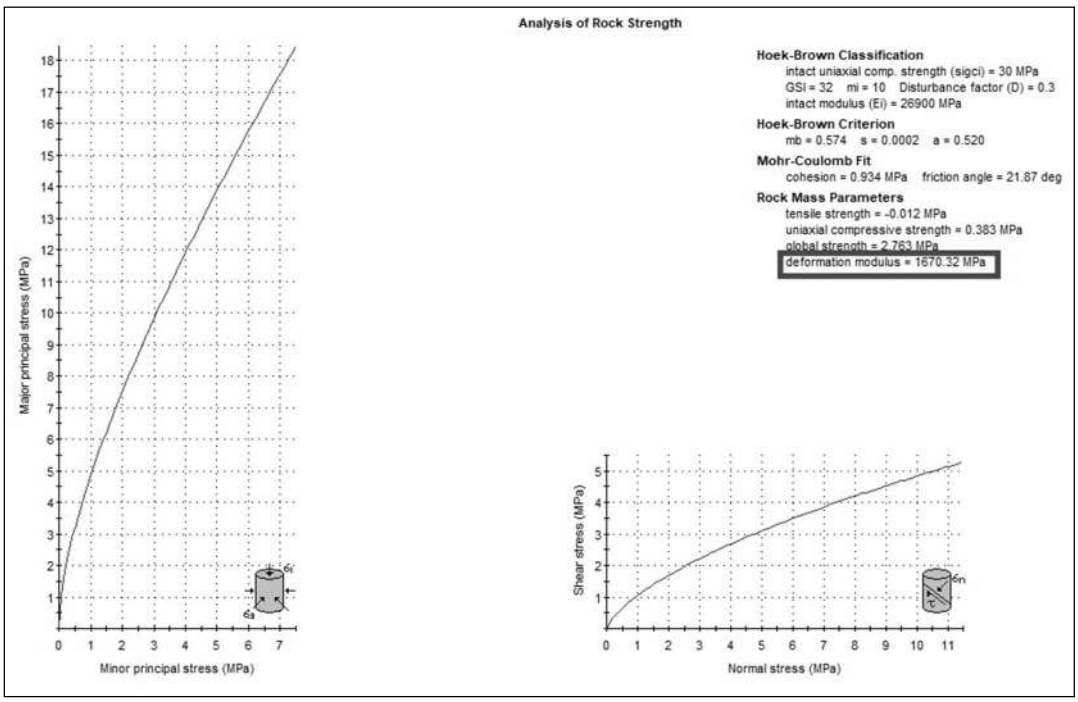
Laboratuvardan elde edilen kaya malzemesine ait elastisite modülünden kütle deformasyon modülünün tahmininin yapılması için temel kazısı yapılırken muhtemel örselenme miktarına göre bir (D) örselenme faktörü belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak Rocdata programında Genelleştirilmiş Hoek and Diederich (2006) formülü (2) ile temele ait kütle deformasyon modülü görgül olarak tahmin edilmiştir. Temel altında yer alan radyolarit ve serpantinit birimleri ayrı ayrı değerlendirmeye tabi tutulmuş parametreler belirlenirken iki farklı birim için hesaplama yapılmıştır.

$$Erm = Ei(0{,}02 + (\frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{(\frac{60+15D-GSI}{11})}}) \quad (2)$$

Çalışma kapsamında laboratuvardan elde edilen intakt elastisite modülü değerlerinin ve kaya presiyometresi deneylerinin yaklaşık aynı seviyelerde olmasına özen gösterilmiş ve karşılaştırma buna göre yapılmıştır. Serpantinit birimi için GSK-1 No'lu sondaj kuyusunda deneylerin aynı seviyeye denk geldiği 6-6,5 m derinlik için Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI:32), Örselenme faktörü (D:0,3) ve İntakt elastisite modülü (Ei: 26,900 MPa) olarak değerlendirmeye alınmıştır. Radyolarit birimi için ise GSK-2 kuyusunda 20,50-21 m arasında GSI:20, D:0 ve Ei: 24,400 MPa olarak değerlendirmeye alınmıştır.



Şekil 5. Radyolarit birimi için laboratuvar deneylerinden elde edilen kaya kütlesi parametreleri



Şekil 6. Serpantinit birimi için laboratuvar deneylerinden elde edilen kaya kütlesi parametreleri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajların (SSB) gövde stabilitesi hesapları için istenilen kaya kütlesi parametrelerinden olan deformasyon modülü değerinin yerinde deneylerle direkt olarak elde edilmesi ve sondajlardan elde edilen numunelerle laboratuvar deneyleri yaparak tahmin edilmesi konu alınmıştır. Silindirle sıkıştırılmış Beton gövde tipinde planlanan Adıyaman Merkez Akçalı -1 Göleti'nde yapılan çalışmalar örnek olarak makale içerisinde yer almaktadır.

Çalışmada proje alanında 3 adet sondaj açılmış olup bu sondajlarda kaya presiyometresi deneyleri belirlenen program dahilinde her deney seviyesi için 3 yükleme ve boşaltma evresi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada laboratuvar deneylerinden tek eksenli basınç dayanımı – elastisite modülü deneyleri yapılmış ve arazi çalışmasında eklem ve süreksizlikler ölçülerek Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) puanı elde edilmiştir. Ayrıca laboratuvardan elde edilen kaya malzemesine ait elastisite modülünden kütle deformasyon modülünün tahmininin yapılması için temel açılırken yapılan örselenme miktarına göre bir (D) örselenme faktörü belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak Rocdata programında Hoek and Diederich (2006) formülü ile temele ait kütle deformasyon modülü görgül olarak tahmin edilmiştir.

Laboratuvar ve yerinde yapılan deneylerle elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucunda kaya malzemesine ait elastisite modülünden görgül yöntemlerle elde edilen kütle deformasyon modülünün, arazi deneyleriyle elde edilen kütle deformasyon modülüne göre yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu durumun özellikle GSI' nın belirlenmesi sırasında gözlemsel verilerden de yararlanılması etken olmakla birlikte farklı kaya türlerinde eklemlenme, faylanma, tektonizma etkisiyle değişkenlik göstereceği düşünülmekte olup baraj gövdesi projelendirilirken özellikle görgül yöntemlerle elde edilen kütle deformasyon modülünün tahmininde kullanılan parametrelerin titizlikle seçilmesi ve arazi deneylerinde deney yapılan seviyelere ve yapılan yükleme – boşaltma programına dikkat edilmesi önerilmektedir.

6. KATKI BELİRTME

Katkılarından dolayı DSİ Genel Müdürlüğü'nden Dr. Ayhan KOÇBAY' a, Ali GEZER' e ve Recep ÇETİN' e teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

Marcil L., Green R. and Baures T. and Boyle R.F. (2013), The PROBEX: Over 25 Years of Experience in Measuring Deformability of Rock, ISP6

ISRM (April 1987). Suggested Method for Deformability Determination Using a Flexible Dilatometer, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 24 (2), 123-134.

Hoek, E and Diederichs, M.S. (2006), Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 203–215

Ertuğ, M,. 2020. Adıyaman Merkez Akçalı-1 Göleti Uygulama Aşaması Jeoteknik Etüt Raporu.

Yeraltı Barajları ve Yeraltısuyu Suni Besleme Tesislerinde Jeoteknik Etüt Çalışmalar ve Uygulamalardan Örnekler

Examples of Geotechnical Investigation Studiesand Applications in Underground Dams and Artificial Groundwater Recharge

M. Özmen[1,*]

[1] *DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Başkan Yardımcısı (*mikdatozmen@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Yarı kurak-kurak iklim kuşağında yer alan ülkemiz için önem taşıyan yeraltı barajları, yüzeye inşa edilen barajlardan daha uygun maliyettedir. Ülkemizde yeraltı barajı yapımına 1970 li yıllarda başlanılmış olup, şimdiye kadar 10 adet yapılmıştır. Tarım ve Orman Bakanlığı eylem planı kapsamında, 2023 yılına kadar 100 adet yeraltı barajı ve suni besleme yapımı planlanmıştır. Proje ile yaklaşık 50 milyon m³ su depolanacak, suyun tamamının içme suyuna tahsis edilmesi halinde, 750 bin kişiye içme suyu sağlanabilecek, tamamının sulamaya tahsis edilmesi halinde ise, 80 bin dekar arazi sulanabilecektir. Yeraltı barajı, yeraltısuyu akımına karşı geçirimsiz bir perde oluşturmak amacıyla suyun geçirimsiz birim üzerinde bulunan akifer içinde depolandığı yeraltı mühendislik yapılarıdır. Yeraltısuyu Suni Besleme ise; akiferin su tutma kapasite özelliğini kaybetmemesi ve yeraltısuyu seviyesini yükseltmek amacıyla inşa edilen mühendislik yapılarıdır. Ülkemizdeki yeraltı barajları ve suni beslemeler için yapılan çalışmalar özetlenecek olursa; uygun topografya ve jeolojik koşullar dikkate alınacak; taneli ve sığ akiferlerde, vadilerin daraldığı yerlerde doğal veya yapay akiferler oluşturularak inşa edilecektir. Bünyesinde su tutabilecek özellikteki akiferin tabanına kadar, bir perde veya kil dolgu inşa edilerek, bu yapının gerisinde suyu depolayıp, ihtiyaç anında kullanımımızı sağlayacak şekilde projelendirilmektedir. Özellikle kıyı bölgelerimizde, yeraltı suyunun denize boşalımını veya denizden tuzlu suyun yeraltısuyuna geçişini önlemek amacıyla da inşaa edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı barajları, Suni beslemeler, Eylem planı

ABSTRACT: *Underground dams, which are important for our country in the semi-arid, arid climate zone, are more affordable than the dams built on the surface. The construction of underground damin our country started in the 1970s, and 10 underground dams have been built until now. Within the scope of the action plan of the Ministry of Agriculture and Forestry, 100 underground dams and artificial recharges were planned until 2023. With the project, approximately 50 million cubic meters of water will be stored, if all of the water is allocated to drinking water, 750 thousand people will be provided with drinking water, and if all of them are allocated to irrigation, 80 thousand decares of land can be irrigated. The underground dam is underground engineering structures where water is stored in the aquifer located on the impermeable unit in order to create an impermeable curtain against groundwater flow. Groundwater artificial recharge is; these are engineering structures constructed in order that aquifer does not lose its water holding capacity feature and increase the groundwater level. If the studies for underground dams and artificial feeds in our country are summarized; appropriate topography and geological conditions will be considered; natural or artificial aquifers will be constructed in granular and shallow aquifers where the valleys are narrowed. A curtain or clay filler is built up to the bottom of the aquifer, which is capable of holding water, and it is designed to store water behind this structure and ensure our use when needed. Especially in our coastal areas, they will be constructed to prevent the discharge of groundwater into the sea or the intrusion of salt water from the sea to the groundwater.*

Keywords: *Underground dams, Artificial recharge, Action plan*

1. YERALTI BARAJLARI ve SUNİ BESLEMELERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Yeraltı barajı, yeraltısuyu akımına karşı geçirimsiz bir perde oluşturularak suyun geçirimsiz birim üzerinde bulunan akifer içinde depolanması esasına dayanmaktadır. Uygun topografya ve jeolojik koşullar dikkate alınarak inşa edilen yeraltı barajları özellikle; taneli ve sığ akiferlerde, vadilerin

daraldığı yerlerde inşa edilmelidir. Suyu depolayabilecek ve iletebilecek nitelikte jeolojik yapının olması zorunludur. Yeraltı barajları vadi alüvyonlarında veya sahil akiferlerinde inşa edilmektedir. Yapılan jeolojik ve hidrolojik çalışmaların ardından, yeterli rezervuar hacmine ve uygun beslenim koşullarına sahip olan akiferin mansabına, genellikle geçirimsiz tabaka üzerine oturtulan bir perde inşa edilerek yeraltısuyu akımının engellenmesi ve bu perde gerisinde suyun depolanması veya baraj yapılmadan önce doğal halde depolanan suyun arttırılması şeklindedir. Yeraltı barajları yararlanma amacına, gövdenin tamamen gömülü olmasına veya zemin üzerine yükselmesine, gövde inşaatında kullanılan malzemenin çeşidine göre değişik adlar alabilmektedir (Nilsson, 1988). Yeraltına inşa edilen depolama yapıları Yeraltısuyu Barajı (Groundwater Dam) / Yeraltı Barajı (Underground Dam) ve Rusubat Depolama Barajı (Sand Storage Dam) yapıları olarak ikiye ayrılabilir (Nilsson, 1988).

Şekil 1. Yeraltı Barajı Türleri

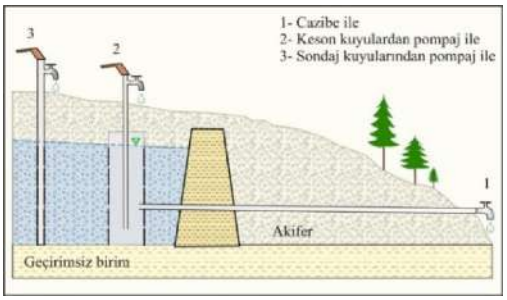
1.1. Yerüstü Barajlarına Göre Avantajları ve Dezavantajları

Çevre ve ekonomi anlamında yerüstü suyu depolamalarına göre daha düşük maliyetli olan yeraltı barajlarının inşaat maliyeti düşük, inşaat süresi kısadır. Su yeraltında depolandığından konut ve araziler su altında kalmaz. Kamulaştırma maliyeti ve buharlaşma kaybı oldukça düşüktür, barajın ekonomik ömrü sediment birikimi olmaması nedeniyle daha uzundur. Taşkınlara neden olma riski yoktur, taşkın ve drenaj sularının tahliyesinde faydalıdır. Karstik boşluklarda çok düşük maliyetlerle yüksek depolama hacimleri elde edilebilir. Delta ovalarında tuzlu su girişimini engellemek için en uygun çözümdür. Kamulaştırılmış malzeme ocaklarının malzeme alımı sonrasında faydaya dönüşmesini sağlamaktadır. Kirlenme ve ötrofikasyon (ekosistemin bozulması) sorunu yoktur.

Dezavantajları ise; depolanacak suyun ve akifer beslenme koşullarının belirlenmesi güçtür. Yeraltı barajının kesin rezervuar hacmini belirlemek oldukça zordur. Depolama hacimleri küçüktür. Su kaçağı gibi problemlerin tespiti güçtür. Suyun terfili (pompajla su temin edilmesi) alınması durumunda işletme enerji maliyetleri yüksektir. Gömülü yapılar olması nedeniyle tesise bakım müdahalesi maliyetleri yüksektir.

1.2 Yeraltı Barajlarından Su Temini

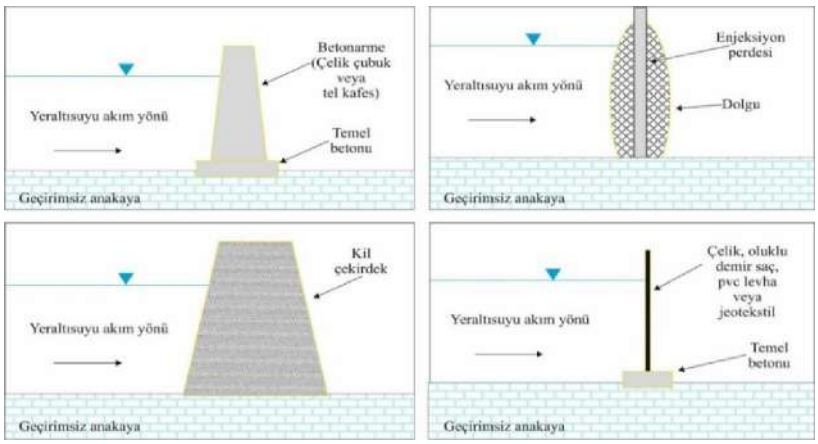
Yeraltı barajlarından su, cazibe veya pompajla elde edilmektedir. Dünyada bugüne kadar inşa edilenlerin çoğundan pompajla yararlanıldığı bilinmektedir. Vadilerde inşa edilen yeraltı barajlarında jeolojik ve topografik koşulların uygun olması durumunda cazibe ile yararlanmak daha kolaydır. Cazibe ile su temini yöntemi; inşaat esnasında (ilave kazılar sebebiyle) maliyeti artırıyor gibi görünse de işletmeye alınan tesisin enerji giderlerini fazlasıyla düşürecektir. Genellikle sahil akiferlerinde enjeksiyonla veya fore kazık benzeri yöntemlerle inşa edilenlerden ancak pompajla su alınabilmektedir. Az tutturulmuş taneli (gevşek) akiferlerde inşa edilen yeraltı barajlarında açılan kuyular, yeraltı su seviyesinin derinliği teknik imkanlara göre sondaj ve keson kuyu olabilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. YAS barajlarından su temin türleri

1.3 Yer Seçimine Yönelik Çalışmalar

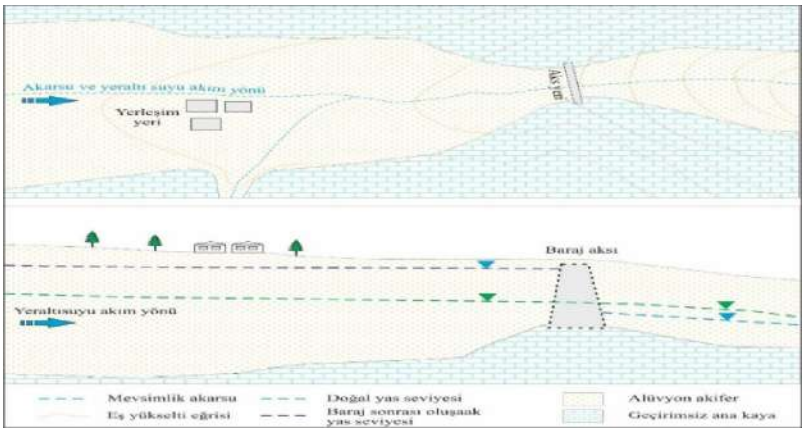
Yer seçimi ve projelendirme yapılmadan önce havza hidrolojisi ve hidrojeolojisi kapsamında yağış, yüzeysel akış, yeraltısuyu beslenimi konuları araştırılmalıdır. Akiferin yüzey alanı ve beslendiği havza alanı geniş olmalı, olmasa bile yağışlı aylarda akifere beslenimin olabileceği yeterli yüzeysel akışın (akarsuyun) veya akifere yan formasyonlardan beslenim olup olmadığı araştırılmalıdır. Akifer kaba taneli veya kırıklı-çatlaklı-erime boşluklu, depolama katsayısı (S) ve hidrolik iletkenliği (K) yüksek olmalıdır. Alüvyonun veya kaya akiferinin altında kazılabilecek veya etkili enjeksiyon yapılabilecek derinlikte geçirimsiz ortam bulunmalıdır (Şekil 3). Alüvyon akiferlerde kalınlığı genellikle 10-15 m'yi geçmeyen ortamlar tercih edilmelidir. Kaya akiferlerinde de daha derin yeraltı barajları inşa edilebilir. Örneğin, Japonya'da karstik kireçtaşlarında enjeksiyonla inşa edilen yeraltı barajının yüksekliği 65 m'dir.



Şekil 3. Gövde tiplerine göre yeraltı barajı çeşitleri (Nilsson, 1988)

Vadilerde yeraltı barajı için en uygun jeolojik-topografik koşullar belirlenirken; daralan bir boğaz gerisinde kalınlaşan ve genişleyen nitelikte ve yeterli büyüklükte yeraltı rezervuarı olmasına, akiferin depolama özellikleri arazi deneyleri (pompalama testleri) ve laboratuvar deneyleriyle araştırılmasına,

süzülmenin fazla olması açısından akiferin ve varsa üzerindeki toprak örtünün kaba taneli (depolama katsayısı ve hidrolik iletkenliği yüksek) bir alüvyon akifer olmasına, akiferin taban formasyonunun geçirimliliği ve derinliği araştırılmalı, tabanının geçirimsiz bir ana kayanın üzerinde yer almasına, akiferdeki yeraltısuyu seviyesi, değişimi ve suyun kalitesine, eksen yeri membasında düze yakın bir vadi eğiminin olmasına, eksen yeri mansabında cazibe ile su almaya elverişli olarak artan topografik eğim olmasına, akiferde depolanacak suyun nasıl temin edileceğine (cazibeyle veya kuyulardan pompajla), cazibeli olarak yararlanılması mümkünse su alma yapısının kotu ve boru çapının belirlenmesine, gövdenin inşası için geçirimsiz malzeme olanakları vb. konuların ayrıntılı olarak araştırılmasına ve projelendirmenin bu çalışmalardan elde edilen verilere göre yapılmasına, kazı güçlüğü ortadan kaldırıldığında, daha kalın alüvyonlarda da yeraltı barajı yapılabileceğine dikkat edilmelidir (Şekil 4).



Şekil 4. Vadilerde YAS Baraj Örneği

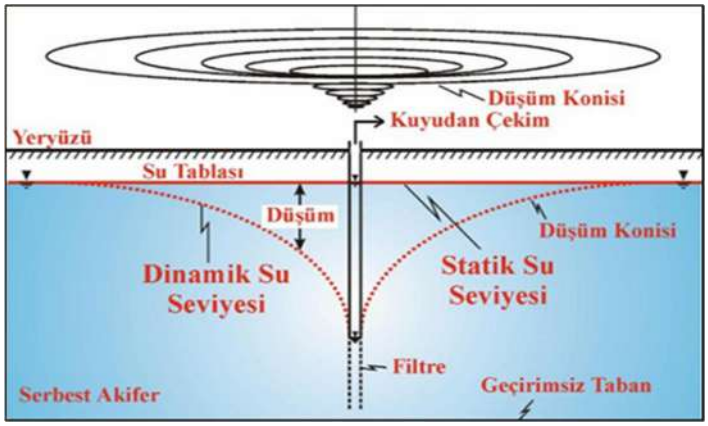
1.4 Akiferlerin Hidrolik Parametreleri Hesaplama Yöntemleri

Bir akiferdeki yeraltısuyunun hareketi ve akiferden yapılan çekim (kullanım) akiferin hidrolik parametrelerine bağlıdır. Dolayısıyla sürdürülebilir bir su kaynakları yönetimi ve su kaynaklarının korunması için akifer parametrelerinin en güvenli şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için farklı arazi (pompa testi, slug test, izleme deneyi gibi) ve laboratuvar yöntemleri (sabit seviyeli permeametreler, düşen seviyeli permeametreler gibi) kullanılmaktadır.
Pompa testinde; akiferden su çekerek (pompalayarak) veya enjekte ederek alan ve zaman içindeki yeraltısu seviyesi değişimini belirleyerek düşüm-zaman verileri ile belli kabuller altında akiferin hidrolik parametreleri belirli yöntemlerle hesaplanmalıdır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Örnek Pompa Test Tablosu

Kuyu Derinliği (m):		22.00	Ankara-Çubuk Güldarbı Köyü	Filtre Kalınlığı (m):	12.00	Tarih	19.04.1962
Dinamik Seviye (m):		4.40		Çekim Debi (l/s):	17.30	Boru Çap	10"
Statik Seviye (m):		1.50		Test Türü:	Cooper-Jacob	Filtre Kalınlığı (m)	12
Düşüm Testi (debi sabit)			Yükselim Testi (motor durdurulduktan sonra)				
Süre (dk)	Suya Olan Derinlik (m)	Düşüm (m)	Süre (dk)	Kümülatif Süre (dk)	t/(t-t0)	Suya Olan Derinlik (m)	Yükselim (m)
1.00	3.39	1.89	2.00	293.00	146.50	2.73	1.23
3.00	3.46	1.96	4.00	295.00	73.75	2.33	0.83
5.00	3.54	2.04	6.00	297.00	49.50	2.22	0.72
7.00	3.63	2.13	8.00	299.00	37.38	2.15	0.65
9.00	3.70	2.20	10.00	301.00	30.10	2.1	0.60
11.00	3.74	2.24	12.00	303.00	25.25	2.06	0.56
13.00	3.80	2.30	14.00	305.00	21.79	2.04	0.54
15.00	3.86	2.36	16.00	307.00	19.19	2.02	0.52
17.00	3.91	2.41	18.00	309.00	17.17	1.99	0.49
19.00	3.94	2.44	20.00	311.00	15.55	1.96	0.46
21.00	3.97	2.47	22.00	313.00	14.23	1.94	0.44
25.00	3.97	2.47	24.00	315.00	13.13	1.92	0.42
29.00	4.00	2.50	26.00	317.00	12.19	1.91	0.41
33.00	4.04	2.54	28.00	319.00	11.39	1.9	0.40
37.00	4.05	2.55	30.00	321.00	10.70	1.89	0.39
41.00	4.07	2.57	32.00	323.00	10.09	1.88	0.38
46.00	4.08	2.58	34.00	325.00	9.56	1.86	0.36
51.00	4.09	2.59	36.00	327.00	9.08	1.85	0.35
56.00	4.10	2.60	38.00	329.00	8.66	1.84	0.34
61.00	4.11	2.61	40.00	331.00	8.28	1.83	0.33
66.00	4.12	2.62	42.00	333.00	7.93	1.83	0.33
71.00	4.15	2.65	44.00	335.00	7.61	1.825	0.33
76.00	4.15	2.65	46.00	337.00	7.33	1.815	0.32
81.00	4.15	2.65	50.00	341.00	6.82	1.8	0.30
86.00	4.16	2.66	55.00	346.00	6.29	1.79	0.29
91.00	4.17	2.67	60.00	351.00	5.85	1.77	0.27
96.00	4.18	2.68	70.00	361.00	5.16	1.75	0.25
101.00	4.19	2.69	80.00	371.00	4.64	1.735	0.24
111.00	4.22	2.72	90.00	381.00	4.23	1.72	0.22

Bir akiferden emniyetli su çekilip çekilmeyeceğini ve ne kadar çekimin akifer için emniyetli olacağı da pompa testleri ile belirlemek mümkündür. Akifer testlerinden; sınır koşullarının varlığı ve konumu, komşu akiferler arası akım olup olmadığı ve miktarı, basınçlı ya da serbest akım koşulları ile kuyu kayıpları ve kuyu veriminin belirlemek amacıyla yapılmalıdır. Pompa testi ile akiferin; Hidrolik İletkenlik Katsayısı (K), İletimlilik Katsayısı (T) ve Depolama Katsayısı (S) belirlenmelidir (Şekil 5).



Şekil 5. Pompa Test Şeması

Pompa testi genel anlamda, pompa kuyusundan yapılan belirli debideki su çekimine karşılık kaydedilen zamana bağlı kuyudaki su seviyesi düşümü ile pompajın kapatılmasından itibaren zamana bağlı kuyudaki su seviyesi yükselimi verilerinin değerlendirilerek, iletimlilik ve hidrolik iletkenlik katsayısının ortaya konması ve pompa kuyusuna belli mesafelerdeki gözlem kuyularının kullanılarak depolama katsayısının tayin edilmesinden ibarettir. Pompa testinin yapıldığı akifer tipi ve akım koşuluna göre yöntem belirlenir. Arazi deneyi tamamlandıktan sonra elde edilen veriler ile uygun metodoloji ile akifer parametreleri ortaya konulur. Akifer tiplerine göre uygun yöntemler (Çizelge 2);

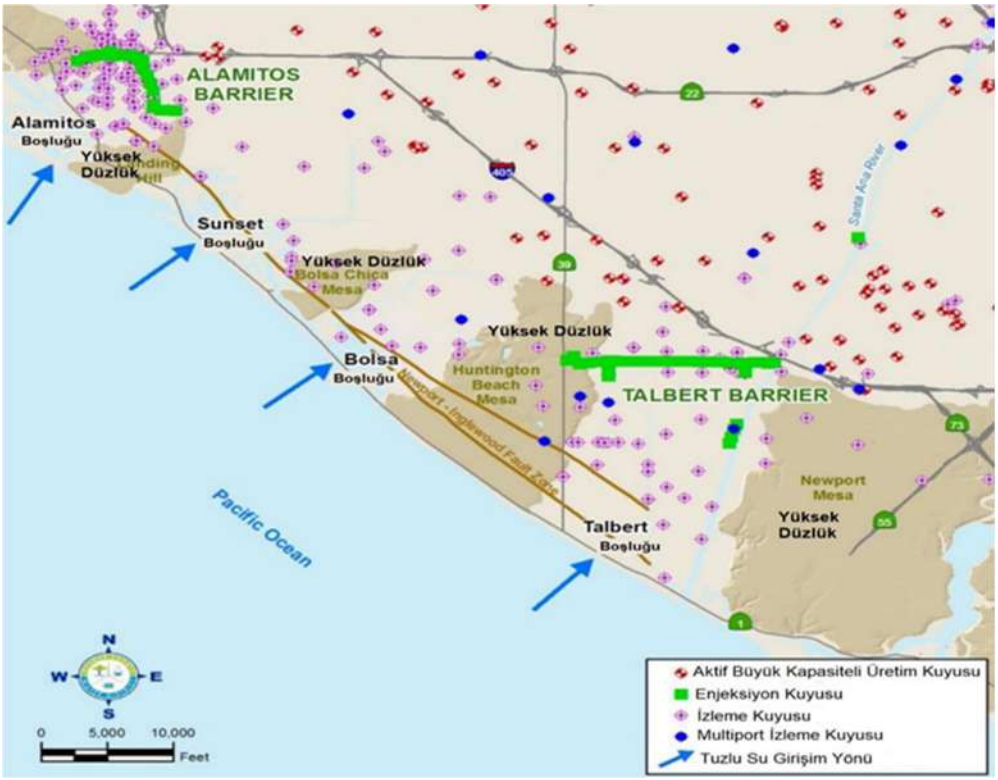
Çizelge 2. Akifer tipine göre yöntemler

Akifer Tipi	Akım Koşulu	Uygulanabilecek Yöntemler
Basınçlı Akifer	Kararlı (Dengeli)	Thiem Yöntemi
	Kararsız (Dengesiz)	Theis Yöntemi, Jacob Yöntemi
Serbest Akifer	Kararlı (Dengeli)	Dupuit Yöntemi
	Kararsız (Dengesiz)	Neuman Yöntemi
Akitard (Sızıntılı Akifer)		Hantush Yöntemi

1.5 Malzeme, Fizibilite ve Projelendirme

Yeraltı barajlarında geçirimsizliği sağlayacak olan perdenin inşaatında değişik türde doğal veya yapay malzemeler kullanılmaktadır. En çok kullanılanlar kil, beton, plastik, blok kaya veya bunların kombinasyonudur. Yeraltı barajlarında inşaat maliyetini etkileyen kalemler yüzey barajlarında olduğu gibi etüt ve sondaj çalışmaları, gövde de kullanılacak malzemenin türü, taşıma maliyeti, gövde ve isale hattı kazıları, su alma yapısı veya sondaj kuyusu inşaatları, pompalar ve enerji tesisleri gibi önemli parametrelerdir. Malzemenin seçiminde, yerüstü barajlarında olduğu gibi, doğal koşullar ile piyasa koşulları etkili olmaktadır. Ekonomiklik açısından, yüzey barajlarında olduğu gibi en ucuz malzeme kullanılmalıdır. Bunun için, mümkün olduğu kadar baraja yakın çevresinden kazılan malzemenin kullanılması önerilir. Farklı tipteki barajların dizayn standartları baraj tipine göre değişmektedir. Genel olarak en ucuz yeraltı barajları yakın yöreden ve kazılan alandan sağlanabilen toprak dolgu barajlardır.

Dünyadaki yeraltı barajı örnekleri incelendiğinde; çatlaklı kaya akiferlerinde enjeksiyon perdesi ile inşa edilen barajlar yapılmaya başlanmıştır. Özellikle sahil akiferlerinde tuzlu deniz suyu girişimini önleyerek denize dökülen tatlı yeraltısuyunu akiferde depolayan bu tür barajlar teknik ve ekonomik analizler yapılarak uygun görülmesi halinde inşa edilebilmektedir. Dünyada yeraltısuyu besleme çalışmaları 1930 lu yıllarda başlamıştır. Tarım faaliyeti ve aşırı göç alan San havzası Orange County akiferinde ilk yas besleme çalışmaları yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Okyanustan tuzlu girişimine karşı önlem bariyeri

1.6 Kazı Çalışmaları ve Gövde İnşaatı

Akifer kalınlığı arttıkça, başka bir deyişle gövdenin oturtulacağı geçirimsiz formasyonun tabanı derinleştikçe kazı miktarı ve güçlüğü o ölçüde artmaktadır. Kazıda en önemli sorun şev stabilitesi ve su seviyesinin altına inildiğinde drenaj sorunudur. Drenaj, ya açılacak kuyulardan, ya da kazı çukurundan pompajla yapılabilir. Baraj inşaatının bir an önce bitirilebilmesi için, kazı çalışmalarına başlanmadan önce bütün hazırlıklar tamamlanmış, şantiye alanında yerleşim planı hazırlanmış, drenaj kuyuları açılmış, enerji, kazı makineleri ve taşıyıcı araçlar ve gerekli diğer araç-gereçler hazırlanmış olmalıdır. Perde derinliği, makinelerin maksimum kazı derinliği olan 5-6'm den fazla ise kazı, ikinci, hatta üçüncü palye oluşturularak ve uygun şev eğimi verilerek güvenli bir şekilde yapılmalıdır. Kazılan malzemenin tamamına yakını tekrar geri doldurulacağından, ulaşım, makinelerin manevra alanı, şantiye yerleşimi gibi hususlar göz önüne alınarak kazı alanına en yakın yerlere boşaltılmalıdır. Geçirimsiz perdenin yapımında kil malzemesi kullanılacak ise, standardına uygun su muhtevasında ve kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmalıdır.

1.7 Su Alma Yapısı, İsale hattı ve Kuyu İnşası

Su, cazibe ile elde edilecekse, su alma yapısı dolgunun inşaatı sırasında projesinde belirtilen kota inşa edilir. Bunun için genellikle gövde arkasına etrafı kaba taneli çakıl malzeme (çakıl zarfı) ile kuşaklanan bir keson kuyu inşa edilerek isale hattının ucu gövde içinden keson kuyuya bağlanmalıdır. Su alma yapısının kotu, topografik yapıya bağlı olarak isale hattı için yapılacak kazı miktarına ve suyun götürüleceği sulama alanının veya havuz/depo gibi ikinci depolama yapılarının kotuna bağlıdır. Su alma

yapısı ne kadar derine inşa edilirse, cazibe ile alınabilecek su o kadar fazla olacaktır. Ancak, su alma yapısı derine indikçe isale hattı için kazı maliyeti ve kazı güçlüğü de artmaktadır.

Barajdan kuyular açılarak pompajla yararlanılması planlanmışsa, kuyu yerlerinin seçimi için ayrıntılı çalışmalar (jeofizik çalışmalar sonucunda araştırma kuyuları ve pompa testleri) yapılmalı, bu çalışmalardan elde edilen verilere göre matematiksel model kullanılarak optimum işletme koşulları belirlenmelidir. Sonuç olarak; yeraltı barajlarının mümkünse her iki yöntemle de su elde edilebilmesi öngörülerek inşa edilmesinde yarar görülmektedir.

1.8 İşletme Süresince Yapılacak Olan Çalışmalar

Yeraltı barajlarında ve suni beslenme tesisi inşaatı sonrasında yapılması gereken çalışmalar ve ölçümler yerüstü barajlarındakine benzerdir. Yeraltı baraj gölündeki su seviye değişimini gözlemek amacıyla gözlem kuyuları açılmalıdır. Gözlem kuyularının yerleri ve sayısı, akiferin boyutlarına, heterojenliğine, yeraltı barajının kullanma şekline (kuyularla veya cazibe ile) göre belirlenmelidir. Kuyudan pompajla çekilen veya cazibe ile alınan debiye karşılık akiferde su seviyesindeki düşüm veya beslenme dönemindeki yükselimler kaydedildiğinde, akiferin davranışı daha net bir şekilde ortaya konacak, aynı zamanda da işletmede yaşanacak belirsizlikler ve güçlükler ortadan kaldırılmış olacaktır. Özellikle yağışların düzensiz ve yetersiz olduğu bölgelerde ölçümlerin sık aralıklarla yapılması son derece önemlidir. Cazibe ile su elde edilen yeraltı barajlarında debi değişimi ile birlikte akiferdeki su seviye değişimi de periyodik olarak kaydedilmelidir.

1.9 Dünyadan ve Ülkemizden Çalışmalar

Yeraltı barajlarının tarihine bakıldığında, suyun yeraltında depolanması yeni bir yöntem değildir. Romalılar zamanında Sardinia Adası ve Tunus'da yeraltı barajı inşa edilmiş olması, Kuzey Afrika'da bu işin çok eskilerden yapıldığını göstermektedir. 18. Yüzyılda Arizona'da (ABD) yapay kum-depolama (sand-storage dam) barajı konusunda bir rapor bulunmaktadır. Yakın tarihlerde Japonya, Hindistan, Güney ve Doğu Afrika ve Brezilya'da yeni teknikler geliştirildiği ve uygulandığı görülmektedir. UNESCO, Afrika'da birkaç barajın yapımını desteklemiştir. Uygun yerler seçildiğinde ve tekniğine uygun bir şekilde inşa edildiğinde yeraltı barajlarının başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 7,8).

Şekil 7. Fukusato Yeraltı Barajı, Japonya

Şekil 8. Büyük Cırcıp 1 Yeraltı Barajı- Şanlıurfa

2. DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ'NDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Devlet Su İşleri tarafından yapılacak çalışmalar kapsamında 2023 yılına kadar 100 adet yer altı barajı ve suni beslemenin tamamlanıp, işletmeye alınması hedeflenmiş ve yeraltı barajı projelerine öncelik tanınmıştır (Şekil 9). Bu kapsamda; birçok Bölge Müdürlüğümüz çalışmalara başlamıştır. Bu çalışmalara yön vermek amacıyla Etüt Planlama ve Tahsisler Dairesi Başkanlığı ve Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı tarafından "Yeraltı Barajı Teknik Raporu" ve "Suni Besleme Teknik Raporu" formatı hazırlanmıştır. 2016 yılında revize edilen "DSİ Jeoteknik Etüt Şartnamesi"ne Yeraltı barajlarının tüm aşamalarında (öninceleme, planlama, kesin proje ve uygulama) yapılması gereken Jeolojik-Jeoteknik çalışmaları içeren başlıklar ilave edilmiştir.

Şekil 9. Eylem Planı Kapsamında İnşa Edilecek Olan Yeraltı Barajları ve Suni Besleme Tesisleri

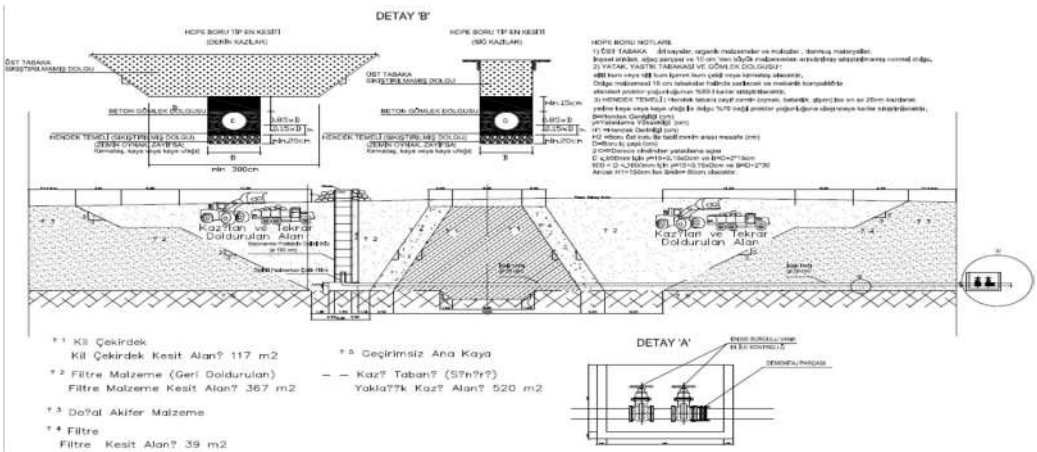
2.1 Yeraltı Barajı Gövde Maliyet Mukayesesi Şematik Gösterimi

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Etüt, Planlama ve Tahsisler Dairesi Başkanlığımız tarafından yapılan çalışmalar neticesinde gövde ve geçirimsizlik perdesi yapılacak projeler için tip kesit ve mukayeseli yaklaşık maliyetler çıkarılmıştır (Çizelge 3).

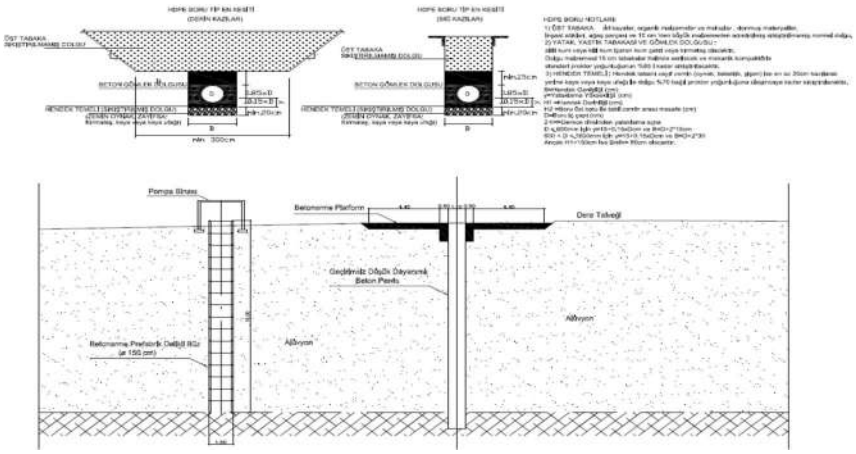
Yapılan Maliyet Mukayesesi hesaplarına göre derinliğin 20 m'ye ulaşması durumda Geçirimsizlik Perdesi (SlurryTrench), Kil Çekirdekli Gövde imalatından daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3. Mukayese Tablosu

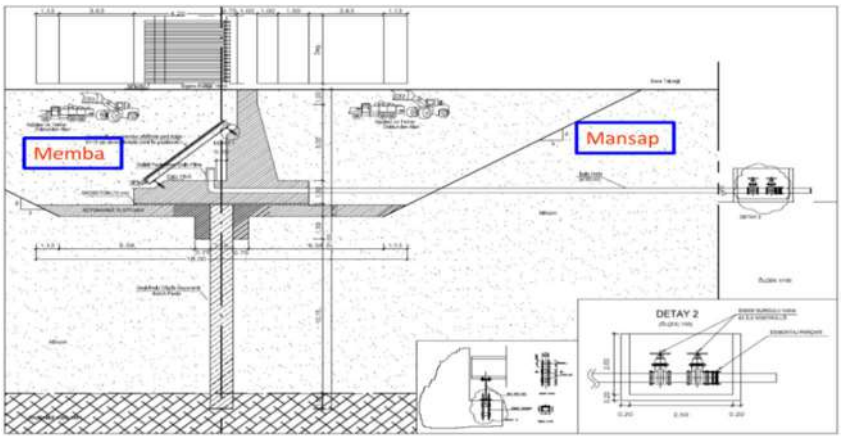
100 m Uzunluğunda ve Çeşitli Yüksekliklerdeki Yer altı Barajı Gövdesi Maliyetleri (%25 yüklenici karı ve genel giderler dahil)		
Yapı yüksekliği(m)	**Kil Çekirdekli Gövde (TL)**	**Slurry Trench (TL)**
10	1.277.257	1.760.289
15	2.343.324	2.560.420
20	3.551.594	3.360.551



Şekil 10. Kil Çekirdekli Gövde ve İsale Hattı Kesitleri (H:10 m).



Şekil 11. SlurryTrench Şematik Gösterimi.



Şekil 12. Payandalı Yeraltı Barajı Şematik Gösterimi.

2.2 Yeraltı Barajları Eylem Planı

Gelinen süreçte 18 adet Devlet Su İşleri Bölge Müdürlüğümüz sınırlarında 105 adet proje çalışma takvimine alınmış olup, bunlardan 100 adedi netleştirilerek aşağıdaki eylem planına uygun şekilde inşa edilecektir. Eylem Planı içerisinde yer alan projelerden uygun olmayanların yerine bölgesince yeni projeler çalışılarak eylem pl anı kapsamına alınacaktır.

Çizelge 4. 2019-2023 Eylem Planı

EYLEM PLANI (2019-2023)

Eylem	Sorumlu Birim	2019		2020										2021	2022	2023
		11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
PLANLAMA	EPTDP JHYDB															
PROJE	BHESDB JHYDB															
İNŞAAT	BHESDB JHYDB MIDDB SGDB EMKDB İDB	3 Adet												16 Adet	26 Adet	35 Adet	25 Adet
TOPLAM		105														

Kısaltmalar: **EPTDB:** Etüt, Planlama ve Tahsisler Dairesi Başkanlığı, **BHESDB:** Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, **JHYDB:** Jeoteknik Hizmetler ve YAS Dairesi Başkanlığı, **MIDDB:** Makine İmalat ve Donatım Dairesi Başkanlığı, **SGDB:** Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, **EMKDB:** Emlak ve Kamulaştırma Dairesi Başkanlığı, **İDB:** İçmesuyu Dairesi Başkanlığı

3. SONUÇLAR

Türkiye'de artan nüfusla birlikte içme suyu, endüstri su ihtiyacı ve özellikle tarımsal amaçla kullanılanım su ihtiyacı da artmaktadır. Bu nedenle yeraltısuyu aşırı kullanım ve kuraklık etkisiyle giderek azalmaktadır. Akiferin su tutma kapasite özelliğini kaybetmemesi ve yeraltısuyu seviyesini yükseltmek amacıyla yeraltı barajları ve yeraltısuyu suni beslenmeler inşa edilmelidir. Özellikle kıyı akiferlerinde; su kullanımı arttıkça akiferdeki yeraltısuyu deniz ve okyanuslardaki tuzlu su girişimlerinden etkilenmeye başlayacaktır. Dünyada tuzlu su girişimini engellemek için kıyı akiferlerinde bariyerler inşa edilmektedir. Ayrıca bu bariyerlerin gerisinde biriken yeraltısuları tuzlu suyu ötelemek amacıyla tatlı su enjeksiyonları da yapılmaya başlanılmıştır. Artan nüfus, suyun kullanımı ve tuzlu suyun girişiminin ilerlemesi 1970 li yıllarda giderek artınca, atık su arıtma tesisleri kurulmuş ve arıtılan sular ile tuzlu girişimleri giderimi çalışmalarına başlanılmıştır. Ülkemizdeki kıyı akiferlerinde de bu yöntem uygulanabilir.

Yeraltı Barajı ve Suni beslenme alanı olarak inşası düşünülen su yapılarında; yer seçimine, akiferin hidrolik özelliklerine, buna bağlı olarak yapılacak kazı sırasında kazı derinliğine, gövde tiplerine, su yapılarında kullanılacak malzemelerin özelliklerine, su alma yapısının yer seçimine, isale hattı ve kuyu inşasındaki kriterler açık ve net olarak ortaya konulmalıdır. Yüzey yapılarında olduğu yeraltında yapılacak çalışmalarda da jeoteknik ve hidrojeolojik çalışmalar; büro, arazi, laboratuvar çalışmaları yanı sıra arazide yapılacak arazi deneyleri, temel ve su sondajlarıyla detaylı çalışılmalıdır. Farklı derinliklerde farklı gövde tipleri çalışılarak gövde maliyet mukayese analizleri yapılarak en ekonomik olan gövde tipi seçilmelidir. Ülkemizde gelinen süreçte DSİ'nin 18 Bölge Müdürlüğü sınırlarında 100 adet proje çalışma takvimine alınmıştır. Bu projelerin planlama ve projelendirme çalışmaları Bölge Müdürlükleri ve Genel Müdürlük tarafından yapılacak olup 2023 yılına kadar yeraltı barajları ve suni besleme çalışmalarının tamamlanması hedeflenmektedir.

4. KAYNAKLAR

Apaydın, A, 2014. Yer Seçiminden İşletmeye Yeraltı Barajları. Devler Su işleri Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

DSİ Genel Müdürlüğü 2019. Yeraltı Barajları Bilgilendirme Toplantısı, Ankara.

Nilsson, A. 1988. Groundwater Damsfor Small-Scale Water Supply. IT Publications, London.

Önen, M.O, 2019. Yeraltında Su Depolanması ve Yönetimi: Orange County Akiferi Örneği.

Özmen, M, 2019. Yeraltısuları İhtisas Eğitimi Ders Notları, Devlet Su İşleri 14. Bölge Müdürlüğü Konya.

Özmen, M, 2020. Yeraltı Barajları ve Yeraltısuyu Suni Besleme Tesislerinde Jeoteknik Etüt Çalışmalar Ve Uygulamalardan Örnekler, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Şube Müdürleri – Sondaj Şube Müdürleri toplantısı–İstanbul.

Deriner Barajı Temelindeki Artvin Granitoyidinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Derinlikle Değişimi

The Investigation of Index and Mechanical Properties of Artvin Granitoid with Depth, Located at the Foundation of Deriner Dam

Ö. Coşkun[1,*], K. Ulamış[2], R. Kılıç[3]

[1] Dolsar Mühendislik A.Ş., Çankaya, Ankara
[2] Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara
[3] Ankara Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Cebeci, Ankara
*(*ocoskun@dolsar.com.tr)*

ÖZ: Ayrışma kayaçların dayanımı, taşıma gücü, oturma, geçirimlilik gibi özelliklerini olumsuz etkilediğinden üzerinde veya içindeki yapıların tasarımında dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada Artvin granodiyoritinin mineralojisi, fiziksel ve mekanik özellikleri, bu özellikler arasındaki ilişkiler ve ayrışma derecesinin derinlikle değişimi araştırılmıştır. Baraj aks yeri ve çevresinden temin edilebilen karot örneklerinde yapılan incelemelerde granodiyoritin temel mineralojik bileşimi kuvars, feldispat, ortoklaz, hornblend, epidot, muskovit, amfibol, piroksen, kalsit ve piritten oluşmaktadır. Kuru birim ağırlığı 25.95 kN/m^3 ile 27.19 kN/m^3, doygun birim ağırlığı 26.00 kN/m^3 ile 27.22 kN/m^3, P-dalga hızı kuru örneklerde 4.24 ile 6.39 km/s, doygun örneklerde 4.84 ile 6.64 km/s, tek eksenli basma dayanımı 8.79 MPa ile 110.89 MPa arasında değişmektedir. Farklı tür ve boyutlardaki minerallerin, farklı yönde dilinim yüzeylerinin bulunması tek eksenli basma dayanımı değer aralığının değişmesine neden olmaktadır. Hidrotermal ayrışmaya uğramış granodiyoritteki silis ve kalsit dolgular birim ağırlığı, P-dalga hızı ve tek eksenli basma dayanımı arasındaki ve bu özelliklerin derinlikle değişiminde kuvvetli ilişki kurulabilmesini olumsuz etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Artvin Granitoyidi, Deriner barajı, Hidrotermal ayrışma, Tek eksenli basma dayanımı, P-dalga hızı

ABSTRACT: *Alteration adversely affects the strength, bearing capacity, settlement and permeability of rocks, which must be taken into account for structure design on or inside. In this study, physical and mechanical properties of Artvin granodiorite, the relationships between these properties and the degree of alteration were investigated. Granodiorite consists of quartz, feldspar, orthoclase, hornblende, epidote, muscovite, amphibole, pyroxene, calcite and pyrite minerals. Dry unit weight of samples are 25.95 kN/m³ and 27.19 kN/m³, saturated unit weights are 26.00 kN/m³ and 27.22 kN/m³, P-wave velocity varies between 4.24 to 6.39 km/s in dry samples and 4.84 and 6.64 km/s in saturated samples. Uniaxial compressive strength varies between 8.79 MPa and 110.89 MPa. The existence of different types and sizes of minerals and cleavage surfaces in different directions causes the uniaxial compression strength value range to change. Silica and calcite fillings in hydrothermally altered granodiorite negatively affect the ability to establish a strong relationship between unit weight, P-wave velocity and uniaxial compression strength and the change of these properties with depth.*

Keywords: *Artvin Granitoid, Deriner Dam, Hydrothermal Alteration, Uniaxial compressive strength, P-wave velocity*

1. GİRİŞ

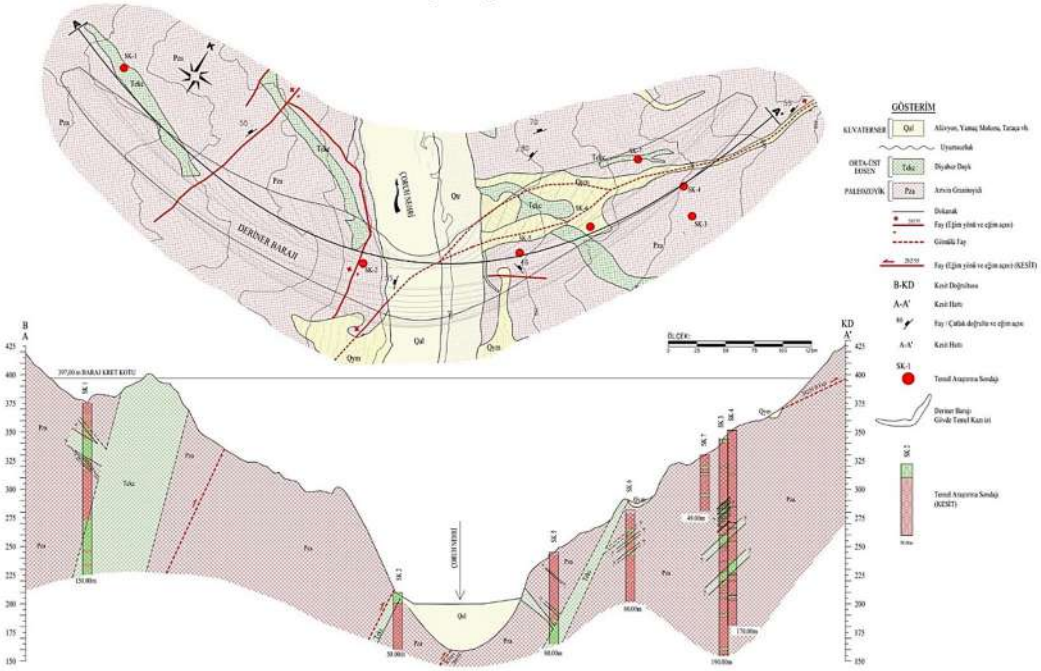
Kayaçların temel olabilme ve malzeme olarak kullanılabilirliği, türü ve süreksizliklerin yanında ayrışma derecesiyle yakından ilgilidir. Kayaçlar üzerinden yük alınması ile oluşan gevşemeye bağlı çatlak ve kırıkların oluşması ve atmosferik şartların etkisi ile yüzeye yakın kesimlerde fiziksel parçalanma ve kimyasal değişimler gerçekleşir. Bu durum farklı araştırıcılar tarafından günlenme, bozunma, bozulma, bozuşma gibi terimlerle ifade edilmektedir. Günlenme yüzeyden derinlere inildikçe örtü yükünün artmasına ve atmosferik etkilerin azalmasına bağlı olarak azalır. Ayrışma ise hidrotermal suların etkisi ile kayaçları oluşturan minerallerin kimyasal olarak değişmesi sonucunda gelişir. Hidrotermal ayrışmaya uğrayan kayaçlar erozyonun etkisi ile yüzeye kadar ulaşmakta ve ıslanma-kuruma ve donma-çözülme ile günlenmeye (bozunmaya) uğramaktadır. Bu durumda hidrotermal ayrışma etkin olmaktadır.

Ayrışma ile kayaçların tek eksenli basma dayanımı, kohezyonu ile içsel sürtünme açısı azalmakta ve geçirgenlik özellikleri de değişmektedir. Bu çalışmada Çoruh Nehri üzerinde inşa edilmiş, 249.0 m yükseklikteki Deriner Barajı (Şekil 1) temelindeki Artvin granitoyidinde 49.0 m ile 190.0 m arasındaki derinliklerde açılan sondajlardan alınan karot örneklerinin kuru ve doygun birim ağırlığı, P-dalgası hızı, tek eksenli basma dayanımı incelenmiş ve farklı sınıflama sistemlerine göre ayrışma derecesi belirlenmiş, özellikler arasındaki ilişkiler ile özelliklerin derinlikle değişimleri incelenmiştir. Granitik kayaçlarda ayrışma mekanizması ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur (Arel ve Tuğrul, 2001; Ceryan ve Ceryan, 2003; Ceryan, vd. 2006; Ceryan vd. 2007; Vasconcelos, vd. 2008; Heidari, 2013).

Şekil 1. İnceleme alanı yer bulduru haritası.

2. JEOLOJİ

İnceleme alanı ve yakın çevresinde Paleozoik yaşlı Artvin Granitoyiti ile bunun üzerine uyumsuz olarak gelen Liyas yaşlı Hamurkesen formasyonuna ait birimler gözlenmektedir. Artvin granitoyidleri diyabaz, gabro, granit porfir ve dasit daykları ile kesilmiş olup, kataklastik ve milonitik zonlar gözlenmiştir (Keskin 2013; Kanar 2016). İnceleme alanı jeoloji haritası ve kesiti Şekil 2'de verilmiştir.



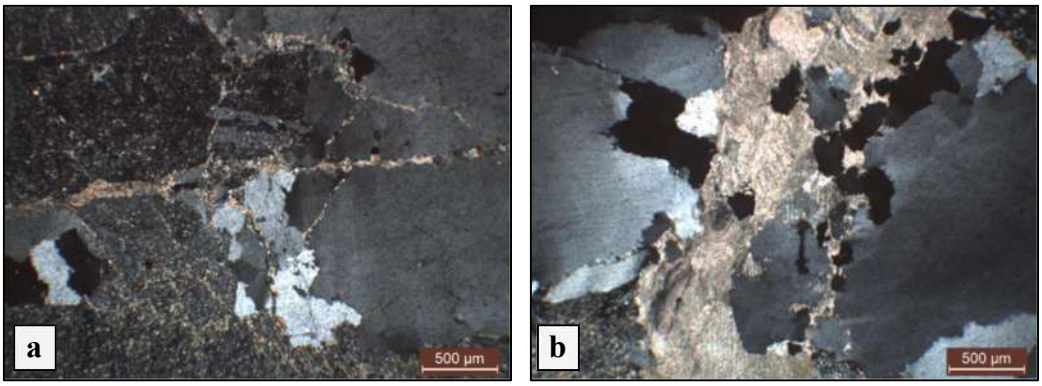
Şekil 2. İnceleme alanı jeoloji haritası ile mühendislik jeolojisi kesiti.

3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

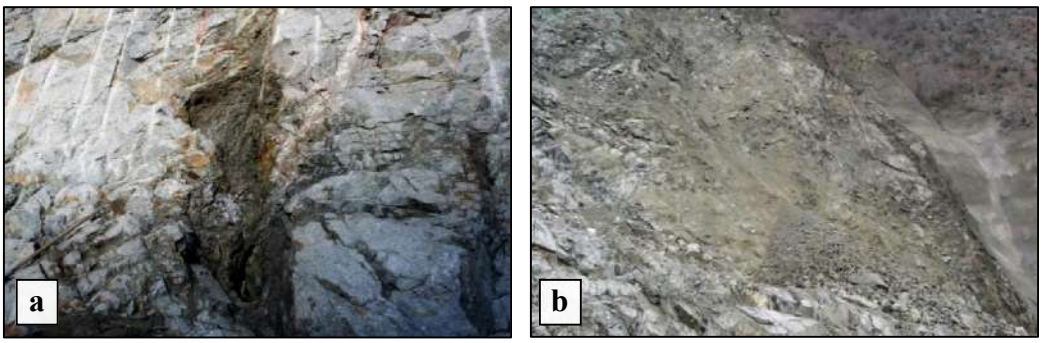
İnceleme alanından alınan sondaj karotlarının mineralojik-petrografik incelemeleri ile fiziksel ve jeomekanik özellikleri Ankara Üniversitesi Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda incelenmiştir.

3.1. Mineralojik ve Petrografik Özellikler

Renk ve dokusal açıdan farklı ayrışma özellikleri gösteren örneklerde felsik ana bileşenler kuvars, alkali feldispat ve plajiyoklas, mafik mineraller, amfibol ve piroksendir. Granodiyoritin çatlakları hidrotermal sularla gelen kuvars ve kalsit ile doldurmuştur (Şekil 3). Opak minerallerden piritin hidrotermal süreçlerle getirildiği ve kayacın yapısındaki çatlaklar boyunca sıralı şekilde dizildiği gözlenmiştir. Kuvars kristalleri kayacın oluşumundan sonra sıkışmaya bağlı olarak birbirlerine girik durumdadır. Örneklerin tamamında serizitleşme yanında kısmen kloritleşme ve pertitleşme mevcuttur.



Şekil 3. SK 7 den 15,5 m (a) ve SK 1 den 64,0 m (b) alınan örnekler. İri taneli hidrotermal kuvarslar, serizitleşmiş feldispatlar ve kalsit damarları (çift nikol).



Şekil 4. Baraj temelindeki hidrotermal ayrışma zonu (a), fiziksel ayrışma yüzeyleri (b)

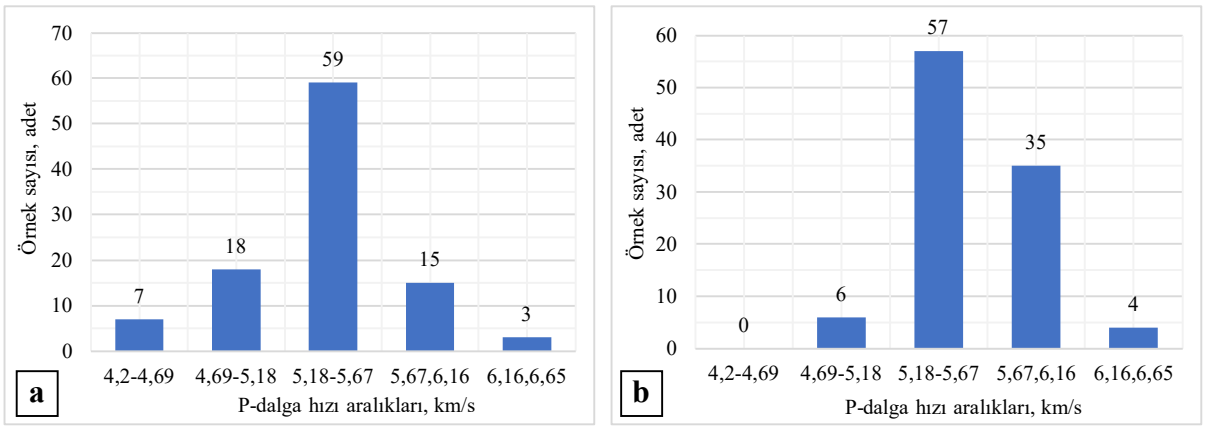
Granodiyoritin ISRM (2007) görsel sınıflaması, P-dalga hızı sınıflaması (Iliev, 1967) ve Kılıç (1999) P-dalga hızına göre belirlenen ayrışma sınıf ve yüzde oranları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Örneklerin farklı sınıflamalara göre belirlenen ayrışma yüzdeleri

	Tanım	Ayrışma yüzdesi, %
ISRM (2007)	Taze	46.0
	Az ayrışmış	27.5
	Orta derecede ayrışmış	26.6
Iliev (1967)	Taze	81.4
	Az ayrışmış	18.6
Kılıç (1999)	Az ayrışmış	50.0
	Orta ayrışmış	49.0
	Çok ayrışmış	1.0

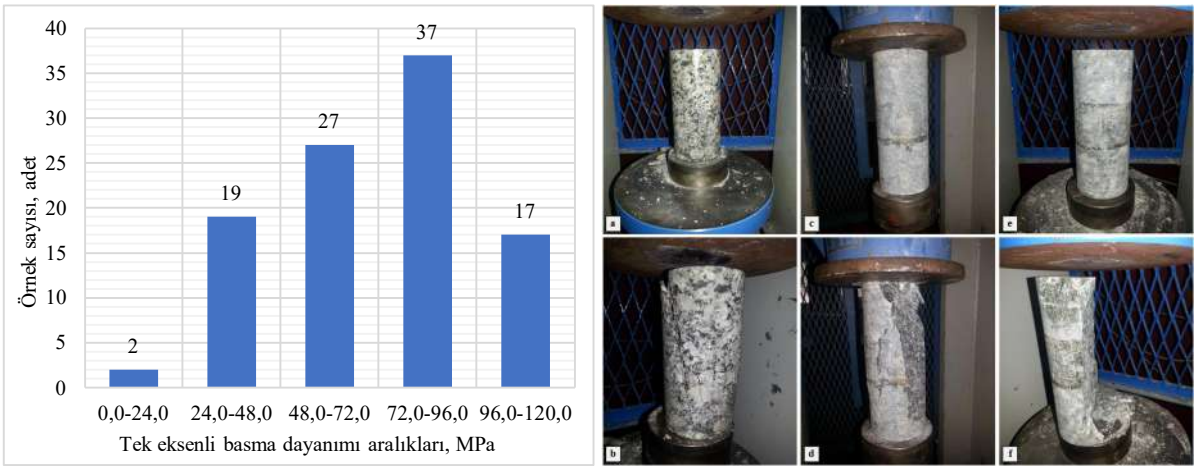
3.2. Fiziksel ve Jeomekanik Özellikler

Granodiyoritin kuru ve doygun birim ağırlığı ISRM (2007) standardına göre belirlenmiştir. Kuru birim ağırlığı 25.95 kN/m^3 ile 27.19 kN/m^3 arasındadır. Doygun birim ağırlığı ise 26.00 kN/m^3 ile 27.22 kN/m^3 aralığındadır. P-dalga hızı kuru örneklerde ($V_{p(k)}$) 4.24 km/s ile 6.39 km/s arasında ve doygun örneklerde ($V_{p(d)}$) 4.84 km/s ile 6.64 km/s arasında değişmektedir. Örneklerin $V_{p(k)}$ nın %17.6'sı ve $V_{p(d)}$ nin %38.2 si 5.67 km/s ile 6.65 km/s aralığında dağılım göstermektedir. Örneklerin su içeriği arttıkça P-dalga hızının yükseldiği gözlenmiştir (Şekil 5). Granodiyoritler, Iliev (1967) sınıflamasına göre %81.4'ü "Taze-Ayrışmamış" ve %18.6'sı "Az Ayrışmış" kayaç sınıfına girmektedir. Iliev (1967) sınıflaması siyenitler için yapılmış olup, granodiyoritleri tam olarak temsil etmediği ayrışma sınıflaması sonuçlarından anlaşılmaktadır. Kılıç (1999) tarafından bazalt ve diyabaz türü kayaçlar için önerilen Birleşik ayrışma indisine (UAI) göre %50.0'si "Az Ayrışmış", %49.0'u "Orta Ayrışmış" ve %1.0'i "Çok Ayrışmış" kaya grubundadır. Granodiyorit iri taneli kristallerden oluşmaktadır. Minerallerin çeşitliliği ve boyutunun farklı olması, uzun eksenlerinin yönelimi, kayaç içerisindeki mikro çatlakların mineral kontaklarındaki ayrışmış yüzeyleri boyunca gelişmesi, çatlakların kuvars ve kalsit gibi ikincil minerallerle doldurulmuş olması granodiyoritin P-dalga hızı ve tek eksenli basınç dayanımını doğrudan etkilediği gözlenmektedir.



Şekil 5. Örneklerin kuru (a) ve doygun (b) koşullardaki P-dalga hızı dağılımları.

Granodiyoritin tek eksenli basma dayanımı 8.79 MPa ile 110.89 MPa arasında değişmektedir (Şekil 6). Deere ve Miller (1966) ve Kılıç (1999) tarafından önerilen Birleşik Ayrışma İndeksi sınıflamasına göre değerlendirilmiş, Deere ve Miller (1966) sınıflamasına göre granodiyoritlerde %1 "yüksek dayanımlı", %33.3 "orta dayanımlı", %44.1 "düşük dayanımlı" ve %21.6 "çok düşük dayanımlı"dır. UAI sınıflamasına göre örneklerin %12.8'i "az ayrışmış", %48.0'i "orta ayrışmış", %26.4'ü "çok ayrışmış" ve %12.8'i "son derece ayrışmış" kaya grubundadır. Tek eksenli basma dayanımını esas alan Heidari vd. (2013) sınıflamasına göre granodiyoritlerin %1.0'u "taze", %19.6'sı "az ayrışmış", %63.7'si "orta ayrışmış" ve %15.7'si "çok ayrışmış" olup, "tamamen ayrışmış" sınıfında örnek gözlenmemiştir.



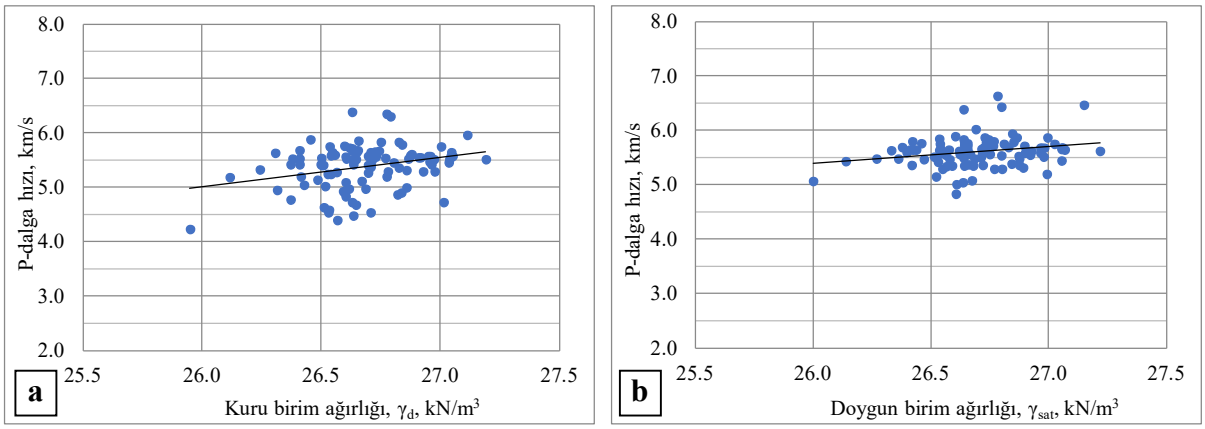
Şekil 6. Örneklerin tek eksenli basma dayanımı dağılımları (solda) ve SK-5 (a,b), SK-6 (c,d) ve SK-7 (e,f) kuyularından alınan örneklerin deneyden önceki (a, c, e) ve sonraki (b, d, f) görünümleri (sağda).

4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Değerlendirmelerde mineralojik özellikler, kuru birim ağırlığı (γ_d), doygun birim ağırlığı (γ_{sat}), kuru ($V_{p(k)}$) ve doygun P-dalgası hızı ($V_{p(d)}$) ile tek eksenli basma dayanımı (σ_c) dikkate alınmıştır.

4.1. Birim Ağırlığı – P-dalga Hızı İlişkisi

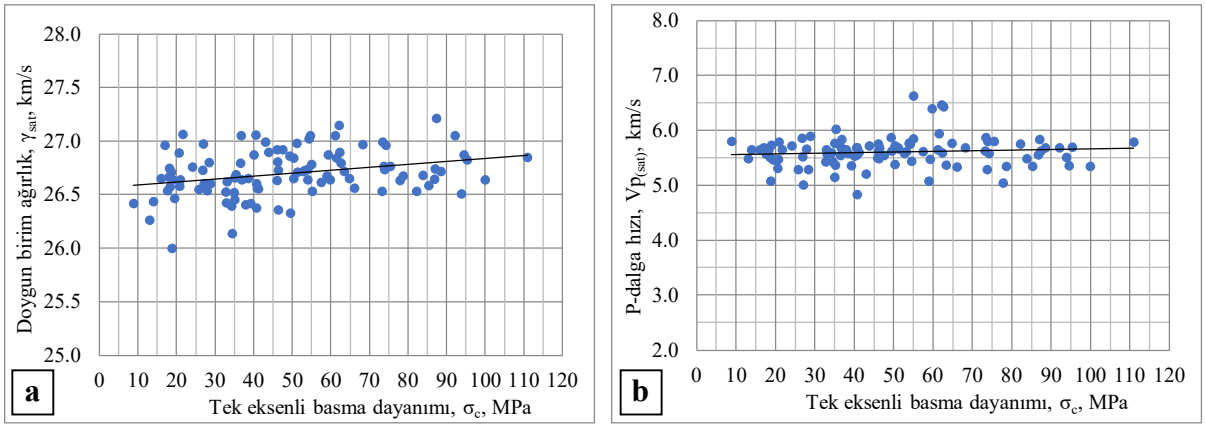
Kuru birim ağırlığı ile $V_{p(k)}$ arasındaki korelasyon katsayısı %8.51'dir. Doygun birim ağırlığı 26.00 kN/m^3 ile 27.22 kN/m^3 ve P-dalga hızı 4.84 km/s ile 6.64 km/s arasında değişmekte olup, aralarındaki ilişkinin korelasyon katsayısı r^2=%5.53'tür. En yüksek $V_{p(k)}$ 6.39 km/s ve $V_{p(d)}$ 6.64 km/s olup, doygunluğa bağlı olarak V_p nin artış oranı %3.8 dir.



Şekil 7. Kuru (a) ve doygun (b) birim ağırlığı P-dalga hızı ilişkisi.

4.2. Tek Eksenli Basma Dayanımı ile Birim Ağırlığı ve P-dalga hızı İlişkisi

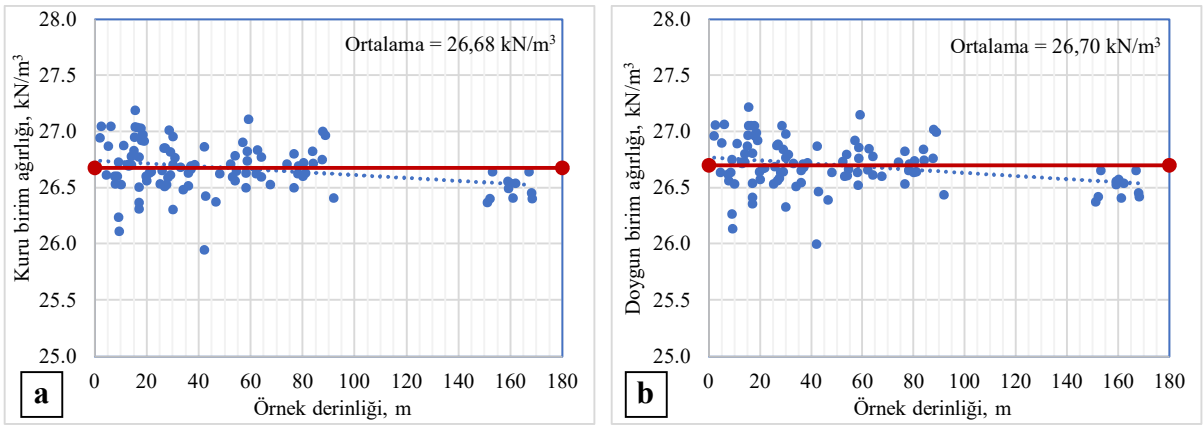
Doygun birim ağırlığı 26.00 kN/m^3 ile 27.22 kN/m^3 arasında ve tek eksenli basma dayanımı ise 8.79 MPa ile 110.89 MPa arasında değişmektedir (Şekil 8a, b). σ_c-γ_{sat} ilişkisinde korelasyon katsayısı r^2=%9.12 olup, doygun birim ağırlığı artışı ile tek eksenli basma dayanımı artışının düşük seviyede olduğunu göstermektedir (Şekil 8a). Granodiyoritin tek eksenli basma dayanımı ve P-dalga hızı arasında r^2=%0.78 ile ifade edilebilecek çok zayıf bir ilişki gözlenmektedir (Şekil 8b).



Şekil 8. Tek eksenli basma dayanımı ile birim ağırlığı (a) ve P-dalga hızı (b) ilişkisi.

4.3. Birim Ağırlığının Derinlikle Değişimi

En düşük kuru birim ağırlığı 42 m' de 25.95 kN/m³ ve en yüksek 15.5 m' de 27.19 kN/m³ tür. Doygun birim ağırlığı 42 m derinlikte en düşük 26 kN/m³ ile 15.5 m derinlikte 27.22 kN/m³ tür. Yüzeyden itibaren 90 m derinliğe kadar kuru ve doygun birim ağırlığının ortalama değer etrafında olduğu ve 90 m'den daha derinden alınan örneklerin birim ağırlığının ise tamamının ortalamanın altında olduğu belirlenmiştir. Kuru birim ağırlığı ile derinlik arasındaki ilişkide korelasyon katsayısı %7.15 ve doygun birim ağırlığı ile derinlik arasındaki ilişkide korelasyon katsayısı %8.37 olarak hesaplanmıştır (Şekil 9).

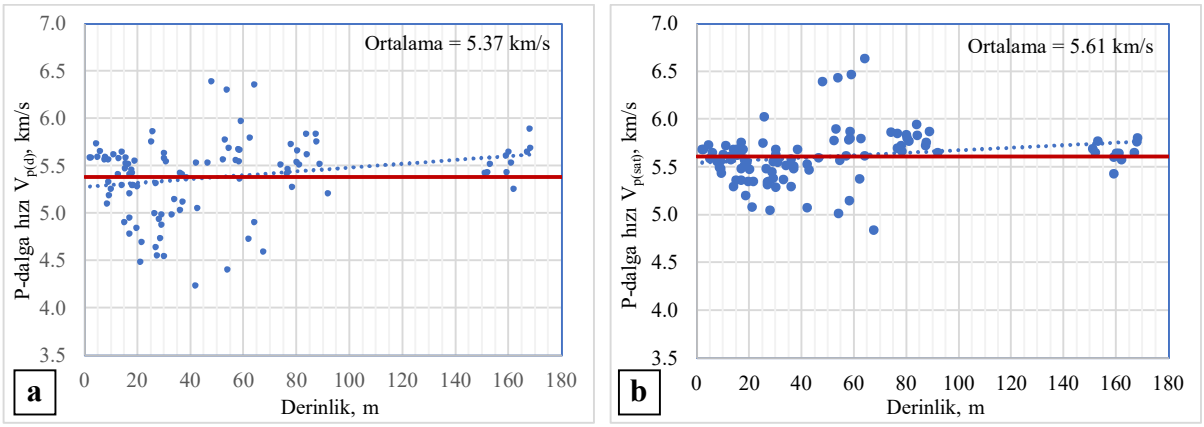


Şekil 9. Kuru (a) ve doygun (b) birim ağırlığı ile derinlik ilişkisi.

Doygun birim ağırlığı, 90 m'nin üzerindeki örneklerde ortalama civarında ve 150.0 m'nin altındaki örneklerde ortalamanın altında olduğu gözlenmiştir.

4.4 P-dalga Hızının Derinlikle Değişimi

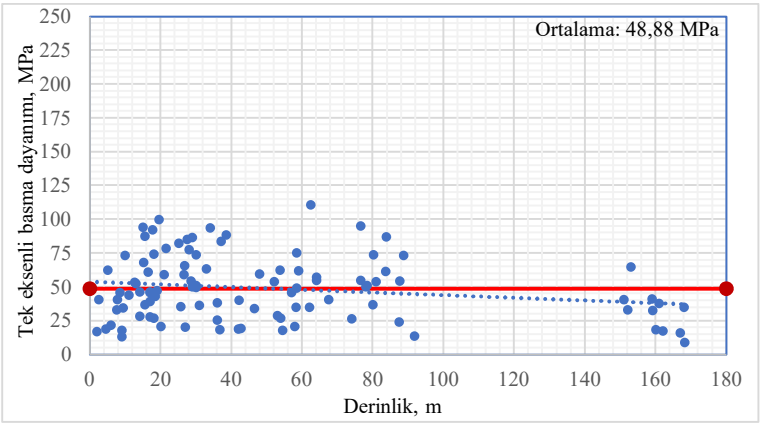
En düşük $V_{p(k)}$ 42 m derinlikte 4.24 km/s ve en yüksek 48 m derinlikte 6.39 km/s dir. En küçük $V_{p(d)}$ 67.5 m'de 4.84 km/s ve en yüksek 67 m'de 6.64 km/s dir. (Şekil 10). Kuru ve doygun P-dalgası hızları derinliğe bağlı olarak çok düşük oranda artmaktadır. P-dalga hızı ile derinlik arasındaki korelasyon katsayısı kuru örneklerle r^2=%5.2, doygun örneklerle ise r^2=%4.7'dir. P-dalgası hızları 42 m ile 67.5 m arasında en düşük ve en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu derinlikler arasındaki granodiyoritin hidrotermal ayrışmadan etkilendiği şeklinde açıklanabilir. Yüzeyden itibaren 42 m ile 67.5 m arası dışında 168.2 m derinliğe kadar P-dalgası hızları ortalama değerlere yakın olup, derinlikle belirgin bir değişim gözlenmemektedir.



Şekil 10. Kuru (a) ve doygun (b) koşullarda ölçülen P-dalga hızı derinlik ilişkisi.

4.5. Tek Eksenli Basma Dayanımının Derinlikle Değişimi

En düşük dayanım 168.2 m derinlikte, en yüksek dayanım 62.5 m derinlikte belirlenmiştir. Yüzeyden 91.8 m derinliğe kadar tek eksenli basma dayanımları derinlikle beraber göz ardı edilebilir bir artış göstermiş olup (r^2=0.005), 150 m'den daha derinde tek eksenli basma dayanımı ortalama değerlerden daha düşük ve derinlikle beraber azalma (r^2=0.036) eğilimindedir (Şekil 11). Tek eksenli basma dayanımı ve birim ağırlığın derinlikle birlikte azalma eğilimi göstermesi, yüzeye yakın kesimlerde daha fazla çatlak içeren granodiyoritlerin yapısındaki bu çatlakların kuvars ve ikincil kalsitle doldurulmuş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 11. Örneklerin tek eksenli basma dayanımının derinlikle değişimi.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Artvin ili sınırları içerisinde Deriner Barajı temelindeki granodiyoritin özellikleri ile ayrışma derecesinin derinlikle değişimi incelenerek elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

1. Granodiyorit hidrotermal ayrışmaya uğramış, hidrotermal sular ile gelen silis ve ikincil kalsit dolgular bulundurmaktadır.
2. P-dalga hızı derinliğe bağlı olarak artmaktadır. Birim ağırlığı ve tek eksenli basma dayanımları ise derinlikle birlikte azalmıştır. Tek eksenli basma dayanımı ile derinlik arasında da azalma gözlenmiştir.
3. Granodiyorit Paleozoyik yaşlı olup, içerisinde diyabaz dayklar ile çok sayıda fay ve süreksizlikler bulunmaktadır. Bu süreksizlikler boyunca gelen hidrotermal sular içerisindeki kuvars, granodiyoriti oluşturan mineraller arasındaki boşluklar ile ikincil süreksizlikler içerisine dolmuş durumdadır. Farklı tür ve boyutlardaki minerallerin, farklı yönde dilinim yüzeylerinin bulunması tek eksenli

basma dayanımı değer aralığının değişmesine neden olduğu düşünülmektedir. Hidrotermal ayrışma nedeni ile oluşan silis dolgu ve ikincil çatlak dolgusu olan kalsit dolguları kayacın birim ağırlığı, P-dalga hızı ve tek eksenli basma dayanımı arasında ve bunların derinlikle değişiminde kuvvetli ilişki kurulabilmesini olumsuz etkilemektedir.

4. Bu durum granodiyoritin ayrışma derecesi ile ilgili yeni bir sınıflama geliştirilmesini olumsuz etkilemektedir. Hidrotermal ayrışma etkisinin az olduğu granitik kayaçlar için yeni bir araştırmanın yapılması, bazalt, diyabaz gibi volkanik kayaçlarda olduğu gibi sınıflama sisteminin geliştirilmesi açısından bilimsel katkı sağlayacaktır.

6. KATKI BELİRTME

Yazarlar, araştırma sırasında desteklerini esirgemeyen DSİ Genel Müdürlüğü'ne, DSİ 26. Bölge Müdürlüğü'ne ve Dolsar Mühendislik A.Ş.'ye teşekkür ederler.

7. KAYNAKLAR

Arel, E. and Tuğrul, A. 2001. Weathering and its relation to geomechanical properties of Cavusbasi granitic rocks in northwestern Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, I(60), 123-133.

ASTM, 2000. D2845-00, Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

ASTM, 2002. D2938-02. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock cores specimens. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

Ceryan, Ş., Tüdeş, Ş., Ceryan, N. ve Aydın, A. 2006. Kürtün Granodiyoriti'ndeki ayrışmış kaya malzemesinin sınıflandırılmasında ve mühendislik özelliklerinin tahmin edilmesinde elastik dalga hızının kullanılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23 Mart, 213-222.

Ceryan, Ş. ve Ceryan, N. 2003. Harşit granitoyidi'nde kaya kütle özelliklerinin ayrışmayla değişimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2 7, 419-432.

Ceryan, Ş., Tudeş, S. and Ceryan, N. 2007. A new quantitative weathering classification for igneous rocks. Environmental Geology, 55, 1319-1336.

Coşkun, Ö. 2021. Deriner Barajı Temelindeki Artvin Granitoyidinin Ayrışma Derecesinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, Ankara.

Heidari, M., Momeni, A. A. and Naseri, F. 2013. New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters. Engineering Geology, 2 September, pp. 65-73.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Eds. R. Ulusay and J.A. Hudson, ISRM Turkish National Group, Ankara.

Kanar, F. 2016. Zeytinlik (Artvin) Civarının Jeolojisi ve Tektoniği, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 103, Yozgat.

Keskin, İ. 2013. Artvin E47 ve F47 Paftaları, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Rapor No: 179, Ankara

Kılıç, R. 1999. The unified alteration index (UAI) for mafic rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, I(4), pp. 475-483.

Vasconcelos, G., Louenço, P. B., Alves, C. S. and Pamplona, J. 2008. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. Ultrasonics 48, 2 March, pp. 453-466.

Doğal Yapı Malzemeleri / *Natural Building Materials*

İstanbul-Çatalca Bölgesinde Yüzeylenen Kuvarsitlerde Ayrışmaya Bağlı Fiziksel ve Mekanik Özellik Değişimleri

Change of Physical and Mechanical Properties Due to Weathering on the Quartzites Outcropped in İstanbul-Çatalca Region

E. Paksoy[1,*], Ö. Ündül[2], E.Bozkurtoğlu[2]

[1] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Avcılar/İstanbul
[2] İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Maslak/ İstanbul
*(*undul@itu.edu.tr)*

ÖZ: Ayrışma süreçleri kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerine önemli etkiler yapmasından dolayı mühendislik çalışmalarının projelendirme ve uygulama aşamalarında mutlaka dikkate alınmalıdır. İstanbul ve çevresinde yüzeylenen farklı formasyonlara ait kuvarsitler yüksek dayanımlar gösterse dahi bu kayaçlarda yapılan mühendislik projelerinde çeşitli sorunlar rapor edilmektedir. Bu çalışmada, İstanbul'un batısında oldukça yaygın olarak yüzeylenen Istranca Masifi'nin önemli seviyesi olan Şermat Kuvarsitleri'nin ayrışma özellikleri incelenmiştir. Arazi çalışmaları sırasında kuvarsitler taze seviyeden kalıntı zemin seviyesine kadar sınıflandırılmıştır. Arazide belirlenen ayrışma seviyelerinden örnekler alınmıştır. Bu örnekler üzerinde kuvarsitlerin içyapı özelliklerindeki değişimler mineralojik ve petrografik araştırmalar ile belirlenmiştir. Aynı örneklerden fiziksel özellikler ve mekanik özellikler belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen veriler ile ayrışmaya bağlı olarak içyapıdaki değişimler, fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimler ve aralarındaki ilişkiler tespit edilmiştir. Verilerin değerlendirilmesi sonucunda kuvarsitlerde ayrışmanın mikro çatlak yoğunlukları ile denetlendiği ve taze-az ayrışmış seviyelerde oldukça dayanımlı olan kuvarsitlerin ayrışma etkisi ile beklenenden çok daha hızlı bir şekilde dayanımında azalmalar olduğu ortaya konmuştur. Bu bağlamda, kuvarsitlerin taze seviyeden tamamen ayrışmış seviyeye kadar kuru birim hacim ağırlıklar 25.40-22.81kN/m^3, porozite değerleri %0-4.52, tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri ise 241-11MPa arasında değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ayrışma, fiziksel-mekanik özellikler, İstanbul, kuvarsit.

ABSTRACT: *Weathering processes should be considered during the project and application stages of engineering studies due to its important effects on the physical and mechanical properties of rocks. Even quartzites of different formations outcrop in İstanbul and its vicinity show high strength values, many problems encountered during engineering studies. Within this context, in this study weathering characteristics of Şermat Quartzites, an important member of Istranca Massive, outcropping in wide areas was investigated. During field studies quartzites were classified from fresh to residual soil. Samples were gathered from each weathering class. The microstructure of quartzites were defined by petrographic and mineralogical studies on these samples. Physical properties (porosity, unit weights) and mechanical properties (uniaxial compressive strength) were defined on the same samples. With the data obtained the changes in microstructure, physical and mechanical properties due to weathering were identified. The evaluation of results concluded that the weathering is densely controoled by microcracks and also it is well understood that the effect of weathering lead the quartzites to lose their strength faster than it is expected that shows high strength values at fresh-slightly weathering grades. Within this respect for the studied quartzites dry unit weight varies between 25.40-22.81kN/m^3 porosity varies between %0-4.52 and UCS varies betweeen 241-11MPa from fresh to completely weathered grade varies .*

Keywords: *Weathering, physical-mechanical properties, Istanbul, quartzite*

1. GİRİŞ

Ayrışma temel olarak, kayaçların mekanik, kimyasal ve biyolojik etkenlerden birinin veya birkaçının etkisi ile parçalanarak ufalanması olayıdır. Kayaçın geri döndürülemez parçalanma olayının sonrasında kaya kütlelerinin davranışları da etkilenmektedir (Ollier, 1984; Price 1995; ANON, 1995) Bu nedenle, ayrışma derecesi, derinliği ve yanal yönde değişimleri gibi özellikleri yer-mühendislik tasarımlarında

büyük önem kazanmaktadır. Ayrışma süreçlerinin farklı kayaçlarda farklı değişimlerin oluşmasına neden olduğu da beklenen ve bilinen bir durumdur. Bu çalışma kapsamında, ayrışmanın en az görüldüğü kayaçlardan kuvarsitlerin ayrışması sonucunda gelişen içyapı özellikleri ve fiziko-mekanik özelliklerdeki değişimler tartışılmış, lisansüstü çalışması olarak devam eden araştırmanın ilk sonuçları sunulmuştur.

Kuvars, bilindiği üzere, sertliği ve dayanımı yüksek, duraylı minerallerdendir. %90'dan fazla miktarda bu minerallerden oluşan kuvarsit ve kuvars arenitler, İstanbul'un çeşitli yerlerinde mostralar vermekte, yüzey ve yüzey altı çalışmalarda karşılaşılmaktadır (Şekil 1). Bu çalışma kapsamında, İstanbul'un batı yakasında (Çatalca ve çevresi) bulunan kuvarsitlerin ayrışma özellikleri ve bunların kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 1: Kuvarsitlerden oluşan kaya kütlelerinde a) Çatalca bölgesinde b) Çamlıca bölgesinde gözlenen ayrışma profillerinden örnekler

2. KUVARSİTLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ, ÖRNEK SEÇİMİ VE UYGULANAN YÖNTEMLER

Çalışmaya konu olan Çatalca ve çevresinde gözlenen Geç Permiyen-Erken Triyas yaşlı (Gedik vd. 2014) Şermat Kuvarsitleri, Istranca masifi içerisinde önemli bir yer tutmaktadır (Şekil 2). Arazide genellikle tepelerde ve hafif eğimli yamaçlarda gözlenen kuvarsitlerin taze seviyeleri açık kahve, beyaz olup likenlerle kaplı olduğu kısımlarda gri, koyu kahve renklidir. Ayrışma seviyesi ilerledikçe daha koyu kahverengi ve kızıl kahve tonlar hâkim olur. Küçük kuvars çakılları içeren rezidüel zemin seviyesinde renk; kırmızı, bordo, kahve olarak gözlenir. Bazı bölgelerde yerel olarak mika pulcukları kuvarsitler içinde bulunur. Süreksizlikler genellikle kapalı, dolgusuz ve kurudur. Bazı mostralarda kuvars damarları da gözlenmektedir.

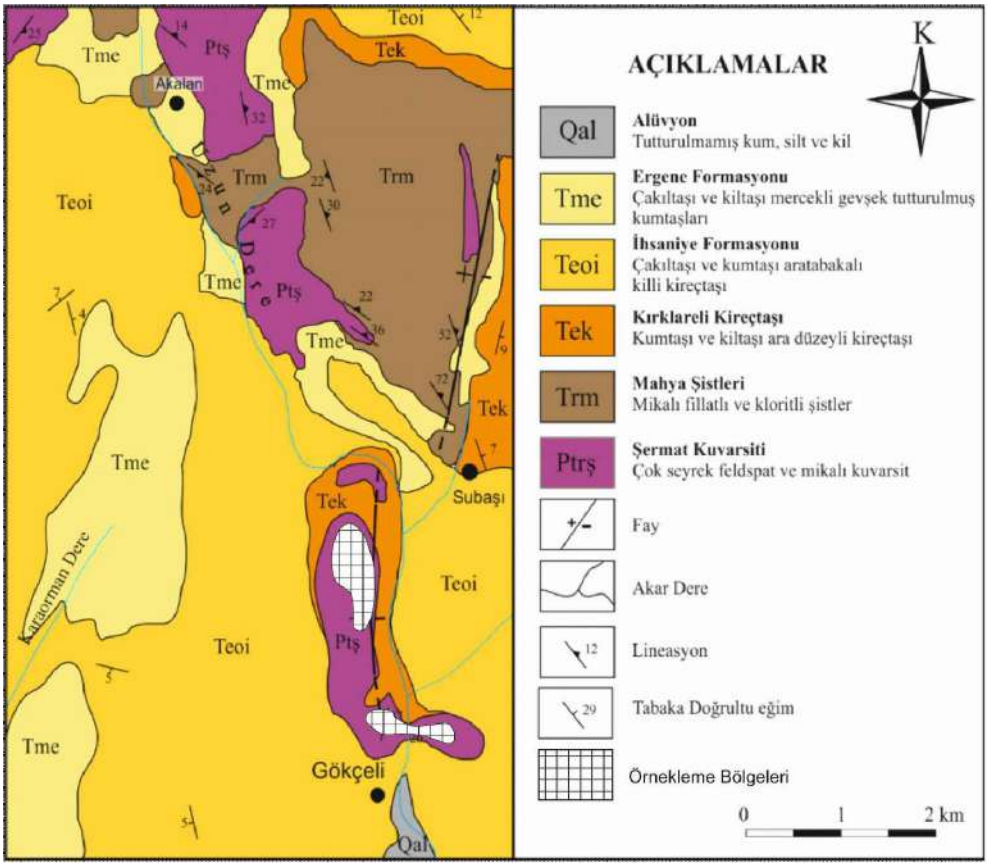
Petrografik olarak bölgedeki kuvarsitler %90'dan fazla oranda kuvars ve eser miktarda da mika ve opak minerallerden oluşmaktadır. Kuvarslar Orta-kötü boylanma gösteren kuvarsların dane boyutları genel olarak 200 mikron-2 mm arasında değişebilmektedir. Mineral sınırları süturlu olup granoblastik doku gösterirler, zayıf rölyef gösteren kuvarslar özşekilli-yarı özşekilli olarak gözlenmiştir.

Arazi çalışmaları sırasında ayrışma profilleri yerinde tespit edilmeye çalışılarak hem kayaç hem kütle ayrışmaları (kaya – zemin oranı) ANON (1995)'e göre değerlendirilmiştir. Araziden mümkün olan yerlerden 50x50x50cm'lik blok örnekler ile bu boyutta örnek alınamayan yerlerden ise mekanik deneylerin yapılabileceği boyutlarda örnekler alınmaya çalışılmıştır. Ayrıca temsilci olacak şekilde el örnekleri ile zemin seviyelerinden de el küreği yardımıyla örnekler alınmıştır. Örnekler üzerinde mineralojik bileşimlerin ve dokusal özelliklerin ortaya konması amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ve petrografik ince kesit çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak, örnekler sırasıyla 105 ºC, 550 ºC ve1050 ºC'de ısıtılarak ateşte kayıp değerleri (LOI) belirlenmiştir. Ayrışmanın içyapıdaki etkilerinin değerlendirilmesi için mikropetrografik indeks ve mikroçatlak yayılımı değerleri aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanmıştır.

$$\text{Mikropetro grafik indeks (Ip)} = \frac{\text{Ayrışmamış mineral yüzdesi}}{\text{Ayrışmış mineral yüzdesi}} \quad (1)$$

$$S_{mf} = N / A \quad (2)$$

S_{mf}: Mikroçatlak yayılımı, N: Birim alandaki çatlak sayısı A: Birim alan (1mm^2)
Birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, porozite, su emme ve kılcallık katsayısı ile tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ISRM (1981 ve 2007) tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenmiştir. Kuvarsitlerin taze kesimlerinden standart ve önerilen yöntemlere uygun karot örneği almada yaşanan sorunlardan dolayı, karot örneği alınamayan seviyelerden nokta yük dayanım indeksi ve Schmidt çekici sertlik deneyleri gerçekleştirilerek kayacın dayanımı dolaylı olarak belirlenmiştir.

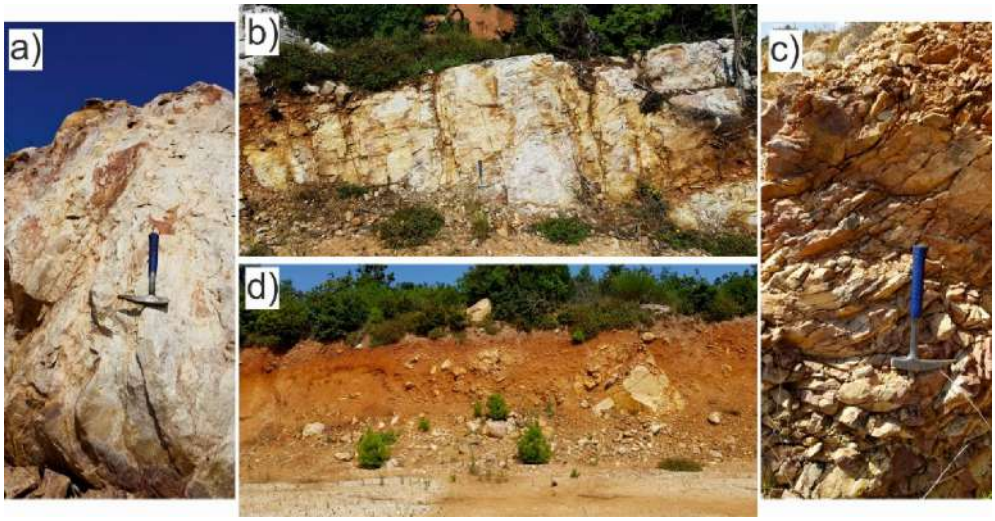


Şekil 2. Bölgenin genel jeolojik özelliklerini gösteren jeoloji haritası (Tuğrul vd. 2006'dan değiştirilerek)

3. KUVARSİTLERDE GELİŞEN AYRIŞMA PROFİLLERİ

Saha çalışmaları sırasında kuvarsitler en çok Gökçeli kuzeyi, Subaşı ve Aklan köyleri arasında Uzundere batısında gözlenmiş ve bu bölgelerde örneklemeler ve gözlemler yoğunlaştırılmıştır (Şekil 2).

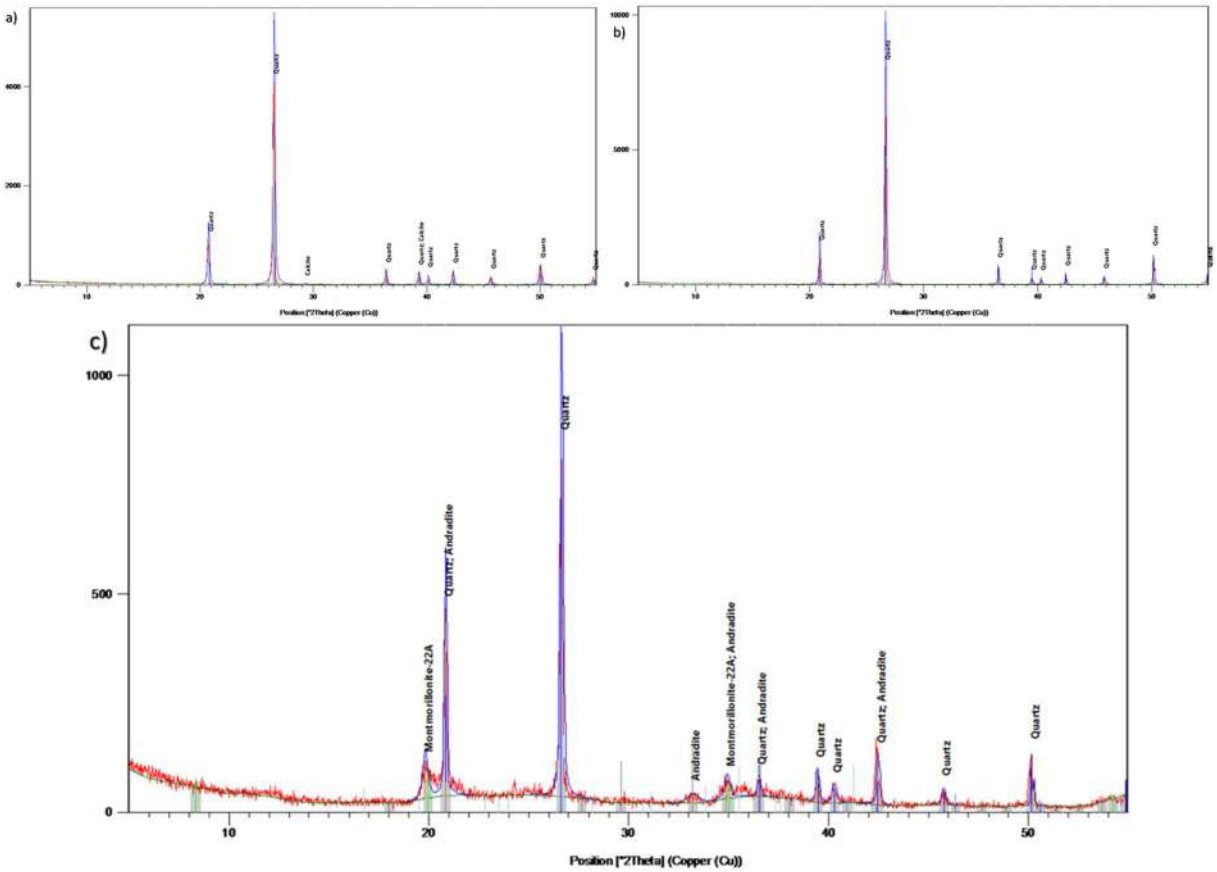
Arazi gözlemlerine göre kuvarsitler taze kesimlerde oldukça açık kahve ve beyaz renkte ve jeolog çekici ile kırılması zordur. Az sayıdaki çatlaklar kapalıdır. Az ayrışmış kuvarsitler yüzeyde kahverengidir (Şekil 3). Bazı mostralarda liken kaplı yüzeyler gri renklidir. Bu seviyede yer yer gözle görülür boyutta çatlak sayısında artış tespit edilmiştir. Çatlakların tamamı kapalı konumdadır. Orta derecede ayrışmış seviyelerde çatlak sayıları her bölgede artmaktadır. Büyük çoğunluğu kapalı çatlaklar olmakla beraber yer yer dolgusuz ve açıklığı 1-5 mm olan çatlaklar gözlenmiştir. İleri derecede ayrışmış seviyelerde çatlak miktarı kayacı ufalamaya başlamış ve çekirdek taşları tamamen çatlaklar tarafından sınırlandırılmıştır. Genel olarak kapalı çatlaklar açık çatlaklardan daha azdır. Yüzeyde açık olan çatlaklar çekiç yardımı ile parçalandığında mostra içine doğru devamlılıklarınn olmadığı ve kapalı çatlaklara dönüştükleri gözlenmiştir. Tamamen ayrışmış seviyelerde farklı boyutlarda (ince çakıldan, blok boyutuna) çekirdek taşları şeklinde ve zeminleşmiş seviye içerisinde yer almaktadır. Kaya oranı zemine göre düşüktür. Ayrışma profilinin en üst kısmını oluşturan kalıntı zemin seviyesinde ince çakıl ve kum boyutunda kuvars parçaları ile silt ve kil boyutlu malzemelere rastlamak mümkündür. Çalışma alanındaki bu seviyenin kalınlıkları değişken olup, rengi ve zon şeklinde uzanımı ile karakteristiktir (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışma alanında gözlenen kuvarsitlerin a) Taze b) Az-Orta derecede ayrışmış, c) Orta ve ileri derecede ayrışmış, d) Tamamen ayrışmış ve kalıntı zemin seviyelerine ait görüntüler

4. FARKLI DERECELERDE AYRIŞMIŞ KUVARSİTİN MİNERALOJİK VE PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİ

Farklı ayrışma seviyelerinden hazırlanan toz örnekler üzerinde yapılan mineralojik çalışmalarda XRD grafikleri tazeden tamamen ayrışmış seviyere kadar birbirleriyle çok benzer sonuçlar vermiştir. Analizlerde %90'ın üzerinde kuvars mineraline rastlanmıştır. XRD analizlerinde böylesine yakın görüntülerin oluşması kuvarsitleri oluşturan ana mineral olan kuvarsların kimyasal olarak ayrışma göstermemelerinden ve ayrışma artmasına rağmen korunmuş olmalarından kaynaklanır. Bu durum XRD analizlerinde de açıkça görülmektedir.



Şekil 4: Kuvarsitlerin XRD grafikleri (a: Taze, b: Tamamen ayrışmış c: Kalıntı-zemin)

Şekil 4'te kalıntı zemin seviyesinden alınan örneğe ait XRD grafiği ise farklılık göstermektedir. Çalışılan bölgedeki kuvarsitler içerisinde çok az miktarda mika tespit edilmiştir. Ayrışma profilinde, kalıntı zemin seviyesinde dane çapları küçülen kuvars mineralleri ile birlikte ince daneli malzeme içerisinde mikanın ayrışması ile oluşan killerin göreceli olarak artması, bu seviyeden alınan örneklerde yapılan XRD analizlerinde kil minerallerine rastlanmasına neden olmaktadır.

Her ayrışma seviyesinden hazırlanan ince kesitlerde, büyük çoklukla kuvars mineralleri gözlenmişken mikalar nadiren gözlenmiştir. Bununla beraber esas değişim mikro-çatlak sayılarındaki artıştır. Taze (WI) seviyeden hazırlanan ince kesitlerden tamamen ayrışmış seviyeden hazırlanan ince kesitlere kadar mikro-çatlaklarda önemli bir artış belirlenmiştir. Bu çatlaklarda yer yer mikalara rastlanmıştır. Ayrıca ayrışmanın artmasıyla kuvars danelerinin küçüldüğü gözlenmiştir (Çizelge 1 ve Şekil 5).

Çizelge 1. Farklı derecelerde ayrışmış kuvarsitlere ait petrografik özellikler.

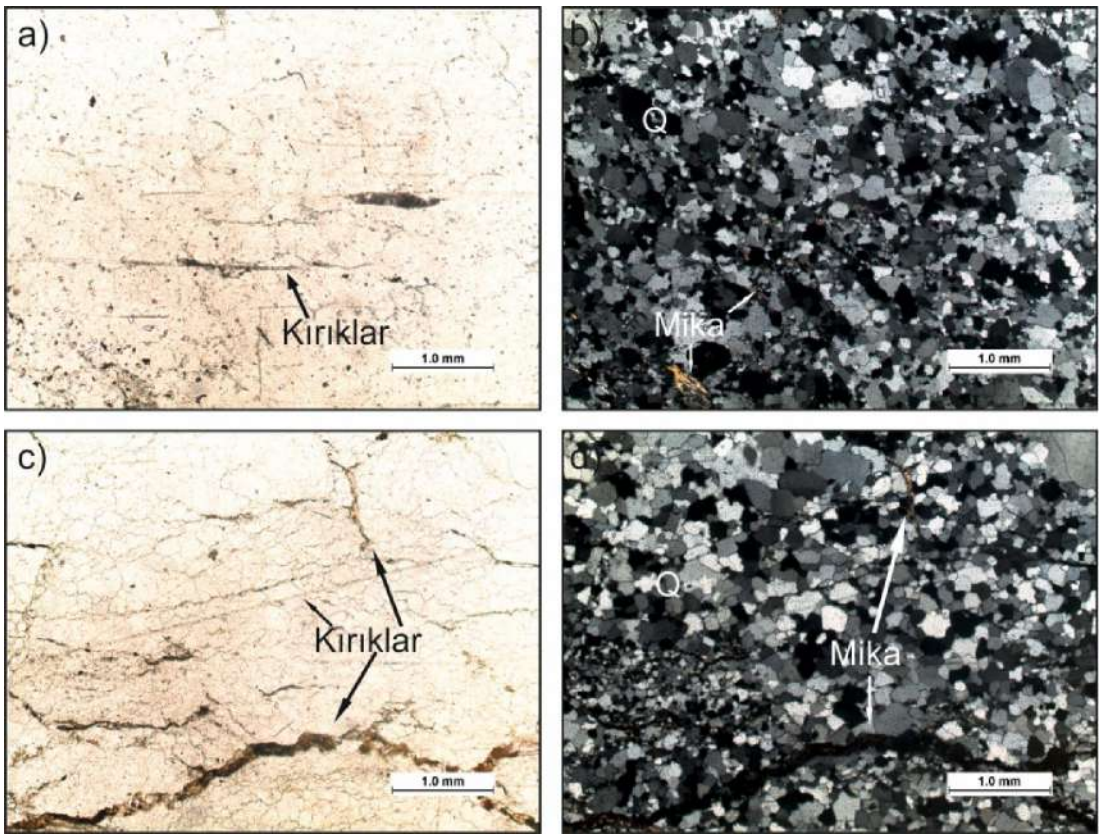
		W I	W II	W III	W IV	W V
Petrografik tanımlama		Kuvarsit	Kuvarsit	Kuvarsit	Kuvarsit	Kuvarsit
Bileşim		Kuvars ve eser oranda mika ve opak mineraller	Kuvars ve eser oranda mika ve opak mineraller	Kuvars ve eser oranda mika ve opak mineraller	Kuvars ve eser oranda mika ve opak mineraller	Kuvars ve eser oranda mika ve opak mineraller
Doku		Granoblastik doku	Granoblastik doku	Granoblastik doku	Granoblastik doku	Granoblastik doku
Ayrışma türleri		Yer yer çatlaklı	Sistematik çatlak artışı, kuvarslar korunmuş olup, nadiren çatlaklarda mikalar	Kuvarsların tane sınırlarında ayrışmanın gelişmeye başlamıştır. Sistematik çatlaklara ek olarak düzensiz çatlak gelişiminin başlamıştır.	Yer yer kuvarslar birbirinden tamamen ayrılmış, çatlaklarda yer yer mika minerallerinin gelişmiştir.	Kuvars tane boyutlarının küçülmüş, çatlaklar genişlemiştir.
Mikroçatlak durumu		Mika minerallerinin olduğu kısımlarda yer yer çatlakalar gelişmeye başlamış.	Sistematik gelişmeye başlamış mikroçatlaklar.	Sistematik ve yeni başlayan düzensiz çatlaklar ve yer yer çatlaklarda mika mineralleri.	Sistematik çatlaklar etrafında şekillenen düzensiz çatlaklar.	Sistematik çatlaklar etrafında şekillenen düzensiz çatlaklar.
I_p	Ortalama	11,46	8,25	5,41	2,77	2,44
S_{mf}	Ortalama	1.62	1.81	2.81	2.93	3.75

İnce kesit çalışmalarındaki gözlemsel değerlendirmeler, sayısal olarak tariflenmiştir. Bunun için, İrfan ve Dearman (1978)'in önerdiği ve ayrışmamış mineraller ile ayrışmış minerallerin yüzdelerini oranladığı mikropetrografik indeks (Ip) ile Ündül (2007)'nin önerdiği 1mm^2'deki çatlak miktarını gösteren mikroçatlak yayılımı (Smf) değerleri hesaplanmıştır (Şekil 6a ve 6b).

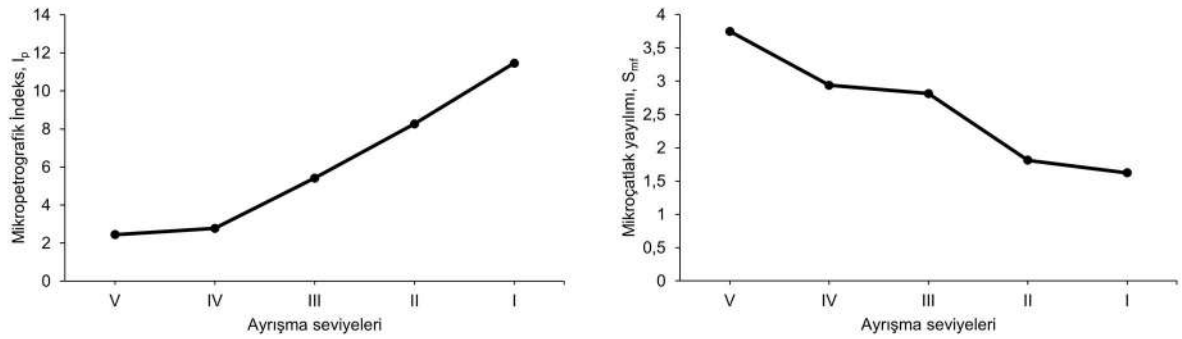
5. FARKLI DERECELERDE AYRIŞMIŞ KUVARSİTİN FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Ayrışma profillerinden alınan örneklerin kızdırma kaybı incelendiğinde mineralojik ve petrografik bulgular ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Taze seviyelerden, tamamen ayrımış seviyeye kadar LOI değerleri oldukça yakın değerler vermiştir (Çizelge 2). Kalıntı zemin seviyesinden alınan örnekte ise XRD analizlerinde de gözlendiği üzere kil artışına bağlı olarak yüksek LOI değerleri elde edilmiştir. Özgül ağırlıklara bakıldığında taze seviyeden sonraki ayrışma seviyelerinde önemli bir azalma olmuş ve azalma kendi içinde tedrici gelişmiştir. Taze ve az ayrışmış seviyelerde gözlenen kapalı makro ve mikro çatlakların etkisi etkin porozitede gözlenmektedir. Az ayrışmış seviyeden sonra artan etkin porozite değerleri bu iki bulgu arasındaki ilişkiyi desteklemektedir. Bu arada su emme ve porozite bazı ayrışma seviyelerinde çekirdek taşlarından yapıldığı için en düşük değerleri taze seviyede elde edilen

değerlere yakın çıkmaktadır. Tüm bu içyapı özelliklerinin yansıması olarak tek eseknli sıkışma dayanımı değerleri taze seviyelerde 200 MPa'ın üzerinde değerler alırken, ayrışmanın artmasıyla 11 MPa seviyelerine kadar azalmıştır (Çizelge 2).



Şekil 5. İncelenen kuvarsitlerin polarizan mikroskop görüntüleri
a) Taze kuvarsit – tek nikol, b) Taze kuvarsit – çift nikol, c) Tamamen ayrışmış kuvarsit – tek nikol, d) Tamamen ayrışmış kuvarsit – çift nikol. (Q: Kuvars, Mika: Biyotit ve muskovit).



(a) (b)

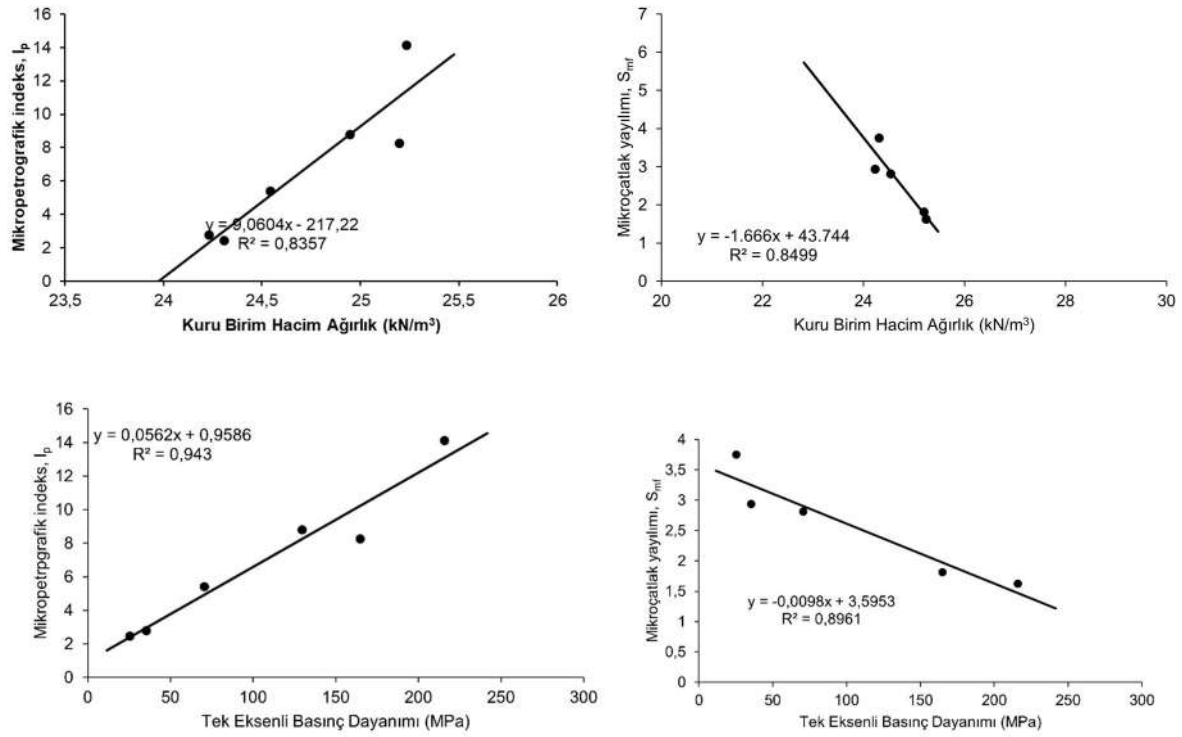
Şekil 6. İncelenen kayaçların ayrışma seviyelerine göre a) mikropetrografik indeks b) mikroçatlak yayılımı değerlerinin değişimleri.

Kuvarsitlerde ayrışma süreçleri önemli oranda fiziksel süreçler ile kontrol edildiğinden bunun yansıması olarak içyapı unsurlarında meydana gelen değişimlerin etkileri Şekil 7'deki grafiklerde verilmiştir. Kuvarsitlerin birim hacim ağırlıkları artan mikro-petrografik indeks değerleri ile artmakta, artan mikroçatlak yayılımı değerleri ile azalmaktadır. Benzer ilişki mikro-petrografik indeks ve mikro-çatlak yayılımı ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında da gözlenmektedir. Bu durum artan ayrışma nedeniyle fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimi yansıtmaktadır.

Çizelge 2: Ayrışma ile kuvarsitlerin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimler

	Ayrışma derecesi	Kuvarsit		
		Ortalama	Min	Max
LOI (%)	VI	5.47	3.94	7.56
	V	0,93	0,17	0,95
	IV	0.67	0.19	1.04
	III	0,65	0,42	0,92
	II	0.61	0.51	0.72
	I	0,59	0,73	1,13
G_s	VI	2,49	2,44	2,43
	V	2,52	2,50	2,53
	IV	2,56	2,54	2,57
	III	2,57	2,55	2,59
	II	2,58	2,58	2,59
	I	2,78	2,73	2,82
γ_k (kN/m^3)	V	24,35	22,81	25,05
	IV	24,55	23,24	25,43
	III	24,94	24,54	25,23
	II	25,11	24,78	25,47
	I	25,19	24,36	25,40
n_e	V	2,55	0,26	3,77
	IV	1,38	0	4,52
	III	1,34	0	2,74
	II	0,99	0	2,14
	I	0,79	0	3,53
σ_c (MPa)	V	34,30	11,45	59,76
	IV	36,42	11,51	80,29
	III	86,42	11,46	168,30
	II	107,51	53,14	176,36
	I	169,96	86,03	241,64

LOI: Ateşte kızdırma kaybı, Gs: Özgül ağırlık, γ_k: kuru birim hacim ağırlık, n_e: etkin porozite σ_c:tek eksenli sıkışma dayanımı



Şekil 7: İncelenen kuvarsitlerde a) γ_k - I_p - b) γ_k – S_{mf} c) UCS – I_p d) UCS – S_{mf} arasındaki ilişkiler.

6. SONUÇLAR

Çatalca bölgesindeki kuvarsitlerin ayrışma özelliklerinin değerlendirildiği ve devam eden bu çalışmadaki ilk sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Kuvarsitler %90'dan fazla kuvars minerali ve çok az oranda da mika minarallerinden oluşmaktadır.

Kuvarsitlerde ayrışma fiziksel olarak gelişmekte ve bu durum arazideki profillerde belirgin olarak gözlenmektedir. Fiziksel ayrışmanın etkileri petrografik açıdanda belirgin olup, her ayrışma seviyesi için hazırlanan ince kesitlerde mikro-çatlak yayılımının arttığı belirgindir.

Ayrışmaya bağlı gelişen çatlakalarda kuvars ve mika dolguları gelişmiştir. Taze ile tamamen ayrışmış kuvarsitin XRD grafiklerine göre mineralojik bileşimi benzerlik sunmakta olup, kalıntı zeminlerde mikanın ayrışması ile kil gelişimi gözlenmiştir.

Kuvarsitleri içyapıda başlayan fiziksel ayrışma süreci kayacın birim hacim ağırlıklarının değişiminde önemli rol oynamakta, ayrışmanın artmasıyla birim hacim ağırlıkların 25.40 – 22.81 kN/m^3 arasında değiştiği belirlenmiştir. Aynı zamanda porozite değerleri de %0'dan % 4.52'ye kadar artmaktadır.

Ayrışmaya bağlı olarak içyapı özellikleri ve fiziksel özelliklerde meydana gelen değişimlere uyumlu olarak kayanın dayanımında da oldukça önemli azalmalar meydana gelmiştir. Taze, az ayrışmış seviyelerde standartlara uygun karot örneği almak çok zor olurken orta derecede ayrışmadan sonra tek eksenli sıkışma dayanımında taze seviyeye göre yarıya yakın azalmalar belirlenmiştir. Kuvarsitlerin ayrışma ile tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri 241 MPa ile 11 MPa arasında değişmektedir.

Tüm bu veriler ışığında kuvarsitlerde ayrışma özelliklerine bağlı fiziksel ve mekanik özelliklerdeki olumsuz değişimlerin kuvarsitlerin gerek malzeme gerekse jeo-mühendislik çalışmalarında kullanılması durumunda dikkatle göz önünde bulundurulması gereken önemli bir parametre olduğu düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Anon, 1995, The description and classification of weathered rocks for engineering purposes, Quaterly Journal of Engineering Geology, 28, 207-242.

Gedik, İ., Timur, E., Umut, M., Bilgin, A.Z., Bilgin, Z.R., Pehlivan, Ş., Duru, M., Şentürk, K., Özcan, İ., Çelik, Y., 2014, 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Kırklareli-F20 Paftası, No: 201, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

Irfan, T.Y. and Dearman, W.R., 1978, The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England, Quaterly Journal of Engineering Geology, Vol. 11, 233-244.

ISRM, 1981, Rock Characterization Testing and Monitoring, Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, In: Brown, E.T. (ed), 211.

ISRM, 2007, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group Ankara, Turkey, 628.

Tuğrul A., Şahin, S. Y., Ündül Ö., Yılmaz M. (2006). İstanbul Dolayındaki Kuvarsit ve Kumtaşlarının Alternatif Agrega Olarak Değerlendirilmesi İstanbul Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi Proje Numarası: 517/05052006.

Ollier, C.D., 1984, Weathering, Geomorphology Texts. 2nd ed. Oliver and Boyd, Edinburgh.

Price, D.G., 1995, Weathering and weathering processes. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 243-252.

Ündül, Ö., 2007. Ayrışmanın Çınarcık barajı göl alanındaki (Bursa) ultramafik kayaçların mühendislik özelliklerine etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 142 (yayımlanmamış).

Saraftepe (Trabzon) Tefrit Silinin Doğal Yapıtaşı ve Çıkan Pasanın Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

The Investıgatıon of Usabılıty of Saraftepe (Trabzon) Tephrıte Sıll as Natural Buıldıng Stone and the Tallow as Aggregate

M. Karahan[1,*], H. Ersoy[1], M.O. Sünnetci[1], S. Peker[2]

[1] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
[2]Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü, 61310 Yıldızlı Akçaabat/TRABZON
*(*muratkarahan21@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada tefritin doğal yapı taşı ve çıkan pasanın agerega olarak değerlendirilmesi araştırılmıştır. Ocaktan alınan örneklerin tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin 87-130 MPa, P-dalga hızlarının 5048-5642 m/s, yoğunluk değerinin 2.58 gr/cm^3, görünür porozite değerlerinin % 2.77-4.54, ağırlıkça su emme değerlerinin % 1.04-1.78, kütlece su emme değerinin % 2.0 olduğu bulunmuştur. Donma-çözünme deneyi sonrası ağırlık kaybı % 0.36, ıslanma-kuruma deneyi sonrası ağırlık kaybı % 0.22 magnezyum sülfat deneyi sonucunda kayıp % 13, kaba agregada Los Angeles parçalanma direnci % 22, aşınmaya karşı direnç M_{DE} değeri % 18 ve metilen mavisi değeri 0.9 olarak hesaplanmıştır. Sonuçları incelendiğinde kütlece su emme oranının ve magnezyum sülfat deneyi sonuçlarının standartlarda istenilen değerin üzerinde olduğu görülmüştür. Her ne kadar tefritler mermer olarak kullanılsa da pasa malzemesinin yol ve beton için kırmataş, mıcır, taş dolgu, pere ve kagir inşaatında kullanım için uygun olmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuca rağmen, bölgede diğer mermer ocaklarından çıkan malzemelerinde agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Agrega, kırmataş, mermer, mıcır, tefrit

ABSTRACT: *The usability of tephrite as building stone and the tallow as aggregate have been investigated in this study. The samples gathered from the quarry have uniaxial compressive strengths of 87-130 MPa, P-wave velocities between 5048-5642 m/s, 2.58 kg/cm^3 density, 2.77-4.54% relative porosity, 1.04-1.78wt% water suction, and 2.0% water suction. Weight loss after the freeze-thaw test is 0.36%, weight loss after wetting-drying cycle is 0.22%, 13% mass loss after $MgSO_4$ test, 22% disintegration strength with Los Angeles test, 18% abrasion strength with micro-deval test, and 0.9 methylene-blue value. The evaluation of the test results indicates the water suction and MgSO4 mass loss values of the samples exceeds the recommended values given in the corresponding standards. Even though the it is being used as a marble today, it is determined that the Saraftepe tephrite sill is not usable as a road concrete, slag, or aggregate material. Despite these results, the usability of materials from other quarries in the region as aggregate should be investigated.*

Keywords: *Aggregate, ballast, marble, flint, tephrite*

1. GİRİŞ

Doğal taş rezervleri bakımından oldukça zengin olan ülkemizin hemen her yöresinde uluslararası piyasada yarışabilecek nitelikte doğal taşlar mevcuttur (Yağız, 2010). Aynı şekilde Doğu Karadeniz Bölgesi'nde de çoğu magmatik kayaçlar olmak üzere önemli miktarda doğal taş rezervi bulunmaktadır (Ersoy et al., 2009; Özdemir, 2009). Bölgedeki yeryüzü şekillerinin elverişsizliği bu rezervin ekonomik bir şekilde işletilmesini güçleştirse de işletilen çok sayıda ocak da vardır (Ersoy vd., 2014). Ülkemizdeki doğal taş ocaklarının verimliliği % 50'nin altındadır. Bu durum milyonlarca metreküp kullanılamayan malzemenin depolanması sorununu ortaya çıkarmaktadır ki bu da uzun vadede çevre kirliliğine yol açmaktadır (Şekil 1). Ortaya çıkan pasanın farklı endüstri alanlarında mıcır, agrega veya doğal çakıl olarak kullanılması hem ekonomik açıdan hem de çevresel anlamda çok önemli faydalar sağlamaktadır. Bu nedenle ocaklardan çıkarılan doğal taşların beton, asfalt gibi malzemelerde kullanılabilirliğinin incelenmesi önem arzetmektedir.

Bu çalışmaya konu olan Saraftepe tefrit sili, Trabzon şehir merkezinin yaklaşık 10 km güneyinde yer almaktadır. Hem şehir merkezine yakın olması hem de albenisinin yüksek olması nedeniyle

Trabzon'daki kaldırım ve yollarda döşeme taşı olarak kullanılmıştır (Ersoy vd., 2014). Bu çalışmada Saraftepe tefrit silinin işletilmesinden geriye kalan pasanın beton, asfalt ve tahkimat malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

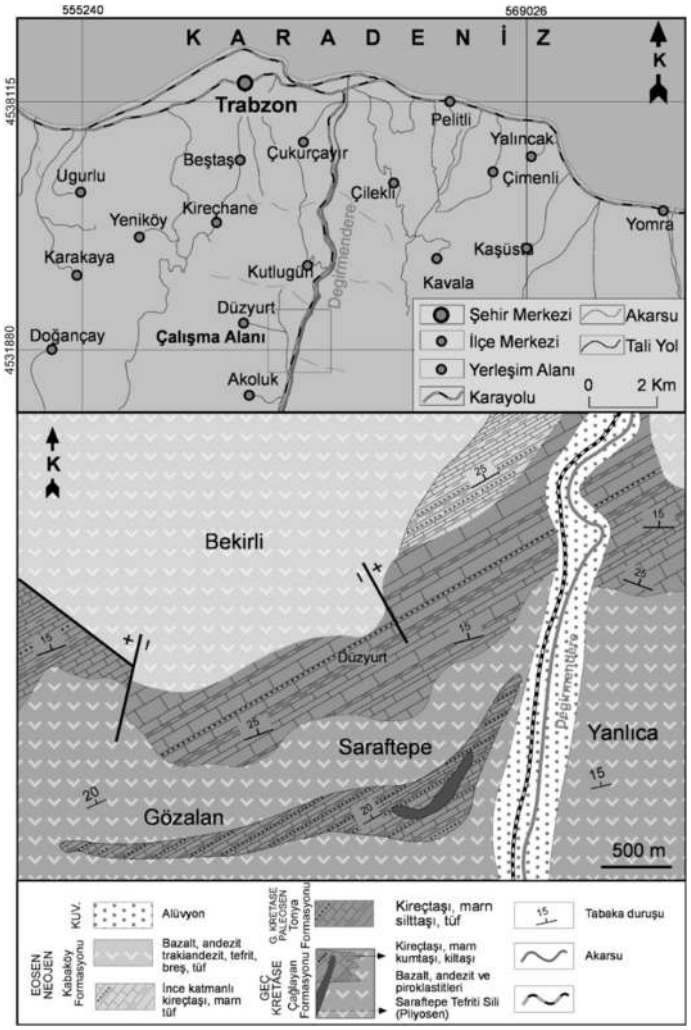
Şekil 1. Saraftepe tefrit sili taş ocağı işletmesi ve geriye kalan pasanın oluşturduğu kirlilik.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ

Alp-Himalaya Kuşağı üzerinde yer alan ve coğrafik olarak Türkiye'nin Kuzeydoğu kesimine karşılık gelen Doğu Pontid Orojenik Kuşağı içerdiği kayaç topluluklarının tipi ve dağılımı, fasiyes değişimleri ve tektonik özelliklerine bağlı olarak kuzeyden güneye doğru önemli farklılıklar gösterir (Bektaş vd. 1995; Eyüboğlu vd., 2006 ve 2016). Orojenik Kuşağın kuzey kesimi baskın olarak, yay ilişkili bir ortamda gelişmiş olan Geç Mesozoyik-Senozoyik yaşlı volkanik kayaçlar ve granitik-gabroyik kayaçlar ile temsil edilir. Bu kesimde mostra veren ve literatürde Kızılkaya ve Çayırbağ Formasyonları olarak bilinen Geç Kretase yaşlı felsik volkanik kayaçlar, içerdikleri masif sülfit mineralizasyonları ile ekonomik açıdan da önemli bir potansiyele sahiptir (Eyüboğlu vd., 2014). Orojenik Kuşağın güneyine doğru gidildikçe, kuzeydeki volkanik ve plütonik kayaç ağırlıklı istif, yerini sedimanter kayaçların baskın olduğu bir istife bırakır. Bununla birlikte, Jura öncesi yaşlı metamorfik kütleler (Pulur, Ağvanis ve Tokat metamorfik masifleri), granitik plütonlar (Gümüşhane ve Köse Granitoidleri), Alaska-tip mafik-ultramafik kütleler, Geç Kretase yaşlı şoşonitik ve ultrapotassik volkanik kayaçlar, Geç Paleosen-Eosen ve Miyosen yaşlı adakitik sokulumlar ve Eosen yaşlı adakitik olmayan granitik kütleler, sedimanter kayaçlar haricinde yaygın olarak görülen kayaç tiplerini temsil eder (Topuz vd., 2010; Dokuz, 2011; Karslı vd., 2010; Eyüboğlu vd., 2010, 2011, 2012, 2013, 2016). Biraz daha güney kesimde ise genellikle serpantinleşmiş ultramafik kayaçlardan oluşan ultramafik masifler (Kop ve Erzincan ultramafikleri), onları kesen gabroyik granitik ve porfiritik kayaç kütleleri, Geç Senozoyik yaşlı volkanik ve sedimanter kayaçlar baskın litolojileri oluşturur. Bütün bu zonlar yaklaşık D-B, KD-GB ve KB-GD doğrultulu, bölgesel ölçekli faylarla ayrılır (Bektaş vd., 1995; Eyüboğlu vd., 2006).

Saraftepe tefrit silini içine alan çalışma alanında yaşlıdan gence doğru Geç Kretase yaşlı Çağlayan Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Tonya Formasyonu, Eosen-Neojen yaşlı Kabaköy Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yüzeyleme vermektedir (Ersoy vd, 2014; Harputlu, 2016). Çağlayan Formasyonu (Güven, 1993) kireçtaşı, killi kireçtaşı ve marn ara seviyeleri içeren bazalt, andezit ve piroklastik kayaçlardan oluşmaktadır (Şekil-2).

Bu birim üzerine uyumlu olarak gelen Tonya Formasyonu (Korkmaz, 1993) beyaz, açık gri renkli kireçtaşı, killi kumlu kireçtaşı ve marn ardalanmasından oluşan kireçtaşı türbiditleri ile karakteristiktir. Tonya Formasyonu üzerine taban konglomerası ile birlikte açısal uyumsuzlukla gelen Kabaköy Formasyonu Güven (1993) tarafından tanımlanmıştır. Taban kesimleri killi, karbonatlı bir matriks içindeki yuvarlak şekilli volkanik kayaç çakıllarından ve killi kireçtaşı, marn bloklarından meydana gelmektedir. Bu tortullar yanal ve dikey yönde alkali bazalt, trakibazalt, trakiandezit ve bunların piroklastitlerinden oluşan volkanitler tarafından örtülmüştür (Ersoy vd., 2014).



Şekil 2. Çalışma alanına ait yer bulduru ve jeoloji haritaları (Harputlu, 2016).

3. TEFRİTLERİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada Trabzon ve çevre illerde döşeme ve kaplama taşı olarak kullanılmakta olan Saraftepe tefrit silinin işletilmesinden geriye kalan pasanın tahkimat, beton, asfalt malzemesi ve ayrıca yapı taşı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. İncelenen örneklerin yapı taşı olarak kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla indeks özellik tayinleri, tek eksenli basınç ve boyuna dalga hızı deneyleri yapılmıştır. Saraftepe tefrit silinin beton, asfalt ve tahkimat malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla Los Angeles parçalanma direnci, donma-çözünme (magnezyum sülfat) deneyi, aşınmaya karşı dayanım (mikro deval) deneyi, metilen mavisi deneyi, görünür yoğunluk, birim hacim ağırlık ve kütlece su emme tayinleri yapılmıştır.

3.1. İndeks Özellik Tayinleri

Araziden alınan blok örnekler küp şeklinde kesilerek hacimleri belirlenmiştir. Küp şekilli örnekler üzerinde ISRM (1981) önerilmiş metoduna uygun olarak su içeriği, ağırlıkça su emme, görünür porozite ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deney 30 örnek üzerinde yapılmış olup sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Küp şekilli örneklerin indeks özellikleri ve boyuna dalga hızları (Ersoy vd., 2014).

	Ağırlıkça Su Emme Oranı (%)	Görünür Porozite (%)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)
Min.	0.62	1.93	27.90
Mak.	2.33	6.80	30.90
Ort.	1.23	3.68	29..66
SS.	0.47	1.34	0.80
Min: en küçük değer; mak: en büyük değer; ort: ortalama; ss: standart sapma			

3.2. Boyuna Dalga Hızı ve Tek Eksenli Basınç Deneyi

Boyuna dalga hızı deneyleri standart 10 karot örneği üzerinde puls iletim (direkt ölçüm) tekniği ile ölçülmüştür (Babacan vd., 2012). Tek eksenli basınç direnci deneyi ise küp şekilli örnekler üzerinde yapılmıştır. Her iki deney de ISRM (1981) önerilmiş metoduna uygun olarak yapılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Örneklerin tek eksenli basınç dayanımları ve boyuna dalga hızları (Ersoy vd., 2014).

	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Boyuna Dalga Hızı (Kuru) (m/sn)	Boyuna Dalga Hızı (Doygun) (m/sn)
Min.	53	4065	4717
Mak.	70	5435	5435
Ort.	59.1	4850.6	5038.4
SS	5.97	386.96	213.02
Min: en küçük değer; mak: en büyük değer; ort: ortalama; ss: standart sapma			

3.3. Los Angeles Parçalanma Deneyi

Yüksek yüke maruz kalan malzemelerde kullanılacak agregaların parçalanma dayanımlarının yüksek olması gerekmektedir. TS EN 1097 – 2 standardına göre agreganın 500 devirde Los Angeles parçalanma katsayısı (LA_{35}) %35 veya daha düşük olmalıdır. Çizelge 3'te Saraftepe tefrit siline ait örnekler üzerinde yapılan Los Angeles deneyine ait sonuç verilmiştir.

Çizelge 3. Saraftepe tefrit sili agregalarının Los Angeles parçalanma yüzdesi değerleri.

İlk Ağırlık (gr)	Son Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Kayıp, LA_{35}(%)	Deney Standardı
5000.4	3903.8	1096.6	22	TS EN 1097-2

3.4. Aşınmaya Karşı Direnç (Mikro Deval) Deneyi

Saraftepe tefrit silinden elde edilen iri agregalar üzerinde TS EN 1097-1 standardına uygun olarak aşınmaya karşı direnç tayini deneyi yapılmıştır. Standarda göre kullanılacak agregaların M_{DE} katsayısı değeri %25 veya altında olmalıdır. Yapılan deneye ait sonuç Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Saraftepe tefrit sili agregalarının aşınmaya karşı direnç değerleri.

Numune No	Deney Numunesi Miktarı (gr)	1.6 mm Elek Üzerinde Tutulan Fraksiyonun Kütlesi (gr)	M_{DE} (Yaş Deney, %)	Deney Standardı
1	500.3	409.1	18.2	TS EN 1097-1
2	500.2	411.2	17.7	
Ort.	500.5	410.15	17.95	

3.5. Magnezyum Sülfat Deneyi

Çalışma konusu tefritlerden alınan agregaların donma-çözünme dayanımını belirlemek amacıyla magnezyum sülfat deneyi yapılmıştır. Deney, agregaların tekrarlı şekilde magnezyum sülfata daldırılıp kurutulmasından sonra malzemenin davranışını belirleme esasına dayanır. TS EN 1367-2 standardına uygun olarak yapılan deneyin sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Magnezyum sülfat (donma-çözünme) deneyi sonuçları.

Numune No	İlk Ağırlık (gr)	Son Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Kayıp (%)	Deney Standardı
1	430.8	370.4	60.4	16	TS EN 1367-2
2	420.5	380.1	40.4	10	
Ort.	425.65	375.25	50.4	13	

3.6. Metilen Mavisi Deneyi

Agregalardaki ince taneli malzeme miktarını belirlemek için yapılan bir deneydir. Saraftepe tefrit silinden alınan malzemenin beton agregası olarak kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla TS EN 933-9 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Saraftepe tefrit sili agregalarının metilen mavisi değeri.

Deney Numunesinin Kuru Kütlesi (g)	İlave Edilen Boya Çözeltisinin Toplam Hacmi (mL)	Metilen Mavisi Değeri	Deney Standardı
210	20	0.9	TS EN 933-9

3.7. Tane Yoğunluğu ve Su Emme Deneyleri

Saraftepe tefrit silinden alınan örneklerin tahkimat malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemek için tane yoğunluğu ve su emme deneyleri yapılmıştır (Çizelge 7).

Çizelge 7. İncelenen örneklerin tane yoğunluğu ve kütlece su emme değerleri.

Kütlece Su Emme (%)		Tane Yoğunluğu (g/cm^3)			Deney Standardı
Agrega (Tahkimat)	Kırılmış Taş (Beton)	Numune No			
		1	2	3	TS EN 1097-6
20	0.9	2.54	2.60	2.61	
		Ortalama: 2.58			

4. DEĞERLENDİRME

Saraftepe tefrit silinden alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen değerlerle karşılaştırılmış ve örneklerin asfalt, beton ve tahkimat malzemesi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir (Çizelge 8, 9, 10). İncelenen örneklerin parçalanma yüzdesi, $MgSO_4$ ve aşınma direnci yüzdesi değerleri Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) uygunken su emme yüzdesi değerinin şartnameye uymadığı görülmektedir. Saraftepe tefrit silinden alınan örneklerin Los Angeles parçalanma yüzdesi, $MgSO_4$ kütlece kayıp yüzdesi, aşınma direnci kütlece kayıp yüzdesi ve doygun yüzey tane yoğunluğu değerleri şartnameye uygunken ağırlıkça su emme yüzdesi değeri şartnameye uygun değildir.

Çalışılan örneklerin aynı zamanda kaplama ve yapı taşı olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla tek eksenli basınç, birim hacim ağırlık, kütlece su emme ve don kaybı değerleri TS 10835 (1993) standardına göre değerlendirilmiştir (Çizelge 11). İncelenen tefrit örneklerinin Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2013) göre taş dolgu, taş tahkimat, pere ve kagir inşaat malzemesi olarak kullanılabilir olmadığı görülmektedir. Ayrıca örnekler TS 10835 (1993) standardına göre kaplama veya yapı taşı olarak kullanılmaya da uygun değildir.

Çizelge 8. Saraftepe tefrit siline ait örneklerin asfalt malzemesi olarak kullanılabilirliği (KGM, 2013).

Bitümlü Sathi Kaplama Şartname Değerleri		
Deney Adı	Şartname	Deney Sonucu
Los Angeles Parçalanma,%	≤30	%22
MgSO4 Don Deneyi, %	≤18	%13
Aşınma Direnci (Mikro Deval), % kayıp	≤25	%18
Su Emme, %	≤2.5	%3.4

Çizelge 9. Saraftepe tefrit siline ait örneklerin beton malzemesi olarak kullanılabilirliği (KGM, 2013).

İri Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri		
Deney Adı	Şartname	Deney Sonucu
Los Angeles Parçalanma, %	≤35	22
$MgSO_4$ Don Deneyi, %	≤18	13
Aşınma Direnci (Mikro Deval), % kayıp	≤25	18
Su Emme, %	≤3.0	3.4
Doygun Yüzey Tane Yoğunluğu (g/cm^3)	≥2.55	2.58

Çizelge 10. Saraftepe tefrit siline ait örneklerin tahkimat malzemesi olarak kullanılabilirliği (KGM, 2013).

Taş Dolgu, Tahkimat, Pere ve Kagir İnşaat Kalite Kontrol ve Şartname Değerleri					
	Şartname				Deney Sonucu
Deney Adı	Taş Dolgu	Taş Tahkimat	Pere	Kagir İnşaat	
Los Angeles Parçalanma, %	≤35	≤30	≤30	≤30	22
$MgSO_4$ Don Deneyi, %	≤10	≤8	≤8	≤8	13
Aşınma Direnci (Mikro Deval), % kayıp	-	≤20	≤20	-	18
Su Emme, %	≤2	≤1.8	≤1.8	≤1.8	2.0
Doygun Yüzey Tane Yoğunluğu (g/cm^3)	≥2.2	≥2.4	≥2.3	≥2.3	2.58

Çizelge 11. Saraftepe tefrit siline ait örneklerin yapı ve kaplama taşı olarak kullanılması (KGM, 2013).

Deney Adı	TS 10835	Deney Sonucu
Tek eksenli basınç direnci (MPa)	>100 MPa veya >60 MPa	59.1
$MgSO_4$ Don Deneyi, %	<1	13
Su Emme, %	<0.7	2.0
Birim hacim ağırlık (g/cm^3)	≥2.55	2.58

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğal yapı taşı potansiyeli çok yüksek olan ülkemizin bu özelliğinden faydalanmak adına son yıllarda taş ocağı işletmelerinin sayısı oldukça artmıştır. Doğu Karadeniz bölgesinde de bu durum geçerli olmasına rağmen bölgenin kendine has fiziki özellikleri taş ocaklarından alınan verimin çok düşük olmasına neden olmaktadır.

Ortaya çıkan pasanın oluşturduğu görüntü ve çevre kirliliğinin önlenmesi ve aynı zamanda ekonomik verimin yükseltmesi amacıyla kullanılamayan malzemenin yapı taşı, tahkimat, beton veya asfalt malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması önem arz etmektedir.

Bu bağlamda Trabzon şehir merkezinin yaklaşık 10 km güneyindeki Saraftepe tefrit sili ocak işletmesinden alınan örnekler üzerinde Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2013 yılında yayınladığı teknik şartnamede belirtilen indeks özellik tayinleri, Los Angeles parçalanma, Mikro deval (aşınma), metilen mavisi, donma çözünme ($MgSO_4$), tane yoğunluğu ve su emme deneyleri belirtilen standartlara uygun şekilde yapılmıştır. Ayrıca örneklerin kaplama ve yapı taşı olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla tek eksenli basınç ve boyuna dalga hızı deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar, TS 10835 (1993) standardıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma alanından alınan örneklerin parçalanma ve aşınma yüzdeleri, don kaybı, ince boyutlu malzeme içeriği ve tane yoğunluğu değerleri asfalt, beton ve tahkimat malzemesi olarak kullanılabilmesine uygunken su emme değerlerinin şartname koşullarını sağlayamadığı belirlenmiştir. TS 10835 standardına göre yapılan incelemelerde örneklerin birim hacim ağırlıkları dışındaki değerleri, bunların yapı taşı veya kaplama taşı olarak kullanılmaya uygun olmadığını göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1992a. Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions (ASTM D5313-92), Annual Book of ASTM Standards, Construction: Soil and Rock, ASTM Publication, 189-190.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1992b. Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Freezing and Thawing Conditions (ASTM D5312-92), Annual Book of ASTM Standards, Construction: Soil and Rock, ASTM Publication, 1344-1346.

Aydın, F., 2003. Değirmendere Vadisi (Trabzon-Esiroğlu, KD Türkiye) Volkanitlerinin Mineral Kimyası, Petrolojisi ve Petrojenezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Doktora Tezi, 232 s. (yayımlanmamış).

Aydın, F., Karslı, O., Chen, B., 2008. Petrogenesis of the Neogene alkaline volcanics with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Eastern Pontides, NE Turkey. Lithos, 104, 249-266.

Ersoy, H., 2007. Trabzon İli Katı Atıkları İçin Düzenli Depolama Yeri Seçimi ve Önerilen Düzyurt Düzenli Depolama Alanının Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Doktora Tezi, 248 s. (yayımlanmamış)

Ersoy, H., Özdemir, A., Yalçınalp, B., 2009. Geology and geotechnical properties of kalecik Gümüşhane) travertines. Proceedings of The 21st International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya, 639-648.

Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu. MTA Yayınları, Ankara, 65 s.

Harputlu, H. 2016. Saraftepe (trabzon) tefritinin fiziksel ve mekanik Özelliklerinin sicaklik etkisiyle değişiminin incelenmesi**.** Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Yüksek Lisans Tezi, 6-20 s. (yayımlanmamış).

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. Rock characterisation testing and monitoring. In: Brown, E. T. (ed.) Pergamon Press, Oxford.

Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013. Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işleri kitabı, Ankara.

Ketin, I., 1966. Anadolu'nun tektonik birliktelikleri. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 66, 23-34.

Korkmaz, S., Van, A., 1995. Trabzon kıyı bölgesinin stratigrafisi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü 30. Yıl Sempozyumu Bildiri Özleri, 107.

Korkmaz, S., 1993. Stratigraphy of The Tonya– Düzköy (Southwest of Trabzon). Türkiye Jeoloji Bülteni, 36–1, 151– 158.

Okay, A.I., Şahintürk, O., 1997. Geology of the eastern Pontides. Report of Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region, 68, 291– 311.

Özdemir, A., 2009. Kalecik (Gümüşhane) Travertenlerinin Fiziko-Mekanik Özellikleri ve Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Yüksek Lisans Tezi, 69 s. (yayımlanmamış).

TS EN 1097-2, 2010. Agregaların Mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: parçalanma direncinin tayini için metotlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1097-1, 2002. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler -Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (MikroDeval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. TS 802, 2009. Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1097-6, 2002. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1367-1,2001. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Donmaya ve çözülmeye karşı direncin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Yağız, S., 2010. Geomechanical properties of construction stones quarried in South-western Turkey. Scientific Research and Essays, 5 (8), 750–757.

Yılmaz, A.O, Çavuşoğlu, İ., Alp, İ., Kaya, R., Vıcıl, M., 2003. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin doğaltaş potansiyeli ve doğaltaş işletmeciliği ile ilgili sorunlar. Türkiye IV. Mermer sempozyumu bildiriler kitabı, 435-448.

Yücel, C., Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu, E. 2012. Trabzon-Giresun arasındaki Tersiyer alkalen volkanitlerinin petrokimyası ve Sr-Nd izotop jeokimyası, KD Türkiye. V. Jeokimya Sempozyumu, Denizli, 132-133.

Yüreğil Köyü (Emirdağ-Afyonkarahisar) Mermer Olarak İşletilen Kireçtaşlarının Jeolojik, Mineralojik-Petrografik ve Jeomekanik Özellikleri

Geological, Minoralogical, Petrographic and Geomechanical Properties of Limestone Produced for Marble Industry in Yüreğir Village (Emirdağ-Afyonkarahisar)

M. Bağcı[*,1], S.S. İşoğlu[1], A. Yıldız[1]
Afyon Kocatepe Üniversitesi
*(*mbagci@aku.edu.tr)*

ÖZ: İnceleme alanının en yaşlı kayaçlarını Orta-Üst Triyas yaşlı Tozlutepe Formasyonu oluşturmaktadır. Tozlutepe Formasyonu dolomitik kireçtaşlarından oluşur. Jura yaşlı yarı kristalize kireçtaşlarından oluşan Koçakkale Formasyonu temel kayaçların üzerinde yer alır. Miyosen yaşlı Gebeceler Formasyonu tüf- tüfit- marn, kumtaşı ve aglomeralardan oluşan Özburun marn ve Seydiler tüf üyelerinden oluşur. Uyumsuzlukla Gebeceler Formasyonu kireçtaşlarını üzerler. Kum, silt ve killerden oluşan Kuvaterner yaşlı alüvyon birimleri oluşmaktadır. Son yıllarda, Yüreğil köyü ve çevresinde çok sayıda mermer ocak işletmesi açılmıştır. Bu durum bölgenin mermer sektörü açısından yakın zamanda önemli bir bölge haline geleceğini göstermektedir. Yüreğil Köyü, Emirdağ (Afyonkarahisar) ilçesinin yaklaşık 20 km güneydoğusunda yer almaktadır. Çalışma alanında, breşik ve lamina (bantlı) yapı gösteren koyu gri ve açık gri renk tonlarında kireçtaşı yatakları bulunmaktadır. Kayaçların litolojik özelliklerinin kireçtaşlarına olan talep artışında önemli etkisi olmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan polarizan mikroskop ve X ışınları difraktometre (XRD) analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, kireçtaşlarının ana minerallerini dolomit ve kalsit mineralleri oluşturmaktadır. İnce kesit incelemelerinde, yer yer mikro çatlakların içine sparikalsit minerallerinin dolgu şeklinde yerleştiği belirlenmiştir. Ayrıca, mikro çatlakların birleştiği noktalarda breşik yapıların yoğun olarak oluştuğu gözlenmiştir. Yapılan fizikomekanik deneyler sonuçlarına göre, bölgedeki kireçtaşlarının yüksek ve çok yüksek kaya sınıfında olduğu, tek eksenli basınç direncine göre orta ve yüksek dirençli sınıfında yer aldığı görülmüştür. Ayrıca, nokta yükleme dayanımına göre ise yüksek dirençli kaya sınıfında bulunduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak Yüreğil Köyü ve çevresinde bulunan kireçtaşlarının fizikomekanik deneyler sonucunda doğal yapı taşı ve kaplama amaçlı kullanılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Emirdağ, Dolomitik kireçtaşı, Breşik yapı, Fizikomekanik özellikler.

ABSTRACT: *The oldest rocks of the study area are the Middle-Upper Triassic Tuzlutepe Formation. The Tozlutepe Formation consists of dolomitic limestones. The Koçakkale Formation, consisting of Jurassic semi-crystalline limestones, overlies the basement rocks. Miocene aged Gebeceler Formation consists of Özburun marl and Seyitler tuff members, which are composed of tuff - tuffite - marl, sandstone and agglomerates. It unconformably overlies the Gebeceler Formation.. Quaternary aged alluvial units are formed, consisting of sand, silt and clays. In recent years, many marble quarries have been opened in and around the village of Yüreğil. This shows that the region will soon become an important region for the marble sector. Yuregil Village is located approximately 20 km southeast of Emirdag (Afyonkarahisar) district. In the study area, there are limestone deposits in dark gray and light gray color tones showing brecciated and lamina (banded) structure. The lithological properties of the rocks have an important effect on the increase in demand for limestones. According to the results obtained from polarizing microscope and X-ray diffractometry (XRD) analyzes carried out within the scope of the study, dolomite and calcite minerals constitute the main minerals of the limestones. In thin-section examinations, it was determined that sparicalcite minerals were emplaced in the micro-cracks in places as fillings. In addition, it was observed that brecciated structures were formed intensively at the junction of microcracks. According to the results of the physicomechanical experiments, it has been observed that the limestones in the region are in high and very high rock class, and in the middle and high resistance class according to their uniaxial compressive strength. In addition, it was determined that it is in the high resistance rock class according to its point loading strength. As a result, it has been determined that the limestones found in Yüreğil Village and its surroundings can be used for natural building stone and coating purposes as a result of physicomechanical experiments.*

Keywords: *Emirdağ, Dolomitic limestone, brecciated structure, Physicomechanical properties.*

1. GİRİŞ

En eski zamanlardan beri kullanılan mermerler önceden sadece yapılarda ve süs eşyası olarak kullanılmaktaydı. Daha sonradan teknolojik gelişmeler vasıtasıyla pekçok alanda daha kullanılmaya başlanmıştır. Petrografik olarak mermer; kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve/veya bu ikisinin çeşitli oranlarda bulunmasıyla oluşan karbonatlı kayaçların metamorfizma geçirmesi sonucu yeniden kristalleşmesiyle oluşmaktadır. Ticari tanıma göre ise kesilip parlatılabilen, blok verebilen her türlü kayaca mermer denilmektedir (Kulaksız vd, 2017). Türkiye'de eski zamanlarda çıkartılan ilk mermer M.Ö. 2000 yıllarına dayanmaktadır. İlk çıkartılan mermer rezervin de yoğun miktarda bulunduğu Batı Anadolu'daki Marmara adasındadır (MTA, 2018). Afyon mermerlerinin çıkartılması ise M.Ö. 900'lü yıllara dayanmaktadır (Erguvanlı vd. 1972). Çok geniş bir kullanım alanına sahip olan mermerler binaların iç ve dış kaplamalarında, banyolarda, heykelcilik alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Ülkemiz 2020 ihracat rakamlarına göre mermer ihracatı yaklaşık 1500 ton olarak gerçekleşmiş ve bu miktar yaklaşık 592 milyon dolara tekabül etmektedir. Yine mermer ihracatı tüm ihracatın yaklaşık %4'ünü oluşturmaktadır. Blok olarak satılan mermerlerde ihracat 2,663 ton olarak yapılmış ve 514 milyon dolar kaynak sağlamıştır. 2019 yılına göre işlenmiş mermerde %17, blok mermerde ise yaşanan %40'lık düşüşün en büyük sebebi Covid-19 pandemisidir (İMİB,2020). Afyonkarahisar ili mermerde 2019 yılında yaklaşık 182 milyon dolarlık ihracat gerçekleştirmiş ve bu rakam Türkiye'deki tüm ihracat rakamının %12'sini oluşturmuştur (ATSO,2019).

Afyonkarahisar ilinin Emirdağ ilçesinde bulunan çalışma alanı Alimoğlu Mermer San. ve Tic. A.Ş.'ye aittir. Yapılan bu çalışmada bölgenin1/10000 ve 1/25000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmıştır. Bütün sahayı temsil edecek şekilde yapılan örneklemeler üzerinde mineralojik, petrografik analizler ve jeokimyasal analizler yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları kapsamında alınan numuneler polarizan mikroskop yardımıyla incelenmiş, x-ışınları difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskop (SEM) analizleri yapılmıştır. Çalışmanın amacı, Emirdağ kireçtaşlarının hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini belirlemektir. Yapılan çalışmalar sonucunda kayaçların boşluk oranı, gözenekliliği ve çeşitli deneyler sonucu elde edilen dayanım değerleri birleştirildiğinde bu kireçtaşlarının hangi alanlarda kullanılabileceğini tespit etmektir.

2. MATERYAL VE METOD

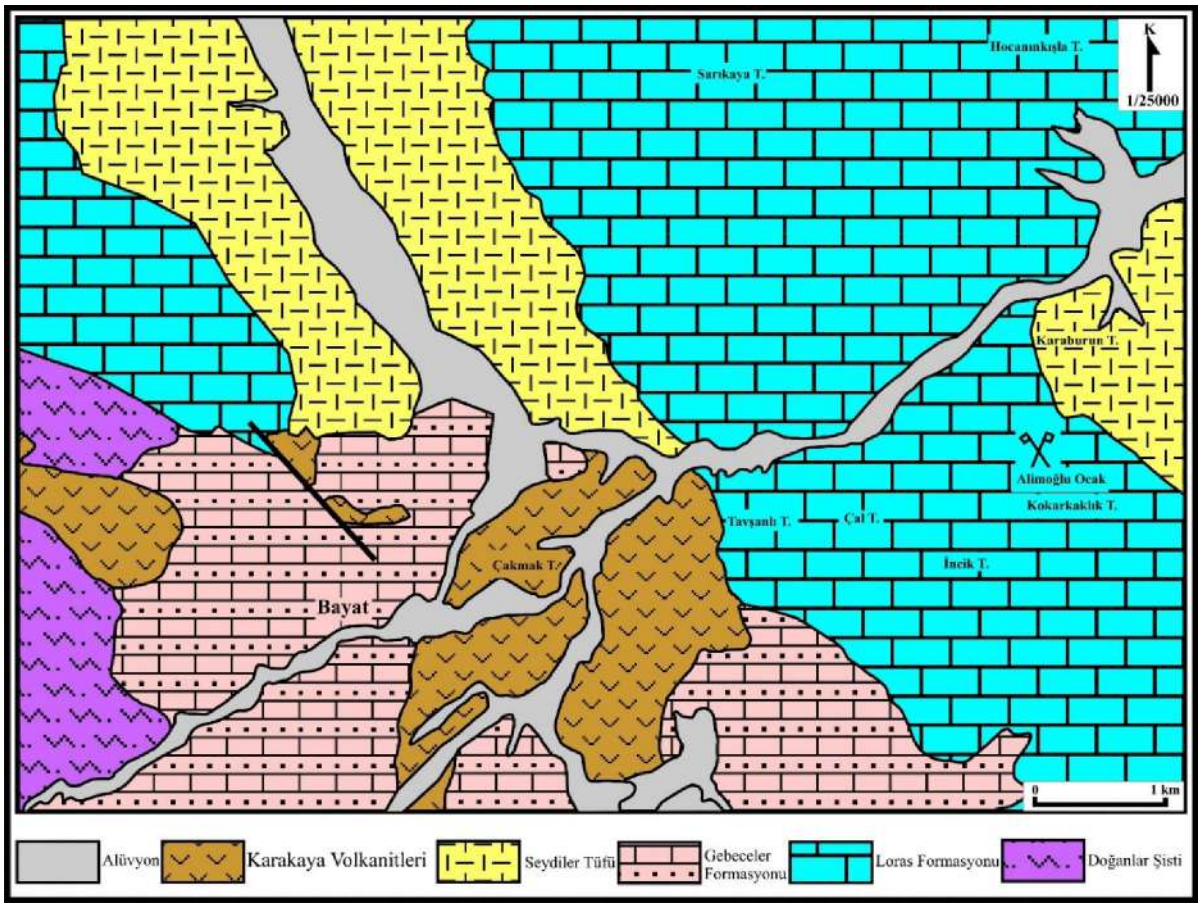
Alınan örneklerin mineralojik-petrografik özellikleri Afyon Kocatepe Üniversites Doğaltaş Analiz Laboratuvarında Nikon Eclipse 2V100POL marka mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca x-ışınları difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskop (SEM) analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde Shimadzu marka XRD-6000 model XRD cihazı ile 2^o ve 70^o arasında çekim yapılarak incelenmiştir. SEM analizleri de Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezinde LEO marka 1430 VP model cihaz yardımıyla yapılmıştır. Jeokimyasal incelemeler için Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Laboratuvarı'nda tüm seviyeleri temsil edecek şekilde 4 farklı numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler ACME (Kanada) laboratuvarında ICP-MS cihazı yardımıyla majör, iz ve nadir toprak element analizleri yapılmıştır. Fizikomekanik deneyler için Alimoğlu ocağında 4 farklı seviyeden her deney için 6 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme laboratuvarında birim hacim ağırlık, gözeneklilik, ultrasonik ses hızı, nokta yükleme ve eğilme dayanım deneyleri yapılmıştır. Schmidt çekici deneyi ise mermer ocağında numuneler üzerinde uygulanmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Jeoloji

Bölgede yayılım sunan ve Doğanlar şisti olarak bilinen birim, kuvars-muskovit-serisit, kuvars-albit-klorit şist, meta kumtaşı-meta konglomera, mermer ve kalkşistlerden meydana gelmektedir (Metin vd. 1987). Bu birimde albit, kuvars, muskovit, epidot, klorit ve granat mineralleri yaygın olarak bulunmaktadır (Erkan vd. 1996). Açık gri, gri ve koyu renklerde bulunan kireçtaşı ve dolomitler bölgede geniş yayılım alanı sunmaktadır (Şekil 1). Bölgede

bulunan mermerler bu birim içerisinden çıkartılmaktadır. Bölgede bulunan Geceler Formasyonun Özburun üyesi konglomera, kumtaşı, tüf, tüfit, marn, killi kireçtaşı gibi birimlerden meydana gelmektedir. Seydiler tüfü ise Aydar ve diğerleri (1998) tarafından tanımlanmıştır. Tüfler içerisinde genel olarak dumanlı kuvars, metamorfik kayaç parçaları, obsidiyen ve riyolit parçaları bulunmaktadır. İnceleme alanında bulunan volkanitler ise Karakaya Bazaltı olarak isimlendirilmiştir. Genellikle siyah renkli, koyu kahve renklidir. Bazalt örnekleri ince kesit yardımıyla mikroskop altında incelendiğinde ojit, biyotit, plajiyoklas mineralleri görülmektedir. İnceleme alanında bulunan Kuvaterner yaşlı alüvyon birim, ovalarda ve akarsu yataklarında biriken kum, çakıl birimlerinde oluşmaktadır.



Şekil 1. İnceleme alanının jeoloji haritası.

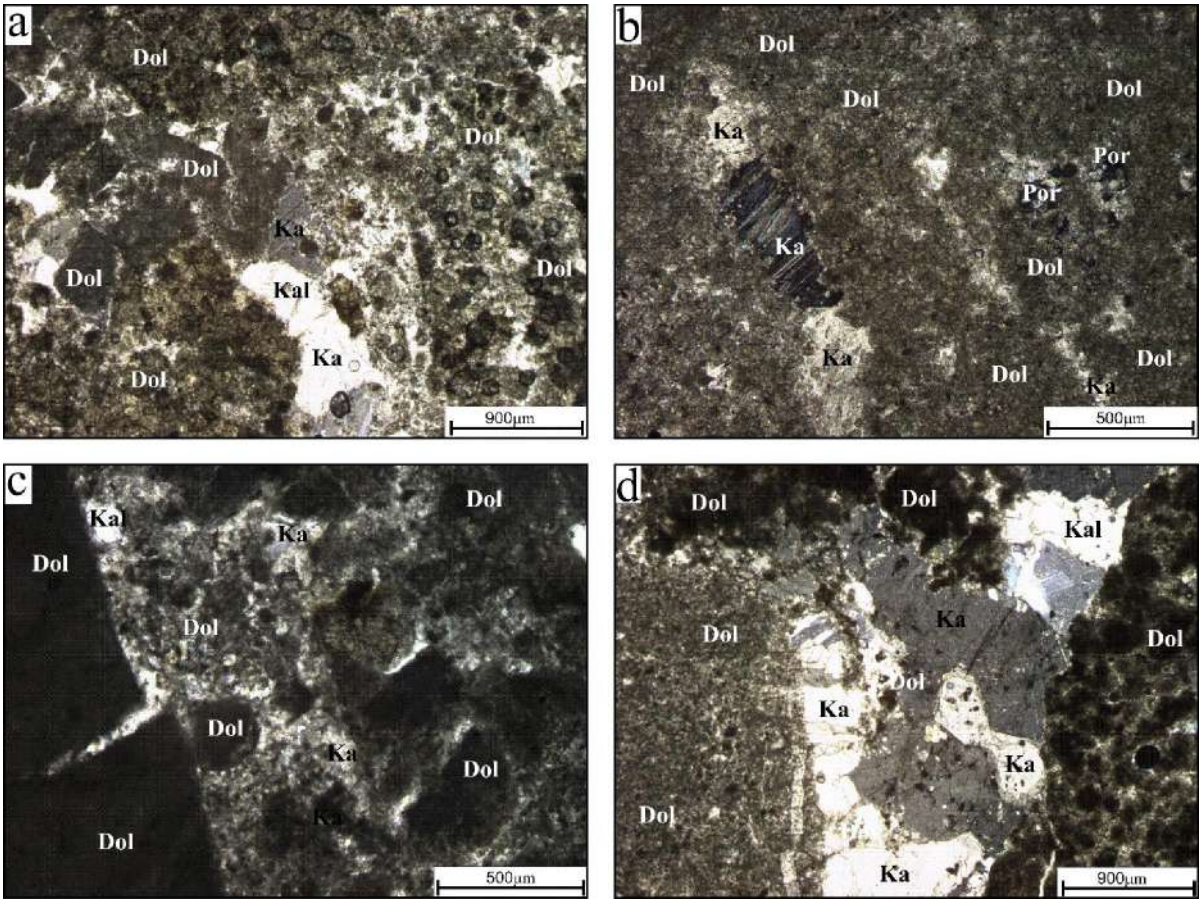
3.2. Mineralojik-Petrografik Özellikler

İnceleme alanında litolojik özelliklerine göre sınıflandırılan açık gri bantlı (Laminalı), açık gri breşik, koyu gri bantlı (Laminalı) ve koyu gri breşik renkli numuneler ince kesit altında incelenmiştir. Dolomitik kireçtaşlarının genel olarak mikritik dokuya sahip oldukları ve mikritik doku içerisine ikincil olarak spari kalsit minerallerinin geldikleri görülmüştür. Açık gri breşik renkli kireçtaşında ikincil olarak kalsit mineralleri yerleşmiş ve yer yer kuvars mineralleri gözlemlenmiştir. Koyu gri breşik kireçtaşlarında ise açık gri breşik renkli kireçtaşıyla benzer özellikte olduğu yalnız ikincil olarak yerleşen kalsitlerin iri taneli olduğu görülmüştür (Şekil 2).

3.3. XRD Analizleri

Kireçtaşı numuneleri üzerinde 4 farklı seriden alınan örnekler üzerinde XRD analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kireçtaşlarının genellikle dolomitten oluştuğu bunun yanında ikincil olarak kalsit minerallerinin

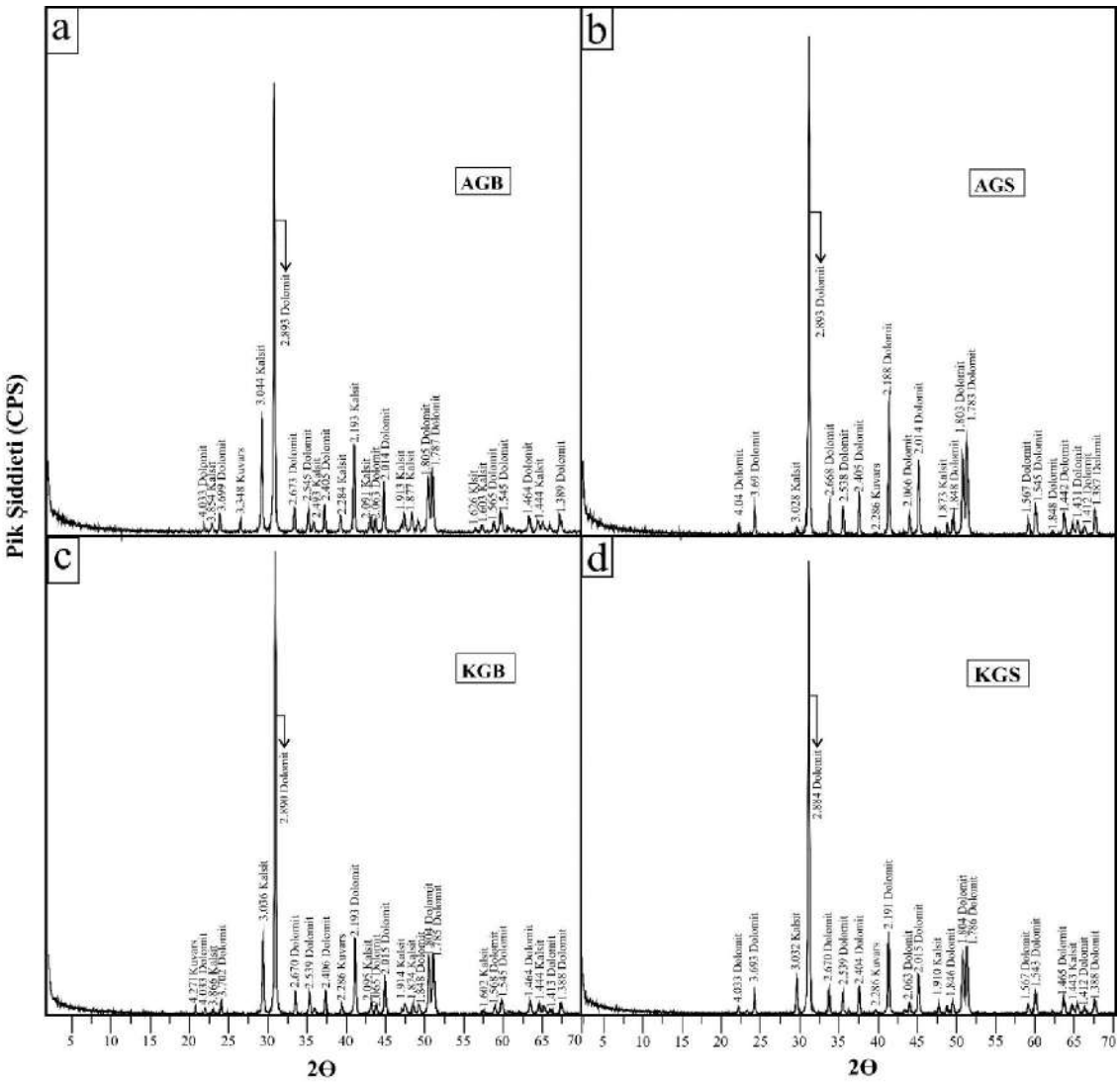
yerleştiği ve koyu gri breşik kireçtaşında az da olsa kuvars minerallerine rastlandığı görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 2. a) Yüreğil Köyü Açık gri renkli breşik kireçtaşlarının polarizan mikroskop görünümü, b) Yüreğil Köyü Açık gri renkli bantlı kireçtaşlarına ait polarizan mikroskop görünümü, c) Yüreğil Köyü Koyu gri renkli breşik kireçtaşlarının polarizan mikroskop görünümü, d) Yüreğil Köyü Koyu gri renkli bantlı kireçtaşlarına ait polarizan mikrodkop görünümü. Dol: Dolomit, Ka: Kalsit, Q: Kuvars, Por: Gözenek.

3.4. Jeokimyasal Özellikler

Alınan numuneler üzerinde majör, iz ve nadir toprak element miktarları ACME (Kanada) laboratuvarında yapılmıştır. Tüm mermer türlerinde SiO_2 oranı %1 den fazladır. SiO_2 oranının %1'den büyük olması kireçtaşlarında yer yer gözlenen kuvars taneleri ile ilişkilendirilmektedir (Koralay ve Kılınçarslan, 2015). Breşik kayalarda SiO_2, Al_2O_3, CaO, Rb, Sr, U, Zr, Y, Ce, Gd miktarları su yollu kireçtaşlarına göre fazla miktardadır. Su yollu kireçtaşlarında ise MgO, Na_2O miktarları breşik kireçtaşlarında daha fazladır.



Şekil 3. a) Yüreğil Köyü Açık gri renkli breşik (AGB) kireçtaşlarının XRD çekim sonuçları, b) Yüreğil Köyü Açık gri renkli bantlı (AGS) kireçtaşlarına ait XRD çekim sonuçları, c) Yüreğil Köyü Koyu gri renkli breşik (KGB) kireçtaşlarının XRD çekim sonuçları, d) Yüreğil Köyü Koyu gri renkli (KGB) bantlı kireçtaşlarına ait XRD çekim sonuçları.

Çizelge 1. Yüreğil Köyü (Emirdağ/Afyonkarahisar) kireçtaşlarına ait kimyasal analiz sonuçları.

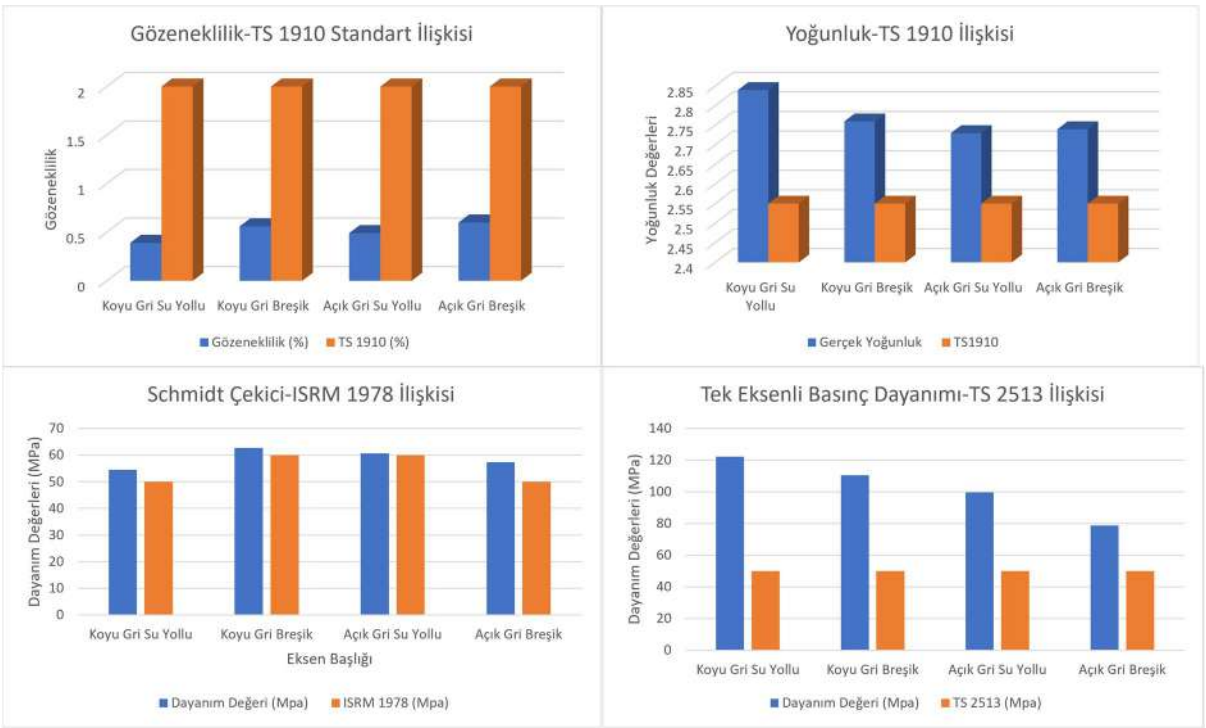
Örnek	AGB	KGB	KGS	AGS
SiO_2	1,19	0,56	0,07	0,08
Al_2O_3	0,12	0,05	0,01	0,02
Fe_2O_3	0,04	0,06	0,17	0,04
MgO	16,32	18,41	19,92	20,80
CaO	36,14	33,95	32,22	31,70
Na_2O	0,03	0,03	0,04	0,04
K_2O	0,03	0,01	0,01	0,01
TiO_2	0,01	0,01	0,01	0,01
P_2O_5	0,01	0,01	0,01	0,01
MnO	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr_2O_3	0,002	0,002	0,002	0,002
A.Z.	45,8	46,3	47,1	47,2
TOP	99,72	99,67	99,65	99,98

3.5. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Kireçtaşı numuneleri üzerinde birim hacim ağırlık, yoğunluk, boşluk oranı, gözeneklilik, Schmidt Çekici, nokta yükü ve tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Birim hacim ağırlık deneyleri sonucunda en düşük birim hacim ağırlık 2,73 gr/cm^3 olarak açık gri su yollu kireçtaşında ölçülmüştür. Ölçülen bu değer TS 1910 göre kaplama olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Gözeneklilik deneyinde yine TS 1910 değerine göre % 2'den az olması istenilmektedir. Ölçülen gözeneklilik değeri en yüksek % 0,60 olarak açık gri breşik kireçtaşları için elde edilmiştir. Schmidt çekici sonuçlarına göre en düşük dayanım koyu gri su yollu kireçtaşında 54 MPa ve en yüksek dayanım koyu gri breşik kireçtaşında 62 MPa olarak ölçülmüştür. Tek eksenli basınç dayanımı değerleri ise 78,8 MPa ile 110,61 MPa arasında değişmektedir. Şekil 4'te belirlenen özellikler çubuk diyagramlarda ilgili standartlarda verilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2. Yüreğil Köyü (Emirdağ/Afyonkarahisar) kireçtaşlarına ait mekanik deney sonuçları.

Numune Adı	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm^3)	Gözeneklilik (%)	Schmidt Çekici Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
Açık Gri Breşik	2,73	0,60	57,4	78,80
Koyu Gri Breşik	2,70	0,56	62,7	110,61
Açık Gri Su Yollu	2,70	0,49	60,6	99,64
Koyu Gri Su Yollu	2,82	0,39	54,5	122,20



Şekil 4. Mekanik incelemelerin standartlar ile karşılaştırılması.

4. SONUÇLAR

Emirdağ kireçtaşları üzerinde yapılan analizler sonucunda kireçtaşları açık gri bantlı, açık gri breşik, koyu gri bantlı ve koyu gri breşik olmak üzere 4 farklı grupta incelenmiştir. Mineralojik-petrografik incelemeler ve XRD analizleri sonucunda kireçtaşlarının genel olarak mikritik yapıya sahip oldukları

gözlemlenmiştir. Açık gri kireçtaşlarında ikincil mineral olarak kalsit, koyu gri kireçtaşlarında ise ikincil mineral olarak spari kalsit mineralleri yerleşmiştir. Buna ek olarak koyu gri kireçtaşlarında yer yer az miktarda kuvars mineralleri gözlemlenmiştir. Jeokimyasal incelemeler sonucunda ana, majör ve iz elementler incelendiğinde SiO_2, Al_2O_3, CaO, Rb, Sr, U, Zr, Y, Ce, Gd değerleri breşik kireçtaşlarında daha fazla miktarlarda bulunmaktadır. Buna karşın su yollu kireçtaşlarında MgO ve Na_2O miktarları su yollu kireçtaşlarında daha fazladır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde Emirdağ kireçtaşlarının breşik olanlarının dolomitik olduğu su yollu kireçtaşlarının ise dolomitik kireçtaşı-kireçtaşı arasında geçiş zonunda yer aldığı görülmüştür. Ca ve Mg korelasyonları incelendiğinde Ca miktarı azaldıkça Mg miktarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu ilişkiden kireçtaşlarının daha çok dolomite yakın olduğunu söylemek mümkündür. Fizikomekanik incelemeleri TS 1910, TS 2513 ve TS 10449'a göre yapılmıştır. Tüm standartlar incelendiğinde Emirdağ kireçtaşlarının istenilen sınır değerleri arasında yer aldığı belirlenmiştir. Deere ve Miller (1966)'ya göre tek eksenli basınç dayanımına göre kireçtaşları orta ve yüksek dirençli kaya sınıfında yer almaktadır. Bieniawski (1975)'e göre nokta yükleme dayanımları incelendiğinde kireçtaşlarının tümü yüksek dirençli kayaç sınıfındadır. Sonuç olarak incelenen kireçtaşlarının tüm standartları yerine getirdiği görülmektedir. Emirdağ kireçtaşlarının kaplama taşı, döşeme, süs ve heykelcilik alanlarında kullanılabileceği tespit edilmiştir.

5. KATKI BELİRTME

Çalışmanın yerine getirilmesini sağlayan ve deneyler için numunelerin hazırlanmasında pay sahibi olan Alimoğlu Mermer Fabrikasına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

6. KAYNAKLAR

Aydar, E., Bayhan, H., G, Alaian., 1998, Koroglu caldera, mid-west Anatolia, Turkey: Volcanological and magmatological evolution, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 85-1

Bieniawski, Z. T., 1975, The Point Load Test in Geotechnical Practice, Engineering Geology, 9, 1-11.

Deere, D. U. and Miller, R. P., 1966, "Engineering classification and index properties for intact rock," Technical Report No AFWL- TR-65-116, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Base, New Mexico.

Erguvanlı, K., Yüzer, E., Güleç, K., Zanbak, C., 1972. Türkiye Mermerlerinin Fiziko-Mekanik Özellikleri ve Mermerlerin Sınıflandırılmaları Hakkında Düşünceler. Türkiye Jeoloji Bülteni, 15,12.

Erkan, Y., Bayhan, H., Tolluoğlu, A. Ü., Aydar, E., 1996, Afyon Yöresi Metamorfik ve Volkanik Kayaçların Jeolojik, Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Ankara.

Koralay T, Kılınçarslan S (2015). Minero-petrographic and isotopic characterization of two antique marble quarries in the Denizli region (western Anatolia, Turkey), Periodico di Mineralogia 84 (2): 263-288.

Kulaksız, S., Özçelik, Y., Bayram, F., Engin, İ. C., 2012, Doğal Taş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.

Metin, S., Genç, Ş. ve Bulut, V., 1987. Afyon ve Dolayının Jeolojisi, M.T.A. Rapor No:8103, (Yayınlanmamış), Ankara

MTA, 2018. Dünyada ve Türkiye'de Doğal Taşlar. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.

TS 1910, Türk Standartları, 1977, Kaplama Olarak Kullanılan Doğal Taşlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 2513, Türk Standartları, 1977, Doğal Yapı Taşları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 10449; TSE, Mermer-Kalsiyum Karbonat Esaslı-Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan, ICS 73.080; 91.100.15, Ankara.

ATSO, 2019. http://www.afyonkarahisartso.org.tr/index.asp?s=141&t=2&a=21

İMİB 2020. https://www.imib.org.tr/tr/raporlar/ihracat-istatistikleri

Mühendislik Jeolojisinde Modelleme ve Analiz / *Modelling and Analysis in Engineering Geology*

Deformasyon ve Güvenlik Sayısı Tahmininde Model Boyutunun Etkisi: İksa Sistemli Temel Kazısı Örneği

The Effect of Model Dimension on Predicted Deformation and Safety Factor: The Example of Foundation Excavation with Shoring System

İ. Kuşku[1,*]

[1] *İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Büyükçekmece, İstanbul*
*(*ibrahim@iuc.edu.tr)*

ÖZ: Derin kazıların oluşturulması amacıyla projelendirilen destek sistemleri, dönme, kayma, temel tabanı kabarması ve toptan göçme riskleriyle karşı karşıyadır. Projelendirme aşamasında, stabilite şartları olarak nitelendirilen, bu risklerin değerlendirilmesi ve güvenlik koşullarının ortaya konulması, aynı zamanda proje başarısını da ortaya koymaktadır. Günümüzde, jeolojik ortamın gerilme şekil değiştirme davranışı ve zemin yapı etkileşimini modelleyebilen sayısal analiz teknikleri, bilgisayar yazılımlarının da yardımıyla, yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu analizlerin sonuçları kullanılarak, destek sistemlerinin stabilite şartları da değerlendirilebilmektedir. Ancak, yapılan değerlendirmelerde, jeoteknik parametrelerin yanında, oluşturulan analiz modeli boyutlarının da doğru seçimi önemli temel kriterlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle, toptan göçme kontrolünde, kazı üst kotu yönündeki model boyutlarının gereğinden kısa seçilmesi, etkin gerilmenin gerektiği şekilde modellenememesi nedeniyle, olumsuz sonuçlara neden olmaktadır. Çalışmada, destek sistemi projelendirilmesinde, toptan göçme kontrolünün öneminin ortaya konulması amacıyla, bir temel kazısı ele alınmıştır. Kazının temel seviyesine ulaşmasıyla eş zamanlı olarak, çevre yollarda, kazı alanına uzaklığı 75 m'ye varan gerilme çatlakları ve yapılarda deplasmanlar meydana gelmiştir. Bu çalışmada, kitle hareketi öncesi ile sonrasında yapılan jeoteknik çalışmalar değerlendirilerek jeoteknik model oluşturulmuştur. Uygun model boyutunun seçimiyle, toptan göçme olayıyla sonuçlanan örnek vakanın öngörülebilirliği ortaya konulmuştur. Yoğun yapılaşma alanlarındaki derin kazılar için, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplamalarda, iksa gerisindeki analiz modeli boyutunun, kazı derinliğinin en az 5 katı seçilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin kazı, iksa, kitle hareketi, toptan göçme, model boyutu.

ABSTRACT: *The support systems designed to deep excavations are faced with the risks that are rotation, slipping, swelling of the foundation base and total collapse. During the project design phase, the assessment of these risks, which are described as stability conditions, and the determination of the safety conditions also reveal the success of the project. Recently, numerical analysis techniques, which can model the stress-strain behavior and soil structure interaction of the geological environment, are widely used with the help of computer software. At the same time, the stability conditions of the support systems can be assessment by using the results of these analyses. However, in the assessments, in addition to the geotechnical parameters, the correct selection of the analysis model dimensions appears as one of the important basic criteria. Especially, in the control of external stability, causing negative results if the model size in the direction of the excavation top level is selected smaller than necessary, and the effective stress cannot be modeled properly. In the study, in order to underline importance of the control of external stability in the design of the support system, a foundation excavation and support system were investigated. Simultaneously with the excavation reaching the foundation level, have occurred tension cracks up to 75 m distance from the excavation area, and displacements in the structures and the roads. In this study, a geotechnical model was created by evaluating the geotechnical studies conducted before and after the mass movement. With the selection of the appropriate model size, the predictability of the case that resulted in the collapse was demonstrated. For deep excavations in dense building areas, it was determined that the analysis model size behind the shoring should be selected at least 5 times the depth of the excavation in the calculations made with the finite element method.*

Keywords: *Deep excavation, shoring, mass movement, external stability, model dimension.*

1. GİRİŞ

Kentsel alanlarda, hızla artan otopark ihtiyacının yanı sıra, yapıların fonksiyonel gereklilikleri sonucu, derin kazılar giderek artmaktadır. Bu kazılar, özellikle yoğun yapılaşma alanlarında, kimi zaman mevcut yapılara, kimi zaman da yoğun araç trafiğinin bulunduğu yollara sınır oluşturacak şekilde yapılmaktadır. Bu durum, projelendirme aşamasında ortaya çıkan kısıtlayıcı ve maliyet arttırıcı etkilerinin yanında, başarısız projelerde, bitişik yapılara zarar, yasal sorunlar, gecikme ve ek maliyetlerle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, çevrenin korunması ve proje güvenliği için oluşturulan destek sisteminin performansının kapsamlı bir şekilde araştırılması önemlidir.

Kazı destek sistemi ve çevre yapılarla etkileşiminin değerlendirilmesi için, alansal veri analizlerine dayalı istatiksel yöntemlere (Feng vd., 2020; Ou vd., 2000, 1993; Tan ve Lu, 2018, 2017; Xu vd., 2016), analitik yöntemlere (Chen vd., 2020; Cheng vd., 2020; Lu-yao vd., 2016) ve sayısal analize dayalı (Chen vd., 2016; Cheng vd., 2021; Goh vd., 2017; Guo vd., 2019; Lim vd., 2018; Zheng vd., 2018; Zhou vd., 2020), kapsamlı birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar, derin kazılar sonucu oluşan gerilme ve deformasyon değişimlerinin anlaşılmasına önemli katkılar sunmuştur. Ancak, kazılardan kaynaklı gerilme ve deformasyon değişimleri, zemin özellikleri, hidrolik koşullar, kazı geometrisi, istinat sisteminin rijitliği ve kazı metodu gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, ampirik yöntemler, pratik çözümler sunmasına karşın, tüm bu faktörleri değerlendirmek oldukça zordur, konservatif sonuçlar sunar ve çoğu zaman tatmin edici sonuçlar verememektedir. Sonlu eleman yazılımlarının ortaya çıkmasıyla, yukarıda belirtilen faktörleri dikkate alma becerisine sahip sayısal analizler, derin kazıların projelendirilmesinde yaygın olarak benimsenmiştir. Ampirik yöntemler, kazı performansının ilk tahmini için kullanılabilecekken, sayısal analizler daha doğru tahminlere ulaşılmasını sağlamaktadır (Tan ve Wei, 2012). Ancak, sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal analizler, yüksek hesaplama gereksinimleri nedeniyle karmaşıktır ve analiz sonuçlarının kesinliği, pratikte belirlenmesi kolay olmayan, seçilen parametrelere duyarlıdır. Tüm bu yöntemler kullanılarak destek sisteminin performansına yönelik yapılan tahminlerin tutarlığı, gerilme ve deformasyonların yerinde tespitine yönelik yapılan ölçümlerle ortaya konulabilmektedir.

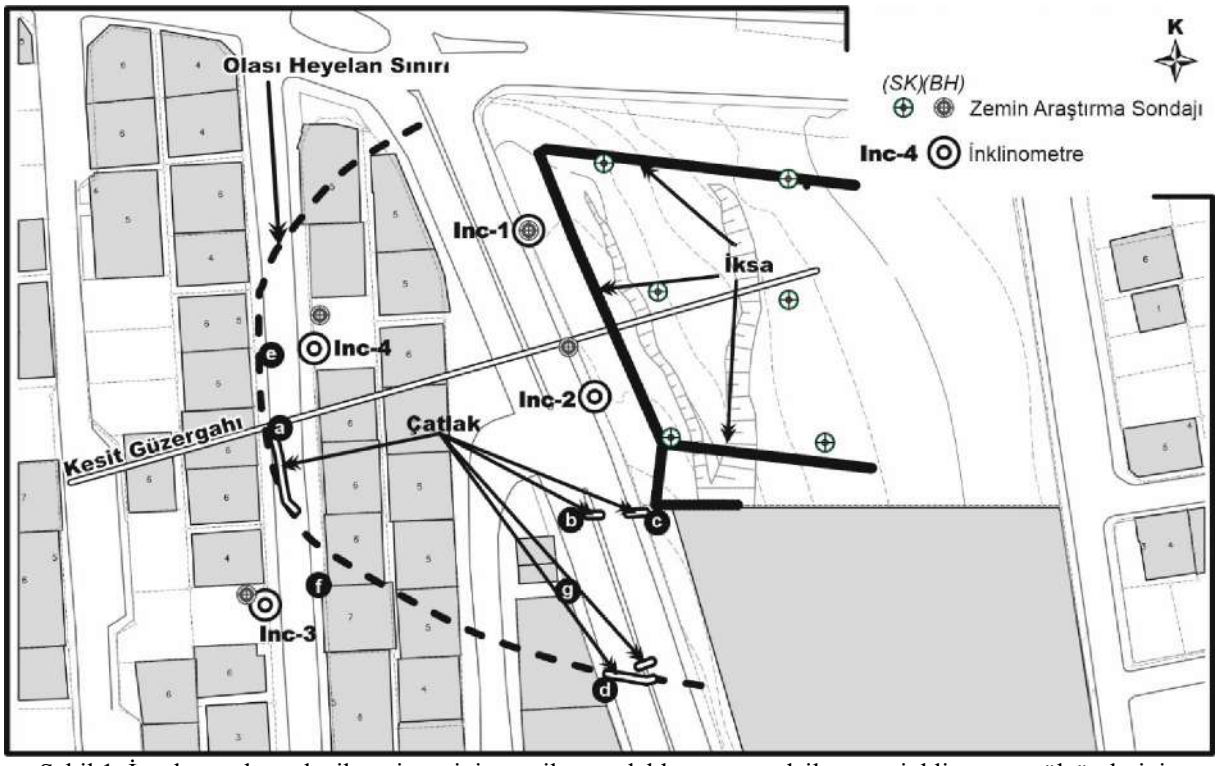
Destek sistemlerinde karşılaşılan göçme veya aşırı deformasyon problemlerinin temelini, jeoteknik parametre seçiminde yapılan hataların yanı sıra, bu sistemler üzerinde etkin, dönme, kayma, temel tabanı kabarması ve toptan göçme risklerinin, sınır kriterler çerçevesinde gerektiği şekilde değerlendirilmemesi oluşturmaktadır. Bununla birlikte, değerlendirme yöntemi seçiminde veya modellemede yapılan hatalar, sonuçları olumsuz yönde etkilemekte, destek sistemi ve bu sistemler kaynaklı hasarların oluşmasına neden olabilmektedir. Özellikle, toptan göçme riski değerlendirmesinde, uygun model boyutlarının seçimi doğrudan etkin bir parametredir. Destek sistemi performansının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda, model boyutlarının etkisi doğrudan bir araştırma konusu olarak seçilmemesine karşın, kazı derinliğine bağlı etki mesafesinin sunulduğu çalışmalar, aynı zamanda seçilen model boyutunun önemini ortaya koymaktadır (Franzius ve Potts, 2005; Harahap ve Ou, 2020; Houhou vd., 2019; Miliziano ve de Lillis, 2019; Shakeel ve Ng, 2018).

Bu çalışmada, yoğun yapılaşma alanında bulunan, 17 m derinliğe varan bir temel kazısında, analiz modeli boyutlarının, sonuçlara ve toptan göçme riskinin değerlendirilmesine etkisini ele alan bir analiz çalışması sunulmaktadır. Temel kazısı, öngermeli ankraj ve fore kazıklarla destekli projelendirilen, destek sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Kazının temel seviyesine ulaşmasıyla eş zamanlı olarak, çevre yollarda kazı alanına uzaklığı 75 m'ye varan gerilme çatlakları ve çevre yapılarda deplasmanlar meydana gelmiş, oluşan kitle hareketinden etkilenen 30 adet bina boşaltılmıştır. Destek sistemi projelendirilmesinde, elasto-plastik davranış etkilerini dikkate alan analitik yöntem kullanıldığı ve fore kazık hattı gerisinde bulunan yolu içine alan 25 m'lik bir kesimin analiz modeli içerisine dâhil edildiği görülmüştür. Bu çalışmada ise, destek sisteminden farklı uzaklıklarda sonlanan analiz modeli oluşturulmuş ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapmaya imkân tanıyan Plaxis 2D yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Destek sistemi güvenlik analizlerinde ise mukavemet azaltma yöntemi kullanılmış ve tüm analizlerde yapısal elemanlar elastik seçilmiştir. Çalışma kapsamında, yoğun yapılaşmanın bulunduğu alanlarda yapılan projelerde, iksa sistemindeki toptan göçme riskinin gerektiği gibi değerlendirilebilmesi için, kazıya uzaklık / kazı derinliği oranının 5'ten büyük seçilmesi

gerektiği belirlenmiştir. Bu oranın gereğinden küçük seçilmesi, deformasyon tahminlerinin gerçekleşenden küçük, güvenlik sayısı tahminlerinin ise büyük belirlenmesinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

2. TEMEL KAZISI VE İSTİNAT YAPISI ÖZELLİKLERİ

Örnek vaka, yoğun bir şekilde kullanılan iki ana yolla sınır oluşturan ve çevresinde 5 ila 7 katlı yapıların bulunduğu bir temel kazısıdır (Şekil 1). Temel alanı, batıda 78 m kotundan başlayarak, doğuda 68 m kotuna kadar azalan, doğuya eğimli bir doğal topografyaya sahiptir. Alanda, 61 m kotuna kadar yapılacak temel kazısı için, alanın batı cephesinde 17 m derinliğe varan kazı yüksekliği oluşturulmuştur. Bu kazı yüksekliğinin desteklenmesi için ise, yüklenici firma tarafından, 16.5 m uzunluğunda, D=65 cm çaplı ve akstan aksa s=1.00 m aralıklı, kısmen öngermeli ankrajlarla destekli iksa sitemi projelendirilerek inşa edilmiştir. Ön germeli ankrajlar kazı alanı batı cephesinde düşeyde 2.50 m aralıklarla 4 sıra olacak şekilde planlanmış, kuzey cephede doğuya doğru azalan topografik kota uygun olarak ankraj sırası azaltılmış, güney cephede ise komşu yapı bodrum katı nedeniyle ankraj uygulanmamıştır.



Şekil 1. İnceleme alanında, iksa sisteminin, gerilme çatlaklarının, sondajların ve inklinometre ölçümlerinin konumu.

Örnek vaka analizlerinde, uzunluğu farklı olmakla birlikte, iksa sistemi projelendirilmesinde de kullanılan ve Şekil 1'de sunulan kesit güzergâhı kullanılmıştır. Bu kesit güzergâhında, 16.5 m uzunluğundaki fore kazıkların, üst kotu ile yol kotu arası 5 m yüksekliğindeki kesim şevli kazılmış, fore kazık soket boyu ise 4.00 m olarak planlanmıştır. Ankraj boyları ise 8.00 m kök boyuna sahip olup üst sıradan başlamak üzere sırasıyla, 21.00 m, 20.00 m, 19.00 m ve 18.00 m uzunluklarında projelendirilmiştir ve kilit yükleri 400 kN olarak belirlenmiştir.

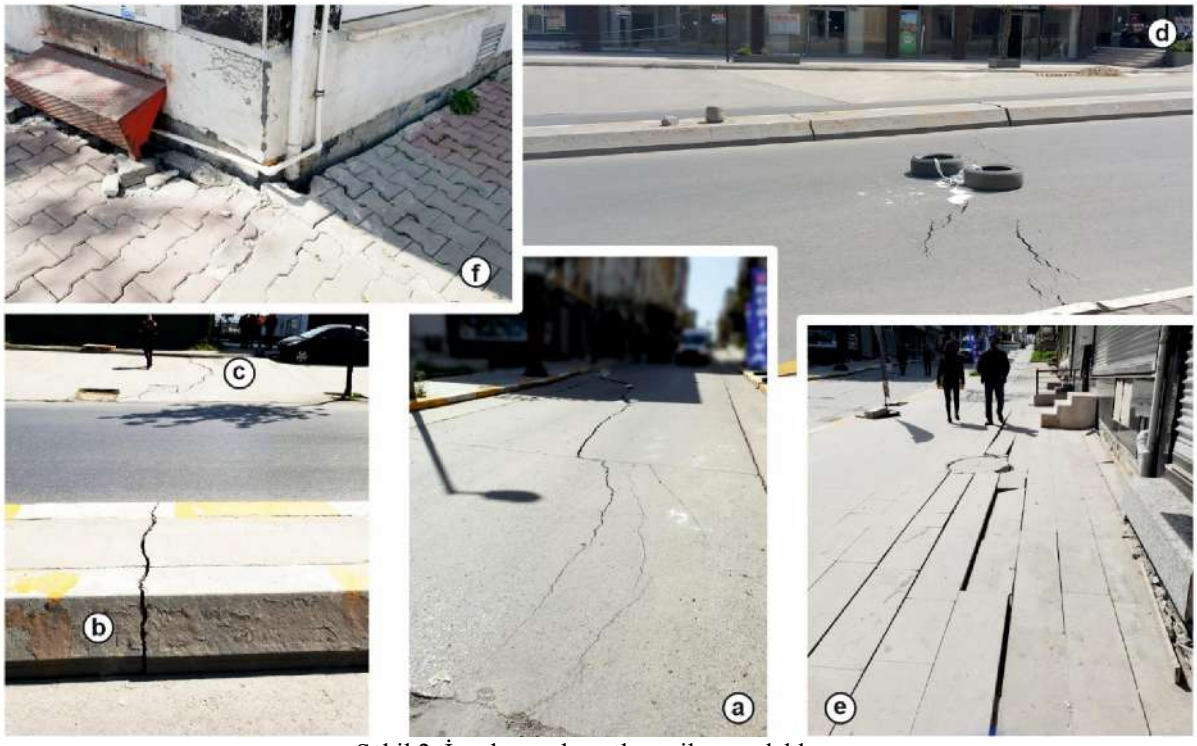
Yüklenici firma tarafından yapılan iksa sistemi proje hesaplarında, kesit güzergâhının batı sınırı, iksa hattına 25 m mesafede seçilmiştir. Amprik yöntem ve kabullere dayalı geliştirilmiş yazılım kullanılarak destek sistemi modellenmiştir. Yapılan hesaplamalarda, zeminin elasto-plastik davranış etkisi dikkate alınmasına karşın, iksa arkasındaki zemin kütlesinin, içsel sürtünme açısına bağlı kritik bir kayma yüzeyine sahip olduğu kabulüyle hesaplamalar yapılmıştır.

Kazı çalışmaları sırasında, iksa sisteminin performansının takibi için iksa yüzeyinde belirlenmiş referans noktaların üç boyutlu düzlemde hareketlerinin takibine dayanan topografik ölçüm sistemi kullanılmıştır.

Ancak, kitle hareketinin gerçekleşmesine kadar düzenli bir ölçüm periyodu takip edilmediği, kayıt sistemi oluşturulmadığı görülmüştür.

2.1. Hasarlar ve İzleme Sistemi Verileri

Kazı alanında yapılan çalışmaların temel kotuna ulaşmasıyla eş zamanlı olarak, alanın batı ve güney kesimindeki, çevre yapılarda deplasmanlar, yollarda ise gerilme çatlakları gözlenmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2). Gözlemlenen bu hasarlar sırasında, iksa istemi 4. sıra ankraj delgileri yapılmış, kök bölgeleri oluşturulmuş ancak halat gergileri yapılmamış durumdadır.
Kazı alanı batı kesiminde, iksa hattına uzaklığı 75 m'ye varan mesafede gerilme çatlaklarıyla birlikte, bina ile kaldırım birleşimlerinde 20 cm'ye varan düzeyde hareketler belirlenmiştir. Bitişik nizamda inşa edilmiş bazı yapılarda birbirinden ayrılmalar gözle görülebilir seviyeye ulaşmıştır ve alandaki 30 adet yapı boşaltılmıştır.

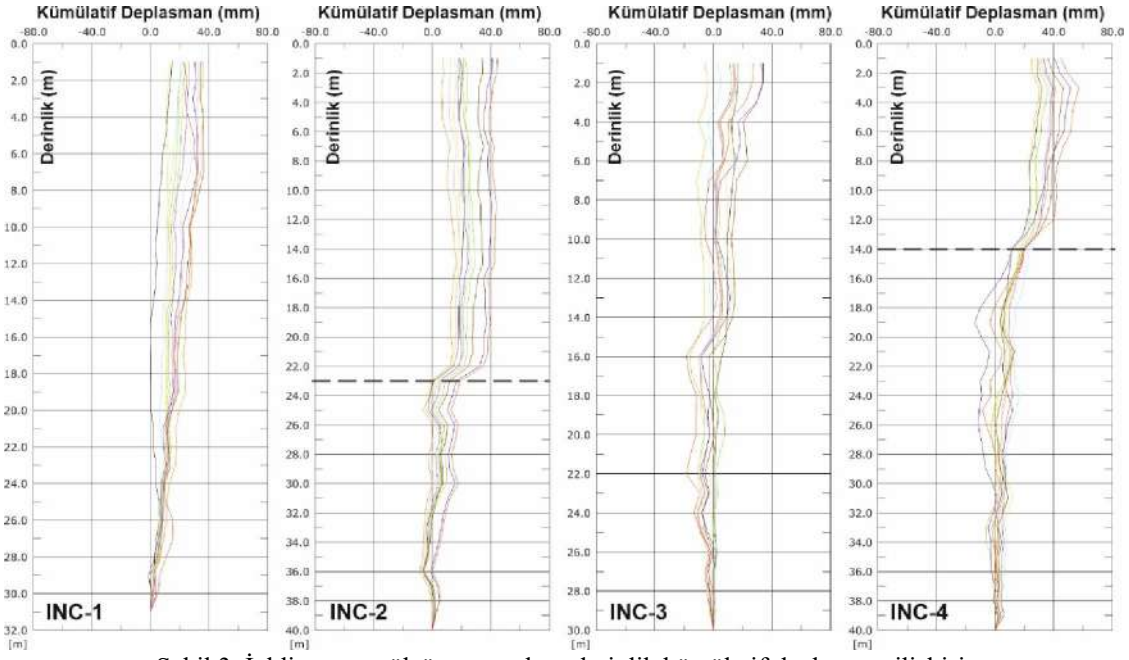


Şekil 2. İnceleme alanında gerilme çatlakları.

Kazı sırasında yapılan topografik ölçümlerden düzenli bir kayıt verisine ulaşılamamıştır. Ancak, yüklenici ölçüm ekibi tarafından iksa sistemi batı cephesinin, olayın gerçekleştiği tarih öncesi son iki günde, doğu yönünde, 20 cm hareket ettiği bilgisi paylaşılmıştır. Yaşanan kitle hareketi sonrasında alanda hareket mekanizmasının ve kayma derinliğinin belirlenebilmesi amacıyla, inklinometre ölçüm kuyuları oluşturulmuştur (Şekil 1). Bir aylık bir süre kapsayan, her bir lokasyon için 15 adet ölçüm verisine göre, iksa hattına doğru olan doğu yönünde kümülatif deplasman, en büyük 58 mm, en küçük 35 mm olarak belirlenmiştir. Inc–1 kuyusu tüm derinliği boyunca doğuya eğim kazanmış, Inc–2 ve Inc–4 kuyularında sırayla 23 m ve 14 m derinlilerinde kayma düzlemleri belirlenmiştir (Şekil 3).

3. İNCELEME ALANI JEOLOJİK VE JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

Temel kazısı alanında, iksa sistemi projelendirmesi öncesinde yapılmış olan 25 m derinliğinde 6 adet (SK) zemin araştırma sondajı bulunmaktadır. Bu verilere ilaveten, kitle hareketi sonrasında yapılmış olan, 30 m ile 40.5 m derinlikleri arasında 4 adet (BH) zemin araştırma sondajı verisinden yararlanılmıştır (Şekil 1). Kazı alanı ve çevresinde, üstte 7.50 m kalınlığa varan siltli kilden oluşan yapay dolgu bulunmaktadır. Yapay dolgu altında, 12 m ile 15 m kalınlıkları arası değişen yer yer çakıllı kum ara seviyeli sarımsı kahverengi katı siltli kil ve bu birim altında sert kil litoloji tespit edilmiştir.



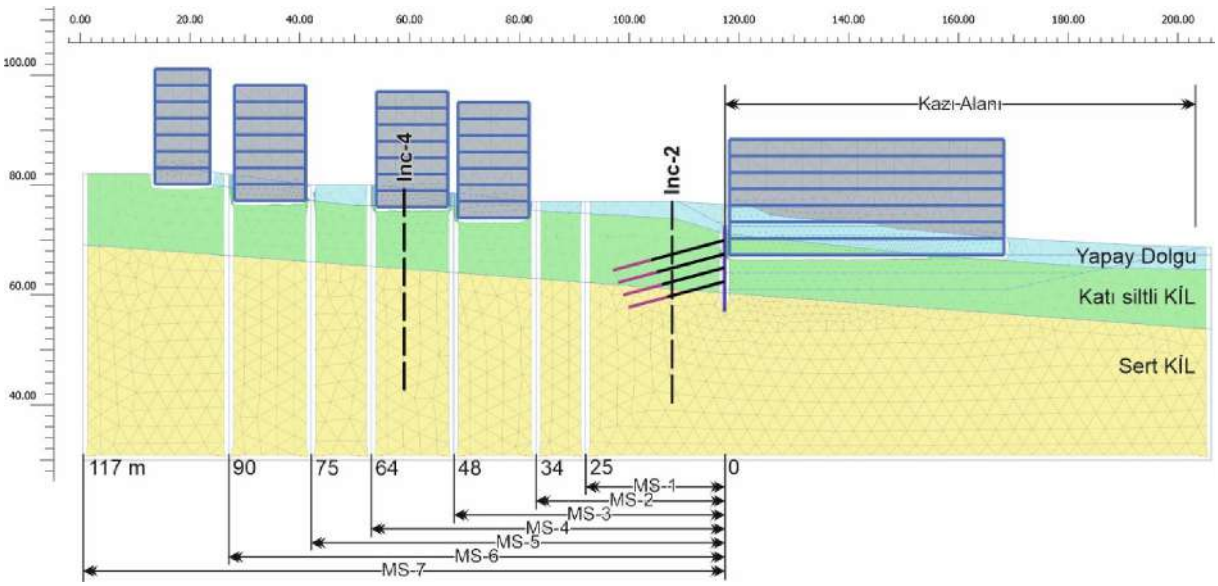
Şekil 3. İnklinometre ölçüm sonuçları, derinlik kümülatif deplasman ilişkisi.

Zemin araştırma sondajları ve bu sondajların örneklerine ait laboratuvar verileri kullanılarak, Şekil 1'de verilen güzergâh boyunca, gerilme – deformasyon analizlerinde kullanılmak üzere jeoteknik zemin profili oluşturulmuştur (Şekil 4). Profilde tanımlanan üç farklı birim için belirlenen, fiziksel özellikler, mukavemet ve rijitlik parametreleri Çizelge 1'de sunulmuştur. Oluşturulan jeoteknik model sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme – deformasyon analizlerine imkân tanıyan Plaxis 2D yazılımına aktarılmıştır. Model sınırları içinde bulunan yapılar, bodrum katlarıyla birlikte toplam kat adetleri göz önüne alınarak, her bir katından 20 kN/m^2 gerilmenin temel zeminine aktarılacağı kabulüyle oluşturulmuştur. Yapılacak analizlerde, sonlu eleman boyutları ve dağılımının sonuçlar arası ilişkiye etkisini ortadan kaldırmak amacıyla, tek bir modelde 7 farklı sınır koşul tanımlanmış ve analiz mesh yapısı bu tanımlama sonrasında oluşturulmuştur. Model sınırları için, iksa sisteminden 25 m (MS–1), 34 m (MS–2), 48 m (MS–3), 64 m (MS–4), 75 m (MS–5), 90 m (MS–6) ve 117 m (MS–7) mesafeler seçilmiştir. Her bir model sınırı için yatayda harekete izin vermeyen, düşeyde serbest ara yüzey elemanları tanımlanmış ve ilgili analizlerde ayrı ayrı aktifleştirilerek model boyutlarının değiştirilebilmesi sağlanmıştır.

4. SONLU ELAMANLAR ANALİZLERİ

İnceleme alanı jeolojik ve jeoteknik özellikleri başlığı altında tanımlanan analiz modeli ve zemin parametreleri kullanılarak, iksa sistemi gerilme deformasyon analizi ile mukavemet azaltma yöntemiyle güvenlik durumu analizleri yapılmıştır. Analizlerde, kazı aşamaları, fore kazık üst kotundan 0.5 m alt kota kadar tek seviyede, sonrasında temel kotuna kadar ise 2.50 m kalınlıklar halinde kazı yapılacak şekilde modellenmiştir. İlk kazı aşamasından sonra fore kazık elemanı aktifleştirilmiş, sonrasındaki her kazı aşamasını takiben ilgili sıra ankrajları aktif konuma getirilerek 400 kN yük uygulanması sağlanmıştır. Tamamlanan kazı sonrası ise son aşama olarak güvenlik analizi tanımlanmıştır.

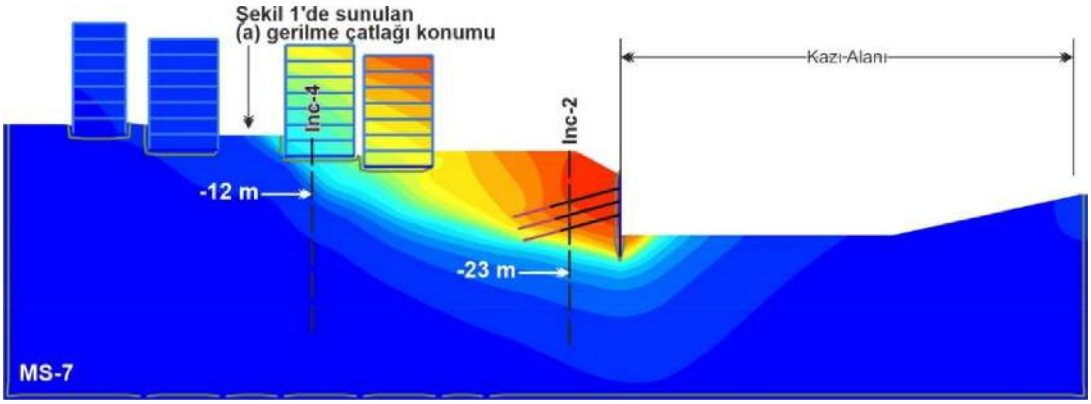
Tüm analiz modeli (MS–7) ile yapılan analizde, en büyük deplasman 0.32 m düzeyindedir. Kazının temel seviyesine indiği ancak son sıra ankrajın imal edilmediği, kitle hareketinin yaşandığı arazi durumunu yansıtan, bu analiz durumu için, güvenlik sayısı ise 1.02 olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucu kritik denge durumunu yansıtmaktadır. Hesaplanan deplasman dağılımı arazi gözlemleri ve ölçümleriyle uyumludur (Şekil 5).



Şekil 4. Analiz modeli sınırları ve zemin profili.

Çizelge 1. Zemin katmanları birim hacim ağırlıkları ile mukavemet ve rijitlik parametreleri.

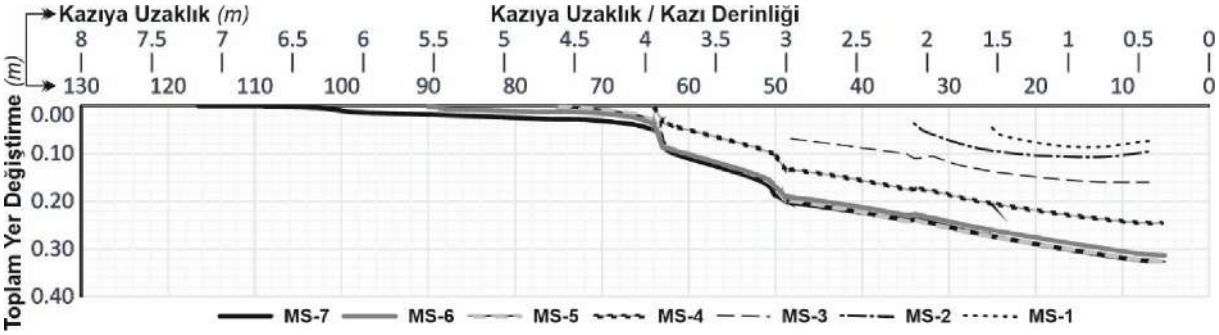
			Yapay Dolgu	**Katı siltli Kil**	**Sert Kil**
Drenaj Tipi			Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız
Yenilme Modeli			Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil
Doğal birim hacim ağırlık	γ_{unsat}	kN/m³	17.50	18.50	19.00
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{sat}	kN/m³	17.50	18.50	19.00
Sekant elastisite modülü	E_{50}^{ref}	kN/m²	5000	15000	35000
Odometrik elastisite modülü	E_{oed}^{ref}	kN/m²	5000	15000	35000
Yeniden yükleme/boşaltma modülü	E_{ur}^{ref}	kN/m²	15000	45000	105000
Kohezyon	c_{ref}	kN/m²	30.00	50.00	60.00
İçsel sürtünme açısı	φ (phi)	°	0.000	0.000	0.000
Kohezyon değişimi	c_{inc}	kN/m²/m	0.000	0.000	5.000
Referans derinlik	y_{ref}	m	0.000	0.000	60.00
Poisson oranı	ν_u		0.4950	0.4950	0.4950



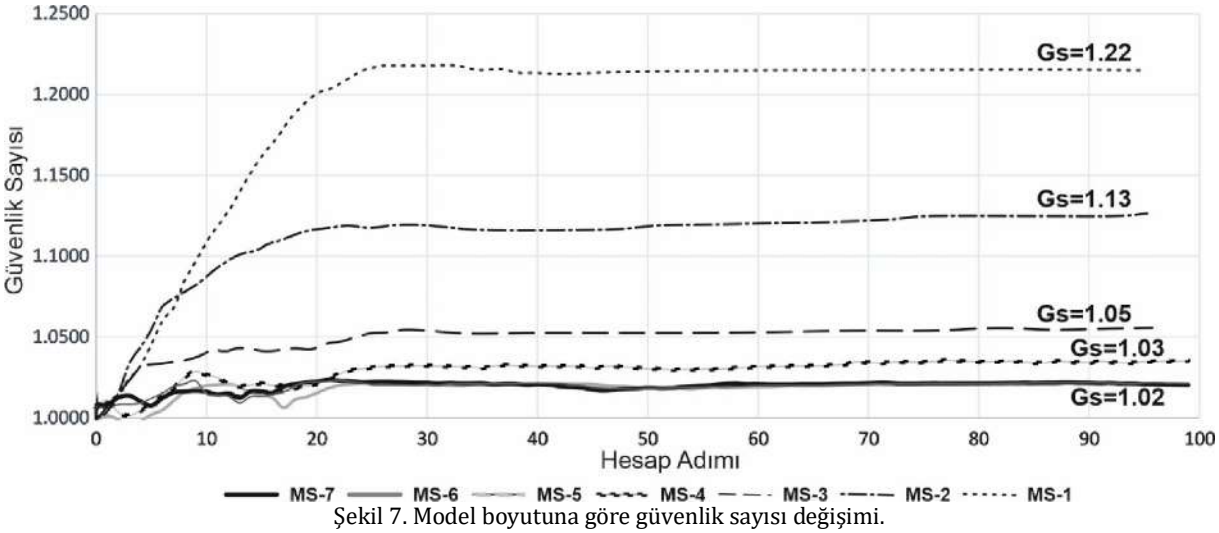
Şekil 5. En büyük analiz modeli ve temel seviyesindeki kazı kotu durumunda toplam deplasman değişimi ile yerinde gözlemler ve ölçümlerle ilişkisi.

Analizi sonuçlarına göre en büyük deplasman MS-7'de iksa sistemine en uzak model sınırı durumunda tespit edilmiştir (Şekil 6). En küçük deplasman ise MS-1'de model sınırının iksa sistemine en yakın olduğu durumda belirlenmiştir (Şekil 6). Model sınırı iksa sisteminden uzaklaştıkça belirlenen en büyük deplasman büyümekte ve 16 m kazı derinliği için, kazıya uzaklık/kazı derinliği oranı 6.5'e ulaştığında kazı etki alanı dışına çıkılmaktadır. Kazıya uzaklık / kazı derinliği oranı 4'ten büyük olduğunda model boyutunun deplasman üzerindeki etkisi azalmaktadır. Model sınırları içerisinde tanımlanan yapı yükleri, yüzey deplasmanlarında ve kazı etki çapında ani değişimlere neden olmaktadır. Mukavemet azaltım yöntemiyle yapılan güvenlik analizlerinde, model sınırı büyüdükçe güvenlik sayısı düşmektedir (Şekil

7). Ancak, kazıya uzaklık / kazı derinliği oranı 3 ve büyük oranda güvenlik sayısı yaklaşık %1 mertebesinde azalmaktadır.



Şekil 6. Model boyutuna, kazıya uzaklığa ve kazıya uzaklık/kazı derinliği oranına göre hesaplanan toplam yer değiştirmeler.



Şekil 7. Model boyutuna göre güvenlik sayısı değişimi.

5. SONUÇLAR

Çalışamaya konu derin kazı örneğinde, 17 m derinliğine varan ve ön germeli ankrajlarla destekli 65 cm çapında fore kazıklardan oluşan iksa sistemi inşa edilmiştir. Ancak, iksa sistemi hesaplarında, zeminin içsel sürtünme açısına bağlı kayma düzlemi ve bu düzlem üzerindeki kütlenin dengesini temel alan ampirik yöntemlerin kullanıldığı belirlenmiştir. İksa sistemi kazı dengesini sağlamakta yetersiz kalmış ve uygulama, 30 adet bina ile imar yollarını etkileyen kitle hareketiyle sonuçlanmıştır. Derin kazı destek sistemlerinde toptan göçmenin kontrolü için, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan deplasman ve güvenlik durumu tahminlerinin, model boyutunun doğru seçilmesi durumunda gerçekleşenlerle uyumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Yapılan tahminlerin model boyunun yanında çevre yapıların yük ve konumlarına duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Yoğun yapılaşmanın bulunduğu alanlarda gerçekleştirilecek derin kazılar için yapılan analizlerde, iksa sistemi arkasındaki model boyutu kazı derinliğinin 5 katından az seçilmemelidir. Analiz sonuçlarında, deplasman gerçekleşen düzeyler, model sınırlarıyla kesişmemiş olmalıdır. Aksi durumda, iksa sistemindeki toptan göçmenin gerektiği şekilde değerlendirilmesi için, analiz modeli büyütülerek analizler yenilenmelidir.

6. KAYNAKLAR

Chen, H., Li, J., Yang, C., Feng, C., 2020. A theoretical study on ground surface settlement induced by a braced deep excavation. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 1–20.

Chen, R., Meng, F., Li, Z., Ye, Y., Ye, J., 2016. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils. Tunnelling and Underground Space Technology. 58, 224–235. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.002

Cheng, K., Riqing, X., Ying, H., Cungang, L., Gan, X., 2020. Simplified method for calculating ground lateral displacement induced by foundation pit excavation. Eng. Comput. 37, 2501–2516.

Cheng, K., Xu, R., Ying, H., Gan, X., Zhang, L., Liu, S., 2021. Observed performance of a 30.2 m deep-large basement excavation in Hangzhou soft clay. Tunnelling and Underground Space Technology. 111, 103872. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103872

Feng, R., Zhang, Q., Liu, S., 2020. Experimental Study of the Effect of Excavation on Existing Loaded Piles. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 146, 04020091.

Franzius, J.N., Potts, D.M., 2005. Influence of Mesh Geometry on Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Tunnel Excavation. Int. J. Geomech. 5, 256–266. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532–3641(2005)5:3(256)

Goh, A.T.C., Zhang, F., Zhang, W., Zhang, Y., Liu, H., 2017. A simple estimation model for 3D braced excavation wall deflection. Comput. Geotech. 83, 106–113. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.022

Guo, P., Gong, X., Wang, Y., 2019. Displacement and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect. Comput. Geotech. 113, 103102.

Harahap, S.E., Ou, C.Y., 2020. Finite element analysis of time-dependent behavior in deep excavations. Comput. Geotech. 119, 103300. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103300

Houhou, M.N., Emeriault, F., Belounar, A., 2019. Three-dimensional numerical back-analysis of a monitored deep excavation retained by strutted diaphragm walls. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 83, 153–164. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.013

Lim, A., Ou, C.-Y., Hsieh, P.-G., 2018. Investigation of the integrated retaining system to limit deformations induced by deep excavation. Acta Geotech. 13, 973–995.

Lu-yao, S., Jian-gu, Q., Rong-ze, Z., 2016. A simplified analytical solution for ground settlement induced by horizontal movement of retailing wall. Rock Soil Mech. 37, 2293–2298.

Miliziano, S., de Lillis, A., 2019. Predicted and observed settlements induced by the mechanized tunnel excavation of metro line C near S. Giovanni station in Rome. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 86, 236–246. https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.022

Ou, C.-Y., Hsieh, P.-G., Chiou, D.-C., 1993. Characteristics of ground surface settlement during excavation. Can. Geotech. J. 30, 758–767. https://doi.org/10.1139/t93–068

Ou, C.-Y., Shiau, B.-Y., Wang, I.-W., 2000. Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history. Can. Geotech. J. 37, 438–448.

Shakeel, M., Ng, C.W.W., 2018. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay. Comput. Geotech. 96, 55–72. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.010

Tan, Y., Lu, Y., 2018. Responses of Shallowly Buried Pipelines to Adjacent Deep Excavations in Shanghai Soft Ground. J. Pipeline Syst. Eng. Pract. 9, 05018002.

Tan, Y., Lu, Y., 2017. Forensic Diagnosis of a Leaking Accident during Excavation. J. Perform. Constr. Facil. 31, 04017061. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001058

Tan, Y., Wei, B., 2012. Observed Behaviors of a Long and Deep Excavation Constructed by Cut-and-Cover Technique in Shanghai Soft Clay. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 138, 69–88.

Xu, C., Chen, Q., Wang, Y., Hu, W., Fang, T., 2016. Dynamic Deformation Control of Retaining Structures of a Deep Excavation. J. Perform. Constr. Facil. 30, 04015071.

Zheng, G., Yang, X., Zhou, H., Du, Y., Sun, J., Yu, X., 2018. A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations. Comput. Geotech. 95, 119–128. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.006

Zhou, H., Zheng, G., He, X., Wang, E., Guo, Z., Nie, D., Ma, S., 2020. Numerical modelling of retaining structure displacements in multi-bench retained excavations. Acta Geotech. 15, 2691–2703.

Ağrı İli, Hudut Duvarı Yol Şevinin Duraylılığında Nötral Nokta Yönteminin Uygulanması

Implementation of Neutral Point to the Road Cut of Boundary Wall, Ağrı

K. Ulamış[1,*], R. Kılıç[2]

[1] *Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gölbaşı, Ankara*
[2] *Ankara Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Cebeci, Ankara*
*(*ulamis@ankara.edu.tr)*

ÖZ: Yamaç ve şevlerde dolgudan gelen ek yükler duraylılığı olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada Küçük Ağrı Dağı'nın güney yamacında Iğdır İli ile İran sınırında Km:7+380 ile Km: 7+680 arasındaki kesimde yolun eğiminin standarda uygun hale getirilmesi amacı ile dolgu yapıldıktan sonraki şevin duraylılığı limit denge ile incelenerek, güvenlik sayısının değişimi nötral nokta yöntemi ile belirlenmiştir. İnceleme alanında toplam 6 adet sondaj yapılmış ve 8 araştırma çukuru açılmıştır. Sondajlarda yeraltı suyuna rastlanmamıştır. Yol dolgusunun yapılacağı yamaçta Miyosen yaşlı marn ile kireçtaşı bulunmaktadır. Bunların üzerinde 2.0 m ile 6.0 m kalınlıkta killi yamaç molozu bulunmaktadır. Kilin doruk ve artık makaslama parametreleri konsolidasyonlu-drenajlı kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir. Duraylılık analizleri sonucuna göre, dolgunun yamaç molozundaki kil üzerinde yapılması halinde güvenli olmadığı belirlenmiştir. Dolgunun, yamaçta 5.0 m yüksekliğinde ve 5.0 m genişliğindeki kademeler halinde marn üzerinde standartlara uygun olarak sıkıştırılması halinde güvenlik katsayısının 1.3 olacağı belirlenmiştir. Ayrıca şev üzerinde ve topukta drenaj önlemlerinin alınması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Şev duraylılığı, limit denge, nötral nokta, psödostatik katsayı, Ağrı

ABSTRACT: *External loads exerted by fill material cause unfavorable effect to slope stability. This study aims to investigate the slope stability of the fill material in order to standardize the road cut located at Mt.Ağrı's southern slope between Iğdır city and Iran boundary by limit equilibrium method, later evaluated by Neutral Point method. A total of 6 boreholes were drilled and 8 trial pits were excavated. There is no groundwater in the construction area. Miocene aged marl and limestone are observed within the slope. Slope debris is comprised of clay and with a thickness between 2.0 to 6.0 m. Peak and residual shear strength parameters of the brown clay were determined by consolidated-drained direct shear tests. Stability of the slopes were investigated by static and pseudostatic limit equilibrium methods. The results imply that, slope is unstable if the fill is constructed on clay. The safety factor is 1.3 in case the fill is constructed with 5.0 m height and 5.0 m bench which is located directly on the marl as compacted by related standards. Slope toe and slope face drainage are also offered.*

Keywords: *Slope stability, limit equilibrium, neutral point, pseudostatic coefficient, Ağrı*

1. GİRİŞ

Yamaç ve şevlerin duraylılığının her türlü kazı, dolgu ve yol projelerinde dikkatle yapılması ve parametrelerin seçilmesi yapıların kısa ve uzun süreli güvenliği için önemlidir. Özellikle yamaç ve şevlerin üzerinde projelendirilen dolgunun ve şevin duraylılık analizlerinin birlikte ele alınması gerekmektedir. Yamaç ve şevlerin duraylılığı ile ilgili yöntemler ilk defa Fellenius (1927) tarafından önerilmiş olup, zaman içinde geliştirilmiştir (Bishop, 1955; Morgenstern and Price, 1965; Spencer, 1967; Janbu, 1968; Sarma, 1973). Yöntemlerin hesaplama detayları ve sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (TRB, 1996). Yamaç üzerindeki yük değişimlerinin stabiliteye etkisinin belirlenebilmesi ve güvenlik sayısının drenajlı/drenajsız koşullardaki değişiminin incelenmesi için nötral nokta yöntemi Hutchinson (1977;1984) tarafından geliştirilmiştir.

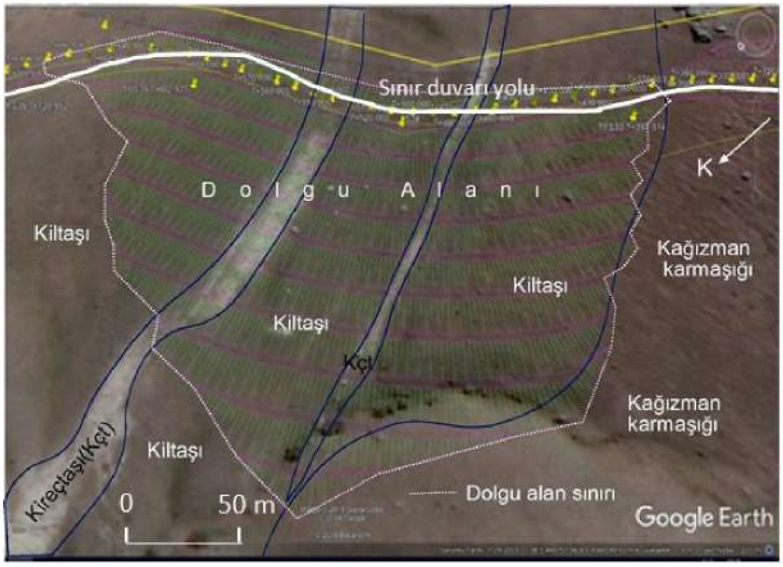
Limit denge ile zemin şevlerinin duraylılığının belirlenmesi ve farklı yöntemler ile karşılaştırılması konusunda farklı araştımalar yapılmıştır (Yun, vd. 1998; Ugai ve Leshchinsky, 1995; Krahn, 2003; Alemdağ, vd. 2015; Kaya, vd. 2017; Cheng, vd. 2017; Yalçın, 2018). Bu çalışmada, yukarıda belirtilen

geleneksel yöntemlerden Bishop (1955) ile şev ve dolgunun güvenlik sayısı belirlenmiş olup, güvenlik sayısının değişimi ise nötral nokta yöntemi ile belirlenmiştir (Hutchinson, 1984). Küçük Ağrı Dağı'nın güney yamacında Iğdır İli ile İran sınırında Km:7+380 ile Km: 7+680 arasındaki kesimde sınır duvarı yolunun eğiminin standarda uygun hale getirilmesi amacı ile yapılacak duvar dolgusunun altındaki zeminin sıyırma kazısı derinliği, taşıma gücü ve öngörülen dolgu yapıldıktan sonraki şevin duraylılığı limit denge ile incelenmiş ve güvenlik katsayısı belirlenmiştir. Bu amaçla, yamaç molozunda açılan araştırma çukurlarından alınan örselenmemiş örneklerin makaslama dayanımı parametreleri direkt kesme kutusu ile konsolidasyonlu drenajlı (CD) şartlarda belirlenmiştir. Ayrıca, nötral nokta ile güvenlik sayısının şev geometrisi boyunca değişimi değerlendirilmiştir. Duraylılık analizleri sonucuna göre, dolgunun kahverengi kilden oluşan yamaç molozu içerisinde yapılması halinde duraysız olacağı ve dolgunun, yamaç üzerinde 5.0 m yüksekliğinde ve 5.0 m genişliğindeki kademeler halinde kazılmış marn ve kireçtaşı üzerinde standartlara uygun olarak sıkıştırılması halinde güvenli olacağı belirlenmiştir. Limit denge analizlerinden statik ve psödostatik şartlarda elde edilen kayma daireleri ve dilimlerdeki gerilme dağılımları dikkate alınarak Nötral nokta ile şev üzerine eklenen dolgudan sonrası denge noktasının konumu belirlenmiş ve güvenlik sayısının drenajlı koşullardaki dağılımı incelenmiştir. Limit denge ile kilin kazılması sonrasında elde edilen güvenlik sayısı projelendirmede esas alınmıştır.

2. İNCELEME ALANININ JEOLOJİSİ

Yol, duvar ve dolgu alanı ve çevresinde (Şekil 1) Üst Kretase - Paleosen yaşlı Kağızman Karmaşığı'na ait metamorfitler ile bunların üzerine uyumsuz olarak gelen Miyosen yaşlı Tuzluca Formasyonu'nun gri, orta-kalın katmanlı kumtaşı içeren çakıltaşı bulunmaktadır. Bunun üstünde aynı formasyona ait kumtaşı, kiltaşı, silttaşı ile üst bölümlerinde kireçtaşı mevcuttur. Kireçtaşı sarımsı gri olup, 5 cm ile 1.0 m arasında tabaka kalınlığa sahiptir. Kireçtaşı üst seviyelerde kahverenkli, çakıllı siltli kil ve yeşilimsi, kırıklı ve parçalı marn ile aratabakalı olup, dolgu alanında yaklaşık K40/80GD yönelimlidir. Yamaç molozu ve alüvyon dolgu sahasında görülen en genç çökeller olup; kum, çakıl ve bloklar ile kilden oluşmaktadır (Şekil 2).

Şekil 1. Türkiye - İran sınır güvenlik duvar güzergahı yer belirleme haritası.



Şekil 2. Yol ve dolgu alanının jeoloji haritası

3. ARAZİ ÇALIŞMALARI

İnceleme alanında yamaç molozu derinliğini, yamaç molozu altındaki zemin türlerini, zeminlerin ayrışma derecesini belirlemek ve toprak zemin ve kayadan örnekler almak amacı ile 6 adet araştırma çukurunda gözlem yapılmış ve 6 adet sondaj yapılmıştır (Şekil 3).

Şekil 3. AÇ1 ve AÇ8 de görülen kahverenkli kil, killi kum ve siltli kum

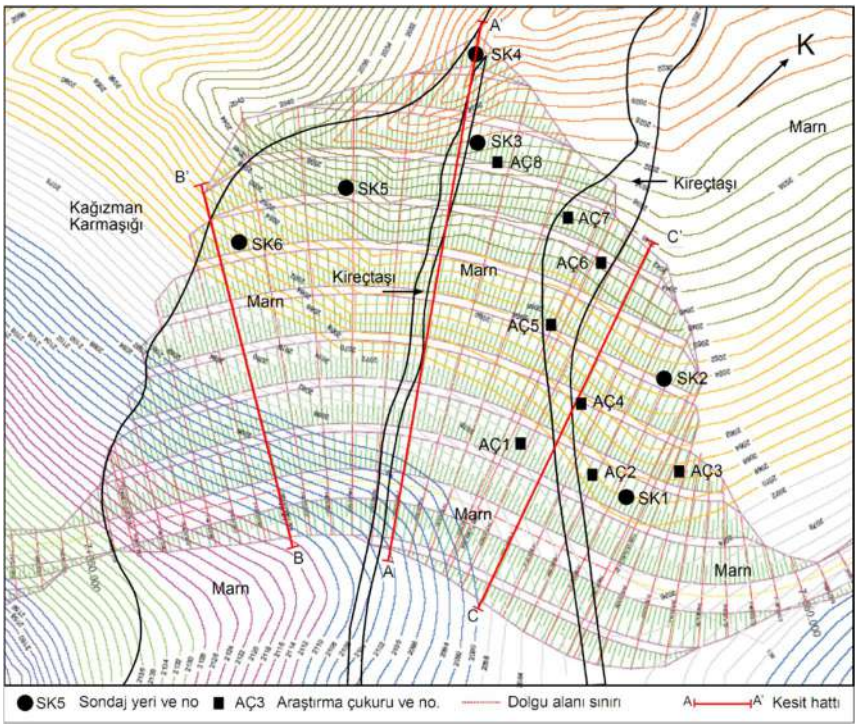
4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Araştırma çukurlarından ve sondajlardan alınan örneklerin sınıflama ve fiziksel özellikleri TS 1900-1 (2006) standardına göre yapılmıştır. Araştırma çukurlarında 0.00 m ile 6.00 m derinlikler arasında bulunan yamaç molozunu oluşturan kahverenkli zemin siltli çakıl (GM), düşük plastisiteli kil (CL) ve killi kum (SC) dur. SK1 de 4.50 m, SK2 de 5.50 m, SK3 de 3.0 m SK4 de 5.0 m, SK5 de 5.50 m ve SK6 da 9.00 m kalınlıkta birleşik zemin sınıflama sistemine göre düşük plastisiteli kil (CL), killi kum

(SC), siltli kum (SM) bulunmaktadır. Araştırma çukurlarından alınan kil, silt ve siltli kum örneklerinde CD koşullarda makaslama kutusu deneyleri yapılmıştır.

5. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

İnceleme alanında yapılan sondajlarda 0.50 m ile 9.00 m arasında kalınlığa sahip kahverenkli kilin SPT N darbe sayısı 6 ile 10 arasında değişmekte olup, "orta katı" kıvamdadır. Kilin altında ise siltli kumdan oluşan yeşilimsi kırıklı ve parçalı marn bulunmaktadır. SK3 de 3.00 m ile 9.00 m arasında gri bej renkli kırıklı ve parçalı yaklaşık K40D/80GD doğrultu ve eğime sahip kireçtaşı bulunmaktadır. Yüzeyde iki hat halinde mostra veren kireçtaşının sınırları Şekil 4' de gösterilmiştir. Yaklaşık K-Gyönünde uzanan ve 5 cm ile 1.0 m arasında tabaka kalınlığa sahip kireçtaşı mostralarının yamaç üzerindeki dolgu şevinin duraylılığının sağlanmasında olumlu yönde katkısı olabileceği düşünülmektedir. Yeraltı suyu gözlenmeyen yeşilimsi kırıklı ve parçalı marnın toplam karot yüzdesi %10 dan düşük ve kaya kalite göstergesi sıfır olup "çok zayıf kaya" grubundadır. Kahverenkli kilin $(SPTN_1)_{60}$ darbe sayısı 10'dan küçük olup, 18 Mart 2018 tarihli Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)'ne göre "Gevşek kum, çakıl veya yumuşak-katı kil tabakaları veya PI>20 ve w>%40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (cu<25 kPa) içeren profiler, ZE" ve marn ve kireçtaşı "Çok sıkı kum, çakıl, ve sert kil tabakaları veya ayrışmış çok çatlaklı zayıf kayalar, ZC" grubundadır. Km: 7+510.000 ekseni boyunca yol dolgusunun kalınlığı en fazla 23.0 m ve şev yönündeki uzunluğu 176.24 m dir. Yol güzergahı ile dolgu alanının mühendislik jeolojisi haritası Şekil 4' de verilmiştir (Kılıç ve Ulamış, 2019).



Şekil 4. Yol güzergahı ile dolgu alanının mühendislik jeolojisi haritası

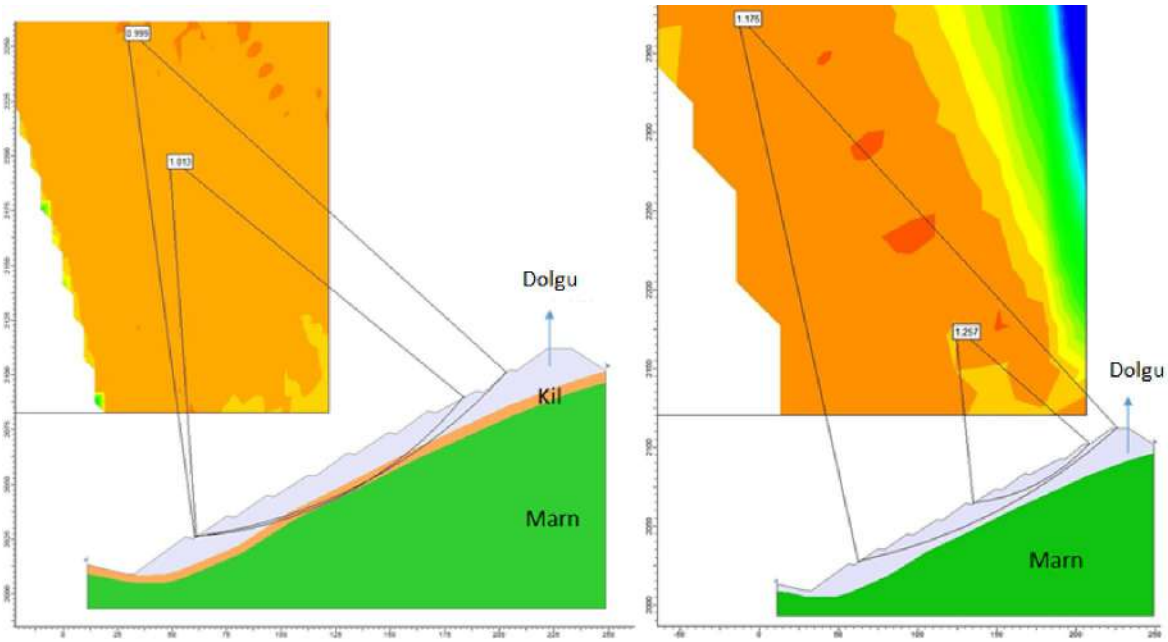
6. ŞEV DURAYLILIĞI

Planlanan kademeli - palyeli yol dolgusunun bulunduğu alanda 0.50 m ile 9.00 m arasında değişen kalınlıkta kahverengi kil ve bunun altında yeşilimsi marn bulunmaktadır. Dolgu alanını temsil ettiği düşünülen Km: 7+510.000 deki A-A', Km: 7+460.000 deki B-B' ve Km: 7+560.000 deki C-C' kesit hattında şev duraylılık analizleri dairesel yenilme düzlemini esas alan Bishop (1955) yöntemine göre yapılmıştır. Analizlerde kesit hatlarını temsil edecek şekilde en altta marn, üstünde kil ve en üstte de kademeli-palyeli şekilde imal edilmesi planlanan (Şekil 5a ve 5b) kontrollü dolgu malzemesinin

jeoteknik parametreleri kullanılmıştır. Kil ve marnda yapılan konsolidasyonlu-drenajlı (CD) makaslama deneylerinden elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açıları ile dolgu malzemesinde limit denge koşulunu sağlayan kohezyon ve içsel sürtünme açıları (Çizelge 1) verilmiştir.

Çizelge 1. Şev duraylılığı analizlerinde kullanılan jeoteknik parametreler

Zemin	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m^3)
Dolgu	1.0	30.0	23.0
Kil	15.5	20.5	20.0
Marn	1.0	32.0	23.5

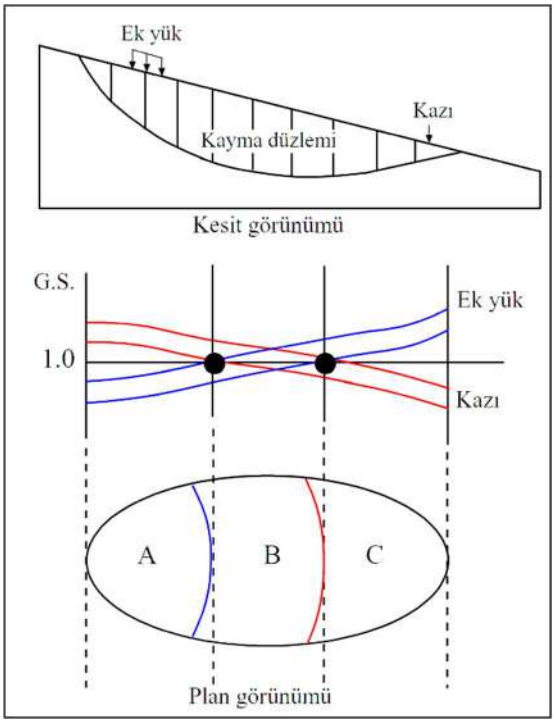


Şekil 5a. A-A' (Km: 7+510.000) statik koşulda duraylılık analizi, 5b. A-A' (Km: 7+510.000) de kil kazısı yapılması halinde statik koşulda duraylılık analizi

Duraylılık analizleri statik ve psödostatik koşulda kil bulunması ve kazılması durumunda yapılmıştır. Psödostatik katsayı Türkiye Sismik Tehlike Haritasında belirtilen en büyük yatay yer ivmesinin (0.113 g) yarısı olarak (Hynes ve Griffin, 1984) hesaba katılmıştır. Dolgu altında kil bulunması halinde güvenlik sayısı statik şartlarda 0.999 ile 1.05 arasında olup, statik koşulda limit dengededir. Deprem durumunda güvenlik sayısı 0.879 ile 0.976 arasındadır. Projede öngörülen dolgu yapılması halinde yenilme kilde oluşacaktır. Kilin SPT N darbe adedi düşük olup, kesit hattında kalınlığı en fazla 3 metredir. Yenilme daireleri kilin içinde ve kil-marn sınırında gelişmektedir. Analizlerde bu nedenle marnın makaslama parametreleri esas alınmıştır. Kilin kaldırılarak dolgunun doğrudan marn üzerine oturması halinde güvenlik sayıları statik şartlarda 1.175 ile 1.267 arasında ve psödostatik şartlarda 1.045 ile 1.131 arasında olup, yenilme halinde kayma daireleri dolgu içerisinden geçmektedir (Şekil 5b). Statik şartlardaki güvenlik sayısının 1.3 ün üzerinde olması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

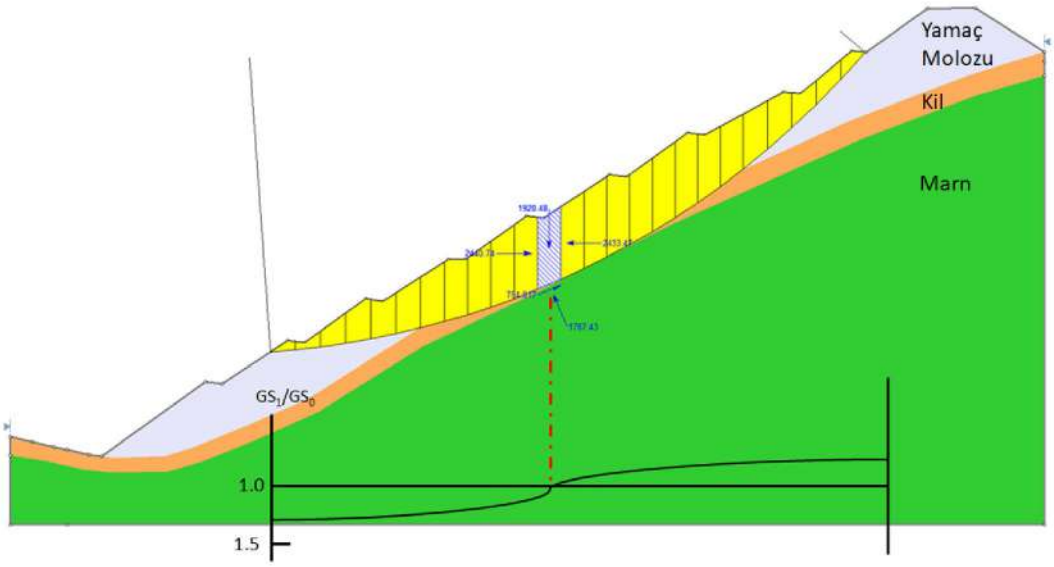
6.1. Nötral Nokta Yöntemi

Yamaç ve şevlerde yükleme ve kazı yapılması duraylılığı olumsuz etkilemektedir. Özellikle şev üzerine dolgu veya yapı gibi ek yük uygulanması durumunda güvenlik sayısının değişimi Hutchhinson (1977) tarafından önerilen nötral nokta yöntemi ile incelenmiştir (Şekil 6). Bu yöntemde, yenilme düzlemi bilinen şevlerde yükleme sonrası güvenlik katsayısının ilk hesaplanan güvenlik katsayısına oranı dikkate alınır (GS_1/GS_0). Uygulanan dolgu yükünün şevde herhangi bir etkisinin olmadığı limit denge noktası ise nötral noktanın konumunu verir (B bölgesi içinde).



Şekil 6. Nötral nokta yöntemi Hutchhinson (1977)

Şev duraylılığında dilimlere eklenecek olan dW yükü güvenlik katsayısını drenajlı ve drenajsız koşullarda değiştirecektir. Drenajlı koşullarda Bishop (1955) ile belirlenen kayma dairesinde dilimlere dolgudan gelecek ek yük uygulanarak drenajlı güvenlik katsayısının değişimi ile şevin limit dengede olduğu durumda (GS_1/GS_0=1.0) nötral noktanın konumu belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. A-A' (Km: 7+510.000) kesitinde kil kazılmadan önce şevdeki nötral noktanın konumu

7. SONUÇLAR

Yol temeli ve dolgusunun yapılacağı yamaçta Miyosen yaşlı yeşilimsi marn ile gri renkli, kireçtaşı bulunmaktadır. Bunların üzerinde 2.0 m ile 6.0 m arasında değişen kalınlıkta kahverenkli çakıllı ve kumlu kilden oluşan yamaç molozu mevcuttur.

Duraylılık analizleri statik ve psödostatik koşulda yapılmıştır. Dolgunun altında kilin bulunması halinde güvenlik katsayısı statik şartlarda 0.999 ile 1.05 arasında ve limit dengededir. Psödostatik koşulda güvenlik katsayısı 0.879 ile 0.976 arasında olup, şev duraysızdır. Yamaç molozu içindeki kil üzerine dolgu yapılması halinde kayma yenilmesi kilde oluşacaktır. Kilin kaldırılarak dolgunun marn üzerine oturması halinde güvenlik katsayıları statik şartlarda 1.175 ile 1.267 arasında ve psödostatik şartlarda 1.045 ile 1.131 arasında elde edilmiştir ve kayma daireleri dolgu içerisinden geçmektedir.

Limit denge analizleri ile güvenlik katsayısı şev için tek olup, nötral nokta ile projelendirilen dolgunun şeve getireceği ek yük ve güvenlik katsayısının değişimi belirlenebilmektedir. Dolgu projelendirilirken nötral noktanın dolgudan gelecek yük sonrasında ulaşılacak güvenlik sayısının halihazırdaki güvenlik sayısına oranı dikkate alınmıştır. Dolgu kalınlığının şev topuğuna yakın yerlerde daha kalın imal edilmesi, tepeye yakın kesimlerde ise daha az olması şevin duraylılığını sağlamıştır.

Dolgunun yamaçta 5 m yüksekliğinde ve 5 m genişliğindeki kademeler halinde kazılmış marn içerisinde standartlara uygun olarak sıkıştırılması halinde güvenlik katsayısı 1.3 elde edilmiştir. Dere tabanına gelen dolgu topuğuna yük konması ve yüzey sularının dolguya olumsuz etkisinin engellenmesi amacı ile şev üzerinde ve topuktaki yükün altında drenaj önlemlerinin alınması statik şartlardaki güvenlik katsayısının 1.3 ün üzerinde kalmasına katkı sağlayacaktır.

8. KATKI BELİRTME

Yazarlar Mila Enerji Anonim Şirketi ile Biroğlu İnşaat Anonim Şirketi Ortaklığı'na ve Koordinatör İbrahim UYSAL'a araştırma sırasında vermiş olduğu destekten dolayı teşekkür ederler.

9. KAYNAKLAR

Alemdag, S, Kaya, A, Karadag, M, Gurocak, Z, Bulut F, 2015. Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: an example of the Kalebasi district (NE Turkey). Journal of African Earth Sciences, 106:134–146.

Bishop, AW, 1955. The use of slip circles in stability analysis of slopes. Geotechnique, 5(1): 7-17.

Cheng, YM, Lansivaara, T, Wei, WB, 2007. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. Computers and Geotechnics, 34(3), 137-150.

Fellenius, W,1927. Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen. Ernst & Sohn, Berlin.

Hutchinson, JN, 1977. Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slope movement. International Association of Engineering Geology, 16, 131-155.

Hutchinson, JN, 1984. An influence line approach to the stabilisation of slopes by cuts and fills. Canadian Geotechnical Journal, 21, 2, 363-370.

Hynes-Griffin, ME, Franklin, AG., 1984. Rationalizing the Seismic Coefficient Method. Paper No. GL-84-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Janbu, N, 1968. Slope stability computations. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Technical University of Norway.

Kaya, A, 2017. Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakkale residential area (Giresun, NE Turkey). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76 875-889.

Kılıç, R., Ulamış K., 2019. Ağrı İli Hudut Hattına 2. Etap Acil Sınır Fiziki Güvenlik Sistemi Yapım İnşaatı İkmal İşi Kapsamında Km: 7+380 İle Km: 7+680 Arasındaki Duvar Dolgusunun Altındaki Zeminin Taşıma Gücünün, Sıyırma Kazısı Derinliğinin ve Dolgudan Sonraki Şev Stabilitesinin Geoteknik Değerlendirmesi. 21 s.

Krahn, J, 2003. The 2001 R.M. Hardy Lecture; the limits of limit equilibrium analysis. Canadian Geotechnical Journal, 40 (3), 643-660.

Morgenstern, NR, Price, VE, 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces.Geotechnique, 15 (1), 77-93.

Sarma, SK 1973. Stability analysis of embankment and slopes. Geotechnique 23(3), 423-433.

Spencer, EA, 1967. Method of analysis of the stability of embankments, assuming parallel interslice forces. Geotechnique, 17, 11-26.

TRB, 1996. Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special

Report. ISSN: 0360-859X: 673 p.
TS1900-1, 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin lâboratuvar deneyleri - Bölüm 1: fiziksel özelliklerin tayini. TSE, Ankara, 99s.
Ugai, K, Leshchinsky, D, 1995. Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis: a comparison of results. Soils and Foundations, 35 (4), 1-7
Yalçın, Y, 2018. Integrated Limit Equilibrium Method for Slope Stability Analysis. MsC Thesis, METU, 162 p.
Yu, H, Salgado, R, Sloan, S, Kim, J, 1998. Limit Analysis versus Limit Equilibrium for Slope Stability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 124 (1), 1090-2024.

Mühendislik Jeolojisi Modelinin Oluşturulması

Engineering Geological Model Building

G. Şans[1,*], E. Bozkurtoğlu[1], R. Eyüboğlu[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, Maslak İstanbul*
*(*sansg@itu.edu.tr)*

ÖZ: 1960'lı yıllardan sonra yapım öncesinde ve sonrasında karşılaşılan doğal ortamların davranışlarının nitelikleri belirlenerek gerekli önlemlerin alınabilmesi için mühendislik uygulamalarında yerbilimsel bakışın kullanılması gerekliliği doğmuştur. Anılan teknik girişimler, yeryüzünün üzerinde, kısmen yeraltında veya tamamen yeraltında gerçekleştirilmektedir. Her üç durumda da sistem büyüklüğü (girişimin yapıldığı ortam) içinde teknik girişimlerle temel ortamı (zemin ve kaya) bir etkileşim halindedir. Her türlü teknik girişimin gerçekleştirildiği ortamın, projelendirmeden yapım öncesi, sırası ve sonrası aşamalarına kadar olan yeterli ve doğru çalışmalarla tanımlanmış litolojik ve yapısal özelliklerinden hareketle jeolojik modeli oluşturulmalıdır. Jeolojik modelden hareketle üretilen ve her teknik girişimin; tasarım, projelendirme ve yapım aşamalarında titiz, ayrıntılı ve doğru bir çalışmayla tanımlanan Mühendislik Jeolojisi verileri, önemli veri grubunu oluşturur. Buradan, mühendislik jeolojisi veri tabanının ayrıntılı ve doğru bir şekilde oluşturulması çok önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Mühendislik Jeolojisi, veritabanı analizleri, veri katmanı sistemleri, jeoteknik, Yer-mekansal değerlendirme.

ABSTRACT: *After 1960s, the characteristics of the behaviors of natural environments encountered before and after construction and the necessity of using a geoscientific view in engineering applications were required in order to determine and take the necessary measures. These technical operations are carried out above the ground, partially underground or completely underground. In all three cases, the basic environment (soil and rock) interacts with technical operations within the system size (the geomechanical environment in which the technical operation is made). Geological model should be established based on the lithological and structural characteristics defined by adequate and accurate studies from projecting to pre-construction, during and post-construction stages of the environment where all kinds of technical operations are carried out. Each technical operation produced based on the geological model; Engineering Geology data, defined by meticulous, detailed and accurate work in the design, projecting and construction stages, constitutes an important data group. Hence, it is very important to create the engineering geological database in detail and accurately.*

Keywords: *Engineering Geology, database analyses, data layer systems, geotechnics, Geo-spatial evaluation.*

1. GİRİŞ

İkinci dünya savaşından sonraki gelişmeler, büyük boyutlu barajların, hidroelektrik santrallerin, tünellerin, otoyolların, havalimanlarının, raylı sistemlerin, deniz yapılarının, rafinerilerin, katı atık depolama tesislerinin yapılmasını, içme, sulama, endüstri suyu, çeşitli enerji kaynakları ile doğal yapı malzemesi olanaklarının araştırılıp bulunmasını zorunlu hale getirmiştir. 1960'lı yıllardan sonra yapım öncesinde ve sonrasında karşılaşılan doğal ortamların davranışlarının nitelikleri ve belirlenerek gerekli önlemlerin alınabilmesi için mühendislik uygulamalarında yerbilimsel bakışın kullanılması gerekliliği doğmuştur.

Anılan teknik girişimler, yeryüzünün üzerinde, kısmen yeraltında veya tamamen yeraltında gerçekleştirilmektedir. Her üç durumda da sistem büyüklüğü (girişimin yapıldığı ortam) içinde teknik

girişimlerle temel ortamı (zemin ve kaya) bir etkileşim halindedir. Teknik girişimin sorunsuz ve ekonomik olması için bu etkileşim, fiziki ve mekanik anlamda modellenmelidir (Durgunoğlu, 2011). Bunun için teknik girişimin üzerinde veya içinde yapıldığı ortamın (zemin-kaya) fiziki ve mekanik özellikleri doğru olarak tanımlanmalıdır. Zemin ve kaya, kaya-toprak dolgu baraj vb. teknik girişimlerde malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu durumda, yapının tasarlanabilmesi ve projelendirilmesi için zemin ve kayaların fiziki ve mekanik özelliklerin belirlenerek modellenmeleri gerekir.

Her türlü teknik girişimin gerçekleştirildiği ortamın, projelendirmeden yapım öncesi, sırası ve sonrası aşamalarına kadar olan yeterli ve doğru çalışmalarla tanımlanmış litolojik ve yapısal özelliklerinden hareketle jeolojik modeli oluşturulmalıdır. Jeolojik model baz alınarak proje özelliklerinden hareketle teknik girişimin projelendirme ve uygulama aşamalarında yararlanılacak Mühendislik Jeolojisi modeli tanımlanmalıdır. Mühendislik jeolojisi, doğal ortamı yapay hedeflere başka bir ifadeyle teknik hizmetlere hazırlayan uygulamalı bilim dalıdır.

2. JEOLOJİ VE MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ' NİN TANIMI

Jeoloji, yer kabuğunun oluşumunu ve evrimini açıklamaya yönelik bilimsel yaklaşımları kullanırken kırıklanma, kıvrımlanma, faylanma ve bunlara bağlı yapılanma biçimini, temel mekaniği esasları çerçevesinde değerlendirerek bölge tektoniğini açıklamayı hedefler. Buradan hareketle jeoloji, yer kabuğunun oluşumunu, evrimini ve yerin bu kesimine ait kayaçların yayılımını inceleyen bilim dalıdır. Jeoloji biliminin üç ana ilkesi ''bulunuş (yayılım)'', ''oluşum'' ve ''evrim'' dir.

Mühendislik Jeolojisi, mühendis ve jeoloji kelimelerinin birleştirilmesi ile bu dalın ilgi alanını belirtmek üzere oluşturulmuş yeni bir kavramdır. Mühendislik Jeolojisi'nin uğraşı alanı; yerkabuğunun türünün, özelliklerinin, niteliklerinin, nicelik ve koşullarının her farklı noktada koordinat bağımlı (Pi (xi, yi,zi)) jeolojik veri tabanının sistem büyüklüğü içinde birebir ve tekil olarak tanımlanmasıdır (Vardar, 2007). "Mühendislik Jeolojisi'' yer kabuğunun insan kullanımına açık olan kesiminin mühendislik uygulamaları bakımından durumunu ve mühendislik özelliklerini sayısal ve/veya sözel olarak ortaya koymayı amaç edinmiş uygulamalı bir bilim dalıdır (Erguvanlı, 1982).

Jeolojik modeli baz alan bu tanım, ortamın nitelik ve niceliklerini proje karakteristikleri (boyut ve konum) çerçevesinde belirlemeye ve değerlendirmeye yönelik ilke, yöntem ve yaklaşımları kapsar. Bu yönü ile Mühendislik Jeolojisi; yerbilimi kökenli veri tabanı oluşturarak, uygulamaların değişik süreçlerinde doğru ve/veya makul çözüme ulaşılmasında önemli katkı sağlar.

Mühendislik Jeolojisi; üç boyutlu verilerle ortamı, amaca yönelik davranış benzerliği gösteren hatlara ayırmayı, değişkenler arasındaki ikili ve/veya çoklu etkileşimleri tanımlar, gerekli olan jeolojik bilgileri sayısal olarak verir. Mühendislik jeolojisi sistem büyüklüğü içindeki ortam ve koşulların koordinatlara bağlanarak somutlaştırma işidir.

Mühendislik Jeolojisi çalışmalarının, kaya ve zemin mekaniğinin ortam ile ilgili temel verilerinin elde edilmesi bakımından uygulamalarda ayrı bir önemi vardır. Projelendirmeden yapım öncesi, sırası ve sonrası aşamalarda kullanılan Mühendislik Jeolojisi modelinin tanımlanması için kümelerden oluşan çok ve çeşitli tür ve nitelikte jeoloji kökenli veri kullanılmaktadır. Mühendislik jeolojisi, teknik girişile zemin veya kaya olan temel ortamı arasındaki etkileşimi mühendisin yorumuna sunar (Yüzer, 2007). Teknik girişimin ve temel ortamn davranışının ne olacağını ve ne olması gerektiğini açıklar. Davranışlarının yorumlanması için koordinata bağlı veri tabanının titiz, dikkatli ve ayrıntılı bir çalışmayla oluşturulması gereklidir.

Sonuç olarak Mühendislik jeolojisi, sistem büyüklüğü içinde teknik girişimle temel ortamı arasındaki etkileşimi ve bu etkileşim sonucunda teknik girişimle temel ortamın davranışlarını yorumlayan, açıklayan ve tasavvur edilmesini sağlayan uygulamalı bilim dalıdır.

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ MODELİNİN KURGULANMASI

Jeoloji, yer kabuğunun oluşumunu, evrimini ve yerin bu kesimine ait kayaçların yayılımını inceleyen bilim dalıdır. Mühendislik Jeolojisi, yer kabuğunun insan kullanımına açık kesiminin teknik girişimler bakımından durumunu, sayısal ve/veya sözel olarak ifade eder. Jeolojik modeli temel kabul eden bu yaklaşım, ortamın nitelik ve niceliklerini proje özellikleri çerçevesinde tanımlamaya ve değerlendirmeye yönelik ilke, yöntem ve yaklaşımları içerir. Mühendislik Jeolojisi, yerbilimi kökenli veri tabanı oluşturarak uygulamaların değişik süreçlerinde doğru ve/veya makul çözüme ulaşılmasını sağlar.

Yerbilimleri ile ilgili değişkenler, kelimelerden, grafiklerden ya da sayılardan meydana gelen kümeleri oluşturur. Çok ve çeşitli olan bu veriler, kağıt üzerinde yazılı olabileceği gibi kişilerin belleğinde de saklanabilir. Mühendislik Jeolojisi verilerinin amaç tanımlanmaksızın oluşturulması, çoğu kez gereksiz bazı verilerin ölçülmesine dolaysıyla gereğinden fazla zaman kaybına neden olmaktadır. Buradaki amaç, problemi belirlemek için aranan yol ya da eylemler dizisinin bir çeşit tanımını elde etmek ise problemin çözümü, öncelikle örneğin mermer üretiminde plaka üretimine elverişli blok alınabilecek yerlerin belirlenmesi, ardından da tanımı yapılan tercihin amaca uygunluğunun kanıtlanması işlemlerini içerir.

Eğer amaç yol veya baraj yeri ya da eksen seçenekleri ise bu durumda ele alınacak olası çözümlerin hangi ölçütler esas alınarak çözüleceği sorusu ortaya çıkar. Bu soru, mühendislik tasarımlarında iki önemli sorunu ortaya koymaktadır. Birincisi problemin çözümü için seçeneklerin nasıl elde edileceği, ikincisi ise üretilen çözümler arasından amaca uygun çözüm setinin nasıl ayırt edileceğidir. Kuşkusuz bu tür sorular, yeterli miktar, tür ve nitelikteki verilerle giderilebilir ve/veya azaltılabilir. Mühendislik Jeolojisi yaklaşımları bakımından sağlıklı ve doğru değerlendirmelerin yapılabilmesi, verilerin doğruluğuna ve yoğunluğuna bağlıdır. Mühendislik jeolojisi verilerinin elde edilmesinde proje çalışmalarının önemi çok fazladır. Bu yönü ile mühendislik jeolojisi çalışmalarının proje uygulamaları ile iç içe olması gerekmektedir (Durgunoğlu, 2011).

Mühendislik Jeolojisi yaklaşımlarında hedeflenen husus, jeolojik verilerden üretilen jeolojik modelden hareketle ortamın, proje amacına uygun kabul edilebilir mühendislik jeolojisi modelini üretmektir. Yetersiz verilerle oluşturulan modelin tekil bir çözümü dikte etmediği gerçeği uygulamalarda ortaya çıkmaktadır. Bu durum, doğal olarak optimizasyon algoritmalarının bulunmadığı yerbilimleri ile ilgili mühendislik alanlarında ya da ortaya konan problemin boyutları nedeniyle gerçekleşmektedir.

İkinci bir önemli neden, araştırma sonucu elde edilen verilerin ortamın doğası gereği sadece ölçüm yerine ait olmasından kaynaklanmaktadır. Gerek laboratuvar koşullarında gerekse arazide yapılan deneylerden elde edilen sonuçların kaya ortamını ne derece temsil ettiği ile ilgili tereddütler, kaya ortamın jeolojik yapı modeline, teknik girişimin boyutlarına ve çevre etmenlerine bağlı davranış belirsizlikleri, araştırmacıları çoğu kez makul çözümlerle yetinmeye optimal çözüme ulaşmak için ek araştırmaları yapmaya zorlamaktadır.

Heterojen, anizotrop ve süreksiz olan kaya ortamın analitik modellemesinde çevre bileşenlerinin, kayanın her noktasında farklı şiddette etki etmesi nedeniyle ortaya çıkan belirsizlikler, analizlerde sürekli, homojen, izotrop, lineer, elastik kabullerin yapılmasını zorunlu kılmaktadır (Hudson, 1992). Bu nedenle Mühendislik Jeolojisi modelleri, mimari tasarım modellerinde olduğu gibi çok ve çeşitli veri türleri kullanılarak üretilmektedir. Bu veriler, kelimelerden, sayılardan ya da grafiklerden oluşmaktadır. Mühendislik Jeolojisi'nde veriler, arazi ve laboratuvar ortamında elde edilirken mimari veriler başkaları tarafından tasarımcıya istekler ve beklentiler şeklinde aktarılmakta, bu veriler mimarın dünya görüşü ile birleşerek belleğinde şekillenmektedir. Mühendislik Jeolojisi çalışmalarında üç temel ilke, problemin tanımlanması, çözüm seçeneklerinin üretilmesi ve çözüm setinin belirlenmesidir.

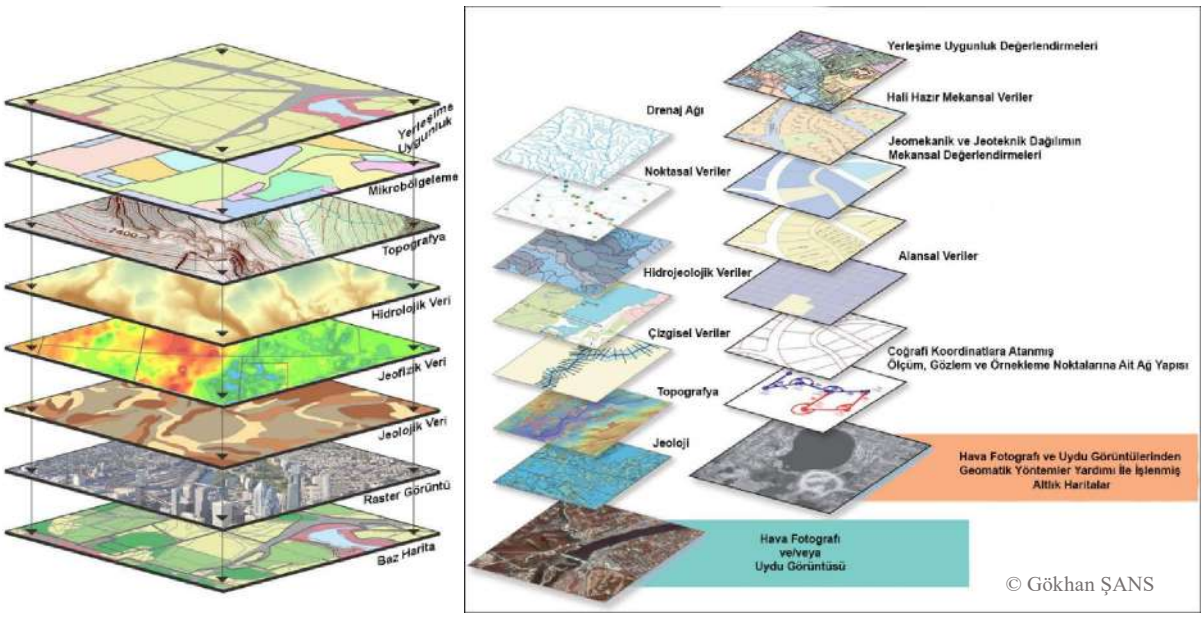
İyi tanımlanmayan problemlerin kesin bir formülasyonu yoktur. Formülasyonun üretilmesi sırasında yeni soruların cevaplandırılması gerekebilir, daha fazla bilgi istenebilir. Formülasyon, modelleme boyunca sabit kalmaz. Süreç ve aşama boyunca edinilen bilgi ve görüşlerin sonucu olarak sınır koşulları ve ölçütler sürekli değişebilir. Problemin çözüm sürecinin durmasını sağlayacak kural

yoktur. Herhangi bir zamanda formüle edilen ve önerilen model yeniden incelenip düzeltilebilir. Durmanın sebebi en iyi çözümün elde edilmiş olması değil araştırma kaynaklarının ve sabrın tükenmesidir.

İyi tanımlanmış problemlerin çözümleri doğru veya yanlış olamaz. Yanlış ya da doğru Mühendislik Jeolojisi modeli yoktur. İyi ya da kötü Mühendislik Jeolojisi modeli vardır. Her iyi tanımlanmış problem için her zaman birden fazla yorum yapılır. Seçilen modelin biçimi bunu oluşturan kişinin görüşüne, deneyim ve bilgi birikimine bağlıdır. Mühendislik Jeolojisi modelleri bu açıdan ele alındığında veri kontrollü deneyim-birikim modelleri olarak değerlendirilebilir.

İyi tanımlanmamış bir problem bir defalık bir operasyondur. Deneme ve yanılmaya yer yoktur. Örneğin bir baraj tasarlanır ve inşa edilir. Buradan geriye dönüp yeniden tasarım ve yapım söz konusu değildir. Bu tür problemlerin tanımlanan amaç için ortaya konan tüm öğeleri sağlaması beklenemez. Örneğin bir tünelde yüksek dirençli kayaların bulunması, tünelin duraylığı açısından olumlu iken kazılabilme açısından olumsuzdur.

Her iyi tanımlanmış problem kendine özgüdür. Hiçbir problem bir diğeri ile tam olarak benzer değildir. Çözümler ve çözümlere ulaşmayı sağlayan stratejiler başka problemler için aynen taklit edilemez. Örneğin bir mermer ocağı için önerilen işletme modeline bağlı oluşan geometrik yapılanma biçimi aynı bölgedeki bir başka ocak için geçerli olmayacaktır.



Şekil 1. Katman mantığı ile hazırlanan veritabanı analizi ile farklı istatistik ve olasılık hesaplamaları kullanarak bilgi pafta ve modellerinin oluşturulması (Bozkurtoğlu, vd., 2017).

Belirlenmiş olan her bir özelliğe ait haritalar oluşturulup bu haritaların üst üste çakıştırılması (Şekil 1) ile tüm özellikler açısından en uygun davranış sergileyecek alanlardan istenmeyen davranış sergileyecek alanlara doğru mühendislik amaçlı zonlamalar yapılabilecek, çalışma alanı kontinuum, kuazikontinuum, diskontinuum mekaniği açısından modellenebilecek ve yerleşime uygunluk değerlendirmesi güvenilir şekilde sonuçlanacaktır.

4. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ VERİLERİNİN SAĞLANDIĞI ORTAMLAR

Veri, bir iletişim ve/veya haberleşme sistemi içindeki bilginin temsil biçimidir. Tartışmasız kabul edilen bir akıl yürütme eyleminin temeli, bir araştırmanın hareket noktası olan değerler ya da ölçütler kümesi olarak tanımlanabilir. Veri türleri, sözel ve sayısal olmak üzere iki grupta toplanabilir. Sözel veriler, kelimelerden, tanımlardan ve terimsel kavramlardan oluşur. Sayısal veriler nesnelerin

özelliklerini rakamsal olarak ifade eden ve genelde matematiksel fonksiyonlarla tanımlanabilen veri türlerini oluşturur.

Mühendislik Jeolojisi çalışmaları 1) Ön veya İlk Çalışmalar 2) Ayrıntılı Arazi Çalışmaları a) Yüzey çalışmaları, b) Yeraltı çalışmaları c) Laboratuvar çalışmaları (Fiziksel Özellikler, Mekanik Özellikler, Elastik Özellikler, Teknolojik Özellikler) 3) Teknik Girişim Sırasında Yapılan Çalışmalar, 4) Teknik Girişim Sonrası Yapılan Çalışmalar olarak 4 ana gruba ayrılır. Anılan çalışmalardan elde edilen ve Mühendislik Jeolojisi modelinin oluşturulmasında kullanılan verilerin sağlandıkları ortamlar Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1. Mühendislik Jeolojisi verilerinin sağlandığı ortamlar.

Doğal ve yapay ortamlar Doğal ve yapay ortamlarda alt sınıfların (Kaya, geçiş kayacı, zemin, kontrollü ve kontrolsüz dolgular)	**Topoğrafik Özellikler** Yerşekillerinin tanımlanması, yamaç ve şevlerin eğimlerinin belirlenmesi, drenaj sistemleri, morfolojik anomaliler, erozyon ve taşkın alanları, hidrolojik ve klimatik veriler, kütle hareketleri ve etkileme alanları.	**Depremsellik ve sıvılaşma** Aktif faylara uzaklık, kaya ve zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi, sıvılaşmaya yatkın zeminlere ait özelliklerin belirlenmesi. **Zemin Hakim Periyodu ve Zemin Büyütmesi** Üst yapı projelerinde kullanılacak sayısal verilerin elde edilmesi için mikrotromör ölçümlerinin yapılması.
	Jeolojik-Jeoteknik-Hidrojeolojik veriler Yüzleklerde yapılan ölçüm ve gözlemler, litolojik tanımlama, amaca uygun jeolojik haritanın yapılması, sedimantolojik özellikler, yapısal unsurlar, jeolojik evrim, kaya kalitesi, kütle hareketlerinin türleri ve etkileme alanları, su noktaları, kaynaklar, debileri, su kalitesi, sıcaklık ve EC değerleri, pusula, Schmidt çekici, çakı, lup, asit, penetrometre, el burguları, örnekleme.	
	Sualtı Araştırmaları Sondajlar, denizaltı jeolojisi, batimetri, sediment kalınlığı ve karakteristikleri, temel kaya derinlikleri, dip topoğrafyası anomalileri, akıntı hız ölçümleri, sualtı heyelanları, kirlilik, örnekleme.	
	Laboratuvar verileri Petrografik, mineralojik ve kimyasal analizler, kaya ve zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, erime, kabarma, şişme ve ayrışma gibi fiziksel/kimyasal özelliklerin tanımlanması.	
	Teknik Girişimler **Tüneller, Şaftlar, Açık ve Derin Kazılar, Yol Şevleri, Ocak ve Maden İşletmeleri** Deformasyonlar, ötelenmeler-oturmalar, sekonder gerilme büyüklükleri, kazı ve destekleme türü, jeoteknik amaçlı ölçüm ve gözlemler, iyileştirme-sağlamlaştırma yöntemleri, temel-ortam etkileşimleri, su problemleri, su kimyası, korozyon, kazıların çevreye etkisi, pusula, Schmidt çekici, çakı, lup, asit, penetrometre, el burguları, örnekleme.	**Sığ Derinlik Verileri** **Temel Kazıları** Litolojik tanımlama, dolgu kalınlıkları, ayrışma durumu, süreksizlik özellikleri, YSD, kazılabilirlik, duraylık, örnekleme. **Araştırma Çukurları** Dolgu, ana kaya dokanakları, ana kaya ayrışma durumu, süreksizlik özellikleri, yerinde deneyler, YSD, örnekleme.

Mühendislik Jeolojisi verilerinin elde edilmesi çalışmaları, veri toplama, gruplama ve bilgisayar ortamına aktarma olarak üç ayrı aşamada gerçekleştirilir. Mühendislik Jeolojisi verileri, gözleme, deneye, jeoteknik amaçlı ölçüme dayalı veriler olmak üzere üç ana grup altında irdelenmiş ve IAGE (International Association Enginnering Geology, 1979) komisyonunun önerdiği standart tanımlamalar kullanılarak veri grupları elde edilmiştir.

Jeolojik birimlerin, Mühendislik Jeolojisi modeli oluşturulmasına yönelik tanımında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, yüksek derecede fiziksel homojenliğe ve üniform litolojik karaktere sahip zonların elde edilmesine yönelik kodlama sisteminin oluşturulmasıdır. Bu amaçla ölçülen her türlü

sayısal veri kümesinin ortalaması, standart sapması, değişme indisi, en büyük ve en küçük değerleri belirlenmiş ranklar istatistiği uygulanarak değişken kümelerinin IAEG komisyonunun esas aldığı sınır değerleri kullanılarak homojenlik grupları elde edilir. Böylece davranış açısından aynı ve/veya benzer özelliklere sahip litoloji grupları tanımlanr.

İnceleme alanındaki sondajlardan, yeraltı kazılarından ve temel çukurlarından elde edilen mühendislik jeolojisi verileri, derinlik ile ilişkilendirilerek ortamın üçüncü boyutta araştırılmasına yönelik veri kümeleri oluşturulur. Bu veriler, katman oluşturacak şekilde ayrı ayrı gruplandırılarak oluşturulan alt veri dosyaları ile sisteme kolay ulaşma ve esnek kullanım olanağı kazandırılır.

Bu işlemler, bir işletim sistemi içerisindeki grafik ve sayısal analiz modelleri kullanılarak yapılır. Veri tabanında amaca yönelik olarak oluşturulan ve algoritma kurgulu yazılımlar yardımıyla elde edilen bilgiler, derinlik bağımlı koordinat çiftleri ile ilişkilendirilir. Bu bilgilerden üretilen harita, şekil ve diyagramlar verilerle doğrudan bağımlı hale getirildiğinden veri dosyalarında yapılan bir değişiklik, üretilmiş şekillere otomatik olarak yansımaktadır.

5. VERİLERİN BİLGİSAYAR ORTAMINA AKTARILMASI

Yüzey verileri ve coğrafik bilgilerin sayısallaştırılmasında, inceleme alanının yer aldığı 1/2000, 1/5000, 1/10000 ve 1/25000 ölçekli topoğrafik haritalar kullanılır. Sayısallaştırma işlemleri, otomatik sayısallaştırıcı ile gerçekleştirilir. İncelenen yüzlek, temel, kazı yerleri vb. yüzey jeolojisi çalışmalarında ölçüm-gözlem yeri koordinatları (+15 m- -15 m) hassasiyet derecesine sahip GPS ile ölçülür. Bu koordinatlar, yerleşim alanı içinde kalan bölgelerde yapılaşma durumunu gösteren 1/2000 ölçekli haritalarla karşılaştırılarak denetlenir ve bilgisayara aktarılır. Anılan haritalar kullanılarak, ana yollar, önemli binalar ve topoğrafik yükseltiler sayısallaştırıcı ile bilgisayar ortamına aktarılır. Elde edilen veri dosyaları, koordinat dönüşümleri yapıldıktan sonra vektör veri yapısı formatında depolanır. Böylece yol, bina ve topoğrafik yükseltileri içeren temel harita üretilir. Bu haritanın üretilmesinden sonra incelenen alandaki yüzey şekilleri, drenaj sistemleri, erozyon ve taşkın alanları arazi modelleme yazılımlarının yüzey değerlendirme modülünün ''digit'' komutu ile ayrı ayrı sayısallaştırılır ve her temaya ait katmanlar oluşturulur. İnceleme alanındaki topoğrafyanın yayılım alanı ve yamaç eğimlerinin bilgisayarda otomatik olarak hesaplanması yükseklik, eğim, jeolojik yapı (fay ve zayıflık zonları, kıvrımlanma ve kırıklanma dereceleri), litoloji, kayaçların ayrışma durumu ve permeabilite ölçümleri dikkate alınarak yapılır. Veri dosyaları, elektronik hesap tablosu yazılımı olan veri tabanı güdümlü, grafik olanaklara ve gelişmiş makrolara sahip programlarda oluşturulur. Tüm değerlendirmeler, grafik ve harita çizimleri ara yüzü geliştirilmiş grafik ortamda gerçekleştirilir.

6. SONUÇ

Jeolojik modelden hareketle üretilen ve her teknik girişimin; tasarım, projelendirme ve yapım aşamalarında titiz, ayrıntılı ve doğru bir çalışmayla tanımlanan Mühendislik Jeolojisi verileri, önemli veri grubunu oluşturur. Buradan, jeolojk veri tabanının ayrıntılı ve doğru bir şekilde oluşturulması çok önemlidir. Jeolojik modeli altlık olarak kullanacak ve doğru oluşturulmuş Mühendislik Jeolojisi modeli her teknik girişimin proje çalışmaları için çok önemlidir. Bu nedenle Mühendislik Jeolojisi çalışmaları proje uygulamaları ile iç içe olmalıdır. ''Mühendislik Jeolojisi, henüz inşa edilmemiş ve kağıt üzerinde proje olarak duran bir yapının inşaatı sırasında ve tüm servis hayatı süresince, etrafındaki zeminlerle ve özellikle oturduğu temel zemin ile kuracağı etkileşimi mühendise anlatan, tasavvur ettiren ve hesaplattıran bir bilim dalıdır" (Arıoğlu, E., 2007).

Sonuç olarak, temel ortamın jeolojik nitelik ve nicelikleri proje özellikleri çerçevesinde değerlendirilmeli, titiz ve ayrıntılı bir çalışmayla oluşturulan jeolojik model baz alınarak planlamaya, projelendirmeye ve uygulamaya altlık oluşturacak Mühendislik Jeolojisi modeli doğru ve uygulanabilir olarak tanımlanmalıdır.

7. KAYNAKLAR

Arıoğlu, E., 2007. Erdoğan Yüzer Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, İstanbul.

Bozkurtoğlu, E., Okay, N., Eyüboğlu, R., Şans, G. 2017. Yerleşime uygunluk çalışmalarında jeomekanik davranış modellerinin önemi. 70. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, Ankara, 822-823.

Durgunoğlu, T., 2011. Temel tasarımında zemin etüd kapsam ve kalitesinin önemi. Attila Yalçın Sondaj Çalıştayı Anılar/Bildiriler Kitabı, İstanbul, 33-46.

Erguvanlı, K., 1982. Mühendislik Jeolojisi, İTÜ Yayını, İstanbul.

Hudson, B.D. 1992. The soil survey as paradigm-based science. Soil Science Society of American Journal. v. 56/3. 836-841. U.S.

IAEG. 1979. Reports by Members of the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. No: 19. 346-348. Krefeld, Germany.

Vardar M., 2007. 'Yerbilimlerinden jeotekniğe giden yolda mühendislik jeolojisinin yeri ve işlevleri. Erdoğan Yüzer Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, İstanbul.

Yüzer, E., 2007. Mühendislik jeolojisi deyince. Erdoğan Yüzer Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, İstanbul.

Yüzey ve Yeraltısuları / Hydrology and Hydrogeology

Yeraltısuyu Sondaj Coğrafi Bilgi Sistemi Geliştirilmesi - Acıpayam Ovası (Denizli) Uygulaması

Application of Geographic Information System for Groundwater Wells- Acıpayam Plain (Denizli)

H. Kumsar[1,*], T. Sarayköylü[2]

[1]Pamukkale Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Denizli
[2]DSİ XXI. Bölge Müdürlüğü, YAS ve JTH Şubesi, Aydın
([*]kumsarh@gmail.com)

ÖZ: Bu çalışma kapsamında, kamu kurumları, özel kuruluşlar ve şahıslar tarafından bir ova içerisinde açtırılmış yeraltısuyu sondaj çalışmalarından elde edilen verilerin sayısal ortamda değerlendirilmesi amacıyla C++ programlama dilinde yeni bir yeraltısuyu bilgi sistemi (YAS-CBS) yazılımı geliştirilmiştir. YAS-CBS yazılımında çalışma alanının topoğrafik, jeolojik ve imar haritaları, yeraltısuyu sondaj noktaları aynı koordinat sisteminde farklı altlık haritalar olarak kullanılabilmektedir. Harita görüntüsü üzerindeki sondaj noktası koordinatına tıklayarak yeraltısuyu sondaj logunun detayları veri tabanından alınarak görüntülenebilmektedir. Yeraltısuyu sondajları arasındaki jeolojik ve hidrojeolojik değerlendirmeler, iki nokta arasında alınan topoğrafik kesitler üzerinde yeraltısuyu sondaj logları çizdirilerek yapılabilmektedir. Acıpayam Ovası (Denizli) içinde DSİ tarafından açılmış yeraltısuyu sondajları, imar, topoğrafya ve jeoloji haritalarını içeren sayısal bir veri tabanı YAS-CBS sisteminde oluşturulmuş ve bir uygulama çalışması yürütülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yeraltısuyu Sondajı, Coğrafi Bilgi Sistemi, Acıpayam Ovası

ABSTRACT: *In this study, a new groundwater information system (YAS-GIS) software was developed in the C++ programming language in order to evaluate the digital data obtained from groundwater boreholes drilled in a plain by public institutions, private organization. In YAS-GIS software, topographic, geological and urban planning maps of the working area, groundwater borehole locations can be used as different base maps in the same coordinate system. By clicking on the borehole point coordinate on the map image, the details of the borehole log can be displayed from the database. Geological and hydrogeological assessments between groundwater borehole can be made by drawing groundwater drilling logs on topographic sections taken between two points. A numerical database containing groundwater boreholes drilled by DSI in the Acipayam Plain (Denizli), urban planning, topography and geological maps was created in the YAS-GIS system and an application study was carried out.*

Keywords: *Groundwater boreholes, geographical information system, Acıpayam basin*

1. GİRİŞ

Köy yerleşim alanlarının ve tarım arazilerinin bulunduğu ovalarda, yağış ve kaynak sularından beslenimin yetersiz olduğu yaz aylarındaki su açığı, kamu kurumları, özel kuruluşlar ve şahıslar tarafınan farklı derinliklerde açtırılan sondaj kuyularından çekilen yeraltısuyundan karşılanır. Ancak elde edilen sondaj verilerinin sayısal bir veri tabanında toplanamaması yeraltısuyunun belenimi, rezervi, korunması ve sürdürelebilir olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca açılan bazı yeraltısuyu (YAS) sondajlarının izinsiz olması, havza içinde yapılan su bilançosu ve yeraltısuyu rezervi hesaplamalarını olumsuz etkilemektedir.

Havzalarda üretilen yeraltısuyu sondaj verileri birçok araştırmacı tarafından ticari yazılımlar kullanılarak (ArcGIS gibi) değerlendirilmektedir (Çelik vd, 2017). Kentleşmeye yönelik uygulamalar için jeolojik ve jeoteknik coğrafi bilgi sistemi yazılımı Kumsar vd, (2003, 2004, 2005) tarafından geliştirilmiş Denizli şehir merkezi ve Acıpayam ilçesi yerleşim alanlarına uygulanmıştır (Kumsar vd,

2021). Bu çalışmada, yeraltısuyu sondaj verilerinin değerlendirilmesine yönelik yeni bir coğrafi bilgi sistemi geliştirilmiştir.

2. YERALTISUYU VERİ TABANI OLUŞTURULMASI

Bir havzanın yeraltısuyunun sürdürülebilir olarak kullanılması ve korunması için havza içinde açılmış yeraltısuyu sondajlarının bir veri tabanında sayısal ortamda değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, yeni bir coğrafi bilgi sistemi yazılımı C++ programlama dilinde yazılımı birinci yazar tarafından geliştirilmiş ve "Yeraltısuyu Coğrafi Bilgi Sistemi (YAS-CBS)" olarak adlandırılmıştır. Mevcut durumda ticari olarak satılmamaktadır. YAS-CBS iki alt ana veri tabanından oluşur. Bunlar; harita ve yeraltısuyu sondaj veri tabanlarıdır.

Şekil 1. Yeraltısuyu coğrafi bilgi sisteminin (YAS-CBS) içeriği.

Harita veri tabanında aynı koordinat sisteminde sayısallaştırılmış topoğrafik, imar, jeolojik ve tektonik haritalar yeralır. Sayısal topoğrafik harita veri dosyaları, her noktanın x, y ve z koordinatlarından oluşmaktadır. İmar haritaları ise iki boyutlu haritalar olup yerleşim yerlerinde yapılmış imarlı alanların x ve y koordinatlarını içerir. Her iki türdeki harita verileri AutoCAD ve NetCAD gibi bilgisayar destekli çizim programlarının ortak veri paylaşımı olan DXF uzantılı çizim dosyalarından YAS-CBS veri tabanına aktarılmaktadır. Jeolojik ve tektonik haritalar ise MTA tarafından veya farklı bilimsel çalışmalarda ve raporlarda yayınlanmış haritaların sayısallaştırılması ile YAS-CBS programına aktarılır.

Yeraltısuyu sondaj veri tabanı, çalışılan havza içinde farklı kuruluşlar (DSİ, Büyükşehir Belediyelerinin Su Kanalizasyon Genel Müdürlükleri, İller Bankası, Özel İdare Müdürlükleri, özel sektör gibi) tarafından açılmış ve logları mevcut olan yeraltısuyu sondaj verilerini içerir. Bu veriler sondaj yeri koordinatı, sondajın jeolojik kesit logu, kuyudaki statik su seviyesi, dinamik seviyesi, kuyu açılış tarihi, kuyu teçhiz ve filitre verisi, kuyu içinden alınan suların kimyasal analiz sonuçları ve rasat yapılan yeraltısuyu sondajlarındaki statik seviyelerin aylık ölçüm verilerini içerir.

Geliştirilen YAS-CBS programında, harita bilgi sistemindeki farklı haritalar ayrı veya beraber çizdirilebilmekte, yeraltısuyu sondajlarının yerleri her farklı harita üzerinde noktasal olarak gösterilebilmektedir. Topoğrafik harita üzerinde istenilen iki nokta arasındaki kesit çizgisi boyunca topoğrafik kesit alınabilmektedir. Kesit çizgisine dik uzaklığı kullanıcı tarafından girilen mesafedeki sondajların jeolojik logları ve yeraltısuyu statik seviyeleri kesit üzerinde çizilebilmektedir. Kullanıcıların bu verileri kullanarak kesit üzerinde jeolojik yapıyı, akifer seviyelerini ve yeraltısuyu seviyesi çizgisini oluşturmasına ve projelerinde kullanmasına imkan sağlanmaktadır.

Sondaj loglarında yeralan statik su seviyesi, suyun kimyasal ve fiziksel özelliklerinden seçilen bir parametrenin ova içerisindeki dağılım haritası YAS-CBS programı içinde çizdirilmekte ve böylece seçilen parametrenin tüm ova içerisindeki dağılımı değerlendirilebilmektedir.

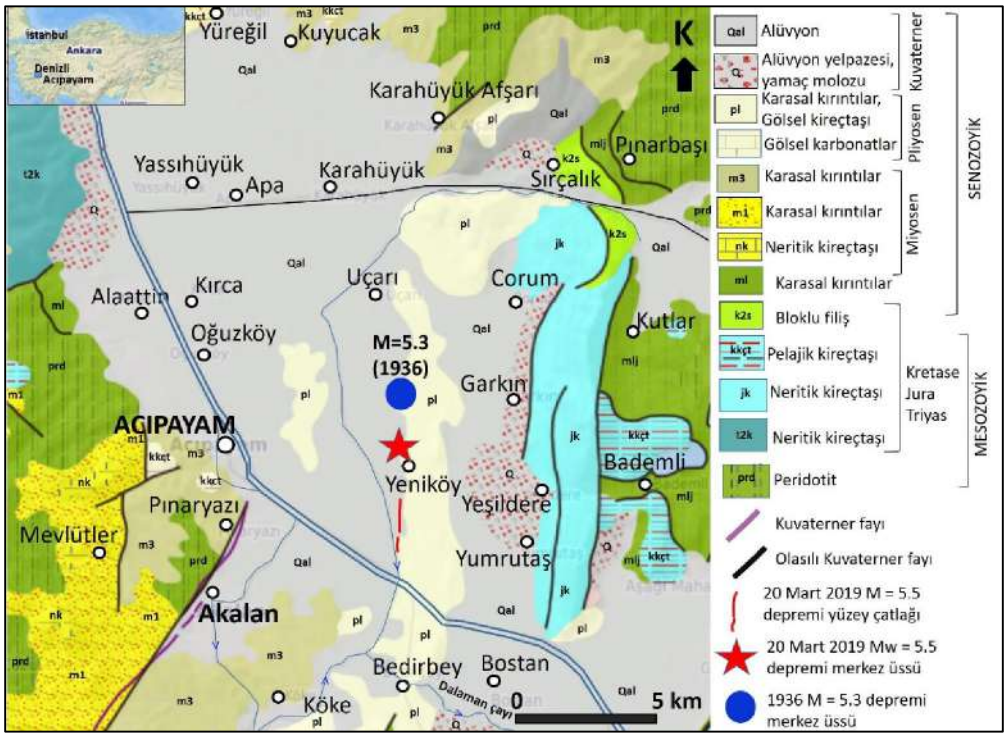
3. ACIPAYAM OVASI YAS-CBS UYGULAMASI

Geliştirilen YAS-CBS programının sınanması ve uygulamaya aktarılması için Acıpayam ovasında farklı tarihlerde DSİ tarafından açılan sondajlar bir doktora tez çalışması kapsamında değerlendirilmiş ve Acıpayam Ovası Yeraltısuları Coğrafi Bilgi Sistemi oluşturulmuştur.

3.1. Acıpayam ve Yakın Çevresinin Jeolojisi ve Tektoniği

Acıpayam Havzası Burdur-Fethiye Fay zonu içinde yer alan, K-G uzanımlı genişlemeli bir Neojen havzadır. Deniz seviyesinden 850-950 m arasında konumlanmış olan havza, GB'ya doğru Dalaman Çayı tarafından drene edilmektedir. Havzayı çevreleyen yüksek dağlık alanlarda Mesozoyik-Senozoyik yaşlı kayaçlar yüzeyler. Mesozoyik (Triyas-Jura-Kretase) birimleri çoğunlukla Likya Napları'nın karbonat ve ofiyolit kayaç toplulukları ile temsil edilir. Acıpayam ilçe merkezinin güneybatısında Mevlütler yöresi, ofiyolitik kayaçların iyi gözlendiği yerlerden birisidir (Balcı vd., 1976). Senozoyik birimleri ise Erken Miyosen çakıltaşları ve sığ denizel kireçtaşları oluşturur (Büyükmeriç, 2017). Geç Miyosen-Pliyosen dönemi alüvyon, akarsu ve göl çökellerinden kuruludur (Kara , 1976; Erten, 2002; Alçiçek vd., 2004, 2005). Havza'yı doğudan sınırlayan, Malı Dağı'nın batı kenarı boyunca K-G uzanımlı fay morfolojisi oldukça belirgindir (Şekil 2). Havza ortasında, üzerinde Bedirbey-Yeniköy-Uçarı gibi yerleşim merkezlerinin yer aldığı K-G doğrultulu ve B ya eğimli bir normal fay hattı gelişmiştir. 20 Mart 2019 günü sabah 9.34'de meydana gelen 5.5 büyüklüğündeki depremin merkez üssü bu fay hattı üzerine düşmektedir (Şekil 2). Kuvaterner döneminin genç birimleri ise göl-akarsu çökelleri, alüvyonlar ve doğudaki Mallıdağı'nın (1745 m) batı yamaçları boyunca (Yumrutaş-Yeşildere-Corum mahallelerinde) gelişmiş yamaç molozlarından (=kolüvyonlar) oluşmaktadır (Kumsar vd., 2019).

20 Mart 2019 tarihinde meydana gelen Mw=5.5 (AFAD, 2019) büyüklüğündeki deprem sonucunda Yeniköy mahallesinin G'de K 5°D doğrultulu ve uzunluğu yaklaşık 1500 m, genişliği 1-4 cm arasında değişen yüzey çatlağı meydana gelmiştir (Şekil 2). Yüzey çatlağı Pliyosen yaşlı gölsel kireçtaşı birimi ile alüvyon biriminin dokanağında olasılı bir fay yüzeyi üzerindedir.



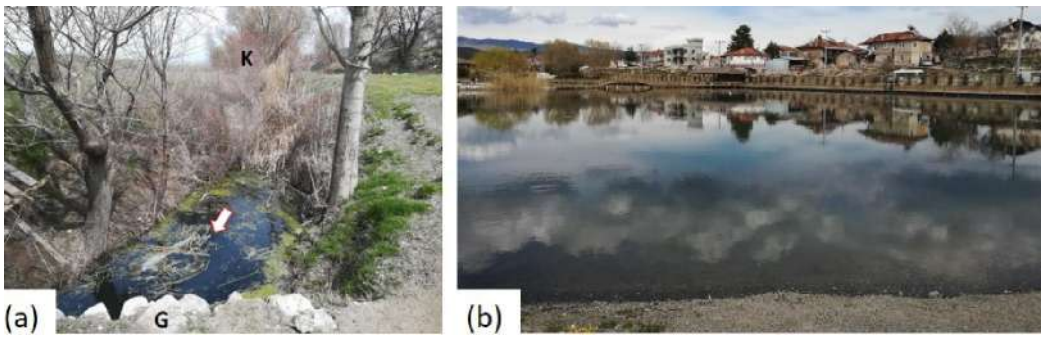
Şekil 2. Acıpayam ve civarının jeolojik ve tektonik yapısı (Emre vd, 2013; MTA, 2019; Akbaş vd, 2002; AFAD, 2019; Kumsar vd., 2020).

3.2. Hidrojeoloji

Acıpayam ovasında sürekli akışı olan tek akarsu Dalaman çayıdır ve ova içine GD da Burdur ili Gölhisar ilçesinin Çamköy sınırından girer, Bedirbey köyünün G den akarak Köke köyü yakınlarından ova dışına akar. Ova içinde mevsimsel akışlı olan Karahüyük deresi drenaj kanalları ile Dalaman çayına karışır (Özdamar, 1997; İsçi, 2012).

Acıpayam ovası içindeki başlıca kaynaklar; 100 lt/sn debisi olan Uçarı, 300 lt/sn debisi olan Dedebağ, 20-30 lt/sn arasında debisi olan Sırçalık, 8-10 lt/sn debisi olan Alaattin ve 10-15 lt/sn arasında debisi olan Bademli kaynaklarıdır (DSİ 1974; Özdamar, 1997; İsçi, 2012).

Ucarı mahallesinin K çıkışında Pliyosen yaşlı gölsel kireçtaşlarından çıkan kaynak suları tabandaki killi zemin üzerinde birikerek bataklık ortamı oluşturmaktadır. Acıpayam belediyesi tarafından yapılan çevre düzenlemesi çalışması sonucunda bu alanda bir gölet oluşturulmuştur (Şekil 3b). Yeniköy, Uçarı ve Bedirbey mahalleleri düşük dayanımlı, karstik boşluklu ve yeraltısuyu içeren bozunmuş gölsel kireçtaşları üzerinde yapılaşmıştır. Karahüyük, Apa, Yassıhüyük, Kırca, Alaattin ve Oğuzköy mahalleleri killi, siltli, kumlu ve az çakıllı alüvyon birimi üzerinde, Acıpayam ilçe merkezi Neojen yaşlı kiltaşı-marn-kumtaşı ile yamaç molozu ve alüvyon birimleri üzerinde yeralır. K-G yönlü Acıpayam ovası içinde yeralan alüvyon biriminde yeraltısuyu seviyesi zemin yüzeyinden 0 ile 5 m arası derinlikte olup kış mevsiminde biriken sular drenaj kanalları ile ova dışına boşaltılmaktadır (Şekil 3a).



Şekil 3. a) Yeniköy'ün 20m D'da G'e akan drenaj kanal suyu, b) Ucarı göletinden görünüm (Kumsar vd., 2020)

3.3. Veri Tabanı Oluşturulması ve Çıktıları

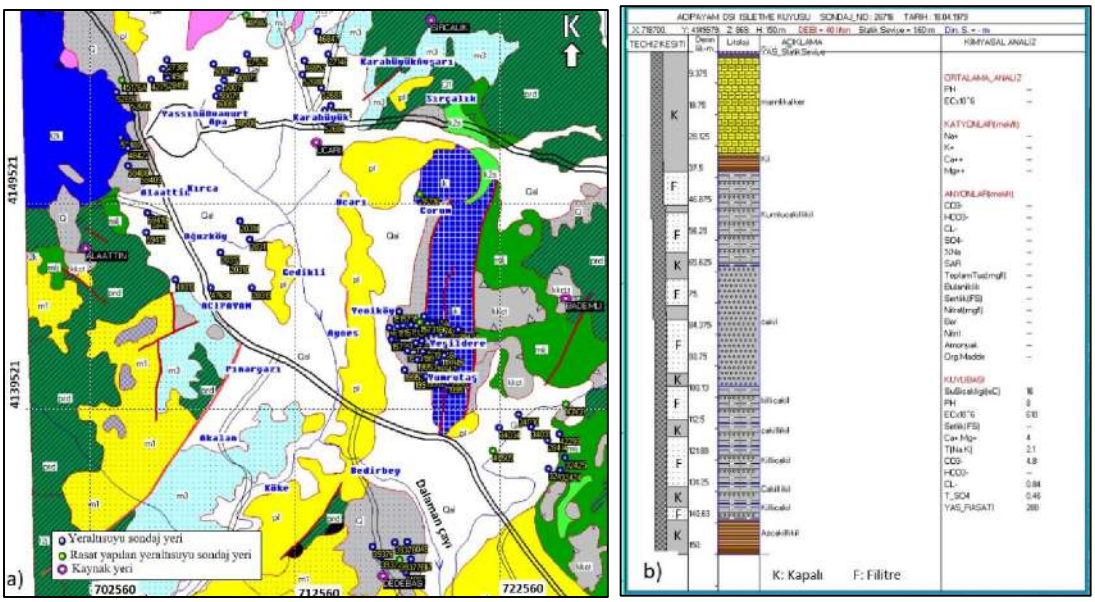
Acıpayam ovasının topoğrafya ve imar haritası ED50-6º'' lik koordinat sisteminde AutoCAD yazılım proframından DXF uzantılı dosya ile YAS-CBS sistemine aktarılmıştır. MTA tarafından yayınlanan bölgenin jeoloji haritası ise sayısallaştırılmıştır (Şekil 4a).

Acıpayam ovası içinde açılmış 87 adet yeraltısuyu arama ve işletme sondajlarının jeolojik ve hidrojeolojik logları sayısallaştırılmış ve YAS-CBS programındaki YAS sondaj veri tabanı oluşturulmuştur. Veri tabanında her sondajın açılış tarihi, x, y ve z koordinatları, derinliği, statik ve dinamik su seviyeleri, kuyu çapı, teçhiz ve filitre bilgileri, kuyu derinliği boyunca kesilen jeolojik birimlerin kalınlıkları, kuyu içinden alınan suların kimyasal ve fiziksel analiz değerleri yeralmaktadır. Ayrıca, Acıpayam ovası içinde DSİ tarafından açılan mevcut sondajlardan yedi adedi rasat kuyusu olarak kullanılmakta ve her ay kuyu içindeki statik su seviyesi DSİ tarafından ölçülmektedir. Bu sondajlarda ölçülen rasat verileri de, YAS veri tabanına aktarılmıştır.

YAS-CBS programı üzerinde farklı altlık haritalar üzerinde sondaj yerleri gösterilebilmekte ve logu görülmek istenen sondajın bulunduğu noktada farenin sağ tuşuna tıklandığında tüm sondaj logu sayısal veri tabanından okunarak grafik ekranında görülebilmektedir. Böylece YAS sondajlarının bilgilerine

hızlı erişim sağlanmaktadır. Örnek olarak Acıpayam ovasının Corum köyü sınırları içinde açılan 26716 numaralı sondaj logu Şekil 4b'de gösterilmiştir.

Acıpayam ovası Corum köyü içinde açılmış 26716 numaralı sondajdaki statik seviye değerleri 1997 yılından günümüze kadar aylık olarak DSİ tarafından ölçülmüştür. Bazı aylarda ise veri seviye ölçümü yapılamamıştır. YAS-CBS sistemindeki veri tabanı kullanılarak YAS sondajlarının rasat grafiği Şekil 5'deki gibi çizdirilmektedir.



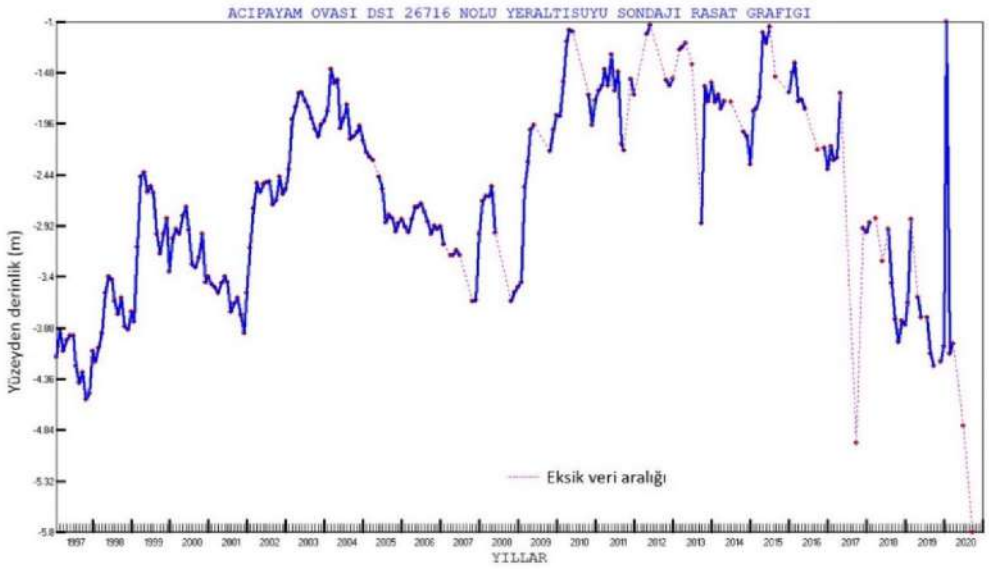
Şekil 4: YAS-CBS sisteminde sayısallaştırılmış Acıpayam ovası ve çevresinin jeolojik ve tektonik haritası (Emre vd, 2013; MTA, 2019), b) DSİ tarafından açılan yearltısuyu sondajların dağılımı (DSİ 1974; Özdamar,1997; İşçi, 2012) (not: jeolojik birimlerin açıklaması Şekil 2'de verilmiştir).

Grafik üzerinde veri alınan aylardaki çizgiler devamlı, alınamayan aylar arasındaki çizgiler ise kesiklidir. Şekil 5'de görüldüğü gibi 1997 yılından günümüze kadar geçen süre içinde statik seviye değişimi 5 ile 7 yıllık periyotlarda tekrarlanan uzun süreli yükselme ve alçalma eğilimi göstermektedir. Bu süre dilimleri içindeki yıllık ve mevsimlik değişimler de grafik üzerinde görülmektedir. 2021 yılı sonlarında ise statik su seviyesi tüm rasat süresinin en düşük seviyesinde yani -5.8m'dedir (Şekil 5). Rasat verilerinin bölgedeki meteoroloji istasyonlarından alınacak ortalama yağış verileri ile aynı grafik üzerinde çizdirilmesi, sondaj kuyusundaki statik su seviyesinin uzun süreli değişiminin iklim değişikliği ile ilişkisinin incelenmesi açısından önemlidir. Rasat süresi boyunca aylık ortalama yağış verilerinin elde edilebilmesi ve veri tabanına aktarılması durumunda, YAS-CBS sisteminde yağış ve YAS değişimi grafiğini çizdirmek mümkündür. Bu çalışmada yağış verileri elde edilemediğinden dolayı YAS veri tabanına aktarılmamıştır.

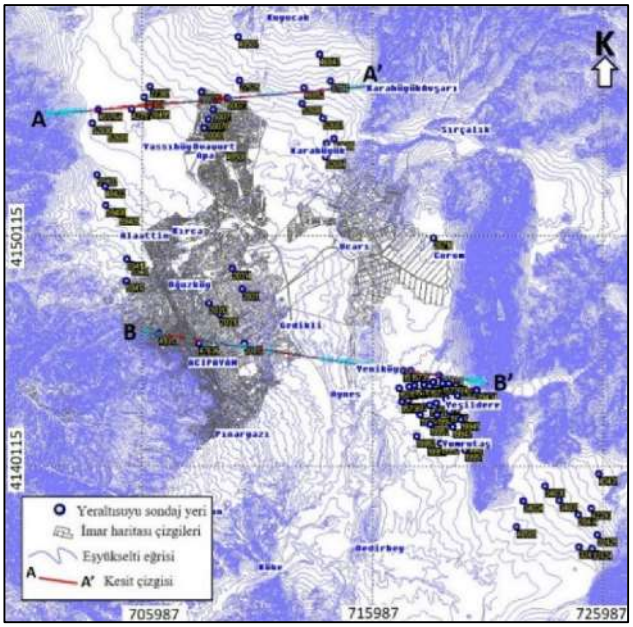
YAS-CBS programı kullanılarak Acıpayam ovasının topoğrafik haritası üzerinde A-A' noktaları ve B-B' noktaları arasında iki ayrı doğrultuda topoğrafik kesitler alınmış (Şekil 6) ve her iki kesit çizgilerine 100m uzaklıktaki sondajların jeolojik kesitleri ve YAS seviyeleri kesitler üzerinde gösterilmiştir. A-A' kesitinde yeraltısuyu seviyesi yüzeyden 15 m ile 30 m arasında değişen derinliklerdedir (Şekil 7), B-B' kesitinde ise yüzeyden 0 ile 14 m arasında değişmektedir. 29319 numaralı sondajda ise yeraltısuyu seviyesi zemin yüzeyindedir (Şekil 8).

YAS sondaj veri tabanındaki tüm sondajların statik seviyeleri YAS-CBS sistemi içinde değerlendirilmiş ve Acıpayam ovası YAS eş derinlik haritası oluşturulmuştur. Şekil 9a'da görüldüğü gibi Oğuzköy, Ucarı ve Yeniköy arasında Gedikli köyünü de içeren alanda YAS seviyesi zemin yüzeyi ile yüzeyden 6m derinliktedir. Ovanın K, G, D ve B kenarlarında YAS seviyesi yüzeyden 10 m ile 50 m derinliktedir. YAS sondaj veri tabanındaki tüm sondajlardaki yeraltısularının elektrik iletkenlik (EC) değerleri

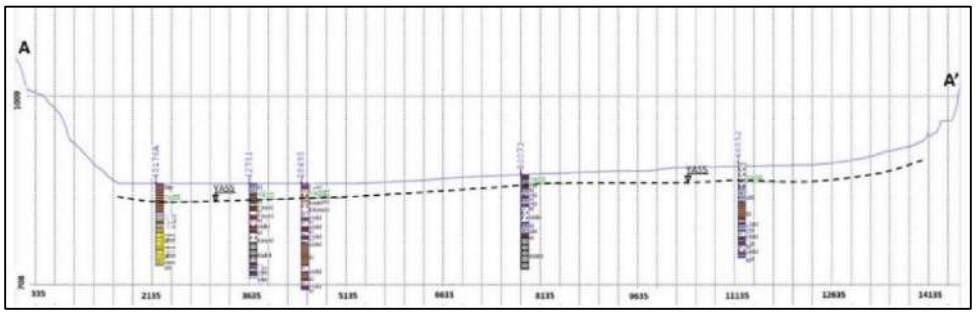
(µS/cm) kullanılarak Acıpayam ovasındaki yeraltısularının EC değeri dağılım haritası YAS-CBS programında üretilmiştir.



Şekil 5. 26716 numaralı DSİ sondajının 1197-2020 yılları arasındaki statik su seviyesinin değişimi (DSİ'den alınmıştır).

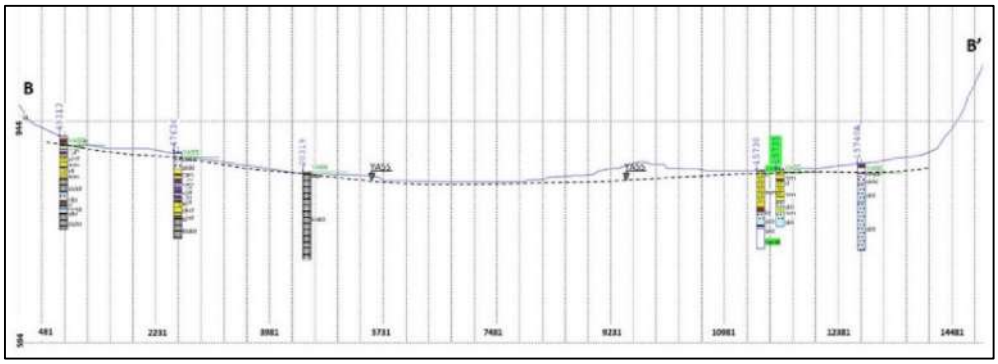


Şekil 6. Topoğrafik harita ve imar haritası üzerindeki kesit çizgisi ve YAS sondaj yerleri.

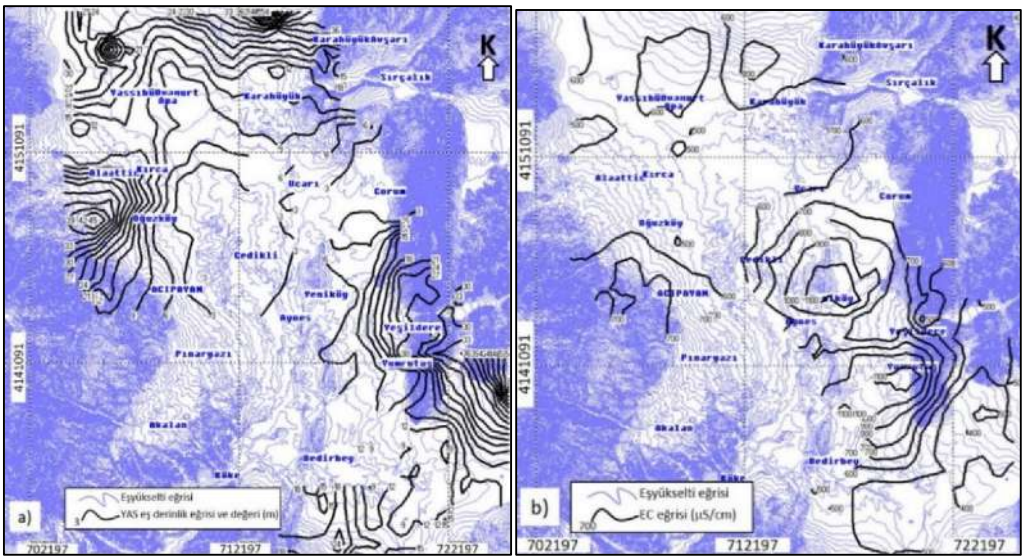


Şekil 7. A-A' doğrultusunda alınan topoğrafik kesit üzerinde YAS sondajları ve YAS seviyesi.

Şekil 9b'de görüldüğü gibi EC değerleri Yeniköy ve Yumrutaş köylerininin bulunduğu alanlarda 1000 µS/cm değerlerine kadar çıkmaktadır. Diğer alanlarda ise 500 ile 700 µS/cm arasında değişmektedir. ABD tuzluluk sınıflamasına göre (Wilcox, 1948) Yeniköy ve Yumrutaş köylerininin bulunduğu alanlarda açılan sondajlardaki yeraltısuları "Yüksek Tuzlu Sular" ve diğerleri "Orta Tuzlu Sular" sınıfındadır.



Şekil 8. B-B' doğrultusunda alınan topoğrafik kesit üzerinde YAS sondajları ve YAS seviyesi.



Şekil 9. a) YAS-CBS sistemi kallanılarak elde edilen Acıpayam ovası YAS eş derinlik haritası, b) YAS elektriksel iletkenlik (EC) haritası.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yeni bir Yeraltısuyu Coğrafi Bilgi Sistemi (YAS-CBS) yazılımı C++ programlama dilinde gerçekleştirilmiş ve Acıpayam ovasına uygulanmıştır. Geliştirilen YAS-CBS yazılımı ile topoğrafya, imar, jeoloji ve tektonik haritalar aynı koordinat sistemi üzerinde farklı tabakalar olarak çizdirilebilmekte ve her bir harita üzerinde YAS sondaj yerleri gösterilmektedir. Harita üzerinde herhangi bir sondajın logu ve tüm detayları ile görülebilmektedir. Topoğrafik harita üzerinde iki nokta arasında tanımlanan kesit doğrusu boyunca topoğrafik kesit alınarak kesite yakın mesafedeki sondaj logları ve her sondajdaki statik seviye topoğrafik kesit üzerinde çizilmektedir. Böylece kullanıcının jeolojik kesit ve yeraltısuyu profilini kesit üzerinde çizebilmesine imkan sağlanmıştır. Sondaj loglarındaki yeraltısuyunun fiziksel ve kimyasal analiz değerleri kullanılarak tüm havzanın seçilen parametreye göre kontur haritalarının YAS-CBS programında oluşturulması, hidrojeolojik verilerin hızlı değerlendirilmesine imkan sağlamıştır.

Gelitşirilen YAS-CBS yazılımında tüm veri tabanı sayısal değerlerden oluşmaktadır. Yani resim dosyaları içermemektedir. Bu da, jeoloji ve hidrojeoloji mühendislerinin YAS-CBS programını kullanarak sayısal değerlendirme haritaları elde etmelerine imkan sağlamaktadır. Mevcut yazılım, ileriki çalışmalarda genişletilerek ilave değerlendirme yöntemlerini de içerecektir.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yeraltısuyu sondaj verilerinin araştırma kapsamında değerlendirilmesine izin veren DSİ Genel Müdürlüğü JTH ve YAS Dairesi Başkanlığı'na ve DSİ Aydın Bölge Müdürlüğü JTH ve YAS Şube Müdürlüğü'ne, imar planı verilerinin kullanılmasına izin veren Acıpayam Belediye Başkanlığı'na yazarlar teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

AFAD, 2019. 20 Mart 2019 Acaıpayam (Denizli) Mw 5.5 Depremine ilişkin ön değerlendirme Raporu (www.deprem.gov.tr).

Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ., Balcı, V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T., Gedik, İ., Günay, Y., Güven, İ.H., Hakyemez, H. Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan, Ş., Sevin, M., Şenel, M., Tarhan, N.,Turhan, N., Türkecan, A., Ulu, Ü., Uğuz, M.F., Yurtsever, A. ve diğerleri, 2002. Türkiye Jeoloji Haritası Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını. Ankara Türkiye.

Alçiçek, M.C., Kazancı, N., Özkul, M., Şen, Ş., 2004. Çameli (Denizli) Neojen Havzası'nın tortul dolgusu ve jeolojik evrimi. MTA Dergisi, 128, 99-123.

Alçiçek, M.C., Kazancı, N., Özkul, M., 2005. Multiple rifting pulses and sedimentation pattern in the Çameli Basin, southwestern Anatolia, Turkey. Sedimentary Geology 173, 409–431.

Balcı, M.; Sarıkaya, A. ve Yıldız, M. 1976. Denizli- Acıpayam peridotit masifinin Çatak-Mevlütler çevresinin jeolojisi. MTA Rap. no. 6447, (yayımlanmamış) Ankara.

Büyükmeriç, Y., 2017. Kale-Tavas ve Acıpayam Havzalarında Erken Miyosen Çökellerinin Mollusk Biyostratigrafisi (Denizli, GB Türkiye). MTA Dergisi, 155, 49-73.

Çelik, R. Aslan, V. Akyıldız, M.H. 2017. Harran Ovası'nın yeraltısuyu potansiyelinin coğrafi bilgi sistemi ile modellenmesi, Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 8, 1, 53-64.

DSİ, 1974. Acıpam Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 28 s.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. 2013, 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi-, Ankara, Türkiye.

Erten, H. 2002. Acıpayam-Çameli karasal Neojen istifinin stratigrafisi ve mikromemeliler yönünden incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 44s (yayımlanmamış), Denizli.

İsçi, A. 2012. Acipayam Ovası Revize Hidrojeolojik Etüt Raporu (Yayınlanmamış), Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü,115 s.

Kara, H. 1976. Acıpayam (Denizli) ovasının ve civarındaki Neojen havzalarının jeolojik etüdü. MTA Rap. no: 6153 (yayımlanmamış), Ankara.

Kumsar, H., Çelik, S. B., Kaya, M., 2003. "Kentleşmeye yönelik mühendislik jeolojisi uygulamalarında jeolojik ve jeoteknik bilgi sistemlerinin önemi ve Denizli örneği", *56. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiriler kitabı, 14-20 Nisan 2003, Ankara, s 248-250.* 2003.

Kumsar, H., Çelik, S. B., Kaya, M., 2004, Denizli il merkezi yerleşim alanının jeolojik, jeoteknik kent bilgi sistemi (JEO-KBS), Pamukkale Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi, Denizli, Özel Sayı (ISSN 1300-7009), s 25-31.

Kumsar H, Özkul M, Semiz B. 2019. "Geological and Geotechnical Investigation of 20 March 2019 M_w 5.5 Acıpayam (Denizli) Earthquake". *National Symposium on Engineering Geology and Geotechnics –ENGGEO'2019*, PAU Denizli, 03-05 October, 701-710.

Kumsar, H., Özkul, M., Semiz, B. 2020. Geotechnical Site Investigation and Evaluation of 20 March 2019 Mw 5.5 Acıpayam (Denizli) Earthquake, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg. 2020; 26(8): 1343-1352.

Kumsar, H., Çelik, S .B., Kaya, M. Topaloğlu, S., 2005., Geological-geotechnical urban information system for Denizli, (Denizli için jeolojik-jeoteknik kent bilgi sistemi), Mühendislik Jeolojisi Büleni-Bulletin of Engineering Geology, ISSN 1305-6859,,v. 21, pp 35-47.

Kumsar, H., Say, Y., Özyurt D., Karagöz, U.C., Sarayköylü, T., Reçber, M. 2021. Sürdürülebilir Kentleşme İçin Jeolojik Jeoteknik Coğrafi Kent Bilgi Sistemi (JEOKBS), Acıpayam Belediyesi (Denizli) Uygulaması, 73. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 24-28 Mayıs 2021, Ankara, JMO Yayınları, s 509-510.

MTA. 2019. http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx

Özdamar A.R. 1997. Acıpayam Ovası Revize Hidrojeolojik Etüt Raporu, DSİ 21. Bölge Müdürlüğü , Yayınlanmamış.

Wilcox, L.V., 1948. The quality of water for irrigation use. US Department of Agriculture Technology Bulletin 962, 40.

Devlet Su İşleri'nde Suyun Yönetimi ve Korunmasında Son 5 Yıldaki Gelişmeler

Developments in the Last 5 Years in Water Management and Protection in State Water Works of Turkey

Ç. Yücel[1,*], Ü. Koç[1], A. Morkoç[1], M.M. Toklu[1], M. Özmen[1]

[1] *DSİ Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve YAS Dairesi Başkanlığı*
*(*cyucel@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Ülkemizde suyun yönetimi ve korunmasından sorumlu olan Kurumumuzdan önce 1952'de "Yeraltısuyu Bürosu" olarak kurulan ilk yapılaşma, 1954'te DSİ'nin kurulmasıyla Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı ile faaliyetlerini sürdürmektedir. Ovalardaki yeraltısuyu etütleri ile başlayan çalışmalar, havza ölçekli hidrojeolojik etütler, yeraltısuyu kütlelerinin belirlenmesi ve karakterizasyonu, kalite ve miktar izleme çalışmaları, tedbirler ve önlemler programları ile kapsamlı şekilde sürdürülmektedir. 2001 yılından beri sürdürülen projeler ile AB Su Çerçeve Direktifi ve rehber dökümanları esas alınarak 12 havzada (Büyük Menderes, Konya, Susurluk, Meriç Ergene, Gediz, Sakarya, Akarçay, Burdur, Batı Akdeniz, Yeşilırmak, Küçük Menderes, Kuzey Ege) yas kütle belirleme çalışmaları tamamlanılmıştır. Yapılan çalışmalar ile direktif ve rehber dökümanlar ayrıntılı olarak incelenmiş, teknik geziler ile Avrupa Birliği Ülkelerinin yaptığı çalışmalar yerinde incelenmiştir. Direktifin yasal mevzuatımıza uyumlaştırılması kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda Su Yönetimi Genel Müdürlüğü ile birlikte "Yeraltısularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik" yayınlanarak, kurumsal görev ve sorumluluklar belirlenmiştir. Ülkemizin jeolojisi, hidrojeolojisi, su kullanım alışkanlıkları, noktasal ve yayılı kirleticilerin suya oluşturduğu baskı-etkiler, havza özelindeki kirletici unsurların durumu dikkate alınarak miktar ve kalite izlemeleri yapılmıştır. Gözetimsel ve operasyonel olarak 3 aylık periyodlarda yapılan kalite izlemeleri, kuyulardan seviye ölçümü ve kaynaklardan boşalım ölçümleri aylık ve mevsimsel (yağışlı-kurak dönem) olarak yapılmıştır. Havzalardaki ekosistemler, yüzey suyu ve yeraltısuyu ilişkisi gözönüne alınarak, yapılan tüm çalışmalar ve analiz sonuçları ile mevcut durum ortaya konulmuştur. Projelerin ardından, edinilen tecrübeler ile Ülkemizdeki havzalarda yas kütle belirleme çalışmalarına devam edilmektedir. Son 5 yılda 12 havzada (Kızılırmak, Marmara, Doğu Karadeniz, Batı Karadeniz, Doğu Akdeniz, Antalya, Seyhan, Ceyhan, Van, Aras, Çoruh, Dicle) yas kütle belirleme çalışmaları yapılmıştır. Havzalarda yas kütleleri belirlenirken, havzaların kendine has özellikleri dikkate alınarak geliştirilen metodolojiler kullanılmıştır. Her bir havzadaki yeraltısuyunun mevcut durumunu ortaya koyacak baskı ve etki unsurları için büro ve arazi çalışmaları yapılmıştır. YAS kütlesi belirlenen havzalarda, havza özeline göre belirlenen kalite parametreleri ile gözetimsel ve operasyonel izlemelere başlanılmıştır. Yeraltısuyu miktar çalışmaları kapsamında ise; kuyulardan aylık ve mevsimlik seviye ölçümleri yapılmış ve kaynak boşalımları takip edilmiştir. Her bir kütlenin miktar durumunu ortaya koymak amacıyla beslenim ve boşalımı hesaplanılmaktadır. Yapılan tüm çalışmalar ve analiz sonuçları coğrafi bilgi sistemleri ile haritalanmaktadır. Hedefimiz tüm havzalardaki yas kütle belirlemelerini tamamlamak, Ülkemizdeki yüzey ve yeraltısularımızı kalite ve miktar izleme ağları ile takip ederek suyu korumak ve yönetmektir.

Anahtar Kelimeler: DSİ Genel Müdürlüğü, Su Çerçeve Direktifi, yeraltısuyu kütlesi, kalite ve miktar izleme

ABSTRACT: *Management and conservation of groundwater resources in Turkey began in 1952 when "Bureau of Groundwater" was set up, and have been maintained by Department of Geotechnical Services and Groundwater with the establishment of DSI in 1954. The studies that started with investigations of groundwater in plains have been comprehensively extended with groundwater researches in catchment scale, determination and characterization of groundwater bodies, monitoring of quantity and quality of the bodies, and programmes of precautionary actions. Groundwater bodies have been determined in 12 catchment basins (Büyük Menderes, Konya, Susurluk, Meriç Ergene, Gediz, Sakarya, Akarçay, Burdur, Batı Akdeniz, Yeşilırmak, Küçük Menderes, Kuzey Ege) by projects some of which founded by the EU since 2001 on the basis of the Water Framework Directive and guide*

documents. Within these projects, not only the directive and the documents were analysed in detail, but also the studies fulfilled by the EU countries were investigated on-site with technical visits. In consequence of the analyses that completed to harmonize the directive with our legislation, institutional duties and responsibilities entitled as "Regulations on Protection of Groundwater Against Pollution and Deterioration" were published in company with the General Directorate of Water Management. The quantity and quality monitored by taking into consideration geology, hydrogeology, water use pattern, pressure of point and areal pollutants on the water resources, and the state of specific pollutants in a basin. Groundwater levels from observation wells, discharge of springs, and water levels on a monthly and seasonal basis in pluvial and dry seasons were measured. The observation of quality was also performed every 3 months. Having regard to ecosystems of the basins and the relationship between surface water and groundwater, the present condition has been deduced by the result of all studies and analyses. The characterization studies of the groundwater bodies in the basins are carried out by means of experiences gained after the projects. In 12 catchment areas (Kızılırmak, Marmara, Eastern Black Sea, Western Black Sea, Eastern Mediterranean, Antalya, Seyhan, Ceyhan, Van, Aras, Çoruh and Tigris), the characterization studies are completed in the last 5 years. The methods developed for each basin according to their hydrogeologic features were used when determining the bodies. The office and field studies to present the pressure on groundwater that reveal status quo for each basin are maintained. The quality monitoring for the basins that the groundwater bodies specified has been started by using of the parameters selected for each basin individually. As a part of the monitoring of quantity studies, monthly and seasonally water level changes and spring discharges are recorded. Recharge and discharge are calculated to assert the state of the quantity for each body. All completed studies and analyses are mapped by using geographic information systems. Our target is to govern and protect the surface and groundwater with monitoring networks of quality and quantity, and to complete revealing all groundwater bodies in Turkey.

Keywords: *DSİ General Directorate, Water Framework Directive, groundwater body, quality and quantity monitoring*

1. GİRİŞ

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü; ülkemizdeki tüm su kaynaklarının planlanması, yönetimi, geliştirilmesi ve işletilmesinden sorumlu, merkezi yönetim bütçesine tabii özel bütçeli yatırımcı bir kuruluştur. DSİ Genel Müdürlüğü, ülkemizdeki su ve toprak kaynaklarının geliştirilmesinden sorumlu ana kuruluş olarak söz konusu doğal kaynakların en akılcı şekilde kullanılmasını amaçlamakta ve çalışmalarını bu şekilde yürütmektedir.

DSİ Genel Müdürlüğü faaliyetlerini;
• 6200 sayılı "DSİ Genel Müdürlüğü'nün Teşkilat ve Vazifeleri Hakkında Kanun"
• 167 sayılı "Yer Altı Suları Hakkında Kanun"
• 1053 sayılı kanun gereği "Belediye Teşkilatı Olan Yerleşim Yerlerine İçme, Kullanma ve Endüstri Suyu Hakkında Kanun" ile yürütmektedir.

Ülkemizdeki yeraltısuyu çalışmaları, DSİ Genel Müdürlüğü'nün kuruluşundan 1 yıl önce 1952 yılında Yeraltısuları Bürosu olarak kurulan, 1956 yılından itibaren DSİ Genel Müdürlüğü bünyesinde Daire Başkanlığı olarak faaliyet gösteren Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Dairesi Başkanlığı tarafından yürütülmektedir. Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Dairesi Başkanlığı, 6200 sayılı kuruluş yasası ile belirtilen görevlerini "jeoteknik hizmetler" ve "yeraltısuları" olmak üzere iki ana konuda sürdürmektedir. 26 Bölge Müdürlüğü ve 19 Sondaj Şube Müdürlükleri vasıtasıyla çalışmalarımız yürütülmektedir.

Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı; yeraltısularının nerede, hangi derinlikte, ne miktar ve kalite olduğunu belirlemek maksadıyla hidrojeolojik etütler yapmaktadır. Bu kapsamda; DSİ'nin kuruluşundan beri hazırlanan "Yeşil Raporlar"ile yeraltısuyu bulunan işletme sahası ve ovalarda mevcut su potaniyeli ve kalitesi ortaya konulmuş, jeoloji ve hidrojeoloji haritaları çizilmiştir. Artan nüfus ve gelişen teknoloji, yeni yaklaşımlar ile ovalarda başlayan yeraltısuyu etüt çalışmaları günümüzde havza ve alt havza ölçekli olarak yapılmaktadır. Şimdiye kadar 3 havzamızda hidrojeolojik

etüt çalışmaları tamamlanılmış, 6 havzamızda hidrojeolojik etüt çalışmaları devam etmekte ve her yıl yenileri eklenilerek havza ölçekli etütlerimiz devam etmektedir. Tüm havzalarımızda aylık ve mevsimlik seviye ölçüm kuyuları ile aylık ve mevsimlik yeraltısuyu seviyelerimiz takip edilmektedir. Seviye ölçümleri Konya Havzası pilot havza seçilerek online takip sistemine 120 kuyu ile geçirilmiştir. Seviye, sıcaklık ve EC değerleri takip edilerek anlık hassasiyetle bilgilere ulaşılmaktadır. Aynı sistem bu yıl birçok havzamızda da uygulamaya geçirilmek üzere çalışmalara başlanılmıştır. Yeraltısuyunun kalitesinin ortaya konulması amacıyla mevsimsel örneklemeler yapılarak analiz edilmektedir. Etüt çalışmaları ile yeraltısuyunun potansiyelinin belirlenmesi ile işletme alanları ilan çalışmaları yapılmakta, etüdün yapıldığı alanda su kullanıcılarına amacına uygun oranda, sürdürülebilir rezerv miktarı kadar tahsis yapmaktadır. Suyun ekonomik olarak işletilmesi sağlanılarak en ekonomik sulama sistemleri için teşvik ve bilgilendirmeler yapılmaktadır. Kaynakların miktar ve kalite envanteri tutulmakta, içme suyu kuyu ve kaynakları için koruma alanı belirleme çalışmalarını yapılarak suyun korunarak teknik ve en ekonomik şekilde kullanılmasını sağlanılmaktadır.

2. SU ÇERÇEVE DİREKTİFİ ve ÜLKEMİZ MEVZUATINA UYUMLAŞTIRILMASI

2.1 Su Çerçeve Direktifi ve Yönetmelik

Son yıllarda Ülkemizde yapılmış olan en kapsamlı çalışma; 25 akarsu havzası esas alınarak yeraltı ve yüzey sularının mevcut durumlarının ortaya konulması amacıyla master plan çalışmalarının yapılmasıdır. Ülkemizdeki her bir havza için yapılan bu çalışmalar, 2012-2016 yılları arasında yaklaşık 4 yılda tamamlanılmıştır. İklim, sosyal durum, su kullanımı ve potansiyeli, yüzey suyu ve yeraltısuyu sulamaları, toprak, tarımsal ekonomi, su kalitesi, taşkın, jeoloji ve hidrojeoloji, içme suyu, atıksu ana başlıkları konularında arazi ve büro çalışmaları yapılmıştır. Yapılan tüm çalışmalar coğrafi bilgi sistemleri ortamında biraraya getirilerek, dijital arşivler oluşturulmuştur.

Master Palan çalışmalarının Devlet Su işleri tarafından tamamlanılması; Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nün Su Çerçeve Direktifine uyum sağlama projelerinin başlamasıyla Ülkemizdeki yeraltısuyu kütle belirleme çalışmaları daha da hız kazanmıştır. 1975'te çeşitli direktifler ile başlayan çalışmalar 2000 yılında Su Çerçeve Direktifi'nin çıkması ile tamamlanmıştır. Habitat, kuş, içme suyu, yüzme suyu, bitki koruma ürünleri, nitrat, kentsel atıksu arıtma, çevresel etki değerlendirme gibi tüm direktifleri kapsayan şemsiye direktif özelliğindedir. Direktifin en önemli özelliği, entegre havza bazlı yönetimi esas alması, miktar ve kalite özelliklerini dikkate alarak suyun önce gözlemsel sonra operasyonel olarak takip edilmesi, her aşamada su kullanıcılarını ve yöneticilerinin sürece dahil edilmesi en önemli özelliklerindendir. Direktif yüzey suyu, yeraltısuyu, kıta içi sular, geçiş suları ve 1 deniz miline kadar olan kıyı sularını içeren tüm su kütlelerini kapsamaktadır.

1999 yılında Helsinki Zirvesi ile Avrupa Birliği üyeliğine adaylık süreci başlayan ülkemizde, öncelikli çalışmalar Avrupa Birliği Müktesebatının Üstlenilmesine İlişkin Ulusal Programın "Çevre" başlığı ile başlamış olup, tüm kurum ve kuruluşların katılımıyla çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Su Çerçeve Direktifi'nin anlaşılması ve uygulanması, mevzuatımızın uyumlaştırılması için yapılan ilk projeler direktifin anlaşılması ve mevzuatın uyumlaştırılması için yapılmışken, son dönemde yürütülen projeler uygulamaya yönelik arazi çalışmalarını da kapsayacak şekilde yapılmaktadır.

Su Çerçeve Direktifi (SÇD)'nin uygulanmasını kolaylaştırmak amacıyla 2012 yılında 'Yeraltısularının Kirlenmeye ve Bozunmaya Karşı Korunması Hakkındaki Yönetmelik' çıkarılmıştır. Yönetmelik ile birlikte yeraltısuyu kütlesi, kütlelerin kalite ve miktar izleme değerlendirmeleri, baskı-etki-risk, eşik değer, trend analizi, tedbirler programı, yas koruma alanları kavramları çalışmalarımızda yer almaya başlamıştır. Yönetmeliğin amacı yeraltısularının mevcut durumunu ortaya koymak, korumak, kirlenmesini ve bozunmasını önlemek ve bu suların iyileştirilmesi için gerekli önlemleri alma esaslarını kapsamaktadır.

2.2 Su Çerçeve Direktifi'ne Uyum Sağlama Projeleri

Avrupa Birliği destekli projeler ve Su Yönetimi Genel Müdürlüğü koordinasyonu ile Gediz, Akarçay, Sakarya, Susurluk, Büyük Menderes, Konya, Meriç-Ergene, Kuzey Ege, Burdur, Batı Akdeniz, Yeşilırmak ve Küçük Menderes havzalarında çalışmalar yapılmıştır. Bu projelerin bir kısmında yalnızca yeraltısuyu miktar ve kalite özellikleri çalışılırken, bazılarında Nehir Havzası Yönetim Planları hazırlanarak yeraltı ve yüzey sularının havza bazında entegre olarak yönetimine dair çalışmalar yürütülmektedir.

2001-2004 yıllarında ve2007 yılında Türkiye'de Su Sektörü için Kapasite Geliştirilmesi Eşleştirme projeleri Büyük Menderes Havzası'nda uygulanmıştır. Ülkemizdeki mevcut mevzuat gözden geçirilerek, suyun yönetilmesinde sorumlu olan kurumlar arasında işbirliğin hızlandırmak ve Türkiye'de su yönetimi planlamasında entegre yaklaşımı geliştirmeyi sağlamak amaçlanmıştır. Proje kapsamında nehir havza yönetimi kapsamında yürütülecek olan çalışmalar tanımlanmış, eğitimler ile alt yapı desteklenerek projenin uygulanmasına yönelik el kitabı hazırlanmıştır. Mevcut durumda SÇD'nin uygulama zorlukları ortaya konulmuştur.

Havzalarımızdaki mevcut su durumlarının ortaya konulması amacıyla Havza Koruma Eylem Planları ve Havza Yönetim Planları 2008-2012 yılları arasında hazırlatılmıştır. Havza Koruma Eylem Planlarında, havzalardaki mevcut yüzey, yeraltı ve kıyı suları miktarları, kalite ve kirlilik durumu, kentsel, endüstriyel, tarımsal, ekonomik vb. faaliyetlere bağlı olarak oluşan baskı ve etkilerinin tespit edilmesi, mevcut su kaynaklarının miktarı ve kullanım potansiyeli ile havza bazında tespit edilen kirlilik kaynaklarının ve yüklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi, su kalitesi haritalarının oluşturulması, çevresel altyapı durumunun tespit edilmesi, havzanın korunması, kirliliğin azaltılması ve iyileştirilmesi için havzadaki tüm paydaşların katılımı ile kısa, orta ve uzun vadede tedbirlere yönelik çalışmaların plan, program ve önceliklendirmeleri yapılmıştır. Tüm çalışmalar coğrafi bilgi sistemine uyumlu veri tabanları oluşturularak tamamlanmıştır.

2.3 Tamamlanan ve Devam Eden Yeraltısuyu Çalışmaları

Avrupa Birliği Katılım Öncesi Yardım Aracı 2011 yılı programlamasından desteklenen "Havza Koruma Eylem Planlarının Nehir Havza Yönetim Planlarına Dönüştürülmesi Projesi" 29 Aralık 2014 tarihinde resmi olarak başlamıştır. 3 yıl süren projede, Havza Koruma Eylem Planlarının Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi ve diğer kardeş direktiflerle uyumlu şekilde Nehir Havza Yönetim Planlarına dönüştürülmesi çalışmasını gerçekleştirilmiştir. Söz konusu projede, Meriç-Ergene, Susurluk, Konya ve Büyük Menderes havzalarında Nehir Havza Yönetim Planları hazırlanmıştır. Nehir Havza Yönetim Planları, su kirliliğinin önlenmesi ve azaltılması, sürdürülebilir su kullanımının sağlanması, sucul ortamların korunması ve durumlarının iyileştirilmesi için kıta içi suların, yeraltısularının, kıyı ve geçiş sularının yönetimini sağlamak maksadıyla hazırlanmıştır. Proje sonucunda her bir havzada yeraltı ve yüzeysuyu kütleleri belirlenmiş, kütlelerin karakterizasyonu yapılmış, baskı ve etkiler doğrultusunda gözlemsel ve operasyonel izlemeler yapılmış, çevresel hedefler ve tedbirler raporları hazırlanmıştır. Havzalardaki yeraltı ve yüzey sularının iyi ve kötü durum koşulları belirlenmiştir. İspanya'daki su yönetimi model alınarak, kütleler havza ve alt havza ölçekli belirlenmiştir. Her havzadaki akifer birimler detaylı olarak incelenmiş, havzadaki su kullanıcılarının uzman görüşleri de alınarak kütle sınırları belirlenmiştir. Meriç-Ergene Havzasında 12 adet, Konya Havzasında 18 adet, Büyük Menderes Havzasında 38 adet ve Susurluk Havzasında 22 adet yeraltısuyu belirlenmiştir. Kütlelerde kalite ve miktar izlemeleri yapılarak, geçmiş dönem analizler ile değerlendirme yapılarak baskı-etki durumları belirlenmiştir. Suların gerek kalite gerekse miktar bakımında "iyi" veya "kötü" durumda olduğu belirlenerek, buna bağlı olarak alınacak tedbir ve önlemler programları belirlenmiştir.

Gediz Havzası Yeraltısularının Miktar ve Kalite Özelliklerinin Ortaya Konulması ve Değerlendirilmesi Projesi kapsamında 2015-2017 yıllarında havzada çalışmalar yapılmıştır. Avrupa Birliği Yer Altı Suyu Direktifi ve Su Çerçeve Direktifi'nin yeraltısuyuna ilişkin hükümlerinin uygulanmasına dair çalışmaları bulunan üye ülkelerin ve/veya ülkemize benzer yeraltısuyu sistemine sahip olan ülkelerin yeraltısularına

ilişkin çalışma ve uygulamaları ve AB rehber dökümanları incelenerek ülkemiz için bir değerlendirme yapılmıştır. Jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri incelenerek birimlerin su taşıma potansiyeli, kuyu ve kaynakların özellikleri, yeraltı ve yüzey suyu ilişkisi, havzadaki nüfus, arazi kullanımı, iletkenlik, özgül debi değerleri istatistiksel olarak değerlendirilerek ülkemize has ilk metodoloji oluşturulmuştur. 76 adet yas kütlesi belirlenen havzada, Yer Altı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmeliği'nin her bir uygulama adımı için ülkemiz şartlarında uygulanabilecek nitelikte yöntem/metodoloji, yaklaşım, model, vs. tespit edileceği ve/veya geliştirileceği ve Gediz Havzası için örnek uygulama gerçekleştirilmiştir. Gediz Havzasında proje kapsamında ve geçmişte yapılmış olan miktar ve kalite izleme verileri değerlendirilerek yeraltısuyu kütlelerinin durumu ortaya konulmuştur. Projede gözlemsel ve operasyonel izlemeler sürdürülmekte olup, yas kütleleri temsil etmesi için izleme ağı genişletmek amacıyla yeni kuyular açılmaya başlanılmıştır.

Türkiye'de Yeraltısuyu Yönetimi Kapasitesinin Geliştirilmesi Projesi kapsamında Sakarya ve Akarçay Havzalarında suyu kullanan tüm paydaşlarında dahil olduğu bir projedir. Öncelikle havzalarda yapılmış olan jeolojik ve hidrojeolojik çalışmalar, havzanın özel durumları dikkate alınarak belirlenen metodoloji ile yeraltısuyu kütleleri belirlenmiştir. Akarçay Havzasında 14, Sakarya Havzasında 71 adet olmak üzere toplam 85 adet yas kütlesi belirlenmiştir. Kütlelerdeki doğal ve antropojenik baskılar belirlenerek kalite ve miktar izlemeleri yapılmıştır. Gözlemsel ve operasyonel olarak gerçekleştirilen izlemeler sonucunda eşik değer belirlenmiş, trend analizleri yapılmış, ekonomik ve çevresel tedbirler raporları oluşturulmuştur. Yapılan tüm çalışmalar havzadaki suyu kullanan paydaşlar ile de paylaşılmıştır.

Burdur, Batı Akdeniz ve Yeşilırmak Havzalarında master plan ve hidrojeolojik etüt çalışmalarının tamamlanması ile "Yeraltısularının Miktar ve Kalite Özelliklerinin Ortaya Konulması Projesi" 2016 yılında başlamış olup, 2019 yılında tamamlanılmıştır. Proje kapsamında her bir havzada, SÇD ve rehber dökümanlar ve daha önce geliştirilmiş olan metodolojiler incelenerek yas kütleler belirlenmiştir. Bu kapsamda Burdur Havzasında 27 adet, Batı Akdeniz Havzasında 67 adet ve Yeşilırmak Havzasında 54 adet yas kütlesi belirlenmiştir. Her bir kütlede belirlenen kuyu/kaynak ile kalite ve miktar izlemeleri gerçekleştirilmiş olup; risk, trend analizi, eşik değer belirleme, ekonomik analiz, tedbir ve önlem programları çalışmaları yapılmıştır.

Kuzey Ege ve Küçük Menderes Havzalarında yüzey ve yeraltısularının bütün olarak incelendiği Nehir Havza Yönetimi projeleri yürütülmektedir. Şimdiye kadar her iki havzada da su kütleleri belirlenmiştir. Su kütleleri belirlenirken Su Çerçeve Direktifi ve rehber dökümanlar, ulusal ve uluslararası daha önceki projelerde belirlenmiş olan metodolojiler gözden geçirilerek havzaların özeline uygulanmıştır. Kuzey Ege Havzası'nda 31 adet, Küçük Menderes Havzası'nda ise 42 adet yas kütle belirlenmiştir. Her bir kütlenin doğal ve antropojenik unsurlara bağlı baskı durumları esas alınarak kalite ve miktar izlemeleri yapılmıştır. Gelinen aşamada baskı ve etkiye göre izlemeler gerçekleştirilmiş, eşik değer ve trend analiz çalışmaları ile ekonomik analiz ve çevresel hedefler rapor çalışmaları tamamlanılmıştır.

DSİ Genel Müdürlüğü, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından koordine edilen tüm proje ve çalışmalarda; faydalanıcı ve paydaş yer almıştır. Kurumsal ve teknik kapasitenin artmasıyla, yeraltısuyu kütle çalışmaları artık Kurumlarımız tarafından da yapılmaktadır. Yönetmeliğin yayınlanması ile havzalarımızda yapılan çalışmalar ile suların genel durumları ortaya konulmuştur. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar sonucunda; yönetmeliğin öngördüğü şekilde yeraltısularının iyi duruma ulaşması için, Su Çerçeve Direktifi ve rehber dökümanlar incelenerek, ülkemizdeki havzaların özelliklerine göre oluşturulan metodolojiye göre öncelikle yeraltısuyu kütleleri belirlenmiştir. Kütleler belirlenirken, jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri dikkate alınarak birimlerin su taşıma özelliklerine göre sınıflandırma yapılmıştır. Yeraltısuyu bulunduran birimler ile süreç devam ettirilerek, birimlerin su taşıma potansiyeline göre gruplandırma yapılmıştır. Ardından yeraltısuyu ile bağlantısı olan ekosistemler belirlenmiştir. Akiferlerin hidrojeolojik özellikleri incelenerek, verimli ve sınırlı yas bulundurma potansiyeline göre sınıflandırılma yapılmıştır. Sınırlı yas içeren birimlerin iletkenlik, özgül debi, nüfus yoğunluğu, arazi kullanımı incelenerek yapılan istatistiksel analizler ile yas kütleler belirlenmiştir. Kütlelerin belirlenmesinin ardından karakterizasyonu yapılmıştır. Her kütlenin üzerindeki doğal ve antropojenik baskıları belirlenerek, kütlelerdeki etkileri kalite ve miktar izlemeleri yapılmaya

başlanılmıştır. Kalite izlemeleri gözlemsel ve operasyonel olarak yapılmaya başlanılmıştır. İzlemeler direktiflerin öngördüğü şekilde 6 yıl boyunca önce gözlemsel ardından operasyonel olarak devam ettirilecektir. Bu kapsamda; Seyhan ve Ceyhan Havzalarında yas kütle belirleme çalışmaları tamamlanılmış, yas kütle karakterizasyonları yapılmış, baskı-etki-risk raporları tamamlanılmıştır. Kızılırmak, Marmara, Doğu Akdeniz, Doğu Karadeniz, Antalya ve Batı Karadeniz Havzalarımızda yas kütle belirleme çalışmaları, ayrıntılı karakterizasyon, baskı-etki-risk çalışmaları; havzalarda devam etmekte olan hidrojeolojik etüt çalışmaları ile birlikte devam ettirilmektedir. Belirlenen yas kütlelerde kalite ve miktar izlemeleri sürdürülmektedir. Ayrıca Daire Başkanlığımız tarafından da 4 havzada Dicle, Çoruh, Van ve Aras Havzalarında yas kütle belirleme çalışmaları tamamlanılmış, karakterizasyon çalışmaları devam etmektedir.

Hidrojeolojik etüt çalışmaları kapsamında kalite çalışmaları temel anyon ve katyon analizlerinin yapılarak su kökeni ve tipinin ortaya konulmasıyla başlamıştır. Su üzerinde noktasal ve yayılı kirleticilerin artışı, antropojenik ve jeojenik kirliliklerin varlığı nedeniyle kalite izleme parametreleri artırılarak daha fazla parametre izlenilmektedir. Su Çerçeve Direktifi ve rehber dökümanlara uyumlu olarak, havza ve yas kütle özeline ait parametreler öncelikle gözetimsel olarak izlenilmekte, gözetimsel izleme tamamlandıktan sonra eşik değeri aşan parametreler için operasyonel izlemeler yapılmaktadır.

Projelerde izleme çalışmaları tamamlanan havzalarda genel miktar ve kalite değerlendirme çalışmalarına başlanılmıştır. Bu raporlarda kalite ve miktar izleme yapılan izleme noktaları, elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Miktar ve kalite izleme ağı büro ve arazi çalışmaları ile değerlendirilmektedir. Burdur Havzası için yapılan ilk rapor diğer havzalarımız için de yapılmaya başlanılmıştır.

3. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Ülkemizdeki bütün su kaynaklarının planlanması, yönetimi, geliştirilmesi ve işletilmesinden sorumlu olan Kurumumuz kuruluşundan itibaren gerek yüzey suyu gerekse yeraltısuyu için etüt çalışmalarını sürdürmektedir. Ova alanları temsil edecek sınırları kapsayan "Yeşil Rapor" etüt çalışmaları, artık havza ve alt havza ölçeğinde yapılmaktadır. Bu kapsamda Gediz, Burdur ve Akarçay Havzaları hidrojeolojik etüt çalışmaları tamamlanılmış; Kızılırmak, Marmara, Doğu Karadeniz, Batı Karadeniz, Antalya, Doğu Akdeniz Havzalarında hidrojeolojik etüt çalışmaları devam etmektedir. Hidrojeolojik etüt çalışmaları jeoloji ve hidrojeoloji ile başlayıp, miktar ve kalite izleme çalışmaları ile sürdürülmekte, su kullanımı için tüm kuyu ve kaynakların arazi tespiti yapılmakta, yağış ve akarsu değerleri, yetiştirilen bitki paternine göre yeraltısuyu bütçeleri hesaplanılmaktadır. Yapılan tüm yeraltısuyu çalışmaları 167 sayılı kanunun gerektirdiği şekilde yürütülmekte olup, 2012 yılında Su Çerçeve Direktifi'ne uyum sağlamayı kolaylaştıracak "Yeraltısularının Kirlenmeye ve Bozunmaya Karşı Korunması Hakkındaki" yönetmelik kapsamındaki çalışmaları da içerecek şekilde sürdürülmektedir. Yönetmeliğin belirttiği gibi yeraltısuyu kütleleri belirlenilmektedir. Ülkemize özel yas kütle belirleme metodolojisi oluşturularak havzalarda yas kütleler belirlenmektedir. Metodoloji her havzanın kendi özelliklerine göre gerek duyulduğunda değiştirilerek kütle belirleme çalışmaları tamamlanılmaktadır.

Yas kütle belirlendikten sonra, kütlede miktar ve kalite izleme çalışmaları yapılmaktadır. İzleme noktası seçiminde kütledeki baskı unsurları dikkate alınarak seçim yapılmakta ve havza özeline has parametreler izlenilmektedir. Baskının sebep olduğu etkiyi yorumlamak için ise; geçmiş dönem yapılmış olan seviye ve kalite izleme sonuçları kullanılarak

Ülkemizde şimdiye kadar yürütülen ulusal ve uluslararası projeler doğrultusunda yas kütle belirleme ve nehir havza yönetimi çalışmaları yapılmış ve bir kısmı da devam etmektedir. Çalışmaları yapılan Büyük Menderes, Konya Kapalı, Susurluk, Meriç-Ergene, Gediz, Akarçay, Sakarya, Kuzey Ege, Küçük Menderes, Burdur, Batı Akdeniz, Yeşilırmak, Marmara, Batı Karadeniz, Doğu Karadeniz, Doğu Akdeniz, Antalya, Kızılırmak, Seyhan ve Ceyhan Havzalarımızda yas kütle belirleme çalışmaları tamamlanmıştır.

4. KAYNAKLAR

Akkaya C., Efeoğlu A., Yeşil N., (2006). "AvrupaBirliği Su Çerçeve Direktifi ve Türkiye'de Uygulanabilirliği" TMMOB Su Politikaları Kongresi, Kongre Sempozyum Kitabı Cilt 1, 195-204. Ankara

Aygün M., Akça G., (2012). "Bakanlığımız ve Bağlı Kuruluşlarınca Yürütülen Ar-Ge Nitelikli Projeler Raporu", Orman ve Su İşleri Bakanlığı Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, Ankara.

Büyük Menderes Nehir Havzası Yönetim Planı, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara 2010.

Devlet Su İşleriGenelMüdürlüğü,http://www.dsi.gov.tr/kurumsal-yapi/hakkimizda (ErişimTarihi: 10.05.2019)

Havza Koruma Eylem Planlarının Nehir Havzası Yönetim Planlarına Dönüştürülmesi Teknik Yardım Projesi Yönetici Özetleri (RIBAMAP), Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara 2017.

Orman ve Su Bakanlığı, http://gediz.ormansu.gov.tr/gediz/anasayfa/resimlihaber/16-06-21/Gediz_Havzas%C4%B1_Yeralt%C4%B1_Sular%C4%B1_%C3%96rnek_%C3%87al%C4%B1%C5%9Fmas%C4%B1_Devam_Ediyor.aspx?sflang=tr(ErişimTarihi: 10.05.2019)

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Kuzey Ege Havzası NHYP, https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM, (ErişimTarihi: 09.05.2019)

Tarım ve Orman Bakanlığı, SYGM, (2017). Yeraltısuları Miktar ve Kalite Özelliklerinin Ortaya Konulması ve Değerlendirilmesi Konusundaki Uygulamalar: Gediz Havzası Örnek Çalışması-Nihai Rapor

Tarım ve Orman Bakanlığı, SYGM, (2019), Burdur ve Batı Akdeniz Havzaları Yeraltı Sularının Miktar ve Kalite Özelliklerinin Ortaya Konması ve Değerlendirilmesi Projesi Nihai Rapor

Tarım ve Orman Bakanlığı, SYGM, (2019), Yeşilırmak Havzası Yeraltı Sularının Miktar ve Kalite Özelliklerinin Ortaya Konması ve Değerlendirilmesi Projesi Nihai Rapor

Tarım ve Orman Bakanlığı, SYGM, (2019), Kuzey Ege Nehir Havza Yönetim Planı Hazırlanması Projesi Nihai Raporu

Tarım ve Orman Bakanlığı, SYGM, (2019), Küçük Menderes Nehir Havza Yönetim Planı Hazırlanması Projesi

Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ, (2019). Marmara Havzası Yas Kütle Belirleme, Baskı Etki, Karakterizasyon Raporu

Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ, (2019). Antalya Havzası Yas Kütle Belirleme, Baskı Etki, Karakterizasyon Raporu

Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ, (2019). Doğu Akdeniz Havzası Yas Kütle Belirleme, Baskı Etki, Karakterizasyon Raporu

Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ, (2019). Doğu Karadeniz Yas Kütle Belirleme, Baskı Etki, Karakterizasyon Raporu

Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ, (2019). Batı Karadeniz Yas Kütle Belirleme, Baskı Etki, Karakterizasyon Raporu

Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ, (2020). Seyhan ve Ceyhan Yas Kütle Belirleme, Baskı Etki, Karakterizasyon Raporu

Water Framework Directive, 2000. https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html

Yeraltısularının Kirlenmeye ve Bozunmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik, (2012). ResmiGazete, Sayı: 28257, http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/04/20120407-10.htm

Türkiye'de Sürdürülebilir Yeraltısuyu Yönetiminin Değerlendirilmesi

Evaluation of Sustainable Groundwater Management in Turkey

N. Erdoğan[1,*], M.M. Toklu[1]

[1] *DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara (*namierdogan@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Yeraltısuları insan yaşamı için önemli bir kaynaktır. Dünya üzerinde artan nüfus ve aşırı yeraltısuyu tüketimi ile yeraltısuları üzerindeki baskı giderek artmaktadır. Bu yüzden yeraltısuyu sistemlerinin emniyetli kullanımı, sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimine ihtiyaç duymaktadır. Sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi akiferlerin kalıcı olarak kullanılmasını amaçlamaktadır. Genel olarak sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi; akiferden yeraltısuyu çekimi, kabul edilemeyen çevresel, ekonomik ve sosyal zararlara sebep olmamalıdır. Bu çalışmanın ilk aşamasında, sürdürülebilir yeraltısuyu yönetiminin önemli onsekiz ilkesi dört bölüm altında (planlama, uygulama, izleme ve değerlendirme) tanımlanmıştır. İkinci aşamasında Türkiye'deki yeraltısuyu yönetimi kapsamında yapılan uygulamaların bu ilkeleri ne kadar içerdiği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda Türkiye'nin yeraltısuyu hakkındaki yasası, yönetmelikleri, raporları ve bazı projeleri incelenmiştir. Sonuçlar Türkiye'de sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi çalışmalarının son 10 yılda arttığını göstermektedir. Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi'nin çıkan yeni yönetmeliklerle Türkiye'nin yeraltısuyu yönetimine uyarlanması, yeraltısuyu kütlelerinin miktar ve kalitesinin korunması ve geliştirilmesi için havzalarda yeraltısuyu kütlelerinin belirlenmesi, artan sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi çalışmalarının önemli göstergeleridir. Bununla birlikte Türkiye'de sürdürülebilir yeraltısuyu yönetiminde geliştirilmesi gereken noktalar olduğu anlaşılmaktadır: planların multi-disipliner olarak hazırlanması, akiferlerin izleme ve veri toplama çalışmalarının yaygınlaştırılması, su tüketicileri arasında farkındalığın artması ve suyun bilinçli kullanımı, havza ölçekli su yönetim süreçlerine bütün paydaşların eşit olarak katılmasıdır. Son ama bir o kadar da önemli olarak, Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi'nin ülkelerde uygulanmasının uzun bir sürece yayıldığı ve çeşitlilikler gösterdiği, üye ülkeler tarafından belirtilmiştir. Sürdürülebilir yeraltısuyu yönetiminde başarılı sonuçların zaman alacağı unutulmamalıdır ve Türkiye'de ki çalışmalar kararlılıkla devam ettirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Yeraltısuyu Yönetimi, Su Çerçeve Direktifi, Türkiye

ABSTRACT: *Groundwater is an important resource for human life. With the increasing population and excessive groundwater consumption in the world, the pressure on groundwater is increasing. Therefore, safe use of groundwater systems requires sustainable groundwater management. Sustainable groundwater management aims permanently use of aquifers. Sustainable groundwater management in general groundwater abstraciton from the aquifer should not cause unacceptable environmental, economic and social damages. In the first phase of this study, eighteen important principles of sustainable groundwater management are defined under four chapters (planning, implementation, monitoring and evaluation). In the second stage, it has been evaluated how much the implementations made within the scope of groundwater management in Turkey include these principles.Turkey's groundwater law, regulations, reports, and some projects have been examined. The results indicate that sustainable groundwater management studies have incresed over the last decade in Turkey. The adaptation of EU Water Framework Directive to Turkey's groundwater management with the new regulations, determination of groundwater bodies in the basin to protect and develop quantity and quality of groundwater bodies,which are important indicators of increasing sustainable groundwater management study. However, it is understood that there are points to improve about sustainable groundwater management in Turkey: the preparation of multi-disciplinary plans, dissemination of monitoring aquifers and data collection, the increasing of awareness among water users and effective using of water , equal participation of all partners in the basin-scale water management process. Last but not least, it has been stated by the member countries that the implementation of the European Union Water Framework Directive in countries has spread over a long period and shows diversity. Sustainable management of groundwater should be noted that successful results will take some time and studies in Turkey should be continued with determination and perseverence.*

Keywords: *Sustainable Groundwater Management, Water Framework Directive, Turkey*

1. GİRİŞ

Kalf & Woolley (2005) tarafından yapılan çalışmaları incelediğinde, 1915'de ortaya çıkan 'emniyetli verim' kavramının yıllar içinde değiştiğini ve 2000 yılında 'sürdürülebilir verim' halini aldığını göstermiştir. Sophocleous (2000) tarafından sürdürülebilir verim'in, emniyetli verimden farklı olarak, yeraltısuyuna bağlı sistemleri (nehir, kaynaklar ve sulak alanların) göz önünde bulundurduğunu belirtilmiştir. Uzun yıllar yapılan çalışmaların sonucunda günümüzde sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi kavramı ortaya çıkmıştır. Akiferlerin devamlı olarak kullanılmasını, akiferden su çekiminin kabul edilmeyen çevresel, ekonomik ve sosyal sonuçlara neden olmaması şeklinde tanımlanmıştır (Alley vd., 1999; Loucks, 2000). Dottridge ve Abu Jaber (1999) akiferden su çekimi, beslenimden yüksek olduğu zaman var olan yeraltısuyu yönetimi kesin olarak sürdürülemez olduğunu eklemiştir. Genel anlamda, sürdürülebilir su yönetimi, sürdürülebilir kalkınmanın üç boyutu arasındaki dengeyi dikkate alır: ekonomik verimlilik, sosyal eşitlik ve çevresel sürdürülebilirlik (Durán-Sánchez, Álvarez-García ve del Río-Rama, 2018). Bu çalışmanın ilk bölümünde, yıllar içinde sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi konusunda yapılan çalışmaların incelemesinin sonucunda öne çıkan on sekiz ilke dört bölüm altında (planlama, uygulama, izleme ve değerlendirme) detaylı olarak açıklanmıştır. İkinci bölümde, Türkiye'de yeraltısuyu yönetimi için yapılan çalışmaların bu belirlenen on sekiz ilkeyi ne kadar içerdiği genel olarak incelenmiştir.

2. SÜRDÜRÜLEBİLİR YERALTISUYU YÖNETİMİ

2.1 Planlama

Multi-Disipliner Yeraltı Suyu Yönetimi

Loucks (2000) su yönetimi için tek disiplinle bakış açısının yetersiz olduğunu ve su kaynakları yönetiminin çoklu disiplinleri içeren bir süreç olduğuna inanmaktadır. Hidrologlar ve mühendisler su kaynakları sistemleri tasarlayıp inşa edebilirler, ancak yüzeysuyu ve yeraltısuyunun sürdürülebilir kullanımı ve yönetimi, hukukçular, müteahhitler, agronomistler, iklim uzmanları, çevreciler, ekonomistler, kimya ve biyoloji uzmanları, sosyal bilimciler, siyasi ve bölgesel bilim adamları gibi diğer disiplinlerin desteğine ihtiyaç duyar (Van der Gun, 2012; Stout, 1998; Loucks, 1992). Bu nedenle sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi, birden çok hedefi karşılamak için multidisipliner bir sisteme ve işbirliğine dönüşmüştür (Van der Gun, 2012; Bruce vd., 2009). Buna ek olarak, United Nations (2020) yukarıda bahsedilen çeşitli disiplinlerin interdisipliner çalışarak, farklı bakış açılarıyla bilgileri birlikte analiz ederek, karar vericilere gerekli sonuçları sunmalarının uygun olacağını belirtmektedir. Son olarak Gleeson vd. (2012) gerekirse dışarıdan uzmanlar ve kuruluşlar tarafından teknik destek önermektedir.

Uygun Ölçekli Yönetim Planları

Merkezi yönetim sistemi yüzyıllardır su kaynaklarını iyileştirmiş ve yönetmiştir (Alley ve Leake, 2004). Ancak koordinasyon eksikliği gibi dezavantajları olabilmektedir (Konikow ve Kendy, 2005). Bu nedenle merkezi yönetim sistemlerinin, nüfus artışı nedeniyle oluşan yüksek talebi karşılaması ve herkese erişilebilir temiz su sağlaması nedenleriyle yerel yönetim birimlerine atanması faydalı olabilir (Alley ve Leake, 2004). Bunun için, uygun ölçekli yeraltı suyu yönetimi önemlidir (Bruce vd., 2009). Sürdürülebilir yeraltı suyu yönetiminde havza ölçeği (Alley ve Leake, 2004) veya akifer ölçeği (Gleeson vd., 2012) önerilmektedir. Bununla birlikte, Loucks (2000) uygun ölçeğin belirlenirken, havza ekonomisi, çevre, ekosistem, kaynak kullanımı ve insan sağlığı faktörlerinin göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmektedir. Sonuç olarak, etkili merkezi kararlar ve koordinasyonun sağlandığı uygun ölçekli yönetimi planları başarıya erişebilir (Jakeman vd., 2016).

Çeşitli Akiferler için Farklı Yönetim Yaklaşımları

Bazı akiferler yalnızca uygun iklim koşulları ve coğrafi konumlar altında çok yavaş yenilenebilir (Kalf ve Woolley, 2005). İzotop ve radyoizotop verileri, bazı akiferlerin yaklaşık bir milyon yıl önce bol yağışlı dönemlerde beslendiğini göstermektedir (Gleeson vd., 2010). Bu akiferler, yenilenemeyen

kaynaklar (Kalf ve Woolley, 2005) veya fosil yeraltı suyu (Margat vd., 2006) olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, bazı akiferlerde ülke sınırları ve akifer sınırları benzer değildir, bu akiferler sınıraşan akiferler olarak adlandırılır (Sandoval-Solis, McKinney ve Loucks, 2011). Akifer türlerine göre sorunlar değişmektedir. Gleeson vd. (2010) yeraltısuyu seviye düşümü (akifer rezervlerinin madenciliği) fosil akiferlerdeki en önemli sorun olarak vurgularken, sınıraşan akiferlerde farklı sorunlar bulunmaktadır: paydaş ülkeler arasında koordinasyon ve şeffaflık, yetersiz izleme, verilere erişilebilirlik önemli sorunlardır (Voss vd., 2013; Jakeman vd., 2016; Bruce vd., 2009). Sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimi, fosil akiferleri (yenilenemeyen kaynakları) gelecek nesiller için korunmalı ve geliştirilmelidir (Loucks, 2000). Sınıraşan akiferler veya havzalar, paylaşılan ülkelerin karar vericileri arasında işbirliği ile bağımsız olarak yönetilmelidir (Bruce vd., 2009).

Yeraltı ve Yüzey Sularının Etkileşimi

Yeraltısuyu tablasının değişmesi, yeraltısuyu ile yüzeysuyu arasındaki akış yönlerini değiştirebilir. Ancak geleneksel su kanunları genellikle yeraltı suyu ile yüzey suyu arasındaki fiziksel ilişkiyi dikkate almamaktadır (Alley vd., 1999; Famiglietti, 2014). Gelişmiş ülkelerdeki çoğu su kanunu ve politikası yenilenmemiştir. Yeraltı suyu ve yüzey suyu, sürdürülebilir su yönetimi için tek bir kaynak olarak düşünülmeli ve birlikte yönetilmelidir (Sakiyan ve Yazicigil, 2004; Burgess, 2002; Kalf ve Woolley, 2005).

Modelleme

Yeraltısuyu alanında modelleme, gelecek tahminleri ve planlama için gerekli bir araçtır. Yeraltısuyu modelleri, mevcut tüm verileri nicel bir temelde mantıksal ve bütünsel bir resim halinde bir araya getirmemize izin verir (Kinzelbach, Bauer, Siegfried ve Brunner, 2003). Bu nedenle hidrojeolojik modeller, gelecekteki senaryoları tahmin etmek, su kaynaklarını sürdürülebilir bir şekilde yönetmek ve bazı sosyal, ekonomik ve çevresel etkilerin zararlarını azaltmak için karar vericiler tarafından kullanılabilir (Alley vd., 1999; Ajami, Hornberger ve Sunding, 2008). Yeni araştırmalar ve izlemeler modelleri iyileştirebilir (Bruce vd., 2009). Bu nedenle modeller, yeraltısuyu sisteminden gelen gerçek verilerle periyodik olarak güncellenmelidir (Alley vd., 1999).

Su Kalitesi

Yüzeysuyu kalitesi ve miktarı, yeraltısuyunun karışmasıyla etkilenecektir (Konikow ve Kendy, 2005). Örneğin, yeraltısuyunun yüzey suyuna deşarjı akarsulara tuz girdisine neden olabilir (Brodie vd., 2007). Bunun tersi olarak da sulamadan süzülen sular veya tuzlu su girişimi yeraltısuyu kalitesini düşürebilir. Bu sorunların etkileri mutlaka planlama boyunca araştırılmalıdır (Kalf ve Woolley, 2005).

Ekolojik Yaşam

Geçmişte hazırlanan, yeraltısuyu yönetim planları ekolojik yaşamının yeraltısuyuyla ilişkisini ihmal ederek, yeraltısularıyla beslenen kaynakları ve sulak alanları dikkate almamaktadır (Burgess, 2002). Ancak su ekosistemleri (akarsular ve sulak alanlar), özellikle kuraklıklar boyunca yeraltısularına bağlı olabilir (Brodie vd., 2007). Bu nedenle su yöneticileri, insanların, tarımsal ve çevresel gereksinimler arasındaki dengeyi göz önünde bulundurmalıdır (Konikow ve Kendy, 2005). Sonuç olarak, nehir, kaynak, sulak alanlar ve diğer yeraltı suyuna bağlı ekosistemlerin miktarını ve kalitesini korumak için akiferlerden su çekimi, akiferin besleniminden daha az olmalıdır (Sophocleous, 2000).

İklim Değişikliği

İklim değişikliği ve hidrolojik döngüdeki ilgili değişiklikler, sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi için zorluklar ortaya çıkarmaktadır (Famiglietti, 2014; Sandoval-Solis vd., 2011). İklim değişikliği nedeniyle hidrolojik döngünün değişimi, sürdürülebilir su yönetimi çalışmaları için farklı hidrolojik koşullar altında tahmin edilmeli ve değerlendirilmelidir (Sandoval-Solis vd., 2011). İklim değişikliğinin farklı etkileri vardır. Birincisi, kurak dönemlerde su talebini karşılamak için yeraltısuyu tüketimi artmaktadır

(Alley vd., 1999). İkincisi, yeraltısuyu beslenimi, ortalama yağış, sıcaklık ve mevsimsel yağış dağılımındaki değişikliklerden etkilenmektedir (Van der Gun, 2012). Üçüncüsü, sel ve kuraklıkların sıklığı ile şiddeti artmakta bununla birlikte dağlık bölgelerdeki kış kar paterni iklim değişikliğinden etkilenmektedir (Konikow ve Kendy, 2005). Son olarak, sığ akifer ve yüzey kaynakları arasında ilişki olması nedeniyle bitki örtüsü, akarsular, göller, sulak alanlar ve kaynaklar zarar görmektedir. Sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi, iklim değişikliği etkilerini azaltmak için hayati bir rol oynayabilir (Alley vd., 1999). Famiglietti (2014), değişen yağış trendleri, yeraltısuyu çekim miktarı, sel ve kuraklık gibi olayların gelecek yönetim stratejilerinde yeniden düşünülmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Hedefler için Uzun Periyotlar

Yeraltısuyunun yenilenme süreci on yıllardan binlerce yıla kadar değişmektedir (Margat vd., 2006). Bu nedenle sürdürülebilir su kalitesi ve miktarı hedefleri, 50 ila 100 yıl gibi çok kuşaklı bir zaman ufkuna sahip olmalıdır. (Sophocleous, 2005; Alley vd., 1999). Gleeson vd. (2012), hazırlanan uzun vadeli planların yeraltısuyu sistemlerinin sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesini sağladığına inanmaktadır. Bu nedenle yeraltısuyu yönetimi konularının uzun vadeli stratejiler gerektirdiği toplumlar, politika yapıcılar, su yetkilileri ve kuruluşlar tarafından anlaşılmalıdır (Knüppe, 2011; Kalf ve Woolley, 2005).

Yeraltısuyu Yönetim Planlarının Sistem Riskleri

Yeraltısuyu yönetim planlarını iyileştirmek için riskler tahmin edilmelidir (Loucks, 2000). Riskin olumsuz sonuçları ve olasılıkları, planlama sürecinde mühendisler ve planlamacılar tarafından belirlenmeli ve geliştirilmelidir (Hashimoto, 1982). Su kaynağı sistemlerinde, risk değerlendirmesi ve risk yönetimi planlaması, bu sistem etkilerinden kimin sorumlu olduğunu veya kimin zarar gördüğünü dikkate almalıdır. Uzun vadeli su talebi, koruma programları ve ekstrem olaylar gibi bazı riskler normal koşullarda verimli su tüketimi için değerlendirilmelidir (Loucks, 2000).

2.2 Uygulama

Sürdürülebilir Verim

Seward vd. (2006) güvenli verim ve sürdürülebilir verim tanımlarının arasındaki farkı vurgulamaktadır. Güvenli verim, ekonomi, su kalitesi ve yasal hakları içerirken, sürdürülebilir verim ek olarak çevrenin ve toplumun önemini vurgular. Sonuç olarak sürdürülebilir verim çevre, toplum ve ekonomi hedefleri arasındaki dengeyi kurarak, nesiller arası ve kuşaklar arası eşitlik sağlar (Alley ve Leake, 2004; Gleeson vd., 2012). Sürdürülebilir verimin belirlenmesi kişiden kişiye göre değişmektedir (Kalf ve Woolley, 2005). Bu nedenle Sakiyan ve Yazicigil (2004), evapotranspirasyon, akarsu akımı, sızma ve akiferden boşalan kaynaklar gibi bazı parametrelerden kaynaklı olarak bazı yönetim planlarında sürdürülebilir verim hesaplamasının yanlış olduğuna inanmaktadır. Sonuç olarak Sophocleous (2000) yeraltısuyu çekimi, yeraltısuyu besleniminden yüksek olmamalıdır ve kayıplar (evapotranspirasyon, akarsulara akış, kaynaklar ve sızıntılar) sürdürülebilir verim hesaplanırken dikkate alınmalıdır.

Farkındalığı Arttırmak ve Su Tasarrufu

De Stefano vd. (2015) su kullanıcılarının yeraltısuyu yönetiminde kritik rollere sahip olduğuna inanmaktadır. Çünkü su kullanıcılarının kararları, genellikle herhangi bir yeraltısuyu politikasının başarısını veya başarısızlığını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yeraltısularının sürdürülebilir bir şekilde yönetilebilmesi için yeraltısuyu sorunlarına ilişkin farkındalığın artırılması gerekmektedir (Knüppe, 2011; Sophocleous, 2010). Bununla birlikte sulamada kayıpları azaltan, kapalı sulama kanalları gibi modern sulama sistemlerinin yaygınlaştırması faydalı olacaktır (Konikow ve Kendy, 2005).

Geniş Katılım

Alley vd. (1999) ve Gleeson vd. (2012) uygulanabilir ve ulaşılabilir sürdürülebilir yeraltısuyu yönetiminin su yöneticileri, yerel topluluklar ve hidrojeologlar arasında işbirliği gerektirdiğine

inanmaktadır. Bu gruplar uzun vadeli hedefleri, politikaları ve önlemleri birlikte uygulamaya koymalıdırlar. Bütün karar süreçlerinde paydaşların işbirliği, entegre yeraltısuyu yönetiminde önemli bir faktördür (Margat vd., 2006; Savenije ve Van der Zaag, 2008).

Nesil İçi ve Kuşaklar Arası Eşitlik

Yeraltısuyu sürdürülebilirliği, değer odaklı bir nesil içi ve kuşaklar arası eşitlik süreci olarak tanımlanmaktadır (Gleeson vd., 2012). Birincisi, yeni politika ve su kaynaklarının yönetimi hakkaniyet ilkesine sahip olmalıdır (Knüppe, 2011). İnsan yaşamı için hayati bir gereklilik olan tatlı su kaynaklarına erişim, temel bir insan hakkıdır (Savenije ve Van der Zaag, 2008). Bu nedenle, sosyal eşitliği geliştirmek için faydalar eşit olarak dağıtılmalıdır (Margat vd., 2006). İkincisi, su sonsuz bir kaynak değildir, bu nedenle gelecek nesillerin hakları düşünülerek, verimli bir şekilde tüketilmelidir (Jha vd., 2007). Bu nedenle kuşaklar arası eşitlik dikkate alınmalı ve günümüzün ihtiyaçlarını karşılamak için gelecek nesillerin ihtiyaçları göz ardı edilmemelidir (Giordano, 2009).

2.3 İzleme

Erişilebilir ve Güncel Veriler

Yeraltısuyu yönetimi uygulamalarına ortalama koşullara göre karar verilir, bu nedenle tarihsel olarak mümkün olan en uzun veri serilerinden faydalanılmaktadır (Kalf ve Woolley, 2005). Ajami vd. (2008) meteorolojik ve hidrolojik gözlemlerin bazı hatalarının olabileceği konusunda uyarmaktadır. Bu nedenle Sophocleous (2000) mevcut olan verileri geliştirecek, yeni veriler toplamayı vurgulamaktadır. Gleeson vd. (2010) yeni verilerle yeraltısuyu yönetim planlarının sürekli olarak güncellenmesini önermektedir. Bununla birlikte, akarsu akışı, yağış ve buharlaşma verilerinin gözlemleri genel olarak hükümetler tarafından kontrol edilir ve bazı ülkelerde bu verilere erişim için izin alınması gerekir. Bu kısıtlama, hidrolojik çalışmaların niteliğini ve miktarını etkiler (Voss vd., 2013). Teknik parametrelerin ve yeraltısuyu kaynak verilerinin mevcut formatlarla kolayca erişilebilir olması yeni hidrojeolojik çalışmalar için önemlidir (Margat vd., 2006).

Modern Teknoloji

Modern teknoloji, uydu verileri, yeraltı suyunun hareketi, bitki örtüsü ve yüzey suyunun dağılımı, jeoloji ve jeomorfoloji gibi hızlı ve pratik temel bilgileri sağlar. Bu bilgiler yeraltısuyu yönetiminde verimliliği artırmaktadır (Jha vd., 2007; Loucks, 2000; Konikow ve Kendy, 2005). Örneğin, GRACE NASA tarafından, su izleme ve karasal su depolama alanları (kar, yüzey suyu, toprak nemi ve yeraltısuyu) gibi verileri uydu aracılığıyla toplayarak, zaman tasarrufu ve erişilemeyen bölgelerden veri toplayan bir yöntemdir (Voss vd., 2013) .

2.4 Değerlendirme

Yeraltısuyu Yönetim Planlarının Etkinliği

Planlardaki uygulamaların izleme sonuçları, hazırlanan planların etkinliğini değerlendirmek için kullanılmalıdır (Adams vd., 2003). Değerlendirme, su yöneticilerine program performansı, politika veya düzenlemelerin etkinliği, politikaların toplum ve çevre açısından durumları hakkında bilgi verir ve planlarda geliştirilmesi gereken alanları belirler (Carr vd., 2012; Sandoval-Solis vd., 2011).

Uyarlanabilir Yönetim Planı

Yönetim koşulları değişmektedir: nüfus artışı, iklim değişikliği. Bu nedenle sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi planları, kolaylıkla güncellenebilir, değişikliklere daha dayanıklı ve yeni nesillerin ihtiyaçlarıyla bağlantılı olmalıdır (Loucks, 2000; Gleeson vd., 2012). Uyarlanabilir yönetimi gerçekleştirmek için öncelikle uzun vadeli hedef belirlenmelidir (Knüppe, 2011). Bundan sonra, yönetim hedefleri düzenli olarak yeniden değerlendirilir. Son olarak, yönetim planını iyileştirmek için belirlenen hedeflerde bazı yeniden düzenlemeler yapılmalıdır (Seward vd., 2006). İzleme, bu

uyarlanabilir yönetim stratejisinin tam olarak ana bileşenidir (Margat vd., 2006). Örneğin, izlenmenin sonuçlarına göre akiferlerde sürdürülebilir verim değeri yenilenmelidir (Sophocleous, 2000).

3. SONUÇLAR

Bu bölümde yukarıda detaylı olarak açıklanan sürdürülebilir yeraltısuyu yönetiminde bulunması gereken ilkeler sırasıyla Türkiye'de yapılan çalışmalarla değerlendirilecektir. Genel olarak bakıldığında, yeni yasal düzenlemeler, projeler ve eylem planları sürdürülebilir yeraltısuyu konusunda Türkiye'de ki önemli çalışmalardır. Planlama ve izleme konusunda yapılan çalışmaların etkili olduğu düşünülürken, uygulama aşamasında geliştirilmesi gereken noktalar bulunmaktadır.

AB SÇD'nin etkisiyle yeni yönetmeliklerin hazırlanması Yeraltı Suları'nın Kirlenmeye Ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (2012) gibi ya da hazırlanan yeni raporlar ve yönetim planları (bütün yüzeysuyu havzaları için hazırlanan master planlar, yeraltısuyu kütlelerinin bir çok havzada (havza bazlı) belirlenmesi, belirlenen su kütlelerinde kalite ve miktar açısında yeraltısuyunun periyodik olarak gözlenmesi, (Nehir Havza Yönetim Planları, Kuraklık Yönetim Planları, Taşkın Yönetim Planları ve Sektörel Su Tahsis Planlarının hazırlanması) sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi açısından Türkiye'deki olumlu adımlara gösterilebilecek, örnek çalışmalardır. Bu çalışmalar ile sürdürülebilir yeraltısuyu yönetiminin birçok ilkesinin Türkiye'de uygulandığı görülmektedir.

Örneğin, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) ve Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM), Türkiye'de su yönetimi konusunda çalışan iki önemli kurumdur. Bünyelerinde barındırdıkları birçok farklı disiplinden uzmanlar, bir projelerde multi-disipliner çalışmaya olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, gerektiğinde yurt içi ve yurtdışından farklı kurum ve üniversitelerle yapılan fikir alışverişleri, farklı fikirlerin su yönetimine katılmasına olanak sağlamaktadır.

İklim değişikliği konusu DSİ ve SYGM tarafından yapılan yeni çalışmalarda dikkate alınan önemli bir konudur. Farkındalığın artırılması için hazırlanan projeler (Su Elçileri vb.), su kütlelerindeki buharlaşma kayıplarını engellemek için inşa edilen yeraltı barajları, suni beslemelerle akiferlerin beslenmesi, kuraklık eylem planları ya da gelecek dönemlerdeki iklim projeksiyonları (ClimaHydro Projesi) teknik ve sosyal olarak etkili çalışmalar olmasına rağmen, iklim değişiklisi konusu global ölçekde ve ülkeler bazında daha çok göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konu olduğu açıktır.

Bununla birlikte AB'nin yayınladığı raporlara göre, sosyal ve politik problemler her ülkede planların uygulanmasında en büyük dezavantajlardır. Yeraltısuyunun sürdürülebilir olarak kullanması bütün su paydaşlarının bu konuya önem vermesine ihtiyaç duymaktadır. Yönetimsel alınacak kararların, su tüketicileri tarafından desteklenmesi gerekmektedir. Bilinçsiz tüketim akiferlerin kurumasına ve yeraltısuyunun gelecekte kullanılmamasına neden olacaktır. Bu durum zorunlu olarak, yeraltısuyunun tüketiminin bazı yerlerde sınırlandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu aşamada sosyal bilimcilerin multi-disipliner çalışmanın bir gereği olarak, su tüketicilerinin tutumunu değiştirmek için desteğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra, Avrupa Birliği ülkelerinde caydırıcı bir bileşen olarak uygulanan para cezaları, yaptırım aracı olarak düşünülebilir. Modernizasyon (kapalı sistem sulama) ve az su tüketen bitkilerin ekimi gibi ek uygulamalar da yeraltısuyun verimli kullanılmasını sağlayacak teknik çözümler olarak düşünülebilir.

Sürdürülebilir su yönetimi, güncel verilere ihtiyaç duymaktadır. Türkiye'de güncel verilerin toplamasına bütün ilgili kurumlar önem vermesi gerekmektedir. Toplanan verilerin değerlendirilmesi, planların geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Son ama bir o kadar önemli nokta, sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi çalışmaları uzun süreçlere ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalar sabırla desteklenmelidir. Unutulmamalıdır ki, yeraltısuyunun sürdürülebilir yönetimi, ülkemize birçok katkılar sağlayacaktır.

4. KATKI BELİRTME

Hazırlanan bu bildiri, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün desteğiyle Birleşik Krallık da hazırlanan 'Determination Of Sustainable Groundwater Management Principles And The Improvement Of Impediments Of Groundwater Management System In Turkey Via UK And EU Implementations (2020)' başlıklı yüksek lisans tezinin, yeni bilgilerle tekrardan gözden geçirilmesiyle özeti niteliğindedir. Yüksek lisans eğitimim boyunca destekleri için kurumuma teşekkür ederim.

5. KAYNAKLAR

Adams, B., Calow, R., Chilton, J., Klinck, B., Lawrence, A., Morris, B. ve Robins, N. (2003). *Groundwater and its susceptibility to degradation: A global assessment of the problem and options for management*. United Nations Environment Programme ; British Geological Survey; Belgian Development Cooperation ; Department for International Development.

Ajami, N. K., Hornberger, G. M. ve Sunding, D. L. (2008). Sustainable water resource management under hydrological uncertainty. *Water Resources Research*, *44*(11), 1–10. doi:10.1029/2007WR006736

Alley, W. M. ve Leake, S. A. (2004). The Journey from Safe Yield to Sustainability. *Ground Water*, *42*, 12–16.

Alley, W. M., Reilly, T. E. ve Franke, O. L. (1999). *Sustainability of Groundwater Resources*. *U.S. Geological Survey Circular* (C. 1186). doi:10.1016/B978-0-12-382182-9.00062-1

Brodie, R., Sundaram, B., Tottenham, R., Hostetler, S. ve Ransley, T. (2007). *An adaptive management framework for connected groundwater-surface water resources in Australia*.

Bruce, J. P., Cunningham, W., Freeze, A., Gillham, R., Gordon, S., Holysh, S., … Therrien, R. (2009). *The sustainable management of groundwater in Canada*. *Council of Canadian Academies*.

Burgess, D. B. (2002). Groundwater resource management in eastern England: A quest for environmentally sustainable development. *Geological Society Special Publication*, *193*, 53–62. doi:10.1144/GSL.SP.2002.193.01.04

Carr, G., Blöschl, G. ve Loucks, D. P. (2012). Evaluating participation in water resource management: A review. *Water Resources Research*, *48*(11), 1–17. doi:10.1029/2011WR011662

De Stefano, L., Fornés, J. M., López-Geta, J. A. ve Villarroya, F. (2015). Groundwater use in Spain: an overview in light of the EU Water Framework Directive. *International Journal of Water Resources Development*, *31*(4), 640–656. doi:10.1080/07900627.2014.938260

Dottridge, J. ve Abu Jaber, N. (1999). Groundwater resources and quality in northeastern Jordan: Safe yield and sustainability. *Applied Geography*, *19*(4), 313–323. doi:10.1016/S0143-6228(99)00012-0

Durán-Sánchez, A., Álvarez-García, J. ve del Río-Rama, M. de la C. (2018). Sustainable water resources management: A bibliometric overview. *Water (Switzerland)*, *10*(9). doi:10.3390/w10091191

Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, *4*(11), 945–948. doi:10.1038/nclimate2425

Giordano, M. (2009). Global Groundwater? Issues and Solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, *34*(1), 153–178. doi:10.1146/annurev.environ.030308.100251

Gleeson, T., Alley, W. M., Allen, D. M., Sophocleous, M. A., Zhou, Y., Taniguchi, M. ve Vandersteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Ground Water*, *50*(1), 19–26. doi:10.1111/j.1745-6584.2011.00825.x

Gleeson, T., VanderSteen, J., Sophocleous, M. A., Taniguchi, M., Alley, W. M., Allen, D. M. ve Zhou, Y. (2010). Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience*, *3*(6), 378–379. doi:10.1038/ngeo881

Hashimoto, T., Stedinger, J. R. ve Loucks, D. P. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria. *Water Resources Research*, *18*(1), 14–20.

Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D. ve Ross, A. (2016). *Integrated Groundwater Management:Concepts, Approaches and Challenges*. *National Centre For Groundwater Resarch and Training*. doi:10.1007/978-3-319-23576-9_24

Jha, M. K., Chowdhury, A., Chowdary, V. M. ve Peiffer, S. (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: Prospects and constraints. *Water Resources Management*, *21*(2), 427–467. doi:10.1007/s11269-006-9024-4

Kalf, F. R. P. ve Woolley, D. R. (2005). Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeology Journal*, *13*(1), 295–312. doi:10.1007/s10040-004-0401-x

Kinzelbach, W., Bauer, P., Siegfried, T. ve Brunner, P. (2003). Sustainable groundwater management - Problems and scientific tools. *Episodes*, *26*(4), 279–284. doi:10.18814/epiiugs/2003/v26i4/002

Knüppe, K. (2011). The challenges facing sustainable and adaptive groundwater management in South Africa. *Water SA*, *37*(1), 67–80. doi:10.4314/wsa.v37i1.64110

Konikow, L. F. ve Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, *13*(1), 317–320. doi:10.1007/s10040-004-0411-8

Loucks, D. P. (1992). WATER RESOURCE SYSTEMS MODELS: THEIR ROLE IN PLANNING, *118*(3), 214–223.

Loucks, D. P. (2000). Sustainable water resources management. *Water International*, *25*(1), 3–10. doi:10.1080/02508060008686793

Margat, J., Foster, S. ve Droubi, A. (2006). Concept and importance of non-renewable resources. S. Foster ve D. P. Loucks (Ed.), *Non-Renewable Groundwater Resources* içinde . United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Sakiyan, J. ve Yazicigil, H. (2004). Sustainable development and management of an aquifer system in western Turkey. *Hydrogeology Journal*, *12*(1), 66–80. doi:10.1007/s10040-003-0315-z

Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C. ve Loucks, D. P. (2011). Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *137*(5), 381–390. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000134

Savenije, H. H. G. ve Van der Zaag, P. (2008). Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth*, *33*(5), 290–297. doi:10.1016/j.pce.2008.02.003

Seward, P., Xu, Y. ve Brendonck, L. (2006). Sustainable groundwater use, the capture principle, and adaptive management. *Water SA*, *32*(4), 473–482. doi:10.4314/wsa.v32i4.5287

Sophocleous, M. (2000). From safe yield to sustainable development of water resources - The Kansas experience. *Journal of Hydrology*, *235*(1–2), 27–43. doi:10.1016/S0022-1694(00)00263-8

Sophocleous, M. (2005). Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal*, *13*(2), 351–365. doi:10.1007/s10040-004-0385-6

Sophocleous, Marios. (2010). Groundwater legal framework and management practices in the High Plains aquifer, USA. *Groundwater management practices*, (January 2010).

Stout, G. E. (1998). Sustainable Development Requires the Full Cooperation of Water Users. *Water International*, *23*(1), 3–7. doi:10.1080/02508069808686725

United Nations. (2020). *WATER AND CLİMATE CHANGE*.

Van der Gun, J. (2012). *Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges*. *UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME*.

Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., De Linage, C., Rodell, M. ve Swenson, S. C. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resources Research*, *49*(2), 904–914. doi:10.1002/wrcr.20078

Yazar İndeksi / *Author Index*

Acar, K., *61*
Akbaş, F.T., *463*
Akın, M., *455*
Akın, M.K., *455*
Alan, H., *395*
Arıoğlu., E., *3*
Arslan, B., *347*
Aslantaş, G., *147*
Atakan, A., *347*
Atalar, C., *123*
Avcı, B., *261, 269*
Avcı, K., *423*
Aydan, Ö., *97, 183, 191, 199, 207, 215, 277, 287, 383, 447, 471, 497*
Aydın, A., *463*
Aydın, H., *21*
Bağcı, M., *549*
Beytekin, Ö., *413*
Boyraz, M.Z., *423*
Bozkurtoğlu, E., *29, 37, 139, 329, 533, 575*
Büyüksaraç, A., *431*
Çağan, N.S., *463*
Can, A., *61*
Çan, T., *167, 175, 463*
Cavlaz, C.R., *261, 269*
Çetin, S., *223*
Çıkrıkcı, B., *223*
Çörekçioğlu, E., *463*
Coşkun, Ç., *115*
Coşkun, Ö., *523*
Coşkun, T., *115*
Dalgıç, S., *69, 115*
Dinçer, İ., *455*
Dönmez, H.O., *357*
Duman, T.Y., *261, 269*
Ekmekçi, M., *487*
Engin, A., *147*
Er, S., *423*
Erdoğan, N., *603*
Erdoğan, S., 321*, 405*
Erik, D., *367*
Ersoy, H., *123, 131, 541*
Eyisüren, O., *431*
Eyüboğlu, R., *29, 329, 575*
Gökçeoğlu, C., *61*
Gündüz, İ., *79*
Gürocak, Z., *157*
Hazar, A., *147*
Higa, Y., *287*
Inoue, H., *199, 287*
İşoğlu, S.S., *549*
Ito, T., *97, 199, 287, 383, 497*
Iwata, N., *471*
Jahed, A.B., *183*
Kalhan, E., *313*
Kanose, K., *471*
Karaca, Ö., *431, 439*
Karagüzel, R., *29, 321, 395*
Karahan, M., *123, 131, 541*
Karakaş, A., *37*
Karakaş, M., *305*
Karapınar, D., *481*
Kayabaşı, A., *233*
Kayhan, H., *295*
Keskin, N., *243*
Kılıç, R., *523, 567*
Kıncal, C., *295, 305, 313*
Koç, Ü., *595*
Koca, T.K., *253*
Koçak, C., *29*
Köksal, R.E., *243*
Kucak, R.A., *481*
Küçükaslan, N., *157*
Kumsar, H., *191, 207, 215, 471, 585*
Kurşun, A., *25*
Kuşku, İ., *559*
Kuzu, C., *29*
Mahmutoğlu, Y., *29, 47, 105, 223, 243, 375, 481*
Malistani, N., *183*
Miyagi, T., *447*
Morkoç, A., *595*
Murayama, Y., *497*
Mutlutürk, M., *367*
Naohiko, T., *287*
Nasiry, N.Z., *183*
Ok, A.Ö., *455*
Okabe, N., *447*
Orhan, A., *455*
Özcan, N.T., *97, 497*
Özdamar, A.R., *79*
Özdilek, T., *261*
Özentürk, B., *439*
Özhan, U., *413*
Özkarslı, H.M., *105*
Özkütük, Ö., *321*
Özmen, M., *213, 595*
Özyürek, Y.E., *61*
Paksoy, E., *533*
Peker, S., *541*
Pınar, Z., *243*
Polat, F., *147*
Poşluk, E., *69*
Samur, C., *347*
Şans, G., *29, 87, 223, 329, 575*
Sarayköylü, T., *79, 585*
Sarıdede, M., *47*
Selçuk, G., *139*
Semiz, B., *191, 207*
Şimşek, N., *37*
Şimşek, O., *261, 269*
Şirin, T., *147*
Sünnetçi, M.O., *123, 131, 541*
Suzuki, K., *447*
Tağa, H., *405*
Tamashiro, M., *383*
Taş, Y., *261*
Tayyar, D., *487*
Tekin, S., *167, 175*
Tokashiki, N., *199, 383*
Toklu, M.M., *595, 603*
Tolun, K., *223*
Topal, C., *375*
Topal, T., *455*
Topçuoğlu, Y.A., *157*
Tunçdemir, H., *87, 357*
Türker, A., *47*
Türkmen, S., *337*
Uçar, C., *87*
Ulamış, K., *523, 567*
Ulugergerli, E.U., 439
Ünal, M.Ö., *233*
Ündül, Ö., *533*
Vardar, M., *29*
Yaprak, S., *337*
Yazıcıgil, H., *487*
Yıldız, A., *549*
Yıldız, C., *505*
Yılmaz, M., *347*
Yücel, Ç., *595*
Yüksel, F.A., *423*
Zabcı, C., *139*
Zorlu, K., *413*

ISBN 978-975561529-5