

Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu

National Symposium on
Engineering Geology and
Geotechnics

12-14 EKİM 2017 ADANA

12-14 OCTOBER 2017

EDİTÖRLER / EDITORS

Tolga ÇAN, Hidayet TAĞA, Hakan ERSOY

MÜHJEO 2017



Çukurova Üniversitesi
Çukurova University
Mithat Özsan Amfisi
Mithat Özsan Hall



MÜHJEO'2017 ULUSAL MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ VE JEOTEKNİK SEMPOZYUMU
12-14 EKİM 2017, ADANA / TÜRKİYE

MÜHJEO'2017 NATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND
GEOTECHNICS
12-14 OCTOBER 2017, ADANA / TURKEY

MÜHJEO'2017 ULUSAL MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ VE JEOTEKNİK SEMPOZYUMU

MÜHJEO'2017 NATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND GEOTECHNICS

Editörler / *Editors*

Tolga ÇAN, Hidayet TAĞA, Hakan ERSOY

Düzenleme / *Organized by*

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Çukurova University, Faculty of Engineering and Architecture, Geological Engineering Department

Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Mersin University, Faculty of Engineering, Geological Engineering Department

Mühendislik Jeolojisi Derneği
Turkish Society for Engineering Geology

ISBN: 978-605-9374-63-7

Baskı: Karahan Kitabevi - Adana
www.karahankitabevi.com

Baskı: Alev Dikici Basım ve Amb. San. Tic. Ltd. Şti. - Adana
0322 / 435 13 13 - info@alevdikici.com

Bu bildiriler kitabının yayım hakkı, Mühendislik Jeolojisi Derneği'ne aittir. Bu kitapta yer alan bildirilerin aynen yayımlanması yazar(lar)ından izin alınması koşuluyla mümkündür. Alıntı için kaynak gösterilmesi yeterlidir. Bildiriler, Sempozyum Hakem Kurulu tarafından değerlendirilmiş olup, yazarları tarafından basıma hazır hale getirilmiştir. Bildirilerin içeriklerinin tüm sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.

Bu bildiriler kitabı FUGRO SIAL Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Limited Şirketi'nin katkılarıyla basılmıştır.

ÖNSÖZ

Mühendislik Jeolojisi Derneği'nin (MühJeoDer) kuruluş amaçları arasında yer alan "Türkiye'de mühendislik jeolojisi konusunda gereksinim duyulan bilimsel iletişimi etkin bir biçimde sağlamak amacıyla, ulusal ve uluslararası düzeyde bilimsel toplantılar (kongre, sempozyum, konferans, çalıştay vb.) düzenlemek veya düzenlenmesine destek olmak" maddesi kapsamında her iki yılda bir düzenlenmesi öngörülen Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumlarının (MühJeo'2017) ikincisi, Çukurova ve Mersin Üniversiteleri ile Mühendislik Jeolojisi Derneği'nin ortaklaşa katkılarıyla 12-14 Ekim 2017 tarihleri arasında Çukurova Üniversitesi Yerleşkesinde gerçekleştirilmiştir.

MühJeo'2017 Sempozyumu ile mühendislik jeolojisi ve jeoteknik (hidrojeoloji ve jeotermal enerji de dahil olmak üzere) alanında yapılan araştırmaların sunulması ve tartışılması, teknik ve bilimsel gelişmelerin uygulamalı jeoloji camiası mensupları arasında paylaşılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda MühJeo'2017 Sempozyumu, ilgili konularda çalışan araştırmacıları, mühendisleri, firma temsilcilerini, yönetici çevrelerini ve öğrencileri aynı platformda buluşturarak bilimsel ve teknik anlamda daha yaygın ve yararlı bir iletişim ve işbirliği gerçekleştirme ortamı sağlamıştır.

Sempozyum Bildiriler Kitabı'nda yer alan çalışmalar başlıca; yeraltı açıklıklarında mühendislik jeolojisi ve jeoteknik, kaya kütlelerinin karakterizasyonu, şev duraylılığı ve heyelanlar, mühendislik uygulamalarında hidrojeoloji, kaya ve zeminlerin jeoteknik özellikleri, tarihi yapıların korunmasında mühendislik jeolojisi, su yapılarında mühendislik jeolojisi ve jeoteknik, mühendislik jeolojisinde tehlike ve risk, doğal yapı malzemeleri gibi konuları içermektedir. Öncelikle gönderilen bildiri özleri Sempozyumun amaç ve konularına uygunlukları açısından değerlendirilmiş, daha sonra bildiri tam metinleri davet edilen Sempozyum Hakem Kurulu üyelerince değerlendirilmiş ve son aşamada Editörlükçe kontrol edilerek programa alınmış ve basılmıştır. MühJeo'2017 Sempozyumu Bildiriler Kitabı'nda 45 adet bildiri bulunmaktadır. Bildirilerin alınması ve değerlendirilip sonuçlandırılması sürecinde, tüm aşamalar Mühendislik Jeolojisi Derneği'nin Web sayfası üzerinde (<http://www.muhsjeoder.org.tr/sempozyum>) Açık Konferans Sistemi (Open Conference Systems-OCS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan sistem ile MühJeo'2017 yanısıra, MühJeo'2015 bildirilerine de ayrı ayrı veya bildiriler kitabı şeklinde ulaşım sağlanmaktadır.

MühJeo'2017 Web sayfasını Açık Konferans Sistemini kullanarak gerçekleştirmemizi sağlayan Dr. Fatih KARAOĞLAN'a, Sempozyum'a bildiri göndererek katkılarını esirgemeyen tüm yazarlara, bildirileri zaman ayırarak değerlendiren Sempozyum Hakem Kurulu'na, çağrılı konuşmacı olarak Sempozyum'a destek veren Prof. Dr. Mahir VARDAR'a, tüm katılımcılara, Sempozyum'a destek veren kamu kurum ve kuruluşlarıyla mesleki derneklere, Sempozyum'a reklam ve maddi katkı sağlayarak destekleyen tüm kuruluşlara ve kuşkusuz sempozyumun başarılı şekilde geçmesi için her türlü katkıyı sağlayarak ev sahipliği yapan Çukurova Üniversitesi ve Mersin Üniversitesi Rektörlükleri ile bu üniversitelerin Jeoloji Mühendisliği Bölümlerine şükranlarımızı sunarız.

Sempozyum Düzenleme Kurulu

Bu sempozyumun düzenlenmesinde katkıda bulunan kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.
Valuable contribution of the following organizations is gratefully acknowledged.



Sempozyum Onursal Başkanları / *Honorary Chairmen*

Prof. Dr. Mustafa KİBAR
Çukurova Üniversitesi Rektörü
Rector, Çukurova University

Prof. Dr. Ahmet ÇAMSARI
Mersin Üniversitesi Rektörü
Rector, Mersin University

Sempozyum Eş Başkanları / *Symposium Co-Chairmen*

Prof. Dr. Reşat ULUSAY
(MühJeoDer)
Hacettepe Üniversitesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Prof. Dr. Ulvi Can ÜNLÜGENÇ
Çukurova Üniversitesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Prof. Dr. Kemal TASLI
Mersin Üniversitesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Sempozyum Sekreteri / *Symposium Secretary*

Doç. Dr. Tolga ÇAN
(Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü)

Düzenleme Kurulu / *Organizing Committee*

Prof. Dr. Mehmet EKMEKÇİ *(Hacettepe Üniversitesi, MühJeoDer)*
Prof. Dr. Hasan ÇETİN *(Çukurova Üniversitesi)*
Prof. Dr. Şaziye BOZDAĞ *(Çukurova Üniversitesi)*
Prof. Dr. Cüneyt GÜLER *(Mersin Üniversitesi)*
Doç. Dr. Hakan ERSOY *(Karadeniz Teknik Üniversitesi, MühJeoDer)*
Doç. Dr. Kıvanç ZORLU *(Mersin Üniversitesi)*
Yrd. Doç. Dr. Hidayet TAĞA *(Mersin Üniversitesi)*
Hüseyin ALAN *(TMMOB, Jeoloji Mühendisleri Odası)*
Dr. Mehmet TATAR *(Jeoloji Mühendisleri Odası Adana Şubesi)*
Emre PINARCI *(Çukurova Üniversitesi)*
Senem TEKİN *(Çukurova Üniversitesi)*
Ümit YILDIRIM *(Mersin Üniversitesi)*

Hakem Kurulu / *Scientific Committee*

AKGÜN, Aykut (Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon)
AKIN, Müge (Abdullah Gül Üniversitesi, Kayseri)
AKSOY, Hüsnü (Atılım Üniversitesi, Ankara)
AYDIN, Harun (Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van)
BİNAL, Adil (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
BULUT, Fikri (Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon)
DUMAN, Tamer Yiğit (Fugro Sial, Ankara)
ERİK, Dursun (Karayolları Bölge Müdürlüğü, Sivas)
FIRAT ERSOY, Arzu (Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon)
IŞIK, Nihat Sinan (Gazi Üniversitesi, Ankara)
KARAGÜZEL, Remzi (İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul)
KARAKUL, Hasan (İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir)
KILIÇ, Recep (Ankara Üniversitesi, Ankara)
KOCA, Mehmet Yalçın (Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir)
KOÇBAY, Ayhan (DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara)
KUMSAR, Halil (Pamukkale Üniversitesi, Denizli)
KURTTAŞ, Türker (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
MAHMUTOĞLU, Yılmaz (İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul)
MUTLUTÜRK, Mahmut (Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta)
NEFESLİOĞLU, Ahmet Hakan (Akdeniz Üniversitesi, Antalya)
ÖZVAN, Ali (Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van)
TUĞRUL, Atiye (İstanbul Üniversitesi, İstanbul)
TUNCAY, Ergün (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)

İçindekiler / Contents

Çağrılı Konuşma

Yerbilimlerinden Jeotekniğe Giden Yolda Mühendislik Jeolojisinin Yeri ve İşlevleri / <i>The Position And Functions of Engineering Geology on the way From Geology to Geotechnics</i> M. Vardar	1
---	---

Yeraltı Açıklıklarında Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik

Demirkapı Tüneli (Antalya) Km:34+705.05-35+95.50 Arası Destek Sisteminin Sayısal Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi / <i>Assessment of Support System of the Section Km:34+705.05-35+95.50 of Demirkapı Tunnel (Antalya) by Numerical Analysis</i> M. Gök, H.A. Nefeslioğlu	5
Kargı HES Tüneli Güzergahında Gözlenen Jeolojik Birimlerin Tünel Delme Makinesi (TBM) İlerleme Hızına Etkisi / <i>Effect of Geological Units of Kargı HEPP Tunnel Alignment on Tunnel Boring Machines (TBM) Penetration Rate</i> Ç. Akkuş, O. Günaydın	12
Nefise Akçelik Tüneli (Ordu) Km:10+683-10+800 Arasında Gözlenen Aşırı Deformasyonlar ve Alınan Önlemlerin Uygulanması / <i>Observation of High Deformations and Protection Methods in Ordu Nefise Akçelik Tunnel between Ch:10+683-10+800</i> C.H. Şentürk	20
Darıca-Bayramoğlu Atıksu Tüneli Tünel Delme Makinesi (TBM) Seçimi ve Mühendislik Jeolojisi Araştırmalarının Projeye Olan Katkısı / <i>Selection of Tunnel Boring Machine (TBM) for Darıca-Bayramoğlu Wastewater Tunnel and Contribution of the Engineering Geology Investigations to Project</i> A. Altuntaş, Ö. Coruk	27

Kaya Kütlelerinin Karakterizasyonu

Kaya Kütlelerinin Kesme Dayanımının Tayini İçin Çok Pratik Bir Yöntem / <i>A Practical Method for Determining The Shear Strength of Rock Mass</i> K. Kayabalı , K. Zorlu, F. Habibzadeh, D. Yılmaz	35
Kaya Kütlelerinin Kesme Dayanımının Çok Aşamalı Kesme Deneyi İle Belirlenmesi / <i>Determination of Shear Strength of Rock Mass by multi-Stage Shear Test</i> K. Zorlu, K. Kayabalı, F. Habibzadeh, T. Beyaz, D. Yılmaz	43

Tarihi Yapıların Korunmasında Mühendislik Jeolojisi

Mermerlerde Isıl Etki Nedeniyle Oluşan Şekerlenme Sorununun Kestirimi / <i>Prediction of Sugaring Problem by Thermal Treatment in Marbles</i> Y. Mahmutoğlu	50
İstanbul'daki Tarihi Yapılarda Kullanılan Önemli Yerli Doğal Taşların Kaynak Alanlarının Araştırılması / <i>Investigation of Potential Resources Areas of Indigenous Natural Stones Used in Historical Buildings in Istanbul</i> Y. Mahmutoğlu, O. S. Angı, I. E. Özmen, Z. Yeşilkaya	58

Şev Duraylılığı ve Heyelanlar

TKİ Hüsamlar Linyit Açık İşletmesi Güney Şevlerindeki Duraysızlık Mekanizmaları / <i>Mechanisms of Instabilities at South Slopes of TKİ Hüsamlar Lignite Open Pit Mine</i> K.C. Solak, E. Tuncay, R. Ulusay	66
Tersun (Gümüşhane/Şiran) Barajı Göl Alanındaki Paleo-Heyalandan Kaynaklanacak Dalga Etkisinin Ampirik Eşitlikler Kullanılarak Araştırılması / <i>Investigation Of Wave Effect Of Tersun (Gümüşhane / Şiran) Dam Due To Paleo-Landslide In Lake Area By Using Empirical Equations</i> M. Karahan, H. Ersoy, A. Akgün, M.O. Sünnetci, A. Taflan, S. Peker	74
Artvin Baraj Gölü Heyelanının Oluşturacağı Olası Dalga Etkisinin Ampirik Yaklaşımlarla İrdelenmesi / <i>Investigation of the Possible Wave Effect of the Artvin Dam Reservoir Landslide with Empirical Approaches</i> H. Ersoy, M. Karahan, A. Akgün, K. Tezel	82
Mersin-Tarsus Otoyolunun Kuzey Şevlerindeki Duraysızlıkların Değerlendirilmesi / <i>Evaluation of Instabilities at Northern Slopes along Mersin-Tarsus Motorway</i> H. Tağa	88
Adana İli Heyelan Duyarlılık Analizi / <i>Landslide Susceptibility Analysis of Adana City</i> M. Dizdar, H. Üstüner	96
Hopa (Doğu Karadeniz) Bölgesi Heyelan Olay Envanter Haritası ve Yağış Şiddet İlişkisi / <i>Rainfall Intensity - Duration Relationship and Event Landslide Inventory of Hopa (Eastern Black Sea) Region</i> T. Çan, T. Duman	103
Gümüşhacıköy (Amasya) - Osmancık (Çorum) Dolaylarının Frekans Oranı Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi / <i>Landslide Susceptibility Evaluation Gümüşhacıköy (Amasya)-Osmancık (Çorum) Region using Frequency Ratio Method</i> M. M. Becer, T. Çan, S. Tekin	111
Gökçay Havzasının Karar Ağaç Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi / <i>Landslide Susceptibility Assessment of the Gökçay Watershed using Decision Tree Method</i> S. Tekin, T. Çan.....	119
Frekans Oranı Metodu Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritası Hazırlanması: Gölpazarı (Bilecik, Güney Marmara) Örneği / <i>Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio Method: An Example From Gölpazarı (Bilecik, South Marmara)</i> E. Sayın, B. Balaban, M. M. Becer.....	127
Drenaj ve Ağaçlandırma ile Heyelan Rehabilitasyonu Eskişehir, Mihalıçcık, Gürleyik Köyü Örneği / <i>Landslide Rehabilitation with Drainage and Afforestation: Example of Gürleyik Village, Mihalıçcık, Eskişehir</i> A. K. Özcan, İ. Bulut, S. Karakaya, A. Küçüköngül.....	135
Güllübağ Göleti (Uşak) Sağ Sahil Mansap Heyelanının Mühendislik Jeolojisi İncelemesi / <i>Engineering Geology Investigation of the Landslide Located in Left Abutment Downstream of Güllübağ (Uşak) Dam</i> H. Kumsar, Ö. Aydan	143
Edirne - İpsala Hamzadere Barajı Sifon Yapısı Heyelanı / <i>Edirne - İpsala Hamzadere Dam Siphon Canal Landslide</i> C. Yıldız	151

Mühendislik Uygulamalarında Hidrojeoloji

Aşağı Seyhan Ovası (Mersin-Adana) Yeraltı Sularının Tarımsal Sulama Suyu Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi / <i>Assessment of Ground Waters in the Lower Seyhan Plain with Respect to Irrigation Water Quality</i> C. Akbulut Camuzcuoğlu, C. Güler	158
---	-----

Karst Susuzlaştırmasının Obruk Oluşumuna Etkisi: Afşin-Elbistan Linyit Sahası Örneği <i>The effect of dewatering on sinkhole occurrence: Case study of the Afşin-Elbistan Coal Basin</i> Y. Mahmutoğlu, R. Karagüzel, G. Şans, M. Erdoğan, E. Bozkurtoğlu, H.S. Akyüz, T. İşseven, C. Taştekin, E. Ata	164
--	-----

Evaporitik Sahalardaki Karstik Boşlukların, Yer Radarı (GPR) Yönetimi ile Tespiti / <i>The Detect Of Karstic Spaces At Evaporitic Areas, By The Ground Penetrating Radar (GPR) Method</i> D. Erik, S. Koşaroğlu	172
--	-----

Kaya ve Zeminlerin Jeomühendislik Özellikleri

Subaşı Viyadüğü İnşa Alanındaki Kaya Kütlelerinin Taşıma Gücü Açısından İncelenmesi (Hopa-Artvin) / <i>Bearing Capacity Assessment of the Rock Masses at the Subasi Viaduct Site (Hopa-Artvin)</i> A. Kaya, F. Bulut.....	179
--	-----

Dane Boyu Dağılımında Ağırlık – Hacim İlişkisinin Zemin Sınıflaması Üzerine Etkisi / <i>Research on Effects of Classification between by Weight-by Volume in Particle Size Distribution</i> M. Mutlutürk, D. Hiçyılmaz.....	186
--	-----

Yapay Bimrock Örneklerinin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Dayanım Oranı (Blok Dayanımı/Bağlayıcı Dayanımı) İle İlişkisinin Araştırılması / <i>Investigation of the Relationship Between Strength Ratio (Block Strength/Matrix Strength) and the Physical and Mechanical Properties of Artificial Bimrock Samples</i> M.O. Sünnetci, M. Karahan, H. Ersoy, O. Yazıcı	194
--	-----

Mersin Limanı' ndaki Zeminlerin İndeks ve Konsolidasyon Özelliklerinin Değerlendirilmesi / <i>Assesment of Index and Consolidation Properties of Sediments at Mersin Harbor</i> A. Alptekin, H. Tağa	200
---	-----

Farklı Kayalarda Ultrasonik Yöntem ile Belirlenen Poisson Oranının Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerle İlişkisinin Belirlenmesi / <i>Determination of the Relationship Between Poisson's Ratio and Physical, Mechanical and Chemical Properties Of Different Type Rocks</i> İ. Akkaya, A. Özvan, M. Tapan, M. Bor, E. Erdeve Özvan	208
--	-----

Dinamik Eksenel Yük Uygulanan Kumlu Marn ve Marnlı Kumtaşı Örneklerinin Dayanım ve Deformasyon Özelliklerinin İncelenmesi / <i>Investigation of Strength and Deformation Characteristics of Sandy Marl and Marly Sandstone Samples Under Dynamic Axial Load</i> T. Kadakçı Koca, M.Y. Koca	216
---	-----

Bazik Volkanik Kayaçlardan Türeme Regolitik Zeminlerin (Trabzon) Jeoteknik Özelliklerinin Araştırılması / <i>Investigation of the Geotechnical Properties of the Regolithic Soils (Trabzon) Originated from the Basic Volcanic Rocks</i> B. Kul Yahşi, H. Ersoy, M. Karahan, M.O. Sünnetci	224
---	-----

Darbe Etkisi altında Granit türü Farklı Kaya Malzemelerinin Çatlak İlerleme Enerjisinin Belirlenmesi üzerine Deneysel bir Çalışma / An Experimental Study on Determination of Crack Propagation Energies of Granite type Different Rock Materials under Impact Effect E. Kömürlü, A. Kesimal	231
Zeminlerin Yerinde İyileştirilmesinde NovoCrete® Teknolojisi ve Uygulamaları / <i>NovoCrete® Technology and Applications in Stabilization of In-Situ Soils</i> B. Yemenici, Ö. Coruk	239
İstanbul'daki mağmatik kayaların dayanım ve deformasyon özellikleri ile yan kayalar ile ilişkileri / <i>Strength and Deformation Characteristics of Magmatic Rocks from Istanbul and their Relation with the Surrounding Rocks</i> Ö. Ündül, B. C. Çobanoğlu	245
Güzelbahçe Balıkçı Barınağında Anroşman Olarak Kullanılan Kayaçların Kalite Açısından Değerlendirilmesi (Güzelbahçe / İzmir) / <i>The Investigation of Armourstones Quality used in Rubble Mound Breakwater (Güzelbahçe /İzmir)</i> M.H. Aboubacar, A.B. Yavuz	253
Kışlaköy Açık Ocak Kömür İşletmesi'nde (Elbistan / Kahramanmaraş) Yer Alan Jeolojik Birimlerin Jeomekanik Parametrelerinin Karşılaştırılması / <i>Comparison of Geomechanical Parameters of the Geological Units in Kışlaköy Open Pit Lignite Mine (Elbistan/Kahramanmaraş)</i> E. Pınarcı, H. Çetin, S. Ural	261
Su Yapılarında Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik	
Dispersif Killerin Tanımlanması ve Dispersivitenin Kestirimi / <i>Identification of Dispersive Clays and Prediction of Dispersivity</i> A. Turgut, N.S. Işık, K.E. Kasapoğlu	269
Atatürk Barajı Kil Çekirdeğinde Kullanılan Malzemenin Dispersivite Özelliğinin Araştırılması / <i>Investigation of Dispersivity Properties of the Material Used for Clay Core of the Atatürk Dam</i> M. Belen, E. Pınarcı, H. Çetin	277
Beypazarı Gölet Yerindeki Tüfün Temel Kaya Olabilirliğinin İncelenmesi, (Ankara) / <i>Investigation of Tuff as Foundation Material at Beypazarı Reservoir Site (Ankara)</i> K. Ulaşmış, R. Temiz, R. Kılıç	285
Yusufeli Barajı ve HES Projesi, Sağ Sahil Kret Üstü Kazılarında Kaya Şevlerinin Tahkimat Tasarımının Belirlenmesi / <i>Yusufeli Dam and HEPP Project, Designing Support of Rock Slopes during Right Bank above Crest Elevation</i> M.Ö. Ünal	292
Mühendislik Jeolojisinde Tehlike ve Risk	
Süttaşı Heyelanın (Giresun/Doğankent) Aslancık Barajına ve Doğankent İlçesine Etkilerinin Araştırılması / <i>The Investigation of the Effect of Süttaşı Landslide (Giresun/Turkey) on Aslancık Dam and Doğankent District</i> A. Akgün, M. Karahan, H. Ersoy, A. Taflan	300
Adana'da Afet Risk Yönetimi ve Sakınım Planı / <i>Urban Mitigation Plan and Disaster Risk Management in Adana</i> G. Keskin	308

Doğal Yapı Malzemeleri

Doğal ve Ergitilmiş Bazaltların Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması / <i>Comparison of Physico-Mechanical Properties of Natural and Melted Basalts</i> S. Er, A. Tuğrul	316
Alkali Silika Reaksiyonu Sonucu Harçlarda Görülen Genleşmeler Üzerine Uçucu Kül Katkısının Etkisi / <i>The Effect of Fly Ash Addition on the Expansions of Mortar due to Alkali- Silica Reaction</i> A. Binal	324
Agrega Kimyasal Bileşiminin Yüksek Dayanımlı Betonlar Üzerindeki Etkisi / <i>The Effects of Chemical Composition of Aggregate on High Strength Concretes</i> E. Gürsel, C. Erenson	330
Gelingüllü Barajındaki (Yozgat) Riprap Bloklarının Jeolojik ve Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi / <i>Investigation of Geological and Engineering Properties of Riprap Blocks at Gelingüllü Dam (Yozgat)</i> E. Kolay, M.Ö. Atay.....	338
Yazar İndeksi / <i>Author Index</i>	346

ÇAĞRILI KONUŞMA

Yerbilimlerinden Jeotekniğe Giden Yolda Mühendislik Jeolojisinin Yeri ve İşlevleri

On the way from Geology to Geotechnics the Position and Functions of Engineering Geology

M. Vardar

*İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, İstanbul
(vardar@itu.edu.tr)*

ÖZ: Beklentilerin karşılanması, gereksinimlerin giderilmesi ve ilerlemenin sağlanabilmesi için araç-gereç ve mekânların oluşturulması ve bunların kullanılması ile gerçekleştirilen çalışma ve uygulamalar “teknik” kavramı altında toplanır. “Mühendislik” ise bilimsel bilgi, deneyim ve görgülenme yoluyla ortam, koşul, malzeme, önlem, işlem, yöntem ve bunların yönetimi konusunda edinilmiş yetkinliği belirtir. Her ikisi de “yapay” lığın ifadesidir, ama doğrudan ya da dolaylı olarak doğanın içindedir ve değişik ölçülerde de onu kullanır. Jeoloji’ye gelince: “Jeoloji” yerkürenin kökenini, oluşumunu, değişimini, gereçlerini ve bulunış biçimini, iç ve dış etmenlere göre tarihsel ölçekte araştıran ve tanımlayan bir doğa bilimidir, doğal olanı, yerkabuğunun doğasını tanımlar. İşte mühendislik jeolojisi bu doğal ortamı yapay hedeflere, bir başka ifadeyle teknik hizmetlere hazırlayan uygulamalı bilim dalıdır.

Mühendislik Jeolojisi sistem büyüklüğü içindeki ortam ve koşulların koordinatlara bağlanarak somutlaştırılması işidir. “Sistem büyüklüğü” teknik girişimin etkilendiği ve etkilediği ortamın geometrik boyutudur.

Mühendislik Jeolojisi programlarının doğrudan belirleyicisi işin konusu ve içinde bulunulan proje aşamasıdır. Konu, kentsel yerleşim ve yerleşime uygunluk, çevresel kullanılabilirlik, biriktirme veya kirlenme sorunu, kütleli duraysızlıklar, karayolu-demiryolu-suyolu geçkileri, tüneller, metrolar, barajlar, yeraltı ya da yerüstü yapıları, yarmalar, şevler, kara, deniz ve su yapılarının temelleri gibi boy, boyut ve biçim farklılıkları gösteren sayısız, genelde yapım işlerine yöneliktir. Açık ocak ve yeraltı madencilığının ilk durum ve kalıcı durum değerlendirmeleri de genelde mühendislik jeolojisi kapsamındadır.

Mühendislik jeolojisi kapsamında yapılacak olan işlerin türü ve sayısı da planlama, fizibilite projesi, kesin proje ve uygulama projesi aşamaları için birbirinden çok farklı olur. İlke olarak, projenin her aşaması için formatlanmış araştırma ve çalışma programlarının kullanılması gerekir. Bunun dışında çıkmak gereksiz zaman ve para kaybına neden olur.

Mühendislik jeolojisi yalnızca koordinatlara, mevcut durum ve koşullara bağlanmış olan somut jeolojik verileri, ölçü ve deneye dayalı olan yaklaşımları kullanır. Mühendisin projelendirme ve uygulamada kullanabileceklerinin dışında kalan her türlü süzülmemiş, fazla ve gereksiz veri ve bilgi onun çalışmalarını karmaşıktırır, belirsizleştirir ve pek çok durumda emek, zaman ve para kaybına neden olur. Mühendis doğru ve güvenilir sonuçlar çıkarılabilmek, seçenek oluşturabilmek ve bunlardan teknik çözümler üretilebilen kararlara varabilmek için bu jeolojik bilgilerin neye, ne amaçla, nerede, hangi düzeyde, ne kadar, nasıl, ne zamanda, kim tarafından, kaç ve hangi formatta olması gerektiğini bilmek ve istemek zorundadır. Mühendislik jeolojisi var olan ve olası yer kökenli sorunları önceden kestirme ve doğal olanak ve koşulları en yararlı ve verimli biçimde kullanabilme yolunun bilimsel ve uygulamalı adıdır.

Mühendisi bu bilgi gereksinimine zorlayan, kayaçların inhomojenliği ve jeolojik yapıların karmaşıklığından kaynaklanan “Jeosistem”lerin çok parametrelili, karmaşık özellikleridir. Değişik sistem büyüklükleri içindeki süreksizlikler tür, miktar, konum ve yerleşimleri ile farklı kayaç dokuları oluştururlar. Özellikle kayanın ortamsal parametreleri ve davranışları (şekil değiştirme özellikleri, dirençleri, dayanımları, hidrolik parametreleri) boyut ve ölçek bağımlıdır. Bu nedenlerle çok titiz ve güvenilir veri tabanlarının oluşturulması gerektir.

Mühendislik Jeolojisi ortamları farklı mekanik davranışlarına göre zemin (ayrık kayaç), kaya ve geçiş kayacı olarak yeniden tanımlar ve onlara ilişkin kullanım parametrelerini genelde laboratuvar ve arazi testleri ve geçmişin birikimlerini de kullanan öngörü ve sezgilerle belirler. Bunun için uzmanlık deneyimi gerekir. Çatlaklı kayalarda süreksizliklere bağlı anizotropinin bulunması, kayaçların “çok fazlı ortam” özelliği taşınması ve boşluk ve çatlakların gaz ve/veya sıvı ile dolu olması nedeniyle her çalışma için oraya özgü özel çözümler geliştirilir.

Bu gerekçelerle hangi alanda olursa olsun her teknik girişim iç ve dış “Etmen Katmanları”nın dikkate alınarak hazırlandığı “Bölgeleme ve Değerlendirme Çalışmaları”ni gerektirir. Bunların yapılması için; ilk aşamada sırasıyla litolojik birimlerin saptanması, yapısal özelliklerin (katmanların, dokunakların, kıvrımların, fayların, süreksizliklerin) alfa-numerik tanımlanması, kayaç türlerinin mineralojik-jeokimyasal nitelik, özellik ve davranışlarının (erime, şişme, kabarma, bozunma, ayrışma) belirlenmesi, depremsellik, hidrolojik ve hidrojeolojik veri ve bilgilerin derlenmesi zorunludur. Bunları mevcut durumu yansıtan, “In-situ Gerilme Durumu”nun belirlenmesi ve kütlelel “Duraylılık-(Stabilite) Risk Haritaları”nın hazırlanması çalışmaları izler. Buradaki bölgelemeleri ve sınırları belirleyebilmek için “Teknik amaçlı Karar Matrisleri”nin oluşturulması gerekir.

Jeolojik/teknik Sistemlerin tanı ve belirlenmesinde izlenmesi gereken yöntem

- Veri toplama, jeolojik ortamların analizi ve özellikle doğa malzemesi niteliklerinin bilgi üretici işlemler aracılığıyla tanımı
- Doğal etmen ve koşulların ölçüm ve deneylerle saptanması
- Etkileşen teknik cisimlerle birlikte jeolojik cisimlerin modellenmesi
- Jeomekanik, jeodinamik ve deprem modellerinin kurulması
- Tepkime-benzetimi ile diğer öngörü ve irdeleme tekniklerinin kullanılması

adımlarını kapsar.

Kayaçalarda teknik girişim sürecinde oluşan tepkimelerin yerinin, biçiminin ve büyüklüğünün saptanabilmesi için önce tepkimenin ne olduğu, niçin ve nasıl olduğu ve hangi değerlerle ifade edildiği bilinmelidir. Daha sonra bunların geçici ve kalıcı durumlar için güvenilirliği tartışılmalı ve uygun tepkimeyi veren yapım öğeleri, önlemler, işlemler ve yöntemler belirlenmelidir. Kuvvetler, basınçlar, momentler, darbeler ve titreşimler mekanik etkime biçimleridir. Bunların şiddeti yer, yön, zaman ve yerine göre sıcaklık denetimiyle değiştirilebilir. Etkilenmeye karşı kayaçalarda mekanik tepkimeler oluşur. Bunlar gerilmeler ve deformasyonlar şeklinde olur ve sırasıyla gerilme durumu ve deformasyon durumu olarak belirlenir. Gerilme ve deformasyonların birim hacimde oluşturduğu tepkimenin değeri gerçekleşen işi, birim zamandaki değeri de direnmenin gücünü gösterir. Ortam niteliğinin değişmezliğini varsayan kısa süreli değerlendirmelerde, çoğun jeomekanik davranış parametrelerinin sabit kaldığı varsayılır. Kaya için bir ölçüde kabul edilebilirse de, özellikle ince daneli ve kohezyonlu zeminlerde ve geçiş kayaçlarında bu yaklaşım çok yanılgılı sonuçlara neden olur. Sonuç olarak; teknik girişimin gerçekleşmesi ve güvenli bir kalıcı yapının oluşturulması etkime ve tepkimelerin denetlenmesiyle başılır.

Tünel, temel yapıları ve destekleme düzenekleri ile kazı, sağlamlaştırma, susuzlaştırma, iyileştirme ve koruma işlemlerinin ve yapım yöntemlerinin belirlenmesi projelendirilmesi ve yetkinlikle uygulanması işi “Jeoteknik”in görev ve çalışma alanı içindedir. Buradaki başarı yerbilimlerinden başlayan ve oradan mühendislik jeolojisine, jeomekaniğe (zemin mekaniği-kaya mekaniği) ve jeodinamiğe uzanan yöntemli, titiz ve seçici bir disiplinler arası anlayışın oluşturulmasına bağlıdır.

Anahtar Kelimeler: Jeoloji, Mühendislik, Mühendislik Jeolojisi, Jeoteknik.

ABSTRACT: *The works and applications that are realized through the creation and use of tools and equipment's to meet the expectations, to eliminate the requirements and to provide advancement are gathered under the concept of "technical". "Engineering" refers to the acquired competence in terms of environment, conditions, materials, measures, processes, methods and their management through scientific knowledge, experience and empathy. Both are "artificial" expressions, but they are directly or indirectly in nature and use it in different measures. Well, to "geology". Geology is a natural science that investigates and identifies the origins, occurrences, changes, evolution, materials and rocks of the earth's crust on a historical scale according to internal and external factors. Geology defines "the natural", the nature of the earth's crust. And the "engineering geology" is the practical science that prepares this natural environment for artificial targets, in other words for technical services and goals.*

Engineering geology; it is the task to embody the environment and the circumstances within the system size by connecting them to the coordinates. The "system size" is the geometric dimension of the environment in which the technical enterprise is affected and influenced.

The direct determinant of engineering geology programs is the project topic and the involved project phase. The topic can be urban settlement and settlement suitability, environmental usability, accumulation or pollution problems, mass-slope instability, route detection for highways, railways, roads, tunnels, subways, dam engineering, underground or superstructures in different heights, sizes and shapes. They are usually numerous building activities. The analysis of the initial and permanent states of opencast mining and underground mining is generally also the task of engineering geology.

The types and the number of the works to be done within the scope of engineering geology are very different for planning, feasibility, final and application project stages. In principle, it is necessary to use formatted research and study programs for each stage of the project. Going out of it causes unnecessary time and money loss.

Engineering geology uses only the concrete geological data and approaches that are based on coordinates and measurements and tests, and linked to existing conditions. Any unfiltered, redundant, and unnecessary data and information that goes beyond what an engineer can use when designing and implementing them, complicate engineers work, and in many cases cause a loss of work, time, and money. For creating alternatives, for making accurate and reliable decisions and for producing technical solutions from these data the engineer has to know what geological information is for, what is its purpose, where, when, how, how much, in what way, in which format it is used. Engineering geology is the scientific and practical name of the way to predict existing and potential site-based problems and to use natural possibilities and conditions in the most useful and efficient way.

The engineer needs this multi-parameter work because of the complexity and heterogeneity of the geological structures of rocks and of the "Geosystems". The discontinuities with their quantity, position and texture form different rock patterns in different system sizes. Especially the environmental parameters and behavior of the rock (deformation characteristics, resistances, strengths, hydraulic parameters) depend on the size and the scale. For these reasons, precise and reliable databases must be created.

Engineering geology defines the ground of project area according to its various mechanical behavior as soil (loose material), rock and transition rock. Normally, it identifies the usage parameters by the data obtained in laboratory and field tests and with the predictions and intuitions of past knowledge accumulations. This requires expertise. There is anisotropy in cracked rocks due to discontinuities. The rocks are "multi-phase environment". Gaps and cracks are filled with gas and/or liquid. For these reasons, specific solutions are developed for each study.

Every technical initiative requires "Zoning and Evaluation Studies", which are based on internal and external "Agent Layers". Respectively for their preparation; in the first stage the determination of lithological units, alpha-numerical identification of structural features (geological contacts, layers,

folds, faults, discontinuities), determination of mineralogical-geochemical characteristics, determination of properties and behaviors (dissolving, swelling, alteration, weathering), hydrological and hydrogeological data and information of the area are compulsory. These are followed by the studies on the determination of "In-Situ Stress State" and the preparation of Slopes "Stability Risk Maps" which reflect the current situation. In order to be able to identify zones and boundaries "Decision Matrices for Technical Goals" must be established.

The method to be considered in the diagnosis and determination of geological/technical systems comprises the following steps:

- *Data collection, analysis of geological environments and, in particular, identification of natural qualities through knowledge generation processes,*
- *Determination of natural factors and states by measurements and experiments,*
- *Modeling of geological bodies with the interacting technical objects,*
- *Establishment of geomechanical, geodynamic and earthquake models,*
- *The use of response simulation and other predictive and explorative techniques.*

In order to be able to determine the location, shape and size of reactions occurring during the process of technical intervention in the rocks, it is necessary to know what reaction is, how and why it occurs, and what values are expressed. Then it should be discussed the sufficiency and reliability of the calculated values for the temporary and permanent stability. Consequently, the materials, measures, procedures and methods that provide the best technical solution should be determined. The forces, pressures, moments, impulses and vibrations are mechanical modes of action. Their intensity can be changed by the control of location, direction, time and temperature. Mechanical reactions occur in rocks against impact. These reactions are in the form of stresses and deformations and respectively they are determined as strain state and deformation state. The magnitude of the stresses and deformations in the unit volume shows the energy and its temporal effect as the generated performance. In short-term evaluations, which assume the invariance of the environmental quality, most of the geomechanical behavior parameters remain constant. Although this may be acceptable for rocks, this approach leads to very misleading results, especially on fine-grained and cohesive soils and on transition rocks. As a result, the technical initiative and the establishment of a secure permanent structure are achieved by controlling the effects and reactions.

The scope of the "Geotechnics" covers tunnels, foundations and support structures, the design and application of excavation, reinforcement, drainage, improvement and protection processes, as well as the determination of the construction methods and the application of competence. The success here depends on the establishment of a methodical, meticulous and selective interdisciplinary understanding, which is based on geosciences, engineering geology, geomechanics (soil mechanics-rock mechanics) and geodynamics.

Keywords: *Geology, Engineering, Engineering Geology, Geotechnics.*

YERALTI AÇIKLIKLARINDA
MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ve JEOTEKNİK

Demirkapı Tüneli (Antalya) Km:34+705.05-35+95.50 Arası Destek Sisteminin Sayısal Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi
Assessment of Support System of the Section Km:34+705.05-35+95.50 of Demirkapı Tunnel (Antalya) by Numerical Analysis

M. Gök¹, H.A. Nefeslioğlu^{2*}

¹ *Zorgün İnşaat Taahhüt Tic. Ltd. Şti., 16130 Niliüfer, Bursa*

² *Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 07058 Konyaaltı, Antalya*

(*hanefeslioglu@akdeniz.edu.tr)

ÖZ: Bu çalışmada; kaya tünelciliğinde görgül yöntemlere bağlı olarak önerilen tahkimat sistemlerinin, tasarım aşamasında sayısal analiz yöntemi ile incelenmesine ilişkin örnek bir uygulama sunulmuştur. Bu amaçla; Antalya Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü Hudutları içerisinde yer alan Demirkapı Tüneli'nin Km:34+705.05-35+95.50 arasında kalan kısmı çalışılmıştır. Çalışılan aralıkta kaya kütle puanı RMR=56 ve kaya kütle kalitesi Q=1.555 olarak hesaplanmıştır. Söz konusu aralığın NATM kaya sınıfı "B2" olarak tanımlanmıştır. Buna göre; kazı yöntemi üst yarı ilerleme uzunluğu 1.50-2.00 m ve alt yarı ilerleme uzunluğu 3.00-3.50 m olarak tasarlanmıştır. Destek sistemi; RMR ve Q değerleri ve NATM kaya sınıfı bir arada değerlendirilerek önerilmiştir. Önerilen destek sistemi; tek sıra Q221/221 çelik hasır, 15 cm C20/25 püskürtme beton, ϕ 28 4.00 m 11-12 adet sistematik SN bulon şeklindedir. Gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarına bağlı olarak; tünel güzergâhı boyunca çalışılan aralıkta tanımlanan kaya sınıfı için önerilen destek sisteminin; beklenen radyal deformasyon toleransı olan 3-5 cm için yeterli olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tünel, Kazı Yöntemi, Destek Sistemi, Sayısal Analiz, Demirkapı Tüneli

ABSTRACT: In the present study a sample application of performing numeric analysis to investigate support systems recommended according to empirical methods in rock tunneling during design stage was presented. For this purpose; the section between Km:34+705.05-35+95.50 of Demirkapı Tunnel located in the boundary of 13th District Office of Antalya Highways was studied. The rock mass rating and quality values in the section were calculated to be RMR=54 and Q=2, respectively. NATM rock class for this section was defined to be "B2". Accordingly; the excavation method was designed to be 1.50-2.00 m advance per round for the upper part and 3.00-3.50 advance per round for the lower part. The support system was recommended by considering both RMR and Q values and NATM rock class. Recommended support system is given as follows; single line Q221/221 wire mesh, 15 cm shotcrete having C20/25 type, 11-12 systematic ϕ 28 SN type rock bolts having 4.00 m length. According to the results of the numerical analysis; the support system recommended for the rock mass in the section investigated is determined to be enough for the tolerance level of 3-5 cm.

Keywords: Tunnel, Excavation Method, Support System, Numeric Analysis, Demirkapı Tunnel

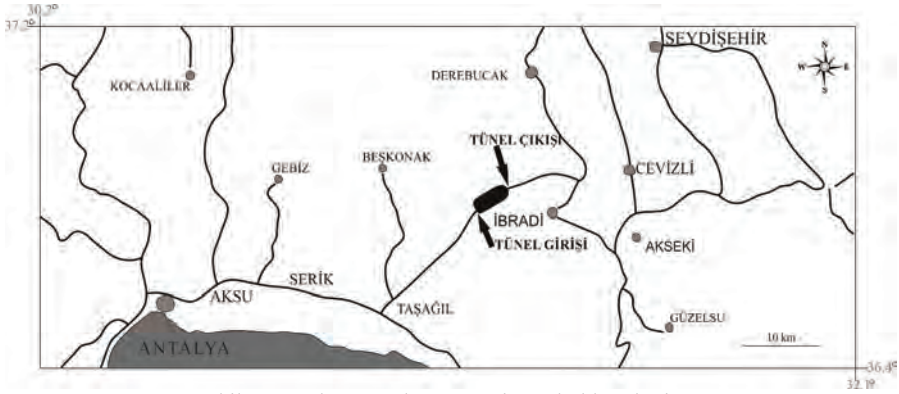
1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının güvenli ve ekonomik olmasına ilişkin gerekliliğin yanı sıra; söz konusu yapıların inşaat süreleri de; bir başka ifade ile zaman boyutu da oldukça önemlidir (Mahmoodzadeh ve Zare, 2016). Tünel yapım çalışmalarında bu üç kavramı etkileyen sınırlamalar özellikle kazının ve tahkimat sisteminin tasarımı ve uygulanması aşamasında etkin olmaktadır (Ayhan ve Topal, 2005; Başarır, 2006; Geniş vd., 2007; Özsan vd., 2009; Rasouli, 2009; Dadashi vd., 2012; Riaz ve Jamil, 2016). Kazı ve tahkimat sisteminin tasarımı için henüz standart bir altlık oluşturulamamış ve bu eksiklik kaya kütleli sınıflama sistemleri ile karşılanmaya çalışılmaktadır. Ancak bu sistemlerin; kaya kütlelerinin davranışlarının belirlenmesinde sınırlamalara sahip olduğu bilinmektedir (Satici ve Topal, 2015). Bu nedenle; özellikle tasarım aşamasında görgül ilişkilere bağlı olarak önerilen kazı ve tahkimat sistemlerinin sayısal analizler ile incelenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada; Antalya Karayolları Genel Müdürlüğü 13. Bölge Hudutları içerisinde yer alan, Antalya ve Konya'yı birbirine

bağlayan Demirkapı Tünel'inin Km:34+705.05-34+805.50 arasında kalan kısmı incelenmiştir. Bu amaçla; arazi çalışmaları, laboratuvar deneyleri ve görgül yöntemler ile elde edilen verilere bağlı olarak kazı ve tahkimat tasarımı yapılmış ve bu tasarımın performansı sayısal analiz ile denetlenmiştir. Bu kapsamda öncelikli olarak alan araştırmaları ve laboratuvar deneyleri neticesinde elde edilen bilgiler doğrultusunda; tünel güzergâhı boyunca karşılaşılan kaya kütleleri, Jeomekanik Sınıflama (RMR) (Bieniawski, 1973; Bieniawski, 1989), Kaya Kütle Kalitesi (Q) (Barton vd., 1974; Barton, 2002) ve Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) (Rabcewicz, 1964)'e göre sınıflandırılmış ve müteakiben kazı ve tahkimat önerileri getirilmiştir. Söz konusu görgül ilişkilere bağlı olarak yapılan tasarım önerilerinin performanslarının değerlendirilmesine yönelik sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; sayısal analizler için gerekli kaya kütlesi parametrelerinin tayininde Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) kavramı (Hoek ve Brown, 1997; Hoek vd., 2013) dikkate alınmıştır.

2. ÇALIŞMA SAHASININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Demirkapı Tüneli Antalya'nın İbradi ilçesi sınırlarında yer almaktadır (Şekil 1). Tünel güzergâhı içerisinde bulunan; Km:34+705.05-35+95.50 arasında kalan inceleme alanında Üzümdere Formasyonuna ait gri - açık gri renkli, orta - kalın tabakalı, aşınma yüzeyleri kahverengimsi gri renkli kireçtaşları bulunmaktadır (Martin, 1969; Toker vd., 1993'den) (Şekil 2).



Şekil 1. Tünel güzergâhını gösterir yer buldurur haritası.

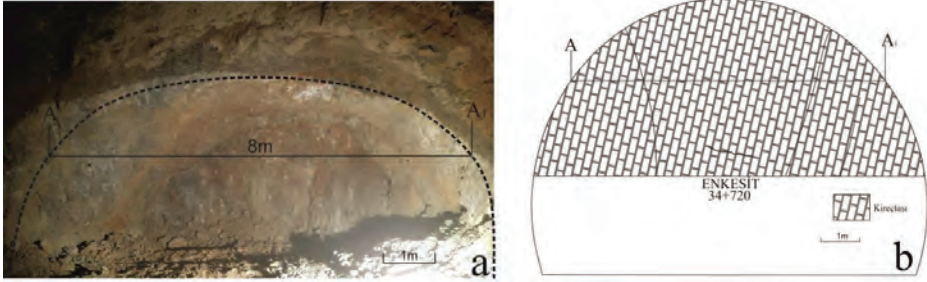


Şekil 2. Tünel güzergâhında çalışmaya konu olan kesimde izlenen kireçtaşı kütlelerinin genel görünümü.

3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

3.1. Jeoteknik Saha İnceleme

Arazi çalışmaları kapsamında kaya malzemesinin dayanımı ve kaya kütlelerinin davranışını belirlemek için bu çalışmaya konu olan kesimde numune alımı yapılmış ve tünel aynası en kesiti çıkarılmıştır (Şekil 3). Kaya malzemesine ilişkin laboratuvar deneylerine ait sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Değerlendirilen kaya kütleleri masif, orta-kalın tabakalı, bej, açık kahve, açık gri renkli kireçtaşıdır (Şekil 3a). 8 m uzunluğa sahip A-A1 aralığında süreksizlik hat etüdü yapılmıştır (Şekil 3b). Gerçekleştirilen hat etüdü çalışmalarında ISRM (2007) önerileri dikkate alınmıştır. Tünel aynasında üç süreksizlik seti izlenmektedir. Süreksizliklerin doğrultuları tünel eksenine paralel; eğimleri ise dike yakın ölçülmüştür. Hat etüdü neticesinde ölçülen ve tanımlanan süreksizlik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Çalışmaya konu olan kesimde izlenen (a) tünel aynası ve (b) en kesiti.

Çizelge 1. Kaya malzemesine ilişkin laboratuvar deneylerine ait sonuçlar.

Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	26.4
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	109

Çizelge 2. Hat etüdü neticesinde ölçülen ve tanımlanan süreksizlik özellikleri.

Parametreler	Tanım / Ölçüm
Kaya Kalite Göstergesi RQD (%)	60
Süreksizlik aralığı (m)	2
Devamlılık (m)	12 m
Açıklık (mm)	0.3 mm
Pürüzlülük	Az Pürüzlü
Dolgu	Sert dolgu 3 mm
Bozunma	Bozunmamış

3.2. Kaya Kütleli Sınıflamaları

3.2.1. Jeomekanik Sınıflama (RMR)

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen kesimde; Bieniawski (1973; 1989) tarafından geliştirilen kaya kütleli sınıflama sistemine bağlı olarak kaya kütlelerinin jeomekanik sınıflama (RMR) puanı hesaplanmıştır (Çizelge 3). Buna göre; çalışmaya konu olan kesimde temel RMR değeri 68; tünel aynasında ölçülen süreksizliklerin konumuna bağlı olarak düzeltilmiş RMR değeri ise 56 olarak

hesaplanmıştır. Söz konusu RMR değerine göre çalışılan kaya kütleli “Orta Kaya” sınıfında tanımlanmıştır.

Çizelge 3. Değerlendirilen kesim için jeomekanik sınıflama (RMR) puanı.

Parametre	Tanım / Açıklama	Puan
Kaya kalite göstergesi RQD (%)	60	13
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	109	12
Süreksizlik aralığı (m)	2-0.6 m	15
Yeraltı suyu	Nemli	10
Süreksizlik durumu		
Devamlılık (mm)	10-20 m	1
Açıklık (m)	0.1-1 mm	4
Pürüzlülük	Az Pürüzlü	3
Dolgu	Sert Dolgu <5 mm	4
Bozunma	Bozunmamış	6
Temel RMR		68
Süreksizlik konumuna bağlı düzeltme		-12
Düzeltilmiş RMR		56

3.2.2. Kaya Kütle Kalitesi (Q)

Çalışmaya konu olan aralık için kaya kütle kalitesi (Q) (Barton vd., 1974; Barton, 2002) ayrıca hesaplanmıştır. Q sınıflama sistemi içerisinde değerlendirilen parametreler için yapılan tanımlamalar Çizelge 4’de verilmiştir. Buna göre; kireçtaşı kaya kütleli Q değeri 1.555 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4. Q sınıflama sistemi içerisinde değerlendirilen parametreler için yapılan tanımlamalar.

Litoloji	Sınıflamada Kullanılan Parametre Değerleri						Q
	Kaya kalite göstergesi (RQD)	Ekleme takımı sayısı (Jn)	Ekleme pürüzlülük durumu (Jr)	Ekleme ayrışma durumu (Ja)	Ekleme su azaltma faktörü (Jw)	Gerilme indirgeme faktörü (SRF)	
Kireçtaşı	60	6	3	2	1	10	1.555

3.2.3. NATM Kaya Sınıfı

Demirkapı Tüneli NATM esaslarına bağlı olarak açılmaktadır. Buna göre; çalışmaya konu olan kesim için hesaplanan RMR ve Q değerleri dikkate alındığında; NATM kaya sınıfı “B” ve destek sınıfı ise “B2” olarak tanımlanmıştır. B2 destek sınıfına göre alt yarı ve üst yarı şeklinde yapılacak kazıda üst yarı ilerleme uzunluğu 1.5-2.0 m ve alt yarı ilerleme uzunluğu 3.0-3.5 m olarak belirlenmiştir. Bu aşamada; üst yarı ve alt yarı kazıları arasındaki mesafenin 25.0-30.0 m’nin üzerine çıkmasına izin verilmemiştir.

3.2.4. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ve Tasarım Parametreleri

Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek sayısal analizler için gerekli kaya kütleli parametrelerinin tayininde Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) kavramı (Hoek ve Brown, 1997; Hoek vd., 2013) dikkate alınmıştır. Bu amaçla; Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI abağı kullanılmıştır. Buna göre süreksizlik özellikli puanı 18, kaya kalite göstergesi (RQD) 60 değerleri dikkate alındığında; $GSI = 1.5JCond_{90} + RQD/2$ eşitliğine bağlı olarak GSI değeri 57 olarak hesaplanmıştır. Sayısal analizlerin

gerçekleştirilmesi sürecinde kaya kütlelerinin süreksizlik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda; Hoek ve Brown (2002) yenilme ölçütü değerlendirilmiştir. Buna göre; çalışma kapsamında belirlenen tasarım parametreleri Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde değerlendirilen tasarım parametreleri.

Sayısal Analizlerde Kullanılacak Parametreler		
Örtü kalınlığı (m)		747
NATM kazı ve destek sınıfı		B2
GSI değeri		57
m_i değeri		10
Örselene faktörü (D)		0.5
Hoek-Brown (2002) ölçütü dayanam parametreleri	m_b	1.290
	s	0.0032
	a	0.504
Deformasyon modülü (MPa)		11221.77

4. SAYISAL ANALİZLER

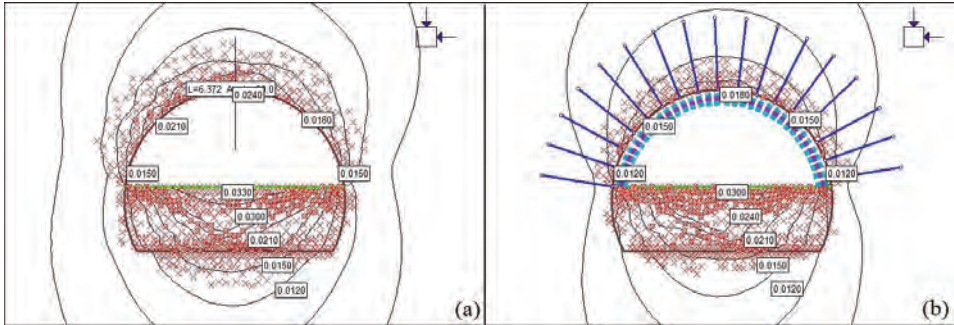
Çalışmaya konu olan kesimde; sayısal analizler ile denetlenecek tahkimat sistemi RMR ve Q sistemleri dikkate alınarak belirlenmiştir (Çizelge 6). Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde “sıfır deformasyon; sabit (x, y)” sınır koşulları dikkate alınmış; modelin dış sınırı tünel çapının 5 katı mesafesinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Sayısal analizlerin gerçekleştirildiği jeolojik ortam 6 düğümlü üçgenler (1655 adet sonlu eleman; 3380 adet düğüm) ile tanımlanmıştır. Çalışılan jeolojik ortama ait yerinde gerilme ölçümü bulunmamaktadır. Bu nedenle; Hoek (2003) tarafından yapılan öneri dikkate alınarak; çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde $K=1$ olarak alınmıştır. Gerçekleştirilen analizler; üst yarı ve alt yarı kazıları olmak üzere ayrı aşamalarda yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan sonlu elemanlar analizlerinde analizlerin gerçekleştirildiği kesitin tünel aynasına olan mesafesi; 2 m dikkate alınmıştır. Buna göre; öncelikle kazı gerçekleştirilmiş; sonrasında püskürtme beton, çelik hasır, tekrar püskürtme beton ve son olarak kaya bulonu uygulaması yapılmış ve müteakiben deformasyon okumaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 4 ve Şekil 5).

Çizelge 6. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde uygulanacak tahkimat sistemi

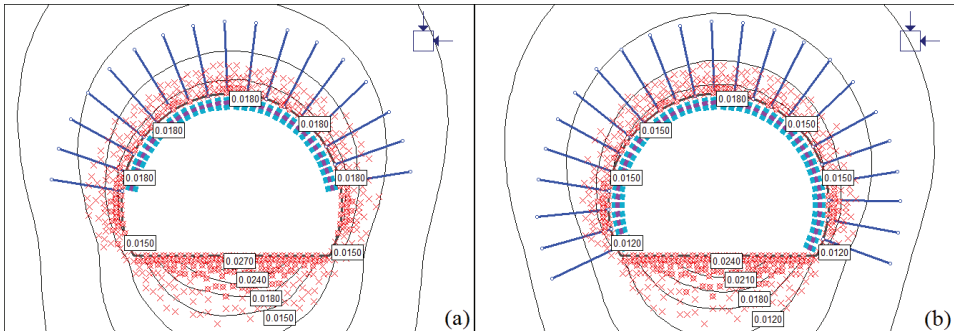
Tahkimat Elemanı	Miktar		Özellik
Püskürtme beton	15 cm	C20/25	İlk aşamada 7.5 cm, çelik hasır ardından 7.5 cm
Çelik hasır	Tek sıra	Q221/221	
Kaya bulonu	23 adet	Çap 28 mm; uzunluk 4 m	11-12 sistematik; üst yarı 17; alt yarı 6 adet

5. SONUÇLAR

Çalışmaya konu olan kesimde sayısal analiz ile hesaplanan en büyük yer değiştirme değeri 3.3 cm'dir. Tünel aynasından 2 m mesafede yer alan kesitte gerçekleştirilen analiz sonucunda plastik bölgenin yarıçapı 6.4 m olarak tespit edilmiştir. Buna göre; Vlachopoulos ve Diederichs (2009) tarafından önerilen görgül ilişki dikkate alındığında tahkimat uygulanmadan önce gerçekleşmesi beklenen radyal yer değiştirme miktarı 1.7 cm olarak bulunmaktadır. Söz konusu radyal yer değiştirme değerlendirildiğinde tahkimatın; kaya kütlesi elastisite modülünün 500 MPa değerinin altına düşmeden uygulanması gerektiği anlaşılmaktadır. Sayısal analizler sonucunda hesaplanan deformasyonlar; alt yarı ve üst yarı kazıları ve tahkimat sisteminin uygulanmasına müteakiben ayrıca belirlenmiştir. Çalışılan kesimde; uygulanan tahkimat sonrasında tünel içerisinde tesis edilen deformasyon ölçüm istasyonlarında gözlenen deformasyon değerleri ile sayısal analiz sonuçlarına bağlı olarak belirlenen deformasyonlar karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre; üst yarı kazısında tavan, yan duvarlarda ve tabanda izlenen deformasyon değerleri sırasıyla 2.4 cm, 1.5-2.1 cm ve 3.3 cm olarak hesaplanmaktadır (Şekil 4). Yine; analiz kapsamında tahkimatın uygulanmasına müteakiben hesaplanan deformasyonlar 1.8 cm, 1.2-1.5 cm ve 3 cm olarak indirgenmektedir (Şekil 4). Benzer şekilde; alt yarı kazısının yapılmasına müteakiben hesaplanan deformasyonlar sırasıyla 1.8 cm, 1.8 cm ve 2.7 cm olarak bulunmaktadır (Şekil 5); yine alt yarı tahkimatının uygulanması sonrasında bu değerler 1.8 cm, 1.5 cm ve 2.4 cm'ye düşmektedir (Şekil 5). Tünel içerisinde çalışılan kesimde burada ifade edilen tahkimatın uygulanmasına müteakiben yapılan deformasyon gözlemleri ile sayısal analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu anlaşılmaktadır; tünel yan duvarlarından alınan yerinde deformasyon ölçümleri 0.8 cm olarak saptanmıştır. Çalışma kapsamında; "B2" NATM destek sınıflaması için radyal deformasyon toleransı 3-5 cm olarak kabul edilmiştir. Buna göre; gerçekleştirilen sayısal analizler dikkate alındığında; tünel güzergâhı boyunca çalışılan aralıkta tanımlanan kaya sınıfı için önerilen destek sisteminin; beklenen radyal deformasyon toleransı için yeterli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4. Üst yarı kazısı ile oluşan deformasyonlar (a) ve üst yarı tahkimat sonrası deformasyonlarda gözlenen düşüşler (b); ölçümler "m" olarak verilmektedir.



Şekil 5. Alt yarı kazısı ile oluşan deformasyonlar (a) ve alt yarı tahkimat sonrası deformasyonlarda gözlenen düşüşler (b); ölçümler "m" olarak verilmektedir.

6. KATKI BELİRTME

Bu araştırma; Sn. Musa Gök'ün Demirkapı Tüneli (Antalya) Km:34+705.05-35+95.50 arasında gerçekleştirmiş olduğu bitirme projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Araştırmacının proje kapsamında ilgili aralıkta kendi toplamış olduğu verilerin bu çalışma kapsamında değerlendirilmesi hususunda vermiş oldukları izin için; yazarlar Karayolları Genel Müdürlüğü 13. Bölge Müdürlüğü Bölge Müdür Yardımcısı Ökkeş Ceylan'a teşekkür eder.

7. KAYNAKLAR

- Ayhan, M., Topal, N., 2005. Excavation and support design of the Dicle-Kralkızı water tunnel: an overview. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20, 81-87.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 189-239.
- Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 185-216.
- Basarir, H., 2006. Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey. *Engineering Geology* 86, 225-237.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley and Sons, New York.
- Genis, M., Basarir, H., Ozarslan, A., Bilir, E., Balaban, E., 2007. Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey. *Engineering Geology* 92, 14-26.
- Hoek, E., 2003. Numerical Modelling for Shallow Tunnels in Weak Rocks. Unpublished notes. <http://www.rocsience.com>.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
- Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, ARMA 13-672, San Francisco.
- I.S.R.M. (International Society for Rock Mechanics), 2007. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. TUKMD, Ankara, 628 pp.
- KGM, 2013. *Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- Mahmoodzadeh, A., Zare, S., 2016. Probabilistic prediction of expected ground condition and construction time and costs in road tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (5), 734-745.
- Özsan A., Başarır H., Yücel S., Cücen Ö., 2009. Engineering geological evaluation and preliminary support design for the metro extension tunnel, Ankara, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 68, 397-408.
- Rabcewicz, L., 1964. <http://www.eos.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Rabcewicz-NATM.pdf>
- Riaz, A., Jamil S.M., 2016. Tunnel support design by comparison of empirical and finite element analysis of the Nahakki tunnel in mohmand agency Pakistan. *Studia Geotechnica et Mechanica* 38 (1), 75-85.
- Satıcı, Ö., Topal, T., 2015. Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 39 (1), 45-57.
- Toker, V., Sonel, N., Ayyıldız, T., Albayrak, M., 1993. Stratigraphy of the northern portion of Akseki and Üzümdere (Antalya) Vicinity. *Geological Bulletin of Turkey*, 36, 57-71.
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S., 2009. Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 42 (2), 131-146.

Kargı HES Tüneli Güzergahında Gözlenen Jeolojik Birimlerin Tünel Delme Makinesi (TBM) İlerleme Hızına Etkisi

*Effect of Geological Units of Kargı HEPP Tunnel Alignment on Tunnel Boring Machines
(TBM) Penetration Rate*

Ç. Akkuş^{1,*}, O. Günaydın²

¹Sufen Proje Yazılım Müh., Ankara

²Adıyaman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman

(*cakkus@sufen.com.tr)

ÖZ: Teknolojinin ilerlemesiyle klasik tünel açma yöntemlerinden olan delme-patlama yönteminin yanı sıra, tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) daha da önem kazanmıştır. TBM ile açılan tünellerde ilk yatırım maliyeti yüksek olduğu için makine verimliliği oldukça önemlidir. Tünel projelerinin başından, bitimine kadar en önemli etkileyici faktör kuşkusuz ki jeolojik koşullardır. Bu çalışmada, Çorum İli, Kargı ilçesine bağlı Maksutlu köyü ve Osmancık ilçesine bağlı İnal köyü arasında yer alan enerji amaçlı kullanılacak olan 9.80 m kazı çapına sahip, 11.8 km uzunluğundaki Kargı HES tüneline, TBM parametrelerinin mevcut jeolojik-jeoteknik parametrelere ne kadar bağımlı olduğu gösterilmektedir. Tünel kazı çalışmalarının yapılması için Robbins marka 063-010-1-DS model numaralı çift kalkanlı sert kaya (double shield hard rock) TBM seçilmiştir. Tünelde, 11+800 km-8+400 km arasındaki jeolojik birimler ve bu birimlerin TBM performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Tünelde gözlenen litolojik birimlerin fiziko mekanik özelliklerinin değişmesiyle TBM parametrelerinin de değiştiği izlenmiştir. Güzergah boyunca genel olarak Kirazbaşı Kompleksi olarak adlandırılan formasyona ait; porfiri bazalt, gabbro, kumtaşı, çamurtaşı, andezit, diyabaz daykları, Kunduz Metamorfiti olarak adlandırılan formasyona ait; mermer, rekristalize kireçtaşı birimlerinde kazılar gerçekleştirilmiştir. İtme kuvveti (thrust force) ve dönme hızı (torque speed) değerlerinde farklı birimler dikkate alınarak değerlendirilmeler yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda TBM kullanılarak açılan tünellerde kazıdan önce veya kazı sırasında beklenmeyen zemin-kaya koşulları ile TBM verileri kullanılarak başa çıkılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kargı HES, TBM, beklenmeyen zemin koşulları, itme gücü, dönme hızı

ABSTRACT: Using tunnel boring machines (TBM) is the most important mechanized tunneling method as well as classic method drill-blast with progressing technology. Machine efficiency is very important due to the high initial investment cost. From the beginning of the project until the end, the most effective factor is the actual geology excavation. In the current study, Dependence of TBM parameters to geological and geotechnical parameters will be investigated through the study of 9.80 m dia. and 11.8 km length of Kargı HEPP tunnel which is located between Maksutlu village and İnal Village and which is used for energy production purposes. Robbins 063-010-1-DS (double shield hard rock) machine has been chosen for tunnel excavation works. Between the CH: 11+800km and 8+400 km, geological lithology and effect of the geological lithology on TBM performance was examined. TBM parameters were changed in parallel to the change in physico-mechanical properties of the lithological units in the tunnel. Along the tunnel alignment, formation that is called Kirazbaşı Complex was observed and the following layers were observed in Kirazbaşı Complex: marble, recrystallized limestone which are belong to porphyry basalt, gabbro, sandstone, mudstone, andesite, diabase dikes, Kunduz Metamorphite formations. In the excavation process, different parameters are considered instead of thrust force and torque. The purpose of the study is to use TBM data that will be used to handle unexpected soil-rock conditions in the tunneling by the use of TBM.

Keywords: Kargı HEPP, TBM, unexpected soil-rock condition, torque, thrust

1. GİRİŞ

Madencilik ve inşaat sektöründe yeraltı yapılarının önemi teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstünde yapılara

zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. Her ne kadar ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) tasman gibi istenilmeyen yeraltı hareketlerini önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kesici kafa (CH) dizaynları ve keski tipleri, makineyi dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonların önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır (Tunçdemir, 1998).

Bir tünelin doğasını, şeklini ve maliyetini belirleyen en önemli faktör jeolojidir (Taylor ve Conwell, 1981). Örnek olarak bir tünelin güzergâhı, tasarımı ve inşaatı büyük ölçüde jeolojik değerlendirmelere bağlıdır. Buna göre saha incelemesi ne kadar iyi yapılırsa yapılsın, güzergâh boyunca yer koşullarına ait bilgiler hiçbir zaman tam olmadığından, tünel açma belirsiz ve bazen de tehlikeli bir girişimdir. Bu nedenle özellikle jeolojik açıdan karmaşık alanlarda tünel inşaatı maliyetinin hesaplanması belirsizlikler içerir.

Türkiye için önem arz eden Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) tünel güzergâhının yaklaşık olarak 100 m kuzeyinden geçmesi ve bundan dolayı tünel çıkış kısmındaki jeolojik birimlerin karmaşık yapı arz etmesinden dolayı TBM'in ilerlemesi açısından ve buna göre jeoteknik özelliklerin belirlenmesi son derece önem teşkil etmektedir. Zemin karakteristikleri takibi ve önlem alınması önemli bir durumdur.

2. TÜNEL AÇMA MAKİNELERİNİN (TBM) SEÇİM KRİTERLERİ

Tünel eksenini boyunca hangi jeolojik birimlerin geçileceği, bu birimlere ait jeoteknik sınıflamalar, basınç dayanımları, süreksizlik durumları ve su muhtevası gibi temel parametreler araştırılır. Söz konusu özelliklere göre, projenin bütünlüğü de göz önüne alınmak şartıyla bir tünel açma makinesinin tipi ve özellikleri belirlenir.

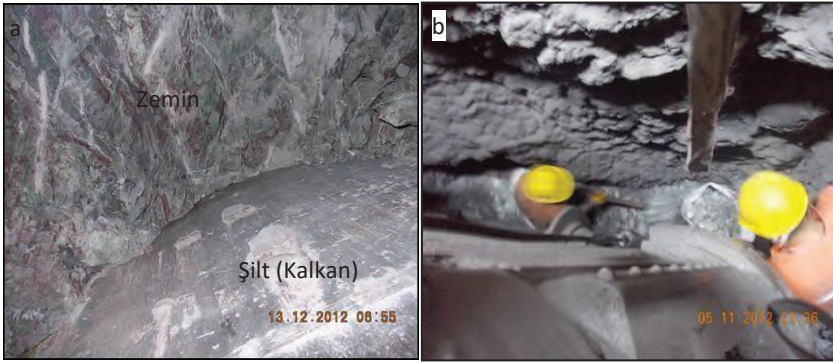
Kargı HES projesinin bir kısmı olan yaklaşık 11,8 km uzunluğunda ve 9,80 m çapında olan tünel için Robbins marka 063-010-1-DS model numaralı double shield hard rock (çift kalkanlı sert kaya) TBM seçilmiştir. Seçilen bu TBM, yapılan ön jeolojik-jeoteknik çalışmalar sonucunda alınmasına karar verilmiştir. Fakat güzergâh üzerinde yapılan çalışmaların yetersiz olması dolayısıyla ile tünel giriş hattında proje boyunca bir takım jeolojik sorunlar meydana gelmiş ve işin bitim süresini aksatmıştır. Ayrıca aşırı maliyet açısından da önem teşkil etmiştir. Bu nedenle projede kullanılan TBM'in teknik özellik değerlerinden faydalanan jeoloji ile ilişkisi ortaya konmaya çalışılmıştır.

2.1. TBM Verilerinin Jeoloji-Jeoteknik Açısından İlişkisi

Bölgede aynı yaş dönemi içerisinde ancak farklı ortamlarda gelişmiş olan daha sonra jeolojik olaylarla bir araya getirilmiş kaya birimleri görülmektedir. Tüysüz (1985) tarafından, bölgenin tektonik birlikleri ayırt edilerek genelde bölgenin kuzeye eğimli bir ekay zonu halinde olduğu belirtilmiş, bu zonda ofiyolitik ve değişik kökenli metamorf kayalar ile bunların arasında çökel kayaların bulunduğu, ofiyolitik kayaların farklı dönemlerdeki iki okyanusa ait olduğu ve bunların Alt Mesozoyik'te yok olan Paleotetis ofiyoliti ile Üst Mesozoyik'te tüketilmeye başlayan Neotetis ofiyoliti olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada TBM makine parametrelerinin mevcut jeolojik parametrelerine ne kadar bağımlı olduğu gösterilmektedir. Kargı HES projesi kapsamında kullanılan TBM özellikleri açısından diğer projelerdeki TBM ile aynı olmasına karşın jeolojik nedenlerin makine üzerindeki olumsuz etkisi açıkça gözlenmiştir. Sıkışan zemin karakteristiği büyük kaya kütleli basıncının ortaya çıkmasıyla birlikte tünel tahkimatının zarar görmesidir. Sıkışan zeminler tahkimat sistemlerinde deplasmanlara yol açmakta, mekanize kazı yöntemiyle açılan tünellerde ekipmanın sıkışmasına yani, koruyucu

kalkanın tünel çevresindeki zemin tarafından sıkıştırılarak ilerleme yapamamasına sebep olmaktadır (Şekil 1a). Bu durum karşısında özellikle tam cepheli tünel açma makinelerinin ekonomikliği tartışma konusu olabilmektedir. Tam cepheli tünel açma makineleri her hangi bir duraklama anında ya da ilerleme sırasında sıkışma olayıyla karşı karşıya gelebilmektedir. Bu sıkışma sorununun üstesinden gelebilmek için makinenin itme kuvvetlerinden yararlanılmaya çalışılır. Sıkışan zeminlerde makinenin sahip olduğu itme kuvvetleri her zaman tam anlamıyla kullanılamamaktadır. Gripper tünel açma makinelerinde zeminin taşıma kuvveti, tek ve çift kalkanlı tünel açma makinelerinde ise prekast segmentlerin taşıma kuvvetine de bağlıdır. Bir tünel açma makinesinin sıkışması durumunda genellikle kalkan (şilt) etrafına bypass tünel adı verilen elle kazı yapılarak galeri açılmakta ve şiltin zeminin uyguladığı kuvvetlerden kurtarılmasına çalışılmaktadır. Bu işlem ise büyük zaman kayıpları ve maliyete sebep olmaktadır, ancak tünel açma makinesinin sıkışması durumunda zorunlu bir iş olarak görülmektedir (Şekil 1b).



Şekil 1. Zeminin şilti (kalkan) sıkması (a), bypass tünel açarak el kazısı ile şiltin (kalkan) etrafının kazılması (b).

Kargı HES tüneli kazıları sırasında arazi basınçlarından dolayı tünel açma makinesinin şildi üzerine baskılar gelmiştir, bu baskılar şilt üzerinde sürtünme yaratarak ilerleme yönü tersine kuvvet uygulamıştır. Makine itme kuvvetlerinin bu sürtünme gücünü yenemediği yerlerde makineye ek kuvvet ekipmanları bağlanarak itme gücünün artırılması yoluyla bu durum giderilmeye çalışılmıştır. Zaman zaman gerek makine itme kuvvetlerinin gerekse ek itme kuvvetlerinin sürtünme kuvvetini yenemeyerek makinenin sıkışmasına yol açtığı görülmüştür. Galeri açma işlemi ile makine şildinin zemin tarafından sıkıştırılması karşısında şilt ile zemin arasındaki boşluk artırılarak sürtünme kuvvetinin yok edilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca kötü zemin koşulları, kesici kafadaki disklerin aşınmasında da önemli etkiler yaratmaktadır. Bütün bahsedilen konular değerlendirildiğinde, bir projenin başarılı olmasında jeolojik profilin ne kadar önem taşıdığı açıkça görülmüştür.

Kazılan zemin, kaya koşullarından yumuşak zemin koşullarına doğru bir geçiş gösterdiği zaman makine parametrelerinde ciddi bir değişim olduğu açıkça görülmüştür. İtme kuvveti değerlerinde bir düşüş; fakat buna karşın kazılan malzemenin yapışkanlık özelliğine ve ince tane yüzdesine göre torkta bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber itme kuvveti düştüğünden, penetrasyon değerlerinde bir artış ve gerek penetrasyon değerinin yükselişiyle, gerekse tork değerlerindeki artışlardan dolayı operatörlerin kesici kafa dönüş hızını azalttığı belirlenmiştir. Bununla beraber torkun, itme kuvvetlerinin düşmesinden dolayı değil de, tamamen kazılan malzemenin yapışkanlık ve kesici kafayı bloke etme eğilimine göre esas bir artışın olduğu görülmüştür. Sıkışan zeminlerde zemin şilt üzerine kuvvet uygulayarak bir sürtünme kuvveti doğurmaktadır. Bu kuvvetin yenilebilmesi için makine itme kuvvetinin uygulanan sürtünme kuvvetinden büyük olması gerekir.

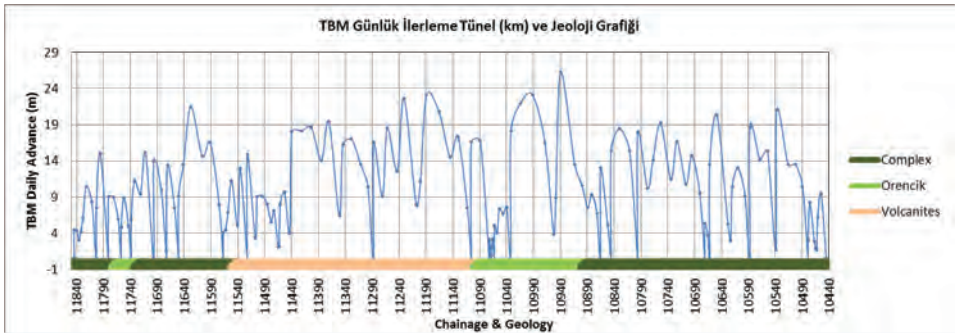
Bu çalışmada da tünel kazısı boyunca makinenin otomatik olarak kaydettiği veriler incelenmiş; grafik oluşturmak ve zeminin makine üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan bu veriler makinenin itme gücü (thrust force) itme hızı (thrust speed), dönme gücü (tork), ilerleme hızı (rpm), kesici kafa dönme hızı (cutter head tork), bant basıncı (conveyor pressure) ve ringe göre ilerleme korelasyonları kullanılmıştır. Ayrıca kazıdan sonra segment döşemek için yapılan reset işlemi bazı jeolojik koşullarda mümkün olamamaktadır. Bundan dolayı kuraldışı reset (exceptional reset) yapılmaktadır. Bu da TBM verilerini etkilemektedir. Kesici kafa hızına (cutter head rpm) bağlı olarak normal dönme (tork) arasındaki ilişki ile kuraldışı resette bu parametrelerin arasındaki korelasyonda belirgin farklar görülmüştür.

2.2. Araştırma ve Bulgular

Kargı HES Projesi kapsamında yapımına devam edilen 11,8 km uzunluğunda ve 9,80 m çapında olan tünel açım işlemleri için iki farklı metod kullanılmaktadır. Su alma yapısı olarak nitelendirilen güney bölgede Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kullanılırken, kuzeyde tam cepheli tünel açma makinesi (TBM) kullanılmaktadır. Kuzey Anadolu Fay Hattının geçtiği, jeolojik açıdan kuzey bölgesi karmaşık bir yapıya sahiptir ve TBM'in ilerlemesi açısından bu karmaşık yapının doğru tahmin edilmesi önem teşkil etmektedir.

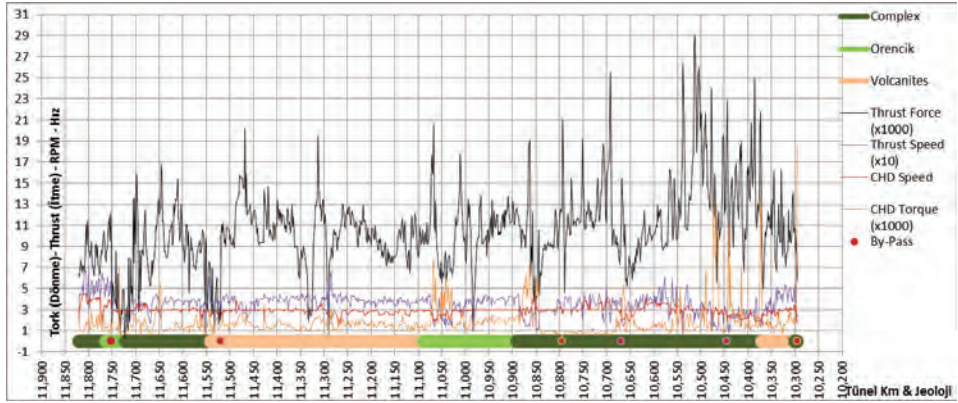
Kargı HES Projesi kapsamında yapılmakta olan tünel Mart 2012'de başlamıştır ve jeolojik nedenlerden dolayı proje bitim süresi uzamıştır. Tünel kazısı sırasında tünel güzergâhının jeolojik özelliklerinden dolayı, zemin şilt ve kesici kafaya baskı yaparak makinenin ilerlemesini güçleştirmiş ve durmasına sebep olmuştur. Zeminin makine üzerine uyguladığı kuvvetler zaman zaman artış göstermiştir. Zeminin şilt (kalkan) üzerine uyguladığı kuvvetlerden biri olan sürtünme kuvveti makinenin ilerleme yönüne ters olarak etki göstermiştir. Makine şiltinin gücü artırılmaya çalışılırsa da bir etki gösterememiş ve makinede sıkışmalara neden olmuştur. Ayrıca olumsuz zemin koşullarından dönme (tork) ve itme (thrust) değerlerinde önemli derecede artışlar meydana gelmiştir. Bazı zamanlarda ise kesici kafa ve şilt üzerine zemin göçükleri neden olmuş ve bu durumda da makinenin ilerletilmesi sağlanamamıştır. Makinenin sıkışması durumlarında şiltin her iki tarafından girilip el ile kazı yapılmak zorunda kalınmıştır. Yaklaşık 1.5 km'lik bölümde toplam 6 adet bypass tünel açılmıştır. Bu bypass tünel işlemlerinin açılmasındaki geçen toplam süre yaklaşık olarak 6 ay sürmüştür ve ciddi zaman ve maliyet kaybıdır. Jeolojik duruma bağlı ilerleme grafiklerle ortaya konulmuştur (Şekil 3).

TBM 21.03.2012 tarihinde kazıya başlamış 15.01.2013 tarihine kadar toplam 1400 metre ilerleme sağlayabilmiştir. Grafikte de görülen düşük pik değerleri bunun göstergesidir. En çok ilerlemeyi kumtaşı birimlerini içeren Örencik formasyonunda yapmıştır.



Şekil 3. Jeolojik duruma bağlı TBM ilerleme grafiği.

TBM verilerinden yararlanılarak sıkışmadan önceki ve sonraki değerler incelenmiş ve bunların jeoloji ile ilişkisi araştırılmaya çalışılmıştır. TBM ilerlemesi esnasında yüzey jeolojisi yapılmış, ring kazı raporları yazılmış ve kılavuz delgi (probe drill) yapılmıştır. Her sıkışma bölgesinden önceki ve sonraki makine değerleri incelendiğinde makine itme ve dönme kuvvetlerinin zemin koşullarına göre değiştiği açıkça görülmektedir (Şekil 4). Şekil 4'de görüldüğü üzere TBM verileri kullanılarak hazırlanan grafikte, zemin değişimleri ve by pass tünellerdeki değerler gösterilmektedir. Zaman zaman bu değerler zemin özelliklerine göre artarken, aynı zamanda bu özelliklere bağlı olarak azalmaktadır. İyi zemin koşullarında TBM fazla güç sarfetmediği için normal değerlerde seyretmiştir. Kırmızı nokta ile gösterilen yerler bypass tünellerinin açıldığı yerleri göstermektedir. İlerleme esnasında yer yer fay, ezik zon, makaslama zonu gibi yapısal unsurlardan geçilmiştir.



Şekil 4. TBM verileri (Tork, İtme gücü, İtme hızı, Kesici kafa dönme hızı)- Jeoloji grafiği.

Grafikte (Şekil 4) de görüldüğü üzere, aşağıda tünel mesafeleri arasında değişimler, nedenleriyle birlikte açıklanmıştır;

11+820km-11+756km arası 66 m'lik mesafede itme (thrust) değerleri ortalama 8450 kN'dur, dönme (tork) değerleri ortalama 1200 kNm Rpm ve bu değerler bypass tünelden sonra oldukça azaldığı gözlemlenmiş ve yaklaşık 1500 kN değerle makine kazıya başlamıştır.

11+756km-11+520km arası 236 m'lik mesafede ise yine itme (thrust) ve dönme (tork) değerlerindeki değişim dikkat çekmiştir. Thrust ve tork değerleri normal değerlerde başlamış by pass tünele yaklaştıkça bu değerlerde bir artış görülmüştür. Ortalama thrust değeri 7500 kN ve ortalama tork değeri 1564 kNm Rpm'dir.

11+520km-10+795km arası 725 m'lik mesafede yine itme (thrust) ve dönme (tork) değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir. Bypass tünel açıldıktan sonra normal değerlerde seyreden makine bir sonraki bypass tünele yaklaşırken artışlar meydana gelmiştir. Ortalama thrust değeri 15000 kN ve ortalama tork değeri 2200 kNm Rpm'dir.

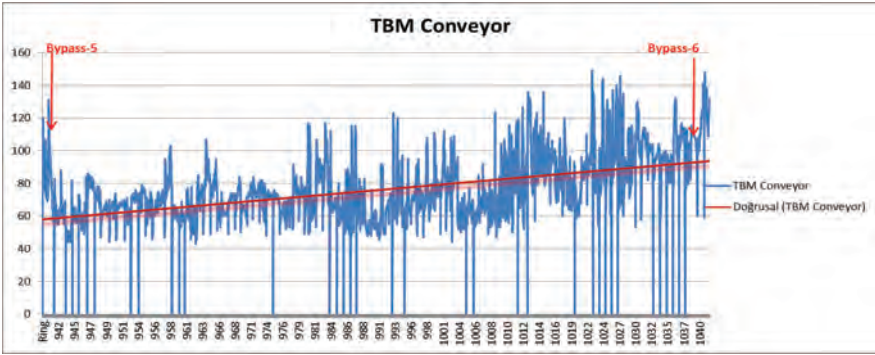
10+795km-10+669km arası 126 m'lik mesafede ortalama itme (thrust) ve dönme (tork) değerlerinde değişim gözlemlenmiştir. Ortalama thrust değeri 12400 kN ve ortalama tork değeri 864 kNm Rpm'dir. Ancak son kazılardaki değerlere bakıldığında muntazam bir artış görülmektedir.

10+669km-10+479km arası 210 m'lik mesafede ortalama itme (thrust) ve dönme (tork) değerlerinde değişim gözlemlenmiştir. Ortalama thrust değeri 12840 kNm ve ortalama tork değeri 2180 kNm Rpm'dir. Bu aradaki değerler oldukça yüksektir ve bypass tünelin bitiminde başlanan kazıda yüksek değerlerde başlamıştır.

10+479km-10+444km arası 35 m'lik mesafede ortalama itme (thrust) ve dönme (tork) değerlerinde değişim gözlenmiştir. Ortalama thrust değeri 13900 kNm ve ortalama tork değeri 4008 kNm Rpm'dir.

10+444km-10+295km arası 149 m'lik mesafede thrust değeri ortalama 12260 kNm ve ortalama tork değeri 2580 kNm Rpm'dir. Fakat çok yüksek değerler gözlenmiş ani zemin değişimleri ile değerlerde düşmeler gözlenmiştir.

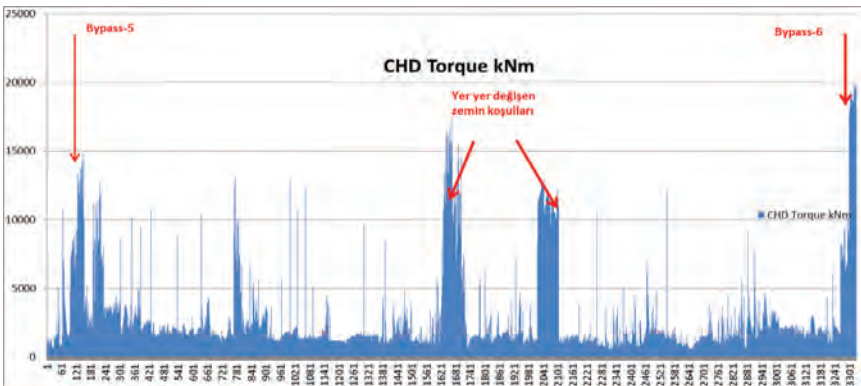
Ayrıca itme hızı, kesici kafa dönme hızı, konveyör bant hızı ve kapasitesinde de önemli değişimler gözlenmiş ve grafikte bu değerlerden de faydalanılmıştır. TBM kazısı esnasında aşırı malzeme gelimi gözlenmiş ve zeminin makineyi sıkıştırması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bunun sonucunda bypass tünel açmak zorunda kalmıştır. Fay hattı geçtikten sonraki 5 ve 6. Bypass tünellere yaklaştıkça konveyör bar değerlerinde artış meydana gelmiştir (Şekil 5).



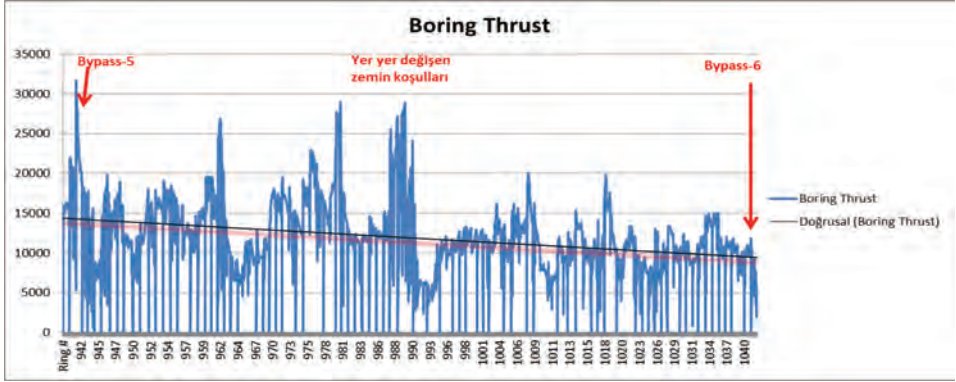
Şekil 5. 10+444 km-10+295 km arası Konveyör bar-Bypass tünel grafiği.

Şekil 5'de, fay hattı geçtikten sonraki 940-1041 ringler arası (10+444 km-10+295 km) TBM değerlerinden bant bar (konveyör) değerlerindeki değişimde konveyör bar değerleri 5 ve 6. bypass tünelleri arasındaki değerlerin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni ise kazı esnasında banta aşırı malzeme gelimi, sökülme ve zeminin sıkıştırmasıdır.

Dönme ve itme değerlerindeki artış nedenleri zemin koşullarına bağlı olup ani değişimler gözlenmektedir. Zemin değişimlerinde makine değerleri zaman zaman artış gösterip zaman zaman bu değerlerde düşme olabilmektedir (Şekil 6). Dönme değeri artarken zayıf zemin koşullarında itme değeri düşmektedir (Şekil 7).



Şekil 6. 10+444 km-10+295 km arası, Kesici kafa dönme kuvveti (CHD Tork)-İlerleme grafiği.



Şekil 7. 10+444 km-10+295 km arası itme kuvveti (thrust)- ilerleme grafiği.

3. SONUÇLAR

Kargı HES Projesi kapsamında yapımına devam edilen 11,8 km uzunluğunda ve 9,80 m çapında olan tünel açım işlemleri için iki farklı metod kullanılmaktadır. Su alma yapısı olarak nitelendirilen güney bölgede Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kullanılırken, kuzeyde tam cepheli tünel açma makinesi (TBM) kullanılmıştır.

TBM ile açılan tünelin yaklaşık 100 m kuzeyinde Türkiye'nin önemli fay zonlarından birisi olan Kuzey Anadolu Fay Zonu yer almaktadır. Tünel güzergâhı boyunca bu faya bağlı birçok fay ve yapısal unsurlardan geçilmiştir ve TBM performansını önemli derecede olumsuz etkilemiştir.

TBM'de tünel kazısı sırasında tünel güzergâhının jeolojik özelliklerinden dolayı, zemin şilt ve kesici kafaya baskı yaparak makinenin ilerlemesini güçleştirmiş ve durmasına sebep olmuştur. Zeminin makine üzerine uyguladığı kuvvetler zaman zaman artış göstermiştir. Zeminin şilt (kalkan) üzerine uyguladığı kuvvetlerden biri olan sürtünme kuvveti makinenin ilerleme yönüne ters olarak etki göstermiştir. Makine şiltinin gücü artırılmaya çalışıldıysa da bir etki gösterememiş ve makinede sıkışmalara neden olmuştur. Ayrıca dönme (tork) ve itme (thrust) değerlerinde önemli derecede artışlar meydana gelmiş ve bu olumsuz zemin koşulları engellenememiştir. Bazı zamanlarda ise kesici kafa ve şilt üzerine zemin göçükleri neden olmuş ve bu durumda da makinenin ilerletilmesi sağlanamamıştır. Makinenin sıkışması durumlarında şiltin her iki tarafından girilip el ile kazı yapılmak zorunda kalmıştır. Yaklaşık 1.5 km'lik bölümde toplam 6 adet bypass tünel açılmıştır.

TBM verilerinden yararlanılarak sıkışmadan önceki ve sonraki değerler incelenmiş ve bunların jeoloji ile ilişkisi araştırılmaya çalışılmıştır ve önemsenecek sonuçlara ulaşılmıştır. TBM ilerlemesi esnasında yüzey jeolojisi yapılmış, ring kazı raporları yazılmış ve kılavuz delgi (probe drill) yapılmıştır. Her sıkışma bölgesinden önceki ve sonraki makine değerleri incelendiğinde makine itme ve dönme kuvvetlerinin zemin koşullarına göre değiştiği açıkça görülmüştür.

Makinede bulunan kayıt cihazı makinenin her hareketini otomatik olarak kaydetmektedir. Bu veriler doğrultusunda sıkışan zeminlerde tam cepheli tünel açma makinesiyle yapılan tünel kazılarında itme kuvvetlerindeki değişimlerin ve dönme/itme kuvveti oranlarının yakından takip edilerek, bu verilerin ışığında sıkışma öncesinde tedbir alınabileceği belirlenmiştir. Tünel kazısı sırasında itme kuvvetlerindeki artış hızı belirlenirse muhtemel sıkışma dönemlerinde zemin ile şilt arasına bentonit enjeksiyonu uygulanabilecektir. Böylece zemin ile şilt arasında kayganlaştırıcı özellik kazanılacaktır. Bütün veriler (itme kuvveti, dönme hızı, kılavuz delgisi vs.) kullanılarak jeolojik profilin makine seçiminde etkisi detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4. KAYNAKLAR

- Taylor, C. L., and Conwell, F.R., 1981. BART- Influence of geology on the construction conditions and costs., Bulletin Association of Engineering Geologists, 18, 195-200.
- Tunçdemir, H., 1998. Arazi Basıncının Dengelenmesi Esasına Göre Çalışan Tam Cephe Tünel Açma Makinelerinin Kazı Performansını Etkileyen Zemin Özellikleri ve İzmir Metrosu Örneği. 4.Ulusal Kaya Mekanığı Sempozyumu, İTÜ, İstanbul.
- Tüysüz, O., 1985. Kargı Masifi ve Dolayındaki Tektonik Birliklerin Ayırıcı ve Araştırılması (Petrolojik İnceleme). TÜBİTAK TBAG521 Proje Raporu, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 431 s.

Nefise Akçelik Tüneli (Ordu) Km:10+683-10+800 Arasında Gözlenen Aşırı Deformasyonlar ve Alınan Önlemlerin Uygulanması

Observation of High Deformations and Protection Methods in Ordu Nefise Akçelik Tunnel between Ch:10+683-10+800

C. H. Şentürk

Ordu Çevre Yolu İnşaatı Eskipazar Mevkii Aydınlık Mah. 4. Sok. Ordu
(senturkcuneyt@gmail.com)

ÖZ: Türkiye ekonomisinin güçlenmesi ile ülkemizde bulunan tünel sayıları da hızla artmaktadır. Karadeniz Sahil Yolu Projesinin bir parçası olan Bolaman-Perşembe Bölünmüş Devlet Yolu projesinde birçok tünel yapımı yer almaktadır. Bunlardan biride Nefise Akçelik Tünelidir. Tüneli'nin yapımı sırasında, zaman içinde jeolojik nedenlerden dolayı bazı sorunlar yaşanmaktadır. Bu bildirisinin amacı da taban kabarmaları ve aşırı deformasyonlar şeklinde gelişen sorunların nedenlerini ortaya koymak ve çözüm önerilerinde bulunmaktır. Bu kapsamda tünelin tip kesitleri, tünel geometrileri, kaya parametreleri, kaya sınıflarına ve yüklenme koşullarına göre sağlamlaştırma-kaplama projeleri ile bunlara ilişkin hesaplar incelenerek değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre ters kemerli sağlamlaştırılmış tünel projesinin uygun olacağı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Duraysızlık, karayolu tüneli, taban kabarması

ABSTRACT: With the strengthening of the Turkish economy, the number of tunnels in our country is increasing rapidly. There are many tunnel constructions on the Bolaman-Perşembe Highway Belt Project, which is part of the Black Sea Coastal Road Project. One of them is the Nefise Akçelik Tunnel. During the construction of Tunnel, there are some problems due to geological reasons over time. The purpose of this declaration is to establish the causes of the problems in the form of base swells and high deformations and to suggest solutions. In this context, type sections of tunnel, tunnel geometries, rock parameters, rock classes and loading-cladding projects according to loading conditions and calculations related to these have been evaluated. According to the obtained data, it is determined that the reverse arch reinforced tunnel project will be appropriate.

Keywords: Instability, tunnel, highway tunnel, basement swell

1. GİRİŞ

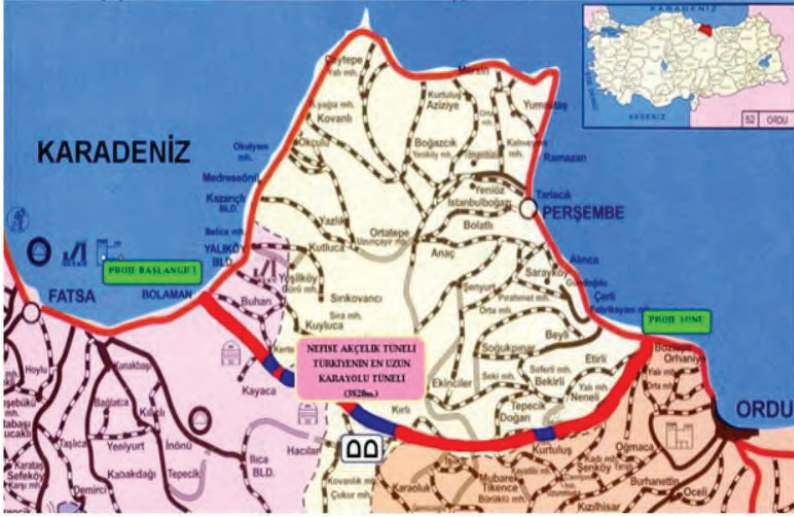
Bolaman-Perşembe arasındaki beş tünelden biri olan Ordu Nefise Akçelik Tüneli, gidiş-geliş yönleri için ayrılmış çift şeritli iki tüpten oluşan ve 3.820 m uzunluğuyla da ülkemizin projelendirilmiş ve yapımı tamamlanmış en uzun karayolu tüneldir (Şekil 1). Giriş-çıkış portallerinde 33 m, güzergâh boyunca 75-375 m –arasında değişen derinliklerdedir. Tünellerin inşası sırasında, sol tüp Km:10+683.00-10+800.60 ile sağ tüp Km:10+693.10-10+742.10 arasında kalan kesimde öngörülmeleyen aşırı deformasyonlar gözlenmiştir.

Yapılan çalışmada önce tünelin tip kesiti, projelendirmede kullanılan kaya parametreleri, öngörülen kaya sınıfları, sağlamlaştırma-kaplama projeleri değerlendirilmiştir. Daha sonra tünel güzergâhının morfolojik, jeolojik ve hidrojeolojik değerlendirmesi ve yorumu yapılarak karşılaşılan olumsuzlukların olası nedenleri ve riskleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çerçevede tünelin açımı sırasında oluşturulan tutanaklar, raporlar ve mevcut ölçüm kayıtları kullanılarak önce geri hesaplar yapılmış ve detaylı bir mühendislik jeolojisi değerlendirmesi yapılarak sorunların nedenleri irdelenmiştir.

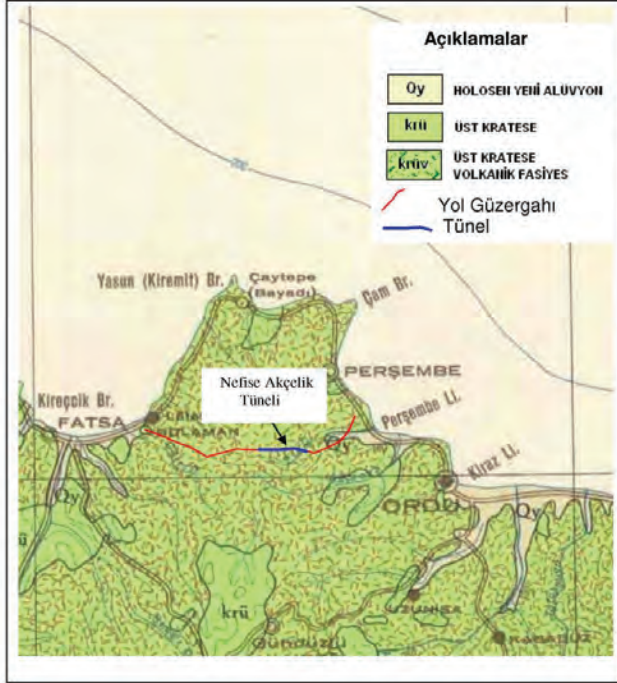
2. JEOLJİ VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

Tünel güzergâhının yer aldığı bölgede Üst Kretase yaşlı bazaltik, andezitik lavlar ve piroklastiklerden oluşan volkanik birimler ile bunların üzerine yerleşmiş olan Üst Kretase-Eosen yaşlı kırıntılar ve karbonatlı kayaçlar bulunmaktadır. Tünellerin kazısı ise tamamen volkanik birimler içerisinde

kalmıştır (Şekil 2). Nefise Akçelik Tüneli çıkış bölgesinde yaygın olarak sert, sağlam, çatlaklı bazaltik lavlar, giriş bölgesinde ise daha zayıf dayanımlı, tuf, breş ve aglomeratlardan oluşan bazik piroklastikler egemendir. Bu kaya birimleri tektonizma, eklem durumu, ayrışma ve yeraltısuyu hareketine bağlı olarak oldukça farklı dayanım ve deformasyon özellikleri gösterebilmektedir.



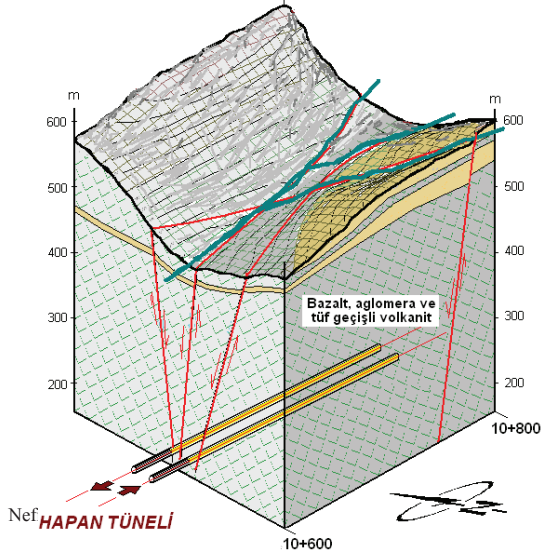
Şekil 1. İnceleme alanı yer bulduru haritası.



Şekil 2. Çalışma alanı genel jeoloji haritası (Göksu, 1974).

Bazaltik ve andezitik lavlar, koyu gri ve yeşilimsi renklerde, ince taneli ve camsı dokulu, değişik yönlerde çatlaklı, çatlakları kalsit, kil ve ayrılmış malzeme ile doludur. Andezitik, bazaltik tüf, breş ve aglomeralar içinde yer yer düzensiz sedimanter blok ve bantları gözlenir. Ayrıca volkanosedimanter seri içinde kireçtaşı, silttaşı, kiltası ve çamurtaşı araldanmaları da gözlenir.

İncelenen güzergâh boyunca tünel, KB-GD ve KD-GB doğrultulu faylarca kesilmiştir. Makaslama faylar şeklinde gelişen bu süreksizlikler, tünel güzergâhının vadi tabanından geçtiğinden tünel açımı sırasında gerilme değişimleri sonucu litolojik birimlerin aşırı kırılmalarına ve ezilmelerine neden olmuştur (Şekil 3). Güzergâhtaki çatlak, kırık ve fay zonlarından sızan suların tünel kotuna kadar etkili olduğu ve etkin bir şekilde bozunmalara neden olduğu kazılar sırasında da gözlenmiştir.



Şekil 3. Tünel güzergâhının morfoloji, akarsu ve fay ilişkisini gösterir blok diyagram (EMAY, 2004).

Tünel kazılarında, faylanma sonucu volkanik birimlerde oluşan ezilmeye bağlı ufalanma ve ayrışma ve yumuşak kilden oluşan milonitik zonlara rastlanmaktadır. Yeraltı suyu etkisi ile de killerde şişme, kabarma ve kavraklanma problemleri oluşmaktadır. Ayrıca andezitik ve bazaltik birimlerde tektonizma etkisi ile kırıklı kesimlerde aşırı sökülme gözlenmektedir.

Tünel açımı sırasında kaydedilen günlük kazı aynası tutanaklarında belirtildiği gibi her iki tüpte de, özellikle ezik zonlarda, tüf ve kil dokanaklarında, aglomeralarda 2 litre/s'yi aşan su gelirleri ölçülmüştür. Bu durum volkanik birimlerin su ile temasta zamanla yumuşayarak dayanımını kaybetmesine, kabarmasına ve tünel stabilitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca, püskürtme beton arkasında hapsedilmiş suların şişebilen killi ortamlarda zamanla kaplamayı çatlattığı, sökülme ve dökülmelere neden oldukları da gözlenmiştir.

3. PROJE BİLGİLERİ VE GÖZLEMLER

Bolaman-Perşembe arasında yer alan beş tünelden biri olan Ordu Nefise Akçelik Tüneli, gidiş-geliş iki şeritli çift tüplü ve 3.820 m uzunluğuyla ülkemizde projelendirilmiş ve yapımı tamamlanmış en uzun karayolu tüneldir. Sorunlu olan kesimde ayrıca iki tane de tüpleri birbirine bağlayan araç geçişi bulunmaktadır. Tünelin tasarım derinliği giriş ve çıkış portallerinde 33 m, güzergâh boyunca da 75 m

ile 375 m arasında değişmektedir. İncelenen sorunlu kesimde (Sol tüp km 10+683.00–10+800.60 ile sağ tüp km 10+693.10–10+742.10) ise 375 m derinliğe sahiptir.

Hazırlanan projede, tünelin Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) A2, B1, B2 ve B3 kaya sınıflarına göre inşası öngörülmüştür. İnşaat sırasında tünelde aşağıdaki gözlemler yapılmıştır;

Sağ tüpte;

- Km: 9+525–9+565, Km:10+045-10+070 ve Km: 10+250-10+265 arasında omuzlarda ve tavanda kavlaklar ve çatlaklar ile püskürtme betonda yer yer dökülmeler olduğu gözlenmiştir.
- Km: 10+700–10+745 arasında tünelde aşırı deformasyonlar oluşmuştur.
- Km: 10+700–10+738 arası, projesinde A2 kaya sınıfı olarak öngörülmüşse de, açım aşamasında arazi koşullarının beklenenden daha kötü olduğu anlaşıldığından önce B2 destek sınıfı uygulanmış, Km 10+735 den sonra ise B2 olarak öngörülen destekleme B3 olarak uygulanmıştır

Sol tüpte;

- Km: 10+520 – 10+530 arasında grobetonda çatlaklar gözlenmiş ve çatlakların nedeninin araştırılması amacı ile açılan çukurlarda altta suya hassas olmayan andezitik – bazaltik karışığının yer aldığı görülmüştür. Bu kesimdeki kabarmaların grobeton imalatından kaynaklandığı belirlenmiştir.
- Km: 10+686 – 10+800 arasında B3 kaya desteği invertsiz olarak uygulanmış, deformasyonlar iç kaplama betonu imalatına uygun düzeye düşürülmüştür. Tabandaki kabarmalar bazaltik ve andezitik tüfle ardalınamalı suya hassas volkanik tüfün suyla temasından kaynaklanmaktadır.

Nefise Akçelik tüneline belirtilen mesafelerde karşılaşılmış olan bu deformasyonların durdurulması ve tünel stabilitesinin tekrar sağlanabilmesi için sağ ve sol tüp için iki farklı sağlamlaştırma yöntemi belirlenmiştir.

B2 Kaya Sınıfından B3 Kaya Sınıfına Geçiş olarak tanımlanmış Km 10+693.24-10+741.24 arasındaki 48 metrelik kesim için sağ tüpte uygulanacak olan sağlamlaştırma yönteminin kazı ve imalatı aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmesi önerilmiştir;

- Üstyarı kazısı (önceden tamamlanmıştır)
- Sağlamlaştırma; 1 kat çelik hasır (Q188/188), 1 kat B20 kalitesinde 10 cm kalınlığındaki püskürtme beton kaplaması (dış kabuk) içinde açılan kemer şeklindeki oluğa 150 cm aralıklarla çift I120 çelik iksa yerleştirilmesi,
- Çift I120 çelik iksa arasından tavan ve omuz bulonlarının yerleştirilmesi; mevcut 4 metrelik kaya bulonlarının arasına 11 adet Φ 28'lik 6 metre uzunluğundaki kaya bulonlarının eklenmesi
- Altyarı kazısı; önceden 0.00 kotuna kadar tamamlanmış olan alt yarı kazısının ters kemer imalatına uygun şekilde birer atlamalı anolar şeklinde kazılması
- Sağlamlaştırma; 1 kat çelik hasır (Q188/188), 1 kat B20 kalitesinde 10 cm kalınlığındaki püskürtme beton kaplaması (dış kabuk) içinde açılan kemer şeklindeki oluğa 150 cm aralıklarla çift I120 çelik iksa yerleştirilmesi,
- Çift I120 çelik iksa arasından taban bulonlarının yerleştirilmesi;
- Mevcut 4 metrelik kaya bulonlarının arasına 2 adet Φ 28'lik 6 metre uzunluğunda ve 2*1 adet Φ 28'lik 8-12 metre uzunluğunda kaya bulonlarıyla birlikte tabanda 2 adet Φ 28'lik 6 metre uzunluğundaki kaya bulonlarının eklenmesi
- Temel; B30 kalitesindeki betonla sağ ve sol temeller ile temel girişinin imalatı
- Yalıtım; keçe (500 gr/m²) ve su yalıtım tabakası (PVC-2 mm)
- İç kaplama; B30 kalitesinde iç kaplama betonunun yerleştirilmesi.

B3 Kaya Sınıfı olarak tanımlanmış Km 10+684.00 – 10+804.00 arasındaki 120 metrelik kesim için sol tüpte uygulanan kazı ve sağlamlaştırma imalatı aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmesi önerilmiştir;

- Üst Yarı Kazısı (önceden tamamlanmıştır).
- Sağlamlaştırma; 1 kat çelik hasır (Q188/188), 1 kat B20 kalitesinde 10 cm kalınlığındaki püskürtme beton, 120 cm aralıklarla yerleştirilen I120 çelik iksa ve 2. kat çelik hasır (Q188/188) (önceden tamamlanmıştır)
- Tavan ve omuz bulonlarının yerleştirilmesi; 4 metre uzunluğunda 11 adet Φ 28'lik kaya bulonlarının eklenmesi (önceden tamamlanmıştır).
- Alt yarı kazısı; önceden 0.00 kotuna kadar tamamlanmış olan alt yarı kazısının ters kemer imalatına uygun şekilde birer atlamalı anolar şeklinde kazılması
- Sağlamlaştırma; önceden 0.00 kotuna kadar 1 kat çelik hasır (Q 188/188), 1 kat B20 kalitesinde 10 cm kalınlığındaki püskürtme beton, 120 cm aralıklarla yerleştirilen I120 çelik iksa ve 2. kat çelik hasır (Q 188/188) imalatı, tünel tabanı boyunca yapılacak olan I120 çelik iksa tünel yan duvarlarından devam eden çelik iksaya tünel temeli altındaki ilave çift I120 çelik iksa ile bağlanması.
- Taban bulonlarının yerleştirilmesi; tünelin yan duvarlarına 2*4 adet Φ 28'lik 8-12 metre uzunluğunda kaya bulonlarıyla birlikte tabanına 6 adet Φ 28'lik 6 metre uzunluğundaki kaya bulonlarının eklenmesi
- Temel; B30 kalitesindeki betonla sağ ve sol temellerin imalatı
- Düzeltme betonu+yalıtım; düzeltme amaçlı B20 kalitesinde 5 cm kalınlığında püskürtme beton, keçe (500 gr/m²) ve su yalıtım tabakası (PVC-2 mm)
- İç kaplama; B30 kalitesinde iç kaplama betonu.

Tünel güzergâhında kazı aşamasında gözlenen yukarıda ayrıntılı olarak tanımlanmış olan deformasyonlara ait fotoğraflar Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Tünel inşaatı sırasında gözlenen taban kabarmaları ve dökülmeler

4. TÜNELDE UYGULANAN GERİ ANALİZ HESAP YÖNTEMİ

Sorunlu tünellerde açım süresince ölçülen konverjansı ve izlenen diğer duraysızlıkları, karşılaşılan ve kaydedilen ortam özelliklerinin kullanıldığı hesaplama modelleriyle açıklamak ve daha sonra bunlara dayanarak yeni çözümler geliştirmek en doğru ve kullanışlı yol olarak benimsenmektedir. Bu amaçla; mevcut verilerden hareketle tünel güzergâhının sorunlu kesimleri için ayrıntılı jeolojik plan ve boy kesitler hazırlanmış ve sonlu elemanlar yöntemine göre çalışan Phase2 Analiz programı ile gerçekleştirilen geri hesap değerlendirmeleri yapılmıştır.

Km: 10+714.92'de 09.09.2002 tarihinde sağ tüpte 14 cm deformasyon, aynı eksen doğrultusunda sol tüpte, tabanda 20 cm'ye ulaşan kabarmalar ölçülmüştür.

Geri hesap yöntemi ile ilgili hesaplar B2 ile geçilen en büyük deplasmanların ölçüldüğü Km 10+714.92'deki kesit için benzer deplasmanları verecek şekilde mekanik parametrelerin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

Uygulanmış olan proje için yapılan hesap modelinde, kaya bulon uzunlukları ortalama 6 metre olduğu kabul edilmiş, püskürtme beton için B20 beton sınıfı karşılığı olarak BS 16 özellikleri kullanılmıştır. Buna göre bulunan mekanik parametre büyüklükleri psödoplastikleşmemiş (in-situ) kaya dayanımı için tuf, gnays (aplit), kilitaşı, bazalt, aglomeralar için Çizelge 1'de ve hesap analizlerinde kullanılan destek sistemleri malzeme parametreleri Çizelge 2'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu hesaplarda bulon paternlerini oluşturan ilerleme adımları projede uygulandığı gibi alınmıştır.

Çizelge 1. Geri analizlerde kullanılan jeoteknik parametreler

Litoloji	Hesaplamalarda Kullanılan Parametreler						
	γ (MN/m ³)	$C_{elastik}$ (MPa)	$C_{plastik}$ (MPa)	$\Phi_{elastik}$ (°)	$\Phi_{plastik}$ (°)	E (MPa)	ν
Tuf	0.023	2.2	1.2	40	34	4300	0.25
Gnays (Aplit)	0.026	15	10	57	50	11000	0.21
Kilitaşı	0.019	1	0.1	22	13	3500	0.31
Bazalt Aglomera Bazalt	0.025	3	2.2	50	42	6500	0.24

Çizelge 2. Analizlerde kullanılan destek sistemleri malzeme parametreleri

İksa Türü	Hesaplamalarda Kullanılan Parametreler					ν
	Kalınlık (m)	Kaya Bulonu Çapı (mm)	Kapasite (MN)		E (MPa)	
Taşıma Yükü			Kalıcı Taşıma Yükü			
Püskürtme Beton	B2 sınıfı için: 0.2 B3 Sınıfı için: 0.25				27000	0.2
Çelik İksa	0.12				310000	0.15
Kaya Bulonu		28	0.1	0.1	200000	

Hesaplarda maksimum 21 cm lik toplam deplasman belirlenmiştir. En yüksek deplasmanlar topluklarda olmuş, her tüp için kaya bulonlarının 9 adedi yenilmiş, püskürtme beton dayanımını kaybetmemiştir.

Önerilen B2'den B3'e geçiş tip kesitinde ise bu anoların arasında, mevcut püskürtme beton ve çelik hasırın kesilmesi ile yerleştirilen çift I120 çelik iksa ve yeni bulon paternleri ile ters taban kemer bulunmaktadır. Kesilen çelik hasır ve kırılan püskürtme beton yeni malzeme ile tanımlanmaktadır.

Böylece ardanmalı olarak üst yarıda bir eski bir yeni kesit oluşturulmuş, tabanda ise boydan boya ters kemer şeklinde imal edilmiştir.

Phase2 hesap programında her bir destek sistemi için ayrı ayrı malzeme parametreleri verilmiş olup, püskürtme beton ve çelik iksanın birlikte hesaplandığı PB+CI olarak tanımlanan kompozit malzeme dış kaplama için kullanılmıştır. Kaya bulonlarının üçüncü boyuttaki birbirlerine olan uzaklığı B2 den B3 e geçiş tip kesiti için 1,5 m, B3 tip kesiti için ise 1,2 metredir. B2 den B3 e geçiş tip kesitinde tabandaki 2 adet kaya bulonunun, B3 tip kesiti için ise tabandaki 5 adet kaya bulonunun yenildiği görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda maksimum deplasmanlar 2,2 cm olarak bulunmuştur.

Bu ortam şartlarında desteksiz durumda görülen gerilme dağılımları yan duvarlarda ve topuklarda yoğunlaşmaktadır. Deformasyonlar ise tünel tabanında kabarmalar ve yan duvarlarda sökümler şeklindedir.

Tabanda ters kemer (invert) ile halka kapanımının sağlandığı desteklenmiş durumda gerilme dağılımlarının topuklarda yoğunlaşmadığı ve tabanda ve yan duvarlarda görülen deplasmanların da büyük ölçüde azaldığı görülmüştür.

5. SONUÇLAR

Nefise Akçelik Tüneli'nin sorunlu kesimleri, tektonik sıkışmalar sonucunda oluşan ezilme zonlarının ve makaslama faylarının şekillendirdiği bir vadinin altında kalmaktadır. Her iki tüpte de etkili olan taban kabarmaları ve aşırı deplasmanlar başta tüfler olmak üzere su etkisiyle ayrılmış volkanitlerin ve bunların oluşturdukları killerin bulunduğu kesimlerde meydana gelmiştir. Bu bölgede sol tüp km: 10+698.60 ile 10+728.60 arasında ve sağ tüp km: 10+697.10 ile 10+706.60 arasında anılan gerilme şartlarına bağlı olarak gelişmiş zayıflık zonlarına rastlanmaktadır.

Nefise Akçelik Tüneli sol tüp km: 10+683.00 – 10+800.60 sol tüp ile km: 10+693.10 – 10+742.10 sağ tüp arası değerlendirilmesine göre, buralarda ve olası sorunlu kesimlerde uygulanmak üzere acilen yeni tünel projelerinin hazırlanması gerekmektedir. Bu amaçla; Ters kemerli (invertli) sağlamaştırılmış B3 sınıfı ile B2 sınıfından B3 sınıfına geçiş imalatını öngören projeler yapılmıştır.

Tasarımın yeterliliği ve güvenilirliği uygulama esnasında yapılan jeoteknik ölçümlerin değerlendirilmesi ile yeraltı kaya yapısının denetimi ve yönlendirilmesi ile doğrulanmalıdır, takip edilmelidir.

6. KATKI BELİRTME

Sn. Prof. Dr. Mahir VARDAR'a, Sn. Halil Karaoğlan'a ve EMAY'ın 2004 yılında çalışanlarına ayrı ayrı teşekkür ederim.

7. KAYNAKLAR

AASHTO, 1995. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part I Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials Washington.

AASHTO, 1995. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part II Tests, American Association of State Highway and Transportation Officials Washington.

EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik A.Ş., 2004, Engineering Geological and Geomechanical Reasons for Time Dependent Excessive Deformations on Hapan Tunnel / Black Sea Coastal Road Project. Nürol-Tekfen-Yüksel A.O. Adına Hapan Tüneli için hazırladığı jeolojik-jeoteknik rapor.

Göksu, E., 1974. 1/500.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Samsun paftası, MTA Enstitüsü yayını, Ankara.

Darıca-Bayramoğlu Atıksu Tüneli Tünel Delme Makinesi (TBM) Seçimi ve Mühendislik Jeolojisi Araştırmalarının Projeye Olan Katkısı

Selection of Tunnel Boring Machine (TBM) for Darıca-Bayramoğlu Wastewater Tunnel and Contribution of the Engineering Geology Investigations to Project

A. Altuntaş¹, Ö. Coruk^{2,*}

¹ Kocaeli Büyükşehir Belediyesi İSU Genel Müdürlüğü

² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
(*coruk@kocaeli.edu.tr)

ÖZ: Yerleşim alanlarındaki kanalizasyon ve atık suların cazibeyle arıtma tesislerine tünel türü iletim hatlarıyla aktarılması günümüzde işletme, bakım ve onarım giderleri açısından en ekonomik seçeneklerdendir. Bu kapsamda Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSU) Genel Müdürlüğü'nün Gebze güneyi, Eskihisar ve Darıca yerleşimleri kanalizasyon ve atık suyunun yapılacak tünelle Bayramoğlu kolektörüne aktarılması birçok yönden en ekonomik yöntem olarak belirlenmiştir. Bu amaçla güzergâhın mühendislik jeolojisi modeli araştırılmıştır. Mühendislik jeolojisi modelin tanımlanmasında daha önce yapılmış sondaj verilerinin yetersizliği tespit edilmiş ve yeniden sondajlar yapılmıştır. Sondaj verileri, arazi ve laboratuvar deney sonuçlarına göre tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi modeli tekrar tanımlanmış, tünel güzergâhında geçilecek birimlerin kaya kütle sınıfı (RMR), jeomekanik ve teknolojik özellikleri tanımlanarak TBM ile kazı koşulları belirlenmiştir. İlk aşamadaki yetersiz verilerle belirlenen modelin ve bu modele göre seçilecek TBM tipinin ne tür risklere ve uygulamadaki güçlüklerle sebep olacağı, yerleşim alanındaki deformasyonlara bağlı zararlar ve bu zararların kuruma yansıtacağı hukuki boyutlar da ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tünel Jeolojisi, Kaya Kütle Sınıflaması, TBM

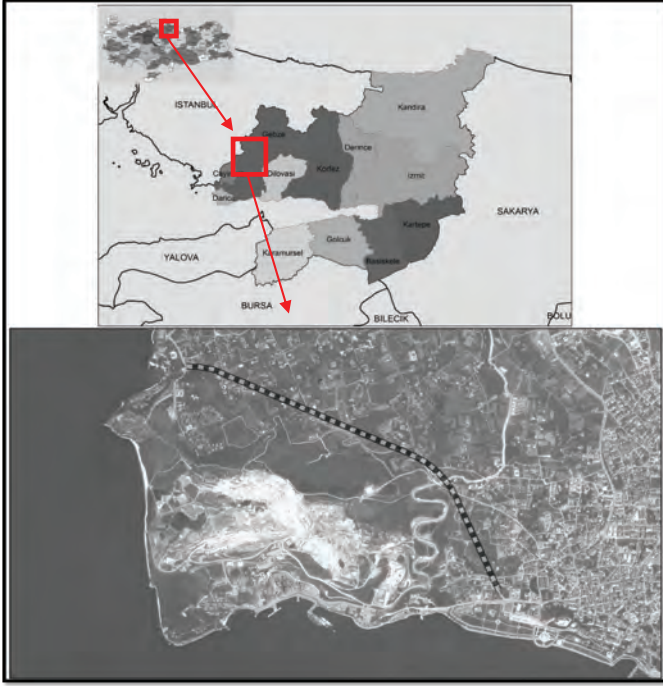
ABSTRACT: The charming trans passing of the drainage and wasted water in the residential area by using tunnel type transmission lines is one of the most economical option in terms of management, renovation nowadays. In this context, the transportation of water and sewerage of drainage and waste water of Kocaeli Metropolitan Municipality İzmit Water and Sewerage Authority, the South of Gebze; Eskihisar and Darıca by constructing tunnels and transposing it to Bayramoğlu collector would be the most economic method in many terms. By this purpose the engineering geology model of the route has been investigated. In defining the engineering geological model, the last boring data that were made before were considered. However, the result of more detailed evaluations these data were found insufficient and borings were made again. According to all data, land investigations, the laboratory and in-situ testing results the engineering geology model of the route of the tunnel was defined, the rock mass rating (RMR) of the geological units that will be passed all along the tunnel route and it's mechanical and physical properties were determined. By taking samples and doing corrosiveness experiments on them, the technological properties were defined, by using TBM the excavation conditions were identified and in conclusion the engineering geology model which is closest to the ideal was defined. The choice of the model which is determined by insufficient data in first stage, the choice of TBM type according to this model and the risks and difficulties in implementation, the damages tied to the deformation in the settlement area and the legal dimensions of damages that will reflect to the institution were revealed.

Keywords: Tunnel Geology, Rock Mass Rating (RMR), TBM

1. GİRİŞ

İnceleme alanı; Kocaeli İli, Darıca İlçesi sınırları içinde Darıca Dudayev Parkı ile Bayramoğlu İş Bankası yerleşkesi arasında kalmaktadır (Şekil 1). Bölge, hafif engebeli bir topografyaya sahip olup eğim genelde % 10-20 arasındadır, Darıca sahiline bakan yamaçlarda yer yer %30 ve üzeri eğime ulaşan yerler bulunmaktadır. Kıyı şeridi çok dar ve kumsalı oldukça azdır. Eskihisar Bölgesinde Kalealtı burnundan başlayarak Büyük Liman, Küçük Liman, Danca Burnu, Yelkenkaya Burnu, Kale

Burnu, Son Burun, Mağara Burnu, Bal Burunu, Bayramoğlu Mevkii'ne kadar yaklaşık 15 km'lik kıyı şeridinde yer yer dik yarlar vardır. Bölgedeki en yüksek tepe Pavlı Tepe olup 136 metre yüksekliğindedir. Bölgeye ait tüm atıksuların kendi cazibesiyile Atıksu Arıtma tesisine iletilmesi morfoloji açısından imkânsızdır. Bunun için birkaç atk su terfi istasyonu yapılması gerekmektedir. Tünel ilk yatırım maliyetleri yüksek olmasına rağmen yüksek debili Atıksu Terfi Tesislerinin elektrik, bakım, onarım, işçilik, amortisman vs. maliyetleri sebebiyle tünel yöntemi ile atk su iletim hattı yapmak ekonomik hale dönüşmektedir.



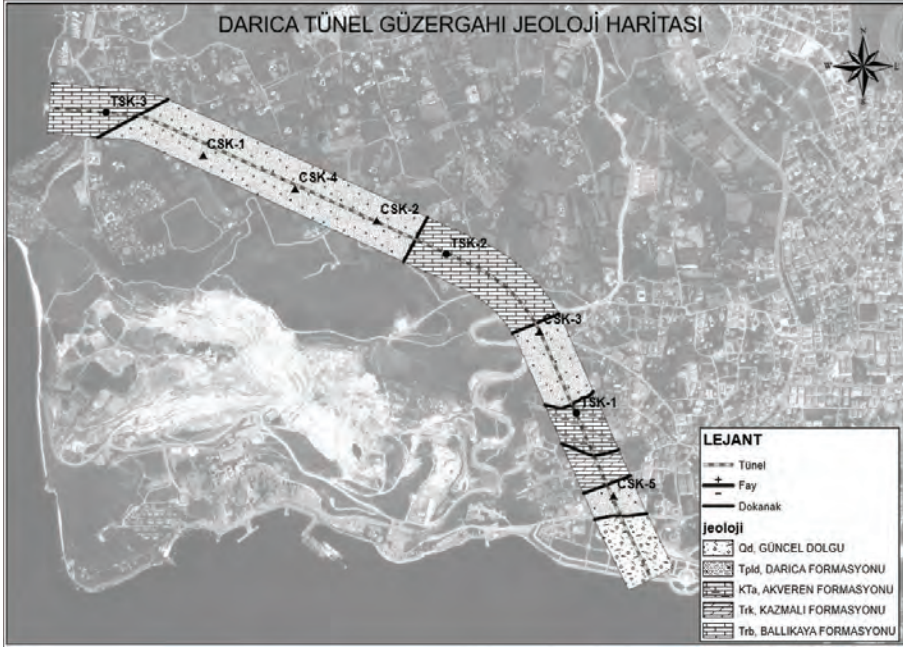
Şekil 1. Proje alanının yerbulduru harita ve görüntüsü.

Proje kapsamındaki tünel güzergâhı en doğu uca Dudayev parkı kuzey sınırında başlar güneydoğu-kuzeybatı doğrultulu güzergâh Camii tepeden itibaren hafif bükümlü bir yay oluşturarak doğu-batı doğrultulu bir yönelim kazanır. Yaklaşık 2500 metre uzunluğundaki tünelde taban kotu membada 5.60 m, mansapta 3.30 m kotundadır. Örtü kalınlığı en fazla Camii tepe yükseliminde 95.00 m kotundadır. Bu kapsamda öncelikle bölgede daha önce yapılmış jeoloji ve mühendislik jeolojisi çalışmalarından elde edilen veriler incelenmiş ve bölgesel jeoloji koşulları irdelenmiştir. Arazi çalışmaları ile proje alanını içine alan yakın bölgedeki jeolojik birimler tespit edilerek, bu birimlerin yanıl ve düşey değişimleri araştırılmıştır. Jeolojik model genel nitelikleriyle tanımlandıktan sonra tünel güzergâhını içine alan yaklaşık 200 metre genişliğindeki alanın ayrıntılı jeoloji haritası yapılmıştır. Projeye ilgili daha önce yapılmış sondaj (TSK-1, TSK-2 ve TSK-3) verileri dikkate alınarak yeni 5 farklı noktada (CSK-1, CSK-2, CSK-3, CSK-4 ve CSK-5) sondajlar yapılmıştır.

Sondaj verileri, arazi deneyleri ve sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi modeli tanımlanmış, tünel güzergâhı boyunca geçilecek jeolojik birimlerin kaya kütle sınıfı (RMR), jeomekanik ve fiziksel özellikleri ile petrografik ve mineralojik özellikleri belirlenmiştir. Yine alınan numuneler üzerinde aşındırıcılık deneyleri yapılarak birimlerin teknolojik özellikleri tanımlanmıştır.

2. PROJE ALANININ JEOLJİSİ

Proje alanında, Paleozoyik istifinin en üst düzeyinin çamurtaşı, şeyl ve kumtaşı (grovak) ar dalanmasından oluşan Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu, Triyas istifinin karbonatlı dolomit, dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşları düzeylerinin temsil ettiği Ballıkaya formasyonu ve konglomera, kumtaşı ve kıltaşı/sheyl litolojilerinden oluşan Kazmalı formasyonu, Üst Kretase istifini ise killi kireçtaşı ve marn ar dalanmasından oluşan Akveren formasyonu ile bu birimler üzerinde diskordan olarak izlenen genelde tutturulmamış ve/veya gevşek tutturulmuş kırıntılardan oluşan Pliyosen yaşlı Darica formasyonu vardır. Güzergâh jeoloji haritası ve sondajlara ait lokasyon haritası Şekil 2'de verilmiştir. Jeolojik birimlerin litolojik özellikleri sondaj verileri ve arazi çalışmalarına göre güzergâh ve/veya tünel kesiti boyunca dağılımları ise Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 2. Tünel güzergâhı jeoloji haritası ve sondaj lokasyonları.

Çizelge 1. Darica – Bayramoğlu tünel güzergâhında geçilecek formasyonlar ve litolojik özellikleri.

Km	Jeolojik Birim	Litoloji	Sondaj
2+510/2+394	BALLIKAYA FM	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI	TSK3
2+394/2+384	FAY ZONU	MİLONİT	
2+384/1+676	DARICA FM	ÇAKILLI SİLTİLİ KİL	CSK1-4
1+676/1+310	TRAKYA FM	KARBONATLI ŞEYL-GROVAK	CSK2
1+310/1+300	FAY ZONU	MİLONİT	
1+300/0+760	BALLIKAYA FM	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI	TSK2
0+760/0+750	FAY ZONU	MİLONİT	
0+750/0+550	TRAKYA FM	KARBONATLI ŞEYL-GROVAK	CSK3
0+550/0+450	KAZMALI FM	YUMRULU KİREÇTAŞI (KARBONATLI PUDİNG)	TSK1
0+450/0+130	KAZMALI FM	KİLTAŞI (ŞEYL)-KUMTAŞI	TSK1
0+130/0+115	FAY ZONU	MİLONİT	
0+115/0+00	AKVEREN FM	KİLLİ MİKİRİTİK KİREÇTAŞI-MARN	CSK5

3. TÜNEL AÇMA TEKNİKLERİ VE SEÇİMİ

Tüneler genel olarak üç yöntemle inşa edilir. Bunlar Aç – Kapa, Delme – Patlatma, Makine ile tünel açma teknikleridir. Delme- patlatma veya kazı makinaları genelde örtü kalınlığının fazla olduğu projelerde kazı yöntemi olarak tercih edilmektedir. Yüzeyle sıkça kullanılan yöntem aç-kapa yöntemidir. Bu yöntemde, yer altı boşluğu, yan duvarlar betonarme kazık veya duvar perdesi ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılır. Kanalizasyon veya içme suyu tünelleri bu yöntemle açılmaktadır. Bu arada zeminin özelliği ve yeraltı suyu durumuna göre gerekiyorsa yeraltı seviyesi düşürülür veya su, derin kuyularla drene edilir. Tavanın kaplamasından sonra kazılan kısım tekrar doldurularak eski haline getirilir. Aç-kapa genellikle 10 m derinliğe kadar etkili bir şekilde uygulanır. Normal tünel açımına göre daha ucuz ve uygulaması daha kolaydır. Proje alanında güzergâhın yerleşim alanlarında, trafiği engellemesi, çevrede oluşturulacak rahatsızlıklar, yüzeyde oluşturabilecek deformasyonlar, örtü kalınlığının fazlalığı, delme patlatma ve geniş delgi sahasına gereksinim duyulması sebebiyle Makine ile tünel açma tekniğinin uygun olduğu kararına varılmıştır.

3.1. Tünel Açma Makinesi (TBM) Genel Bilgi ve Seçimi

Açık TBM'ler çok sert, aşındırıcı, az su geliri olan masif veya az kırıklı çatlaklı kaya koşullarda kullanılmaktadır (RMR=80-100). Açık TBM'ler, alttan destekli bir çift pabuçlu önden motorlu (Main Beam), alttan desteksiz bir çift pabuçlu önden motorlu (Open Gripper) ve iki çift pabuçlu arkadan motorlu (Kelly Beam) TBM'ler olmak üzere üçe ayrılır (Bilgin vd. 2014).

Şiltli TBM'ler ise şiltli sert kaya TBM'leri ve şiltli yumuşak zemin TBM'leri olmak üzere ikiye ayrılır. Şiltli sert kaya TBM'leri kırıklı çatlaklı, bloklu, kuru veya az su geliri olan kaya koşulları ve orta derecede sıkışan kil formasyonlarda kullanılmaktadır (RMR=30-80). Şiltli sert kaya TBM'leri jeolojik ve jeoteknik özelliklere bağlı olarak tek şiltli TBM'ler, teleskopik şiltli TBM'ler ve sadece kesici kafa bölgesi şiltli (Gripper Shield) TBM'ler olmak üzere üç alt gruba ayrılır. Şiltli yumuşak zemin TBM'leri; çamur basınçlı TBM'ler (Slurry TBM's), pasa basınçlı TBM'ler (EPBM's), hava basınçlı TBM'ler (Compressed Air Balance TBM's), kombine TBM'ler (Mixshield) ve özel TBM'ler olmak üzere dört alt gruba ayrılır. Hangi tip şiltli yumuşak zemin TBM'inin kullanılacağını jeolojik ve jeoteknik koşullar sınırlamaktadır. Yeraltı suyunun fazla olduğu çakıl, iri ve orta taneli kum formasyon koşullarında çamur basınçlı TBM'ler; yeraltı suyunun fazla olduğu ince taneli kum, kil ve silt formasyon koşullarında pasa basınçlı TBM'ler; yeraltı suyunun fazla olduğu stabil kumlu formasyon koşullarında hava basınçlı TBM'ler; her türlü yumuşak zemin ve sert kaya koşullarında kombine TBM'ler kullanılmaktadır. Tüm özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

3.2. TBM ile Kazılacak Formasyonların Fiziksel ve Jeomekanik Özellikleri

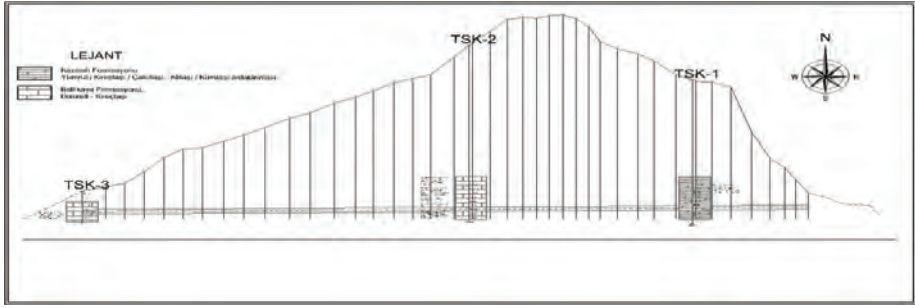
Bu çalışmadaki Gebze – Eskişehir - Darıca - Bayramoğlu Sahil Atıksu Kolektörü, Darıca - Bayramoğlu TBM İnşaatı İşi kapsamında tünel iç çapı 2.20 m, tünel dış çapı 2.80-3.20 m, tünel uzunluğu 2600 m olarak proje parametreleri hesaplanmıştır. Yapım ihalesi öncesinde güzergâh boyunca arazide mostra vermiş birimlerden tünel girişi, çıkışı ve ortası olmak üzere TSK ile adlandırılan 3 noktadan Şekil 3'de işaretlenen sondajlar yapılmıştır. Yapılan sondajlarda tünel eksenini alt ve üst 5 metresini temsil edecek kısımlarında karotlu numuneler alınmış, karotlar üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmış Karot Yüzdeleri (RQD), Kaya Sınıfı (RMR) hesaplanmıştır. Ayrıca basınçlı su testleri yapılmıştır. 3 Sondaja ait tünel eksenini üst diğer metreler ise ekonomik ve zaman kaybı olmaması açısından eritmeli kuyu olarak yapılmıştır. Bu seviyelerde herhangi arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmamıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde Çizelge 3'te hesaplanan veriler ve aşağıda Şekil 3'te gösterilen jeolojik kesite ulaşılmıştır.

Çizelge 2. Tam cepheli tünel açma makinelerinin sınıflandırması ve uygun jeolojik ve jeoteknik koşullara göre seçimi (Bilgin vd. 2014).

Açık TBM'ler (Open TBM's)	Alttan destekli bir çift pabuçlu - önden motorlu - TBM'ler (Main Beam)		Çok sert, Aşındırıcı, Masif veya Az kırıklı çatlaklı Kaya koşulları, Kuru veya az su geliri olan koşullar, RMR = 80-100
	Alttan desteksiz (askıda) bir çift pabuçlu - önden motorlu - TBM'ler (Open Gripper)		
	İki çift pabuçlu - arkadan motorlu - TBM'ler (Kelly Beam)		
Şiltli TBM'ler (Shielded TBM's)	Şiltli Sert Kaya TBM'leri	Tek Şiltli TBM'ler	Kırıklı çatlaklı, Bloklü ve kuru veya az su geliri olan koşullar, RMR = 30-80
		Teleskopik Şiltli TBM'ler	
		Sadece Kesici Kafa Bölgesi Şiltli TBM'ler (Gripper Shield)	Kırıklı çatlaklı, Bloklü ve kuru veya az su geliri olan koşullar, Orta derecede sıkışan killer
	Şiltli Yumuşak Zemin TBM'leri (Ayna Basınçlı)	Çamur Basınçlı TBM'ler (Slurry Pressure Balance)	Yeraltı suyunun fazla olduğu çakıl, iri ve orta taneli kum formasyon koşulları (Permeabilite Katsayısı < 10-7 m/s), RMR = 0-30
		Pasa Basınçlı TBM'ler (Earth Pressure Balance)	Yeraltı suyunun fazla olduğu ince taneli kum, kil ve silt formasyon koşulları (Permeabilite Katsayısı < 10-4 m/s), RMR = 0-30
		Hava Basınçlı TBM'ler (Compressed Air Balance)	Yeraltı suyunun fazla stabil kumlu formasyon koşulları (Permeabilite Katsayısı < 10-7 m/s), RMR = 0-30
		Kombine TBM'ler (Mixshield)	Her türlü yumuşak zemin ve sert kaya koşulları RMR = 0-100
		Özel TBM'ler (Kesici Kafasız, Çoklu Kesici Kafalı TBM'ler)	Jeolojik ve jeoteknik koşullara göre özel imalat makineler

Çizelge 3. Yapılan ilk çalışmalara ait jeomekanik sonuçlar.

Sondaj No:	Jeolojik Birim	Litoloji	Ortalama RQD (%)	Kaya Sınıfı (RMR)	Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	YAS DURUMU
TSK-3	BALLIKAYA FM	DOLOMITİK KİREÇTAŞI	60	54	50	BAĞLANTILI ERİME BOŞLUKLARI KONTROLÜNDE SINIRLI
TSK-2	BALLIKAYA FM	DOLOMITİK KİREÇTAŞI	75	55	50	BAĞLANTILI ERİME BOŞLUKLARI KONTROLÜNDE SINIRLI
TSK-1	KAZMALI FM	YUMRULU KİREÇTAŞI (KARBONATLI PUDİNG)	60	50	45	SIZINTI



Şekil 3. Yapılan ilk çalışmalara ait jeolojik kesit.

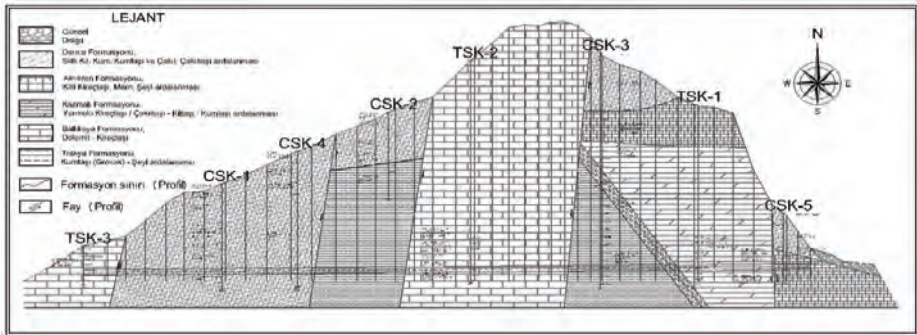
Güzergâh boyunca Balıkayalar Formasyonuna ait dolomitik kireçtaşları ve Kazmalı Formasyonuna ait Yumrulu Kireçtaşlarının olması, hesaplamalar ve jeolojik kesitler neticesinde üst bölümlerde anlatılan Şiltli Sert Kaya TBM'leri ile tünel imalatının yapılacağı bahsedilerek ihaleye çıkılıp yapım sürecine başlanılmış olacaktır.

Daha sonra tekrar yapılan arazi çalışmaları, topoğrafya durumu, 2. Şahıslara ait su sondaj kuyu açım teknik ve verileri ile birlikte koşullar tekrar değerlendirilerek önceden yapılmış sondaj aralarına haritada CSK olarak adlandırılan 5 noktada Şekil 4'deki sondajlar yapılmıştır.

Yapılan karotlu sondajlarda önceki çalışmalardan elde edilen bilgiler haricinde Darıca Formasyonu (Çakıllı Siltli Kil), Trakya Formasyonu (Karbonatlı Şeyl-Grovak), Akveren Formasyonu (Killi Mikritik Kireçtaşı-Marn) jeolojik birimlerinin de olduğu gözlenerek yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri neticesinde Çizelge 4'de hesaplanan veriler ve aşağıda Şekil 4'de gösterilen Jeolojik kesite ve yeni bir mühendislik jeolojisi modeline ulaşılmıştır.

Çizelge 4. Sonradan yapılan çalışmalara ait jeomekanik özellikler.

Km	Jeolojik Birim	Litoloji	Ortalama ROD (%)	Kaya Sınıfı (RMR)	Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	YAS DURUMU
CSK1 CSK4	DARICA FM	ÇAKILLI SILTLİ KİL	-	10	5	SIZINTI
CSK-2	TRAKYA FM	KARBONATLI ŞEYL-GROVAK	40	36	30	SIZINTI
CSK-3	TRAKYA FM	KARBONATLI ŞEYL-GROVAK	55	52	45	SIZINTI
CSK-5	AKVEREN FM	KİLLİ MİKİRİTİK KİREÇTAŞI-MARN	60	45	40	BAĞLANTILI ERİME BOŞLUKLARI KONTROLÜNDE SIZINTI



Şekil 4. Darıca - Bayramoğlu TBM atık su tünelinin basitleştirilmiş jeolojik kesiti.

Yapılan sondajlar neticesinde son haliyle 2405 metrelik tünel çalışmasının 700 metresinde Darıca Formasyonu olarak adlandırılan çakıllı siltli kil birimleri ve birimler arası faylanmadan kaynaklanan ezik zonların olduğu gözlenmiştir. Tünel güzergâhı boyunca yapılan sondajlardan alınan zemin+kaya numuneleri üzerinde yapılan fiziksel ve jeomekanik özelliklerine dönük deneyler ve diğer veriler yardımıyla birimlerin efektif kohezyon, efektif içsel sürtünme açıları, deformasyon modülü, elastisite modülü, kaya sınıfı, jeolojik dayanımları saptanmıştır. Bu elde edilen veriler ışığında yapılacak Tünel çalışmasının Siltli Yumuşak Zemin TBM'leri (Ayna Basınçlı) ile yapılmasına ve isteklilerin bu veriler doğrultusunda ihaleye katılması sağlanmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Gebze-Eskişehir / Darıca-Bayramoğlu sahil atıksu kolektörü inşaatı Darıca - Bayramoğlu TBM metodu ile yapılacak tünel güzergâhının jeoloji ve mühendislik jeolojisi modeli, arazi ve sondaj çalışmaları ile belirlenerek jeolojik birimlerin yanal ve düşey değişimleri araştırılmıştır. Jeolojik modelin tanımlanmasında daha önce yapılmış 3 sondaj verisi dikkate alınmıştır. Ancak daha ayrıntılı değerlendirmeler sonucunda bu verilerin yetersizliği tespit edilmiş ve 5 farklı noktada tekrar sondajlar yapılmıştır.

Tüm sondaj verileri, arazi deneyleri ve sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi modeli tanımlanmış, tünel güzergâhı boyunca geçilecek jeolojik birimlerin kaya kütle sınıfı (RMR), jeomekanik ve fiziksel özellikleri ile petrografik ve mineralojik özellikleri tüm ayrıntılarıyla saptanmıştır. Yine alınan numuneler üzerinde aşındırıcılık deneyleri yaptırılarak birimlerin teknolojik özellikleri tanımlanarak TBM (Tünel Açma Makinası) ile kazı koşulları belirlenmiş ve ideale yakın mühendislik jeolojisi modeli tanımlanmıştır.

Projenin gösterdiği jeoteknik koşullar kazı makinesi seçimi açısından değerlendirilmiş iyi kaya ortam koşullarına sahip, “orta-iyi kaya” özelliklerindeki Ballıkaya, Trakya, Kazmalı ve Akveren Formasyonlarının yer aldığı güzergâh da EPB-TBM (Open Mod) TBM ile fay ve ezilme zonları içeren, çok sık çatlaklı “zayıf kaya” özelliklerine sahip ve belli bölümlerinde alüvyon zeminler bulunan bölümde zemin basıncı dengeleme moduna sahip EPB-TBM (Closed) tipinde TBM makinesi öngörülmüştür.

Tünel güzergâhı boyunca geçilecek fay zonları, ezik kırıklı çatlaklı ve düşük basınçlı su geliri olan farklı formasyonlar, TBM geçişinde kayda değer zorluklar çıkaracağı aşikârdır. TBM makinesinin basınç kayıplarından kaynaklanabilecek ani akma/göçmelerin gelişmesi, yumuşak ve killi-siltli-kumlu zeminler geçilirken zemin sıkıştırması, kesici kafanın kille sarılması veya yanlış kafa tasarımının yapılması gibi olumsuzluklar projenin yapılabilirliğinde önemli etkenlerdir. Ayrıca araziye temsil eden yeterli bilgi neticesinde ilerleme boyunca TBM dönüş hızı, bir dönüşteki optimum penetrasyon, uygulayacağı tork, itme kuvveti ve ayna basınç değerleri için optimizasyonunu sağlayacaktır.

Tünel Açma Makinesinin seçimi, projenin ekonomikliğı ve başarımı açısından kritik bir konu olup, büyük ölçüde geçilen ortamların jeomekanik özellikleri tarafından denetlenmektedir. Projeyi yeterli düzeyde yansıtmayan veriler neticesinde işin yapılabilirliği düşecek ve iş tamamlanmadan yüklenici-idare arasında hukuki problemleri oluşturacaktır. Yine güzergâh boyunca gelişebilecek oturma, göçük, kabarma gibi durumların üst yapılaraya vereceğı zararlar işin daha karmaşık ve üzücü hal almasını sağlayacaktır. Kısacası proje aşamasında ekonomik ve zaman kazancı açısından bakılıp, yeterli gibi görünen jeolojik araştırmalar projenin yapılabilirliğinde en önemli etkenidir.

5. KAYNAKLAR

- Altınlı, İ., E., 1968. İzmit-Hereke-Kurucadağ Alanının Jeoloji İncelemesi. M.T.A. Mecmuası, Sayı 71, 1-26 ss., Ankara.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A., Arıoğlu, Ergin, 2002. İzmir Metrosu Ümmühan Ana Tüneli'nde Zemin Basıncı Dengeleme Tünel Metodu (EPBM) Uygulaması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Arıoğlu, E. 2009. Tünel açma makineleri, arın basınç hesapları, tünel kaplamaları, bir proje örneği. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Tünel Dersi 7. Bölüm, Yapı Merkezi AR&GE Bölümü.
- Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H., Tumaç, D., Akgül, M., 2007. Tünel açma makinelerinin (TBM) Tam boyutlu kesme deneyi ile performans tahmini, Birinci Maden Makinaları Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, , Editör: C. Şensöğüt. ISBN 978-9944-89-277-3, 61-70, Dumlupınar Üniv., Kütahya.
- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., Tumaç, D., Akgül, M., Yüksel, A., Kahrıman, A., 2014. Kadıköy-Kartal Metro Tünellerinde kullanılacak tünel açma makinelerinin (TBM) bazı tasarım parametrelerinin kesme deneyleri ile belirlenmesi ve performans tahmini, Ulaşımında Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Yayın No: 138.
- Yüksel, A., Yeşilçimen, Ö., Arıoğlu, E. 2006. Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesinde Jeolojik ve Jeoteknik Araştırma Çalışmaları, Rocmec'2006, VIII Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, İTÜ, İSTANBUL.

KAYA KÜTLELERİNİN
KARAKTERİZASYONU

Kaya Kütlesinin Kesme Dayanımının Tayini İçin Çok Pratik Bir Yöntem

A Practical Method for Determining the Shear Strength of Rock Mass

K. Kayabalı¹, K. Zorlu^{2,*}, F. Habibzadeh¹, D. Yılmaz¹

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı Kampüsü

² Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampüsü

(*kivancgeo@mersin.edu.tr)

ÖZ: Kaya kütlesi dayanımı mühendislik yapıları için oldukça önemli bir parametredir. Süreksizlik yüzeylerinin dayanım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan laboratuvar deneyleri için alınacak blok örneklerin süreksizlik içermesi veya bu süreksizliklerin özde özelliklere sahip olması çoğunlukla mümkün olamamaktadır. Bu çalışmada, süreksizliklerin kesme dayanımını belirlemek amacıyla tek bir deneyin yeterli olup olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla, tek eksenli sıkışma dayanımı birbirinden farklı olan dört çeşit magmatik kaya kullanılmıştır. Kaya bloklar üzerinde bir balta presi ile yapay süreksizlikler oluşturulmuş ve hem düşük hem de yüksek gerilme düzeylerindeki yenilme zarfları (çift eğrili yenilme zarfı) çizilmiştir. Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü profilometre ile ve testere ile kesilmiş yüzeylerin temel sürtünme açısı da tilt deneyi ile belirlenmiştir. Sonra, yenilme eğrisinin ikinci kısmına düşen noktalardan sadece biri kullanılarak temel sürtünme açısında zarf çizilmiş; zarfın birinci kısmı ise toplam sürtünme açısına göre oluşturulmuştur. Sonuç olarak, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açısının ve düz süreksizlik yüzeylerinin temel sürtünme açısının belirlenmesi halinde, bir adet kesme deney sonucu ile çift eğrili yenilme zarfı elde edilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaya kütlesi, kesme dayanımı, pürüzlülük açısı, süreksizlik, temel sürtünme açısı.

ABSTRACT: Determination of the shear strength of a rock mass is critically important for engineering structures. It is usually not possible to collect block samples including discontinuity surface or having identical surfaces for laboratory tests conducted for this purpose. In this study, it was investigated whether a single shear test was adequate to determine the shear strength of discontinuities. For this purpose, 4 igneous rocks of varying uniaxial compressive strength were used. The cubic rock blocks were split into two blocks by a saw cut and artificially prepared discontinuity surfaces were obtained. The rock blocks were first subjected to a direct shear test conducted under low to high normal stresses and failure envelopes (bilinear failure envelope) were obtained. The discontinuity planes were scanned through a profilometer to obtain the asperity angle and saw-cut surfaces were subjected to tilt tests to determine the basic friction angle. Then, a line was drawn through the plotted only one point at the angle of basic friction to represent the second part of the failure envelope. The first part of the failure envelope was constructed such that it has total friction angle. As a result, the bilinear failure envelope of a discontinuity surface could be constructed using a single direct shear test providing that the basic friction and the asperity angles are determined.

Keywords: rock mass, shear strength, asperity angle, discontinuity, basic friction angle

1. GİRİŞ

Kaya kütleleri, sağlam kaya bloklarını birbirinden ayıran süreksizlikler veya zayıflık düzlemleri içermektedir. Kaya kütlesinin davranışını, hem sağlam kayanın hem de süreksizliklerin özellikleri kontrol etmektedir. Süreksizlik yüzeyleri, kaya kütlelerinin jeomekanik davranışını denetleyen zayıflık düzlemleri olarak tanımlanabilir. Kırıksız, sağlam kaya bloklarının dayanımı, bu blokları birbirinden ayıran süreksizlik düzlemlerinin dayanımından çok daha yüksektir. Özellikle granit veya kuvarsit gibi kayalarda, süreksizliklerin sert kaya kütlelerinde kesin bir kontrolü söz konusudur. Çamurtaşı, şeyl veya marn gibi yumuşak kaya kütlelerinde ise blok ve süreksizliklerin dayanımları arasındaki fark çok önemli olmayabilir. Bu durumda, kaya kütlesinin bir bütün olarak davranışının, sağlam kaya özellikleri tarafından kontrol edilmesi olasıdır.

Süreksizlik düzlemlerinin dayanımı, Mohr-Coulomb yenilme ölçütü temel alınarak laboratuvarında doğrudan kesme deneyiyle tayin edilmektedir. Süreksizliklerin kesme dayanımı, esas itibarıyla düzlemlerin sürtünme özelliğine ve daha az olarak da kohezyonuna bağlıdır. Süreksizlik duvarlarının pürüzlülüğü veya düzensizliği (özellikle düşük normal gerilmelere maruz kalan süreksizliklerde) sürtünme dayanımı üzerinde en etkili faktörlerden biridir. Düz süreksizliklerdeki doruk kesme dayanımı Eş. 1'deki (τ_p), Mohr Coulomb denklemi ile tanımlanmaktadır (Şekil 1).

$$\tau_p = c' + \sigma_n \tan \phi_p \quad (1)$$

Burada, τ_p doruk kesme dayanımı (kPa), c' kohezyon (kPa), σ_p' süreksizlik düzlemi üzerindeki normal etkin gerilme (kPa) ve ϕ_p etkin gerilme cinsinden içsel sürtünme açısı (derece)'dir.

Patton (1966), süreksizliklerde bulunan düzensizliklerin veya pürüzlülüğün etkisine dayalı çift-eğrili bir yenilme modeli önermiştir. Bir süreksizlik düzleminin düzensizliği pürüzlülük açısı (i) ile tanımlanabilir. Pürüzlülük açısı temel sürtünme açısına (ϕ_b) eklenerek yüzeyin toplam ϕ_p değeri elde edilebilir (Eş. 2)

$$\phi_p = \phi_b + i \quad (2)$$

i parametresi düzensizliğin süreksizlik düzlemi ile yaptığı açı olup, süreksizliklerin jeomekanik davranışları üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Pürüzlülüğün (i) tanımlanması ve ölçülmesinin nedeni düzlemlerin kesme dayanımının tayin edilmesidir. ϕ_p 'nin tipik değerleri genellikle 30° ile 70° arasında; ϕ_b açısının da genellikle 20° ile 40° arasında değişmektedir. i açısı sıfır ile 40° arasında değişebilir. süreksizliğin kohezyonu sıfır ise (Eş. 3):

$$\tan \phi = \tau^* / \sigma_n^* \quad (3)$$

$\tau / \sigma_n = \tan (\phi + i)$ olmaktadır.

Süreksizlik düzlemi üzerine, düşük normal gerilme altında kesme gerilmesi uygulandığında düzlem boyunca bir yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Ayrıca, yerdeğiştirmenin gerçekleşebilmesi için i açısının aşılması gerektiğinden, süreksizlik duvarları açılarak birbirinden uzaklaşmakta ve genişleme (dilatation) oluşmaktadır. Bu noktada etkin sürtünme açısı ($\phi_b + i$) devreye girer ve τ_p 'nin değeri ($c = 0$ alınarak) aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş. 4):

$$\tau_p = \sigma_n' \tan(\phi_b + i) \quad (4)$$

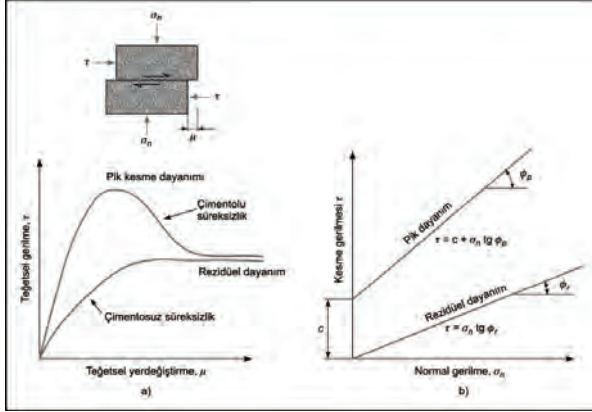
Patton'ın çift-eğrili yenilme ölçütünün büküm noktası σ_n 'nin özel bir değerine karşılık gelmektedir. Pürüzlü süreksizlik yüzeyleri üzerindeki yenilme için (bunlar üzerine etkiyen normal gerilme ile kesme gerilmesine bağlı olarak) birçok yazar Patton'ın ölçütüne dayalı ampirik ölçütler geliştirmişlerdir. Bunlara örnekler Barton ve Choubey ile Ladanyi ve Archambault olup (Şekil 2), birincisi daha yaygın biçimde kullanılmaktadır (Vallejo ve Ferrer, 2011).

Şekil 2'de değişik σ_n değerleri için pürüzlü süreksizlikler üzerindeki kesme deneylerinin sonuçları görülmektedir. $\sigma_n = 0$ olan en üstteki eğride genişleme söz konusu olup, etkin sürtünme sıfır olduğundan kesme dayanımı pratikte sıfır olacaktır. σ_n değeri artırılırsa, ona karşılık gelen eğri genişlemede ya da açılmada azalır, dayanımda artış göstermektedir.

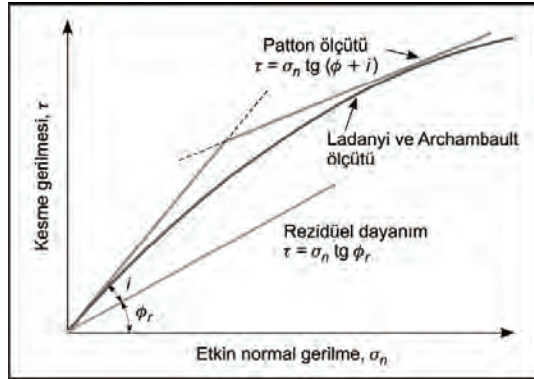
Kesme yerdeğiştirmesi devam ederken en keskin kenarlar kırılabilir ve pürüzlülük "düzleşebilir". Süreksizliğin iki yüzeyi temas ederek ϕ_b baskın olabilmektedir. Düzlem üzerindeki σ_n gerilmesi artarsa genişlemeyi önleyen bir değere ulaşılır ve yerdeğiştirmenin gerçekleşmesi için düzensizliklerin yenilmesi gerekir. Bu noktada $\tau_p - \sigma_n$ eğrisinin eğimi rezidüel sürtünme açısının (ϕ_r) ile yaklaşık aynıdır. Yüksek normal gerilmeler için (Eş. 5):

$$\tau_p = \sigma_n \tan \phi_r \quad (5)$$

Bu çalışmanın amacı, yeterli numune alınmasının zor olduğu durumlarda, değişik normal gerilme koşullarında 5-6 deney tekrarı ile elde edilen çift eğrili yenilme ölçütünün sadece bir adet doğrudan kesme deneyi ile elde edilip edilemeyeceğini belirlemektir.



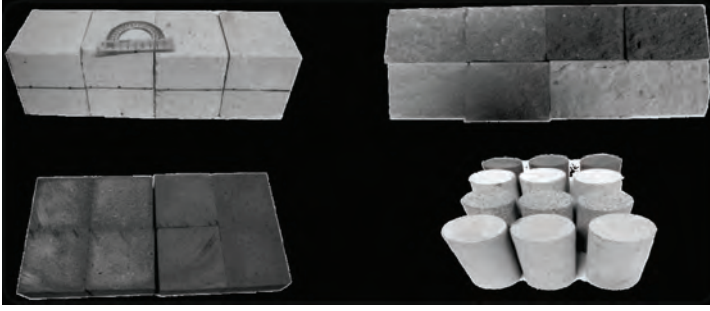
Şekil 1. a) Düzlemsel süreksizlikler için tipik kesme gerilmesi-kesme yerdeğiştirmesi (τ-μ). b) Bir düzlemsel süreksizliğin teorik kesme dayanımı.



Şekil 2. Pürüzlü süreksizlik düzlemlerinin kesme dayanımını normal gerilmenin fonksiyonu olarak kestirmede Patton'ın (1966) doğrusal ölçütü ile Ladanyi ve Archambault'un (1970) doğrusal-olmayan ölçütünün temsili (Vallejo ve Ferrer, 2011).

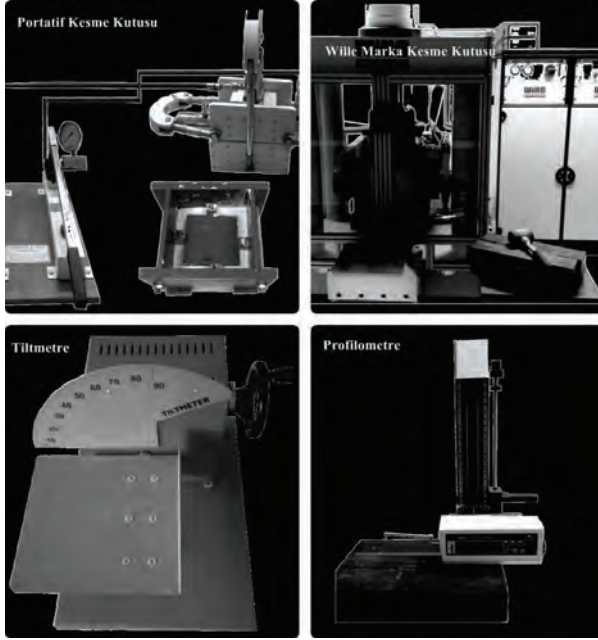
2. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada kökenleri farklı, küp şeklinde kesilmiş 4 çeşit kaya kullanılmıştır. Kayalardan pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmiş ve 53 mm çaplarındaki karotlar alınmıştır. Kübik şekilli kayalar ortadan testereyle kesilerek yapay süreksizlikler oluşturulmuştur. Ayrıca, disk kaya kesiciler kullanılarak kayaların yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Denede kullanılan pürüzlü, pürüzsüz yüzeyler ve karotlar.

Çalışmada, statik kesme dayanımı değerleri elde etmek için taşınabilir kesme kutusu düzeneği ve bilgisayar kontrolü Wille marka kesme kutusu cihazı, pürüzlülük açısı değerleri elde etmek için profilometre cihazı, temel içsel sürtünme açısı değerleri elde etmek için tiltmetre aleti, tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri elde etmek için tek eksenli sıkışma dayanımı deney düzeneği, kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışmada kullanılan cihazlar.

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

3.1 Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi

Bu deney silindirik bir şekle sahip kaya malzemesi örneklerinin dayanım ve kaya kütlesi sınıflamasında, ayrıca tasarımda yaygın derecede kullanılan tek eksenli sıkışma dayanımının tayini amacıyla yapılmaktadır. Bu çalışmada 4 farklı kaya türünün her biri için 7 tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Tek eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçları

Kaya no	σ_c^* (MPa)	σ_c (MPa)	σ_c (MPa)
	En yüksek	En düşük	Ortalama
S-1	66	31	48
S-2	56	12	30
S-3	104	29	59
S-4	8	4	6

*Tek eksenli sıkışma dayanımı

3.2. Tiltmetre Deneyi

Pürüzsüz süreksizlik yüzeyleri için tiltmetre cihazı ile yapılan deneylerden elde edilen temel içsel sürtünme açısı (ϕ_b) değerleri her bir numune için tek tablo ile gösterilmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kayaların Tiltmetre'de ölçülen temel sürtünme açıları.

Kaya no	ϕ_b açısı (°)
S - 1	29,5
S - 2	34,3
S - 3	34,3
S - 4	36,0

3.3. Profilometre Ölçümleri

Küçük blok örnekler üzerinde oluşturulan yapay süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüklerini belirlemek amacıyla yapılan profilometre ölçümleri, merkezden, kenar ve köşelerden olmak üzere toplam 6 profil hattı üzerinden alınmıştır. Ölçümlerde kullanılan profilometre cihazının hassasiyeti 0,0001 mm'dir. Çizelge 3'de profilometre ile ölçülen pürüzlülük açılarının bir örnek yer almaktadır.

Çizelge 3. S-3 numunesi için profilometre ile ölçülen pürüzlülük açıları.

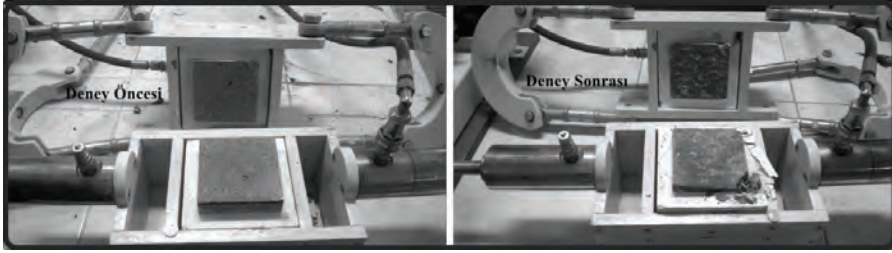
S ₃ -1					S ₃ -2					S ₃ -3			
MD	KÖ1	KÖ2	KE1	KE2	MY	DMY	H1	H2	MMY	MD	KÖ1	KÖ2	MY
6,53	8,22	1,33	7,58	6,84	12,37	5,85	3,51	0,32	9,85	8,05	3,15	0,94	9,43
12,10	1,41	11,62	2,14	5,21	4,64	4,22	8,24	4,14	4,87	5,07	2,10	11,56	1,63
0,71	5,87	7,62	6,661	1,42	2,16	0,03	5,57	5,03	3,87	3,18	8,30	5,35	3,75
4,88	4,18	15,56	5,06	0,18	4,55	8,87	4,61	0,42	3,64	1,13	8,93	8,41	8,21
7,89	3,69	7,82	1,19	6,77	10,79	1,01	3,82	3,89	14,62	5,80	3,50	9,16	4,50
4,31	0,22	0,12	2,76	4,70	2,61	6,59	2,42	10,45	8,40	4,27	8,07	5,40	2,27
11,89	3,43	6,53	3,82	3,49	1,80	2,23	3,28	3,55	4,90	1,53	9,37	2,78	6,72
3,76	4,06	3,24	3,36	0,79	4,12	2,50	8,99	1,00	7,05	2,25	7,44	10,94	5,03
3,70	6,75	2,92	3,79	2,29	3,31	5,27	2,66	0,21	3,71	0,46	5,13	1,92	8,08
3,27	8,14	1,35	14,99	1,89	7,05	1,38	9,36	2,42	2,93	0,28	1,42	0,98	1,02
1,85	5,21	12,61	3,81	2,68	1,81	0,63	1,51	0,80	11,48	0,26	12,32	12,04	
0,74		3,13	6,01	0,06	4,35	1,09	6,02	12,62		0,68	12,32	2,40	
3,73				4,18			1,14	5,61			9,76	5,13	
5,97						3,99					6,33	4,27	
6,89											8,19		
1,58													
3,33													
4,89	4,43	6,15	5,09	3,12	4,96	3,23	5,00	3,88	6,85	2,75	7,09	5,80	5,06
S ₃ ORT: 4,88													

*MD: Merkezden dikey yönde, MY: Merkezden yatay yönde KÖ.1-2: 1. ve 2. köşeden, KE.1-2: 1. ve 2. kenardan alınan ölçümler.

3.4. Portatif Kesme Kutusu ile Süreksizlik Dayanım Deneyi

Bu deney, taşınabilir bir makaslama düzeneği kullanılarak, kaya kütlelerinin içerdiği doğal süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı parametrelerinin tayini amacıyla yapılmaktadır. Bu çalışmada alçı kalıp içine gömülerek sabitlenen örneğin alt ve üst blokları, süreksizlik yüzeyleri üst üste gelecek şekilde cihaza yerleştirilmekte ve hidrolik bir pompa ile yüklemeye yapılmaktadır. Süreksizliklerin makaslanmasına neden olan bu hareketin sürekli ve sabit bir hıza sahip olması gerekmektedir. Son olarak, süreksizliklerin dayanımı doruk dayanıma ulaştığında okuma alınmaktadır (Şekil 5).

Portatif kesme kutusu düzeneğinden elde edilen veriler ve ortalama değerleri Çizelge 4'de sunulmuştur.



Şekil 5. Portatif kesme kutusunda pürüzsüz yüzeyin deneyden önceki ve sonraki hali.

Çizelge 4. Portatif kesme kutusu düzeneğinden elde edilen veriler.

Örnek no	Yüzey	Deney no	σ_n (Mpa)	τ (Mpa)	Ortalama(MPa)
S-1	Pürüzlü	Deney 1	4	4,51	3,98
		Deney 2	4	3,93	
		Deney 3	4	--	
S-2	Pürüzsüz	Deney 1	4	3,73	2,97
		Deney 1	4	3,34	
		Deney 2	4	2,94	
S-3	Pürüzlü	Deney 2	4	3,14	3,40
		Deney 3	4	3,93	
		Deney 1	4	2,8	
S-4	Pürüzsüz	Deney 1	4	3,73	2,90
		Deney 1	4	3,14	
		Deney 2	4	2,94	
S-4	Pürüzlü	Deney 2	4	2,94	2,90
		Deney 3	4	--	
S-4	Pürüzsüz	Deney 1	4	2,75	2,90
		Deney 1	4	2,75	

σ_n :Normal Gerilme, τ :Kesme Gerilmesi

3.5. Wille Marka Kesme Cihazı ile Süreksizlik Dayanım Deneyi

Wille marka bilgisayar kontrollü cihaz statik ve dinamik koşullarda normal yük uygulanarak kesme gerilmesi ve deformasyon değeri vermektedir. Cihazın bu özelliklerinden faydalanarak statik koşullarda farklı yük değerleri altında, farklı kesme gerilmesi değerleri elde etmek amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 10 cm'lik küp numuneler üzerinde 7 farklı normal gerime değerine karşılık gelen kesme gerilmesi değerleri temel içsel sürtünme açıları (ϕ_b) ve pürüzlülük açıları (i) ile birlikte değerlendirilmiştir (Çizelge 5).

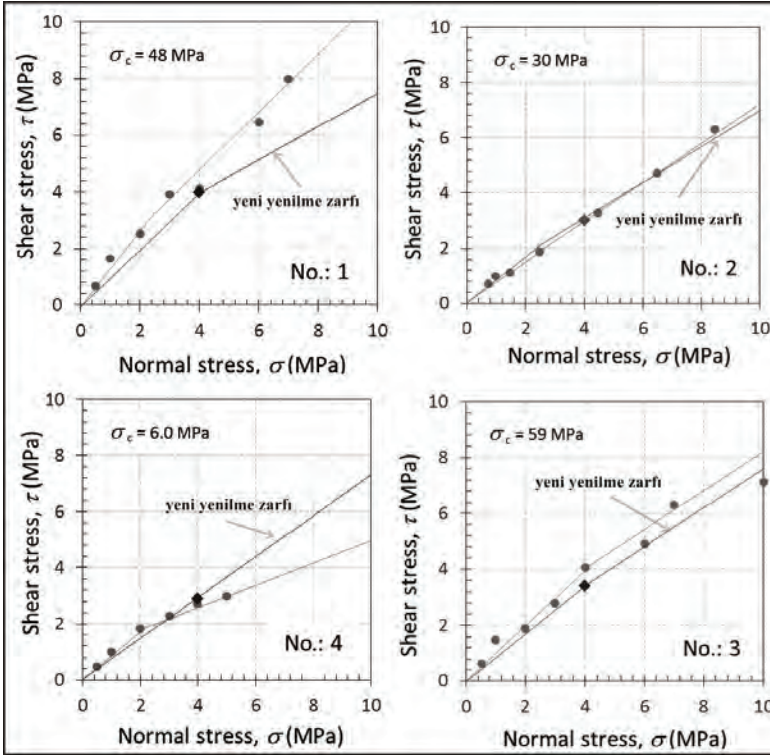
Çizelge 5. 10 cm'lik küp numuneler üzerinde 7 farklı normal gerilme değerine karşılık gelen kesme gerilmesi değerleri.

Örnek no	σ (MPa)	τ (MPa)	$(\phi_b)^\circ$	$(i)^\circ$
S-1	0.50	0.66	30	10
	1.00	1.64		
	2.00	2.51		
	3.00	3.92		
	4.00	4.11		
	6.00	6.47		
	7.00	7.98		
	10.00	10.83		
S-2	0.72	0.71	32	7
	0.97	0.99		
	1.47	1.13		
	2.47	1.86		
	4.47	3.26		
	6.47	4.72		
	8.47	6.31		
	10.47	6.04		
	15.47	10.87		
S-3	0.50	0.63	36	6
	1.00	1.48		
	2.00	1.89		
	3.00	2.79		
	4.00	4.07		
	6.00	4.90		
	7.00	6.31		
	10.00	7.14		
S-4	0.50	0.47	40	8
	1.00	0.99		
	2.00	1.82		
	3.00	2.30		
	4.00	2.72		
	5.00	2.99		
	6.00	Fail		
	7.00	Fail		

* (ϕ_b) : Temel içsel sürtünme açısı, (i) : Pürüzlülük açısı, σ : Normal Gerilme,
 τ : Kesme Dayanımı

4. SONUÇLAR

Portatif kesme kutusu ve kesme cihazları deney sonuçlarından elde edilen normal gerilme-kesme gerilmesi grafikleri incelendiğinde, iki yenilme zarfının kesişim noktasına karşılık gelen normal gerilme değerinin 4 MPa'dan küçük olduğu görülmektedir. Bu durum dikkate alınarak, portatif kesme düzeneğinde 4 MPa'lık normal gerilme altında elde edilen kesme değerlerine göre yeni yenilme zarfları çizilmiştir (Şekil 6). Bu aşamada, 4 MPa'lık normal gerilmeye karşılık gelen kesme gerilmesini temsil eden noktadan yatay ile (Tiltmetreden elde edilen) temel sürtünme açısı çizilmiştir. Eğrinin ikinci kısmı orijinden geçecek şekilde çizilmiş olup, yatayla yaptığı açı tiltmetreden ve profilometreden elde edilen iki açının toplamı $(\phi_b + i)$ olarak alınmıştır. Bu şekilde, sadece bir kesme deneyine ait normal gerilme – kesme gerilmesi veri çifti, temel sürtünme açısı ve pürüzlülük açısı ile birlikte kullanılarak yeni yenilme zarfları elde edilmiştir (bkz. Şekil 6). Bilgisayar kontrollü kesme düzeneğinden “çoklu” olarak gerçekleştirilen doğrudan kesme deneylerinden elde edilen yenilme zarflarının, portatif kesme düzeneğinden elde edilen “tek nokta” yenilme zarfları ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Bilgisayar kontrollü kesme düzeneğinden elde edilen verilerin tek nokta deneyinden elde edilen verilerle karşılaştırılması.

Sonuç olarak, bir süreksizlik yüzeyine ait pürüzlülük açısıyla, aynı kayanın testereyle kesilmiş düz yüzeyinden elde edilen temel sürtünme açısı kolaylıkla bulunabilmektedir. Çift eğrili yenilme zarfının ikinci kısmında kalacak (4,0 MPa gibi) bir normal gerilme altında makaslanan tek süreksizlik deneyinden çift – eğrili yenilme dayanımı elde edilebilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Barton, N. and Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, vol. 10, 1/2, pp. 1-54.
- Ladanyi B., Arehambault G. 1970. Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass. 11th U.S. Rock Mech. Symp., 105-125.
- Patton, F.D. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. Proceedings 1st Congress on Rock Mechanics, ISR Lisbon. Vol. 1, pp. 509-513.
- Vallejo, L. G. and Ferrer, M., 2011. Geological Engineering: CRC Press, 678 pp.

Kaya Kütlesinin Kesme Dayanımının Çok Aşamalı Kesme Deneyi İle Belirlenmesi

Determination of Shear Strength of Rock Mass by multi-Stage Shear Test

K. Zorlu^{1*}, K. Kayabalı^{2,*}, F. Habibzadeh², T. Beyaz³, D. Yılmaz²

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çifilikköy Kampüsü

²Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı Kampüsü

³Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampüsü

(*kivancgeo@mersin.edu.tr)

ÖZ: Kaya kütlelerinin kesme dayanımı, süreksizliklerin kesme dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde, süreksizliklerin kesme dayanımını belirlemek amacıyla, sıklıkla, sabit normal gerilme altında, statik koşullarda ve tek aşamalı olarak uygulanan yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, süreksizliklerin kesme dayanımının, sabit normal gerilme altında, çok aşamalı kesme deneyi ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, üç farklı tür kayaya statik koşullarda, aşamalı yük değerleri altındaki kesme gerilmeleri uygulanmış olup, normal gerilmeler; 0,5 MPa, 1 MPa, 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa ve 8 MPa'dır. Deneylerde, her bir yük aşaması için; gerilme-kesme yer değiştirme eğrisi, en yüksek değerine ulaşmadan hemen önce, bir sonraki yük aşamasına geçilmiştir. Sonuç olarak farklı yük aşamaları için; normal gerilme - kesme yer değiştirmesi ile normal gerilme-kesme dayanımı grafiklerinden elde edilen yenilme zarfının yanı sıra, yüksek gerilme düzeylerinde pürüzlülüklerin tartışıldığı ve bu gerilme düzeylerinden sonra süreksizliklerin, "artık" makaslama dayanım parametrelerinin geçerli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya kütlesi, kesme dayanımı, pürüzlülük açısı, süreksizlik, temel sürtünme açısı.

ABSTRACT: The shear strength of rock masses is directly related to the shear strength of discontinuities. In order to determine the shear strength of discontinuities, only single shear test under static and constant normal stress conditions was used in the literature. In this study, it was aim to determined shear strength of discontinuities by using multisatege shear test under constant normal stress. For this purpose, multistage shear stresses were applied on three different types of rock samples, under static conditions, normal stresses; 0,5MPa,1 MPa, 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa ve 8 MPa. During the tests, according to stress-displacement curve, next loading stage was applied just before reaching the maximum shear value for each loading stage, As a result, failure envelope was obtained from normal stress-shear displacemet and normal stress - shear strength graphs for different loading stage, and also, discontinuity surface was trimmed and residuel strength parameters were valid under high stress conditions.

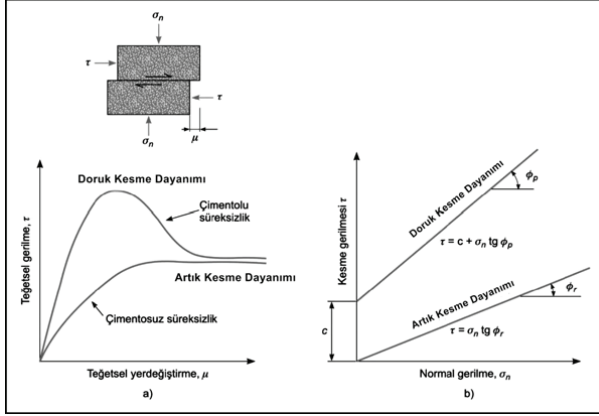
Keywords: rock mass, shear strenght, asperity angle, discontinuity, basic friction angle

1. GİRİŞ

Süreksizlik düzlemlerinin dayanımı, laboratuvarında gerçekleştirilen doğrudan kesme deneyleri ile belirlenmekte ve dayanım parametreleri Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre tayin edilmektedir. Süreksizliklerin kesme dayanımı, düzlemlerin birbirleri ile sürtünmesine ve görünür kohezyonuna bağlıdır. Kohezyonun süreksizliklerin kesme dayanımı üzerine etkisi çok daha az kabul edilmektedir. Düşük normal gerilme düzeyleri altında süreksizlik duvarlarının pürüzlülüğü, süreksizlik yüzeylerinin sürtünme dayanımı üzerinde en etkin faktörlerden biridir. Pürüzsüz, düz süreksizliklerdeki doruk kesme dayanımı Eş. 1'deki (τ_p), Mohr Coulomb denklemi ile belirlenmektedir (Şekil 1).

$$\tau_p = c' + \sigma_n \tan \phi_p \quad (1)$$

Burada, τ_p doruk kesme dayanımı (kPa), c' kohezyon (kPa), σ_p' süreksizlik düzlemi üzerindeki normal etkin gerilme (kPa) ve ϕ_p' etkin gerilme cinsinden içsel sürtünme açısı (derece)'dir.



Şekil 1. a) Düzlemsel süreksizlikler için tipik kesme gerilmesi-kesme yerdeğiştirmesi (τ - μ). b) Bir düzlemsel süreksizliğin teorik kesme dayanımı (Kayabali, 2014).

Yüksek normal gerilme düzeylerinde süreksizlik duvarlarındaki pürüzlülük tıraşlanmakta ve süreksizliklerin sürtünme dayanımı sadece temel sürtünme açısı değeri ile tanımlanmaktadır. Bu durumda, süreksizlikler, yükleme koşullarına yalnızca temel sürtünme açısı ile karşı koymaktadırlar.

Düşük normal gerilme altında, süreksizlik düzlemleri üzerine uygulanan kesme gerilmesi ile süreksizlik düzlemlerinde bir yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Yerdeğiştirmenin oluşabilmesi için, süreksizliğin i açısının aşılması gerekmektedir. Bu durumda toplam sürtünme açısı ($\phi_b + i$) söz konusudur ve τ_p 'nin değeri, kohezyon sıfır alınarak aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş. 2):

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (2)$$

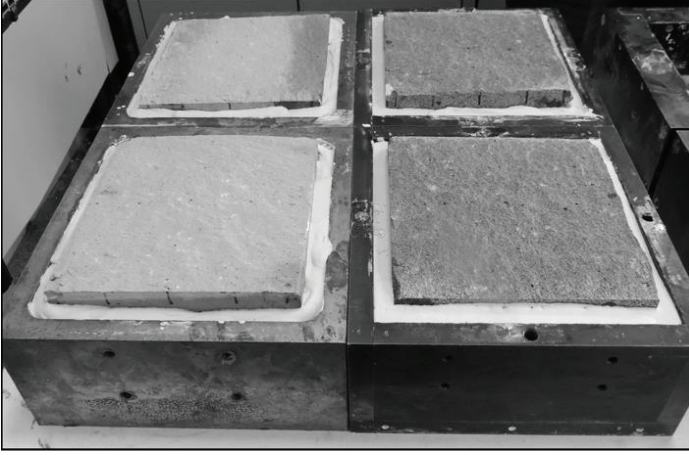
Kesme yerdeğiştirmesinin sürekliliği halinde, süreksizlik yüzelerindeki pürüzlülüğün kenarları kırılabilir ve pürüzlülük düz bir yüzey halini alabilir. Bu durumda, süreksizliğin iki yüzeyi temas ederek sadece ϕ_b 'den söz etmek mümkün olabilmektedir. Düzlem üzerindeki σ_n gerilmesi artarsa genişmeyi önleyen bir değere ulaşılır ve yerdeğiştirmenin gerçekleşmesi için düzensizliklerin yenilmesi gerekir. Bu noktada τ - σ_n eğrisinin eğimi rezidüel sürtünme açısındaki (ϕ_r) ile yaklaşık aynıdır. Yüksek normal gerilmeler için (Eş. 3) geçerli olmaktadır.

$$\tau_p = \sigma_n \tan \phi_r \quad (3)$$

Bu çalışmada, laboratuvarında doğrudan kesme deneyleri için özdeş örnek alınmasının zor olduğu durumlar için çok aşamalı kesme deneyi gerçekleştirilmiştir.

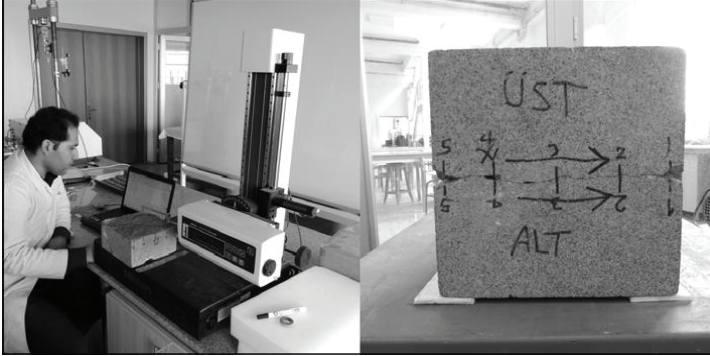
2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada tek eksenli sıkışma dayanımı birbirinden farklı, küp şeklinde kesilmiş 3 çeşit kaya kullanılmıştır (Şekil 2). Kübik olarak kesilmiş kayaların ortasında yapay süreksizlikler oluşturulmuştur. Bu işlem yapılırken özel olarak tasarlanmış bir baltalı pres kullanılmıştır. Bu düzenek ile oluşturulan süreksizliklerin daha sonra yapılan yüzey pürüzlülüğü değerlendirmelerine göre numunelerin özdeş olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, disk kaya kesiciler kullanılarak kayaların yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan küp şeklindeki örneklerin baltalı pres ile oluşturulmuş özdeş süreksizlikler.

Çalışmada, kesme dayanımı değerleri, bilgisayar kontrolü Wille marka kesme kutusu cihazı ile belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, pürüzlülük açısı değerlerinin belirlenmesinde profilometre cihazı kullanılmıştır (Şekil 3).

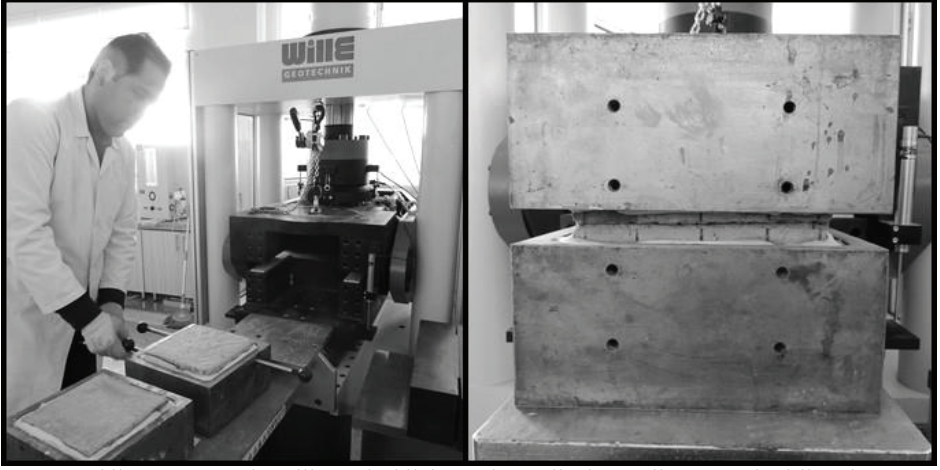


Şekil 3. Süreksizliklerin alt ve üst yüzeylerinin pürüzlülüklerinin profilometre ile belirlenmesi.

2.1. Wille Marka Kesme Cihazı ile Süreksizlik Dayanım Deneyi

Statik ve dinamik koşullarda deney yapılabilen Wille marka bilgisayar kontrollü cihaz, normal yük uygulandığı durumlarda kesme gerilmesi ve deformasyon değerlerini verebilmektedir. Ayrıca cihazın özel olarak hazırlanmış yazılımı ile bilgisayar ekranında deneyi kontrol etmek ve deney sırasında oluşan gerilme ve yerdeğiştirmeleri izlemek mümkün olabilmektedir.

Örnekler deneye tabi tutulmadan önce, cihaz için uygun hazırlanmış kalıpların içerisine yerleştirilerek, bu kalıba bir alçı yardımı ile sabitlenmektedir. Alçının kuruması ve örneğin deneye hazır hale gelebilmesi için oda sıcaklığında en az 24 saat kurutma işlemi gerçekleştirilmelidir. Bu aşamada, yapay olarak elde edilmiş süreksizlik yüzeylerinin alt ve üst yüzeyleri ile makaslama yönü örnekler üzerine işaretlenmektedir (bkz. Şekil 3). Örnek, Wille marka bilgisayar kontrollü cihaz içerisine güvenli bir şekilde yerleştirildikten sonra deneye başlanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Küp örneğin Wille marka bilgisayar kontrollü deney cihazına yerleştirilmesi.

2.2. Deney Yöntemi

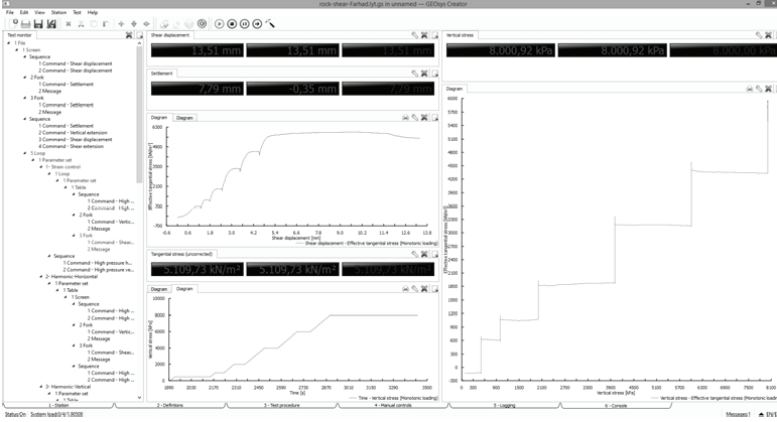
Patton (1966), süreksizliklerde bulunan düzensizliklerin veya pürüzlülüğün etkisine dayalı çift-eğrili bir yenilme modeli önermiştir. Bir süreksizlik düzleminin düzensizliği pürüzlülük açısı (i) ile tanımlanabilir. Pürüzlülük açısı temel sürtünme açısına (ϕ_b) eklenerek yüzeyin toplam ϕ_p değeri elde edilebilir (Eş. 4).

$$\phi_p = \phi_b + i \quad (4)$$

i parametresi düzensizliğin süreksizlik düzlemi ile yaptığı açı olup, süreksizliklerin jeomekanik davranışları üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Bu çalışmada, düşük normal gerilme altında, süreksizliklerin pürüzlülük ve temel sürtünme açılarının toplam ϕ_p değerine ve yüksek normal gerilme düzeylerinde pürüzlülüklerin düzleşerek i açısının ortadan kalktığı, sadece ϕ_b 'nin baskın olduğu durum dikkate alınarak normal gerilme-kesme dayanımı grafiklerinden elde edilmiştir (çift eğrili yenilme zarfı).

Deney her bir örnek üzerinde değişen normal gerilme aşamalarında gerçekleştirilmiştir. Burada önemli olan nokta, bütün normal gerilme aşamalarının aynı örnek üzerinde uygulanmasıdır. Bu şekilde tek bir örnek ile yenilme zarfının çizilmesinin mümkün olup olmayacağı araştırılmıştır. Deneyde kullanılan yük aşamaları; 0,5 MPa, 1 MPa, 2 MPa (düşük normal gerilme düzeyleri için), 4 MPa, 6 MPa ve 8 MPa (yüksek normal gerilme düzeyleri için) olara uygulanmıştır. Deneylerde, her bir yük aşaması için; gerilme-kesme yer değiştirme eğrisi, en yüksek değerine ulaşmadan hemen önce, bir sonraki yük aşamasına geçilmiştir. Yük aşamalarındaki değişim anı cihazın ekran kontrol panelindeki grafiklerden takip edilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).

Deney sonunda, yüksek gerilme düzeylerinin uygulanması ile süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünün tamamen tıraşlandığı ve düz bir yüzey haline geldiği görülmektedir (Şekil 6). Bu da, süreksizliklerin kesme dayanımının sadece ϕ_b ile kontrol edildiğini, süreksizliklerin i açısının bu aşamadan sonra herhangi bir etkisinin kalmadığını göstermektedir.



Şekil 5. Wille marka cihazın ekran kontrol paneli.

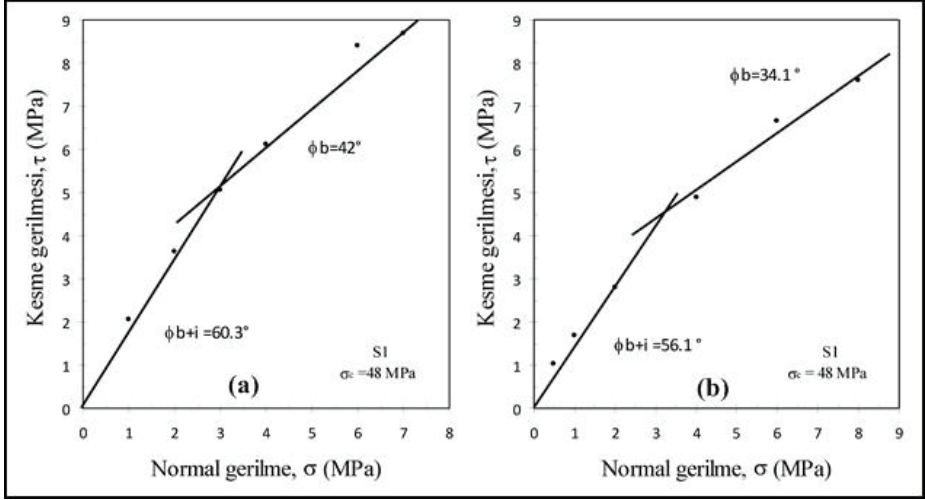


Şekil 6. Deney sonrasında traşlanmış süreksizlik yüzeylerinin durumu.

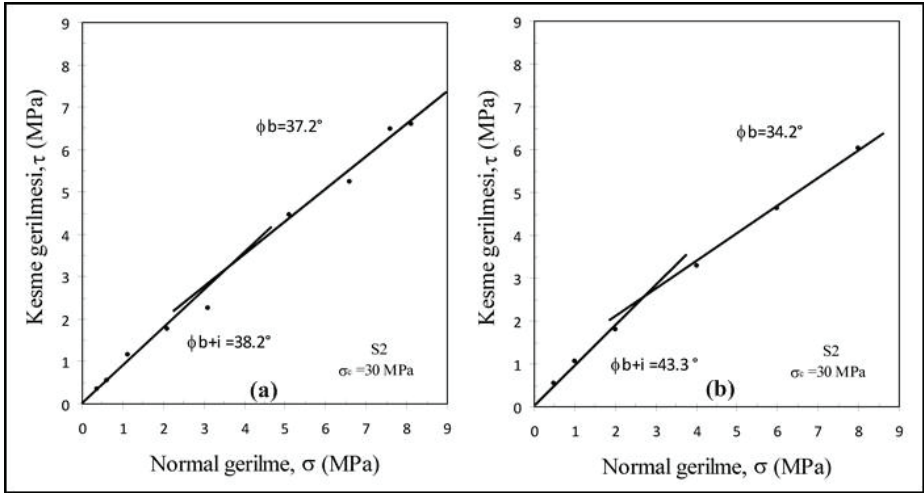
3. DENEYSEL BULGULAR

Tek bir örnek üzerinde aşamalı olarak gerçekleştirilen kesme deneyi sonuçlarına göre; normal gerilme-kesme gerilmesi grafiklerinde, iki yenilme zarfının kesişim noktasına karşılık gelen normal gerilme değerinin, deneyde düşük gerilme sınırı olarak kabul edilen 4 MPa'dan küçük olduğu görülmektedir. 0.5 MPa, 1 MPa ve 2 MPa normal gerilme düzeyleri için yenilme zarfı orijinden geçecek şekilde çizilmiş olup, yatayla yaptığı açı ($\phi_b + i$) olarak alınmıştır. 4 MPa, 6 MPa ve 8 MPa normal gerilme düzeyleri için çizilen yenilme zarfı (eğrinin ikinci kısmı) temel sürtünme açısı (ϕ_b) değeri ile çizilmiştir.

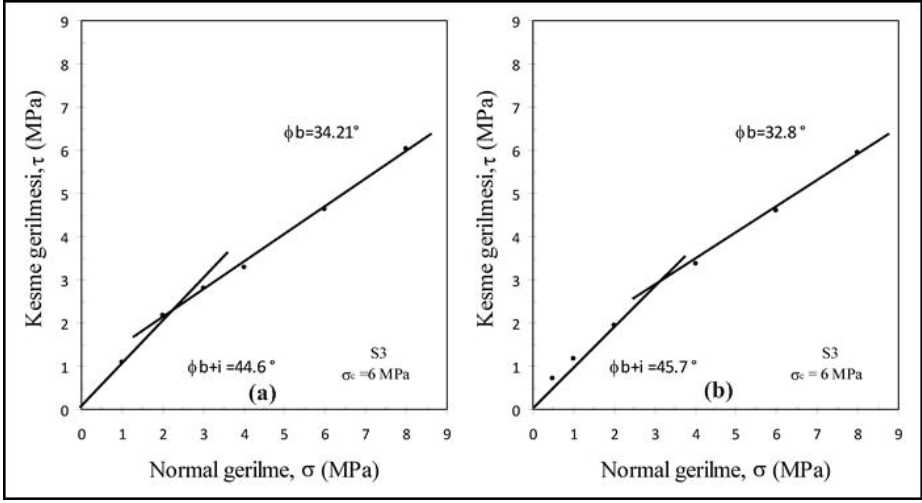
Çalışmada yürütülen aşamalı kesme deneyinin yanı sıra, 3 çeşit kayada, aşamalı deneydeki normal gerime düzeylerinin her biri için (0,5 MPa, 1 MPa, 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa ve 8 MPa düşük ve yüksek normal gerilmelerde) ayrı ayrı kesme deneyleri yapılmıştır. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar Şekil 7, 8, 9'da sunulmuştur.



Şekil 7. S1 örneği için çok aşamalı ve çoklu deneylerden elde edilen düşük ve yüksek normal gerilme düzeylerine ait yenilme zarfları, a) 6 numune ile elde edilen grafik, b) tek numune üzerinde çok aşamalı deneyle elde edilen grafik.



Şekil 8. S2 örneği için çok aşamalı ve çoklu deneylerden elde edilen düşük ve yüksek normal gerilme düzeylerine ait yenilme zarfları, a) 6 numune ile elde edilen grafik, b) tek numune üzerinde çok aşamalı deneyle elde edilen grafik.



Şekil 9. S3 örneği için çok aşamalı ve çoklu deneylerden elde edilen düşük ve yüksek normal gerilme düzeylerine ait yenilme zarfları, a) 6 numune ile elde edilen grafik, b) tek numune üzerinde çok aşamalı deneyle elde edilen grafik.

4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, çalışmalarda önce tek bir kaya numunesi için 6 örnek üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapay süreksizlik yüzeylerine uygulanan normal gerilmeler 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 6,0 ve 8,0 MPa'dır. Bu normal gerilme koşullarında elde edilen en büyük kesme gerilmesi değerleriyle birer veri çifti oluşturularak elde edilen noktalar grafiğe taşınmış ve noktaların konumuna en iyi uyan zarflar çizilmiştir (bkz. Şekil 7a, 8a ve 9a). Elde edilen yenilme zarfları Patton (1966) tarafından geliştirilen çift eğrili yenilme ölçütünü çok iyi bir şekilde yansıtmaktadır.

Çok aşamalı deneylerde “çok örnekli” numunelerde kullanılan normal gerilme değerleri uygulanmıştır. Her bir aşamada kaydedilen en büyük kesme gerilmesi değeri ile oluşturulan veri çiftleri grafiğe aktarılarak, sonuçta her bir kaya türü için elde edilen 6 noktaya en iyi uyan yenilme zarfları çizilmiştir (bkz. Şekil 7b, 8b ve 9b).

Özdeş süreksizlik yüzeylerine sahip örneklerin alınmasının ve hazırlanmasının oldukça güç olduğu kesme deneyleri için, tek bir örnek üzerinde, pürüzlülük açısının ve temel sürtünme açısının kolaylıkla bulunabildiği tek bir deney ile çift eğrili yenilme zarfı çizilebilmektedir. Bu deneylerden elde edilen ($\phi_b + i$) ve (ϕ_b) değerleri, çok aşamalı deneyden elde edilenler ile karşılaştırılmış (bkz. Şekil 7a,b, 8a,b, 9a,b) ve birbirine yakın değerler elde edildiği gözlenmiştir. Bu da, örnek almanın ve hazırlamanın oldukça güç olduğu kesme deneyleri için çok aşamalı deneylerin kullanılabileceğini ve elde edilen verilerin güvenilir olduğunu göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

- Kayabalı, K., 2014. Mühendislik jeolojisi. Ankara Üniversitesi yayınları, 674 s (Geological Engineering, G. Vallejo ve M. Ferrer, 2011, CRC press'den çeviri).
- Patton, F.D. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. Proceedings 1st Congress on Rock Mechanics, ISR Lisbon. Vol. 1, pp. 509-513.

TARİHİ YAPILARIN KORUNMASINDA
MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

Mermerlerde Isıl Etki Nedeniyle Oluşan Şekerlenme Sorununun Kestirimi Prediction of Sugaring Problem by Thermal Treatment in Marbles

Y. Mahmutoğlu

İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, İstanbul
(yilmazm@itu.edu.tr)

ÖZ: Tarih boyunca, insanlığın en sık kullandığı en önemli doğal taş türlerinden birini mermer oluşturur. Ancak, bozunma etmenlerinden dolayı yıpranma bu tür taşların mühendislik özelliklerinde değişime neden olmaktadır. Isıl dalgalanma, şekerlenme, kavlaklanma, bükülme gibi yıpranmalar üzerinde en önemli etkenlerden birini oluşturur. Bu sorunların önlenmesi ve giderilmesine yönelik koruma, iyileştirme veya yenileme çalışmalarının seçiminde ise taş özelliklerinde olumsuz yönde oluşan değişimin düzeyi dikkate alınmaktadır. Onarım veya koruma çalışmalarının değerlendirilmesi amacıyla, mermerin malzeme özelliklerinin ölçülmesi ve sınıflandırılması için birçok geleneksel deney yöntemi önerilmektedir. Ancak, çoğu durumda tarihi ve kültürel yapılar ile anıt ve heykellerden deneysel çalışmalar için örnek almak mümkün değildir. Bu nedenle, anılan malzemelerdeki kötüleşmenin belirlenmesi amacıyla hasarsız deney yöntemleri tercih edilmektedir. Benzer amaçlar için yerinde uygulanabilir, en pratik yöntemlerden birini ultra-ses hızı ölçümü oluşturmaktadır. Bildiride, farklı sayıda periyodik ısıl işleme tabi tutulan mermer örneklerinin ultra-ses hızı ile diğer önemli malzeme özellikleri arasındaki ilişki irdelenmiştir. Deneysel çalışmalar, iri taneli ve homojen, beyaz renkli Muğla mermeri kullanılarak periyodik ısıtma-soğutma ve donma-çözülme işlemlerine maruz bırakılan 7 farklı örnek grubu üzerinde uygulanmıştır. Farklı çevresel koşullarda elde edilen deney sonuçlarından, mermerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde oluşan değişimin ultra-ses hızı ile güvenilir düzeyde ilişkilendirilebileceği belirlenmiştir. Sonuçta, kuru ve suya doymun hallerdeki P dalgası hızları arasındaki oran ile kılcal su emme katsayısı ve görünür porozite arasındaki ilişkilerin mermerlerde oluşan şekerlenme türü bozunmanın iki önemli göstergesi olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mermer, şekerlenme, ısıl işlem, ultra-ses hızı, kılcal su emme

ABSTRACT: One of the most favourite natural stone used by humankind throughout historical period is marble. However, engineering properties of marble can vary because of degradation by weathering agents. Thermal fluctuation is one of the most important agent on deteriorations such as sugaring, bowing, cracking and spalling of marble. As a result, physical and mechanical properties of marble used in the construction of old and/or modern 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, non-destructive testing methods are often suggested for the prediction of weathering grade of building stones. One of the most practical method for similar purposes is ultrasonic pulse velocity measurement, which can be performed in place. The main goal of this study is attainment of sound empirical correlations between the ultrasonic pulse velocity and engineering properties of previously deteriorated marble. Experimental works were conducted on seven different specimen categories of a coarse-grained marble having different micro-crack frequencies induced by both cyclical heating-cooling and freeze-thaw actions. The experimental results indicated that variations in physical and mechanical properties of Muğla marble can be reliably estimated for different environmental cases by ultrasonic pulse velocities. The ratio between P-wave velocities (V_p) in dry and saturated conditions are two sound indicators of both the apparent porosity and the coefficient of capillary absorption, and whereby the sugaring type of deterioration for coarse-grained marbles.

Keywords: Capillary absorption, marble, pulse velocity, sugaring, thermal treatment

1. GİRİŞ

Dünyada doğal taşın yaygın ve çok amaçlı kullanımı milattan önceki yüz yılda Roma'da başlamıştır. Günümüzde halen iç ve dış kaplamada ve anıtlarda güvenilir ve dekoratif malzeme olarak tercih edilmektedir. Mermer, tarihsel dönemde mimari elemanların yapımında en yaygın kullanılan taş türüdür. Ancak atmosferik etkenlere hassas olup, sınırlı dayanıklılığa sahiptir. Yağmur, kar, periyodik sıcaklık

değişimi, rüzgâr ve kirlenici 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 problemlerine, ani sıcaklık değişimi ise farklı genleşmeden dolayı iç gerilmeye neden olmaktadır.

Mineral bileşiminden dolayı, atmosfer sıcaklığındaki periyodik değişim mermerlerin hastalığında çok büyük öneme sahiptir. Birçok farklı neden ileri sürülse de, 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. Bu terim mermer tanelerinin dağılması sonucunda kalsit tanelerinin şekere benzer toza dönüşmesinden türetilmiştir (Carfagni, 1999; Sassoni ve Franzoni, 2014). Darot ve Reuschle (2000), Ferrero ve Marini (2001), Siegesmund vd. (2000), Zeisig vd. (2002), Bandini ve Berry (2013), ısıl etkinin doğal taşların mühendislik özelliklerini olumsuz olarak etkilediğini ortaya koymuşlardır. Ancak, pratikte laboratuvar deneyleri için antik yapılardan ve anıtlardan örnek alınması mümkün olmadığından, kullanılan taşların mühendislik özellikleri çoğu zaman geleneksel deneylerle kolayca belirlenmemektedir. Bu nedenle, yapı elemanlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yerinde uygulanabilen hasarsız deney teknikleri tercih edilmektedir. En yaygın hasarsız deney tekniği, ses dalgalarının malzeme içerisinde geçiş hızının ölçülmesidir. Bu yöntemle, doğal taşlardaki bozunma derecesinin kestirimine yönelik çok sayıda olgu tartışılmıştır (Weiss vd., 2002, 2003; Siegesmund ve Dürrast, 2011; Christaras, 2003; Török ve Vasarhelyi, 2010; Luque vd., 2011; Ruedrich vd., 2011; Moropoulou vd., 2013). Bu yöntemin kullanıldığı çalışmaların çoğu mermerlerin analizi üzerine olduğu, düşük ultra-ses hızlarının artan bozunma derecesine işaret ettiği belirlenmiştir.

Bildiride tartışılan çalışmada kaba taneli mermerden (Muğla mermeri) hazırlanan farklı düzeylerde ısıl işleme tabi tutulan örneklerin kuru, doygun ve donmuş haldeki ultra-ses hızları ile mühendislik özellikleri arasındaki ilişkiler irdelenmiştir. Bu kapsamda laboratuvarda yürütülen deneysel çalışmalar, başlangıçta art arda iki farklı termal işlem (ısıtma-soğutma ve donma çözülme) geçirilerek tane sınırları önceden örselenen 7 farklı örnek kategorisi üzerinde uygulanmıştır. Beşer numuneden oluşan her örnek kategorisi üzerinde fiziksel özelliklerin tespitine yönelik deneyler, ultra-ses hızı ölçümü ve tek eksenli basınç deneyleri sıralı olarak yapılmıştır.

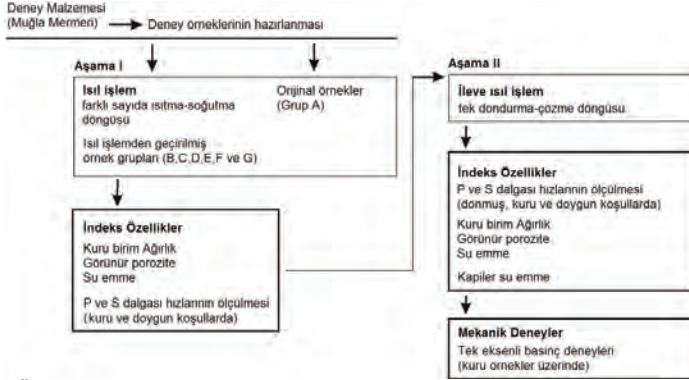
2. MALZEME VE YÖNTEM

Deney malzemesi olarak homojen ve izotrop özelliklere sahip Muğla Kavaklı Dere bölgesinde işletilmekte olan iri kristalli mermer seçilmiştir. Genellikle düzgün şekilli taneleri düz ve hafif eğrilikle olup kayaç homoplastik dokuya sahiptir. Mikroskopta incelenen kesitlerde tane boyunca genellikle 0.5-2 mm arasında değiştiği, kimyasal olarak ise %99 CaCO₃'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 54 mm ve boy/çap oranı 2 olan silindirik numuneler kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan 42 adet örnek tek bir bloktan, aynı yönde alınan karotlardan hazırlanmıştır. 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 işlem 400°C, soğutma ise 20°C sıcaklıkla sınırlandırılmıştır.

Isıl işlem iki aşamalı uygulanmış (Şekil 1), ilk aşamada, 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 (V_{pd} , V_{ps} , V_{sd} ve V_{ss}) ölçülmüştür (ASTM D2845-08, 2008). İkinci aşamada, A grubu örnekler dahil, tüm örnekler bir kez 24 saatlik sürelerle donma-çözülme işlemine tabi tutulmuştur. Dondurma işleminin hemen ardından çözülmeye müsaade etmeden donmuş örneklerde P ve S dalgalarının hızı (V_{pf} , V_{sf}) ölçülmüştür. 24 saatlik çözülme süresi sonunda ise, önce ilk aşamada uygulanan deneyler (birim hacim ağırlığı, görünür porozite, su emme değerleri ile kuru ve doygun haldeki P ve S dalgalarının hızları (V_{pd2} , V_{ps2} , V_{sd2} ve V_{ss2}) tekrar ölçülmüş, daha sonra aynı örnekler kılcal su emme deneyine tabi tutulmuştur. İkinci aşamanın sonunda tüm örnekler

kurutulmuş ve deformasyon kontrollü tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli basınç deneylerinde deformasyon hızı ($5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) tüm örnekler için aynı alınmıştır. Örnek gruplarının I. ve II. ısıtma işlem aşamaları sonundaki ortalama kuru birim hacim ağırlığı, görünür porozitesi, su emmesi, kuru ve doymun haldeki V_p ve V_s hızları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Örnek hazırlama, ısıtma aşamaları ve deneysel çalışmaları gösteren akım şeması.

Çizelge 1. Isıtma işlemi I. aşaması sonrasında örnek gruplarının ortalama kuru birim hacim ağırlığı (γ_d), görünür porozitesi (n_a), su emmesi (a_w), kuru (V_{pd} , V_{sd}) ve doymun (V_{ps} , V_{ss}) halde ölçülen P ve S dalgalarının hızları.

Örnek Grubu	Örnek Sayısı	IDS	γ_d (kN/m^3)	n_a (%)	a_w (%)	Kuru ve Doymun P ve S Dalgası Hızları (m/s)			
						V_{pd}	V_{sd}	V_{ps}	V_{ss}
A	5	Orjinal	27.10	0.14	0.05	5636	3759	6513	5458
G	5	1/2	26.90	0.96	0.36	2182	1576	3223	2932
D	5	1	26.76	1.32	0.49	1583	1445	2519	1769
B	5	2	26.49	2.07	0.78	1160	949	1678	
C	5	3	26.43	2.31	0.87	1027	808	1425	Uygulanamadı
E	5	4	26.34	2.39	0.91	1111	1044	1636	
F	5	8	26.32	2.47	0.94	1170	981	1696	

Çizelge 2. Isıtma işlemi II. aşaması sonrasında örnek gruplarının ortalama kuru birim hacim ağırlığı (γ_{d2}), görünür porozitesi (n_{a2}), su emmesi (a_{w2}), donmuş (V_{pf} , V_{sf}), kuru (V_{pd2} , V_{sd2}) ve doymun (V_{ps2} , V_{ss2}) halde ölçülen P ve S dalgalarının hızları.

Örnek Grubu	γ_{d2} (kN/m^3)	n_{a2} (%)	a_{w2} (%)	Donmuş, Kuru ve Doymun Halde P ve S Dalgası Hızları (m/s)					
				V_{pf}	V_{sf}	V_{pd2}	V_{sd2}	V_{ps2}	V_{ss2}
A	27.07	0.23	0.09	6251	6038	5636	3620	5873	
G	26.87	0.97	0.36	5404	5311	2182	1750	4437	
D	26.73	1.40	0.52	4892	4303	1583	1360	3547	Uygulanamadı
B	26.46	2.28	0.86	5186	4396	1160	932	2712	
C	26.41	2.41	0.91	5232	4226	1027	790	2295	
E	26.31	2.68	1.02	5366	4818	1111	1048	2689	
F	26.29	2.65	1.01	5433	4806	1170	983	2606	

3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Isıtma İşlemi İlk Aşaması Sonrası Görünür Porozite ve Ultra Ses Hızı Arasındaki İlişkiler

Çizelge 1'den anlaşıldığı gibi ısıtma işlemi I. aşaması sonrasında deney örneklerinin kuru birim hacim ağırlıkları, görünür poroziteleri ve su emmesi ısıtma-soğutma döngüsü sayısına bağlı olarak değişmiştir. Bu aşama sonrasında, ısıtma döngü sayısına bağlı olarak, örneklerin görünür porozitesi ve su emmesi önemli oranda artarken birim hacim ağırlıkları azalmaktadır. Görünür porozitedeki artış oranı G ve D grubu örneklerde, fazla sayıda ısıtma işlemi tabii tutulan diğer gruplara göre (B, C, E, F) daha fazladır. Bu durum, ısıtma işlemi nedeniyle kalsit kristalleri arasındaki açılmaya işaret etmektedir (Şekil 2). En fazla ısıtma döngüsüne tabii tutulan F grubu örneklerin ortalama görünür porozitesi ve su emmesi orijinal örneklerinki (A grubu) ile karşılaştırıldığında, artış miktarlarının sırasıyla %2.33 ve % 0.89 olduğu anlaşılmıştır (Çizelge 1). Kuru birim hacim ağırlığındaki hızlı azalma ise beklendiği gibi ilk ısıtma döngüsü sonrasında görülmektedir. Isıtma

işlemin birinci aşaması sonrasında ortalama kuru birim hacim ağırlığı 27.10 kN/m³ den 26.32 kN/m³'e düşmüş, görünür porozite ise % 0.14 den % 2.47'ye ulaşmıştır.

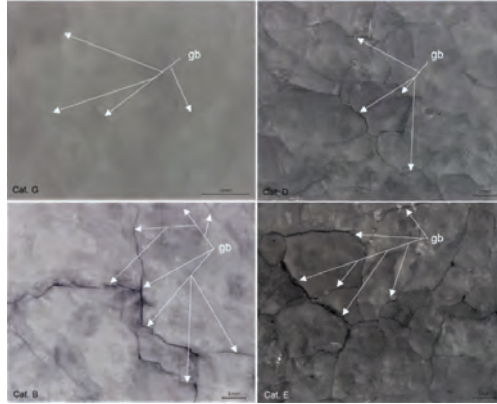
Kuru ve doymun örneklerin P dalgası hızları ile kuru örneklerin S dalgası hızları ile görünür poroziteleri arasındaki ilişki, deneye tabi tutulan tüm örnekler için, Şekil 3'de verilmiştir. Buradan, deney örneklerinin ultra ses hızları ile görünür poroziteleri arasında sağlam bir ilişkinin olduğu anlaşılmaktadır. Bu ilişkileri tanımlayan yüksek güvenilirlikli korelasyon eğrileri ($R^2 = 0.93-0.98$) Eşitlik 1, 2 ve 3'de verilmiştir.

$$V_{pd} = -1783 \ln(n_a) + 3068 \quad (1)$$

$$V_{ps} = -1591 \ln(n_a) + 2344 \quad (2)$$

$$V_{sd} = -983 \ln(n_a) + 1733 \quad (3)$$

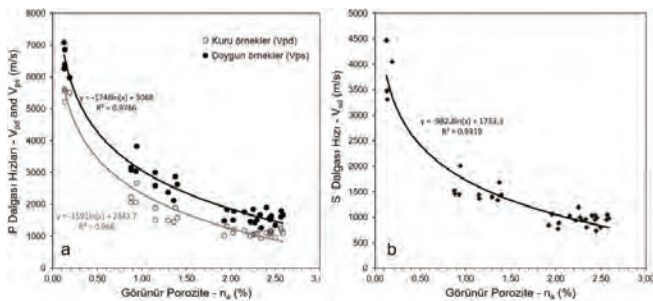
Eşitliklerde; V_{pd} , V_{ps} and V_{sd} 'nin birimi m/s, n_a 'nın ki ise yüzdendir.



Şekil 2. G, D, B ve E örnek gruplarının parlatılmış yüzeylerine ait mikro-görüntüler (gb: tane sınırları boyunca açılmaları gösterir).

Ancak, ortalama V_{ps}/V_{pd} oranı 1.16'dan 1.59'a değişmektedir. En yüksek oran D grubu örnekler için en düşük oran ise orijinal örnekler (A) için elde edilmiştir (Çizelge 3). Bu değerler, deneye tabi tutulan örnekler için, mikro çatlaklı örneklerin doymun haldeki P dalgası hızının (V_{ps}), kuru örneklerle oranla 1.4-1.6 yüksek olduğunu gösterir. Kuru haldeki örneklerin P ve S dalgalarının hızları (V_{pd} , V_{sd}) arasındaki ilişki ise Şekil 4 de verilmiştir. Şeklin üzerinde ısıtım döngüsü sayısına işaret eden örnek grubu simgeleri işaretlenmiştir. Bu şekilden de izlendiği gibi iki hız arasında doğrusal bir ilişki görülmektedir. Yüksek korelasyon katsayısına sahip ($R^2=0.97$) bu ilişki aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır. Eşitlikteki V_{pd} , V_{sd} hızlarının birimi m/s'dir.

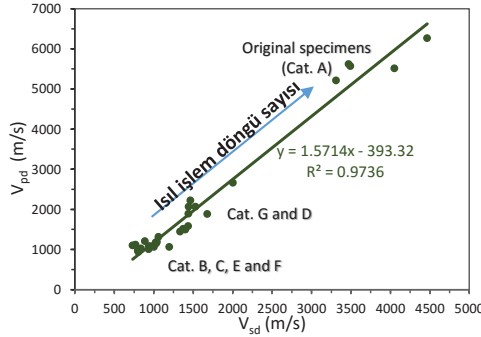
$$V_{pd} = 1.57V_{sd} - 393 \quad (4)$$



Şekil 3. Isıtım işleminin I. aşaması sonrasında kuru ve doymun haldeki örneklerin P dalgası hızları ile görünür porozite arasındaki ilişki (a), S dalgası hızı ile görünür porozite arasındaki ilişki (b).

Çizelge 3. I. ve II. ısıl işlem sonrasında örnek gruplarının ultra-ses hızları arasındaki oranların değişimi.

Örnek Grubu	Örnek Gruplarının Isıl İşlem Aşamaları					
	Aşama I			Aşama II		
	V_{ps}/V_{pd}	V_{pd}/V_{sd}	V_{ps2}/V_{pd2}	V_{pd2}/V_{sd2}	V_{ps2}/V_{pf}	V_{sd2}/V_{sf}
A	1.16 (±0.09)	1.50 (±0.12)	1.61 (±0.13)	1.01 (±0.01)	0.94 (±0.01)	0.59 (±0.05)
G	1.47 (±0.07)	1.38 (±0.08)	1.37 (±0.37)	1.08 (±0.06)	0.82 (±0.07)	0.33 (±0.07)
D	1.59 (±0.09)	1.10 (±0.02)	2.34 (±0.09)	1.12 (±0.06)	0.73 (±0.05)	0.31 (±0.02)
B	1.45 (±0.04)	1.22 (±0.09)	2.30 (±0.29)	1.27 (±0.06)	0.52 (±0.08)	0.21 (±0.02)
C	1.39 (±0.04)	1.28 (±0.18)	2.13 (±0.04)	1.37 (±0.22)	0.44 (±0.04)	0.18 (±0.02)
E	1.47 (±0.17)	1.06 (±0.03)	2.25 (±0.20)	1.10 (±0.07)	0.50 (±0.05)	0.22 (±0.03)
F	1.45 (±0.16)	1.19 (±0.08)	2.29 (±0.22)	1.16 (±0.11)	0.48 (±0.04)	0.20 (±0.02)



Şekil 4. Isıl işlemin I. aşaması sonrasında kuru örneklerin P ve S dalgası hızları arasındaki ilişki.

3.2. Isıl İşlemin İkinci Aşaması Sonrası Görünür Porozite ve Ultra Ses Hızı Arasındaki İlişkiler

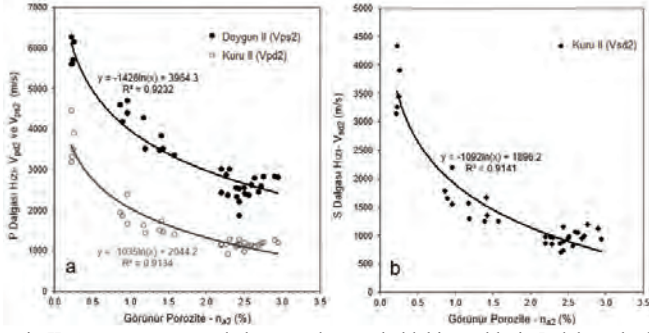
Isıl işlemin ikinci aşamasında aynı örnekler ilave bir donma-çözülme işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlem sonrasında, mermer örneklerinin fiziksel özelliklerinde ilave değişiklikler oluşmuştur. Isıl işlemin birinci aşamasında fazla sayıda ısıtma soğutma-döngüsüne tabi tutulan B, C, E ve F grubu örneklerin fiziksel özelliklerindeki değişim belirgin, diğer A, D ve G gruplarda çok belirgin değildir. E ve F grubu örneklerde ortalama görünür porozite sırasıyla % 2.68 ve % 2.65 olarak belirlenmiştir (Çizelge 3). Bu aşamada elde edilen P ve S dalgası hızları ile görünür porozite arasındaki ilişkiler Şekil 5'de verilmiş ve Eşitlik 5, 6 ve 7 ile tanımlanmıştır. Şekil 3a ile karşılaştırıldığında, bu aşamanın sonunda, kuru haldeki örneklerin P dalgası hızında (V_{pd2}) bir azalmanın olduğu, doygun haldeki B, C, E ve F grubu örneklerindeki (V_{ps2}) ise artmanın olduğu belirlenmiştir. Bu durum bir çelişki olarak görülmesine rağmen, elde edilen farkın örneklerin I. ve II. aşama sonrasındaki su emmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Örnek gruplarının V_{pd} ve V_{pd2} hızları arasındaki ortalama farklar Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. Buna rağmen, Şekil 5 ile Şekil 3 karşılaştırıldığında, ikinci ısıl işlem sonrasında da kuru haldeki P ve S dalgası hızları ile görünür porozite arasındaki ilişkiler benzerdir.

$$V_{pd2} = -1035 \ln(n_{a2}) + 2044 \quad (5)$$

$$V_{ps2} = -1428 \ln(n_{a2}) + 3964 \quad (6)$$

$$V_{sd2} = -1092 \ln(n_{a2}) + 1896 \quad (7)$$

Şekil 7 de deney örneklerinin kuru ve doygun şartlarda ölçülen P dalgası hızları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi Isıl işlemin I. ve II aşamasından sonra elde edilen V_{pd} ve V_{ps} hızları logaritmik eşitlikler yardımıyla (Eşitlik 8 ve 9) korele edilebilmektedir. Kuru ve doygun örneklerde ölçülen hızlar karşılaştırıldığında, doygun olanlar için ölçülen hızların beklendiği gibi daha yüksek olduğu görülür. Doygun ve kuru örnekler için elde edilen P dalgası hızları arasındaki oranın (V_{ps2}/V_{pd2}) ısıl işlemin II. aşamasından sonra arttığı anlaşılmaktadır. Bu oran ortalama olarak orijinal örneklerde 1.6 iken en fazla ısıl işleme maruz bırakılan F grubu örneklerde 2.27'ye ulaşmaktadır (Çizelge 3). Diğer bir ifade ile, V_{ps2}/V_{pd2} oranı kalsit taneleri arasında oluşan mikro-fissürlerin genişlemesi ile artmaktadır (Şekil 2).



Şekil 5. Isıl işlemin II. Aşaması sonrasında kuru ve doymun haldeki örneklerin P dalgası hızları ile görünür porozite arasındaki ilişki (a), S dalgası hızı ile görünür porozite arasındaki ilişki (b).

Bu durum, genel anlamda O'Connell ve Budiansky (1974) tarafından tartışılan durumla uyumludur. Bu nedenle bu oran şekerlenme ve bükülme gibi ısı etkisiyle oluşan bozunmanın bir göstergesi olarak dikkate alınabilir.

$$V_{ps} = 2.95 \ln(V_{pd}) + 1.24 \quad (8)$$

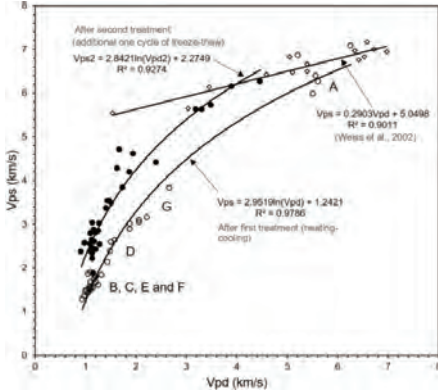
$$V_{ps2} = 2.84 \ln(V_{pd2}) + 2.27 \quad (9)$$

Eşitliklerde V_{ps} ve V_{pd} hızlarının birimi km/s dir.

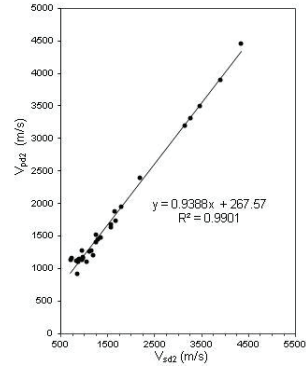
Şekil 7 de ısı işlemin ikinci aşamasından sonra elde edilen V_{pd2} ve V_{sd2} hızları karşılaştırılmıştır. Belirtilen hızlar arasındaki ilişki Eşitlik 10'da verilmiştir. Çizelge 3'de verilen değerler elde edilen eşitlik karşılaştırıldığında, bir çelişki gözükmemektedir. Bu çelişki, Çizelge 3'de her örnek grubuna ait ortalama değerlerin, Şekil 7'de ise 35 adet tüm deney örneklerine ait tekil değerlerinin göz önünde tutulmasından kaynaklanmaktadır. V_{pd2} hızının maksimum ve minimum değerleri sırasıyla 1467 m/s ve 918 m/s, V_{sd2} 'nin ise 4337 m/s ve 700 m/s dir. Eşitlik 10 belirtilen aralıklar için dikkate alınmalıdır.

$$V_{pd2} = 0.94V_{sd2} + 268 \quad (10)$$

Burada V_{pd2} ve V_{sd2} hızlarının birimi m/s olup, ısı işlemin ikinci aşamasından sonra elde edilmiş değerlere karşılık gelmektedir.



Şekil 6. Doymun (V_{ps}) ve kuru (V_{pd}) örneklerin P dalgası hızlarının karşılaştırılması (İçer boş daireler ısı işlemin ilk aşaması sonrasında, dolu olanlar ise ikinci aşamasından sonra ölçülen değerlere karşılık gelir. Weiss vd., 2002 ölçümleri eşkenar dörtgenle belirtilmiştir).



Şekil 7. Isıl işlemin ikinci aşaması sonrasında ölçülen V_{pd2} ve V_{sd2} hızları arasındaki ilişki.

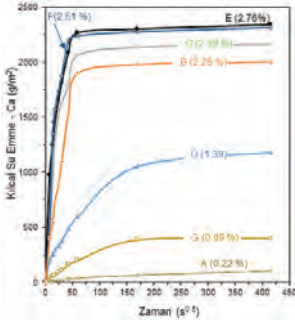
3.3. Kılcal Su Emme ve Ultra Ses Hızı Arasındaki İlişki

Isıl işlemin ikinci aşamasının sonrasında deney örnekleri ayrıca kılcal su emme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler BS EN 1925 (1999) standardına uygun olarak 2 günlük süreyle sürdürülmüştür. Her bir örnek grubundan bir örneğin kılcal su emme davranışı Şekil 8'de verilmiştir. Davranış eğrilerinin üzerinde örnek grupları ve görünür poroziteleri ayrıca belirtilmiştir. Şekilden örnek gruplarının su emme davranışındaki önemli farklılıklarının olduğu, fazla sayıda ısıtma-soğutma döngüsüne maruz bırakılanlarda su emme hızının çok yüksek, G ve D gruplarında düşük, orijinal örneklerde (A grubu) ihmal edilebilecek düzeylerde olduğu anlaşılmaktadır. İki günlük sürede ortalama kılcal su emme miktarları (C_a) ve şekilde verilen eğrilerin eğimine karşılık gelen kılcal su emme katsayısı (c_1) belirlenmiş ve Çizelge 4'de topluca verilmiştir.

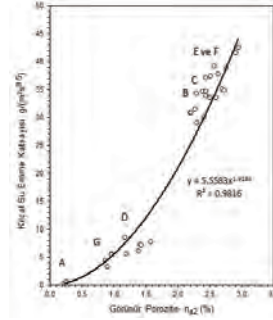
Çizelge 4. Deney örneği gruplarının ortalama kılcal su emme (C_a) ve görünür porozitelerinin (n_{a2}) karşılaştırılması, kılcal su emme katsayısı ile görünür porozite arasındaki oranın değişimi, basınç mukavemeti ve elastisite modülü.

	n_{a2} (%)	C_a (g/m ²)	c_1 g/(m ² s ^{0.5})	C_a (g/m ²)		c_1 (g/(m ² s ^{0.5}))		c_1/n_{a2} g/(m ² s ^{0.5})	σ_c (MPa)	EM (GPa)
				C_{amax}	C_{amin}	c_{1max}	c_{1min}			
A	0.23 (±0.01)	103.05	0.35 (±0.03)	139.7	87.3	0.38	0.31	152.2	36.5	10.8
G	0.97 (±0.12)	628.82	4.75 (±1.06)	650.6	397.4	5.68	3.35	489.6	28.0	4.5
D	1.40 (±0.14)	1186.30	6.84 (±0.86)	1349.3	982.5	7.82	5.63	488.6	24.3	2.9
B	2.28 (±0.09)	1999.13	31.33 (±1.79)	2100.4	1899.6	34.06	29.11	1374.1	21.4	2.2
C	2.41 (±0.10)	2269.00	35.29 (±3.35)	2436.7	2214.0	39.15	30.13	1464.3	21.8	2.2
E	2.68 (±0.17)	2369.43	38.23 (±2.39)	2580.8	2152.8	41.70	35.79	1404.5	13.3	1.4
F	2.65 (±0.18)	2399.14	36.39 (±3.78)	2689.9	2231.4	42.57	33.55	1373.2	12.0	1.3

Örneklerin ikinci ısıtma işlemi sonrasında kılcal su emme ve görünür porozitesi Şekil 9, kuru ve doymun haldeki P dalgası hızları ise Şekil 10'da en uygun korelasyon eğrileri ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 9'dan anlaşılacağı gibi kılcal su emme hızı ısıtma işlemi sayısına bağlı artmaktadır. Ancak, kılcal su emme hızı ile porozite arasındaki ilişkiyi gösteren eğrinin (Şekil 9) B, C, E ve F gruplarına karşılık gelen kesiminde eğim artmaktadır. Korelasyon eğrisinin, görünür porozite %1'i aştığında, yukarı doğru yönelmektedir. Bu nokta deney tabii tutulan mermerde şekerlenmenin başladığı aşamaya karşılık gelmektedir.



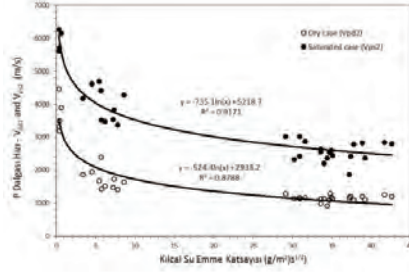
Şekil 8. Örnek gruplarının ısıtma işlemi II. aşamasında kılcal su emme davranışları. Eğrilerin üzerinde örneğin ait olduğu grup ve görünür porozitesi belirtilmiştir.



Şekil 9. Örnek gruplarının ısıtma işlemi II. aşamasında kılcal su emme katsayısı ve görünür poroziteleri arasındaki ilişki.

4. SONUÇ

Yapay olarak tane sınırları ısıtma etkisi ile koparılan kaba taneli mermer üzerinde yürütülen fiziksel ve mekanik deneyler ile ultra ses hızları arasındaki ilişkilerden, mermerde şekerlenme sorununun ultra-ses hızı ölçümleriyle güvenilir düzeyde kestirilebileceği görülmüştür. Deney sonuçları konuyla ilişkili önceki çalışmalarla uyumludur. Sonuçta, doymun ve kuru haller için elde edilen P dalgası hızları arasındaki oranın (V_{ps}/V_{pd}) ve kılcal su emme katsayısı ile görünür porozite arasındaki ilişkinin mermerde bozunma düzeyini gösteren iki önemli parametre olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 10. Örnek gruplarının ısı işlemin II. aşaması sonrasında kılcal su emme katsayısı ile kuru ve doygun hallerdeki P dalgası hızları arasındaki ilişki.

5. KAYNAKLAR

- ASTM D2845 – 08, 2008. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.
- Bandini, A., Berry, P., 2013. Influence of marble's texture on its mechanical behaviour. *Rock Mech Rock Eng.* 46, pp. 785–799.
- BS EN 1925, 1999. Natural Stone Test Methods - Determination of water absorption coefficient by capillarity.
- Carfagni, G.F., 1999. On the thermal degradation of marble. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36, pp.119– 126.
- Chararas, B., 2003. P-wave velocity and quality of building materials. in: Yuzer, E., Ergin, H., Tugrul, A. (Eds.), *Proc. of the Int. Symp. Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul*, pp. 295–300.
- Darot, M., Reuschle, T., 2000. Acoustic wave velocity and permeability evolution during pressure cycles on thermally cracked granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, pp.1019– 1026.
- Ferrero, A.M., Marini, P., 2001. Experimental studies on the rock mechanical behaviour of two thermal cracked marbles. *Rock Mech. Rock Eng.* 34(1), pp.57– 66.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Suggested methods for determining sound velocity. In: Ulusay, R. and Hudson, J.A., (Eds.) pp. 117–120.
- Luque, A., Agudo, ER., Cultrone, G., Sebastian, E., Siegesmund, S., 2011. Direct observation of microcrack development in marble caused by thermal weathering. *Env. Earth Sci.*, 62, pp.1375– 1386.
- Mahmutoglu, Y., 2006. The effects of strain rate and saturation on a micro-cracked marble. *Eng.Geol.* 82, pp. 137–144.
- Moropoulou, A., Labropoulos, KC., Deleghou, ET., Karoglou, M., Bakolas, A., 2013. Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials.* 48, pp.1222–1239
- O'Connell, RJ., Budiansky, B., 1974. Seismic velocities in dry and saturated cracked rock, *J. Geophys. Res.* 79, pp.5412–5426.
- Ruedrich, J., Kirchner, D., Siegesmund, S., 2011. Physical weathering of building stones induced by freeze-thaw action: a laboratory long-term study. *Environ Earth Sci.* 63, pp.1573–1586.
- Sassoni, E., Franzoni, E., 2014. Influence of porosity on artificial deterioration of marble and limestone by heating. *Appl Phys A.* 115, pp.809–816.
- Siegesmund, S., Ullermeyer, K., Weiss, T., Tschegg, EK., 2000. Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. *Int. J. Earth Sci.* 89, pp.170–182.
- Siegesmund, S., Dürrast, H. 2011. Physical and Mechanical Properties of Rocks, In: Siegesmund, S. and Snehlage, R., (Eds.), *Stone in Architecture, Springer-Verlag*, 4th ed., 97–222.
- Török, A., Vasarhelyi, B., 2010. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Eng. Geol.* 115, pp. 237–245.
- Weiss, T., Rasolofosaon, PNJ., Siegesmund, S. 2002. Ultrasonic wave velocities as a diagnostic tool for the quality assessment of marble. In: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (eds.). *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*, Geological Society of London, Special Publications, 205, pp149–164.
- Weiss, T., Siegesmund, S., Fuller, E.R., 2003. Thermal degradation of marble: indications from finite-element modelling. *Build. Environ.* 38(9–10), pp1251–1260.
- Zeisig, A., Siegesmund, S., Weiss, T., 2002. Thermal expansion and its control on the durability of marbles. In: Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A. (Eds) *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Special Publications, Geological Society, London. 205, pp 65–80.

İstanbul'daki Tarihi Yapılarda Kullanılan Önemli Yerli Doğal Taşların Kaynak Alanlarının Araştırılması

Investigation of Potential Resource Areas of Indigenous Natural Stones Used in Historical Buildings in Istanbul

Y. Mahmutoğlu, O. S. Angı*, I. E. Özmen, Z. Yeşilkaya

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
(*angio@itu.edu.tr)*

ÖZ: Uygarlık tarihinde önemli bir yere sahip olan İstanbul'un tarihi kimliğini yapılarında kullanılan doğal taşlar oluşturur. Antik kent merkezi olarak bilinen "Tarihi Yarımada" adeta doğal taşlardan oluşturulan bir müze görünümündedir. Kentin tarihi kimliğini oluşturan saray, kilise, cami, sur, külliye, türbe vb. birçok yapıda yöreden sağlanan Bakırköy Fosilli Kireçtaşı (Küfeki Taşı), Kutluca Kireçtaşı (Gebze Rudistli Kireçtaşı) ve Hereke Pudingi yaygın olarak yapı ve kaplama elemanı olarak kullanılmıştır. Bu yapıların taştan oluşan mimari elemanlarında zamanla oluşan yıpranma ve taş bozulmaları bugün bu yapıların çoğunda restorasyon ve onarım çalışmalarını zorunlu hale getirmiştir. Öte yandan, mimari özelliklerin korunması açısından restorasyon çalışmalarında orijinal veya alternatif doğal taş kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bildiride, Kırklareli iline bağlı Pınarhisar-Vize ile İstanbul-Hadımköy arasındaki bölge ve İzmit-Gebze ile Hereke yerleşkelerini içine alan bölgede orijinal ve alternatif olabilecek doğal taş kaynaklarının arazi ve laboratuvar çalışmalarının sonucunda, restorasyon uygulamalarında kullanıma uygunlukları ve temin edilebileceği potansiyel kaynak alanları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İstanbul, Küfeki Taşı, Kutluca Kireçtaşı, Hereke Pudingi, restorasyon

ABSTRACT: *Stones used in ancient buildings form the historical essence of Istanbul being in an important place in civilization history. Ancient city center known as "Historical Peninsula of Istanbul" seems a museum decorated by different types of stones. The Bakırköy Fossiliferous Limestone (Küfeki Stone), The Kutluca Limestone (Gebze Limestone with Rudists) and Hereke Pudding obtained from The Çatalca and The Kocaeli Peninsulas are these important building and ornamental stones generally used as decorative elements in historical and cultural heritages such as churches, mosques, palaces, shrines, wall and building complexes adjacent to mosques. Unfortunately, because of stone decays in masonry structures, both conservation and restoration works for similar structures are urgently essential. On the other hand, original stones are essential in these projects for restoration and conservation of architectural aspects of masonry structures. In this presentation, the potential areas around Kırklareli-Pınarhisar and Vize, Istanbul-Hadımköy, İzmit-Gebze and Hereke districts in the Çatalca and the Kocaeli Peninsulas were investigated for original and alternative stone sources used for restoration purposes. The potential sources of these stones and the locations of quarries having suitable properties were determined in field and laboratory studies.*

Keywords: *Istanbul, Küfeki Stone, Kutluca Limestone, Hereke Pudding, Restoration*

1. GİRİŞ

İstanbul ülkemizdeki tarihi, kültürel ve antik yapı ile anıtların en fazla olduğu kenttir. Eski kent merkezi "Tarihi Yarımada" yüzlerce tarihi ve antik yapıya sahip olup UNESCO tarafından Dünya Kültür Merkezleri arasına alınmış ve ülkemizdeki Tarihi ve Kültür Yapılarını Koruma Kurulu tarafından korunmaktadır. Burada bulunan yapıların çoğunda yapı ve kaplama taşı olarak genellikle İstanbul ve civarından sağlanan taşlar kullanılmıştır. Günümüzde bu taşların bulunduğu bölgeler (Bakırköy, Haznedar, Güngören, Merter, Davutpaşa, Gebze ve Hereke) yoğun yerleşim alanlarına dönüşmüştür. Bunun sonucu olarak tarihi yapılarda kullanılan orijinal taşlara ulaşma olanağı bulunmamaktadır. Öte yandan tarihi yapılarda kullanılmış olan taşlarda, doğal ve kent kaynaklı yapay etkenlerle zamanla bozulmalar oluşmuştur. Bu nedenle tarihi yapıların çoğunda aslına uygun

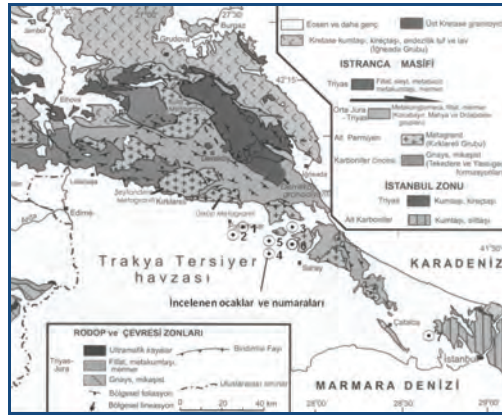
restorasyon ve onarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde birçok tarihi yapıda restorasyon çalışmaları devam etmektedir. Bu uygulamalarda, genellikle orijinal Küfeki Taşı olarak bilinen Üst Miyosen yaşlı Bakırköy Fosilli Kireçtaşı yerine Kırklareli ili, Pınarhisar ilçesi, Erenler köyü civarından temin edilen ve doğal taş piyasasında Pınarhisar Taşı olarak bilinen Oligosen yaşlı fosilli kireçtaşı kullanılmaktadır. Bazen de İstanbul'un batısında Küçükçekmece Gölü civarından sağlanan Eosen yaşlı Sazlıbosna fosilli ve killi kireçtaşı tercih edilmektedir. Ayrıca, İstanbul'daki tarihi yapılarda sıkça kullanılmış olan Gebze Rudistli Kireçtaşı ve Hereke Pudinge alternatifi olacak taş kaynağı bilinmediği için yenileme çalışmalarında bunların yerine taklit malzeme kullanılmaktadır. Küfeki Taşı'nın alternatifi olan taşların üretildiği ocaklarda malzeme kalitesinin jeolojik nedenlerle kısa aralıklarda değişmesi, rezervin sınırlı olması ve üretim yapılan bazı ocakların İstanbul'a uzaklığı gibi nedenlerle yeni taş kaynaklarının araştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, Kırklareli iline bağlı Pınarhisar-Vize ile İstanbul-Hadımköy ve İzmit-Gebze ve Hereke yerleşkelerini içine alan bölgelerde restorasyon çalışmalarında kullanılacak taş kaynaklarının belirlenmesine yönelik araştırma sonuçları değerlendirilmiştir.

2. RESTORASYON ÇALIŞMALARINDA KULLANILABİLECEK TAŞ KAYNAKLARI

2.1. Çatalca Yarımadası

Çatalca Yarımadası'ndaki taş kaynakları, doğuda Küçükçekmece Gölü'nden batıda Kırklareli iline bağlı Pınarhisar ilçesi Erenler köyüne kadar uzanmaktadır. İncelenen noktaların çoğu Pınarhisar ve Vize ilçeleri civarında kümelenmiştir (Şekil 1).

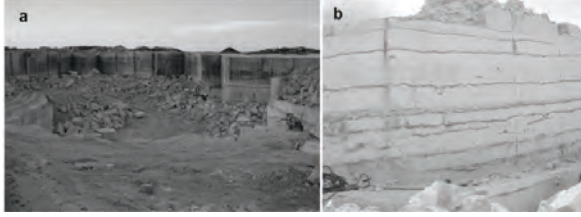


Şekil 1. Çatalca Yarımadası yapı taşı ocaklarının konumları ve bölgenin genelleştirilmiş jeoloji haritası (Okay vd., 2001'den yeniden düzenlenmiştir).

Çatalca Yarımadası'nın temelini batıda metamorfik kayalardan oluşan Mesozoyik yaşlı Istranca Masifi'ne ait istif ile Paleozoyik yaşlı gnays, mikaşist, meta granit, doğuda ise Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu (Kaya, 1971) oluşturur. Metamorfikleri yer yer granit ve diyorit türündeki magmatik kayalar kesmektedir. Temel üzerine, Trakya Tersiyer Havzası çökelleri olarak tanımlanan ve açılı diskordansla resifal kireçtaşlarının tabanını temsil eden çakıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı-marn aralanmasından oluşan Alt Eosen yaşlı çökeller gelir. Bunlar da geçişli olarak Orta Eosen yaşlı killi kireçtaşları tarafından örtülmektedir. Oligosen yaşlı kireçtaşları ise açılı diskordansla bu seviyelerin üzerine gelmekte, Neojen yaşlı marn – kıltaşı – çakıltaşı – kumtaşı aralanması uyumlu olarak Oligosen yaşlı birimleri örtmektedir. Bölgede yapı taşı üretimi için açılmış olan güncel ve antik taş ocaklarının yerleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Ocak yerleri harita üzerinde dairelerle belirtilmiş ve numaralandırılmıştır. Yapı taşı üretimine uygun olabilecek ocaklarda yapılan gözlemlere göre jeolojik ve litolojik özellikler aşağıda sırayla verilmiştir.

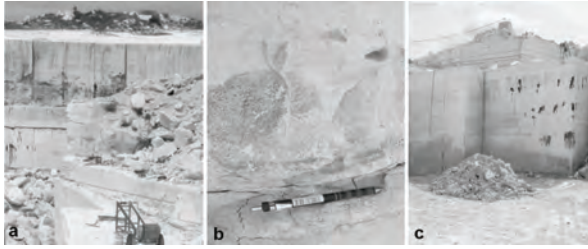
Pınarhisar-Erenler Köyü Yapı Taşı Ocağı (Ocak No: 1)

Tel kesme yöntemi ile üretim yapılan bu ocak Erenler Köyü'nün hemen girişinde bulunmaktadır (Şekil 2a). Ocakta; jeolojik ve litolojik olarak homojen bir yapı söz konusu değildir. Bazı seviyelerde kil ve kum oranı fazlayken, bazı seviyelerde fosil oranı yüksektir. Bu ara seviyeler, genellikle gevşek tutturulmuş, sarı renkli karbonatlı killerden ve kumlardan oluşmaktadır (Şekil 2b).



Şekil 2. Pınarhisar-Erenler köyündeki 1 numaralı yapı taşı ocağının genel görünümü (a) ve ocakta üretimi sınırlandıran yatay konumdaki killi, marnlı ve kumlu ara tabakaların görünümü (b); (Angı vd., 2012).

Ocakta, yüzeye yakın seviyelerde ayrışma ve renk değişimi belirgindir (Şekil 3a). Ayrıca, çatlak yüzeylerinde yer yer demiroksit ve mangan oksit sıvımaları (Şekil 3b) ve ocak aynalarında yer yer makro karst yapılarının bulunduğu görülmüştür (Şekil 3c).



Şekil 3. Pınarhisar'da işletilmekte olan 1 numaralı ocağın üst kotunda karşılaşılan renk değişimi (a), çatlak yüzeylerindeki mangan oksit sıvıması (b) ve üretim aynasında görülen karst yapıları (c); (Angı vd., 2012).

Vize-Küçükayla Köyü Yapı Taşı Ocağı (Ocak No: 6)

Ocağın açıldığı jeolojik birim, beyazımsı bej renkli, yumuşak, orta tabakalı, killi ve az miktarda kum içeren kireçtaşından oluşmaktadır. Kayaç; az fosilli ve az gözeneklidir. Ocağın üst kesimleri ayrışmış ve oldukça dayanımsız malzemeden oluşmaktadır. Yüzeyden olan derinlik arttıkça taşın sertliği artmakta ve kalitesinde iyileşme görülmektedir. Ayrıca derine doğru süreksizlik sıklığı azaldığından dolayı blok verimliliği artmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Vize-Küçükayla köyünde işletilmekte olan 6 numaralı yapı taşı ocağının görünümü (Angı vd., 2012).

Hadımköy–Sazlıbosna Köyü Yapı Taşı Ocağı (Ocak No: 7)

Bu ocak; İstanbul'a en yakın mesafedeki yapı taşı ocağıdır. İşletme, Küçükçekmece Gölü'nün kuzeyinde bulunan Sazlıdere Barajı'nın doğusunda kalmaktadır. Ocak, Eosen yaşlı Soğucak formasyonunun kil içeren alt düzeylerinde açılmıştır. Ocağın belirli düzeylerini oluşturan ve kil içermeyen karbonat içeriği yüksek seviyelerinde yapı taşı kalitesi artmaktadır. Masif nitelikteki kireçtaşı içerisinde açılan ocakta blok verimliliği çok yüksektir (Şekil 5).

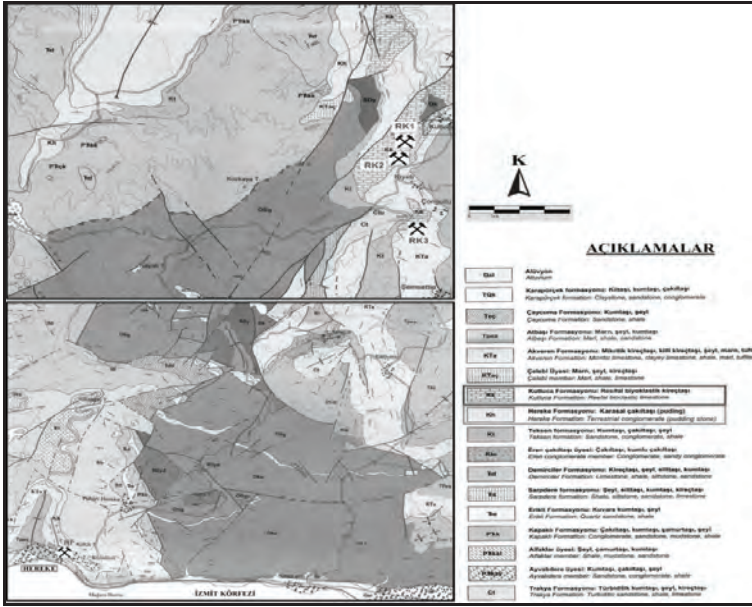


Şekil 5. Sazlıbosna yapı taşı ocağı ve üretilen taşın İstanbul'da tarihi Kara Surları restorasyonunda kullanımı (Mahmutoğlu, 2014).

Kent merkezine yakınlığı, işletme kolaylığı, pasa sorunu bulunmaması, çevresel açıdan önemli sayılabilecek olumsuz bir etkisinin olmaması ve birçok tarihi yapıda kullanılarak taşın denenmiş olması (Şekil 5) bu ocağın özenle işletilmesi ve korunmasını gerektirmektedir. Ocakta selektif üretim yapılarak kil içeriği yüksek seviyelerin ayıklanması ve üretilen taşın düşey uygulamalarda kullanılması uygun görülmüştür.

2.2. Kocaeli Yarımadası

Kocaeli Yarımadası jeolojik olarak, Paleozoyik, Permo-Triyas, Geç Kretase-Orta Eosen, Geç Oligosen-Erken Miyosen, Pliyosen ve Kuvaterner yaşlı çökel kayalar ile Permiyen, Permo-Triyas ve Geç Kretase yaşlı magmatik kayalardan oluşmaktadır. Paleozoyik yaşlı birimleri, transgresif aşmalı olarak Permo-Triyas yaşlı kayaçlar örter. Bu istiflerden en yaygın olanı (Kocaeli Triyas İstifi), en altta çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı-şeylden oluşan akarsu çökelleri ile başlar. Bu çökellerin üzerine, kıyı-sığ denizel kumtaşları gelir (Altınlı, 1968). Paleozoyik ve Permo-Triyas yaşlı birimler üzerinde transgresif aşmalı olarak Geç Kretase-Orta Eosen yaşlı çökeller yer alır. Bu istif, altta karasal-sığ denizel çakıltaşı, kumtaşı (Teksen formasyonu; Santoniyen-Kampaniyen), konglomera (Hereke Formasyonu; geç Kampaniyen-erken Maastrichtiyen) ve biyoklastik kireçtaşlarıyla (Kutluca Formasyonu; geç Kampaniyen-erken Maastrichtiyen) başlar. (Erguvanlı, 1949; Abdülcelamoğlu, 1977). Hereke Pudingi ve Kutluca Kireçtaşı olarak adlandırılan yapı ve kaplama taşlarının kaynağını bu iki formasyon oluşturur (Şekil 6). Bu iki jeolojik formasyon içerisinde açılmış antik ocaklarda yapılan incelemeler aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.



Şekil 6. Kutluca ve Hereke formasyonlarının yayılım gösterdiği alanlar ve çalışma sırasında belirlenen üretim yapmaya uygun potansiyel antik taş ocakları (RK1, RK2 ve RK3; Kutluca Kireçtaşı, HP; Hereke Pudingi içerisinde açılmış eski ocak yerleri); (Gedik vd., 2005; 1:50.000 ölçekli MTA Türkiye Jeoloji Haritası'ndan düzenlenmiştir).

Kutluca Kireçtaşı Ocakları

Şekil 6'da RK1 simgesiyle gösterilen ocak Kutluca Köyü güney batısında, köye çok yakın Köprücek mevki adı verilen bölgede yer almaktadır. Yerleşim alanına uzak, küçük bir vadinin sol yamacında bulunan ocakta yakın geçmişte üretim yapılmıştır. Kayacın esas iskeletini farklı büyüklüklerdeki Rudist fosili kavkıları/kavki kırıntıları oluşturur. Taneler arasını bağlayan karbonat çimentosu demir oksit içermektedir. Bu nedenle kayaç kırmızımsı, kızıl ve koyu kızıl renklidir (Şekil 7). RK2 nolu ocak eski İstanbul-İzmit kara yolunun kuzeyinde, yola çok yakın mesafede Kutluca Köyü Kurtkaya mevkiinde yer almaktadır (Şekil 6). RK1 nolu ocağa 100 m mesafede ve Kutluca Kireçtaşı'nın farklı düzeyinde açılmıştır. Yaklaşık 10 m yüksekliğindeki ocak aynasına ulaşım yolu bulunmaktadır. Açık bej renkte, yer yer masif yapıdaki kireçtaşı yoğun miktarda Rudist ve Hippurites fosili içermektedir. Yerleşime uzak mesafede bulunan RK2 numaralı ocak aynası üretim yapmaya uygundur (Şekil 8).



Şekil 7. Köprücek mevkiinde bulunan Kutluca Kireçtaşı ocağı (Şekil 6'da RK1 nolu ocak). Sağda ocak aynasındaki güncel üretim izi ve ocağın alından alınan örneğin parlatılmış yüzeyinin görünümü (Mahmutoğlu vd., 2016).

Bölgedeki en büyük antik ocak (RK3) Kırırlı Mahallesi'nin güney batısında, Sevindikli Göleti'nin membasındaki vadinin sağ sahilinde bulunmaktadır. Yamacın tepeye erişen kesiminde bulunan ocak çukurunun büyüklüğü ve yamaçta biriktirilen güncel ve antik pasa yığınının fazlalığı, farklı dönemlerde ocakta üretim yapıldığına işaret etmektedir (Şekil 9). Kutluca Köyü'nün güneybatısında yer alan ocak etrafında işletmenin etkileyeceği yerleşim alanı bulunmamaktadır. Ocak aynası yer yer masif ve kalın tabakalı, bol fosilli, farklı desen ve renkte kireçtaşı tabakalarından oluşmaktadır.



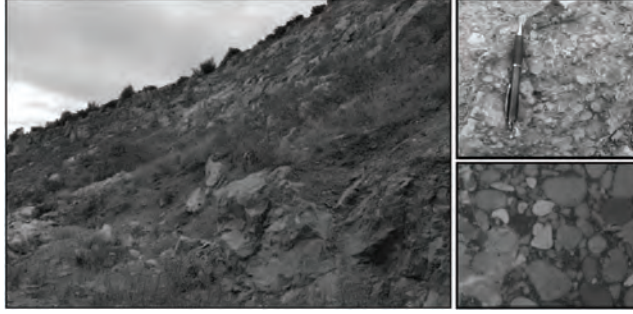
Şekil 8. Kurtkaya mevkiinde bulunan Kutluca Kireçtaşı ocağı (Şekil 6'da RK2 nolu ocak). Sağda ocak aynasından alınan bloğun ve yüzeyi parlatılmış örneğin görünümü (Mahmutoğlu vd., 2016).



Şekil 9. Kırırlı Mahallesi güney batısında Sevindikli Göleti memba tarafında bulunan Kutluca Kireçtaşı ocağı (Şekil 6 da RK3 nolu ocak). Sağda ocak aynasından alınan bloğun ve yüzeyi parlatılmış örneğin görünümü (Mahmutoğlu ve dig., 2016).

Hereke Pudıngi Ocağı

Şekil 6'da verilen harita üzerinde konumu HP simgesiyle belirtilen ocak Hereke-Kışladüzü Mahallesi'ne komşu vadinin sol yamacında bulunmaktadır. Mevcut ocak yerleşim alanına yakın mesafededir. Ancak ocağın devamında bulunan ve kuzeye uzanan vadinin her iki yamacında geniş alanlarda ocakta üretilen aynı türdeki taş izlenmektedir. Renk ve desen açısından İstanbul'daki tarihi birçok yapıda kullanılan taşla tam benzerlik göstermektedir (Şekil 10). Bu bölgedeki antik ocaklar kıyıya yakın ve günümüzde TEM otoyolunun koruma bandı içerisinde kalmaktadır. Tarihi yapılarda, özellikle dış mekânlarda kullanılan bu taş atmosferik etkilere karşı farklı davranan çakıltaşını oluşturan tane ile çimentosu arasındaki bağın zayıflaması ve kopması sonucunda mevcut yapılardaki birçok taş yapı elemanın restorasyonunu zorunlu kılmaktadır. Bu tür restorasyon çalışmaları İstanbul'da son on yıldan beri sürdürülmekte olup, Hereke Pudıngi ve Rudistli Kireçtaşı'nın yerine taklit malzeme kullanılmaktadır. Renk ve görünüm açısından kıyaslanamayacak ölçüde, yapay malzemelerin mimaride aranan görsel ve işlevsel özellikte olmadıkları yapılan uygulamalardan anlaşılmaktadır. İnceleme alanında bulunan ve yukarıda tanıtilen sahalar çalışmaya konu orijinal taşlar için potansiyel alanlar olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 10. Yukarı Hereke Mevkii, Kışladüzü Mahallesi kuzeybatı-batısındaki vadi yamacını oluşturan Hereke formasyonu ve bu sahada açılan Hereke Pudingi ocağı (Şekil 6’da HP nolu ocak). Sağda ocak aynasından alınan bloğun ve yüzeyi parlatılmış örneğin görünümü (Mahmutoğlu vd., 2016).

2.3. Laboratuvar Çalışmaları

Yapı ve kaplama taşlarında aranan standart özelliklerin belirlenmesi amacıyla, Çizelge 1’de belirtilen ocaklardan ve restorasyonu yapılan tarihi eserlerden alınan örnekler üzerinde TS 699 standardına göre laboratuvarda fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Deneyler, her taş türünü temsil eden bloklardan hazırlanan 5’er adet örnek üzerinde tekrarlanmıştır. Birinci aşamada sırasıyla, donma-çözünme işlemine tabi tutulmamış örneklerin kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), doymuş birim hacim ağırlığı (γ_d), porozite (n), ağırlıkça su emme (W_a), ve tek eksenli basınç direnci (σ_{Bd0}) ile sürtümlü aşınma direnci (As) değerleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise donma-çözünme işlemine tabi tutulan örneklerde ağırlıkça don kaybı (A_{dk}) belirlenmiştir. Ayrıca, Kutluca Kireçtaşı ve Hereke Pudingi örneklerinin ultrasonik dalga hızları ölçülmüştür. Bu iki durumda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve bildiriye konu olan taş türlerinin atmosferik koşullardan etkilenip etkilenmediği irdelenmiştir. Her bir taş için elde edilen ortalama değerler Çizelge 2’de karşılaştırmalı olarak topluca sunulmuştur.

Çizelge 1: Laboratuvar çalışmalarında kullanılan yapı ve kaplama taşı türleri ve alındıkları yerler.

Ocak No/Ahndığı Nokta	Kodu	Taş İsmi
1	PHSc	Pınarhisar Kireçtaşı (Süleymaniye Camii restorasyonu)
2	PHDB	Pınarhisar Kireçtaşı (Dolmabahçe Sarayı restorasyonu)
7	SB	Sazlıbosna Kireçtaşı
Süleymaniye Camii	SC1	Süleymaniye Camii beden duvarından çıkma taş
Süleymaniye Camii	SC2	Süleymaniye Camii bahçe duvarından çıkma taş
RK-1	RK-1	Gebze Kutluca Kireçtaşı (Köprücek Mevkii)
RK-2	RK-2	Gebze Kutluca Kireçtaşı (Kurtkaya Mevkii)
RK-3	RK-3	Gebze Kutluca Kireçtaşı (Kıyırılı Mevkii)
HP	HP	Hereke Pudingi (Kışladüzü Mevkii)

Çizelge 2: Dene örneklerinin ortalama fiziksel ve mekanik özellikleri ile Kutluca Kireçtaşı ve Hereke Pudingi’nin don öncesi (V_{pd0}) ve don sonrası (V_{pds}) ultrasonik dalga hızları.

Taş Kodu	γ_k (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	n (%)	W_a (%)	σ_{Bd0} (MPa)	As (cm ³ /50 cm ²)	A_{dk} (%)	V_{pd0} (m/s)	V_{pds} (m/s)
PHSc	2.20	2.35	15.84	7.22	33.8	43.1	0.36	-	-
PHDB	2.27	2.42	14.40	4.33	27.6	-	-	-	-
SB	1.87	2.09	21.66	11.64	23.0	83.8	0.61	-	-
SC1	2.15	2.22	7.39	3.45	8.1	69.8	0.32	-	-
SC2	2.45	2.49	3.85	1.59	34.6	22.4	0.18	-	-
RK-1	2.69	2.70	0.58	0.21	36.8	11.27	0.04	6192	6079
RK-2	2.62	2.64	2.40	0.92	63.4	11.52	0.02	6328	6200
RK-3	2.66	2.67	0.93	0.35	60.6	12.25	0.20	5698	5498
HP	2.71	2.72	0.77	0.28	45.2	10.78	0.30	6304	6000

Çizelge 2'deki sonuçlarda görüldüğü gibi orijinal Bakırköy Küfeki Taşı'nın yerine kullanılan alternatif taşlardan en uygun olanının Kırklareli-Pınarhisar Fosilli Kireçtaşı olduğu, orijinal Kutluca Kireçtaşı ve Hereke Pudingi'nin potansiyel kaynak alanlarındaki taşların ise ilgili doğal yapı standartlarında (TS 11137, TS 11143) öngörülen sınır değerleri karşıladığı anlaşılmaktadır.

3. SONUÇLAR

İstanbul'daki tarihi yapılarda yaygın olarak kullanılan Küfeki Taşı'nın (Bakırköy Mactralı Kireçtaşı) günümüzde temin edilmesi mümkün olmadığından, mevcut restorasyon çalışmalarında bu taşın alternatifi olabilecek kaynaklardan sağlanan taşlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Çatalca Yarımadası'nda Kırklareli-Pınarhisar ve Vize ile İstanbul-Hadımköy civarından çıkarılan Küfeki Taşı'nın alternatiflerinin, Kocaeli Yarımadası'nda da, İzmit-Gebze ve Hereke civarından, Kutluca Kireçtaşı ve Hereke Pudingi'nin orijinallerinin sağlanabileceği potansiyel kaynak alanları belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda İstanbul'daki farklı dönemlere ait tarihi ve kültürel yapıların restorasyonunda kullanılabilecek alternatif ve orijinal taş kaynakları ortaya çıkarılmıştır. Belirlenen potansiyel kaynak alanlarındaki bazı doğal taşların günümüzde malzeme üretimine uygun olduğu, fiziksel ve mekanik özelliklerinin ilgili yapı ve kaplama taşı standartlarında öngörülen değerleri büyük ölçüde karşıladığı görülmüştür. Ancak, Bakırköy Küfeki Taşı'nın yerine restorasyon uygulamalarında kullanılan alternatif taşların özellikle dış mekanlarda ve yatay kullanıma yeterince uygun olmadıkları, bu yüzden de gereksinimleri karşılayabilecek niteliklere sahip yeni bir potansiyel taş kaynak alanının araştırılıp bulunması öngörülmektedir. Bununla birlikte, Kutluca Kireçtaşı ve Hereke Pudingleri için yapılan mevcut restorasyon uygulamalarında "taklit" malzeme kullanımının yapıların mimari özgünlüğünü bozduğu, görsel ve teknik açıdan kısa zaman içerisinde tahrip olduğu bilindiğinden, bu çalışma sonucunda söz konusu taşlar için belirlenen potansiyel sahalardan orijinal taşların seçilerek temin edilmesi önerilmektedir.

4. KAYNAKLAR

- Abdülselemoğlu, S., 1977. The Paleozoic and Mesozoic in the Gebze Region. Explanatory Text and Excursion Guidebook. İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.
- Altınlı, İ.E., 1968. İzmit-Hereke-Kurucadağ Alanının Jeoloji İncelemesi. MTA Dergisi, 71;1-26, Ankara.
- Angı, S., Mahmutoğlu Y., Yeşilkaya, Z., 2012. İstanbul'daki Tarihi Yapıların Restorasyonunda Küfeki Taşının Yerine Kullanılabilecek Yapı Taşı Alternatiflerinin Araştırılması. İBB-KUDEB Kargir Yapılarda Koruma ve Onarım Semineri III Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- Erguvanlı, K., 1949. Hereke Pudingleri ile Gebze Taşlarının İnşaat Bakımından Etüdü ve Civarlarının Jeolojisi. İTÜ İnşaat Fakültesi, Doktora Tezi.
- Gedik, İ., Pehlivan, Ş., Timur, E., Duru, M., 2005. 1:50.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, No:16, BURSA-G23a Paftası, MTA, Ankara.
- Kaya, O., 1971. İstanbul'un Karbonifer stratigrafisi: Türkiye Jeol. Kur. Bült., 14, 143-199.
- Mahmutoğlu, Y., 2014. İstanbul'un Gerçek Hafızası Küfeki Taşı ve Restorasyonda Kullanılabilecek Trakya Bölgesi Yapı Taşı Olanakları, Yer Mühendisliği, Sayı 4, İstanbul.
- Mahmutoğlu Y., Angı, S., Özman, I. E., 2016. İstanbul'un Kimliğine Yazılı Yerli Dekoratif Taşlar: Kocaeli Yarımadası'nda Hereke Pudingi ve Kutluca Kireçtaşı Potansiyeli. İBB-KUDEB Kargir Yapılarda Koruma ve Onarım Semineri VII Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- Okay, A.I., Satır, M., Tüysüz, O., Akyüz, S., Chen, F., 2001. The tectonics of the Strandja Massif: Variscan and mid-Mesozoic deformation and metamorphism in the northern Aegean. International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau), 90, 217-233.
- TS 699., 2009. Doğal Yapı Taşları - Muayene ve Deney Metotları. Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.
- TS 11137., 1993. Kireçtaşları-Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan. Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.
- TS 11143., 1993. Konglomera-Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan. Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.

ŞEV DURAYLILIĞI ve HEYELANLAR

TKİ Hüsamlar Linyit Açık İşletmesi Güney Şevlerindeki Duraysızlık Mekanizmaları

Mechanisms of Instabilities at South Slopes of TKİ Hüsamlar Lignite Open Pit Mine

K. C. Solak*, E. Tuncay, R. Ulusay

*Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, ANKARA
(*cemsolak@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, TKİ-Milas Hüsamlar Açık Linyit Ocağı'nın (Muğla) güney şevlerinde gelişen ve üretimin durmasına neden olan duraysızlıkların mekanizmalarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, işletmedeki jeolojik birimler ayrıntılandırılmış, duraysızlıklara ilişkin gözlem ve ölçümler yapılmış ve örnekleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerle güney şevlerindeki beş duraysızlıktan üçünün dairesel, birinin düzlemsel ve birinin de birleşik kayma modeline uygun olarak geliştiği anlaşılmıştır. Limit denge analiz yöntemleri kullanılarak duraysızlıkların geriye dönük analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarıyla laboratuvar deney sonuçları ve görgül ilişkilerle belirlenen kaya kütleli parametreleri karşılaştırılarak, gerek süreksizlik gerekse kaya kütleli için kayma anındaki makaslama dayanımı parametrelerine ve boşluk suyu basıncı koşullarına yönelik değerlendirmelere gidilmiştir. Sonuç olarak, duraysızlıkların gelişiminde boşluk suyu basınçlarının oldukça etkin olduğu ve güney şevlerinde güvenli ve ekonomik şev tasarımı için öncelikle bölgedeki yeraltısu durumunun açıklığa kavuşturulmasının gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geriye dönük analiz, gözenek suyu basıncı oranı, Hüsamlar linyit açık işletmesi, şev duraylılığı.

ABSTRACT: In this study, it was aimed to investigate the mechanisms of the instabilities which occurred in the southern slopes of the TKİ-Milas Hüsamlar Open Lignite Pit (Mugla) and resulted in an interreption in production. For this purpose, the geological units in the pit were distinguished, observations and measurements on instabilities were performed and sampling studies were carried out. Based on the evaluations, it was understood that three of the five instabilities in the southern slope developed in the form of circular, one planar and one combined slip model. Back analyses of the instabilities were made by using limit equilibrium methods of analysis. By comparing the results of these analyses with those of the laboratory tests and the rock mass parameters determined by empirical relations, the shear strength parameters and pore pressure conditions at the time of failures for both discontinuity and rock mass were evaluated. As a result, it was determined that pore water pressures were very effective in the development of instabilities and the groundwater conditions in the southern slope should be first clarified for safe and economical slope design.

Keywords: Back-analysis, pore pressure ratio, Hüsamlar lignite open pit, slope stability.

1. GİRİŞ

Hüsamlar (Milas-Muğla) Açık Linyit Ocağı'nın ilerleme yönündeki güney şevlerinde, 2011-2012 yılları arasında yapılan incelemelerde, basamak ölçeğinde şev duraysızlıklarının geliştiği görülmüş ve bu şevlerin doğu kesiminde büyük bir duraysızlığın göstergesi olan gerilim çatlakları gözlenmiştir. 2013 yılında ise, çatlakların bulunduğu kesimde büyük bir duraysızlık gelişmiştir. Bu durum üretimin durmasına neden olmuş ve ilerleme yönünde güvenli şev tasarımına geçmeden önce mevcut duraysızlık mekanizmalarının çözülmesini gerektirmiştir. Bu çalışmada, söz konusu duraysızlıkların mekanizmalarına ilişkin değerlendirmelerin yapılması amaçlanmıştır.

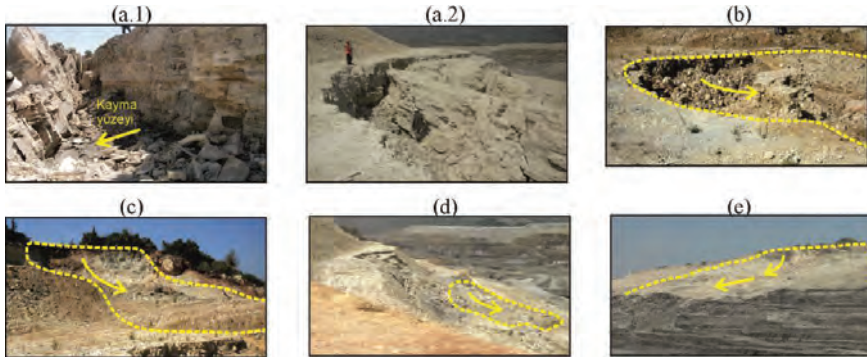
Çalışma kapsamında, öncelikle duraysızlıkların geriye dönük analizi ve mekanizmalarının anlaşılması için işletmede gerekli ölçümler ve gözlemler yapılmıştır. Şevi oluşturan kaya kütlelerine ait özelliklerin belirlenmesi için içerdikleri süreksizliklerin özelliklerine ilişkin bilgi toplanmış ve laboratuvar deneylerinde kullanmak üzere örnekler alınmıştır. Laboratuvarında yapılan doğrudan makaslama deneyi sonuçları kullanılarak tabaka yüzeylerinin makaslama dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca, sağlam kaya malzemesinin laboratuvarında belirlenen özellikleri ile kaya kütleli özelliklerinden ve bir görgül yenilme ölçütünden yararlanılarak kaya kütlelerinin makaslama

dayanımları belirlenmiştir. Son aşamada ise işletmede gözlenen duraysızlık modellerine göre, kaymaların limit denge yöntemleri kullanılarak geriye dönük analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, gerek süreksizlikler gerekse kaya kütleleri için kayma anındaki makaslama dayanımı parametrelerine ve boşluk suyu basıncı koşullarına yönelik değerlendirmelerde kullanılmıştır.

2. SAHA ÇALIŞMALARI

Duraysızlıkların geliştiği şevlerde Sekköy formasyonuna ait birimler gözlenmektedir. Hakyemez ve Örcen (1982) tarafından formasyon seviyesine çıkarılan birimler, tabanda linyitli bataklık çökelleri ile başlayıp, marn ve kireçtaşıyla devam eden gösel çökellerden oluşmaktadır. Arazide yapılan incelemelerde, linyit damarı üzerindeki örtü birimlerinde beş adet duraysızlık belirlenmiştir (Şekil 1). Bunlardan biri (Duraysızlık 1) marn tabaka kalınlığının arttığı kesimlerde tabaka yüzeyleri boyunca düzlemsel kayma) gerçekleşmiştir (Şekil 1a). Bu kesimde tabaka yüzeyleri düz, pürüzsüz ve az bozunmuş olarak tanımlanmış olup, eklem yüzeylerinde ise oksitlenme gözlenmiştir. Çalışmaların yürütüldüğü kurak dönemde süreksizlerde herhangi bir su akışına rastlanmamıştır. Üç duraysızlığın ise, ince tabakalı marn seviyelerinde geliştiği gözlenmiş ve bunların kaya kütleleri özellikleri tarafından kontrol edildikleri (dairesel kayma) anlaşılmıştır (Şekil 1b-d; Duraysızlık 2, 3, 4). İnce tabakalı marn seviyelerinde tabaka yüzeylerinin pürüzlü olduğu ve ileri-çok ileri derecede bozunmanın varlığı saptanırken, dolgu malzemesine rastlanmamıştır. Basamak ölçeğinde gelişen bu duraysızlıkların yanı sıra, kömürün üzerinde yer alan şevlerin tamamını (marn ve kireçtaşı) kapsayan büyük bir duraysızlık meydana gelmiştir (Şekil 1e, Duraysızlık 5). Gözlemler sonucu hareketin kireçtaşı, ince tabakalı ve kısmen kalın tabakalı marn seviyeleri içinde dairesel kayma şeklinde başladığı ve kalın tabakalı marnlarda tabaka yüzeyleri boyunca devam ettiği anlaşılmıştır. Söz konusu bu beş duraysızlığın kayma sonrası ve kayma yüzeylerine ilişkin gerekli ölçümler alınmıştır.

Güney şevlerinde jeoteknik veri toplama amaçlı yapılan çalışmalar şevlerin en üst basamağından başlayıp ocak tabanında son bulmuş ve Sekköy formasyonuna ait birimlerin sınırları ayırtlanmıştır. Yatay ve düşey yönlü hat etütlerinin yanı sıra, süreksizlik yönelimleri de ölçülmüş ve tabaka yöneliminin değişimine bağlı olarak güney şevi üç sektöre ayrılmıştır (Şekil 2). Tabaka dışında sektör bazında konumları değişmeyen iki eklem setinin olduğu belirlenmiş (Çizelge 1) ve süreksizliklere ait parametreler Çizelge 2'de verilmiştir. Süreksizlik yüzeylerine ait özelliklerden ve Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen niceliksel sınıflama abağından yararlanılarak kaya kütlelerinin jeolojik dayanım indeksi (GSI) belirlenmiştir (Çizelge 3).



Şekil 1. Güney şevlerinde gözlenen duraysızlıklar: (a.1-a.2) kalın tabakalı marnda tabaka yüzeyi boyunca düzlemsel kayma (Duraysızlık 1), (b-c-d) ince tabakalı marnlarda dairesel kaymalar (Duraysızlık 2, 3,4), (e) Birleşik kayma (Duraysızlık 5).



Şekil 2. İşletmenin güney şevi jeoloji ve dökümantasyon haritası.

Çizelge 1. İncelenen şevlerdeki süreksizliklerin ortalama (ağırlıklı) yönelimleri.

Sektör No.	Tabaka	Süreksizlik (eğim/eğim yönü)	
		Eklem Seti-1	Eklem Seti-2
1	05/345		
2	10/359	86/247	85/135
3	23/340		

Çizelge 2. Süreksizliklere ait gerçek aralık (S), sıklık (λ), hacimsel eklem sayısı (J_v) ve ortalama aralık (χ) değerleri.

Süreksizlik		S (m)	λ (m ⁻¹)	J_v * (m ⁻³)	χ (m)
Tabaka	Kireçtaşı	0.11	9.09	17.48	0.14
	Kalın tabakalı marn	0.12	8.33	16.72	
	İnce tabakalı marn	0.03	33.3	41.69	
	Linyit	0.05	20.0	28.39	
Eklem	Set 1	0.32	3.13		
	Set 2	0.19	5.26		

* J_v değerleri, tabakaların ve eklemelerin gerçek aralıkları dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Jeolojik birimlerin içerdiği süreksizliklere ait yapısal özellik puanı (SR), süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR) ve jeolojik dayanım indeksi (GSI).

Birim	Açıklık (mm)	Dolgu	Pürüzlülük	Dalgallık	Bozunma	Su Durumu	SCR	SR	GSI
Kireçtaşı	< 2	Dolgunsuz	Düz	Az	Orta	Kuru	10	29.7	39
Kalın tabakalı marn	< 2	Kil Sıvama	Düz	Az	Az	Nemli	9	30.5	37
İnce tabakalı marn	< 2	Yumuşak	Pürüzlü	Az	Çok İleri	Kuru	3	14.5	16
Linyit	< 2	Dolgunsuz	Düz	Az	Az	Nemli	13	21.3	42

3. JEOMEKANİK ÖZELLİKLER

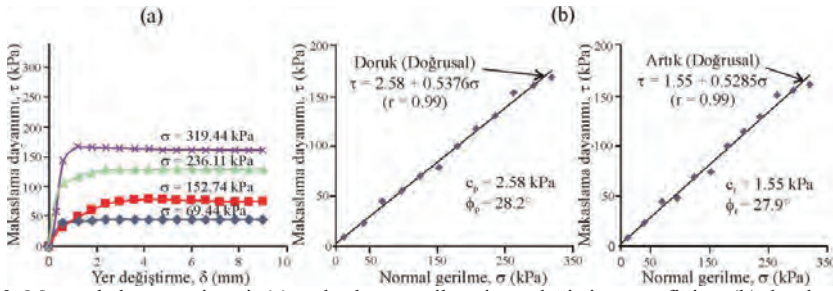
Düzlemsel kayma analizlerinde süreksizlik yüzeyinin, kaya kütleindeki dairesel kayma analizleri içinse kaya kütleli makaslama dayanımı parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada Hoek-Brown yenilme ölçütü (Hoek vd., 2002) kullanılmış ve birim hacim ağırlık tayini, tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı ve Brazilian çekilme dayanımı deneyleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kalın tabakalı marnlarda tabaka yüzeylerinde ise zeminlerde kullanılan doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde tabaka yüzeyleri ıslak konumda olacak şekilde makaslama kutusu su ile doldurulmuştur. Uygun örnek alınamamasından dolayı, ince tabakalı marn örneklerinin UCS değeri disk makaslama dayanım indeksinden (BPI) dolaylı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ince tabakalı marn biriminde üç eksenli deney yapılamadığı için m_i parametresi, UCS ve Brazilian çekilme dayanımı değerleri kullanılarak Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen ilişki denklemleri kullanılarak belirlenmiştir. Laboratuvar deneylerinden belirlenen jeomekanik özellikler Çizelge 4'te verilmiştir.

Kalın tabakalı marnlardaki tabaka yüzeyi örneklerinde yapılan doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen makaslama gerilmesi-yer değiştirme grafiklerinde (Şekil 3a), süreksizlik yüzeyleri üzerinde meydana gelen çok küçük yer değiştirmeler sonucunda makaslama dayanımının doruk değerlere ulaştığı ve ardından artık değerlere düştüğü görülmektedir. Üç setten oluşan deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, doğrusal yenilme zarfına ait korelasyon katsayısının oldukça yüksek bir değere ($r=0.99$) sahip olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3b).

Çizelge 4. İncelenen şevlerdeki jeolojik birimlerin jeomekanik özellikleri.

Birim	γ (kN/ m ³)	UCS (MPa)	σ_i (MPa)	Çevre Basıncı (MPa)					m_i
				1	2	3	4	5	
Kireçtaşı	23.9-25.1 (24.6)	92.8-142.4 (116.6)	5.77-6.97 (6.90)	110.03	125.6	142.56	155.98	-	32.4
Kalın tabakalı marn	13.4-14.6 (14.1)	17.5-21.6 (20.1)	1.05-1.80 (1.38)	20.98	25.51	31.24	35.27	38.81	9.51
İnce tabakalı marn	19.2-23.1 (21.8)	5.1-5.9* (9.2)	2.11-3.00 (2.58)	-	-	-	-	-	3.3**
Linyit	12.0-13.4 (12.5)	7.5-8.7 (8.1)	0.13-1.59 (1.08)	9.47	11.67	13.98	15.76	-	3.2

Parantez içindeki değerler ortalama değerlerdir. *BPT'den belirlenmiştir. **Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen ilişkiyle belirlenmiştir.



Şekil 3. Marn tabaka yüzeyine ait (a) makaslama gerilmesi-yer değiştirme grafiği ve (b) doruk ve artık makaslama dayanımları için genelleştirilmiş doğrusal yenilme zarfları.

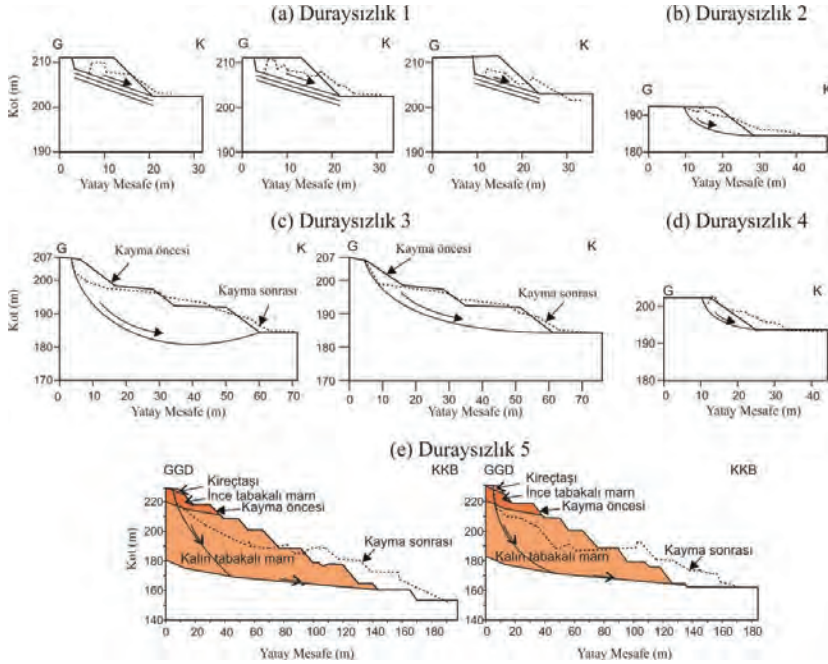
4. ŞEV DURAYSIZLIKLARININ MEKANİZMALARININ ARAŞTIRILMASI

İşletmede meydana gelmiş duraysızlıkların geriye dönük analizleri yapılarak, kayma anındaki makaslama dayanımı parametrelerinin kestirimi mümkün olabilmektedir (Sancio, 1981). Bu yöntemde, şev duraysızlığına neden olan koşulların (limit denge koşulu, $F=1$) sağlandığı kabul edilmektedir. Duraysızlık anında kayma yüzeyi boyunca etkin olan makaslama dayanımı parametrelerinin geriye dönük analizle belirlenebilmesi için bilinmesi gerekenler; a) duraysızlığa uğrayan şevin kayma öncesi geometrisi, b) kayma yüzeyinin şekli, c) şevi oluşturan malzemenin birim hacim ağırlığı ve d) şevdeki yeraltı suyu durumudur. Duraysızlık türüne uygun limit denge analiz yöntemi seçildikten sonra ulaşılmak istenen parametrelerin değişim aralıkları geriye dönük analizlerle belirlenebilmektedir. Duraysızlık analizlerinde kullanılan kesitler Şekil 4'te verilmiştir.

4.1. Duraysızlık 1 - Düzlemsel Kayma

Şekil 1a'da görülen ve 4a'da kesiti verilen bu duraysızlığın geriye dönük analizi, Hoek ve Bray (1977) tarafından önerilen limit denge analiz yönteminden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Kayma anında tansiyon çatlakları (ya da eklem) ve tabaka yüzeyindeki boşluk suyu basıncına ilişkin herhangi bir bilgi olmaması nedeniyle, analizler tansiyon çatlaklarının kuru ve değişik seviyelerde su ile dolu olduğu koşullar için ayrı ayrı yapılmıştır. Farklı su durumları için hazırlanmış ve $F=1$

koşulunu sağlayan $c-\phi$ zarfları Şekil 5'te gösterilmiştir. Marn tabaka yüzelerindeki doğrudan makaslama deneylerinde birbirine eşit ya da çok yakın doruk ve artık makaslama dayanım parametrelerinin elde edilmesinden dolayı, Şekil 5'teki grafiklerde sadece artık makaslama dayanım parametrelerinin değişim aralığı (0-6.5 kPa ve 26.1-29.2°) gösterilmiştir. Geriye dönük analiz sonuçları dikkate alındığında, tansiyon çatlağının 3/5'i ile 4/5'inin su ile dolu olduğu durumlarda, $c-\phi$ zarfları ile laboratuvar deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Kayma yüzeyinin ve duraysızlık geometrisinin arazide yapılan ölçümlerle hassas şekilde belirlenmiş olmasından dolayı, duraysızlık anında tansiyon çatlağının yarısından fazlasının su ile dolu olduğunu söylemek mümkün görünmektedir.

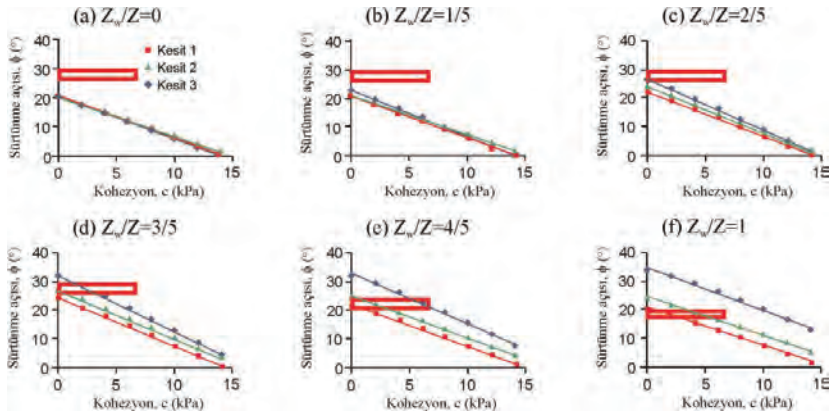


Şekil 4. Güney şevlerinde gözlenen duraysızlıklar için kayma öncesi ve sonrası şev geometrileri ile kayma yüzeylerini gösteren kesitler.

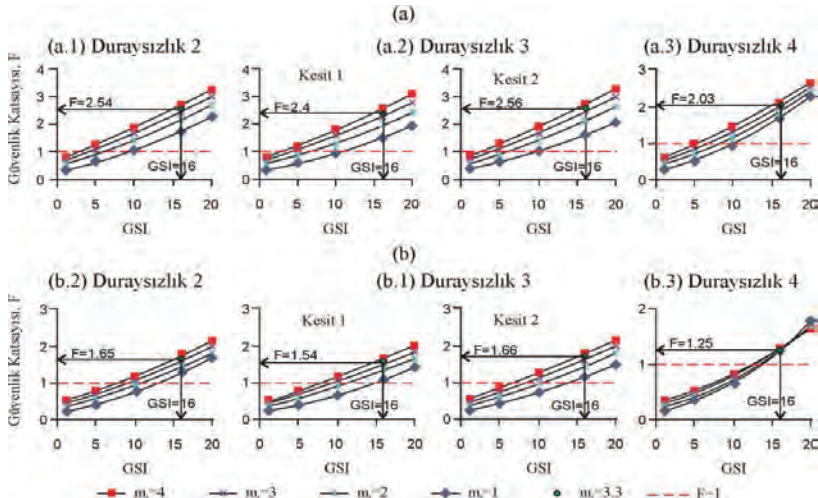
4.2. Duraysızlık 2, 3 ve 4 - Dairesel Kaymalar

Orta veya ileri derecede eklemli kaya kütlelerindeki duraysızlıklar genellikle dairesel kayma yüzeyleri boyunca gelişmekte olup, bu tür duraysızlık modellerinde kaya kütlelerinin makaslama dayanımı yaygın olarak Hoek-Brown yenilme ölçütü ile belirlenmektedir. Ayrıca, dairesel kayma modeli için genellikle Bishop (1955) tarafından önerilen basitleştirilmiş 2-boyutlu limit denge analiz yöntemi tercih edilmektedir. Güney şevlerinde gözlenen üç duraysızlık (bkz. Şekil 1b-d) ince tabakalı marnlarda dairesel kayma şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 4b-d). Bu üç duraysızlık için işletmede gevşetme amacıyla kontrollü patlatmalar yapılması nedeniyle, örselenme faktörü $D=0.7$ seçilerek; $F=1$ koşulunu sağlayan m_i ve GSI değerlerinin değişimi, SLIDE programı (Rocscience, 2009) kullanılarak geriye dönük analizlerle belirlenmiştir. İlk analizler sonucunda m_i ve GSI değerlerinin dar bir aralıkta değiştiği görülmüştür. Bu nedenle, sadece $F=1$ durumunu sağlayan m_i -GSI çiftlerinin belirlenmesi yerine, m_i ve GSI'nin belirli bir aralıktaki değişimlerine bağlı olarak tüm güvenlik katsayıları hesaplanmış ve ilgili grafikler hazırlanmıştır (Şekil 6). Şekil 6a'daki analiz sonuçları, kayma anında ince tabakalı marn kaya kütlelerinin kuru olduğu durum için geçerlidir. Bu grafikler incelendiğinde, limit denge ($F=1$) koşulunun sağlanabilmesi için m_i 'nin 1 ile 4 arasındaki değerleri için GSI'nin yaklaşık 2 ile 10 arasında bir değer alması gerekmektedir. Arazi ölçümleriyle belirlenen GSI (16) ve

deneylerden hesaplanan m_i (3.3) değerleriyle bir analiz yapıldığında ise, güvenlik katsayısının 1'den çok daha yüksek değerler aldığı anlaşılmaktadır. Bu belirleme dikkate alınarak, söz konusu duraysızlıklar için analizler, ince tabakalı marın biriminin suya doymun olduğu koşul için de tekrarlanmıştır (Şekil 6b). Şekil 6'daki grafiklerden, ölçüm ve deneylerle belirlenen m_i ve GSI değerleri ile hesaplanan güvenlik katsayılarının suya doymun durum için dahi $F=1$ 'den yüksek değerler aldığı görülmektedir. $F=1$ koşulunu sağlayan m_i ve GSI değerleri sırasıyla 1-4 ve 7-14 aralıklarında değişmektedir. İşletme yetkililerinden duraysızlıkların yağışlı dönemlerden sonra meydana geldikleri yönünde bilgi edinilmiş olup, bu bilgi ve geriye dönük analizlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, suya doymun koşulda $F=1$ 'i sağlayan m_i ve GSI çiftlerine ait ortalama değerlerin duraylılık analizlerinde kullanılmasının daha temsil edici olacağı düşünülmüştür. Bu değerlendirmelerin ışığında; ince tabakalı marın kaya kütlesi için m_i ve GSI'nı sırasıyla 3 ve 10 alınmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.



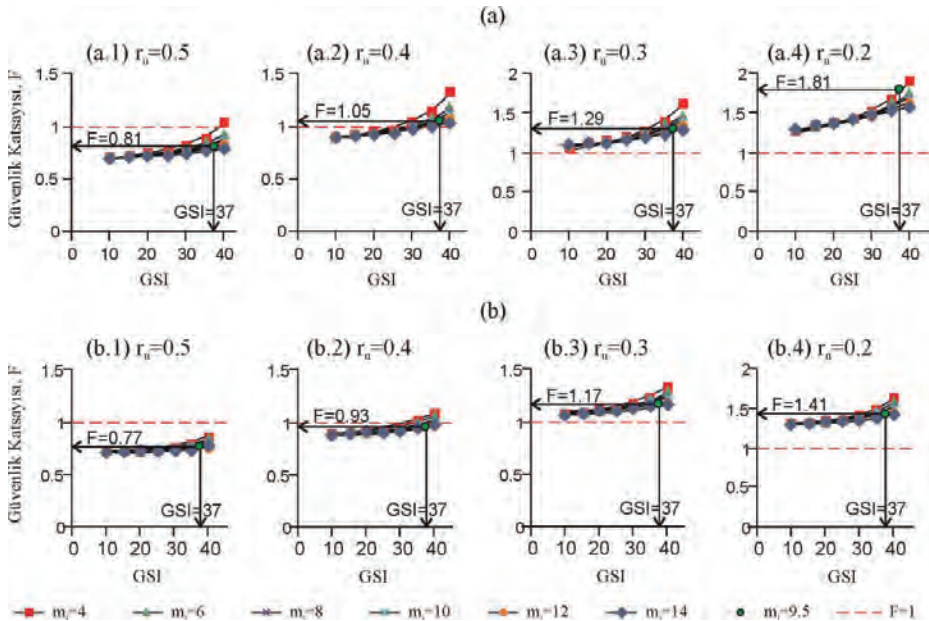
Şekil 5. Tansiyon çatlağının (a) kuru, (b) 1/5'inin, (c) 2/5'inin, (d) 3/5'inin, (e) 4/5'inin ve (f) tamamının suyla dolu olduğu durumlar için yapılmış geriye dönük analizlerden belirlenen c - ϕ zarfları. (Kırmızı dikdörtgenler deney sonuçlarına göre belirlenmiş makaslama dayanımı değişim aralığını göstermektedir.)



Şekil 6. İnce tabakalı marında meydana gelmiş 2, 3 ve 4 no.lu duraysızlıklar için: (a) kuru ve (b) suya doymun koşullarda m_i -GSI değişimine bağlı olarak elde edilen F değerleri.

4.3. Duraysızlık 5 - Birleşik Kayma

Yapılan gözlemler ve ölçümlerle tespit edilen duraysızlık kesitleri göz önüne alındığında (bkz. Şekil 1e ve 3e), 5 no.lu duraysızlığın işletmenin güney şevinde gözlenen tüm kaya birimlerini kapsadığı anlaşılmaktadır. Güney şevinin bu kesiminde en üstte yer alan kireçtaşı seviyelerinden başlayıp, kalın ve ince tabakalı marnı içine alacak şekilde gelişen duraysızlığa ait kayma yüzeyinin, kireçtaşı içinden geçen kesiminin çok kısa olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bu birime ait parametrelerdeki değişimi duraysızlık üzerindeki etkisinin çok küçük olacağı açıktır. Bu nedenle duraysızlığın geriye dönük analizinde, kireçtaşı kaya kütleleri için laboratuvar deneylerinden ve gözlemlerden belirlenen değerlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Dairesel başlayıp marn tabaka yüzeyleri boyunca devam ederek gelişen birleşik yüzeyli bir duraysızlık söz konusu olduğu için, bu duraysızlığın geriye dönük analizinde önceki analizlerden belirlenen parametrelerin yanı sıra, kalın tabakalı marnın kaya kütleli parametrelerinin de tahminine gereksinim duyulmaktadır. Bu aşamaya kadar yapılan analiz ve değerlendirmelerden elde edilen parametreler sabit tutularak, kalın tabakalı marna ait m_i ve GSI'nin belirli bir aralıkta değişen değerleri için Morgenstern-Price (1965) yöntemi kullanılarak analizler yapılmış ve güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Yeraltısuyunun konumuna ilişkin herhangi bir veri bulunmamasından dolayı, bu eksikliğin giderilmesi amacıyla analizlerde boşluk suyu basıncı oranı (r_u) kullanılmış olup, farklı su koşullarının etkisinin incelenmesi amacıyla r_u 'nun 0 ile 0.5 arasında değişen değerleri için analizler yapılmıştır. Bu duraysızlığa ait 1 ve 2 no.lu kesitlerde yapılan geriye dönük analiz sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Bu kesit üzerinde yapılan analizlerden elde edilen grafiklerde, $F=1$ çizgisi sadece $r_u=0.4$ koşulunda grafikleri kesmektedir. Bu koşulda kayma olabilmeye için m_i ve GSI'nin sırasıyla 4-14 ile 28-39 arasında değişmeleri gerekmektedir. Kalın tabakalı marnın kaya kütleli dayanım parametreleri ($m_i=9.5$ ve $GSI=37$) ise $F=1$ çizgisinin hemen üstünde bulunmaktadır. İkinci kesit üzerinde yapılan değerlendirmeler de ilk kesitle benzerlik göstermektedir. r_u 0.3 ile 0.4 arasında iken, $m_i=9.5$ ve $GSI=37$ değerleri $F=1$ çizgisi üzerinde kalmaktadır. Bu analizler değerlendirildiğinde, kayma anında yeraltısuyunun $r_u=0.3$ ile 0.4 oranında bir boşluk suyu basıncı yaratacak düzeyde olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, deneylerden ve gözlemlerden elde edilen kaya kütleli parametrelerinin kalın tabakalı marn birimi için temsil edici olduğu da anlaşılmıştır.



Şekil 7. 5 no.lu duraysızlıktan alınan (a) Kesit 1 ve (b) Kesit 2'de, farklı gözenek suyu basıncı oranları için ($r_u=0.5, 0.4, 0.3$ ve 0.2) yapılan analizlere göre m_i -GSI değişimine bağlı olarak elde edilen F değerleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hüsamlar Linyit Açık İşletmesi'nin güney şevlerinde gözlenen duraysızlıkların mekanizmalarının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- (a) Tabaka yönelimlerine göre 3 sektöre ayrılmış olan güney şevleri için yapılan kinematik analizler, süreksizlik denetimli bir duraysızlığın beklenmeyeceğini göstermiştir. Ancak düzlemsel kayma türünde gelişen bir duraysızlığın geriye dönük analizinde, gerilme çatlakındaki suyun artışına bağlı olarak duraysızlık meydana gelebileceği saptanmıştır. Ayrıca kayma anında artık makaslama dayanımı parametrelerinin etkin olduğu belirlenmiştir.
- (b) Dairesel kayma şeklinde gerçekleşen duraysızlıklar için, kayma anında gözenek suyu basıncının etkin olduğu belirlenmiş olup, r_u 'nun 0.3 ve 0.4 değerleri için limit denge koşulunun sağlanabildiği anlaşılmıştır.
- (c) Laboratuvar deneyleri ve arazi gözlemleri ile belirlenen parametrelerin, ancak şevde bir su basıncının söz konusu olması durumunda geriye dönük analizlerden elde edilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum; duraysızlıkların gerçekleşmesinde su basıncının etkili olduğunu göstermekte olup, bölgenin hidrojeolojik koşullarının belirlenmesine yönelik ayrıntılı çalışmaların yapılmasından sonra mevcut tasarımın değiştirilmesine yönelik adımların atılmasının uygun olacağına işaret etmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Bishop, A.W., 1955. The use of slip circle in the stability of slopes. *Geotechnique*, 5, 7-17.
- Hakyemez, H.Y. ve Örcen, S., 1982. Muğla Denizli Arasındaki Güneybatı Anadolu Senozoyik Yaşlı Çökel Kayaların Jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Rapor No:7311.
- Hoek, E., and Bray, J.W., 1977. *Rock Slope Engineering*. Institute of Mining and Metallurgy, London, 402p.
- Hoek, E., and Brown, T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106(GT9), 1013-1035.
- Hoek, E., Caranza-Torres, C.T., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceeding of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, Vol.1, 267-273*.
- ISRM, 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*, eds: Ulusay R. and Hudson J.A., Kozan Ofset, Ankara.
- Morgenstern, N.R., and Price, V.E., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15, 79-93.
- Rocscience, 2009. *Slide V5.043-2D limit equilibrium analysis*. Rocscience, Canada.
- Sancio, R.T., 1981. The use of back-calculations to obtain the shear and tensile strength of weathered rocks, *Proceeding of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo*, 647-658.
- Sönmez, H., and Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-99.

Tersun (Gümüşhane/Şiran) Barajı Göl Alanındaki Paleo-Heyalandan Kaynaklanacak Dalga Etkisinin Ampirik Eşitlikler Kullanılarak Araştırılması

Investigation Of Wave Effect Of Tersun (Gümüşhane / Şiran) Dam Due To Paleo-Landslide In Lake Area By Using Empirical Equations

M. Karahan^{1,*}, H. Ersoy¹, A. Akgün¹, M.O. Sünnetci¹, A. Taflan², S. Peker³

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

²DSİ 22. Bölge Müdürlüğü

³Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü, 61310, Yıldızlı, Trabzon

(* muratkarahan21@gmail.com)

ÖZ: Bu çalışmada Gümüşhane ili Şiran ilçesi Gökçeler (Aşağı Tersun) köyü'nün 2 km kuzeyinde sulama suyu temini amacı ile yapılması planlanan Tersun barajının memba kısmı sol sahilinde baraj gövdesinden 1.5 km uzaklıkta bulunan paleo-heyelan malzemesinin olası hareketi sonucunda meydana gelecek dalganın rezervuar alanına, baraj gövdesi ve elemanlarına, gövdenin mansabında bulunan Gökçeler Köyüne ve karşı sahildeki Şiran- Gümüşhane karayoluna olan etkisi araştırılmıştır. Kütle hareketinin etkilerinin araştırılması için 2 boyutlu analizler yapılmıştır. Analizlerde heyelan kütlelerinin geometrik, fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılmış, böylece hareketin üreteceği dalganın hızı, yüksekliği ve baraj gövdesine ulaşma süresi hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda heyelan kütlelerinin suya çarpma hızı 24.5 m/sn çarpma ile oluşacak dalganın yüksekliği 33 m, hızı 22 m/sn, karşı kıyı için ilerleme miktarı 30 m, baraj gövdesine ulaşma süresi 68 sn ve gövdeye ulaşan dalganın boyunun 10 m olacağı hesaplanmıştır. Sonuç olarak heyelanın oluşturacağı dalganın Gümüşhane-Şiran karayoluna, barajın gövdesine ve barajı aşan suların mansaptaki Gökçeler Köyüne hasar verebileceği ön görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dalga etkisi, heyelan, rezervuar, Tersun barajı.

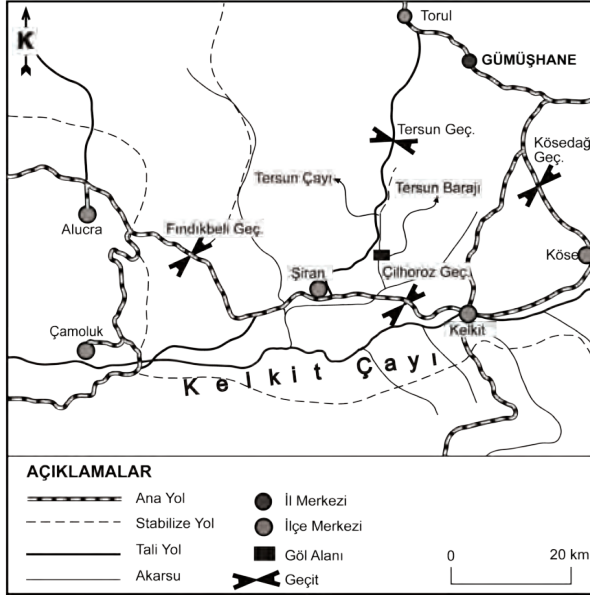
ABSTRACT: In this study, the possible movement of the paleo-landslide material located 1.5 km from the dam site on the left bank of the Tersun dam, which is planned to be built with the aim of irrigation water source 2 km north of Gökçeler (Aşağı Tersun) village in Şiran district of Gümüşhane city, and its effect on the village, dam girder and its elements, and Şiran-Gümüşhane highway on the opposite coast have been investigated. Two-dimensional analyzes were performed to investigate the effects of mass movement. In the analyzes, the geometric, physical and mechanical properties of the landslide mass were used, so that the velocity, height of the waves and the duration of reaching the dam body were calculated. It is calculated that the velocity of the landslide mass which will hit the water as 24.5 m/s, the height of waves as 33 m and their velocity as 22 m/s, run-up as 30 m, the time of reaching the dam body is 68 sec and the height of the wave reaching the body as 10 m. As a result, it has been predicted that the waves caused by the landslide will damage the Gümüşhane-Şiran highway and the dam's body, and waters exceeding the dam could damage Gökçeler village.

Keywords: Wave effect, landslide, reservoir, Tersun dam.

1.GİRİŞ

Doğu Karadeniz bölgesinde gerek yüksek eğimin gerekse aşırı yağışın etkisi ile yoğun bir şekilde kütle hareketi meydana gelmektedir. Baraj ve göl rezervuar alanlarında, yerleşim alanlarında, dağlık alanlarda ve yol şevlerinde meydana gelen kütle hareketlerinin birçok olumsuz etkileri bulunmaktadır. Dünya genelinde özellikle baraj ve göl rezervuar alanlarında meydana gelen kütle hareketleri sonucunda dalgalar oluşmakta, oluşan dalgalar gerek baraj gövdesine gerekse yerleşim alanlarına çok ciddi zarar vermekte hatta bazı durumlarda baraj gövdesinde yıkılmalara neden olmaktadır. Ülkemizde bu gibi vakalar yaşanmamış olsa bile olmayacağı anlamına gelmemektedir. Bu olumsuzlulardan dolayı baraj ve göl rezervuar alanındaki olası kütle hareketlerinin iyi araştırılması ve olası olumsuz

sonuçlarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Gümüşhane ili, Şiran ilçesi Gökçeler (Aşağı Tersun) Köyü'nün kuş uçuşu 2.2 km kuzeyinde, Yeşilirmak havzası içinde yer alan Tersun Çayı üzerinde sulama suyu temini amaçlı yapılması planlanan Tersun Barajı rezervuar alanındaki paleoheyelanın olası hareketi sonucu oluşacak dalgaların baraj gövdesine ve Şiran-Gümüşhane karayoluna olası etkileri araştırılmıştır (Şekil 1). Yapılması planlanan projenin özellikleri; gövde tipi silindire sıkıştırılmış beton, gövdenin talvegten yüksekliği 39.50 m, temelden yüksekliği 51.00 m, kret uzunluğu 263.52 m, aktif depolama hacmi 7,71 hm³ olarak planlanmıştır. Olası hareket riski bulunan paleoheyelan kütlelerinin baraj aksına yaklaşık 2 km mesafede, sol sahilde 1575-1805 m kotları arasında bulunmakta olup kütlelerin 2.934.606 m³ lük kısmının Tersun barajı gölü 1597 m kotu üzerinde kaldığı hesaplanmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanının yerbulduru haritası.

2. ÇALIŞMA ALANI VE ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

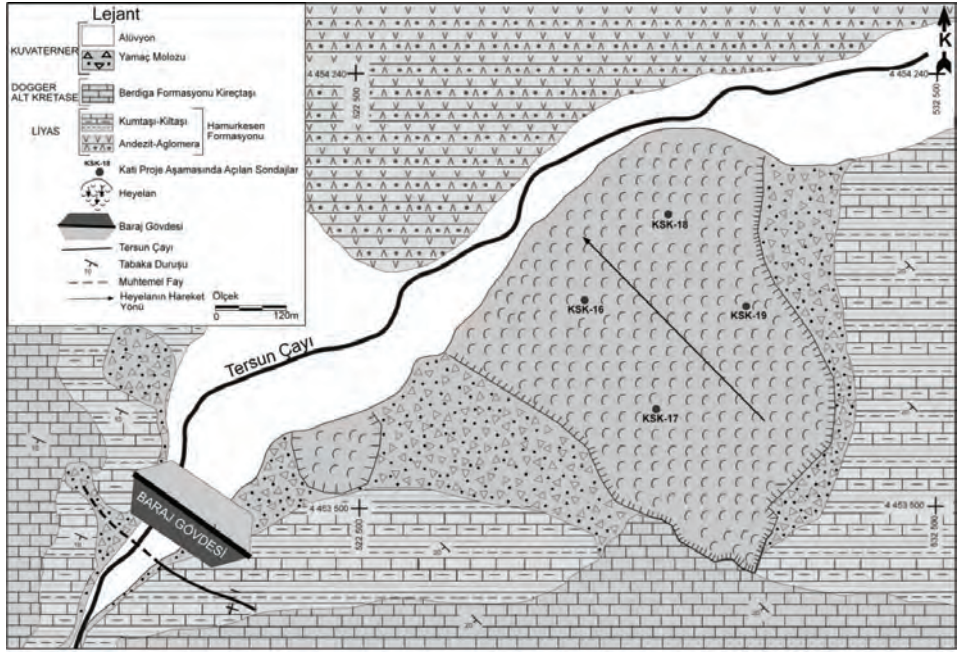
Türkiye'nin tektonik ve jeolojik birlikteliklerinden biri olan Doğu Pontidler, yapısal ve litolojik özellikler göz önünde bulundurulurken Kuzey ve Güney Zon olarak tanımlanan iki ayrı bölgeye ayrılmıştır (Ketin, 1966; Gedikoğlu vd., 1979; Özsayar vd., 1981; Bektaş vd., 1999). Kuzey Zon Üst Kretase ve Orta Miyosen volkanik ve piroklastik kayalarla karakteristik iken, Güney Zon ise Üst Kretase öncesi tortul birimler ile karakteristiktir. Şiran (Gümüşhane) ilçesinin 15 km kuzeydoğusunda yer alan çalışma alanı ise Doğu Pontid'lerin Kuzey Zonu içerisinde yer almaktadır. Çalışma alanı ve çevresinde bulunan kayalar, litostratigrafik sınıflama ve adlama kuralları (NACS, 1983) esas alınarak tanımlanmış ve bunun sonucunda inceleme alanında yaşlıdan gence doğru; Liyas yaşlı Hamurkesen Formasyonu, Erken Kretase-Geç Jura yaşlı Berdiga Formasyonu, Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyonların yüzeylenme verdiği belirlenmiştir (Şekil 2).

Çalışma alanının temel birimlerini oluşturan Hamurkesen Formasyonu ilk olarak Açar (1977) tarafından Demiröz (Bayburt) civarında izlenen Liyas yaşlı volkano-tortul karakterli birim için kullanılmıştır. Formasyon kumtaşı, kiltası, siltaşı arakatlı bazalt, andezit, spilitik bazalt, kuvarslı andezit ve piroklastitlerden oluşmaktadır. Formasyon çalışma sahasında, Tersun Barajı aksı ve çevresinde kumtaşı, kiltası, killi-kireçtaşı ve marnlar ile göl alanında ise volkanik birimleri ile karakteristiktir. Kumtaşları sert sağlam yapıda, az eklemli ve eklemli açıktır. Kiltaları,

kahverengimsi, kırmızı, siyahımsı, gri ve siyahımsı yeşil renklerde, çok kırıklı parçalı, hava ile temasında dağılan özellik göstermektedir.

Çalışma alanı ve çevresinde geniş yayılımlar veren kireçtaşları, ilk kez litostratigrafi adlama kurallarına uygun olarak Pelin (1977) tarafından Berdiga Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Berdiga Formasyonu tek tip litolojiden oluştuğu için, Tash (1984) tarafından Berdiga Kireçtaşı olarak da isimlendirilmiştir. Çoğunlukla gri, grimsi beyaz renklerde olan birim, çok çatlaklı ve tabakasız bir yapı göstermektedir. Çalışma alanının güney kesimlerinde ve yüksek kotlarda yüzeylenen birim, kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve kristalize kireçtaşlarından oluşmaktadır. Sarp kayalıklar şeklinde gözlenmesi ile çevre kayalardan kolayca ayırt edilebilmektedir.

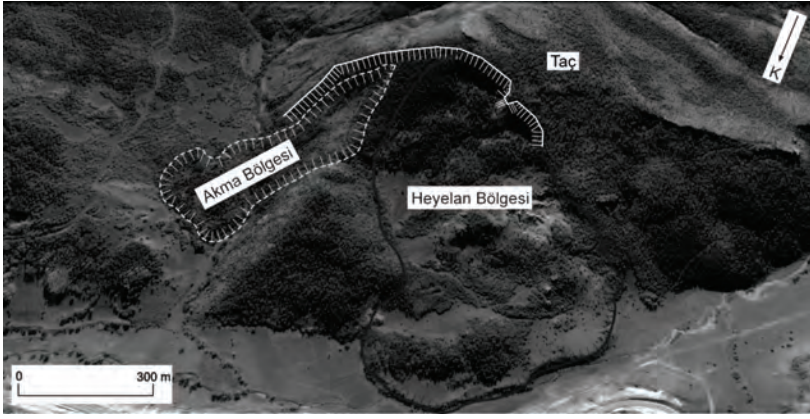
Yamaç molozları, çalışma sahası ve çevresinde özellikle göl alanı sol sahil yamaçlarında gözlenmiştir. Çoğunlukla kireçtaşı, kumtaşı ve marn kökenli olan blok, çakıl, kum ve kil boyutundaki malzemelerden oluşurlar. Blok boyutları maksimum 50 cm'ye ulaşmaktadır. Kum, çakıl ve blok boyutunda malzemenin oluşan alüvyonlar dere yatakları boyunca yüzeylenme vermektedir. Yuvarlak ve yarı yuvarlak malzeme içeren alüvyon, çoğunlukla kireçtaşı, marn, kumtaşı ve magmatik kökenlidir. Maksimum blok boyutu 15-20 cm civarındadır. Blok miktarı, malzemenin %20-30 kadarını teşkil etmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin jeolojik haritası.

3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÇALIŞMALARI

Sulama suyu temini amaçlı olarak yapılması planlanan Tarsun barajının memba tarafındaki sol yamacında iri-ufaklı birçok heyelan bulunmaktadır. Bu heyelanlardan en önemlileri sırasıyla baraj aksına 200 m ve 2 km mesafededir. Baraj işletilmeye başladıktan ve su yüksekliği işletme kotuna ulaştığı zaman 200 m mesafedeki heyelanın büyük bir kısmı su altında kalacaktır, 2 km uzaklıktaki heyelan kütlelerinin ise sadece topuk kısmı sular altında kalacaktır. Gerek hacmi gerekse heyelan malzemesinin büyük bir kısmının su altında kalmaması nedeniyle 2 km mesafedeki heyelanın olası hareketi sonucu oluşacak dalganın etkisi çalışma kapsamında araştırılmıştır (Şekil 3).

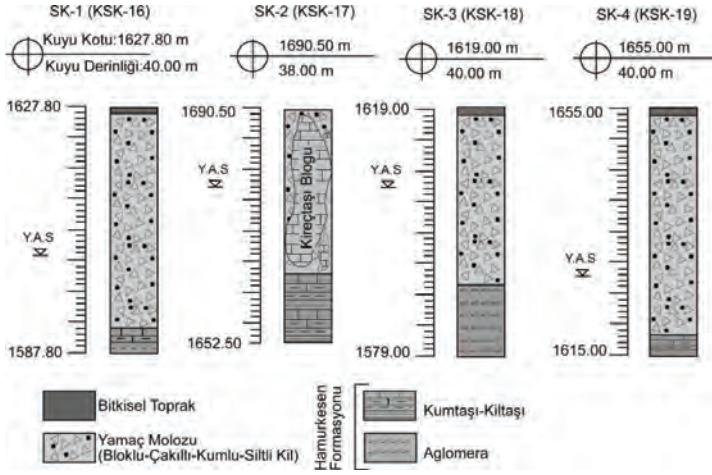


Şekil 3. Gövdeden 2 km uzaklıktaki heyelan ait Google Earth görüntüsü.

Çalışma kapsamında heyelan malzemesinin yanıl ve düşey devamlılığını tespit etmek için 4 adet (158 m) sondaj kuyusu açılmıştır. Yapılan sondajlardan elde edilen veriler doğrultunda ana kaya derinliği, heyelanın derinlere doğru geometrisi ve heyelan malzemesinin türü tespit edilmiştir. Yüzev çalışmaları kapsamında heyelanın taç kısmı, çöken kısım, kabarma bölgeleri, akma ve yayılma bölgeleri tespit edilmiştir. Yüzev çalışmaları sonucundan sınırları tespit edilen heyelan kütlelerinin yüzev alanını tespit edildikten sonra sondaj verilerinden belirlenen ortalama derinlik kullanılarak heyelanın toplam hacmi hesaplanmıştır. Laboratuvar çalışmalarında ise araziden alınan örnekler üzerinde ASTM D 422-63 standartlarına uygun bir şekilde elek analizi yapılmıştır. Yapılan sınıflamada zeminin sınıfı SM-SC olduğu anlaşılmıştır. Örselenmemiş zemin numunelerinin birim ağırlığı, laboratuvarda bunların fiziksel boyutların ölçerek ve tartarak kolayca belirlenebilir. Fakat heyelan malzemesinden örselenmemiş örnek almak mümkün olmadığı için zemin türü dikkate alınarak birim hacim ağırlık değeri 20,5-22 KN/m³ olarak alınmıştır (Coduto, 1999). Sondaj kuyuları, 1 adet 4456-Tone ve 1 adet 4199-Joy model döner (rotary) sistemle çalışan sondaj makineleriyle açılmıştır. Sondajlarda T-76 çift tüplü ve tek tüplü karotiyer, kesici olarak ise emprenye ve taşlı elmas kesiciler yan sıra vidye matkaplar da kullanılmıştır. Kuyularda ilerleme sırasında muhafaza boruları sürülmüştür. Muhafaza borusu olarak 90 mm (NWG) tipte borular kullanılmıştır. Muhafaza borularında elmas kesici uç kullanılmıştır. Sondaj çalışmaları kapsamında heyelan kütlesi üzerinde toplamda 158 m sondaj açılmıştır (SK-1, SK-2, SK-3, SK-4). Açılan sondaj kuyularından elde edilen veriler özet halinde Çizelge 1 ve Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 1. Sondajlara ait özet tablosu.

Kuyu No	Kotu (m)	Derinlik (m)	Kesilen Litolojik Birim
SK-1	1627.8	40.0	00.00 - 01.00 Kil
			01.00 - 36.10 Yamaç Molozu (Bloklu-Çakıllı-Kumlu-Siltli kil)
			36.10 - 38.00 Kumtaşı-Kiltaşı
SK-2	1690.5	38.0	00.00 - 24.20 Yamaç Molozu (Kireçtaşı Bloğu)
			24.20 - 38.00 Kumtaşı-Kiltaşı
SK-3	1619.0	40.0	00.00 - 01.00 Kil
			01.00 - 29.00 Yamaç Molozu (Bloklu-Çakıllı-Kumlu-Siltli kil)
			29.00 - 40.00 Andezit
SK-4	1655.0	40.0	00.00 - 01.00 Kil
			01.00 - 37.00 Yamaç Molozu (Bloklu-Çakıllı-Kumlu-Siltli kil)
			37.00 - 40.00 Andezit



Şekil 4. Sondaj kuyularına ait kuyu logları.

4. DALGA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Tersun barajı rezervuar alanındaki paleoheyelanın olası hareketi sonucu oluşacak dalganın baraj gövdesine ve Şıran-Gümüşhane yoluna etkisinin araştırılması amacıyla öncelikli olarak sondaj verileri ışığında heyelan kütesinin geometrik özellikleri tespit edilmiştir (Çizelge 2). Elde edilen veriler yardımıyla heyelan kütesinin suya çarpma hızı, çarpma ile oluşacak dalganın hızı, yüksekliği, karşı kıyıdağı ilerleme miktarı ve gövdeye ulaşma süresi ile gövdeye ulaşan dalganın yüksekliği hesaplanmıştır. Kayması muhtemel kütle, sol sahilde 1575-1805 m kotları arasında bulunmaktadır. Heyelanın uzunluğu ve genişliği yaklaşık olarak 705 m'dir. Yapılan sondajlar dikkate alındığında heyelanın toplam hacminin 6.308.537 m³ olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu miktarın yaklaşık 5.266.780 m³'lük kısmının, Tersun barajı gölü 1597 m kotu üzerinde kaldığı hesaplanmıştır. Baraj işletmeye geçtikten sonra olası bir kayma durumunda tek parça halinde tek seferde gelmesi muhtemel, çoğunlukla kireçtaşı bloklarından oluşan kütenin hacmi 3.445.931 m³ olarak tahmin edilmektedir. 3.445.931m³'lük malzemeye göre hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 2. Paleoheyelan malzemesinin fiziksel özellikleri.

Özellikler	
Heyelan en üst nokta kotu	1805 m
Heyelan en alt nokta kotu	1575 m
Heyelan kütesinin uzunluğu	780 m
Heyelan kütesinin ortalama genişliği	409 m
Heyelan kütesinin maksimum genişliği	680 m
Heyelan kütesinin ortalama kalınlığı	17 m
Birim hacim ağırlık	22 kN/m ³
Heyelan kütesinin eğim açısı	34°
Karşı yamacın ortalama eğim	30°
İçsel sürtünme açısı	30°
Heyelan kütesinin yüzey alanı	324,856 m ²
Heyelan kütesinin maksimum hacmi	6,308,537 m ³
Rezervuardaki maksimum su derinliği	38.47 m
Minimum su seviyesi kotu	1571 m
Maksimum su seviyesi kotu	1595.97 m
Normal su seviyesi kotu	1594 m

Heyelan Kütlesinin Hızı

Heyelan kütlesinin suya çarpma hızı oluşan dalganın hızını, yüksekliğinin, baraj gövdesine dalganın ulaşma hızı, gövdeye uyguladığı basıncı ve karşı kıyıdaki ilerleme miktarı etkileyen en önemli parametredir. Heyelan kütlesinin suya çarpma hızı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Huber, 1980; Huber and Hager, 1997; Vischer and Hager, 1998);

$$v_s = v_0 + [2g s(\sin\alpha - \tan\phi \cos\alpha)]^{1/2} \quad (1)$$

Burada;

v_s : heyelan hızı, v_0 : ilk hız, g : yer çekimi ivmesi (9.81 ms^{-2}), s : heyelan hareket miktarı, α : yamaç eğimi, ϕ : heyelan malzemesinin içsel sürtünme açısıdır.

Dalga Yüksekliği

Heyelan kütlesinin aniden suya çarpması ile rezervuar alanında dalga oluşmaktadır. Oluşan dalga karşı kıyaya ya da baraj gövdesine ulaştığı zaman ciddi zararlar vermektedir. Zararın boyutu dalganın boyutuna bağlıdır. Dalga yüksekliği Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanır (Huber, 1980; Huber and Hager, 1997; Vischer and Hager, 1998);

$$H = 0.88 \sin \alpha \left(\rho_s / \rho_w \right)^{1/4} \left(V_s / b \right)^{1/2} \left(h / x \right)^{1/4} \quad (2)$$

Burada;

H : dalga yüksekliği, α : yamaç eğimi, ρ_s ve ρ_w : malzemenin ve suyun yoğunluğu, V_s : malzeme hacmi, b : malzeme genişliği, h : su derinliği, x : karşı kıyıya olan uzaklık.

Dalga Hızı

Heyelan kütlesinin suya çarpması ile su yüzeyinde birçok farklı yönde ve yüksekliklerde hızlarda dalga oluşmaktadır. Çarpma yönü boyunca oluşan dalganın momenti en büyük olup dalganın hızı Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmaktadır (Huber, 1980; Huber and Hager, 1997; Vischer and Hager, 1998);

$$C = (g * (H + d))^{0.5} \quad (3)$$

Burada;

C dalganın yayılma hızı, g yerçekimi ivmesi, H dalga yüksekliği ve d su derinliğidir.

Dalganın Karşı Kıyıda İlerleme Miktarı

Heyelan kütlesinin ürettiği dalga karşı kıyaya ulaştığı zaman dalganın hızı, yüksekliği ve karşı yamacın eğim açısına bağlı olarak dalga karşı kıyıda ilerler dalganın karşı kıyıdaki ilerleme miktarı Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanır; (Huber, 1980; Huber and Hager, 1997; Vischer and Hager, 1998);

$$R/d = 1.25(\pi/2b)^{0.2}(H/d)^{1.25}(H/L)^{-0.15} \quad (4)$$

Burada;

R dalganın karşı kıyıda ilerleme miktarı, d su derinliği, b karşı kıyımın eğim açısı, H dalganın yüksekliği, L dalganın uzunluğudur.

Dalganın Baraj Gövdesine Etkisi

Kütle hareketi sonucu oluşan ve baraj gövdesine ulaşan dalganın hızı ve yüksekliği önemlidir, çünkü gövdeye etki eden dalga barajı aşabilir ya da baraj gövdesine hasar vererek gövdede yıkılmalara neden olabilir. Bu yüzden gövdeye ulaşan dalganın yüksekliğinin hesaplanması gerekmektedir. Dalga yüksekliği Eşitlik 5 yardımıyla hesaplanır (Huber, 1980; Huber and Hager, 1997; Vischer and Hager, 1998);

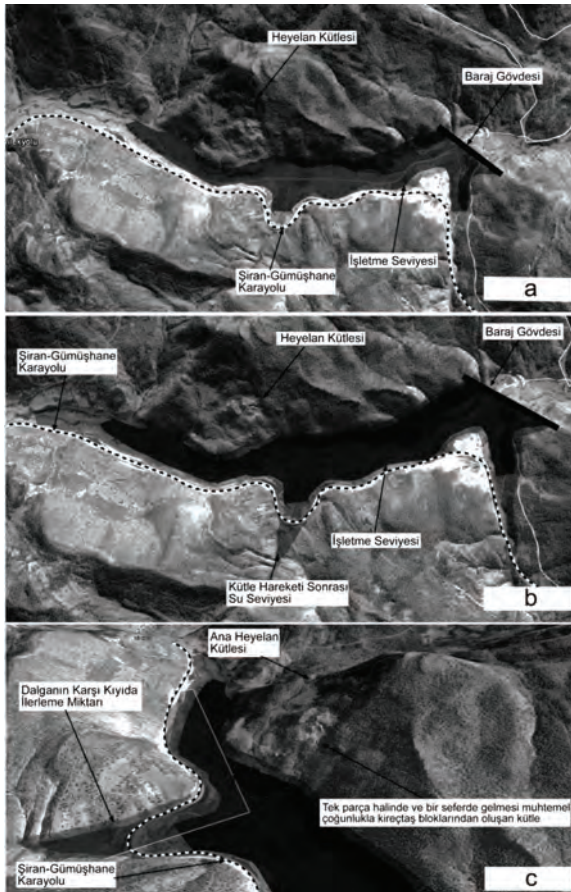
$$H/h = 2 \times 0.88 \sin \alpha \cos^2 \left(2\gamma/3 \right) \left(\rho_s / \rho_w \right)^{1/4} \left(V_s / bh^2 \right)^{1/2} \left(r/h \right)^{-2/3} \quad (5)$$

Burada;

H: dalga yüksekliği, α : yamaç eğimi, ρ_s ve ρ_w : malzemenin ve suyun yoğunluğu, V_s : malzeme hacmi, b: malzeme genişliği, h: su derinliği, x: karşı kıyıya olan uzaklık, H/h: göreceli dalga yüksekliği, γ : dalga yönü, r: radyal seyahat mesafesidir.

5. SONUÇLAR

Baraj işletme seviyesine ulaştıktan sonra heyelan kütesinin akma ve kabarma bölgesi sular altında kalacaktır. Olası bir kütle hareketinde tek parça halinde çoğunlukla kireçtaşı bloklarından oluşan malzemenin rezervuar altına dolarak dalga üreteceği ve rezervuardaki su seviyesinin yaklaşık 8 metrelik bir yükselmeye neden olacağı, oluşan dalganın karşı kıyı ve vadiye doğru hücum ederek Şiran-Gümüşhane yoluna zarar vereceği tahmin edilmektedir (Şekil 5 a, b, c). Ayrıca baraj gövdesine ulaşan suyun kreti aşır mansap tarafındaki Gökçeler köyüne ulaşacağı düşünülmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda heyelan kütesinin suya çarpma hızı 24.5 m/sn çarpma ile oluşacak dalganın yüksekliği 33 m, hızı 22 m/sn, karşı kıyı için ilerleme miktarı 30 m, baraj gövdesine ulaşma süresi 68 sn ve gövdeye ulaşan dalganın boyunun 10 m olacağı hesaplanmıştır. Sonuç olarak heyelanın oluşturacağı dalganın Gümüşhane-Şiran karayoluna, barajın gövdesine ve barajı aşan suların mansaptaki Gökçeler köyüne hasar verebileceği ön görülmektedir.



Şekil 5. İşletme aşamasındaki (a), kütle hareketi sonucu su seviyeleri (b) ve dalganın karşı kıyıda ilerleme miktarı (c).

6. KAYNAKLAR

- DSİ, 1997. Şiran Projesi Tersun Barajı ve Sulaması Mühendislik Jeolojisi Planlama Raporu, Trabzon.
- DSİ, 2013. Tersun Barajı Kesin Proje Yapım Aşaması Jeoteknik Etüt Raporu, Dolsar Mühendislik, Ankara.
- Erdik, M., Demircioğlu, M., Şeşetyan, K. ve Durukal, E., 2006. Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları Limanlar ve Hava meydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği için Deprem Tehlikesi Belirlenmesi, BÜ Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü.
- Ertunç, A., 2003. Mühendislik Jeolojisi. SDÜ Yayınları, Isparta.
- Gelişli, K., Ersoy, H., 2017. Landslide Investigation with the use of Geophysical Methods: A Case Study In Northeastern Turkey, *Advances in Biology and Earth Sciences*, 2(1), 52-64.
- Huber, A., 1980. Schwallellen in seen als flogevon felssturzen. Technical Report Mitteilung 47, VAW-Mitteilung, 180, Vischer D. (ed.), Zurich, Switzerland.
- Huber, A., and Hager, W. H., 1997. Forecasting impulse waves in reservoirs, in *Dix-neuvieme Congres des Grands Barrages*, Florence, Commission Internationale des Grands Barrages, 993-1005.

Artvin Baraj Gölü Heyelanının Oluşturacağı Olası Dalga Etkisinin Ampirik Yaklaşımlarla İrdelenmesi

Investigation of the Possible Wave Effect of the Artvin Dam Reservoir Landslide with Empirical Approaches

H. Ersoy*, M. Karahan, A. Akgün, K. Tezel

*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
(*blavetirra@hotmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, Artvin Barajının 8 km mansabında bulunan paleo-heyelan malzemesinin yeniden aktif hale gelmesi durumunda rezervuarda oluşacak dalgaların etkisi ampirik yaklaşımlar kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada, toplamda 1602 metre olmak üzere 21 adet sondaj, 20 farklı profilde yapılan öz direnç ölçümleri ve arazi gözlemleri sonucunda heyelan malzemesinin morfolojik özellikleri ortaya koyulmuş, sondajlardan temin edilen örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ve presiyometre deneyleri ile heyelan malzemesinin jeomekanik özellikleri ortaya koyulmuştur. İki boyutlu sonlu elemanlar tekniğiyle yapılan yaklaşık 3.5 milyon metreküp malzemenin hareket edeceği hesaplanmıştır. Heyelan malzemesinin %60'ının rezervuar alanına kayacağı kabulü yapılarak iki ve üç boyutlu ampirik yaklaşımlar uygulanmış, modelde heyelan kütesinin uzunluğu, genişliği, kalınlığı, eğimi, ortalama hareket miktarı, karşı yamacın eğimi ve rezervuar derinliği girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Yapılan analizlerde, heyelanın oluşacağı bölgenin karşı yamacını 28 metrelik dalgaların etkileyeceği, rezervuar boyunca ortalama 30 m/s hızla ilerleyen dalganın boyunun Artvin baraj gövdesine ve Yusufeli baraj inşaat alanına gelinceye kadar sönümleneceği hesaplanmıştır. Artvin barajında, dalga payının 15 metre olarak bırakıldığı düşünüldüğünde gelişecek dalgaların barajın üzerinden aşmayacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, baraj, rezervuar, dalga

ABSTRACT: *In this study, effect of the possible wave originated from the reviewing of the paleo-landslide located on the 8 km upstream of the Artvin dam was investigated using empirical approaches. The morphological properties of the landslide materials were defined using the data obtained from 21 boreholes a totally of 1602 m, electric resistivity surveys in 20 different profiles and field observations. In addition, geo-mechanical properties of the materials were determined with in situ pressuremeter test results and laboratory test results on undisturbed samples from the boreholes. Two-dimensional finite element method shows that about 3.5-million-cubic meters material could be unstable. With acceptance of the flowing materials is about 60 percent of the all materials, the two dimensional empirical approaches were used, the length of the landslide mass, width, thickness, unit weight of the slide mass, average landslide travel distance, slope gradient, slope gradient of the opposite shore, depth of the reservoir were used as input parameters in the model. The analysis show the 28-meter wave could affect the opposite shore of the landslide area, the wave with the speed of 30 m/s could be damped up to the Artvin dam Yusufeli dam construction site. Because the freeboard of the dam was designed as 15 m, the wave formed by landslide does not overflow the dam.*

Keywords: *Landslide, dam, reservoir, wave*

1. GİRİŞ

Barajlar genel olarak çok güvenli yapılar olmalarına karşın dünyada 300'den fazla büyük baraj yenilmiştir. Bunların %10'unda rezervuar alanlarında meydana gelen heyelanların sonucunda oluşan dalgalar etkili olmuştur (Ertunç, 2003; Ersoy vd. 2015). Bu heyelanların %85'i ise baraj gölünün dolmasından itibaren iki yıl içerisinde gerçekleşmiştir (Riemer, 1995).

Artvin Barajı ve HES Projesi, Doğu Karadeniz Bölgesi Orta Çoruh Havzasında ve Çoruh Nehri üzerinde planlanmış olup, barajın inşası 2015 yılında tamamlanmıştır. Yüksekliği talvegten 135 metre,

temelden 180 metre ve kret uzunluğu 277,90 m olan baraj, beton kemer tipindedir. Barajın su tutması sonucu baraj gölü işletme kotu 500 metreye ulaşmış ve baraj rezervuar alanı içerisinde bulunan Havuzlu paleo-heyelan alanı (Yusufeli-Artvin) topuğuna kadar erişmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı ve çevresinin yer bulduru haritası.

2013 yılında başlayıp 2015 yılında son bulan çalışmalar ile Artvin barajının su tutmasıyla birlikte topuk kısmı göl alanı içerisinde kalacak olan paleo-heyelan malzemenin yanal ve düşey devamlılığı, jeolojik (toplamda 1602 metre olmak üzere 21 adet sondaj) ve jeofizik çalışmalar (20 farklı profilde yapılan öz direnç ölçümleri) ile belirlenmiş, farklı koşullar için paleo-heyelan malzemesinin stabilitesi araştırılmıştır (Ersoy vd. 2015; Gelişli and Ersoy, 2017).

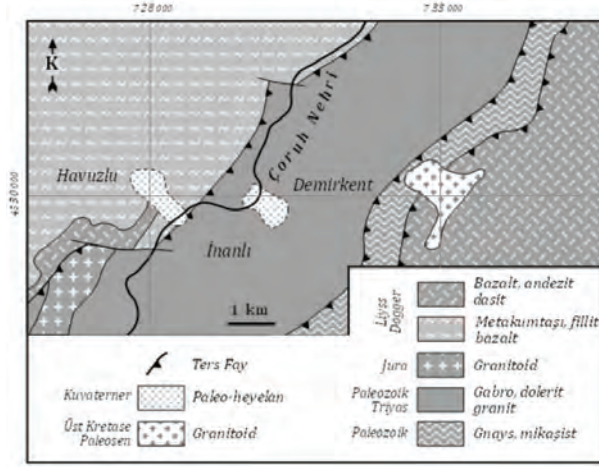
Bu çalışma kapsamında ise heyelanın gelişmesi durumunda baraj gölünde oluşacak dalgaların fiziksel özellikleri iki boyutlu ampirik yaklaşımlar uygulanarak tahmin edilmiş, bu dalgaların Artvin Baraj gövdesine ve yapımı devam eden Yusufeli Baraj elemanlarına etkisi araştırılmıştır.

2. HAVUZLU PALEO HEYELANI

2.1. Genel Jeoloji ve Depremsellik

Çalışma alanı ve çevresinde Paleozoyik ile Paleosen yaş aralığında oluşmuş kayalar yüzeylenme vermektedir (Şekil 2). Tabanda bulunan Paleozoyik yaşlı metamorfik temel kayalar genel olarak gnays ve mikaşistlerden oluşmaktadır. Bölgede tonalit, fillat, mikro gabro ve gabrolardan oluşmuş Paleozoyik-Trias yaşlı magmatik kompleks kuzey-güney yönlü tektonik faaliyetlerin kontrolü altında yüzeylenmiştir. Bu kayalar, Jura yaşlı granitik kayalar tarafından kesilmiştir. Tüm bu kayaların üzerinde ise metakumtaşı, fillat, bazalt ve andezitlerden oluşan Liyas-Dogger yaşlı birimler bulunmaktadır. En genç birimler ise bütün bu birimleri keserek yerleşen Üst Kretase-Paleosen yaşlı granitlerdir. Havuzlu paleo-heyelanı ise Jura yaşlı birimler üzerinde uyumsuz olarak bulunmaktadır (Gelişli vd., 2015; Ersoy vd. 2015; Gelişli and Ersoy, 2017).

Artvin ili ve çevresinde deprem oluşma potansiyeli irdelendiğinde, inceleme alanının bulunduğu bölgede yıkıcı özellikte deprem yapabilecek herhangi bir aktif fayın bulunmadığı anlaşılmaktadır. Erdik vd (2006) tarafından Türkiye'deki diri faylar dikkate alınarak, uygun azalım ilişkileri kullanılarak aşılma olasılığı dağılımlarına göre belirlenmiş dönüş periyotlarına tekabül eden eş-ivme eğrileri haritası hazırlanmıştır. Bu haritaya göre çalışma alanı ve çevresinde beklenen en büyük ivme değerlerinin 0.20 olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Ersoy vd., 2015; Gelişli and Ersoy, 2017).

2.2. Heyelan Malzemesinin Jeoteknik Özellikleri ve Stabilité Analizleri

Olası bir heyelanın baraj gölünde oluşturacağı dalga yüksekliği büyük oranda heyelan malzemesinin geometrisi ile ilişkilidir. Bununla birlikte topografya ve heyelan malzemesinin jeoteknik özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. 2013 ile 2015 arasında yapılan çalışmalarda paleo-heyelan malzemesini yatay ve düşey devamlılığının belirlenmesi amacıyla 21 farklı lokasyonda toplam 1602 metre sondaj yapılmış ve 20 farklı profilde multi-elektrot ve 2 profilde sismik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ortamın jeoteknik özelliklerini belirlemek için 4 kuyuda presiyometre ölçümleri yapılmış, sondaj ve araştırma çukurlarından temin edilen örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 1 ve Çizelge 2’de özetlenmiştir.

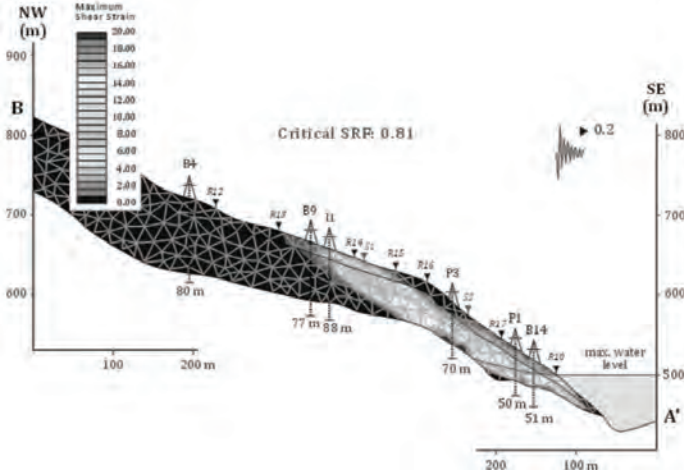
Çizelge 1. Jeofizik çalışmalardan elde edilen veriler (Gelişli vd. 2015).

Derinlik (m)	Boyuna Dalga Hızı (m/s)	Enine Dalga Hızı (m/s)	γ (kN/m ³)
0-15	800	420	18.6
15-	1050	550	19.1

Çizelge 2. Arazi deneylerinden elde edilen veriler (Gelişli vd. 2015).

Derinlik (m)	Presiyometre modülü (kPa)	Limit basınç (kPa)	Pik c (kPa)	Pik ϕ (derece)
0-15	1200-7000	300-800	24	22
15-	2500-18000	800-1350	26	24

Bu veriler kullanılarak, iki boyutlu sonlu elemanlar tekniğiyle yapılan stabilite analizlerinde baraj su seviyesinin işletme seviyesinde (500 metre) olması durumunda depremlilik için (0.20 g) gerilme azaltma faktörü 0,81 olarak bulunmuş (Şekil 3), bu durumda ise yaklaşık 3.5 milyon metreküp malzemenin duraysız hale geleceği hesaplanmıştır.



Şekil 3. İki boyutlu sonlu elemanlar tekniğiyle yapılan stabilite analizi.

3. REVERVUAR ALANINDA OLUŞACAK DALGA ETKİSİ

Çalışmada, muhtemel bir kütle hareketi sonucu oluşabilecek dalganın, gerek heyelanın mansabında bulunan Artvin Barajına, gerekse heyelan membasında yapımı devam eden Yusufeli Barajı inşaat alanına olan etkileri araştırılmış, gelişebilecek heyelan malzemesinin %60'ı rezervuar alanına kayacağı kabulü yapılarak iki ve üç boyutlu ampirik yaklaşımlar uygulanmıştır.

Kayan malzemenin darbe hızı, heyelan kaynaklı dalga oluşumlarının modellenmesinde kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle çalışma kapsamında, heyelan hızı Vought (1979) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$v_s = v_0 + [2g s(\sin\alpha - \tan\phi \cos\alpha)]^{1/2} \quad (1)$$

Burada;

v_s : heyelan hızı, v_0 : ilk hız, g : yer çekimi ivmesi (9.81 ms^{-2}), s : heyelan hareket miktarı (topuktan su yüzeyine), α : yamaç eğimi, ϕ : heyelan malzemesinin içsel sürtünme açısıdır.

Bir heyelanın baraj gölünde oluşturacağı dalganın karşı yamaca etkisi 2 boyutlu deneysel modellerle araştırılmış, oluşacak dalga boyutları için Eşitlik 2 tanımlanmıştır (Huber, 1980; Huber and Hager, 1997; Vischer and Hager, 1998). Ancak çoğu zaman baraj gövdesi, oluşacak heyelanın karşısında olmaz. Bu durumda oluşan heyelan istikameti ile farklı açılar yapan yönlerde gelişen dalga boyu daha küçük olur. Bu nedenle, dalgaların farklı yönlerdeki yükseklikleri 3 boyutlu modellerle araştırılmış ve Eşitlik 3 tanımlanmıştır (Huber, 1980). Bu çalışma kapsamında da karşı yamaca etkileyecek dalga yüksekliği Eşitlik 2, baraj gövdesini etkileyecek dalga yüksekliği Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$H = 0.88 \sin\alpha \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)^{1/4} \left(\frac{V_s}{b}\right)^{1/2} (h/x)^{1/4} \quad (2)$$

$$H/h = 2 \times 0.88 \sin\alpha \cos^2\left(\frac{2\gamma}{3}\right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)^{1/4} \left(\frac{V_s}{bh^2}\right)^{1/2} (r/h)^{-2/3} \quad (3)$$

Burada;

H : dalga yüksekliği, α : yamaç eğimi, ρ_s ve ρ_w : malzemenin ve suyun yoğunluğu, V_s : malzeme hacmi, b : malzeme genişliği, h : su derinliği, x : karşı kıyıya olan uzaklık, H/h : göreceli dalga yüksekliği, γ : dalga yönü, r : radyal seyahat mesafesidir.

Dalga hızı erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve mevcut baraj gövdesinde oluşacak darbe etkisinin hesaplanması için kullanılan önemli bir parametredir. Bu çalışmada Huber and Hager (1997) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak dalga hızı hesaplanmıştır.

$$c = (g x h)^{0.5} \quad (4)$$

Tüm bu eşitliklerde kullanılan ve heyelan malzemesine ait parametreler Çizelge 3'de, bu veriler yardımıyla hesaplanan dalga özellikleri de Çizelge 4'de özetlenmiştir.

Çizelge 3. Paleo-heyelan malzemesinin fiziksel özellikleri (Ersoy vd., 2015; Gelişli and Ersoy, 2017).

Özellikler	Değer
Artvin Barajına uzaklık	8000 m
Yusufeli Barajına uzaklık	12000 m
Heyelan bölgesinde rezervuar derinliği	70 m
Artvin barajı su derinliği	120 m
Yusufeli mansabında su derinliği	30 m
Duraysız malzeme miktarı (V)	3.5 milyon m ³
Göle akacak malzeme miktarı (% 60 x V)	2.1 milyon m ³
Göle akacak malzeme uzunluğu (hareket miktarı)	300 m
Göle akacak malzeme genişliği	500 m
Göle akacak malzeme kalınlığı	69 m
Hareket edecek malzeme eğimi	33 derece

Çizelge 4. Heyelan oluşması durumunda meydana gelecek dalga özellikleri.

Belirlenen Özellikler	Değer
Heyelan hızı	35.2 m/s
Karşı yamacı etkileyecek dalga yüksekliği	27.6 m
Karşı yamacı etkileyecek dalga hızı	31 m/s
Artvin barajını etkileyecek dalga yüksekliği	2.5 m
Artvin barajını etkileyecek dalga hızı	34.3 m/s
Yusufeli baraj yapılarını etkileyecek dalga yüksekliği	1.5 m
Yusufeli baraj yapılarını etkileyecek dalga hızı	22.1 m/s

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Artvin Barajının su tutması ile birlikte, baraj mansabının 8 km güneybatısında bulunan paleo-heyelan malzemesinin yeniden aktif hale gelmesi durumunda olası heyelanın baraj gölünde oluşturacağı dalganın Artvin ve Yusufeli baraj yapılarına olan etkisi araştırılmıştır. Paleo-heyelan malzemesi üzerinde yapılan 21 adet sondaj (1602 m) ve özdirenç (20 farklı profil) çalışmaları ile heyelan malzemesinin yatay ve düşey devamlılığı ortaya koyulmuş, laboratuvar ve arazi deneyleri (presiyometre) sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile heyelan malzemesinin indeks ve dayanım özellikleri belirlenmiştir. Depremlilik durum gözetilerek rezervuarın işletme seviyesinde (500 m) olması durumunda iki boyutlu sonlu elemanlar tekniğiyle yapılan analizlerde gerilme azaltma faktörü 0.81 olarak bulunmuş, yaklaşık 3.5 milyon metre küp malzemenin hareket edeceği hesaplanmış ve 2.1 milyon metre küp malzemenin rezervuar alanına kayacağı öngörülmüştür. Bu durumda iki ve üç boyutlu ampirik yaklaşımlar uygulanarak yapılan analizlerde heyelan malzemesinin 35.2 m/s hızla rezervuara akacağı ve karşı yamacın yaklaşık 30 metrelik bir dalgadan etkileneceği hesaplanmıştır. Ayrıca, Artvin barajını etkileyecek dalga yüksekliği 2.5 m ve dalga hızı 34.3 m/s olarak, Yusufeli baraj yapılarını etkileyecek dalga yüksekliği 1.5 m ve dalga hızı 22.1 m/s olarak belirlenmiştir. Bu durumda her iki mühendislik yapısı açısından ilk oluşacak dalganın risk oluşturmayacağı ancak oluşacak dalganın karayolunu ve güzergâh boyunca bulunan Demirkent Paleo-heyelanını olumsuz etkileyebileceği sonucuna varılmıştır.

5. KAYNAKLAR

- Erdik, M., Demircioğlu, M., Şeşetyan, K. ve Durukal, E., 2006. Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları Limanlar ve Havameydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği için Deprem Tehlikesi Belirlenmesi, BÜ Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü.
- Ersoy, H, Gelişli, K, Bayraktar, A, Öztürk, H.H, Seçkin, A.C, Karabrahimoğlu, G, Sağır, G, Özen, M, Tezel, B, Yüregir, B, Kul Yahşi, B, 2015. Havuzlu Paleo-Heyelanının (Yusufeli, Artvin) Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi, MUHJEO'2015 Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, Trabzon, 90-97.
- Ertunç, A., 2003. Mühendislik Jeolojisi. SDÜ Yayınları, Isparta.
- Gelişli, K, Ersoy, H, 2017. Landslide Investigation with the Use of Geophysical Methods: A Case Study In Northeastern Turkey, *Advances in Biology and Earth Sciences*, 2(1), 52-64
- Huber, A. 1980. Schwallellen in seen als flogevonfelsessturzen. Technical Report Mitteilung 47, VAW-Mitteilung, 180, Vischer D. (ed.), Zurich, Switzerland.
- Huber, A. and Hager, W.H, 1997. Forecasting impulse waves in reservoirs, in Dix-neuvieme Congres des Grands Barrages, Florence, Commission Internationale des Grands Barrages, 993-1005.

Mersin-Tarsus Otoyolunun Kuzey Şevlerindeki Duraysızlıkların Değerlendirilmesi

Evaluation of Instabilities at Northern Slopes Along Mersin-Tarsus Motorway

H. Tağa

Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 33343, Yenişehir, Mersin
(htaga@mersin.edu.tr)

ÖZ: Bu çalışmada, Çukurova Otoyolunun 57 km uzunluğundaki Mersin-Tarsus kesiminin (MTO) kuzeyinde yer alan kazı mühendislik şevlerinin duraylılığı değerlendirilmiştir. Yapımına 1992 yılında başlanan Mersin-Tarsus Otoyolu, bölgedeki en önemli ulaşım koridorunu oluşturmaktadır. Otoyoldaki kazı mühendislik şevlerinden 1995 yılından 2016 yılı sonuna kadar 61 noktada yaklaşık 4.5×10^6 m³'lük zemin malzemesi kaymıştır. MTO'da en son meydana gelen duraysızlık problemi 29 Aralık 2016 tarihinde yaklaşık 100 mm'lik yağışın arkasından Gözne viyadüğünün de yer aldığı kuzey şevinin 12+250 ile 12+500 kilometrelerinde oluşmuştur. 12+250 ile 12+500 kilometrelerindeki heyelan dairesel başlayıp zayıf dayanımlı siltli kiltası litolojisinde düzlemsel olarak devam etmiştir. Yüksek plastik-çok yüksek plastik CH/MH olarak değerlendirilen heyelan malzemesinin XRF sonuçlarına göre %15 dolayında Al₂O₃, %44 SiO₂, %10 CaO ve %10 da Fe₂O₃'den oluşmaktadır. Duraysızlık probleminin yaşandığı alanlarda yüzeyde kalış ve bu kalışın tabanında da Tortoniyen yaşlı Kuzgun formasyonunun yeşilimsi gri renkli, zayıf-çok zayıf dayanımlı çok ayrılmış siltli kiltası-marn seviyeleri yer almaktadır. Bölgede oluşan sağanak yağışlar, kazı şevlerindeki zeminlerin boşluk suyu basıncını artırarak kayma dayanımının azalmasına neden olmuştur. Kayma dayanımının azalması ile kazı şevleri duraylılıklarını kaybetmişlerdir.

Anahtar Kelimeler: Otoyol, heyelan, mühendislik şevi, duraysızlık

ABSTRACT: In this study, the cut slope stability problems of northern engineered slopes along 57 km long Mersin-Tarsus Motorway was evaluated. The Mersin-Tarsus Highway, which was built in 1992, constitutes the most important transportation corridor in the region. In the excavation engineered slopes on the highway, about 4.5×10^6 m³ of landslide material has slipped in 61 points from 1995 to the end of 2016. The most recent slope stability problem in MTO took place on chainage 12 + 250 to 12 + 500 kilometers where the Gözne viaduct was located on December 29, 2016. The landslide followed about 100 mm of precipitation. The landslide started in a circular direction and continued in a planar on the weak resistance silty claystone lithology. The landslide material evaluated as high plastic - very high plastic CH / MH. According to the XRF results of the slipped material is consist of 15% Al₂O₃, 44% SiO₂, 10% CaO and 10% Fe₂O₃. In the areas where there is a problem of instability, there is surface caliche and on the bottom of this caliche is the greenish gray color of the Kuzgun formation of Tortonian age and very weakly diffused silty claystone-marl levels. Pore water pressures increase following intense rainfall events and cause reduced resistance to shear strength at the engineered slopes on northern slopes.

Keywords: Motorway, Landslide, Engineered Slope, Instability

1. GİRİŞ

Bu çalışmada Uluslararası Mersin Limanı ile ülkemizin Doğu ve Güney Anadolu bölgelerini, Ortadoğu ülkeleri ile Asya'yı bağlayan köprü niteliğindeki Çukurova Otoyolunun 57 km uzunluğundaki Mersin-Tarsus kesiminin (MTO) kuzey mühendislik şevlerinde oluşan duraysızlık problemleri değerlendirilmiştir (Şekil 1). Yapımına 1992 yılında başlanan MTO, 1995 yılından itibaren araç trafiğine açılmıştır. MTO'daki 2Y:1D olarak yapımına başlanılan kazı mühendislik şevleri, inşaat aşamasında oluşan kaymalar nedeniyle kuzey şevleri 3Y:1D olarak tekrar projelendirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası

1995 yılından bugüne kadar MTO'da 60 farklı noktada yaklaşık 4 milyon m³'lük bir kayma oluşmuştur (Şekil 2). Şev duraylılığı problemi yaşanan bu alanlarda en üstte şapka şeklinde sert kalış ve bunun altında da kalışın yumuşak seviyeleri ile siltaşı-kumtaşı-marn-çamurtaşı ardalanmalı Kuzgun formasyonu yer almaktadır (Taga vd., 2015). MTO'da meydana gelen en son heyelanlar 10 Mart 2014 tarihinde 150 mm'lik yağışın arkasından 3Y:1D olarak inşaa edilen 29+000 ile 29+300 kilometreleri arasında (Deliçay Heyelanı), 15 Şubat 2015 tarihinde 120 mm'lik yağışın ve 29 Aralık 2016 tarihinde de yaklaşık 100 mm'lik yağışın arkasından Gözne viyadüğünün de yer aldığı kuzey şevinin 12+250 ile 12+500 kilometrelerinde (Gözne Viyadüğü Heyelanı) oluşmuştur. Yoğun yağışların neden olduğu heyelanlar dünyada ve ülkemizde Sidle ve Swanston (1982), Azzoni vd., (1992), Finlay vd., (1997), Petrucci ve Polemio (2003), Rahimi vd., (2010), Regmi vd., (2014), Cotecchia vd., (2015), Oh ve Lu (2015), Regmi vd., (2017), Wu vd., (2017) gibi araştırmacılar tarafından incelenmişlerdir.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

Çalışma alanı, Toros Dağları ile Çukurova baseni arasında doğu-batı yönünde uzanan yumuşak, az engebeli bir topografyaya sahiptir. Çalışma alanında Tersiyer ve Kuvaterner yaşlı resifal kireçtaşı (Karaisalı fm), kiltası, marn, killi kireçtaşı (Güvenç fm), kumtaşı-kiltası-siltaşı-marn (Kuzgun fm), kalış ve alüvyondan oluşan litostratigrafi birimleri, Palozoyik yaşlı temel birimler üzerinde uyumsuz olarak gelmektedir (Şekil 2). Paleozoyik yaşlı Ziyarettepe formasyonu yüksek dayanımlı dolomitik kireçtaşı ve mermerden oluşmaktadır (Özgül, 1973; Tutkun, 1984). MTO güzergâhının büyük bir kısmında bu birimlerden Tersiyer yaşlı Kuzgun formasyonu ve bunu üzerleyen Kuvaterner yaşlı kalış birimi ile dere yataklarındaki alüvyonlar yer almaktadır. Drenaj ağı kuzeyden güneye doğru MTO'yu dik keser. Başlıca akarsular, Berdan nehri, İçme, Deliçay, Gökkuşluğu, Mezitli ve Müftü dereleridir. Akarsular, geniş tabanlı ve 10 -15 m kalınlıklarda alüvyon birikintilerine sahiptir. Schmidt (1961) tarafından adlandırılan Kuzgun formasyonu çalışma alanının güney-doğu kısmında bir şerit halinde uzanmaktadır. Birim konglomera, kumtaşı, çamurtaşı, kiltası, marn ve resifal kireçtaşlarıyla temsil edilmektedir (İlker, 1975; Şenol vd., 1998). Zayıf dayanımlı kiltası ve çamurtaşı seviyeleri kırmızı kahve renkli ve üst yüzeyleri oldukça ayrılmış durumdadır.



Şekil 2. 57 km uzunluğundaki MTO'da heyelan olmuş lokasyonlar (a), yol koridorunun jeolojik haritası (Hoş, 1995 ve Taga vd, 2015'den değiştirilerek) (b) ve Yol boyunca jeolojik profili (Hoş, 1995'den değiştirilerek) (c).

Formasyonu meydana getiren sedimanlar karasal ve denizel ortamda çökelmişlerdir. Sahanın kuzey-doğusunda karasal fasiyeste olan çökme güneybatıya doğru denizel fasiyese geçmektedir. Kuzgun formasyonunu Kuvaterner yaşlı taraça, kalış, kolüvyon ile güncel alüvyonlar üzerlemektedir. Taraçalar, dere kenarlarında çok büyük çakıldan siltlere varan tane boyu ile temsil edilmektedir. Kuvaterner yaşlı ikincil oluşuk olan kalış, oluşan tüm heyelan sahalarında çalışma alanında geniş yüzlekler sunmaktadır. Kalışlar; kireç tozu, yumru, tüp, laminalı kabuk ve karbonat kabuk gibi farklı görünümlere sahip olup (Estaban ve Klappa 1983; Tucker, 1991; Wright ve Tucker, 1991), çalışma alanında 2-4 m kalınlığında yumru, tüp şeklinde yumuşak seviye ve 2-3m kalınlığında da karbonat kabuk ile temsil edilmektedir. Bölgedeki kalış oluşumu Kuzgun formasyonu ve taraçalar üzerinde yer almaktadır (Şekil 2).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Bu çalışmada Çukurova Otoyolunun 57 km uzunluğundaki Mersin-Tarsus kesiminin (MTO) kuzey mühendislik şevlerinde oluşan duraysızlıklar değerlendirilmiştir. 60 farklı noktada meydana gelen heyelanların tamamı siltaşı-çamurtaş marn litolojisindeki Kuzgun formasyonu ile bu formasyonu şapka şeklinde örten kalış birimi içerisinde gelişmiştir (Şekil 2). Kütle hareketleri değerlendirilirken, Brunton 5010 tipi jeolog pusulası, Magellan Explorist XL el GPS'i, 1/100.000 ölçekli Mersin O 33 paftası, 1/5.000 ölçekli hâlihazır, 1/1.000 ölçekli planlar, çalışma alanını kapsayan 2012 yılına ait ortofotolar, farklı tarihlere ait uydu görüntülerinden ve oluşan heyelandan sonra alınan fotoğraflardan yararlanılmıştır.

3.2. Yöntem

MTO kuzey şevlerinde oluşan duraysızlıklardan 3Y:1D olarak inşaa edilen 29+000 ile 29+300 kilometreleri arasındaki Deliçay Heyelanı ile 12+250 ile 12+500 kilometreleri arasında oluşmuş Gözne Viyadüğü heyelanları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Deliçay heyelanının yüzey haritasını ve heyelanın kayma mekanizmasını belirlemek amacıyla 1/25000 ölçekli topografik harita, farklı tarihlere ait uydu görüntüleri ile heyelan kütlesi içerisinde açılmış 6 adet araştırma sondajı (Çizelge 1), heyelan alanından alınmış fotoğraflar ve heyelan malzemesinin taç, ana gövde ve topuğundan alınan zemin örneklerinden yararlanılmıştır. Alınan zemin örnekleri üzerinde sınıflandırma ve tanımlama deneyleri ile heyelan malzemesinin petrografik ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Mersin Üniversitesi İleri Araştırma Merkezinde FTIR ve X-Işınları toz difraktometresi (XRD) ile mineral analizleri ve X-Işın Floresan (XRF) spektroskopisi ile kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 2). Karotlu ilerleme şeklinde açılmış araştırma sondajlarında (Yüksel Proje, 2014) standart penetrasyon testi (SPT) ile Louis Menard GA tipi presiyometre ile presiyometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu sondajlarda heyelanın derinliği ve mekanizmasının değerlendirilmesi amacıyla inklinometre düzenekleri yerleştirilerek 17 gün boyunca deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3). Ayrıca birimlerin indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da heyelan alanından örselenmiş örnekler alınmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 1. Deliçay heyelanı alanında araştırma sondajlarının özellikleri (Yüksel Proje, 2014).

No	X* (Sağa_Doğu)	Y* (Yukarı_Kuzey)	Z (Yükseklik) (m)	Yeraltı Suyu Seviyesi (m)	Sondaj Derinliği (m)	İnklinometre Tesis derinliği (m)
MOS-1	650556	4087405	101	14,00	24	24
MOS-2	650580	4087450	107	18,00	30	30
MOS-3	650590	4087423	104	20,00	27	27
MOS-4	650623	4087461	105	18,80	27	27
MOS-5	650524	4087515	122	2,40	27	27
MOS-6	650562	4087553	120	17,80	24	24

* Koordinatlar UTM ED1950 koordinat sistemine göre dir.

Çizelge 2. Deliçay heyelanından alınmış zemin örneklerinin kimyasal bileşimi (% olarak).

Alındığı Nokta	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	ZnO	Rb ₂ O	SrO
Taç	0,41	4,77	14,15	44,68	0,09	0,1	0,13	2,75	10,54	0,97	0,058	0,091	9,39	0,04	0,016	0,018	0,032
Ana Gövde	0,31	5,02	14,93	44,62	0,093	0,43	0,16	3,26	9,08	1,02	0,067	0,086	9,26	0,052	0,018	0,022	0,038
Topuk	0,34	5,06	14,29	43,14	0,097	0,83	0,17	3,28	9,5	1,02	0,069	0,095	10,24	0,049	0,018	0,022	0,043

Çizelge 3. Araştırma sondajlarındaki inklinometre okumaları (Yüksel Proje, 2014).

Sondaj No	İnklinometre		Kayma Hareketi		
	Tesis Derinliği (m)	Ölçüm Süresi (gün)	Kayma Derinliği (m)	Kayma Miktarı (mm)	Hareket Hızı (mm/gün)
MOS-1	24	17	3,30	8,94	0,34
MOS-2	30	17	6,30	4,76	0,20
MOS-3	27	17	9,30	0,58	0,03
MOS-4	27	15	6,10	12,16	0,53
MOS-5*	27	4	8,20	65,70	16,42
MOS-6*	24	6	5,70	53,85	8,97

* İnklinometre kuyusunun kırıldığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4. MTO Deliçay Heyelanından alınmış zemin örneklerinin indeks özellikleri.

Zemin Türü	Doğal Su içeriği (%)	Kıvam Limitleri (%)			Tane Boyu Dağılımı (%)	
		Likit Limit	Plastisite Limit	Plastisite indisi	4 Nolu elekte kalan	200 nolu elekten geçen
Yapay Dolgu	18-29	NP-64	NP-34	NP-31	<40	30-97
Heyelan Malzemesi	18-34	NP-75	NP-35	NP-40	13-40	30-99
Ayrışmış Kıltaşı- çamurtaşı	8-27	NP-77	NP-39	NP-38	4-65	12-98

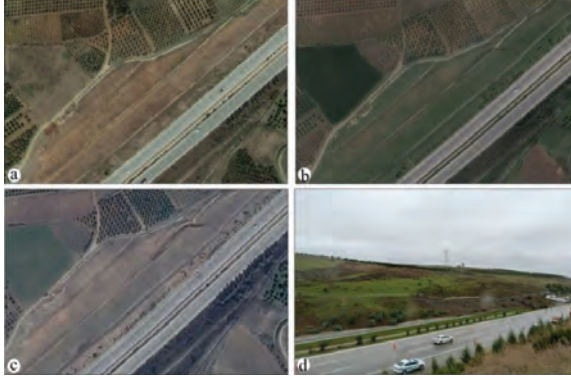
4. DURAYSIZLIKLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Duraysızlıkların Tarihçesi

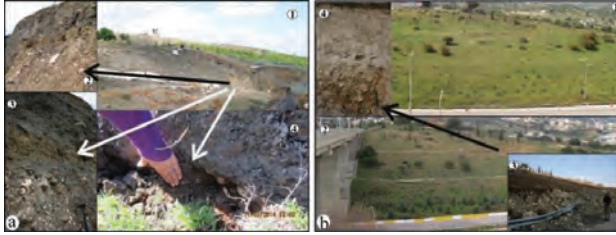
Yapımına 1992 yılında başlanan MTO 1995 yılında hizmete açılmış olup, inşaat aşamasından itibaren günümüze kadar 60 farklı noktada toplam 4 milyon m³'lük bir heyelan oluşmuştur (Şekil 2a). İnşaat aşamasında kuzey şevlerinde duraysızlıklar meydana gelmesiyle beraber 2Y:1D olan şev kazı şevi geometrileri 3Y:1D düşey olarak tekrar projelendirilerek inşaatı tamamlanmıştır. MTO'nun Deliçay mevki ve Gözne Viyadüğünün bulunduğu kilometrelerde farklı tarihlerde heyelanlar meydana gelmiştir.

Deliçay heyelanının olduğu alanın 21 Ekim 2011 tarihli alınmış uydu görüntüsünde çok az bir deformasyon gözükürken (Şekil 3a), 25 Mart 2013 tarihli uydu görüntüsünde daire yayı şeklinde bir gerilme çatlaklarının olduğu ve bu çatlakların drenaj kanalını da kırdığı (Şekil 3b), 13 Şubat 2014 tarihli uydu görüntüsünde de bu çatlakların genel bir dairesel kayma geometrisine dönüştüğü, ikincil ve üçüncül gerilme çatlaklarının meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3c). Bu tarihli uydu görüntüsüne göre bu oluşan deformasyonlardan dolayı bu kilometrelerdeki kazı şevi geometrisi kaybolmuştur. 10 Mart 2014 tarihinde 150 mm'lik bir yağışın arkasından 500000 m³'lük bir heyelan meydana gelmiş ve otoyol ulaşımına kapanmıştır (Şekil 3d ve Şekil 4a).

MTO Gözne viyadüğünün bulunduğu kısımda da önce gerilme çatlakları oluşmuş (Şekil 4b'de 1 nolu resim) ve 15 Şubat 2015 tarihinde 100 mm'lik bir sağanak yağışın arkasından ilk duraysızlık meydana gelmiştir. Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen iyileştirme çalışmalarından sonra otoyol trafiğe açılmıştır. MTO'nun bu kilometresinde Gözne viyadüğünün ayaklarının bulunduğu kısımlar derin kazıklarla, şevin diğer kısımları ise 3Y:1D olacak şekilde kontrollü dolgu yapılarak iyileştirilmiştir. MTO'nu bu kısımda 29 Aralık 2016 tarihinde bölgede meydana gelen sağanak yağmurların arkasından (100 mm) tekrar bir duraysızlık problemi meydana gelmiştir (Şekil 4b'de 3 nolu resim).



Şekil 3. MTO Deliçay heyelanının oluştuğu bölgenin a) 21 Ekim 2011 tarihli uydur görüntüsü, b) 25 Mart 2013 tarihli uydur görüntüsü, c) 13 Şubat 2014 tarihli uydur görüntüsü ve d) 10 Mart 2014 tarihinde oluşmuş heyelana ait resim.



Şekil 4. MTO Deliçay heyelanı (a) ve Gözne viyadüğü heyelanı (b) alanındaki yüksek geçirgenlikli seviyeler.

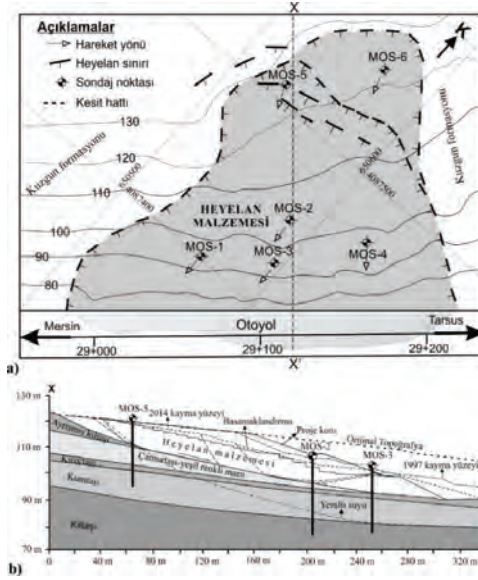
4.2. Duraysızlıkların Türü ve Mekanizması

MTO'nun kuzey kazı şevlerinde farklı tarihlerde oluşan kütle hareketlerinin tamamı, Varnes (1978)'e göre dairesel başlayıp düzlemsel olarak devam etmiş kompleks bir kayma olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme yapılırken, MTO'nun kuzey şevlerinde oluşan heyelanların oluşum geometrisi (Şekil 3), gerilme çatlakları ve heyelan kütesinin diğer özelliklerinden yararlanılmıştır (Heyelanın taç kısmının geometrisi, çökme, kabarma ve çökme bölgesine yakın kısımda dönme hareketi ile heyelan gölü). MTO'nun kuzeyindeki kazı şevlerinde meydana gelen duraysızlıklar, Zaruma ve Mencul (1969)'a göre derin-çok derin olarak değerlendirilmiştir.

MTO'nun Deliçay ve Gözne Viyadüğü kesimlerinde oluşan heyelanların mekanizmasının açıklanması amacıyla farklı tarihli uydur fotoğrafları, topoğrafik haritalar, arazi gözlemleri ve 6 adet araştırma sondajına tesis edilen inklinometre ölçümleri ile MTO Deliçay heyelan bölgesinden alınmış zemin örneklerinin indeks özellikleri beraber değerlendirilmiştir (Şekil 3, 4, 5, Çizelge 3 ve 4).

MTO Deliçay ve Gözne viyadüğü heyelanlarının arazi incelemelerinde, her iki heyelanın da kopma bölgelerinin alt kısımlarında kötü derecelenmiş oldukça iyi yuvarlaklaşmış silt ile blok boyutu çakıl içeren bir seviye belirlenmiştir (Şekil 4). Bu seviyenin üzerinde, Deliçay heyelanının olduğu alanda, kontrollü sıkıştırılmış dolgu yer almakta iken (Şekil 4a'da 2, 3 ve 4 nolu resim) Gözne viyadüğü heyelanının yer aldığı kesimde ise kalış biriminin devam ettiği belirlenmiştir (Şekil 4b'de 4 nolu resim). Yüksek geçirgenliğe sahip bu kesimlerden yoğun yağışlı dönemlerde gelen yüzey sularının kontrollü dolgu yapılarak sıkıştırılmış şev yüzeyinin gerisindeki bloklu alanlarda birikmesine yol açmıştır (Şekil 4b'de 3 nolu resim).

Deliçay heyelanının yer aldığı alana ait farklı tarihli uydu görüntülerinde (Şekil 3a, b ve c) görülen gerime çatlağının başlangıç konumu ile heyelan meydana geldikten sonra alınan resimdeki bu yüksek geçirgenliğe sahip alanlar (Şekil 3d ve Şekil 4a'da 1 nolu resim) çakışmaktadır. Şev yüzeyinin arkasında biriken su oldukça ayrılmış konumdaki kiltası-çamurtaş seviyelerinin kayma dayanımı parametrelerinin azalmasına neden olmuştur. Deliçay heyelanının hazırlanmış olan 1/1000 ölçekli mühendislik jeoloji haritası ve X-X' enine kesiti beraber değerlendirilerek kaymanın yönü ve derinliği de bu alanda tesis edilmiş inklinometre okumalarına göre belirlenmiştir (Şekil 5). İnklinometre ölçümlerine (MOS-3 nolu inklinometre) göre hareketin 26 metre derinliğinde bir yüzeyi ile 10. metredir ikincil bir yüzeyinin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. MTO Deliçay heyelanına ait mühendislik jeolojisi haritası (a) ve heyelan alanından X-X' yönünde oluşturulmuş enine kesiti (b)

5. SONUÇLAR

Arazi ve laboratuvar çalışmaları, araştırma sondajları ve bu araştırma sondajlarında gerçekleştirilen inklinometre okumaları ile beraber gerçekleştirilen kimyasal ve mineralojik çalışmalar beraber değerlendirildiğinde;

1) Deliçay ve Gözne viyadüğü heyelanlarının her ikisinin de ilerleyen çoklu dairesel tipte olduğu,

2) Heyelan malzemesinden alınan örneklerin kimyasal analizlerine göre (XRF sonuçlarına göre) %15 dolayında Al_2O_3 , %44 SiO_2 , %10 CaO ve %10 da Fe_2O_3 'den oluştuğu; XRD ile FTIR analizlerine göre de smektit, kaolen, illit, kalsit, kuvars ve karbonat içerdiği;

3) MTO kazı şevlerinde oluşan heyelanlar ile litostratigrafi birimlerinin eğim yönlerinin aynı olduğu ve kaymanın tabakalanma düzlemini takip ettiği;

4) MTO'da Kuzgun formasyonu içerisindeki aşınma düzlemlerinden (kaba çakıllı, kumlu bloklar tarafından doldurulmuş) aşırı yağışlı dönemlerde gelen sular, yüzeyi geçirimsiz hale getirilmiş olan kazı şevlerinde hidrostatik basınç oluşturarak heyelanların oluşmasında etkili olduğu sonuçlarına varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Azzoni, A., Chiesa, S., Frassoni, A., Govi, M., 1992. The Valpola landslide. *Engineering Geology*, 33:59–70.
- Cotecchia, F., Vitone, C., Santaloia, F., Pedone, G., Bottiglieri, O., 2015. Slope instability processes in intensely fissured clays: case histories in the Southern Apennines. *Landslides*, 12, 877-893.
- Estaban, M., Klappa, C. F., 1983. In: *Carbonate Depositional Environments* (P.A. Scholle, D.G. Bebout and C.H. Moore, Eds.). American Association of Petroleum Geologists 33, 1-96.
- Finlay, P.J., Fell, R., Maguire, P.K., 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal* 34:811–824.
- Hos, T., 1995. Tarsus Ayrımı-Mersin Otoyolundaki Yarma ve Dolguların Jeoteknik İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- İlker, S., 1975. Adana Baseni kuzeybatısının jeolojisi ve petrol olanakları. TPAO Arama Arşiv No: 973, 63 p, Ankara.
- Oh, S., Lu, N., 2015. Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes. *Engineering Geology*, 184, 96-103.
- Özgül, N., 1973. Torosların bazı temel jeoloji özellikleri. *Türkiye Jeoloji Kurum Bülteni*, 19-1, 65-78.
- Petrucci, O., Polemio, M., 2003. The use of historical data for the characterisation of multiple damaging hydrogeological events. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3:17–30.
- Rahimi, A., Rahardjo, H., Leong, 2010. Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure. *Engineering Geology*, 114, 135-143.
- Regmi, R. K., Jung, K., Nakagawa, H., Kang, J., 2014. Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall. *Catena*, 122, 27-41.
- Regmi, R. K., Jung, K., Nakagawa, H., Do, X. K., Mishra, B. K., 2017. Numerical analysis of multiple slope failure due to rainfall: Based on laboratory experiments. *Catena*, 150, 173-191.
- Schmidt GC (1961) Stratigrafic nomenclature for the Adana Region Petroleum District. VII Turkish Petroleum Administration Bull No 6, Ankara, pp 47–62.
- Şenol, M., Şahin, Ş., Duman, T.Y., Albayrak, Ş., Akça, İ. ve Taşkın Ş., 1998. Adana-Mersin dolayının jeoloji etüd raporu: 1/100.000 ölçekli Mersin O33 paftası. MTA, Rapor No:109098.
- Sidle, R.C, Swanston, D.N, 1982. Analysis of a small debris slide in coastal Alaska. *Can Geotech J* 19:167–174.
- Sitar, N., Anderson, S.A., Johnson, K.A., 1992. Conditions leading to the initiation of rainfall-induced debris flows. Stability and Performance of Slopes and Embankments -II. ASCE, New York, Geotech Eng Div Specialty Conf, pp 834–839.
- Taga, H., Türkmen, S., Kaçka, N., 2015. Assessment of stability problems at southern engineered slopes along Mersin-Tarsus Motorway in Turkey. *The Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 379-391.
- Tucker, M. E., 1991. *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. 260 p, Blackwell Science, Oxford.
- Tutkun, S.Z., 1984. Saimbeyli (Adana) yöresinin stratigrafisi. *Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, Yerbilimleri*, 1-1, 31-40.
- Yüksel Proje, 2014. Mersin-Tarsus Otoyolu Km: 28+980 – 29+220 Kesimi Stabilite Sorunları Geoteknik Proje Raporu, 30s., Ankara.
- Zaruma, Q. ve Mencul, V., 1969. *Landslides and their control*. 205 s., Elsevier, Amsterdam.

Adana İli Heyelan Duyarlılık Analizi Landslide Susceptibility Analysis of Adana City

M. Dizdar*, H. Üstüner

Adana İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü Yenibaraj Mahallesi 68017 Sk. No:2

(*melih.dizdar@afad.gov.tr)

ÖZ: Doğal afetler içerisinde önemli bir yere sahip olan heyelan; tarım ve orman alanları, yerleşim alanları, ulaşım yolları ve su kaynakları üzerinde olumsuz etkilere yol açarak, can kayıpları ve ekonomik zararlara neden olmaktadır. Adana ilinde heyelan zararlarını en aza indirmek, can ve mal kayıplarının önüne geçebilmek amacıyla heyelan bölgelerinin tespit edilmesi ve bu bölgelerdeki heyelan riskinin ortaya çıkarılması gerekmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada Frekans Oranı (FR) yaklaşım yöntemi kullanılarak Heyelan Duyarlılık haritalarının CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) destekli yazılımlarla üretilmesi amaçlanmıştır. Analiz aşamasında bölgeye ait yamaç eğimi, bakı, yükseklik, jeoloji ve yamaç eğriliği dikkat edilen 5 parametre olmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde Adana ili sınırları içerisindeki tüm bölgeler çalışma kapsamı içerisine alınmıştır. Yapılan heyelan analizi çalışmaları için Adana ilinde toplamda 36 paftada 150 heyelan bölgesi belirlenmiştir. Heyelan türlerine baktığımızda heyelanların ağırlıklı olarak kayma türünde yoğunlaştığı ve çoğul dairesel kayma şeklinde görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca heyelanların olduğu litolojik birimler incelendiğinde çamurtaşı, killi şist, şist, kil, silt gibi zayıf ve çok ince taneli birimlerde daha fazla gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumdan dolayı, yağıştan ve yeraltı suyundan daha fazla etkilenen litolojik birimlerde heyelanların görülme olasılığının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Yamaç şekillerine bakıldığında ise heyelan bölgelerinin içbükey yamaç türünde % 60, dışbükey yamaç türünde ise %40 seviyelerinde bulunduğu görülür. Oluşturulan parametrik analizler ortak bir çerçevede incelendiği zaman heyelanların en çok görüldüğü alanların yüksek kesimlerde, yamaç eğimi 40 derecelerin üstünde ve Adana ilinin Toros dağları boyunca uzanan kuzey ve kuzeybatı kesimlerinde daha çok görüldüğü tespit edilmiştir. Adana ilinde heyelan oluşma potansiyeli analiz sonuçlarına göre çok düşük ve düşük alanlar %32, orta derece alanlar %10 ve yüksek ve çok yüksek alanlar ise %48 seviyesindedir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Duyarlılık analizi, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri), Frekans Oranı Metodu, Adana.

ABSTRACT: Around natural disasters landslide that takes part on important role, causes death and economic damage by the way the damage on agricultural forest and city area and transportation way and water supply. To reduce the harm of landslide effect in the city of Adana the aim of prevention of death and economic harms, it's necessary to detect landslide areas and the risk on it. There for in this work by using frequency ratio approach production of landslide sensivity map is aimed by the support of GIS software. During analysis attentive that slope, aspect, height, geology and slope curvature are attentive parameters. Worked analysis whole areas in Adana city is counted in scope of work. For the landslide are study, 150 landslide area is determined in 36 quadrangles. When we look at the landslide types, it's detected that most common landslides are slide type and specially rotational slides. Also when we examine the litological parts that landslide; we can see that these areas within the include fine grained like mudstone clayey schist, schist, and clay. Because of this reason it's understood that the possibility of landslide is much more in the rainy and high ground water area. When we look at the shape of slope we can see that the are %60 of concave and %40 of the area are convex. When the determine whole parametric analysis in common platform, we can see the most landslide area around the Toros mountain in the North and northwest part of Adana that has 40 degree and more slope. Consequently, in Adana city, less potential areas has the degree of %32, middle potential one is the degree of %10 and the high and highest are has the level of %48.

Keywords: Landslide, sensivity analysis, GIS, Frequency ratio method, Adana.

1.GİRİŞ

Adana ili sınırları içerisinde meydana gelmiş heyelan olaylarının incelenerek Adana ili heyelan duyarlılık haritasının hazırlanması kapsamında yapılan çalışmadır. Bu çalışmayla Adana ilinin heyelan duyarlılık haritası oluşturularak, Adana ilindeki heyelan potansiyeline sahip bölgeler belirlenmeye çalışılmıştır.

Adana ili sınırları içerisinde meydana gelen ve gelmesi muhtemel heyelan bölgeleri, öncelikli olarak arşiv çalışması yapılarak geçmiş kayıtlardan bilgiler alınmıştır. Belirli tarihlerde araziye gidilerek arşiv kayıtlarında bulunan bilgiler ile müdürlüğümüzde bulunan sayısal veriler incelenip araziye envanter çalışmaları yapılmıştır. Analiz aşamasında kullanılan parametrelerden yamaç eğimi, bakı, yükseklik, jeoloji ve yamaç eğriliği envanter çalışmalarında dikkat edilen 5 parametre olmuştur. Bu parametrelerin seçilmesindeki amaç ilimizdeki heyelanlı alan sınırlarına ait bölgelerin doğru bir şekilde tespit edilmesi ve bu parametreler yardımıyla daha doğru bir duyarlılık analiz sonucu elde edilmesini hedeflenmiştir. Heyelan Duyarlılık Analizleri oluşturulurken Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında birçok yaklaşım örnekleri kullanılmakla birlikte, bu çalışmada Frekans Oranı (FR) yaklaşım yöntemi kullanılarak heyelan duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

2. HEYELAN DUYARLILIK ANALİZ PARAMETRELERİ VE ARAZİ ÇALIŞMALARI

2.1. Genel Jeoloji

İnceleme alanı Toros kuşağında, Ecemiş Fayı ile Yumurtalık Fayı arasında oluşur. Bu sınırlar içerisinde kalan Adana ili ve çevresi, ayırtman stratigrafisi, yapı ve kayatürü özellikleri açısından, aralarında belirgin ayrımlar bulunan, birbirleriyle tektonik dokanaklı değişik tektonostratigrafik birlikleri kapsar. Bolkar Dağı birliği, Devoniyen-Alt Tersiyer aralığından çökelmiş karbonat ve kırıntılı kayalar ile beraber olistostrom özellikli kayaları kapsar. Bozkır birliği, Triyas-Senoniyen aralığında çökelmiş kıta yamacı ve okyanus tipi kayalardan, şelf tipi kayalara kadar değişen farklı fasiyeler ve ortamları temsil eden istiflerle asidik tüf, bazik ve ultrabazik kayaları ve serpantinleri kapsar. Aladağ birliği, Devoniyen-Kretase aralığını temsil eden şelf tipi karbonat ve kırıntılı kayaları kapsar. Geyik Dağı birliği, Kambriyen-Erken Tersiyer aralığına ait karbonat ve kırıntılı kayaları kapsar. Görbiyes Dağı birliği, olasılıkla Jura-Geç Kretase aralığını temsil eden karbonat istifi ile olistolit ve olistostrom oluşukları kapsar. Görbiyes Dağı birliği düşük dereceli metamorfizma gösterir. Keban-Malatya birliği, Üst Paleozoyik-Alt Kretase yaş aralığına sahip, metamorfizma geçirmiş, ağırlıklı olarak platform türü metakırıntılı ve metakarbonatlarla temsil edilir. Misis-Andırın birliği, Kretase-Tersiyer zaman aralığında çökelmiş, melanj nitelikli ve volkanosedimanter fasiyeler özellikleri sunar. Örtü birimleri, Tersiyer-Kuvaterner aralığında çökelmiş sığ deniz çökelleri ile pelajik (derin deniz > 1000 m) çökellerden oluşur.

2.2. İklimsel Özellikler

Adana, Akdeniz iklim özelliklerini taşır. Yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlıdır. Bölgede meydana gelen yağışlar, genellikle yamaç yağışları ve gezici hava kütlelerinin karşılaşması ile oluşur. Ortalama yağış miktarı 625 mm dir. Yılın ortalama 74 günü yağışlı geçer. Yağışlar %51 kışın, %26 ilkbaharda, %18 sonbaharda, %5 yazın düşer. Yazın havanın nemle yüklü olmasına karşılık, bazı yıllarda hiç yağış düşmediği görülür. Yazın bir alçak basınç merkezi olan Çukurova'ya denizden ve Toroslardan hava akımı olur. Böylece dinamik nedenli bir yüksek basınç merkezi oluşur. Bir taraftan denizden gelen nemli hava, diğer taraftan barajlar ve ovanın sulanması nedeniyle nem artar. İklimin ve enlemin etkisiyle ısınan hava, birikim nedeniyle ağırlaştığı için yükselemez ve doyma noktasına ulaşamaz. Böylece yazın nem yüklü sıcak bir hava görülür. Ortalama nisbi nem %66 olmakla beraber, yazın %90'ın üzerine çıkar. 37 yıllık ortalama sıcaklık 18.7° C'dir. En soğuk ay ocak, en sıcak ay ağustostur. Ocak ayı ortalaması 9° C, ağustos ayı ortalaması 28° C'dir. Ovanın sıcak olmasına karşılık, ilin topraklarında yükselti ve yüzey şekillerine göre iklim şartları çok değişir. Yağışlarda da değişim görülür ve dağlık kesimde yağışlar doğal olarak fazladır.

2.3. Uzaktan Algılama (Hava Fotoğrafi-Uydu Görüntüleri) Çalışmaları

Arazide heyelanlı bölgeler tespit edilirken yararlanılan bir diğer yardımcı kaynakta Google Earth uydu görüntüleri olmuştur. Bu kapsamda araziye çıkılmadan önce Google Earth üzerinden heyelan afetinin olduğu bölge incelenmiş, analiz aşamasında doğru bir duyarlılık haritası sonucu vermesi açısından heyelan bölgesinin sınırları, kapladığı alan ve nereye kadar etkilediği uydu görüntüleri yardımı ile sağlanmıştır. Ayrıca Adana iline ait heyelanlı paftalar tespit edildikten sonra 1/25000 ölçekli renkli çıktılar alınmıştır. Bu paftalar üzerinde Müdürlüğümüzde bir ön çalışma yapılmış, heyelanlı bölgeler harita üzerinde işaretlenmiştir. Haritalarda dikkat edilen hususlar eş yükselti eğrilerinin nerelerde yoğunlaştığı, heyelanlı bölgelerin hangi yükselti eğrilerine denk geldiği, akarsu, dere vb. suyun olduğu bölgelerde heyelanların ne kadar bulunduğu gibi bilgiler bu harita yardımı ile işaretlenmiştir. Genel bir çalışma Müdürlüğümüzde tamamlandıktan sonra mevcut paftalar araziye de götürülerek yerinde incelenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda bir hata varsa yerinde gözlemlenerek düzeltilmiştir. Örneğin heyelan bölgesi dar veya geniş çizildiyse gerekli düzenleme yapılmış ya da heyelanın etkilediği bölgede konutlar var ise bu durumlara arazide daha dikkat edilmiştir.

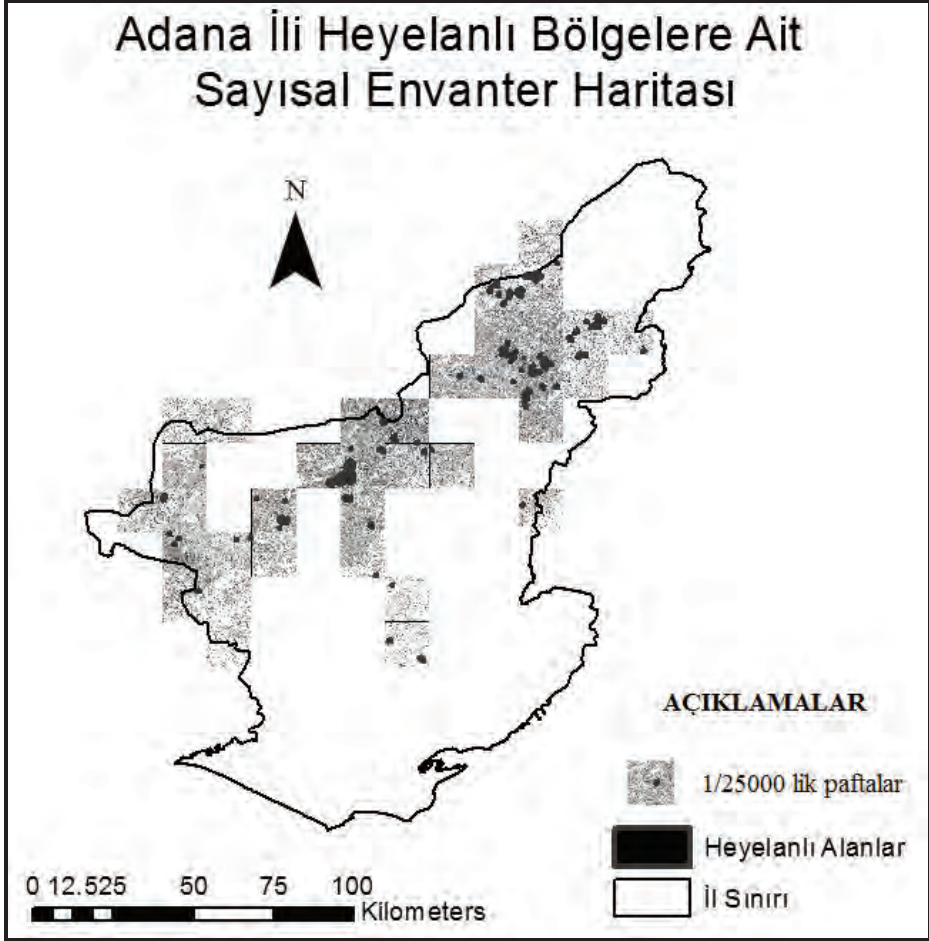
2.4. Envanter ve Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmalarına başlamadan önce Müdürlüğümüz bünyesinde bulunan geçmiş yıllarda meydana gelmiş heyelan afetlerine yönelik gerekli rapor, harita, kroki vb. belgeler teker teker incelenmiştir. Buna göre arazide envanter çalışması yapılacak afet bölgesine ait daha detaylı bilgi elde edilmiştir. Başkanlığımızın Müdürlüğümüze göndermiş olduğu MTA heyelan envanter bilgileri ile Müdürlüğümüz arşivinde bulunan envanter bilgileri kıyaslanmış ve bunun sonucunda ortak afet bölgeleri tespit edilerek, arazide gidilmesi ilk olarak önem arz eden yerler belirlenmiştir. Arazi çalışmaları, afet olayının olduğu yerde doğrudan sahada yapılacak çalışmaları kapsamakta olup, envanter çalışmalarının en önemli kısmını oluşturmaktadır. Bu amaçla Müdürlüğümüzde ilk olarak geçmiş afet raporlarına bakılmış ve krokilerin yardımı ile arazide heyelanlı bölgeler yerinde tespit edilmiştir. Eğer teyit edilmesi gereken bir durum oluşmuş ise heyelan bölgesine ait köy muhtarından bilgi alınmış, geçmiş dönemde afet esnasında o bölgede yaşamış kişilerin görüşlerine başvurulmuştur. Ayrıca Maden Tetkik Arama (MTA) kurumunun daha önceden Adana ilinde belirlediği heyelan bölgeleri de göz önünde bulundurulmuştur. Arazide elde edilen veriler sayısallaştırılarak, öznitelik verileri ile birlikte 1/25000 lik topografik haritalara işlenmiştir. Ayrıca her heyelan bölgesi için Heyelan Kayıt ve Zarar Formundaki bilgiler doldurularak, heyelanlı bölgelerin öznitelik bilgileri kayıt altına alınmıştır. Yerinde yapılan incelemeler neticesinde dağlarla çevrili olan Adana ilinin kuzey ve kuzey batısında yağış ve yeraltı suyu etkisi ile yüksek eğimdeki zayıf-ince taneli litolojiye sahip birimlerde heyelan olaylarının daha sık gözlemlenmesine sebep olmuştur. Adana ilinin Feke, Saimbeyli, Pozantı ve Kozan ilçelerinin genel olarak litolojisinin; killi-ıştılı birimler ihtiva etmesi ve inceleme alanlarının ortalama 35-45 derece eğim arasında bulunması sebeplerine yağış ve yeraltı suyu faktörlerinin eklenmesi ile bu bölgelerde heyelan olayına daha çok rastlanıldığı gözlemlenmiştir. Heyelan olaylarının tek jeolojik birimde gelişmesi ve söz konusu birimin de ince taneli ve zayıf malzemeden oluşması, yüzey eğim ve açılarının farklı yönlerde olması, oluşan heyelanın diğer bir heyelanı tetikleme gibi sebeplerle çoklu dairesel kayma tipli heyelanlara daha sık rastlanılmıştır.

2.5. Sayısal Envanter Haritasının Oluşturulması

Arazide elde edilen envanter bilgilerinden sonra diğer bir önemli aşama arazi sonucu oluşturulan bilgilerin doğru bir şekilde haritalanması olacaktır. Bunun için öncelikli olarak sayısallaştırma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının hazırlanmış olduğu AYDES programı üzerinde arazide elde edilen veriler 1/25000 lik topografik haritalara işlenmiştir. Sayısallaştırma işlemi sırasında heyelanlı bölgeye ait yükseklik, eğim, bakı vb. envanter bilgileri ile heyelanın türüne göre veriler kayıt altına alınmış ve görsel olarak heyelan bölgesinin daha anlaşılır olması açısından fotoğraflama işlemi gerçekleştirilip, heyelana ait tüm veriler sistem içerisine aktarılmıştır. Adana ilinde yapılan heyelan çalışması neticesinde toplam 36 paftada 150 heyelan sayısallaştırılmıştır. Heyelan türlerine baktığımızda heyelanların ağırlıklı olarak kayma türünde yoğunlaştığı ve çoğul dairesel kayma şeklinde görüldüğü tespit edilmiştir. Yamaç şekillerine

bakıldığında ise içbükey yamaç türünün %60 seviyelerinde, dışbükey yamaç türünün ise %40 seviyelerinde bulunduğu görülür. Heyelanların 35 - 40 derece eğimlerde, 2200-3500 metre yükseklikte ve 247,5 - 292,5 derece bakı değerlerinde fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Adana İlinde Heyelanlı Bölgelere Ait Sayısal Envanter Haritası.

2.6. Parametre Haritalarının Oluşturulması

Duyarlılık analizlerine başlamadan önce analiz sonunda daha doğru sonuç alabilmek ve duyarlılık haritasını etkin bir şekilde yorumlamak için öncelikli olarak parametre haritalarını Adana iline ait özelliklerin dikkate alınarak seçilmesidir. Bunun yanında parametre ve heyelan envanter haritalarının harita özelliklerinin de aynı olmasına dikkat edilmiştir. Adana ilinin genel durumu göz önüne alındığında; sayısal yükseklik modeli (sym), yamaç eğimi (slp), bakı (asp), eğrisellik (crv) ve litoloji parametreleri kullanılmıştır (Çizelge 1). Frekans oranı (FR), parametre alt grubundaki heyelanlı piksel sayısının, toplam heyelanlı piksel sayısına oranının (a) Eş. 1, parametre alt grubunun çalışma alanındaki piksel sayısına oranına (b) Eş. 2, bölünerek, Eş.3'teki gibi frekans oranı elde edilmektedir. Son olarak Eş. 4 kullanılarak normalize edilmiş frekans oranları hesaplanarak duyarlılık haritası elde edilmiştir.

Çizelge 1. Adana İli Parametre Değerleri

ASP(baki)	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT PİKSEL SAYISI	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT HEYELANLI PİKSEL SAYISI	a	b	FR	NFR
0	41	0	0.0000	0.00	0.00	0
1(0-22.5-337.5-360)	2021852	56817	0.0854	0.09	0.93	87
2(22.5-67.5)	2091257	64220	0.0965	0.09	1.02	95
3(67.5-112.5)	3075928	96191	0.1446	0.14	1.04	97
4(112.5-157.5)	3431616	101337	0.1523	0.16	0.98	91
5(157.5-202.5)	3410892	102199	0.1536	0.15	0.99	93
6(202.5-247.5)	2893214	86487	0.1300	0.13	0.99	92
7(247.5-292.5)	2903909	90704	0.1369	0.13	1.07	100
8(292.5-337.5)	2289689	67284	0.1011	0.10	0.97	91
TOPLAM	22018398	665239			1.07	
CRV(eğrimsellik)	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT PİKSEL SAYISI	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT HEYELANLI PİKSEL SAYISI	a	b	FR	NFR
<-1.0(1)	667335	36800	0.0953	0.03	1.83	95
-1.0-0.25(2)	3722544	169393	0.2546	0.17	1.51	78
-0.25-0.25(3)	13118039	251015	0.3773	0.60	0.63	33
0.25-1.0(4)	3890904	172015	0.2586	0.18	1.46	76
1.0<(5)	619576	36016	0.0541	0.03	1.92	100
TOPLAM	22018398	665239			1.92	
SLP(eğim)	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT PİKSEL SAYISI	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT HEYELANLI PİKSEL SAYISI	a	b	FR	NFR
0-5(1)	8548455	39224	0.0590	0.39	0.15	6
5-10(2)	2691627	53709	0.0807	0.12	0.66	25
10-15(3)	2521845	83004	0.1248	0.11	1.09	40
15-20(4)	2291920	107781	0.1620	0.10	1.56	58
20-25(5)	2128752	119240	0.1792	0.10	1.85	69
25-30(6)	1772580	112106	0.1685	0.08	2.09	78
30-35(7)	1163664	86341	0.1298	0.05	2.46	91
35-40(8)	494618	40263	0.0605	0.02	2.69	100
40-90(9)	304937	23571	0.0354	0.01	2.56	95
TOPLAM	22018398	665239			2.69	
SYM(yükseklik)	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT PİKSEL SAYISI	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT HEYELANLI PİKSEL SAYISI	a	b	FR	NFR
0-200(1)	9294829	27712	0.0417	0.42	0.10	4
200-400(2)	1985030	21395	0.0322	0.09	0.36	13
400-600(3)	889581	26510	0.0399	0.04	0.99	35
600-800(4)	1029186	67057	0.1008	0.05	2.16	77
800-1000(5)	1412228	112745	0.1695	0.06	2.64	94
1000-1200(6)	1319831	104681	0.1574	0.06	2.63	94
1200-1400(7)	1544116	100867	0.1516	0.07	2.16	77
1400-1600(8)	2010790	71690	0.1078	0.09	1.18	42
1600-1800(9)	1307143	50335	0.0757	0.06	1.27	46
1800-2000(10)	613107	35448	0.0533	0.03	1.91	68
2000-2200(11)	296305	20039	0.0301	0.01	2.24	80
2200-3500(12)	316252	26760	0.0402	0.01	2.80	100
TOPLAM	22018398	665239			2.80	
LİTOLOJİ	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT PİKSEL SAYISI	ÇALIŞMA ALANINDAKİ PARAMETRE ALTGRUBUNA AİT HEYELANLI PİKSEL SAYISI	a	b	FR	NFR
1	6939765	16690	0.0251	0.28	0.09	3
2	5285211	291533	0.4382	0.21	2.04	72
3	74146	0	0.0000	0.00	0.00	0
4	1465	0	0.0000	0.00	0.00	0
5	405275	903	0.0014	0.02	0.08	3
6	9858986	288831	0.4342	0.40	1.09	38
7	224650	17153	0.0258	0.01	2.83	100
8	17641	5	0.0000	0.00	0.01	0
9	623490	32325	0.0486	0.03	1.92	68
10	433919	0	0.0000	0.02	0.00	0
11	796662	17799	0.0268	0.03	0.83	29
TOPLAM	24661210	665239			2.83	

$$a = \frac{\text{Parametre Alt Grubundaki Heyelanlı Pıksel Sayısı}}{\text{Toplam Heyelanlı Pıksel Sayısı}} \quad (1)$$

$$b = \frac{\text{Parametre Alt Grubundaki Pıksel Sayısı}}{\text{Toplam Pıksel Sayısı}} \quad (2)$$

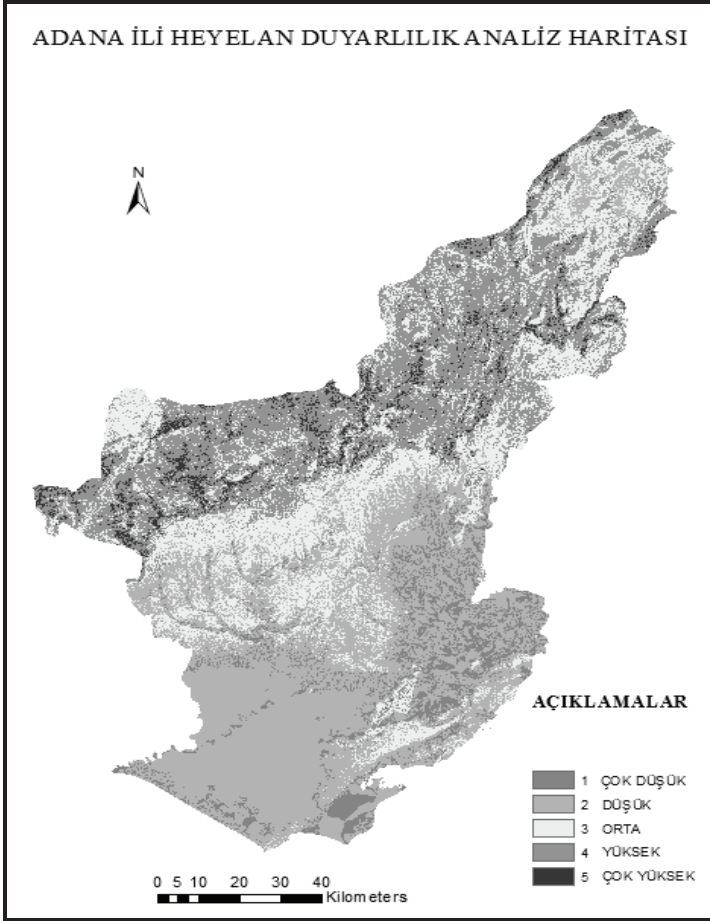
$$FR = \frac{a}{b} \quad (3)$$

$$NFR = \frac{100 \cdot FR}{MAX FR} \quad (4)$$

2.7. Duyarlılık Analizinin Yapılması

Adana iline ait heyelan alanlarının etki derecelerinin belirlenebilmesi ve ilerde oluşabilecek heyelanlara karşı önleyici tedbir alınması açısından CBS ortamında analiz edilen ve seçilen Frekans Oranı yöntemine göre hesaplaması yapılan heyelanların duyarlılık analizi çalışması yapılmıştır. Bu çalışma için yeniden sınıflandırması yapılmış parametrelerden yükseklik, eğim, baki, yamaç eğrimselliği ve litoloji kullanılmıştır. Ayrıca araziden elde edilen 150 adet heyelan envanterinden %20 si (30 heyelan bölgesi) sına için ayrılmış, %80 i (120 heyelan bölgesi) analiz için model olarak seçilmiştir. Bu ayrımları gerçekleştiren sına için ayrılan heyelanlarda dikkat edilen özellik hem heyelanların farklı yerlerden seçilmesi hem de farklı litolojik birimlere denk gelmesine dikkat edilmiştir. Analiz

öncesi hazırlanan duyarlılık parametreleri ve analize sokacağımız model verilerin tamamlanmasından sonra CBS ortamında duyarlılık parametreleri analize sokulmuştur. Analiz sonucu Adana ilinin kuzey ve kuzeybatı kesimlerinde heyelanların yoğunlaştığını, güney ve güneydoğu yönlerinde ise yer alan düzlük yerlerde heyelan duyarlılığının düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Adana ili duyarlılık haritası.

3. SONUÇLAR

Yapılan heyelan analizi çalışmaları için Adana ilinde toplamda 36 paftada 150 heyelan bölgesi belirlenmiştir. Çalışmaların arazi boyutunda analiz için gerekli olan envanter bilgileri toplanıp, heyelana ait bilgiler heyelan kayıt formuna işlenmiştir. Bunun yanında heyelan bölgelerine ait fotoğraflar çekilip AYDES ortamında kaydedilmiş ve heyelan bölgelerinin fotoğraf kataloğu oluşturulmuştur.

Heyelan türlerine baktığımızda heyelanların ağırlıklı olarak kayma türünde yoğunlaştığı ve çoğunlukla dairesel kayma şeklinde görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca heyelanların olduğu litolojik birimler incelendiğinde çamurtaşı, killi şist, şist, kil, silt gibi zayıf ve çok ince taneli birimlerde daha fazla gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumdan dolayı, yağıştan ve yeraltı suyundan daha fazla etkilenen litolojik birimlerde heyelanların görülme olasılığının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Yamaç

şekillerine bakıldığında ise heyelan bölgelerinin içbükey yamaç türünde %60, dışbükey yamaç türünde ise %40 seviyelerinde bulunduğu görülür.

Oluşturulan parametrik analizler ortak bir çerçevede incelendiği zaman heyelanların en çok görüldüğü alanların yüksek kesimlerde, yamaç eğimi 40 derecelerin üstünde ve Adana ilinin Toros dağları boyunca uzanan kuzey ve kuzeybatı kesimlerinde daha çok görüldüğü tespit edilmiştir.

Adana ili heyelan duyarlılık haritası oluşturulurken seçilen yöntem Frekans Oranı yöntemi olmuştur. Bu yöntem ve seçilen parametrelerin kullanımı sonucunda ulaşılan değerlerle birlikte, analiz sonucu elde edilen heyelan duyarlılık haritası karşılaştırıldığında doğru bir sonuç yaklaşımı olduğu görülür. Bu durum bize seçilen yöntemde doğruluğu hakkında bilgi vermektedir.

Adana ilinde heyelan oluşma potansiyeli analiz sonuçlarına göre çok düşük ve düşük alanlar %32, orta derece alanlar %10 ve yüksek ve çok yüksek alanlar ise %48 seviyesindedir. Heyelan duyarlılık haritası kullanılan alanları olarak; yeni yerleşim yeri seçimi işlemlerinde, maden araştırmalarında, HES ve baraj inşaatlarında ve karayolu, köprü, tünel, demiryolu gibi ulaşım çalışmalarına altlık olarak kullanılabilir.

4. KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın proje mimarı Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığına, uygulayıcısı Adana İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü çalışanlarına ve desteğini bizden esirgemeyen Çukurova Üniversitesi öğretim üyesi Sn. Tolga ÇAN ve Senem TEKİN'e teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR

- Ayhan, A., 1987. Kozan-Elmadağı (Adana ili) Arasının Jeolojisi (Doğu Toroslar-Türkiye). İstanbul Üni. Fen Bilimleri Enst. Jeoloji Müh. Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Bilgin, A.Z., Elibol, E., Bilgin, Z.R. ve Beğenilmiş, S., 1981. Ceyhan-Karataş-Yumurtalık- Osmaniye-Haruniye-Kadirli Dolayının Jeoloji Raporu: MTA Rap: No: 7215. Demirtaş, R., 1998, 27 Haziran 1998 Ceyhan-Misis Depreminde Sıvılaşma. J.M.O. Bülteni, Sayı.98/3, ANKARA.
- Kop, A., 2003. Gökçeköy-Kışlak-Menkez-Akdam (D-KD Aladağ, ADANA) Dolayının Tektono-Stratigrafisi ve Yapısal Evrimi, Çukurova Üni. Fen Bilimleri Enst. Jeoloji Müh. Anabilim Dalı, Doktora Tezi., 311 sayfa. ADANA.
- Metin, S., 1984. Doğu Toroslar'da Derebaşı (Develi)-Armutalam ve Gedikli (Saimbeyli) Köyleri Arasının Jeolojisi: İstanbul Üni. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, Cilt 4, Sayı: 1-2, Sayfa: 45-66.
- Özgül, N., 1976. Toroslar'ın Bazı Temel Jeoloji Özellikleri: TJK Bülteni, C: 19, Sy: 65-78.
- Özgül, N., 1971. Orta Toroslar'ın Kuzey Kesiminin Yapısal Gelişiminde Blok Hareketlerinin Önemi: TJK Bült., 14, sayfa 75-87.
- Özgül, N., Metin, S., Göğer, E., Bingöl, İ., Baydar, O. ve Erdoğan, B., 1973. Tufanbeyli Dolayının (Doğu Toroslar-Adana) Kambriyen-Tersiyer Kayaları: TJK Bülteni, Cilt: 16, Sayfa: 82-100.
- Özgül, N. ve Kozlu, H., 2002. Kozan-Feke (Doğu Toroslar) Yöresinin Stratigrafisi ve Yapısal Konumu İle İlgili Bulgular. TPJD Bülteni, Cilt 14, Sayı 1, Sayfa 1-36.
- Şenel, M., 1999. Toros Kuşağındaki Yapısal Birimlerin Stratigrafik ve Yapısal Özellikleri, Bu Birimlerin Yeniden Tanımlanması. 52. TJ Kurultayı Bildiriler Kitabı, Sayfa 376378.
- Şenel, M., 2003. Toros Kuşağının Tektonik Birlikleri ve Bunların Korelasyonu. 56. TJ Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, Sayfa 307-308.
- Uçar, L., 1997. Gülek-Pozantı-Kamışlı Alanının Jeolojisi. ÇÜ Doktora Tezi ADANA.
- Usta, D., Şenel, M., Metin, Y., Bedi, Y., Vergili, Ö., Usta, M., Balcı, V., Kuru, K., Tok, T., Özkan, M.K. ve Kop, A., 2004. TJK Bildiri Özleri, Sayfa, 275.
- Yaşar, A., Abasikeleş, G. ve Yalçın, N., 1999. Adana İlinin Arazi Kullanım Potansiyeli, MTA Rap. No: 10239.
- Yetiş, C. ve Demirkol, C., 1986. Adana Baseni Batı Kesiminin Jeoloji Etüdü. MTA Rap. No: 8037.
- Yılmaz, A., Bedi, Y., Uysal, Ş., Yusufoglu, H., Atabey, E., ve Aydın, N., 1992. Doğu Toroslar'da Uzunayla ile Beritdağı Arasının Jeolojisi, MTA Jeoloji Dairesi Rap. No: 389.

Hopa (Doğu Karadeniz) Bölgesi Heyelan Olay Envanter Haritası ve Yağış Şiddet İlişkisi

Rainfall Intensity - Duration Relationship and Event Landslide Inventory of Hopa (Eastern Black Sea) Region

T. Çan^{1,*}, T. Duman²

¹Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü 01330 Adana

²Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Farabi Sk. 40/4, 06690 Çankaya/Ankara
(*tolgacan@cukurova.edu.tr)

ÖZ: Artvin ili Hopa ilçesinde 24 Ağustos 2015 tarihinde aşırı yağışların tetiklemesi sonucu çok sayıda heyelan meydana gelmiştir. Bölge geneli için büyük ölçekli haritaların olmaması meydana gelen heyelanların poligon olarak haritalanmasını sınırlandırmaktadır. Bu çalışmada Google Earth görüntüsü üzerinden 180 km²'lik bir alanda büyüklüğü 30 m² ile 18000 m² arasında değişen 1216 adet heyelan haritalanmıştır. Meydana gelen heyelanların büyük çoğunluğu sıg toprak akması tipinde gelişmiştir. Hopa meteoroloji istasyonundan elde edilen saatlik yağış verilerine göre günlük toplam 199.4 mm'lik yağışın önemli bir bölümü iki farklı zamanda 18.36-27.12 mm/saat yağış şiddeti etkisi altında gerçekleşmiştir. Olay envanter haritasında heyelanların alansal dağılımı ile sıklık arasında ilişkiler değerlendirildiğinde ise olasılık yoğunluğunun üç parametrelili ters gama dağılımına uygun olduğu belirlenmiştir. Buna göre, literatürde tam olay envanter haritaları ile uyumlu olarak en yüksek olasılık yoğunluğu 1.47x10⁻³ km², küçük ölçekli heyelanları kontrol eden değerin -1.0x10⁻⁵ km², büyük ve orta ölçekli heyelanları kontrol eden eğrinin eğim değeri ise 2.02 bulunmuştur. Doğu Karadeniz bölgesinde heyelanlardan kaynaklanan zararların azaltılmasında olay envanter haritalarının yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri aracılığı ile sistematik olarak haritalanması ve yağış şiddet-süre ilişkileri ile değerlendirilmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: olay heyelan envanteri, heyelan yağış şiddet-süre, heyelan alan-sıklık dağılımı.

ABSTRACT: Numerous landslides were triggered by heavy rainfall recorded on 24th of August 2015 around the Hopa county of the Artvin city. The deficiency of the large scale base maps for the entire region does not permit to delineate the landslides by polygon features. In this study 1216 landslides ranging between 30 m² and 18000 m² were mapped onto the Google Earth image of 182 km². Most of the landslides were occurred in the form of shallow earth flows. According to the hourly rainfall data the considerable amount of the total daily rainfall of 199.4 mm were took place into two different time spans with rainfall intensities of 18.36 mm/hr and 27.12 mm/hr. The frequency-size statistics of the event landslide inventory revealed that the probability density is suitable with three parameters inverse gamma distribution. In accordance with the complete landslide inventories in the literature 1.47x10⁻³ km² for the location of the maximum probability, 1.0x10⁻⁵ km² for the exponential roll over of the small scale landslides and 2.02 power-law decay for the medium to large scale landslides were found. In order to reduce the adverse effects of landslides in the eastern Black Sea region event landslide inventories should be prepared systematically with the aid of high resolution satellite images and rainfall intensity duration relationships should be evaluated.

Keywords: Event landslide inventory, landslide rainfall intensity duration, landslide size-frequency distribution

1. GİRİŞ

Ülkemizin jeolojik yapısı ve coğrafi özellikleri nedeniyle heyelan olayları sıkça yaşanmakta ve çoğu kez aynı bölgede tekrarlanarak doğal afete dönüşmektedir. Karadeniz bölgesi ülkemizde heyelanların en sık ve yoğun gözleendiği 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.

Heyelanların yol açtığı kayıplara karşı etkili mücadele belirli bir bölgede heyelanları kontrol eden ve meydana getiren çevresel değişkenlerin sağlıklı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Bu anlamda güvenilir heyelan envanter haritaları heyelanların mekansal dağılımı, tipi, tekrarlanma aralıkları ve istatistiksel değerlendirmelerine açıklık getirmekle birlikte, heyelan duyarlılık, olası tehlike ve risk değerlendirmelerinde en önemli ve en temel ihtiyacı oluşturmaktadır (Çan vd. 2008). Tekil heyelanlarla ilgili tarihsel veri kayıtlarının derlenmesiyle yapılan heyelan haritaları “heyelan arşiv envanteri” olarak isimlendirilmektedir. Heyelan envanter haritaları, belli bir tetikleme süreci ayırt edilmeksizin geçmişte oluşmuş ve yapıldığı tarih itibarı ile morfolojilerini koruyan, tüm heyelanları gösteriyorsa “tarihsel heyelan envanteri” olarak isimlendirilmektedir. Farklı tarihlerde çekilmiş hava fotoğraflarından yararlanılarak üretilen envanter haritaları ise “çok zamanlı heyelan envanter haritası” olarak isimlendirilmektedir. Aşırı yağış, kar erimesi ve deprem gibi belli bir tetikleyici faktör sonucu meydana gelmiş heyelanların gösterildiği haritalar ise “olay heyelan envanteri” olarak tanımlanmaktadır (Guzzetti vd., 2012).

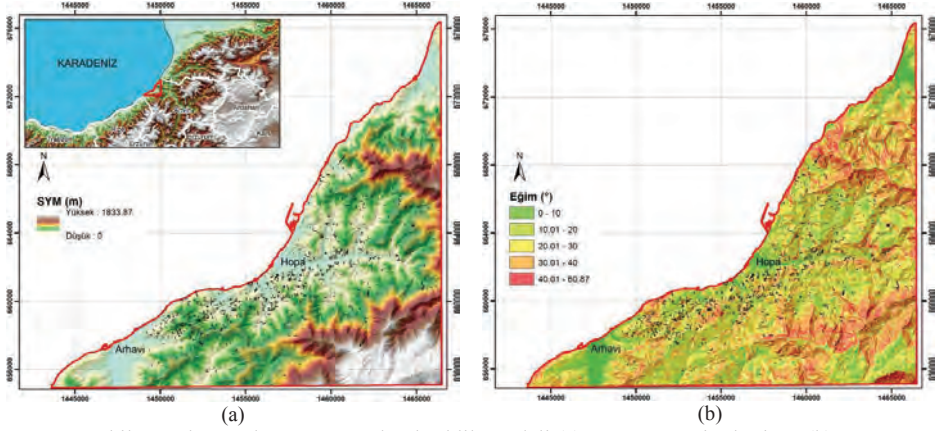
Akma, kayma, düşme ve devrilme gibi farklı hareket mekanizmasında gelişen heyelanlar bölgesel olarak belirgin jeolojik, morfolojik ve fiziksel faktörlerin kontrolü altında meydana gelmektedir. Heyelanı oluşturan birim (toprak, moloz veya kaya kütlesi), hareket eden kütleli alansal ve hacimsel büyüklüğü, heyelanın hızı, çalışma alanının büyüklüğü ve çalışılan harita ölçeği gibi faktörler heyelanlara karşı yapılacak çalışmalarda göz önünde bulundurulması zorunlu ve sınırlayıcı etkilere sahiptir. Bu anlamda Karadeniz bölgesi içinde de heyelan tipleri ve alansal büyüklükleri farklılık göstermektedir. Batı ve Orta Karadeniz bölgesinde (jeolojik faktörler) genellikle alansal olarak büyük kayma türü heyelanlar gözlenirken, Doğu Karadeniz bölgesinin kıyı kuşağı boyunca daha küçük ölçekli kaymalar ve daha sık olarak akma türü heyelanlar meydana gelmektedir. Doğu Karadenizin iç bölgelerinde ise özellikle Çoruh ve Kelkit nehirleri boyunca büyük ölçekli heyelanlar gözlenmektedir (Duman vd., 2007a, 2007b; 2009). 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 sistemi, ulaşım ağının kontrolsüz yüzey drenaj sistemi oluşturması, heyelanların oluşumunu hazırlayan ve tetikleyen faktörlerin başında gelmektedir (Çan vd., 2017).

Hopa ilçesi ve çevresinde 24 Ağustos 2015 tarihinde meydana gelen sel ve heyelan olayları sonucu 8 kişi yaşamını yitirmiş ve önemli ekonomik kayıplar meydana gelmiştir. Bu çalışmada bölgedeki mevcut heyelan veritabanları değerlendirilmiş ve 24 Ağustos 2015 tarihinde aşırı yağışların tetiklemesi sonucu oluşan heyelanlar Google Earth görüntüsü üzerinde sayısallaştırılarak bölgenin olay envanter haritası hazırlanmıştır. Daha sonra olay envanter haritasındaki heyelan alanlarının sıklık ilişkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Son olarak günlük ve saatlik yağış verileri dikkate alınarak heyelan yağış şiddet süre ilişkileri araştırılmıştır.

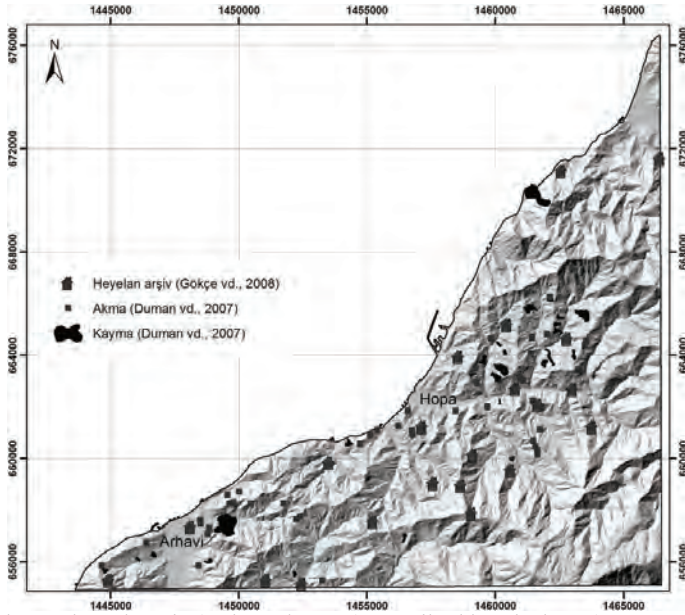
2. ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı Artvin ili Hopa ve Arhavi ilçeleri kıyı kuşağını kapsamaktadır. Çalışma alanının yükseklik değerleri en fazla 1833 m'ye ulaşmaktadır. 350 m'den daha yüksek alanlar çalışma alanının %50'sini oluşturmaktadır (Şekil 1a). Çalışma alanında yamaç eğimleri 60 dereceye kadar ulaşmakta olup, 20 derecenin üzerindeki yamaçlar çalışma alanının %73'ünü oluşturmaktadır (Şekil 1b). Çalışma alanı içerisinde Gökçe vd., (2008) tarafından hazırlanan heyelan arşiv kayıtlarına göre yerleşim birimlerini etkileyen değişik tarihlerde toplam 44 adet bölgesel heyelan olayı gerçekleşmiştir (Şekil 2). Bununla birlikte bölgede aşırı yağışların tetiklemesi sonucu oluşan heyelanlar, alansal olarak küçük olmasından ve kırsal yerleşim alanlarında 1:25000'den büyük ölçekli altlık haritaların olmaması klasik yöntemler ile heyelan envanter haritalarının haritalanmasını sınırlandırmaktadır. MTA Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Türkiye Heyelan Envanter veritabanında, bölgedeki küçük ölçekli heyelanlar, ülke genelinde kullanılan en büyük harita ölçeği olan 1:25000 ölçekli topoğrafik haritalarda ancak çizgi veya nokta şeklinde vektör veriler ile gösterilebilmektedir (Çan vd., 2005a; 2005b, 2013, Duman vd., 2005, 2011). Bu durum Doğu Karadeniz bölgesinde heyelan envanter haritası baz alınarak yapılan çalışmaları önemli ölçüde kısıtlamaktadır (Çan vd., 2005b). Duman vd., (2011)'e göre Türkiye Tarihsel Heyelan Envanter veritabanında 45 adet akma, toplam alanı 2.03 km² olan 25 adet kayma türü heyelan haritalanmıştır (Şekil 2). Tarihsel ve arşiv heyelan envanter verileri risk azaltma çalışmalarına hedef bölgeleri göstermekle birlikte, risk azaltma çalışmalarının

güvenilirliğini ve doğruluğunu artıracak olan olay envanter haritalarının düzenli olarak hazırlanması bölge açısından son derece önemlidir.



Şekil 1. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli (a) ve yamaç eğim haritası (b).

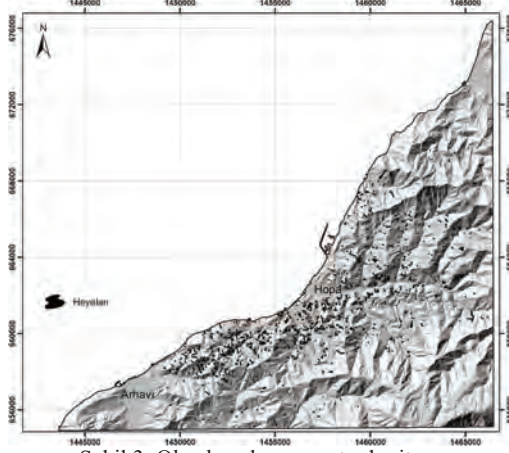


Şekil 2. Çalışma alanında arşiv (Gökçe vd., 2008) ve tarihsel heyelanların (Duman vd., 2007a) mekansal dağılımı.

3. 24 AĞUSTOS 2015 TARİHLİ OLAY HEYELAN ENVANTER HARİTASI

Artvin ili Hopa ilçesinde 24 Ağustos 2015 tarihinde aşırı yağışların tetiklemesi sonucu Google Earth görüntüsü üzerinde, 180 km²'lik bir alanda, büyüklüğü 30 m² ile 18000 m² arasında değişen 1216 adet heyelan haritalanmıştır (Şekil 3). Heyelanların toplam alanı 1243300 m² ortalama heyelan büyüklüğü ise 1021.6 m² olarak hesaplanmıştır. Meydana gelen heyelanların büyük çoğunluğu sıg toprak akması tipinde gelişmiştir (Şekil 4). Heyelanlar mekansal olarak kıyı kuşağı boyunca dağılım göstermekte

olup, yükseklik değerlerine göre heyelanların % 80'i 350 m'nin altındaki yükseklik değerlerinde yer almaktadır. 15°-35° yamaç eğimi aralıklarında arasında ise heyelanların % 77'si yer almaktadır (Şekil 5).



Şekil 3. Olay heyelan envanter haritası.

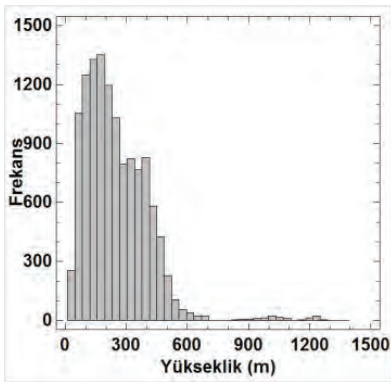


(a)

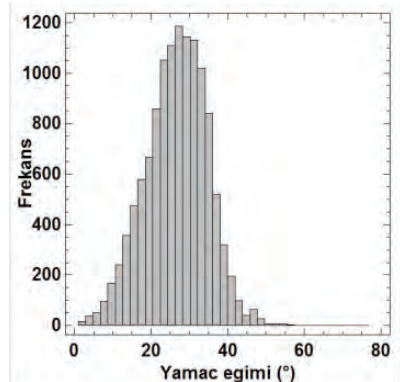


(b)

Şekil 4. Heyelanların ormanlık sahalarda (a), yerleşim ve tarım (b) arazilerinde meydana getirdiği zararlar.



(a)



(b)

Şekil 5. Heyelanlı alanların yükseklik (a) ve yamaç eğimi değerlerine (b) göre dağılımı.

3.1. Heyelan alansal büyüklük-sıklık ilişkileri

Deprem, sel ve heyelan olaylarının büyüklük-sıklık ilişkileri güç yasası (power law) dağılımlarına uyumlu olduğu gözlenmiştir (Malamud vd., 2004; Malamud ve Turcotte, 1999; 2006). Belirli bir alansal büyüklükten itibaren heyelanlar negatif güç yasası bileşeni sunmaktadır (Malamud vd., 2004; Van den Eeckhaut vd., 2007). Malamud vd., (2004) aşırı yağış, deprem ve hızlı kar erimesi tetiklemesi sonucu Guatemala, Kaliforniya ve İtalya'da hazırlanan tam heyelan olay envanter haritalarında heyelanların sıklık alansal büyüklük ilişkilerinin aynı olasılık yoğunluk fonksiyonu ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışma kapsamında Hopa bölgesinde elde edilen heyelan olay envanter haritasının alansal büyüklük-sıklık ilişkisi araştırılarak Malamud vd., (2004) tarafından önerilen genel dağılım fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır. Olay heyelan envanterinin olasılık yoğunlukları, $(p(A_L))$, Eşitlik 1 ve olasılık yoğunluk fonksiyonları $(p(A_L; \rho, a, s))$ ise Eşitlik 2 kullanılarak değerlendirilmiştir.

$$p(A_L) = \frac{1}{N_{LT}} \frac{\delta N_{CL}}{\delta A_L} \quad (1)$$

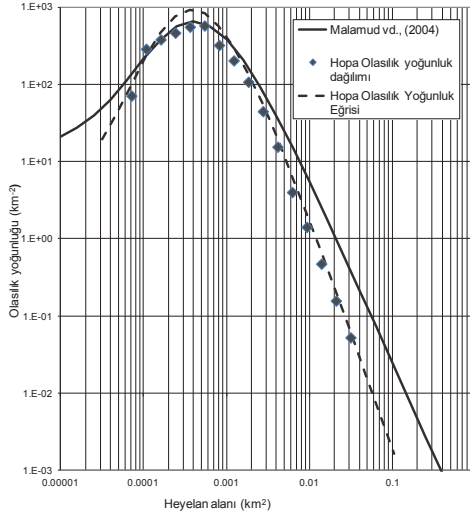
burada N_{LT} envanterdeki toplam heyelan sayısını, δN_{CL} ise belirli heyelan alan (A_L) aralıklarındaki toplam heyelan sayısını ifade etmektedir.

Üç parametrelili ters gama olasılık yoğunluk fonksiyonu ise $p(A_L; \rho, a, s)$ Eşitlik 2'deki gibi ifade edilmektedir.

$$p(A_L; \rho, a, s) = \frac{1}{a \Gamma(\rho)} \left(\frac{a}{A_L - s} \right)^{\rho+1} \exp\left(-\frac{a}{A_L - s} \right) \quad (2)$$

Burada A_L heyelan alanını, dağılımdaki ρ orta ve büyük alanlı heyelanlar için negatif güç yasası parametresini, a olasılık yoğunluk fonksiyonundaki en büyük değer lokasyonunu, s parametresi ise küçük alanlı heyelanlar için üstel azalmayı, $\Gamma(\rho)$ ise ρ değerinin gama fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Malamud vd., 2004).

Çalışma alanı içinde hazırlanan heyelan envanter verileri Eşitlik 1 kullanılarak sırasıyla heyelan alansal büyüklüğü ile olasılık yoğunluk değerleri ve Eşitlik 2 ile olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplanmıştır. Hopa olay heyelan envanter haritası uygun gamma eğrisinin parametreleri çalışma alanı için $a=1.47 \times 10^{-3} \text{ km}^2$, $s=1.0 \times 10^{-5} \text{ km}^2$, $\rho=2.02$ olarak bulunmuştur (Şekil 6).



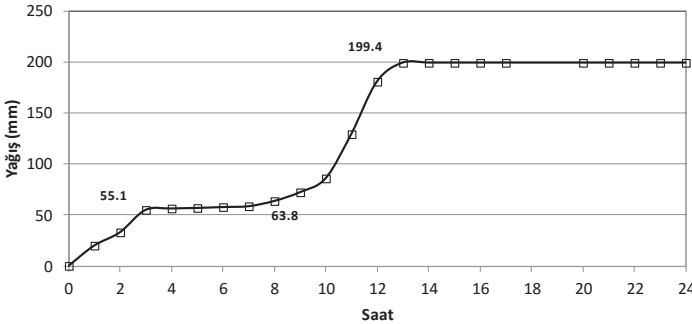
Şekil 6. Hopa olay heyelan envanteri olasılık yoğunluk dağılımı (siyah noktalar) ve olasılık yoğunluk fonksiyonu eğrisi (kesikli eğri). Düz çizgi Malamud vd., (2004) tarafından üç adet olay heyelan envanteri için genel üç parametrelili ters gama olasılık yoğunluk fonksiyonu eğrisini ($a=1.28 \times 10^{-3} \text{ km}^2$, $s=-1.32 \times 10^{-4} \text{ km}^2$, $\rho=1.40$) göstermektedir.

Şekil 6'da Hopa olay envanteri ile üç olay envanteri ile genelleştirilmiş olasılık yoğunluk fonksiyonlarında olduğu gibi güç yasası dağılımına uygun davranış gösterdiği belirlenmiştir. Olasılık yoğunluk dağılımının orta ve büyük ölçekli heyelanları kontrol eden negatif güç yasası bileşeni için 2.02 olarak daha yüksek bir eğim değeri bulunmuştur. Değişik bölgelerde yapılan envanter çalışmalarında da benzer küçük farklılıklar ile karşılaşmıştır (Turcotte vd., 2006; Van den Eeckhaut vd., 2007; Guzzetti vd., 2008). Elde edilen frekans sıklık ilişkileri bölgede yapılacak heyelan olası tehlike değerlendirmelerinde heyelan alansal büyüklük ilişkilerinin tanımlanmasında önemli bir veri olarak kullanılabilir.

3.2. Heyelan yağış şiddeti ve süre ilişkileri

Doğu Karadeniz bölgesi Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgesi olup, yıllık yağış miktarı 2350 mm'ye kadar yükselmektedir. Hopa ilçesi standart sürelerde yapılan ölçümler arasında 5, 10, 15 ve 30 dakikalık yağış değerlerinde sırasıyla 50.5, 60.6, 70.7, 90.9 mm değerleri ile Türkiye maksimum yağış şiddet değerlerine sahiptir (Ulupınar vd., 2015). 24 Ağustos 2015 tarihinde, günün erken saatlerinden itibaren etkisini arttırmaya başlayan yağışlar öğleye kadar 199.4 mm günlük toplam yağış değerine ulaşarak sel ve taşkınlar yol açmıştır (Şekil 7). Beraberinde çok sayıda heyelanın tetiklenmesi ile birlikte bölgede büyük bir afet meydana gelmiştir. (Ulupınar vd., 2015).

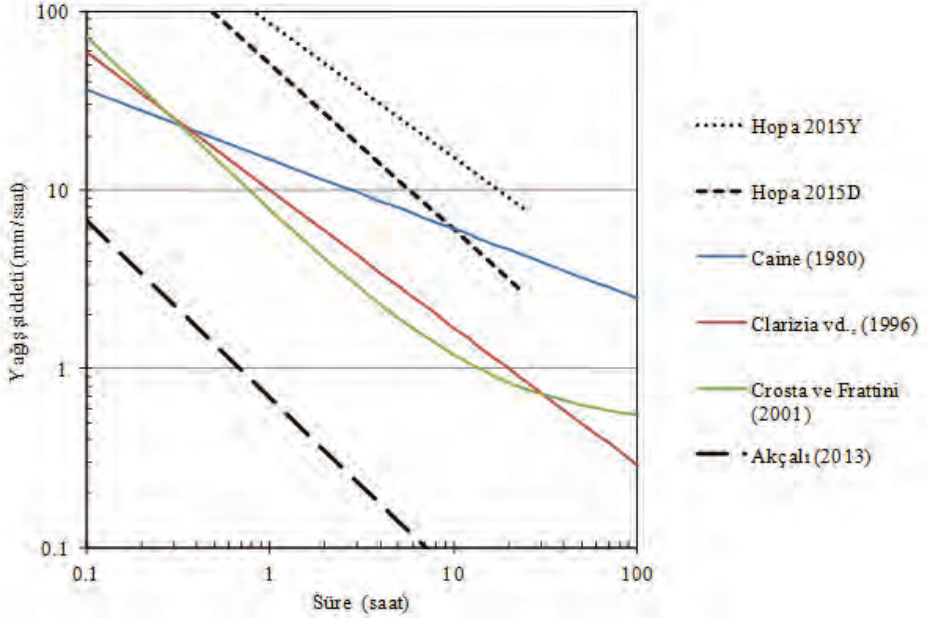
Heyelanları tetikleyen faktörler genel olarak deprem, hızlı kar erimesi ve aşırı yağışlar olarak bilinmektedir. Doğu Karadeniz bölgesinde heyelanlar genellikle bölgesel olarak kısa süreli ani yağışlar sonucu gelişmektedir. Bu nedenle heyelan yağış şiddeti-süre ilişkileri için o sahayı temsil eden yakınlıkta meteorolojik verilerin mevcut olması gerekmektedir. Heyelanları tetikleyen yağış olayları iklim değişkenleri yanısıra bölgenin hidrolojik, jeolojik, morfolojik ve arazi kullanımı gibi değişkenlerine bağlı olarak da değişmektedir. Bu açıdan heyelan yağış şiddet-süre ilişkileri için küresel, bölgesel ve lokal ölçekte olmak üzere çok sayıda görgül eşitlikler üretilmiştir (Guzzetti vd., 2007). Bu çalışmada Caine (1980), Clarizia vd., (1996) ve Crosta ve Frattini (2001)'in küresel ölçekte ve Trabzon ili için Akçalı ve Erman (2013) tarafından önerilen heyelan yağış şiddet eşik değerleri 24 Ağustos 2015 tarihinde Hopa'da meydana gelen yağış olayları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 1, Şekil 8). 24 Ağustos 2015 tarihinde 199.4 mm lik toplam yağış değerleri 3 ve 5 saatlik iki ayrı zaman diliminde sırasıyla 18.36 ve 27.12 mm/saat yağış şiddetinde gerçekleşmiştir. Hopa yağış değerlerinin global ve Trabzon ili yağış şiddet-süre ilişkisi ile karşılaştırıldığında Hopa yağış şiddet-süre ilişkisinin en yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 7. 24 Ağustos 2015 günü saatlik birikimli yağış değerleri.

Çizelge 1. Küresel, Trabzon ili ve bu çalışmadan elde edilen yağış şiddet süre eşitlikleri.

Kaynak	Yağış Şiddeti, (mm/saat)	Süre, S (Saat)
Hopa 24 Ağustos Yüksek	$Y\dot{S}=85.84xS^{-0.75}$	$0.1<S<24$
Hopa 24 Ağustos Düşük	$Y\dot{S}=50.96xS^{-0.93}$	$0.1<S<24$
Akçalı ve Erman (2013)	$Y\dot{S}=0.69xS^{-0.99}$	$0.2<S<1000$
Crosta ve Frattini (2001)	$Y\dot{S}=0.48+7.2xS^{-1.00}$	$0.1<S<1000$
Clarizia vd., (1996)	$Y\dot{S}=10.0xS^{-0.77}$	$0.1<S<1000$
Caine (1980)	$Y\dot{S}=14.82xS^{-0.39}$	$0.167<S<500$



Şekil 8. Küresel ölçekte (Caine 1980; Clarizia vd., 1996; Crosta ve Frattini 2001), Trabzon ili (Akçalı ve Erman 2013) ve 2015 Hopa için elde edilen heyelan yağış-şiddet süre ilişkileri.

4. SONUÇLAR

Bir bölgedeki heyelanların tipi, mekansal dağılımı ve oluşum sıklığı heyelanlara neden olan hazırlayıcı ve tetikleyici faktörlere bağlı olarak gerçekleşmektedir. Yapılan çalışmada Hopa ilçesi çevresinde 24 Ağustos 2015 tarihinde günlük 199.4 mm'lik olağanüstü yağış sonucu en küçük, en büyük ve ortalama heyelan alanları sırasıyla 30 m², 18000 m² ve 1021 m² olan 1216 heyelan haritalanmıştır. Hopa ve çevresinde aşırı yağışlar sonucu uzun yıllardan beri sel ve heyelan olayları gerçekleştiği bilinmektedir. Bölgedeki heyelanların yüksek yamaç eğimlerine sahip engebeli topoğrafya, ayrılmış birimlerin varlığı, arazi kullanımı gibi hazırlayıcı ve aşırı yağışların tetiklemesiyle geliştiği bilinmektedir. Ancak, geçmişe yönelik olarak istenilen nitelikte ayrıntılı ve çok zamanlı heyelan olay envanter haritalarının mevcut olmaması ve bölgede otomatik meteoroloji istasyonlarının sayısının 2009 yılından sonra artırılması, geçmişe yönelik bölgesel olarak heyelanları tetikleyen yağış şiddet süre ilişkilerinin araştırılmasını kısıtlamaktadır. Düzenli olarak heyelanların üst ve altyapılar üzerinde meydana getirdiği hasar görülebilirlik derecelerini de içeren, ayrıntılı heyelan olay envanter haritalarının hazırlanması ve heyelanların yağış eşik değerleri ile ilişkilendirilmesi, bölgede heyelan risk azaltma çalışmalarına önemli katkılar sağlayacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Akçalı, E., ve Arman, H., 2013. Yağış Eşiği Bazlı Heyelan Erken Uyarı Sistem: İMO Teknik Dergi, v. 396, p. 6307-6332.
- Clarizia M., Gulla G., and Sorbino G., 1996. Sui meccanismi diinnesco dei soil slip. In: Int. Conf. Prevention of Hydro-geological Hazards: The Role of Scientific Research (Luino F, ed), vol. 1. Alba: L' Artistica Savigliano pub, pp 585–597.
- Crosta GB, and Frattini P., 2001. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In: Proc. 2nd EGS Plinius Conf. on Mediterranean Storms (Mugnai A, Guzzetti F, Roth G, eds). Siena, pp 463–487.
- Crosta, G. B., Dal Negro, P., and Frattini, P., 2003. Soil slips and debris flows on terraced slopes Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 3, no. 1-2, p. 31-42.

- Çan T., ve Duman T.Y., 2015. Bölgesel Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi: Kuzey Türkiye, Mühendislik Jeolojisi, Trabzon, Türkiye, 3-5 Eylül 2015, ss.153-160.
- Çan, T., Duman, T.Y., Çil, E., ve Mazman, T., 2008. Heyelan Olası Tehlike Çalışmalarında Tarihsel ve Olay Heyelan Envanter Haritalamaları ve Bunların İstatistiksel Değerlendirilmesi: Mersin Merkez ve Erdemli İlçeleri Örneği," Mersin Sempozyumu 2008, Bildiriler Kitabı. 2796-2803, Mersin.
- Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., and Duman, T.Y., 2005a. 'Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three subcatchments by logistic regression analyses', *Geomorphology*, 72, 250-271.
- Çan, T., Duman, T.Y., Nefeslioğlu, H.A., Durmaz, S., Gökçeoğlu, C., and Sönmez, H., 2005b. 'Earthflows in a small catchment from eastern black sea region (Turkey): Conditional (Environmental) factors and susceptibility assessments.' International Symposium on Latest Natural Disaster-New Challenges for Engineering Geology, Geotechnics and Civil Protection, Proceedings CD, Sofia, Bulgaria.
- Çan, T., Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çörekçioğlu, Ş., Karakaya-Gülmez, F., Elmacı, H., Olgun, Ş., Hamzaçebi, S. ve Emre; Ö., 2013. Türkiye Heyelan Veri Tabanı. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi 2013, 11-13 Kasım 2013, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Bildiriler İnteraktif CD, Bildiri No: 217, 6 s., Ankara.
- Çan, T., E. Bulut, İ. Tekin, S. ve Özcan A.K., 2017. Gülyalı (Ordu) - Bulancak (Giresun) Arası Kıyı Kuşağı Havzalarının Heyelan Olası Tehlike Haritaları. 70. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri, 184-185., Ankara, 10-14 Nisan 2017.
- Duman, T. Y., Can, T., Emre, Ö., Kecer, M., Dogan, A., Ates, S., and Durmaz, S., 2005, Landslide inventory of northwestern Anatolia, Turkey: *Engineering Geology*, v. 77, no. 1-2, p. 99-114.
- Duman, T.Y., Çan, T., ve Emre, Ö., 2011. "1:1.500.000 ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası," MTA Özel Yayınlar Serisi-27 Ankara.
- Duman, T.Y., Nefeslioğlu, H.A., Çan, T., Olgun, Ş., Durmaz, S., Hamzaçebi, S., Çörekçioğlu, Ş., 2007a. "Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1/500000 ölçekli Trabzon Paftası," MTA Özel Yayınlar Serisi-9, 25 s. Ankara.
- Duman, T.Y., Durmaz, S., Çan, T., Olgun, Ş., Ateş, Ş., Keçer, M., Hamzaçebi, S., Nefeslioğlu, H.A. and Çörekçioğlu, Ş., 2007b. "Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1/500000 ölçekli Samsun Paftası," MTA Özel Yayınlar Serisi-8, 23 s. Ankara,
- Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Hamzaçebi, S., Durmaz, S., Elmacı, H., ve Çörekçioğlu, Ş. 2009. "Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1/500000 ölçekli Kars Paftası," MTA Özel Yayınlar Serisi-14, 27 s. Ankara,
- Gökçe O. Özden, Ş. ve Demir, A. 2008. Türkiye'de Afetlerin Mekansal Ve İstatistiksel Dağılımı, Afet Bilgileri Envanteri, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 118.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reichenbach, P., and Rossi, M., 2008. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy: *Geomorphology*, v. 96, no. 1-2, p. 105-122.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., and Chang, K. T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem: *Earth-Science Reviews*, v. 112, no. 1-2, p. 42-66.
- Malamud, B. D., and Turcotte, D. L., 1999, Self-organized criticality applied to natural hazards: *Natural Hazards*, v. 20, no. 2-3, p. 93-116.
- Malamud, B. D., and Turcotte, D. L., 2006, The applicability of power-law frequency statistics to floods: *Journal of Hydrology*, v. 322, no. 1-4, p. 168-180.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., and Reichenbach, P., 2004, Landslide inventories and their statistical properties: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 29, no. 6, p. 687-711.
- Ulupınar, Y., Çelik, S., Gülsoy, E., Akbaş, A. İ., ve Köse, S., 2015. 24 Ağustos 2015 Tarihinde Hopa'da Meydana Gelen Şiddetli Yağışın Meteorolojik ve Hidrometeorolojik Analizi: II. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu 03-05 Kasım 2015 Antalya, <https://mgm.gov.tr/FILES/genel/makale/hopa-yagis.pdf>, 12 sayfa.
- Van den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., and Demoulin, A., 2007. Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 256, no. 3-4, p. 588-603.

Gümüşhacıköy (Amasya) - Osmancık (Çorum) Dolaylarının Frekans Oranı Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi

Landslide Susceptibility Evaluation Gümüşhacıköy (Amasya)-Osmancık (Çorum) Region using Frequency Ratio Method

M. M. Becer^{1,*}, T. Çan², S. Tekin²

¹Çorum Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 19100 Merkez, Çorum

²Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Balcalı, Adana
(*muratbecer@gmail.com)

ÖZ: Heyelanların mekansal olabirliğini gösteren duyarlılık haritaları bölgesel ölçekte heyelanlardan kaynaklı gelişebilecek zararların azaltılmasında önemli katkı sağlamaktadır. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması; heyelanların tipi, dağılımı ve envanter haritasının güvenilirliği başta olmak üzere, çalışılan bölgenin özelliklerini yansıtan çevresel değişkenlerin seçilmesi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu çalışmada, Gümüşhacıköy ve Osmancık ilçeleri arasındaki 1138 km²'lik bölgede, istatistiksel değerlendirme yöntemlerinden frekans oranı metodu ile heyelan duyarlılık değerlendirme yapılmıştır. Türkiye Heyelan Envanter veri tabanına göre çalışma alanında heyelan alanı 79 km² olan 385 adet heyelan bulunmaktadır. Frekans oranı yöntemi ile elde edilen heyelan duyarlılık haritası çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 sınıfta incelenmiştir. Buna göre, çalışma alanının %21'i, heyelanların ise %80'i yüksek ve çok yüksek duyarlı bölgelerde bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Frekans Oranı, Duyarlılık Değerlendirmesi, Gümüşhacıköy, Osmancık

ABSTRACT: Susceptibility maps show the spatial availability of landslides and provide a significant contribution to the reduction of landslide-related losses at the regional scale. Preparation of landslide susceptibility maps; such as the type of landslides, the reliability of the inventory map, and the selection of environmental variables that reflect the characteristics of the studied region. In this study, a landslide susceptibility evaluation was carried out by the frequency ratio method from statistical evaluation methods in 1138 km² area between Amasya-Gümüşhacıköy and Çorum-Osmancık districts. According to prepared by the MTA the Turkish Landslide Inventory database, there are 385 landslides with a landslide area of 79 km² in the study area. The landslide susceptibility map obtained by the frequency ratio method is investigated in 5 classes as very low, low, medium, high and very high. According to this, 21% of the study area and 80% of the landslides are in high and very sensitive regions.

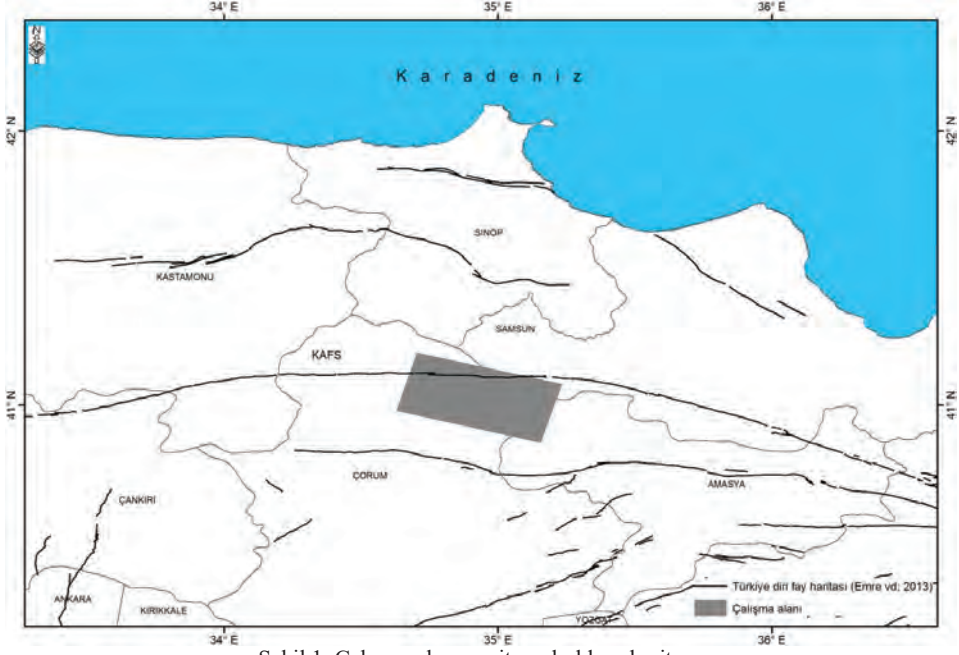
Keywords: Landslide, Frequency Ratio, Susceptibility Evaluation, Gümüşhacıköy, Osmancık

1. GİRİŞ

Doğal afet tehlikelerine karşı etkin mücadele, afet öncesi, sırası ve sonrasında oluşacak risklerin tamamen ortadan kaldırılması veya uzun süreli azaltılmasına yönelik bir yaklaşım modelinin geliştirilip uygulanması mümkündür. Ülkemizin jeolojik, jeomorfolojik ve sahip olduğu iklimsel yapısı nedeni ile deprem, heyelan, sel gibi olaylar aynı bölgelerde tekrarlanmalı olarak meydana gelmekte ve çoğu kez afete dönüşmektedir. 1950-2007 arasındaki dönemi kapsayan Gökçe vd. (2008)'e göre, aynı yerleşim biriminde, değişik zamanlarda, birden fazla gerçekleşen olay sayıları da dikkate alınarak 13494 heyelan olay sayısı ile tüm afetler içerisinde %45.27'lik bir paya sahip olduğu görülmektedir. Herhangi bir doğal afete uğramış ve afet bölgesi ilan edilerek, genel hayata etkili nakli gerçekleştirilen konutların dağılımına bakıldığında, ulusal ölçekte heyelan olayları nedeniyle gerçekleştirilen nakillerin % 27.6 gibi önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, Gümüşhacıköy (Amasya) - Osmancık (Çorum) arasında kalan 1138 km²'lik bölgede (Şekil 1), istatistiksel değerlendirme yöntemlerinden biri olan frekans oranı metodu ile heyelan duyarlılık değerlendirme yapılmıştır. MTA tarafından hazırlanan Türkiye Heyelan Envanter veri tabanına göre çalışma alanında toplam heyelan alanı 79 km² olan 385 adet heyelan bulunmaktadır.

Heyelan oluşumuna sebep olan faktörler olarak jeolojinin yanı sıra sayısal yükseklik modelinden türetilen yamaç eğimi, topoğrafik nemlilik indeksi, kesit, teğetsel ve düzlemsel yamaç eğriselliği haritaları kullanılmıştır.

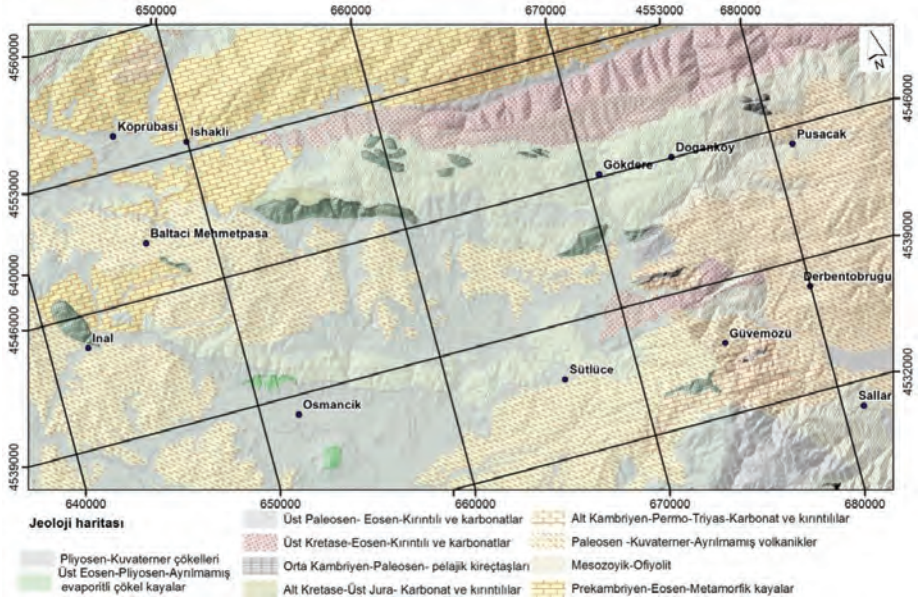


Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

2. ÇALIŞMA ALANININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Çalışma alanında kuzeyde Orta Pontidler ve ofiyolitler, güneyde Sakarya Kıtası, Tokat Masifi ve Çankırı-Çorum havzasına ait birimler yer almaktadır. Bu çalışmada heyelanların litolojik birimler içerisindeki alansal dağılımları Ağrıdağ vd. (2002) tarafından hazırlanan Türkiye jeoloji haritası Sinop paftasına göre yapılmıştır (Şekil 2). Haritaya göre; bölgede Paleozoyik ve öncesi kayalar metamorfik kayalar ile temsil edilir. Söz konusu kayalar Sakarya Kıtasına ait birimlerde görülmektedirler. Mesozoyik; metamorfik, ofiyolitik, volkanit ve sedimanter kayalardan oluşur. Senozoyik birimler volkanit ve sedimanter kayalardan oluşur. Bu birimler Sakarya Kıtası ile Çankırı - Çorum havzasının inceleme alanı içerisinde kalan kısmında görülmektedir. Çalışma alanı, gerek paleotektonik gerekse neotektonik etkinliklerin yoğun olarak gerçekleştiği bir bölgede yer alır. Paleotektonik dönem yapıları farklı tektonik birimleri bir araya getirmesi ve buna bağlı olarak bölgesel morfolojinin şekillenmesi açısından önemlidir (Duman vd. 2007). Bölgenin esas Neotektonik dönem yapısı ve deprem kaynağı Kuzey Anadolu Fay (KAFS) sistemidir. KAFS yaklaşık 1600 km uzunlukta olan sağ yönlü doğrultu atımlı transform nitelikli aktif bir levha sınırır (Şengör, 1979). Çalışma alanı, KAFS kaynaklı depremlerin etki alanı içerisindeydi. 26 Kasım 1943 Tosya ($M_w=7.6$) depremi sonucunda oluşan yüzey kırığının yaklaşık 40 km'lik kısmı çalışma alanı içerisinde kalmaktadır. Söz konusu alan büyük depremlerle etkilenmiş olmasına rağmen, depremlerle tetiklenmiş heyelanlara ilişkin kayıt bulunmamaktadır.

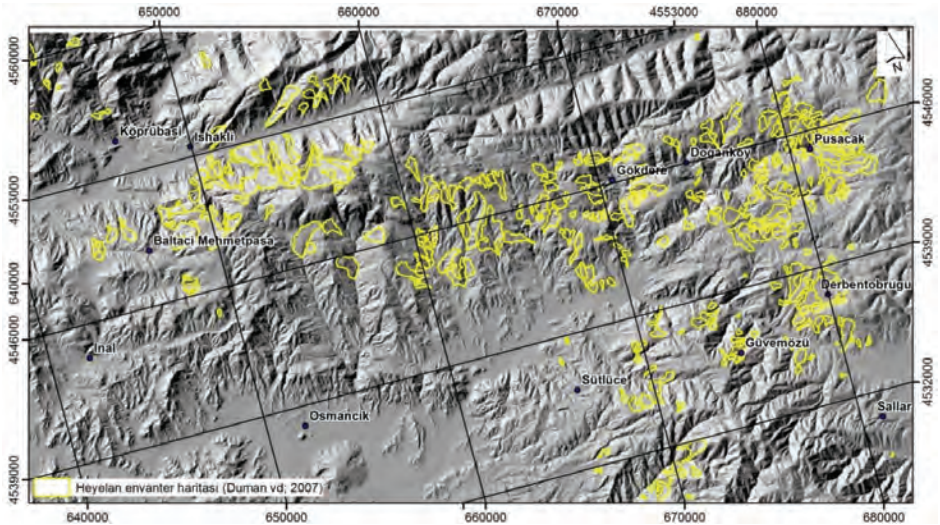
Bölgenin esas morfolojik yapısı oluşmasında KAFS etkilidir. KAFS zonu dar fay vadileri ve bunların arasında gelişmiş değişik havza tipleri ile karakteristiktir. KAFS boyunca doğrultu atıma bağlı olarak kuzeyde ve güneyde farklı morfolojik birimler bir araya gelmektedir (Duman vd., 2007).



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası (Ağrıdağ vd., 2002).

3. HEYELAN ENVANTER HARİTASI

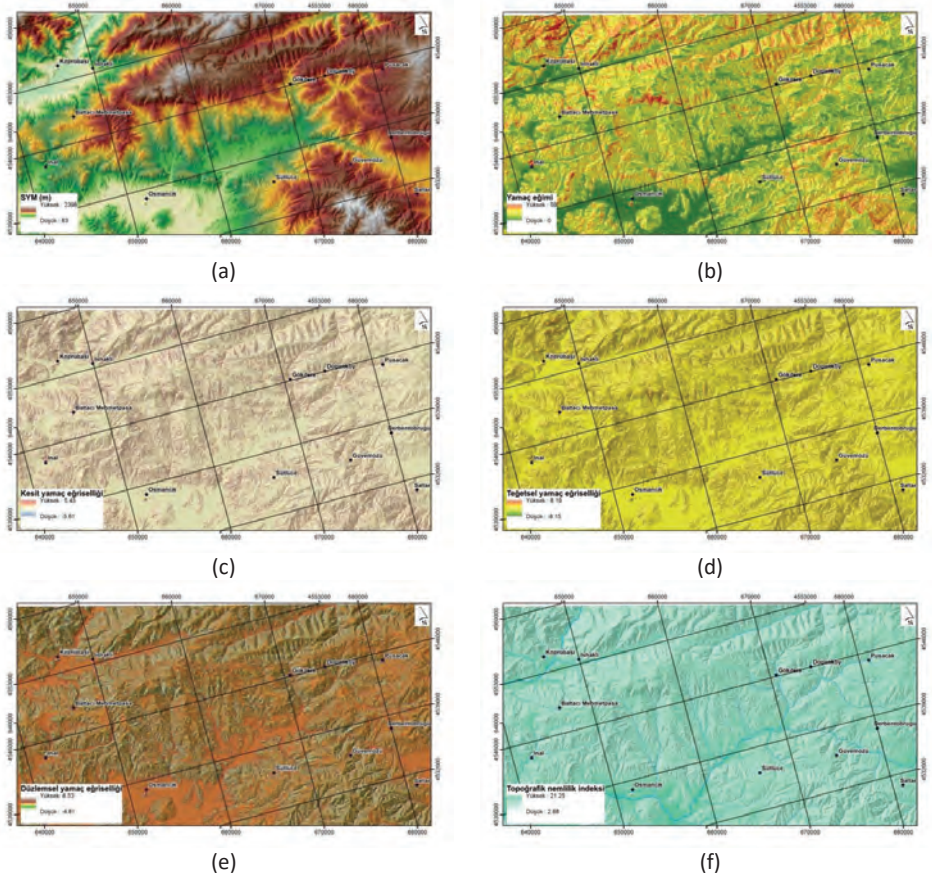
Heyelan envanter haritaları arşiv, olay, çok zamanlı ve tarihsel olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan tarihsel heyelan envanteri haritaları yapıldığı tarih itibarı ile mevcut heyelanların gösterildiği haritalardır. Zaman içinde özellikle küçük ölçekli heyelanların erozyon gibi çevresel faktörler etkisi altında yok olduğu veya tanımlanmasının güç olduğu bilinmektedir. Karadeniz iklimi etkisi altında bulunan araştırma alanında benzer durum geçerlidir. Çalışma alanında toplam 79 km² alan kaplayan 385 adet heyelan (Şekil 3) haritalanmıştır (Duman vd., 2007).



Şekil 3. Çalışma alanına ait heyelan envanter haritası (Duman vd., 2007).

4. HEYELAN DUYARLILIK DEĞERLENDİRMESİ

Heyelan duyarlılık değerlendirmeleri, heyelanların hangi bölgelerde meydana gelebileceğine dair yaklaşımlar sunmaktadır. Çalışılan bölgede mevcut heyelan envanter haritaları ve heyelanları hazırlayıcı çevresel faktörleri birlikte değerlendirilmesiyle elde edilmektedir (Varnes, 1984; Soeters ve VanWesten, 1996; Aleotti ve Chowdhury, 1999; Guzzetti vd., 1999; Van Den Eeckhaut vd., 2005; Çan vd., 2007, Tekin, 2014; Tekin vd., 2015). Bu çalışmada, heyelanları hazırlayıcı faktörler olarak başta jeoloji olmak üzere sayısal yükseklik modeli ve türev haritaları olan yamaç eğimi, topoğrafik nemlilik indeksi, kesit, düzlemsel, teğetsel yamaç eğrimsellikleri kullanılmıştır (Şekil 4). Buna göre heyelan duyarlılık haritalarında kullanılan yöntemler niteliksel ve niceliksel yaklaşımlar olarak iki ana başlık altında toplanmaktadır. Niceliksel heyelan duyarlılık yöntemlerinde geçmişte heyelanlara neden olan faktörlerin gelecekte de heyelanların mekansal dağılımında etkili olacağı varsayımı yapılmaktadır. Niceliksel yöntemler veri güdümlü ve fiziksel tabanlı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Corominas vd., 2014).



Şekil 4. Çalışmada kullanılan çevresel değişkenler, sayısal yükseklik modeli (a), yamaç eğimi (b), kesit yamaç eğrimselliği (c), teğetsel yamaç eğrimselliği (d), düzlemsel yamaç eğrimselliği, topoğrafik nemlilik indeksi (f) haritaları.

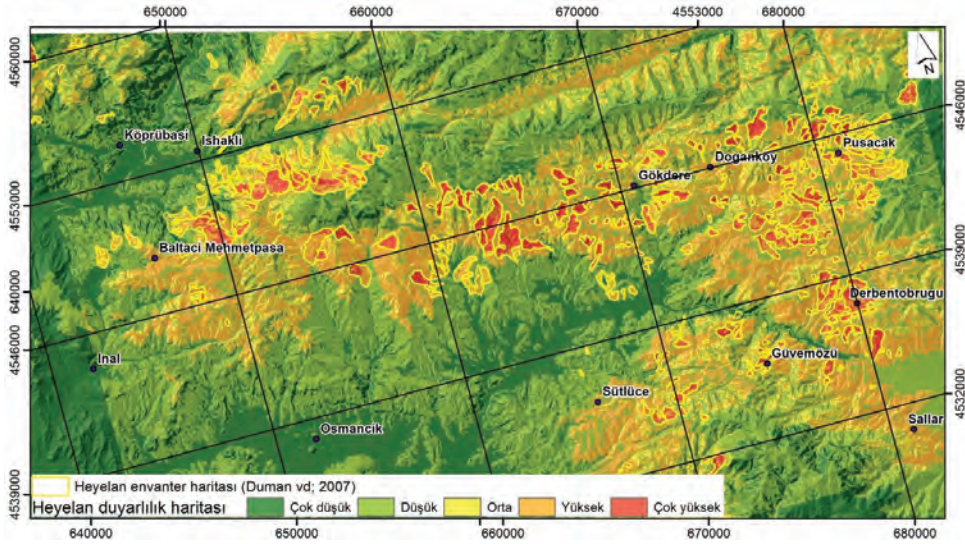
4.1. Frekans Oranı Yöntemi

Frekans oranı (FR), bir olayın gerçekleşme olasılığının gerçekleşmeme olasılığına oranı şeklinde tanımlanmakta olup yoğunluk analizlerine dayanmaktadır (Bonham-Carter, 1994; Lee vd., 2004; Lee ve Evangelista, 2005; Lee ve Talib, 2005; Yılmaz, 2009). Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan çevresel değişkenlerin her birinin frekans oranını hesaplamak için her bir faktör kategorilere ayrılmış ve her bir faktörün her bir alt kategorisindeki heyelanlı hücre sayıları belirlenmiştir. Frekans oranı Eşitlik 1'deki gibi hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte FR, frekans oranı; a katsayısı, parametre alt grubundaki heyelanlı piksel sayısının, toplam heyelanlı piksel sayısına oranına; b katsayısı ise, parametre alt grubunun çalışma alanındaki piksel sayısının, çalışma alanındaki toplam piksel sayısına oranına karşılık gelmektedir. Bu yöntemde, 1 değerinden büyük olan FR değerlerinin, göreceli olarak heyelan oluşumunda daha etkin olduğu, 1 değerinden daha küçük FR değerlerinin ise, heyelan oluşumunda daha az etkiye sahip olduğu belirtilmektedir (Lee ve Talib, 2005) (Çizelge 1). Dikkate alınan her bir parametre alt grubu için hesaplanan FR değerleri, ilgili parametrelere atanarak, CBS ortamında çalıştırılmaktadır. Bu işlem için, dikkate alınan ve FR değerleri atanmış parametreler, CBS ortamında toplanarak LS (Landslide Susceptibility) değerleri elde edilmektedir (Lee ve Talib, 2005).

$$FR = \frac{a}{b} \quad (1)$$

$$LS = \Sigma FR \quad (2)$$

Eşitlik 2'de LS heyelan duyarlılığını, ΣFR ise çalışma alanındaki her bir piksel için hesaplanan FR değerlerinin matematiksel toplamına karşılık gelmektedir. Yapılan analizler sonucu elde edilen heyelan duyarlılık haritası doğal sınıflara göre çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 sınıfta değerlendirilmiştir (Şekil 5).

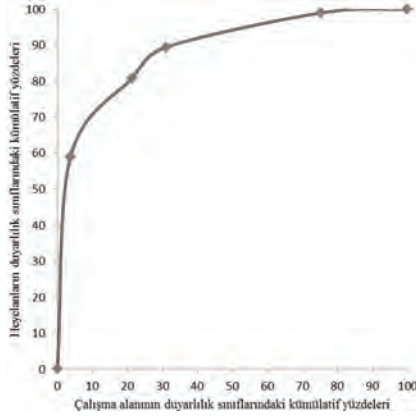


Şekil 5. Çalışma alanına ait heyelan duyarlılık haritası.

Çizelge 1. Çevresel değişkenler için FR değerleri.

	Değişken	Heyelanlı piksel sayısı	Çalışma alanı piksel sayısı	a	b	FR
SYM	<612	2926	212773	2.32	11.68	0.20
	612-850	20153	264019	15.97	14.50	1.10
	850-1100	50547	354097	40.06	19.44	2.06
	1100-1300	32896	263235	26.07	14.45	1.80
	>1300	19653	254869	15.58	13.99	1.11
Yamaç eğimi	<10	25437	336501	20.16	24.94	0.81
	10-20	65658	503990	52.04	37.36	1.39
	20-30	30224	384193	23.95	28.48	0.84
	30-40	4601	116741	3.65	8.65	0.42
	>40	255	7568	0.20	0.56	0.36
Teğetsel yamaç eğriliği	<0	68366	639435	54.18	35.11	1.54
	0-1	43497	638546	34.47	35.06	0.98
	>1	14312	71012	11.34	3.90	2.91
Kesit yamaç eğriliği	<0	59488	661848	47.15	49.06	0.96
	0-1	59818	588977	47.41	43.66	1.09
	>1	6869	98168	5.44	7.28	0.75
Düzlemsel yamaç eğriliği	<0	68366	588977	54.18	43.66	1.24
	0-1	43497	463507	34.47	34.36	1.00
	>1	14312	296509	11.34	21.98	0.52
Jeoloji	Pliyosen-Kuvaterner çökelleri	4915	136282	3.90	7.48	0.52
	Üst Eosen-Pliyosen -Ayrılmamış evaporitli çökel kayalar	0	3591	0.00	0.20	0.00
	Üst Paleosen- Eosen -Kırıntılı ve karbonatlar	16178	123781	12.82	6.80	1.89
	Üst Kretase-Eosen -Kırıntılı ve karbonatlar	1773	144971	1.41	7.96	0.18
	Orta Kambriyen-Paleosen- pelajik kireçtaşları	1885	35508	1.49	1.95	0.77
	Alt Kretase-Üst Jura-Karbonat ve kırıntılılar	75	4370	0.06	0.24	0.25
	Alt Kambriyen-Permo-Triyas-Karbonat ve kırıntılılar	129	37897	0.10	2.08	0.05
	Paleosen -Kuvaterner-Ayrılmamış volkanikler	46501	475532	36.85	26.11	1.41
	Mesozoyik-Ofiyolit	36705	235589	29.09	12.94	2.25
	Prekambriyen-Eosen-Metamorfik kayalar	18014	151472	14.28	8.32	1.72

Duyarlılık haritası performans değerlendirmesi başarı tahmin eğrisi ile test edilmiştir (Şekil 6). Frekans oranı yöntemi ile elde edilen heyelan duyarlılık haritası çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 sınıfta incelenmiştir. Buna göre çalışma alanının %21'i, heyelanların ise %80'i yüksek ve çok yüksek duyarlı bölgelerde bulunmaktadır. Çalışma alanında heyelanlar genel olarak, 612 metre ve üstü yükseklik değerleri, 10-20° eğim aralıkları arasında ve Üst Paleosen- Eosen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı ve Paleosen –Kuvaterner yaşlı ayrılmamış volkanik birimlerinde gözlenmektedir.



Şekil 6. Duyarlılık haritası başarı-tahmin eğrisi.

5. KAYNAKLAR

- Ağrıdağ, D.S., Akat, U., Ekay, E., Akbaş, B., Akçören, F., Akın, E., Akkuş, M.F., Akman, Ü., Akpınar, K., Akyürek, B., Altun, İ., Arbaş, A., Atalay, M., Ateş, M., Aziz, A., Barburst, M.y, Besbelli, B., Bilginer, E., Birgili, S., Boztaş, D., Çalapkulu, F., Gümüşsu, M., Hakyemez, Y., Herece, E., İmik, M., Karabalık, N.N., Keskin, A., 2002. 1/500 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Sinop Paftası, MTA Genel Müdürlüğü. Ankara.
- Aleotti, P, And Chowdury, R., 1999. Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives, Bull. Eng. Geol. Environ., 21-44.
- Bonham-Carter, G.F., 1996. Geographic Information Systems For Geoscientists, Modelling With GIS. Pergamon Press, Canada, 398p.
- Corominas, J., Van Westen, C., Freattini, P., Cascini, J.-Malet, P., Fotopoulou, S., Catani, F., Eeckhaut, M. V., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitolakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofni, V., Hervas, J., Smith, J. T., 2014. Recommendations For the Quantitative Analysis of Landslide Risk, Bull. Eng. Geol. Environ., 73:209-263.
- Çan, T. Nefeslioğlu, H, A. Duman, T, Y. Gökçeoğlu, C. Sönmez, H. 2007. Batı Karadeniz Bölgesinde Seçilmiş Üç Farklı Havzanın Akma Ve Kayma Duyarlılıklarının Ayrı Ayrı Değerlendirilmesi, Erdoğan Yüzer Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 212-220 İstanbul.
- Çil, E., 2009. Erdemli (Mersin) Yöresinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Heyelan Olası Tehlike Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana
- Duman, T. Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioğlu, H. A., Hamzaçebi, S., Durmaz, S., Emre, Ö., Ateş, Ş., Keçer, M., Çörekçioğlu, Ş., 2007. 1/500000 Ölçekli Türkiye Heyelan Envanter Haritası, Sinop Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, VI+89s., Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara, Türkiye.
- Ergünay, O., 1999. A Perspective Of Disaster In Turkey: Issues And Prospects, Urban Settlements And Natural Disasters Proceedings Of UIA Region II Workshop Chamber Of Architects Of Turkey

- Gökçe, O. Özden, Ş., Demir, A., 2008. Türkiye'de Afetlerin Mekansal Ve İstatistiksel Dağılımı, Afet Bilgileri Envanteri, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 118 S.
- Gökçe, O., Demir, A., Özden, Ş., 2006. Türkiye'de Heyelanlı Yerleşim Birimlerinin Dağılımı Ve CBS Ortamında Sorgulanması (Afet Envanteri 1950-2005), 1. Heyelan Sempozyumu Bildiriler Kitabı, S.24-40
- Guzzetti, F. Carrara, A. Cardinali, M. and Reichenbach, P. 1999. Landslide Hazard Evaluation: A Review Of Current Techniques And Their Application in A Multi-Scale Study, Central Italy, *Geomorphology*, 31, 181-216.
- Ildır, B., 1995. Türkiye'de Heyelanların Dağılımı Ve Afetler Yasası İle İlgili Uygulamalar, 2. Türkiye Ulusal Heyelan Sempozyumu, Sakarya Üniversitesi, S.1-9.
- Lee, S., Choi, J., Min, K., 2004. Landslide Hazard Mapping Using GIS And Remote Sensing Data At Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2037-2052.
- Lee, S., Evangelista, D.G., 2005. Landslide Susceptibility Mapping Using Probability and Statistics Models in Baguio City, Philippines, 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, Saint Petersburg, Russia.
- Lee, S., Talib, J. A., 2005. Probabilistic Landslide Susceptibility and Factor Effect Analysis, *Environ. Geol.*, 47:982-990
- Soeters, R. and Van Westen, C.J. 1996. Slope Instability Recognition, Analysis And Zonation, In: Turner AK, Schuster RL (Eds) *Landslides: Investigation And Mitigation*, Transp Res, Board, Nat Res, Counc Spec Rep 247, 129-177.
- Şengör, A.M.C., 1979 The Anatolian Transform Fault: Its Age, Offset And Tectonic Significance, *J.Geol. Soc. Lond.*, 136, 269-282
- Tekin, S., Çan, T., Mazman, T., Duman, T.Y., 2015. "Doğu Akdeniz Bölgesinin Yapay Sınır Ağları Yöntemi İle Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi", *Mühendislik Jeolojisi*, Trabzon, Türkiye, 3-5 Eylül 2015, Ss.137-144.
- Tekin, S., 2014. Kadirli-Aslantaş (Osmaniye) Dolaylarının CBS Tabanlı Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 106, Adana.
- Van Den Eeckhaut, M. Vanwalleghe, T. Poesen, J. Govers, G. Verstraeten, G. And Vandekerckhove, L. 2005. Prediction of Landslide Susceptibility Using Rare Events Logistic Regression: A Case-Study In The Flemish Ardennes (Belgium) *Geomorphology*, Volume 76, Issues 3-4, 30 June 2006, Pages 392-410.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practtice, In *Natural Hazards*, Vol, 3, UNESCO, 63 pp, Paris.
- Wang, L-J., Min Guo, Sawada, K. Lin, J., And Zhang, J., 2016. A Comparative Study of Landslide Susceptibility Maps Using Logistic Regression, Frequency Ratio, Decision Tree, Weights of Evidence and Artificial Neural Network. *Geosciences Journal*, Vol. 20, No. 1, P. 117-136, February 2016. DOI 10.1007/S12303-015-0026-1
- Yılmaz, I., 2009. A Case Study From Koyulhisar (Sivas-Turkey) For Landslide Susceptibility Mapping By Artificial Neural Networks. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 68 (3), 297-306.

Gökçay Havzasının Karar Ağaç Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi

Landslide Susceptibility Assessment of the Gökçay Watershed using Decision Tree Method

S. Tekin*, T. Çan

Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Balcalı, Adana
(*senemtekin01@gmail.com)

ÖZ: Bu çalışmada, Göksu Nehri havzasının ana kollarından biri olan Gökçay Nehri havzasında (4425 km²) karar ağacı yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma alanında toplam alanı 77 km² olan 152 adet kayma türü heyelan bulunmaktadır. Karar ağacı yönteminde Ki-kare otomatik etkileşim dedektörü algoritması kullanılmıştır. Heyelanları hazırlayıcı çevresel faktörler olarak arazi kullanımı, jeoloji haritası, sayısal yükseklik modeli, yamaç eğimi, yamaç eğrissellikleri, pürüzlülük indeksi, eğim/yamaç yönelimi oranı kullanılmıştır. Heyelan duyarlılık değerlendirilmesi için çalışma alanı veri matrisi %80 analiz ve %20 doğrulama olarak ikiye ayrılmıştır. Duyarlılık haritasının performansı doğrulama ve analiz veri setlerinin başarı tahmin eğrileri ve alıcı işletim karakteristik eğrileri ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen heyelan duyarlılık haritasında çalışma alanının %22'si, analiz heyelanlarının %75,42'si, test heyelanlarının ise %73,55'i orta, yüksek ve çok yüksek duyarlı bölgelerde yer aldığı görülmüştür. Alıcı işletim karakteristik eğrisi altında kalan alan analiz ve doğrulama veri setlerinde sırasıyla 0.848 ve 0.764 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gökçay havzası, heyelan duyarlılık, karar ağacı.

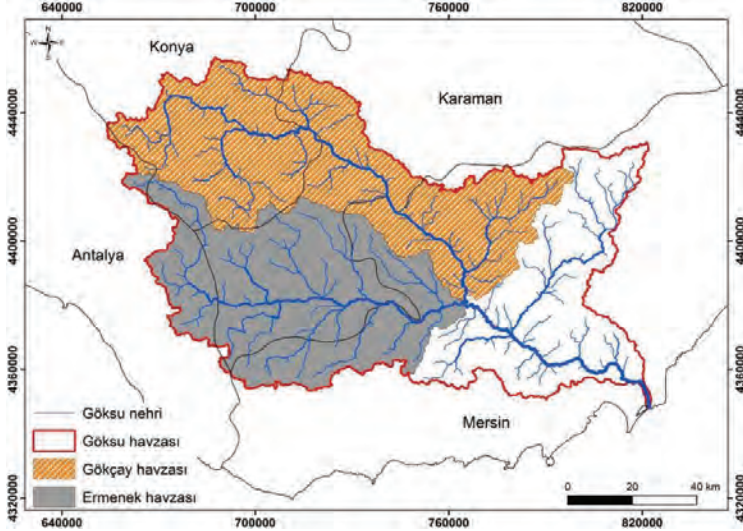
ABSTRACT: In this study, a landslide susceptibility evaluation was carried out by decision tree method in Gökçay River subwatershed (4425 km²) which is one of the two main branches of Göksu River. 152 landslides covering 77 km² were delineated in the study area. In decision tree method, Chi-square automatic interaction detector algorithm was used. Land-use, geological map, digital elevation model, slope, slope curvature, roughness index, slope/aspect ratio were used as landslide preparatory factors. For the landslide susceptibility assessment, the study area was divided into 80% for the training data and the rest for the validation data. The performance of the susceptibility map was verified by the success prediction curves and the receiver operating characteristic curves. It has found that 22 % of the study area including 75.42 % of the training and 73.55 % of the validation landslides were found in the medium to very high susceptible classes. The area under the receiver operating characteristic curve was for the training and the validation datasets were found 0.848 and 0.764 respectively.

Keywords: Gökçay watershed, landslide susceptibility, decision tree.

1. GİRİŞ

Toprak, moloz veya kaya kütlelerinin yamaç aşağı hareketi olarak tanımlanan heyelanlar, dünyada olduğu gibi ülkemizde de önemli sosyo-ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Akma, kayma, düşme ve devrilme gibi farklı hareket mekanizmasında gelişen heyelanlar bölgesel olarak belirgin jeolojik, morfolojik ve fiziksel faktörlerin kontrolü altında meydana gelmektedir. Göksu Nehri havzası yaklaşık olarak 11.000 km²'lik alansal büyüklüğe sahiptir. Göksu Nehri, kuzeybatı kolu Gökçay havzasını, batı kolu Ermenek Nehri havzasını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 4425 km²'lik alansal büyüklüğe sahip Gökçay Nehri havzasının karar ağacı yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirilmesi yapılmıştır (Şekil 1). Karar ağaçları, sınıflandırma ve olasılık değerlendirmeleri için sıkça kullanılan yöntemlerden biridir. Mantıksal regresyon, sıklık oranlama, yapay sinir ağları gibi diğer niceliksel yöntemler de sınıflandırma için kullanılabilmesine rağmen, karar ağaçları, kolay yorumu ve anlaşılabilirliği açısından son yıllarda tercih edilen yöntemlerden biridir (Althuwaynee vd., 2016). Karar ağacı tekniğini kullanarak çalışmada kullanılan verilerin sınıflanması, Ki-kare otomatik etkileşim dedektörü (CHAID), Otomatik Etkileşim Algılama (CRT), kontrollü denetleme (SLIQ), ID3 algoritmalarından biri ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada karar ağacı analizleri Ki-kare otomatik etkileşim

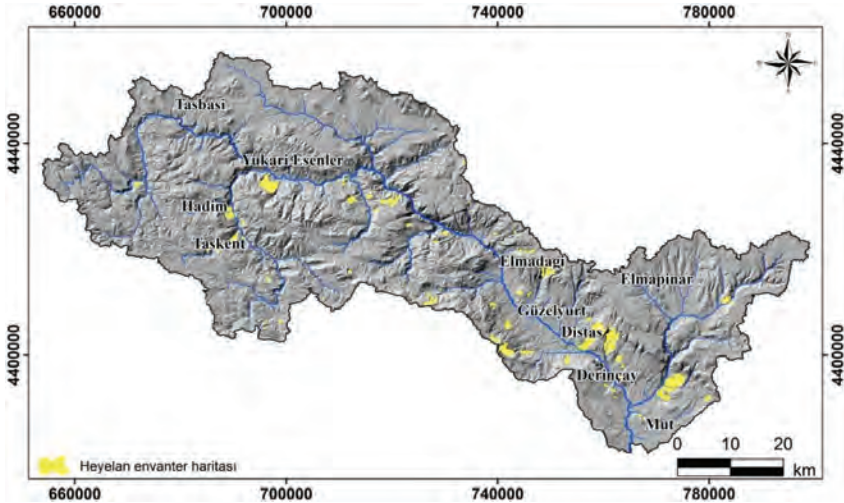
dedektörü algoritması (CHAID) ile gerçekleştirilmiş olup, heyelanlar ile çevresel değişkenler arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak ortaya çıkarması ve en yüksek ilişkiden en düşüğe doğru bölme işlemini gerçekleştiriyor olmasından dolayı tercih edilmiştir. Yapılan heyelan duyarlılık değerlendirmesi bölgede yapılması planlanan olası tehlike ve risk çalışmalarına altlık oluşturması açısından önemlidir.



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

2. HEYELAN ENVANTERİ

Heyelan envanter haritasına göre Gökkuşu havzasında alansal büyüklüğü 77 km² olan 152 adet kayma türü heyelan bulunmaktadır (Duman vd., 2009) (Şekil 2). Heyelanların en küçüğü 0.00503 km², en büyüğü Diştaş köyü güneyinde 11 km²'dir.

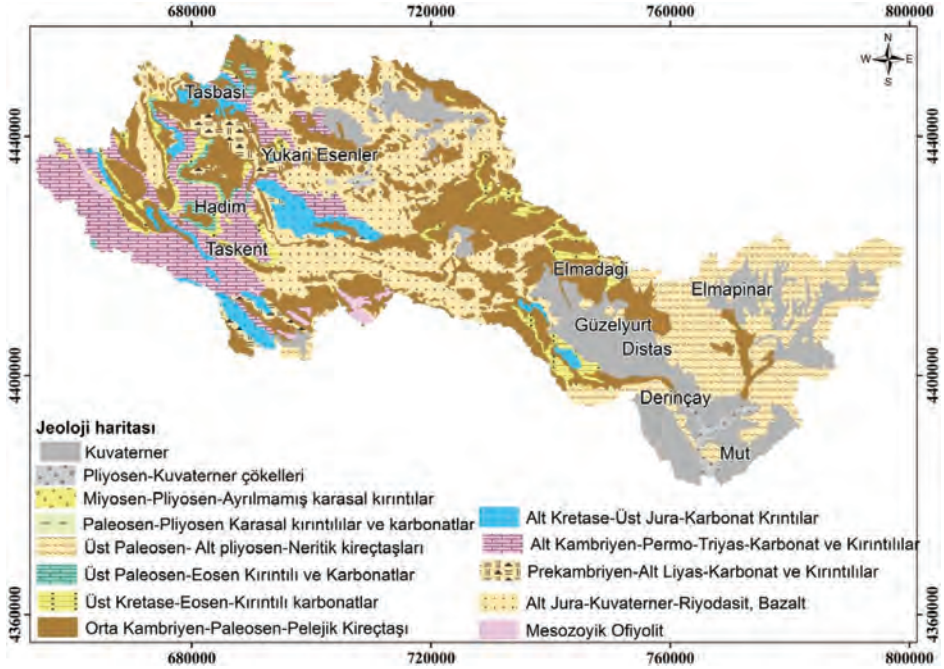


Şekil 2. Heyelan envanter haritası (Duman vd., 2009).

Çalışma alanında heyelanlar Göksu Nehri havzası boyunca Miyosen-Pliyosen kırıntılı birimlerinden ince tabakalı kireçtaşı, killi kireçtaşı, marn ardalınlı litoloji özellikleri gösteren birimlerde yaygın olarak gözlenmektedir.

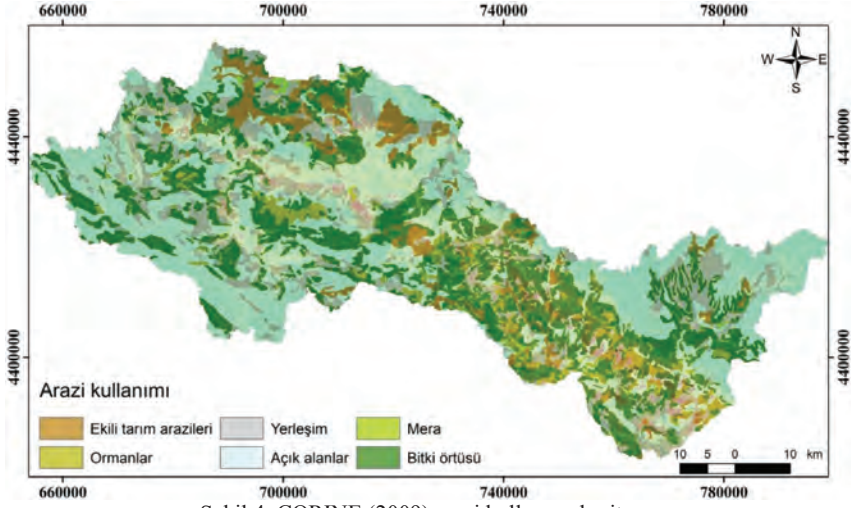
3. ÇALIŞMA ALANININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Bölgede jeolojik olarak en yaşlı birimler Paleozoyik yaşlı karbonatlı, kırıntılı ve metamorfik kayalardan oluşmaktadır (Acarlar vd., 2002). Bu birimlerin üzerine Mesozoyik yaşlı neritik kireçtaşları, radyolarit, çört, peridodit, diyabaz kayaları içeren birimler yer almaktadır. Miyosen çökelleri ise; tabanda, temel kayaların üzerinde, açılal uyumsuzlukla bulunmakta ve üzerinde resifal özellikteki birimler bulunmaktadır. Üst Paleosen-Eosen yaşlı birimler bölgede Tersiyer örtü kayalardan oluşmaktadır. Bu birimlerin üzerine açık gri, krem renkli killi kireçtaşları, ince-orta kalınlıkta genellikle düzlemsel tabakalı Üst Paleosen - Alt Pliyosen birimleri yüzeylenmektedir. Gökçay Nehri ve çevresinde Pliyosen-Kuvaterner çökelleri çakıl, kum, kil ardalınlması ile görülmektedir (Acarlar vd., 2002). Heyelanlar genellikle ince tabakalı kireçtaşı, killi kireçtaşı, marn ardalınlmasından oluşan Miyosen yaşlı birimlerde yer almaktadır (Şekil 3).



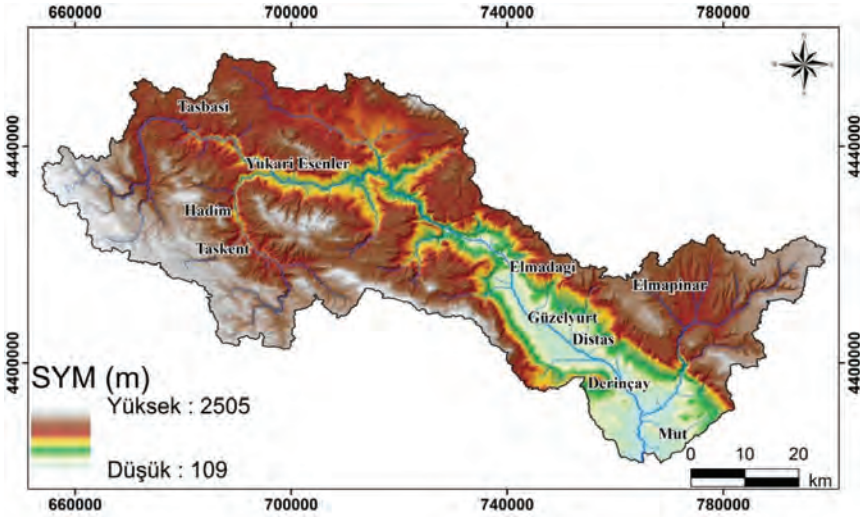
Şekil 3. Çalışma alanının jeoloji haritası (Acarlar vd., 2002).

CORINE (2009) arazi sınıflamasına göre; Gökçay havzasının % 74'lük kısmı açık alanlar, orman ve bitki örtüsünden, % 25'i ise yerleşim, ekili tarım alanlarından oluşmaktadır (Şekil 4). Heyelanların % 63'ü açık alanlar, orman ve bitki örtüsü sınıfları arasında bulunmaktadır.



Şekil 4. CORINE (2009) arazi kullanımı haritası.

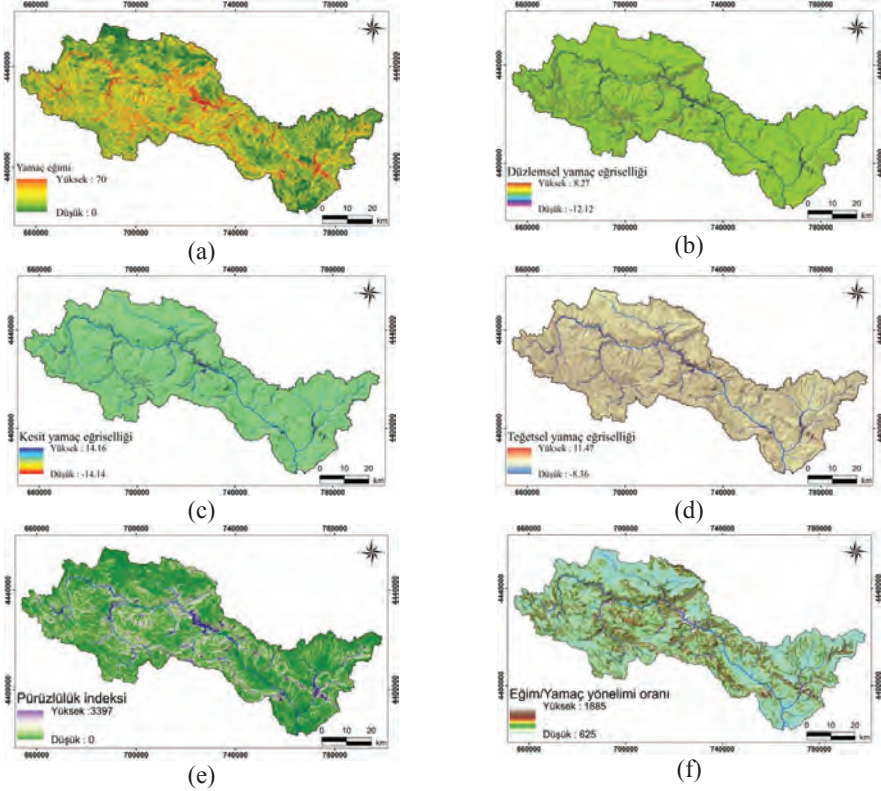
Heyelanları hazırlayıcı faktörler genel olarak jeoloji, topoğrafik ve çevresel faktörler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada başta jeoloji olmak üzere, arazi kullanımı, sayısal yükseklik modeli ve türev haritalarından olan yamaç eğimi, düzlemsel, kesit ve teğetsel yamaç eğrisellikleri, pürüzlülük indeksi, eğim/yamaç yönelimi oranı kullanılmıştır. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik değerleri 109 - 2505 metre aralığında değişmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli.

Heyelanların % 54'ü 450-1065 m. Arasındaki yüksekliklerde yer almaktadır. En yüksek eğim dereceleri havzanın orta ve yamaç iç kesimlerinde 70°'ye ulaşmakta olup heyelanlar ise genellikle bu bölgelerde yer almaktadır (Şekil 6a). Yamaç eğrisellikleri; iç bükey ve dış bükey yamaç şekilleri hidrolojik akış durumunu kontrol etmesi bakımından oldukça önemlidir. Yamaç eğrisellikleri değerlendirildiği doğrultuya göre kesit, düzlemsel ve teğetsel eğrilik olarak üçe ayrılmaktadır (Wilson ve Gallant, 2000). Bunlardan düzlemsel yamaç eğriselliği, belirli bir yükseklik boyunca yamaç yöneliminin değişimi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 6b). Azalan eğim yönünde akış çizgisindeki eğim

değişim oranı olan kesit yamaç eğriselliği Şekil 6c'de, düzlem yamaç şekli değerinin yamaç eğimi değeri ile çarpılmasından elde edilen teğetsel yamaç eğriliği haritası ise Şekil 6d'de verilmiştir. Pürüzlülük indeksi hesaplamalarında 5x5 piksellik pencereler kullanılmış ve her bir hücredeki yükseklik değerinin karekökü ile komşu hücreler arasındaki yükseklik farklarının çarpılmasıyla elde edilmiştir (Riley vd., 1999). Pürüzlülük indeksi değerleri engebeli alanlarda ve sırtlar boyunca yüksek değerlere ulaşmaktadır (Şekil 6e). Eğim/Yamaç yönelimi parametresi, her bir pikselin eğim değeri ile yamaçların yönlerinin 0-360° arasında doğrusal olarak sahip oldukları değerlerin oranlanmasıyla hesaplanmış olup; yamaçların iç kesimlerinde yüksek değerler düz alanlarda ise düşük değerler vermektedir (Şekil 6f).



Şekil 6. Çalışma alanına ait yamaç eğimi (a), düzlemsel (b), kesit (c) ve teğetsel (d), yamaç eğriliği, pürüzlülük indeksi (e), eğim/yamaç yönelimi oranı (f).

4. HEYELAN DUYARLILIK DEĞERLENDİRMESİ

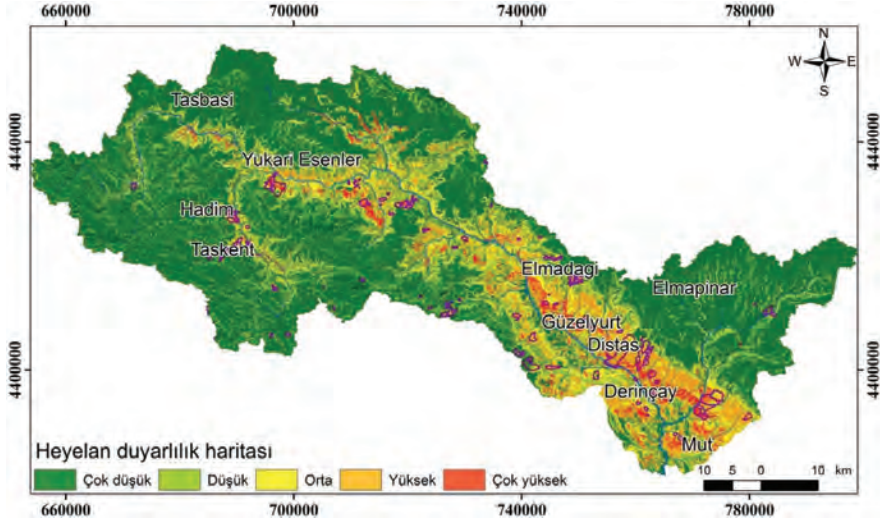
Heyelan duyarlılık haritaları; heyelan envanter haritaları ile heyelanları hazırlayıcı çevresel faktörlerin birlikte değerlendirilmesi ile ileride nerede heyelan olabileceğini olasılıksal olarak ifade etmektedir (Çan vd., 2009; Tekin 2014; Tekin vd., 2015). Duyarlılık haritaları genel olarak niceliksel ve niteliksel yöntemlere dayalı olarak bir çok yöntem ile elde edilebilmektedir (Corominas vd., 2014). Bu çalışmada verilerin yorumlanması ve veritabanları ile entegrasyon kolaylığı ile bir çok yöntemle göre avantajlı olması bakımından karar ağacı CHAID algoritması yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirmesi yapılmıştır. CHAID algoritmasıyla, veriler birbirine benzer alt sınıflara ayrılmaktadır. Her bir veri için kategoriler oluşturulur ve bölünme sonucu gruplaşan veriler, bir önceki sınıfın özeti şeklindedir. Kategoriler, anlamlı bir şekilde birleştirildikten sonra tablolar oluşturulur ve Ki-kare istatistikleri hesaplanır. Veriler birbirleriyle karşılaştırılıp, kategorilere göre alt sınıflara ayrılır. Alt

sınıflar, bağımsız bir şekilde tekrar analiz edilir, her bir veri kategorisinde bölünmeler oluşturularak Ki kare testindeki önemine göre tablolar oluşturulur. Böylece bağımlı değişken (heyelanlar) ile bağımsız değişkenler (çevresel değişkenler) arasındaki ilişkiler elde edilir (Haughton ve Oulabi, 1999, Althuwaynee vd., 2014, Althuwaynee vd., 2016). Karar ağaç yönteminde CHAID algoritması ile otomatik etkileşim algılama, kontrollü denetleme, ID3 algoritmaları arasındaki fark ise çoklu ağaçlar üretmesidir. Bir diğer avantajı ise CHAID algoritması hem sürekli hemde kategorik verileri sınıflama imkanı sunmaktadır.

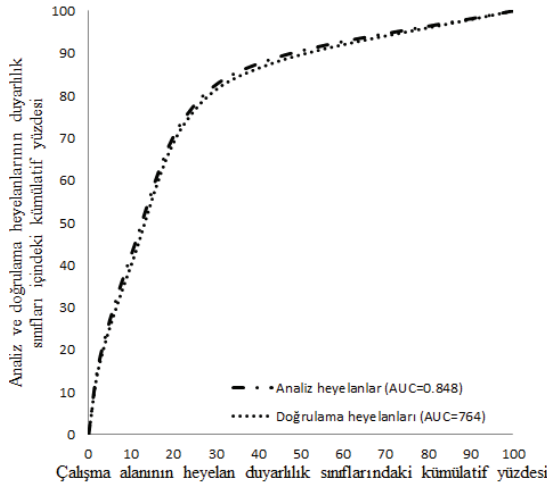
Göksu Nehri havzasının iki ana kolundan biri olan 4425 km²'lik alana sahip Gökçay Nehri havzasında, heyelanlar ve çevresel değişkenler kullanılarak oluşturulan çalışma alanına ait veri setinin, % 80 analiz ve % 20 doğrulama olmak üzere iki gruba ayrılması ile heyelan duyarlılık değerlendirmesi yapılmıştır. Oluşturulan Karar ağacı modeline, sayısal yükseklik modeli, Paleosen-Pliyosen karasal kırıntılılar ve karbonatlar, açık alanlar, Pliyosen-Kuvaterner çökelleri, düzlemsel yamaç eğriselliği, yamaç eğimi, kesit yamaç eğriselliği, teğetsel yamaç eğriselliği, pürüzlülük indeksi değişkenleri girmiştir. Karar ağaç modelinin derinliği 3 olup 179 düğüm noktası ve 130 terminal daldan oluşmaktadır (Çizelge 1). Karar ağacı yöntemi kullanılarak elde edilen duyarlılık haritası çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 sınıfta değerlendirilmiştir (Şekil 7). Duyarlılık haritasının performansı doğrulama ve analiz veri setlerinin başarı tahmin eğrileri ve alıcı işletim karakteristik eğrileri ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen heyelan duyarlılık haritasında çalışma alanının %22'si, analiz heyelanlarının % 75.42'si, doğrulama heyelanlarının ise % 73.55'i orta, yüksek ve çok yüksek duyarlı bölgelerde yer aldığı görülmüştür. Alıcı işletim karakteristik eğrisi altında kalan alan analiz ve doğrulama verisetlerinde sırasıyla 0.848 ve 0.764 olarak elde edilmiştir (Şekil 8).

Çizelge 1. Karar ağacı modeli genel özellikleri.

	Algoritma	CHAID
	Bağımlı değişken	Heyelan
Model özellikleri	Bağımsız değişkenler	Jeoloji haritası, Arazi kullanımı, sayısal yükseklik modeli, yamaç eğimi, yamaç eğrisellikleri, pürüzlülük indeksi, eğim/yamaç yönelimi oranı,
	Doğrulama	Doğrulama seti
	En yüksek ağaç derinliği	3
	En yüksek düğüm sayısı	200
	En düşük terminal dal sayısı	50
		Modele giren değişkenler
Model çıktıları	Düğüm sayısı	179
	Terminal dal sayısı	130
	Derinlik	3



Şekil 7. Çalışma alanına ait heyelan duyarlılık haritası.



Şekil 8. Heyelan duyarlılık haritasının başarı-tahmin eğrileri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Göksu Nehri havzasının alt havzalarından biri olan 4425 km² büyüklüğünde Gökçay havzasında karar ağacı CHAID algoritması yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirmesi yapılmıştır. Karar ağacı analizi sonucu 179 düğüm noktası ve 130 dal oluşmuştur ve Pliyosen karasal kıvrıntılar ve karbonatlar, açık alanlar, Pliyosen-Kuvaterner çökelleri, sayısal yükseklik modeli, yamaç eğimi, yamaç eğrisellikleri, pürüzlülük indeksi parametreleri heyelan oluşumunda etkili parametreler olarak ortaya çıkmaktadır. Elde edilen heyelan duyarlılık haritası performans değerlendirmeleri sonucu, heyelanların büyük kısmı yüksek-çok yüksek duyarlı bölgelerde yer almaktadır. Bu çalışma ile elde edilen heyelan duyarlılık haritası, bölgesel ölçekte heyelan olaylarını kontrol eden çevresel değişkenler

ile heyelanlar arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde ve heyelanlardan kaynaklanan zararların azaltılmasına yönelik yapılacak çalışmalara önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Acarlar, M., Afşar, Ö.P., Akarsu, B., Akay, E., Akbulut, A., Aktaş, İ., Akyürek, B., Arbaş, A., Ayan, T., Bakarihan, B., Baydar, O., Bedi, Y., Bilgin, A.Z., Birgili, S., Bölükbaşı, A.S., Bulduk, A., Çakmakoğlu, A., Çelik, M.B., Cetin, F., Çörekçiöglü, E., Dalkılıç, H., Demirci, A.R., Doğan, O.Z., Dumont, J.K., Dupoux, B., Ekmekçi, E., Elibol, E., Erdoğan, B., Ergin, A., Esentürk, K., Gedik, A., Gedik, I., Gök, A., Gönenç, O., M.Z., Gözler, Granit, S., Gutnic, M., Gül, M.A., Günay, Y., Güner, E., Hakyemez, Y., Iztan, H., Kadir, S., Kalafatçıoğlu, A., Kar, H., Kara, I., Kaerataş, M., Kaynar, A., Kengil, R., Kerey, E., Keskin, O., Korkmaz, S., Korucu, M., Kuru, K., Kurt, Z., Lheureux, A., Marcoux, J., Metin, S., Metin, T., Metin, Y., Monod, O., Öcal, H., Özcan, A., Özgönül, E., Özgül, N., Öztürk, E.M., Öztürk, Z., Özyardımcı, N., Poisson, A., Reuber, I., Selim, M., Selvi, Y., Şengün, M., Sönmez, I., ve Sözeri, Ş., 2002. 1/500 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Konya paftası, MTA Genel Müdürlüğü. Ankara.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., and Lee, S., 2016. A novel integrated model for assessing landslide susceptibility mapping using CHAID and AHP pair-wise comparison. *International Journal of Remote Sensing*, 37(5), 1190-1209, doi:10.1080/01431161.2016.1148282.
- Althuwaynee, O.F., Pradhan, B., Ahmad, N., 2014. Landslide susceptibility mapping using decision-tree based Chi-squared automatic interaction detection (CHAID) and Logistic regression (LR) integration. 7th IGRSM International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition 20.
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitalakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., and Smith, J.T., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73, 209-263.
- Çan, T. Duman, T.Y. Çil, E. ve Mazman, T. 2009. Mersin Merkez ve Erdemli ilçeleri kuzeyinin Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanlı heyelan envanter, duyarlılık, olası tehlike ve risk değerlendirmesi. TÜBİTAK-ÇAYDAG:107y138, Adana.
- Çivi, A., Akgündüz, E., Kalaycı, K., İnan, Ç., Sarca, E., Toru, E., 2009. CORINE (Coordination of Information on the Environment) projesi. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 02-06 Kasım 2009, İzmir.
- Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çan T., Nefeslioğlu, H.A. Hamzaçebi, S. Elmacı, H. Durmaz S. ve Çörekçiöglü, Ş. 2009. "Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1/500000 ölçekli Konya Paftası," MTA Özel Yayınlar Serisi-22, Ankara, 22 s.
- Haughton D. And Oulabi S., 1999. "Direct Marketing Modeling With Cart and Chaid", *Journal Of Direct Marketing*, C. 11, S. 4, 1999 S. 42-52.
- Özdoğan, M. 2004. Çevrimsel Dizilime Bir Örnek: Mut havzasının Miyosen Stratigrafisi, Adana Havzası ile İlişkisi ve Paleocoğrafik Gelişimi. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi*, 29: 77-95.
- Riley, S. J, S. D., DeGloria and R. Elliot, 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5(1-4).
- Tekin S., Çan T., Mazman T., Duman T.Y., 2015. "Doğu Akdeniz Bölgesinin Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi", *Mühendislik Jeolojisi, Trabzon, Türkiye*, 3-5 Eylül 2015, ss.137-144.
- Tekin, S., 2014. Kadirli-Aslantaş (Osmaniye) Dolaylarının CBS Tabanlı Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 106, Adana.
- Wilson, J. P. and Gallant, J. C., 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. John Wiley and Sons: New York.

**Frekans Oranı Metodu Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritası
Hazırlanması: Gölpazarı (Bilecik, Güney Marmara) Örneği**
*Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio Method: An Example from
Gölpazarı (Bilecik, South Marmara)*

E. Sayın^{1*}, B. Balaban¹, M. M. Becer²

¹ Bilecik Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Bahçelievler Mah. Necmettin Şener Caddesi, No:1
Merkez / BİLECİK

² Çorum Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Mimar Sinan Mahallesi İnönü Caddesi No:153
Merkez / ÇORUM

(*sn_erdogan@hotmail.com)

ÖZ: Bilecik ili, doğal afetlerde yerleşim alanlarının etkilenmesi açısından Türkiye sıralamasında son sıralarda bulunsa da, heyelanlar doğal afet yönünden ili büyük ölçekte etkilemektedir. Son zamanlarda, yerleşim yerleri dışında, sanayi ve mühendislik yapılarına yönelik yatırımların artması, fabrika ve sanat yapılarının artması heyelan yönünden bölgenin detaylı incelenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada; Gölpazarı ilçe sınırlarını kapsayacak şekilde, geçmiş yıllarda meydana gelen heyelanlar (MTA, Afet Geçmiş İnanteri vb.) araştırılmış ve ilçenin heyelan duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Heyelan duyarlılık haritası yapımında model olarak frekans oranı metodu uygulanmıştır. İlk olarak; heyelanların arazide gözlemeleme şeklinde doğrulamaları yapılmış, heyelanların başlangıç ve kayma bölgelerini kapsayacak şekilde sınırları çizilerek, ilçe sınırlarında kalan 211 adet heyelan üzerinden, sayısal envanter haritası oluşturulmuştur. 211 heyelanın 1/5'i 42 heyelan sına ma verisi için ayrılmış, modelleme 169 heyelan üzerinden yapılmıştır. Sonrasında CBS yardımı ile raster girdi parametre haritaları üretilmiş ve üzerinden duyarlılık analizleri yapılmıştır. Son olarak 42 heyelanda duyarlılık seviyeleri üzerinden sına ma yapılmış ve modelin doğruluğu hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Frekans oranı, Gölpazarı, Envanter, CBS, Heyelan Duyarlılık Haritası

ABSTRACT: Although Bilecik Province is located in the last row of Turkey in terms of the impact of settlements on natural disasters, landslides affect the province in large scale due to natural disasters. Recently, except for settlements, the increase in investment in industrial and engineering structures, the increase in factories and art structures reveals the necessity of a detailed examination of the region in terms of landslide. In this study; The landslides (MTA, Disaster History Inventory, etc.) that have occurred in the past years have been researched and the landslide susceptibility map of the province has been prepared so as to cover the Gölpazarı District borders. The frequency ratio method is applied as a model in the construction of the landslide susceptibility map. Firstly, Landslides were inspected in the form of observations in the form of landslides and bounded so as to cover the starting and slipping areas of the landslides and a digital inventory map was created on 211 landslides remaining on the boundaries of the districts. 1/5 of the 211 landslides were reserved for 42 landslide test data, and the modeling was carried out over 169 landslides. Raster input parameter maps were then generated with the help of GIS and sensitivity analyzes were performed. Finally, the sensitivity levels were calculated and the accuracy of the model was calculated.

Keywords: Frequency Ratio, Gölpazarı, Inventory, GIS, Landslide Susceptibility Map

1. GİRİŞ

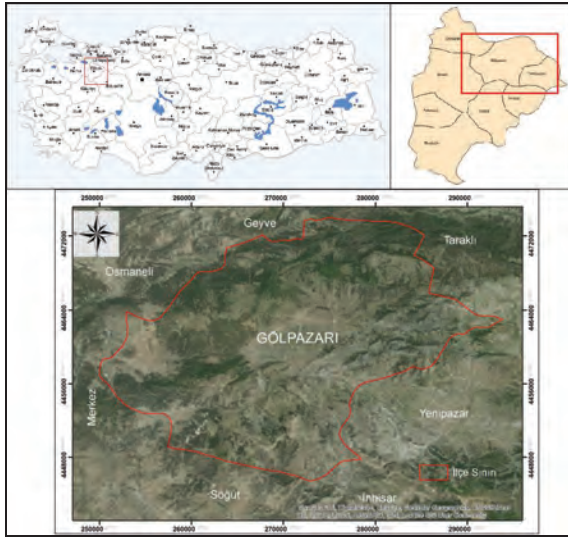
Heyelanlar, tüm Dünya'da olduğu gibi Türkiye'de de can ve mal kayıplarına neden olan doğal afetlerin başında gelmektedir (Akıncı vd., 2011). Literatürde farklı tanımlamaları yapılan heyelanlar, genel anlamda yerel jeolojik, hidrolojik, jeomorfolojik koşulların ürünü olarak bitki örtüsü, arazi kullanımı, insan aktiviteleri tarafından etkilenen, yağış ve sismik olayların sıklığı ve şiddeti tarafından kontrol edilen yapay ve doğal şev duraysızlıklarıdır (Soeters vd., 1996). Ani ve şiddetli yağışların ve depremlerin yanı sıra, gerekli jeoteknik çalışmalar yapılmadan yerleşime açılan yamaçlardaki yapı

inşası, değişik amaçlı patlatma ve kazı çalışmaları, doğal bitki örtüsünün tahrip edilmesi gibi nedenler herhangi bir alanda meydana gelen heyelanları tetiklemektedir (Dağ vd., 2012).

Heyelan duyarlılık analizinin temel amacı, tehlikeli ve riskli alanların tespit edilerek heyelanın etkilerini azaltmaktır (Reis vd., 2009). Coğrafi Bilgi Sistemleri ile heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan metotlardan birisi de Frekans Oranı metodudur (Lee ve Evangelista, 2005; Lee ve Sambath, 2006; Akgün vd., 2008; Yılmaz, 2009; Jadda vd., 2009; Reis vd., 2009; Erener ve Düzgün, 2010). Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının, Bütünleşik Afet Tehlike Haritaları Hazırlanması Projesi kapsamında heyelan duyarlılık analizleri; Bilecik il sınırının tamamını kapsayacak şekilde İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Bu çalışmada, büyük bir alanların yanı sıra küçük alan sınırları içerisinde yapılacak heyelan duyarlılık analizlerinin modelleme ve analiz açısından daha doğru sonuçlar doğuracağı öngörülmüştür. Heyelan oluşumu açısından zengin bir geçmişi olan Gölpazarı ilçesi seçilmiştir. Frekans oranı metodu yöntemi kullanılarak ilçenin heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı olarak seçilen Gölpazarı ilçesinin toplam yüzölçümü yaklaşık 690 km²'dir. Gölpazarı ilçesi 6°'lik koordinat sisteminde UTM (Universal Transverse Mercator) projeksiyonunda, 36°'lik dilimde, 249940-293850 doğu ile 4445450-4473990 kuzey koordinatları arasında yer almaktadır. (Şekil 1).



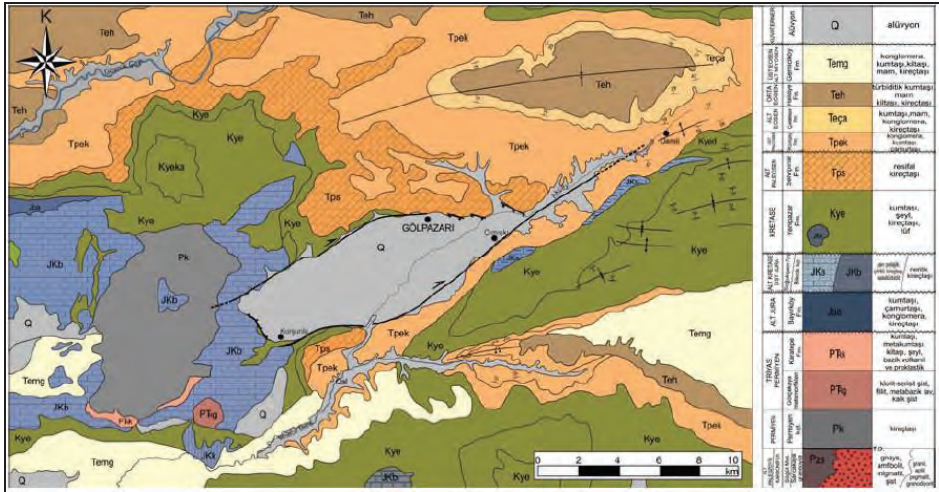
Şekil 1. Çalışma Alanı Olarak Seçilen Gölpazarı İlçesi Yer Bulduru Haritası.

Bilecik ili Merkez ilçesinin doğusunda yer alan ilçenin, kuzeyinde Sakarya iline bağlı Geyve ve kuzeydoğusunda Taraklı ilçeleri, kuzeybatısında Osmaneli, doğusunda Yenipazar, güneydoğusunda İnhisar, güneyinde Söğüt ilçeleri bulunmaktadır.

2.1. İnceleme Alanı Jeolojisi

Çalışma alanı ve yakın çevresinin en yaşlı kayaç topluluğu Sakarya Zonu'na ait Paleozoik yaşlı (Duru vd., 2002) Söğüt Metamorfitleridir. Bunlar, granit ve granitoid kompleksinden oluşan Karbonifer yaşlı (Çoğulu vd., 1965) Sarıcakaya granitoidi tarafından kesilmektedir (Duru vd., 2002). Bu temel kayaçlar, Pontidler ve Anatolid-Torid kuşakları arasında Sakarya Zonu'nun alt seviyelerinde

yer alan, Permo-Triyas yaşlı Karakaya grubunu oluşturan Gökçekaya metamorfittleri ve Karatepe Formasyonu ile tektonik dokanaklıdır (Gedik ve Aksay, 2002). Permo-Triyas yaşlı birimler üzerine uyumsuz olarak Alt Jura yaşlı kırmızı renkli bol fosilli kumtaşlarından oluşan Bayırköy formasyonu gelmektedir. Bayırköy formasyonu üzerinde Üst Jura-Alt Kretase yaşlı Soğukçam formasyonu ve Bilecik kireçtaşları bulunur. Bilecik kireçtaşları, Geç Jura'da bir neritik karbonat alanı olan Sakarya kıtasının karakteristik ürünleridir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Erken Kretase'de ise ortamın hızla derinleştiği çörtlü kireçtaşlarının varlığından anlaşılmaktadır. Bu litolojiler üzerine Üst Kretase-Paleosen yaşlı yamaç-havza çökellerinden oluşan ve üst seviyelerinde sığlaşan bir denizel ortamı temsil eden genel olarak grimsi, yeşil renkli marn ve beyaz, bej, kırmızı, pembe renkli, ince tabakalı mikritik kireçtaşı ile az miktarda konglomeradan oluşan Yenipazar formasyonu gelir (Duru vd., 2002). Formasyon üste doğru farklı lokasyonlarda resifal kireçtaşlarından oluşan Selvipınar (Alt Paleosen) ile karasal çökellerden oluşan Kızılçay (Paleosen) formasyonları sığ denizel ortam ürünlerini içeren Çataltepe (Alt Eosen) ve Halidiye (Orta Eosen) formasyonlarıyla geçişlidir. Karbonat, kıltaşı, şeyl ve kumtaşı litolojisinden oluşan Halidiye formasyonu üzerine konglomera, kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı içeren Gemiciköy formasyonu (Üst Eosen - Alt Miyosen) uyumsuzlukla gelmiştir (Gedik ve Aksay, 2002). Halidiye formasyonu ile paralel uyumsuzluk gösteren birim, üstte havza dolgusunu temsil eden Kuvaterner yaşlı birimler tarafından açılal uyumsuzlukla örtülür (Gürbüz ve Seyitoğlu, 2014).



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Duru vd. 2002'den değiştirilerek alınmıştır). Haritadaki kıvrım eksen verileri Tuncer, 2004'ten alınmıştır (Gürbüz ve Seyitoğlu, 2014).

3. ÇALIŞMA YÖNTEMİ VE ANALİZ

Gölpazarı ilçesinin heyelan duyarlılık haritasının üretilmesinde kullanılan parametre haritalarından; Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) haritası 1/25000 ölçekli topografik haritadan, baki, eğim, yamaç şekli haritaları SYM' den üretilmiştir. Jeoloji parametre haritası olarak MTA'dan temin edilen sayısal jeoloji haritası kullanılmıştır (Duru vd., 2002). Analiz için üretilen tüm haritaların proje koordinat sistemleri; WGS_1984_UTM_Zone_36N olup; raster haritaların piksel boyutları 25x25 tir. Analizlerde frekans oranı metodu kullanılmıştır.

$$Fr = a/b$$

(1)

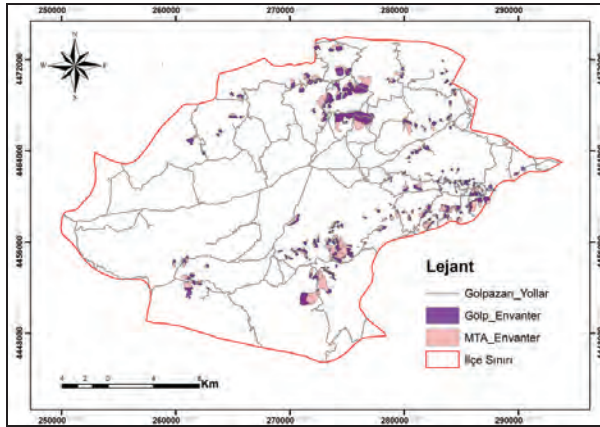
Bu eşitlikte; Fr, frekans oranını, a, parametre alt grubundaki heyelanlı piksel sayısının toplam heyelanlı piksel sayısına oranını, b, parametre alt grubundaki piksel sayısının toplam piksel sayısına oranını ifade etmektedir.

$$\text{NFR} = (\text{Fr} / \text{EYFr}) * 100 \quad (2)$$

Bu eşitlikte; NFR, frekans oranının yüzdesel dağılımını, Fr, frekans oranını, EYFr, parametre grubundaki en yüksek frekans oranını ifade etmektedir.

3.1. Sayısal Heyelan Envanter Haritası ve Raster Parametre Haritalarının Oluşturulması

Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinin ilk adımı, geçmişte meydana gelen heyelanlar hakkında bilgi edinmektir. Çünkü gelecekteki heyelanların şimdiki ve geçmişte olmuş heyelanlarla benzer şartlar altında gerçekleşebileceği varsayılmaktadır (Lee vd., 2004; Yılmaz, 2009; Jadda vd., 2009). Heyelan envanter haritaları, arazideki mevcut heyelan alanlarının alansal dağılımı ve özelliklerinin gösterildiği haritalardır. Bu haritalar, arazide fark edilebilir heyelanları göstermektedir (Çevik ve Topal, 2003; Yalçın, 2007; Reis vd., 2009). Bu çalışmada Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından temin edilen ve MTA Genel Müdürlüğüne üretilen sayısal heyelan envanter haritası kullanılmıştır (Duman vd., 2005). İlçe sınırları içerisinde bulunan 211 adet heyelan, arazi ve uzaktan algılama yöntemleri ile gözlenmiş olup; her bir heyelanın başlangıç (taç) bölgesi ve yayılma alanının bir kısmını kapsayacak şekilde (topuk başlangıç kısmı ile taç bölgesi arasında kalan alan) poligon olarak kapatılmış ve analiz için envanter haritası oluşturulmuştur. Yapılan analizdeki amaç heyelan duyarlılığı gösterebilecek başlangıç bölgelerinin belirlenmesi olduğundan, heyelanın durağan hale geldiği topuk kısımlarının envantere alınarak analize sokulmasının analiz doğruluğunu azaltacağı düşünülmektedir. Çalışma alanının içerisindeki MTA heyelan envanteri ile analiz için oluşturulan envanter haritası Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Çalışma Alanı İçerisindeki Heyelan Envanter Haritası (Duman vd., 2005).

Parametre haritaları seçiminde; Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından 2015 yılında yayımlanan Bütünleşik Tehlike Haritalarının Hazırlanması Heyelan Temel Kılavuzda belirtilen parametre haritalarından; eğim haritası en düşük eğim derecesi 0 ve en yüksek eğim derecesi 58 aralığında, litoloji parametre haritası 13 ayrı litolojik birimde gruplandırılarak, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) en düşük 102 m ve en yüksek 1285 m aralığında, baki haritası 0 ve 360 derece aralığında 8 sınıflı, eğrilik (yamaç şekli) haritası -8/+8 aralığında 5 sınıflı üretilmiştir.

3.2. Sınama ve Analiz Girdi Heyelanlarının Seçimi

Sınama verileri seçiminde, envanterdeki 211 heyelanın 1/5 'i (42 heyelan) sınama verisi için ayrılmıştır. Geriye kalan 169 heyelan analize sokulmuştur. Sınama verileri belirlenirken; analizin önemli iki parametre haritası olan eğim ve litoloji ile tüm envanterdeki heyelanlar ilişkilendirilmiş ve CBS ortamında sınıflandırılmıştır. Tüm heyelanların, belirlenen parametre alt gruplarındaki piksel

dağılımına göre, o alt gruptan sınama için seçilmesi gereken heyelan sayıları belirlenmiş (Çizelge 1), her biri haritada kontrol edilerek sınama heyelanları seçilmiştir. Burada amaç; sınama verilerinin herhangi bir parametre alt grubunda yığılmasını engellemek ve analiz girdi verilerinde de bir alt grubun fazla puan alması ile birlikte modeli etkilemesini engellemektir.

Çizelge 1. Sınama ve Analiz Girdi Verilerinin Seçilmesi İçin Uygulanan Model.

SLP (Eğim) (derece)	Heyelanlı Alanlardaki Toplam PS		Tüm Heyelanlı alandaki Alt Grup PS		a	Alt Gruplarda Heyelanlı PS Yüzdesi %	Envanterdeki Tüm Heyelan Sayısı	Tüm Sınama Verisi Sayısı	Alt Gruptaki Tüm Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)	Alt Gruptaki Sınama Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)
	Toplam PS	Heyelanlı PS	Alt Grup PS	Heyelanlı PS	(Alt Grp Ps/Top Ps)	Yüzdesi %	Tüm Heyelan Sayısı	Tüm Sınama Verisi Sayısı	Alt Gruptaki Tüm Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)	Alt Gruptaki Sınama Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)
0-10(1)	27084	3861		0.14	14	211	42	30	6	
10-25(2)	27084	20807		0.77	77	211	42	162	32	
25-90(3)	27084	2416		0.09	9	211	42	19	4	
LİTOLOJİ	Heyelanlı Alanlardaki Toplam PS		Tüm Heyelanlı alandaki Alt Grup PS		a	Alt Gruplarda Heyelanlı PS Yüzdesi %	Envanterdeki Tüm Heyelan Sayısı	Tüm Sınama Verisi Sayısı	Alt Gruptaki Tüm Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)	Alt Gruptaki Sınama Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)
	Toplam PS	Heyelanlı PS	Alt Grup PS	Heyelanlı PS	(Alt Grp Ps/Top Ps)	Yüzdesi %	Tüm Heyelan Sayısı	Tüm Sınama Verisi Sayısı	Alt Gruptaki Tüm Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)	Alt Gruptaki Sınama Hey Verisi Dağılımı (Piksel Yüzdelerine Göre)
0 (Eski Alüvyon)	27084	320		0.01	1	211	42	2	0	
1 (Cürtlü Kireçtaşı, Killi Kireçtaşı)	27084	156		0.01	1	211	42	2	0	
2 (Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı)	27084	9644		0.36	36	211	42	76	15	
3 (Çakıtaşı-Kumtaşı-Çamurtaşı)	27084	13698		0.51	51	211	42	108	22	
4 (Riyolit)	27084	911		0.03	3	211	42	6	1	
5 (Yamaç Malozu-Birikinti Konisi)	27084	571		0.02	2	211	42	4	1	
6 (Migmatit-Gneys)	27084	6		0.00	0	211	42	0	0	
7 (Olistofron)	27084	14		0.00	0	211	42	0	0	
8 (Alüvyon, Göl)	27084	0		0.00	0	211	42	0	0	
9 (Kireçtaşı)	27084	1764		0.07	7	211	42	15	3	
10 (Sist)	27084	0		0.00	0	211	42	0	0	
11 (Volkanit Çökel Kaya)	27084	0		0.00	0	211	42	0	0	
12 (Traverten)	27084	0		0.00	0	211	42	0	0	
13 (Granit)	27084	0		0.00	0	211	42	0	0	

3.3. Analiz Yapılması ve Gölpazarı Heyelan Duyarlılık Haritası

Duyarlılık analizinde yapılan modellemede, her bir parametre grubundaki heyelanlı piksel sayılarının dağılımı ile o parametre alt grubundaki piksel sayılarının oranına bakılarak belirlenen FR değerleri, parametredeki en yüksek FR değeri ile oranlanarak en yüksek 100 puan üzerinden değerlendirilmiştir (Çizelge 2).

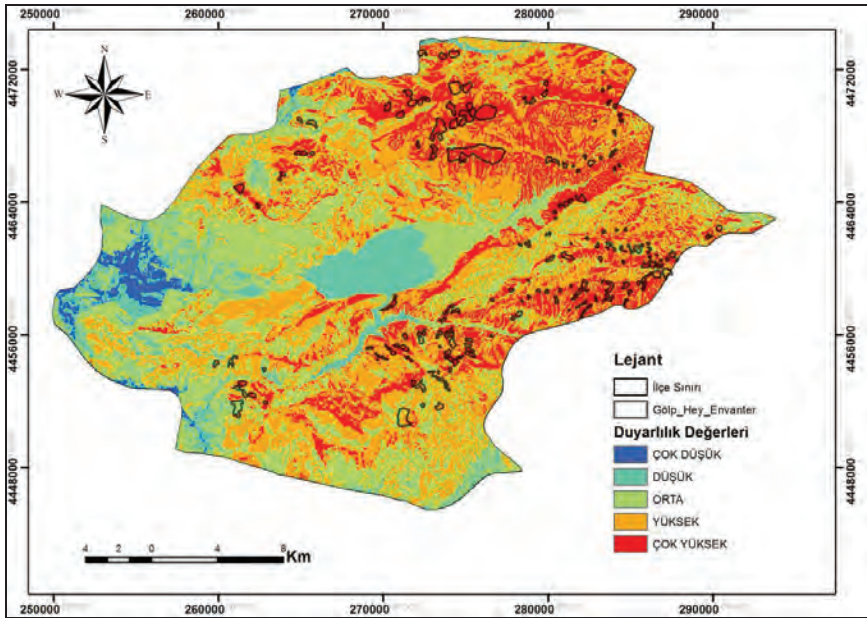
Modellemeye bakıldığında; analizi etkileyen en önemli parametrelerden biri olan litoloji parametresinde en yüksek puanı çakıtaşı-kumtaşı-çamurtaşı ardalanmalı birimlerin bulunduğu alanların aldığı, sırasıyla yamaç molozu-birikinti konisi, kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı ardalanmalı birimlerin de yüksek puanlar aldığı, kireçtaşı, riyolit, eski alüvyon birimlerin de puan aldığı ve heyelan başlangıç bölgelerini etkilediği görülmüştür. Bakı parametresindeki en yüksek değeri 337.5-22.5 derece aralığı, yani kuzeye bakan yamaçlar almaktadır. Yamaç şekli parametresinde ise en yüksek değeri -1 ila -0.5 derece aralığının, eğim parametresinde ise 10-25 derece arasında en yüksek değeri aldığı tespit edilmiş olup, yükseklik parametresine bakıldığında heyelanların neredeyse tamamına yakınının 530-1285 m aralığında olduğu anlaşılmaktadır.

Parametre aralıklarına göre aldığı puanlar modellendikten sonra, NFR değerlerine göre her bir parametre haritası CBS ortamında tekrar sınıflanmış ve 5 adet duyarlılık parametre haritaları üretilmiştir. Her bir duyarlılık parametre haritası CBS ortamında aritmetik toplanmış ve toplam duyarlılık haritası elde edilmiştir.

Çizelge 2. Heyelan Duyarlılık Analizi Parametre Alt Grupları Frekans Oranları.

ASP (Yamaç Yönelimi Baki) (derece)	Heyelanlı Alanlardaki Toplam PS		Heyelanlı alandaki Alt Grup PS	Alandaki Toplam PS	Alt Gruptaki PS	a	b	FR	NFR
	Alanlardaki Toplam PS	Heyelanlı alandaki Alt Grup PS							
1(0 - 22.5 /337.5-360)	25044	5459	1101261	164397	0.22	0.15	1.46	100	
2(22.5-67.5)	25044	2536	1101261	95772	0.10	0.09	1.16	80	
3(67.5-112.5)	25044	1488	1101261	92202	0.06	0.08	0.71	49	
4(112.5-157.5)	25044	1729	1101261	118774	0.07	0.11	0.64	44	
5(157.5-202.5)	25044	3869	1101261	158307	0.15	0.14	1.07	74	
6(202.5-247.5)	25044	2482	1101261	152250	0.10	0.14	0.72	49	
7(247.5-292.5)	25044	2820	1101261	156886	0.11	0.14	0.79	54	
8(292.5-337.5)	25044	4661	1101261	162673	0.19	0.15	1.26	86	
CRV (Yamaç Şekli) (derece)	Heyelanlı Alanlardaki Toplam PS		Heyelanlı alandaki Alt Grup PS	Alandaki Toplam PS	Alt Gruptaki PS	a	b	FR	NFR
Alanlardaki Toplam PS	Heyelanlı alandaki Alt Grup PS								
-8 <-1.0 (1)	25044	208	1101260	24485	0.01	0.02	0.37	32	
-1.0-0.5(2)	25044	2288	1101260	85339	0.09	0.08	1.18	100	
-0.5-0.5(3)	25044	20877	1101260	882018	0.83	0.80	1.04	88	
0.5-1(4)	25044	1519	1101260	90624	0.06	0.08	0.74	62	
1-8(5)	25044	152	1101260	18794	0.01	0.02	0.36	30	
SLP (Eğim) (derece)	Heyelanlı Alanlardaki Toplam PS		Heyelanlı alandaki Alt Grup PS	Alandaki Toplam PS	Alt Gruptaki PS	a	b	FR	NFR
Alanlardaki Toplam PS	Heyelanlı alandaki Alt Grup PS								
0-10(1)	25044	3551	1101261	446313	0.14	0.41	0.35	23	
10-25(2)	25044	19275	1101261	553144	0.77	0.50	1.53	100	
25-58(3)	25044	2218	1101261	101804	0.09	0.09	0.96	63	
SYM (Yükseklik) (metre)	Heyelanlı Alanlardaki Toplam PS		Heyelanlı alandaki Alt Grup PS	Alandaki Toplam PS	Alt Gruptaki PS	a	b	FR	NFR
Alanlardaki Toplam PS	Heyelanlı alandaki Alt Grup PS								
100-250(1)	25044	0	1101261	81733	0.00	0.07	0.00	0	
250 - 530(2)	25044	2360	1101261	227086	0.09	0.21	0.46	36	
530 - 1285(3)	25044	22684	1101261	792442	0.91	0.72	1.26	100	
LİTOLOJİ	Heyelanlı Alanlardaki Toplam PS		Heyelanlı alandaki Alt Grup PS	Alandaki Toplam PS	Alt Gruptaki PS	a	b	FR	NFR
Alanlardaki Toplam PS	Heyelanlı alandaki Alt Grup PS								
0 (Eski Alüvyon)	25044	296	1101214	58112	0.01	0.05	0.22	12	
1 (Çörtülü Kireçtaşı, Killi Kireçtaşı)	25044	145	1101214	15906	0.01	0.01	0.40	21	
2 (Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı)	25044	9174	1101214	307357	0.37	0.28	1.31	69	
3 (Çakıltaşı-Kumtaşı-Çamurtaşı)	25044	12747	1101214	294298	0.51	0.27	1.90	100	
4 (Riyolit)	25044	657	1101214	73794	0.03	0.07	0.39	21	
5 (Yamaç Molozu-Birikinti Konisi)	25044	328	1101214	9113	0.01	0.01	1.58	83	
6 (Migmatit-Gnays)	25044	6	1101214	5712	0.00	0.01	0.05	2	
7 (Olistostrom)	25044	14	1101214	7321	0.00	0.01	0.08	4	
8(Alüvyon, Göll)	25044	0	1101214	49160	0.00	0.04	0.00	0	
9 (Kireçtaşı)	25044	1677	1101214	258712	0.07	0.23	0.29	15	
10 (Sist)	25044	0	1101214	2817	0.00	0.00	0.00	0	
11 (Volkanit Çökel Kaya)	25044	0	1101214	1064	0.00	0.00	0.00	0	
12 (Traverten)	25044	0	1101214	198	0.00	0.00	0.00	0	
13 (Granit)	25044	0	1101214	17650	0.00	0.02	0.00	0	

Toplam duyarlılık haritası en yüksek ve en düşük puan aralığında 5 eşit parçaya bölünerek Gölpazarı Heyelan Duyarlılık Haritası oluşturulmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Frekans Oranı Metodu Kullanılarak Oluşturulan Gölpazarı Heyelan Duyarlılık Haritası.

Duyarlılık haritası incelendiğinde; çok yüksek ve yüksek duyarlı alanların ilçe yüzölçümünün % 59.63 (411.38 km²)'ünü oluşturduğu, % 29.27 (201.97 km²)'sinin orta, % 9.26 (63.89 km²)'sının düşük, % 1.84 (12.70 km²)'ünün de çok düşük duyarlı alanlarda kaldığı görülmektedir.

Son olarak sınama için ayrılan 42 heyelan alansal sınırları duyarlılık haritası ile karşılaştırılarak, çok yüksek ve yüksek alanların sınama piksel sayılarının toplamı, tüm sınama piksel sayılarına göre oranlanmış ve analiz doğruluğu %91.36 olarak bulunmuştur. Modellemede veri olarak MTA heyelan envanteri kullanılmıştır. Ayrıca modelde kullanılmayan fakat ilçe içerisinde oluşumu ve yerleri bilinen Bedi ve Taşcahiler köylerindeki heyelanların da çok yüksek ve yüksek duyarlı alanlarda kaldığı gözlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, Gölpazarı ilçesinin heyelan duyarlılık haritasının üretilmesine yönelik çalışmaları içermektedir. Çalışmada heyelan duyarlılık haritası, Frekans Oranı Metodu uygulanarak üretilmiştir. Uygulamada heyelanı etkileyen 5 faktör dikkate alınmıştır. Duyarlılık haritası; "çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek" duyarlı alanlar olmak üzere 5 şekilde sınıflanmıştır.

Yapılan analizde doğru parametre ve model parametre aralıklarının belirlenmesinin yanı sıra, envanter olarak kapatılan heyelanların başlangıç ve topuk gerisinde kalan kısımlarının alınmasının analiz doğruluğunu olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Analizin doğruluğunu olumlu yönde etkileyen bir başka etken ise sınama verisi seçiminin rastgele yapılmaması ve bir model doğrultusunda kontrol edilerek seçilmesidir. Tüm bu etkenler birlikte değerlendirildiğinde analizin doğruluğu % 91.36 olarak elde edilmiştir.

Gölpazarı ilçe yüzölçümünün % 59.63 (411.38 km²) yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlarda kaldığı, % 29.27 (201.97 km²)'sinin orta, % 9.26 (63.89 km²)'sının düşük, % 1.84 (12.70 km²)'ünün de çok düşük duyarlı alanlarda kaldığı görülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AFAD, 2015. Bütünleşik Tehlike Haritalarının Hazırlanması Heyelan- Kaya Düşmesi Temel Kılavuz, Ankara-Türkiye
- Akgün, A., 2007. Ayvalık ve Yakın Çevresinin Erozyon ve Heyelan Duyarlılığının Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı İncelenmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Akgün, A., Dağ, S., Bulut, F., 2008. Landslide Susceptibility Mapping For A Landslide prone Area (Findikli, NE of Turkey) By Likelihood- Frequency Ratio And Weighted Linear Combination Models, *Environmental Geol.*, 54(6), 1127-1143
- Akıncı, H., Doğan, S., Kılıçoğlu, C., 2011. Frekans Oranı Metodu Kullanılarak Samsun İl Merkezinin Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara-Türkiye, 1-8.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., Kanno, T., 2005. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based Susceptibility Mapping with Comparisons of Results from Two Methods and Verifications, *Engineering Geology*, 81, 432-445.
- Çevik, E., Topal, T., 2003. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping for a Problematic Segment of the Natural Gas Pipeline, Hendek (Turkey), *Environmental Geology*, Vol. 44, No. 8, 949-962.
- Çoğulu, H. E., Delaloye, M. ve Chessex, R., 1965. Sur l' age de Quelques roches plutoniques acides dans la region d'Eskişehir- Turquie: *Arch. Sci. Geneve*, v. 18, p. 692-699.
- Dağ, S., Bulut, F., 2012. Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanmasına Bir Örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 36 (1), 35-61.
- Dai, F.C., Lee, C.F., 2002. Landslide Characteristics and Slope Instability Modeling Using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213-228.
- Duman, T.Y., Emre, Ö., Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Keçer, M., Doğan, A., Durmaz, S., Ateş, Ş., 2005. Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1/500000 ölçekli Zonguldak Paftası. MTA Özel Yayınlar Serisi-4, 24 s., Ankara, 2005.

- Duru, M., Gedik, İ. ve Aksay, A. 2002. MTA Genel Müdürlüğü, 1:100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Adapazarı-H24 Paftası, No:37, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Erener, A., Düzgün, H.S.B., 2010. Improvement of Statistical Landslide Susceptibility Mapping By Using Spatial and Global Regression Methods in the Case of More and Romsdal (Norway), *Landslides*, Volume 7, Number 1, 55-68.
- Gedik, İ. ve Aksay, A., 2002. MTA Genel Müdürlüğü, 1:100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Adapazarı-H25 Paftası, No: 38, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara
- Gómez, H. and Kavzoglu, T., 2005. Assessment of Shallow Landslide Susceptibility Using Artificial Neural Networks in Jabonosa River Basin, Venezuela, *Engineering Geology*, 78, 11-27.
- Gürbüz, E., Seyitoğlu, G., 2014. Gölpazarı Havzası'nın Kuvaterner Gelişimi (KB Türkiye). *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 57 (2), 1-17,
- Jadda, M., Shafri, H.Z.M., Mansour, S.B., Sharifikia, M., Pirasteh, S., 2009. Landslide Susceptibility Evaluation and Factor Effect Analysis Using Probabilistic-Frequency Ratio Model, *European Journal of Scientific Research*, Volume 33, Number 4, 654-668.
- Kavzaoğlu, T., Çölkesen, İ., Şahin, E.K., 2012. Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesinde Kullanılan Faktörlerin Etkilerinin Araştırılması: Düzköy Örneği. IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2012), Zonguldak-Türkiye, 1-8.
- Lee, S., Choi, J., Min, K., 2004. Probabilistic Landslide Hazard Mapping Using GIS and Remote Sensing Data At Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 25, Issue 11, 2037-2052.
- Lee, S., Evangelista, D.G., 2005. Landslide Susceptibility Mapping using Probability and Statistics Models in Baguio City, Philippines, 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, Saint Petersburg, Russia.
- Lee, S., Sambath, T., 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models, *Environmental Geology*, Vol.50, No.6, 847-855.
- Reis, S., Yalçın, A., Atasoy, M., Nişancı, R., Bayrak, T., Sancar C., Ekercin, S., 2009. CBS ve Uzaktan Algılama Teknikleri ile Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretimi: Rize İli Örneği. Türkiye Ulusal Fotogrametri Ve Uzaktan Algılama Birliği V. Teknik Sempozyumu, Ankara-Türkiye, 2009.
- Soeters, R.S., Van Westen, C.J., 1996. Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In *Landslides: Investigation and Mitigation* A.K. Turner and R.L. Schuster (eds.). Transportation Research Board, National Research Council, Special Report-247, National Academy Press, Washington DC, 129-177.
- Şengör, A.M.C. ve Yılmaz, Y., 1981. Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach, *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Vivas, L., 1992, Los Andes Venezolanos. *Academia Nacional de la Historia*, Caracas.
- Yalçın, A., 2007. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesinde Analitik Hiyerarşi Yönteminin ve CBS'nin Kullanımı, Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 22, Sayı 3, Sayfa 1-14.
- Yılmaz, I., 2009. Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio, Logistic Regression, Artificial Neural Networks And Their Comparison: A Case Study From Kat Landslides (Tokat-Turkey) *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125-1138.

Drenaj ve Ağaçlandırma ile Heyelan Rehabilitasyonu Eskişehir, Mihalıççık, Gürleyik Köyü Örneği

Landslide Rehabilitation with Drainage and Afforestation: Example of Gürleyik Village, Mihalıççık, Eskişehir

A. K. Özcan*, İ. Bulut, S. Karakaya, A. Küçükdöngül

*Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, ANKARA
(*kozcan@ormansu.gov.tr)*

ÖZ: Eskişehir ili, Mihalıççık ilçesi, Gürleyik Köyü yolunun alt kesiminde meydana gelen kütle hareketi bir paleo (eski) heyelandır ve heyelanın taç kısmı köy yoluna dayanmaktadır. Heyelanın geriye doğru ilerlemesi durumunda köyün ulaşımı olumsuz etkilenecektir. Heyelan kütleli üzerinde önleyici yapıların inşa edilmesinin ekonomik olmamasından dolayı zarar azaltma amacıyla kontrole yönelik drenaj ve ağaçlandırma çalışmaları planlanmıştır. Heyelan sahası içerisinde, ana kanalların ve bu kanallara bağlanacak toplama kanallarının inşa edilmesi ve sahada bulunan heyelan göllerinin bu drenaj kanallarına bağlanması ile heyelanın mekanizmasını tetikleyecek suların Gürleyik Deresine drene edilmesi amaçlanmıştır. Drenaj çalışmalarının yanı sıra bitkilerin intersepsiyon (suyun tutularak buharla salınması) özelliklerinden yararlanmak amacıyla bölgede bulunan karaçam, dut, söğüt, iğde, ceviz, meşe gibi türler ile çalışmada heyelanlı sahanın yoğun bir şekilde ağaçlandırılması tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında rehabilitasyon yapıları ile heyelan kaynaklı zararların azaltılması, gelir getirici ağaçlandırma çalışmaları ile köy halkının ekonomisine katkı sağlanması ve bölgeye yeni bir rekreasyon alanının kazandırılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, rehabilitasyon, ağaçlandırma, drenaj, Gürleyik, Eskişehir

ABSTRACT: A mass movement which occurred on Gürleyik Village road, Mihalıççık district in Eskişehir city, is a paleo-landslide and crown of landslide up to the village road. In case of landslide regression, transportation to the village will be affected negatively. As building preventive structures on the landslide mass was not feasible, drainage and afforestation were planned to risk mitigation. The aim was to drain water which triggers landslide mechanism to Gürleyik Stream by building main channels and collector channels which connect to main channels, and connecting existing puddles to these channels in study area. In addition to drainage works, an intensive afforestation of landslide area was planned with species such as black pine, mulberry, willow, silver berry, walnut, oak for the purpose of utilizing plants' interception characteristics. Within the scope of this study; it was expected that landslide damages to be reduced by the rehabilitation structures, as well as making a big contribution to local people's income by income-generating afforestations and gaining a new recreation area for the region.

Keywords: Landslide, rehabilitation, afforestation, drainage, Gürleyik, Eskişehir

1. GİRİŞ

Çalışmaya konu olan "Eskişehir Mihalıççık Gürleyik Köyü Heyelanlı Alanların Ağaçlandırma ve Drenaj ile Rehabilitasyonu Projesi" Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü tarafından 2016 yılında hazırlanmıştır. Mihalıççık - Gürleyik Köyü asfalt yolunun alt kesiminde oluşan heyelanın bir paleo (eski) heyelan olduğu ve heyelan malzemesinin eteğinin Gürleyik Deresine kadar devam ettiği saha çalışmalarında gözlenmiş olup orta sıkı ve pekişmemiş, silt, kum, çakıl ve killerden oluşan Kuvaterner çökellerinin hâkim olduğu alanda kayma yüzeyinin derin olduğu ve heyelan kütleli üzerinde önleyici yapıların inşa edilmesinin etkili olmayacağı anlaşılmıştır. Bundan dolayı zarar azaltma faaliyetlerinin yapılmasına karar verilerek kontrole yönelik drenaj çalışmaları yapılmıştır. Heyelan sahası içerisinde kontrol yapılarından ana kanalların ve toplama kanallarının inşa edilmesi ve mevcut heyelan göllerinin bu drenaj kanallarına bağlanması ile heyelanın mekanizmasını tetikleyecek suların Gürleyik Deresine drene edilmesi amaçlanmıştır. Drenaj çalışmalarının yanı sıra bölgede

bulunan karaçam, dut, söğüt, iğde, ceviz, meşe gibi türler ile heyelanlı sahanın yoğun bir şekilde ağaçlandırılması gaye edilmektedir. Çalışmanın uygulanmasında ağaçlandırma ve drenaj faaliyetleri farklı zamanlarda kısımlar halinde yapılabilir. Bu bildiride ağaçlandırma ve drenaj çalışmaları ile heyelan kaynaklı zararların ve heyelana neden olacak kaydırıcı kuvvetlerin azaltılması konu edilmektedir.

2. ÇALIŞMA ALANININ ÖZELLİKLERİ

2.1. Coğrafi Konum

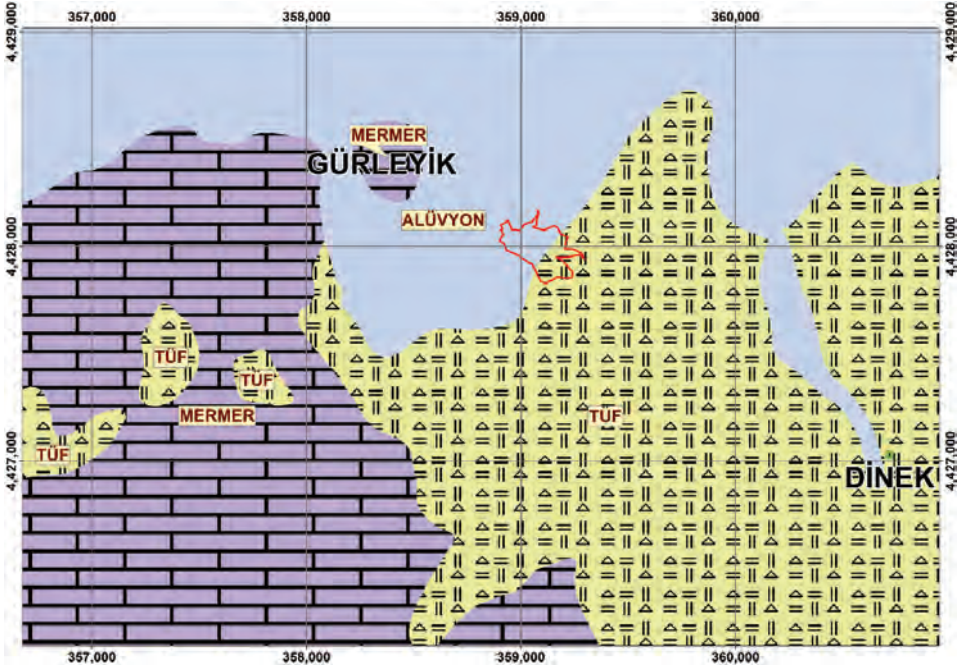
Çalışma sahası Eskişehir ilinin Mihalıççık ilçesinin kuzey batısında bulunan Gürleyik Köyünün güneydoğusunda kalmaktadır (Şekil 1). Çalışma sahası Gürleyik Köyünün ilçe merkezi ile ulaşımın sağlandığı ilçe yolunun alt kısmındadır ve genel alanı 5,86 ha'dır.



Şekil 1. Çalışma alanının konumu.

2.2. Jeolojik Yapı ve Toprak Durumu

Çalışma alanının bulunduğu bölgenin temelinde Orta Sakarya Masifini oluşturan Paleozoik yaşlı metamorfite bulunmaktadır. Altınlı (1973)'ya göre bu metamorfite büyük ihtimalle Permiyen yaşlı olup bölgenin en yaşlı kayalarını oluşturan metamorfite; fillit, şist, amfibolit, mermer ve metabazittir. Çalışma sahası çevresinde yapılan arazi incelemelerinde Triyas yaşlı mermerlere ve yamaç molozlarına da rastlanmıştır. Proje sınırları içerisinde kalan heyelan malzemesi; Kuvaterner alüvyonu olan pekişmemiş, kum, çakıl, silt ve kilden ve Orta Miyosen - Üst Miyosen yaşlı tüften ibarettir.



Şekil 2. Proje alanının jeoloji haritası (MTA).

2.3. İklim

Marmara, Ege ve İç Anadolu Bölgeleri arasında bir geçiş bölgesinde bulunan Eskişehir ilinde, her ne kadar İç Anadolu ve Ege'ye özgü iklim özellikleri görülse de, sert bir karasal iklim hâkimdir. Kışlar sert ve sürekli iken yaz ayları gündüzleri sıcak, geceleri ise serindir. Gece-gündüz sıcaklık farkı oldukça fazladır. İlin yıllık ortalama sıcaklığı 11°C civarındadır. Eskişehir, İç Anadolu, Batı Karadeniz ve Akdeniz iklimlerinin etki alanı içinde olduğundan dolayı kendine has bir iklim yapısına sahiptir. Yıllık sıcaklık ortalaması 11 °C'dir. Aylık ortalamaya göre yılın en soğuk ayı, -3,7 °C ile Ocak ayıdır. Aralık ayının ortalarından, Şubat ayının ortalarına kadar çok soğuk günler ve don olayları yaşanır. -10 °C ile -25 °C arasında değişen derecelere rastlanabilir. Ancak Ocak ayı içinde 10 °C ile 15 °C'lik ılık günler de geçirilir. Mart ve Nisan aylarında da don olayları görülmektedir. Baharın ikinci yarısında maksimum sıcaklık, 20 °C'nin üzerine çıkar. 30 Ocak 2006 tarihinde -27,8 °C ve 29 Temmuz 2000 tarihinde 40,6 °C ile en düşük ve en yüksek sıcaklıklar kaydedilmiştir (TÜMAS, 2012).

Eskişehir'de yağışlar, kışın kar ve yağmur halinde görülür. Aralık ayından itibaren yağışlar daha çok kar şeklindedir. Nisan ayı sonundan itibaren havalar ısınmaya başlar. Eskişehir'de bahar yağmurları, batı ve güneybatıdan gelerek, sağanak halinde düşer. Yıllık ortalama yağış miktarı 367,1 mm'dir (MGM, 2017).

Çalışma alanında yapılacak ağaçlandırma çalışmalarının başarıya ulaşması tür seçiminden başlayarak dikilen fidanın tutma, gelişme, artım ve kalitesine kadar her şeyini etkileyen, hatta bir yerde ağaç yetiştirmenin mümkün olup olmayacağını dikte eden iklim faktörünün analizini iyi yapmakla mümkündür. Ağaçlandırma yatırımlarının başarısı yönünden etüdü gerekli iklim elemanlarını şöyle sıralayabiliriz. Ortalama sıcaklık, ortalama yüksek sıcaklık, ortalama yağış, ortalama bağıl nem, yağışın 10 mm ve çok olduğu günler sayısı, günlük maksimum yağış, saatlik maksimum yağış, bitki örtülü gün sayısı, donlu günler sayısı, en erken ve en geç don tarihleri, ortalama rüzgâr hızı, en hızlı rüzgâr yönü ve hızıdır.

Havzanın genel iklim karakteristiklerini yansıtacak meteorolojik gözlemler ve bunun neticeleri, sahaya en yakın olan 650 m rakımlı Nallıhan meteoroloji istasyonundan elde edilmiştir. Çalışma alanının ortalama rakımı da 675 m'dir. Yurdumuz şartlarına en uygun yöntem olarak kabul edilen Erinç (1965)'in yağış müessiriyet indisi formülü Nallıhan meteoroloji istasyonu verilerine uygulanmıştır. Yağış müessiriyet indisi bir yerdeki yağış miktarı ile yıllık ortalama maksimum sıcaklık arasındaki ilişkiyi belirtmektedir (Eş.1).

$$\text{Erinç Formülü } Im = \frac{P}{Tom} \quad (1)$$

Burada; Im yıllık yağış müessiriyet indisi, P yıllık ortalama yağış (mm) ve Tom yıllık ortalama maksimum sıcaklıktır (°C).

Çalışma alanının iklim özelliklerini belirtmek için, iklim değerleri formülde yerine konularak; $Im = 294,7 / 19,0 = 15,51$ olarak bulunmuştur. Erinç'in Yağış Müessiriyeti İndisine göre iklim ve bitki örtüsü tipleri aşağıdaki gibidir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Erinç'in yağış müessiriyeti indisine göre iklim ve bitki örtüsü tipleri

İndis	İklim tipi	Bitki Örtüsü Tipleri
$I < 8$	Tam kurak	Çöl
$8 < I < 15$	Kurak	Çölümsü step
$15 < I < 23$	Yarı Kurak	Step
$23 < I < 40$	Yarı Nemli	Park görünümlü kurak mıntika ormanları
$40 < I < 55$	Nemli	Nemli mıntika ormanları
$55 < I$	Çok Nemli	Çok nemli mıntika ormanları

15,51 rakamı bu çizelgeye göre havzanın iklim tipinin yarı kurak, bitki örtüsü tipinin step olduğunu göstermektedir. Yağış müessiriyeti indislerine göre iklimin yıl içerisindeki değişimini incelemek ve vejetasyon (bitkilene) devresindeki su ekonomisini bilmek için aylar itibarıyla yağış müessiriyeti indisleri hesap edilerek tablo halinde gösterilmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. 650 m rakımlı Nallıhan meteoroloji istasyonu değerlerinin analizi.

AYLAR	Ortalama yağış (mm)	En düşük sıcaklık (°C)	En yüksek sıcaklık (°C)	Ortalama sıcaklık (°C)	Ortalama yüksek sıcaklık (°C)	Yağış etkinliği indisi	İklim tipi
Ocak	40,5	-14,8	17,0	1,4	5,5	88,4	Çok Nemli
Şubat	26,7	-15,1	20,6	2,8	7,9	40,6	Nemli
Mart	28,6	-14,5	27,6	6,7	12,9	26,6	Yarı Nemli
Nisan	34,8	-4,0	31,8	11,2	18,3	22,8	Yarı Kurak
Mayıs	26,6	0,3	34,0	16,0	23,8	13,4	Kurak
Haziran	18,1	4,0	37,4	20,3	28,2	7,7	Tam Kurak
Temmuz	11,0	7,0	40,4	23,0	31,4	4,2	Tam Kurak
Ağustos	8,1	8,8	39,4	23,0	31,2	3,1	Tam Kurak
Eylül	9,2	3,0	38,0	19,2	27,5	4,0	Tam Kurak
Ekim	20,8	-3,4	33,0	13,7	21,3	11,7	Kurak
Kasım	30,7	-10,0	25,8	7,2	13,1	28,1	Yarı Nemli
Aralık	39,6	-13,8	18,5	3,1	7,3	65,1	Çok Nemli
YILLIK	294,7	-15,1	40,4	12,3	19,0	15,51	Yarı Kurak

2.4. Mikro İklim Özellikleri

Gürleyik Köyünün iklimi bulunduğu coğrafi konumundan dolayı Orta Anadolu'nun tipik karasal iklimidir. Gürleyik Köyünde yazları gündüz sıcaklığı çok yüksek değilken geceleri serin geçer. Kışlar ise soğuk ve yağışlıdır. Yağışlar kışın genellikle kar şeklindedir. En fazla yağış kışın düşerken bunu ilkbahar mevsimi izlemektedir. En yağışlı ay Ocak'tır. Yıllık ortalama sıcaklık 12 °C civarındadır. Havanın donlu olduğu gün sayısı 60 civarındayken çok nadiren Nisan ve Ekim aylarında da don görülmektedir.

2.5. Mülkiyet Durumu

Çalışma kapsamına giren saha Eskişehir ili, Mihaliççik ilçesi, Gürleyik Köyü sınırları içerisinde kalmaktadır. Sahanın tamamı Eskişehir Orman Bölge Müdürlüğü, Mihaliççik Orman İşletme Müdürlüğü, Beşpınar Orman İşletme Şefliği sınırları dâhilindedir ve 04.05.2016 tarihinde tahsisi yapılmıştır. Çalışmanın uygulanmasında mülkiyet ile ilgili sorun bulunmamaktadır.

2.6. Heyelan Durumu

Gürleyik Mahallesi muhtarı ve mahalle sakinleri ile yapılan görüşmelerde 1946-1947 yılları arasında heyelanın meydana geldiği anlaşılmıştır. Yağışların ve sızıntı sularının etkisiyle doymun hale gelen zeminin kohezyonunun azaldığı, duraylılığının bozulduğu ve heyelanın meydana geldiği düşünülmektedir.

Heyelan bölgesinin üst kotunda, yolun alt tarafında bulunan tarım arazilerinin uç kısımlarında çatlaklar ve yarılmalar gözlenmiştir. Bu durum, aşırı yağışlarla birlikte heyelanın taç kısmının geriye doğru ilerleme riskinin bulunduğunu göstermektedir. Heyelan bölgesinin üst kotlarında, çöküntü alanının eteğinde biri küçük olmak üzere iki adet su birikintisi oluşmuştur. Aynı şekilde heyelan bölgesinin alt kotlarında da sızma hatlarının yüzeye çıkması ile oluşan daha küçük boyutlarda su birikintilerine rastlanmıştır.

Heyelan zarar azaltma faaliyetleri kapsamında projelendirilen açık kanallar ile heyelanlı sahanın drenaj yapısının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

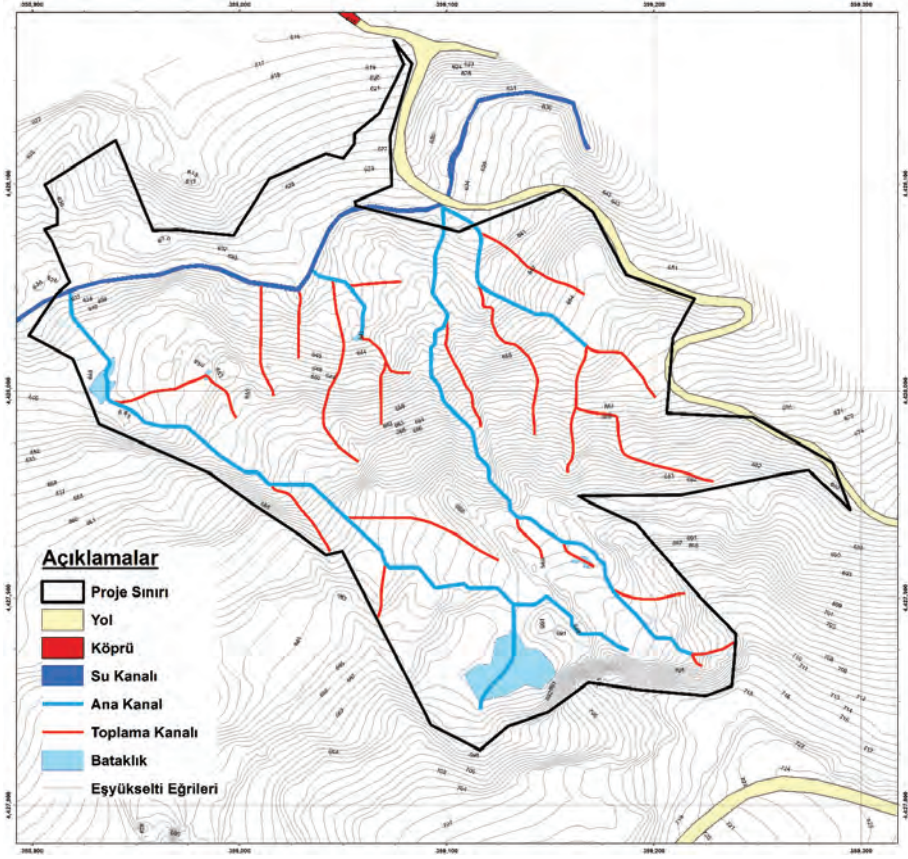
2.7. Bitki Örtüsü Durumu

Çalışma sahasında heyelan malzemesi üzerinde farklı bitki türleri bulunmaktadır. Ot ve çalılar haricinde iğde ağaçları, kavak, söğüt, karaçam gibi ağaçlar doğal olarak yetişmiştir. Uydu görüntülerinden yararlanılarak çalışma alanının mevcut bitki örtüsünün 1,2 ha olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında ağaçlandırma yapılırken mevcut bitki örtüsü korunmalıdır.

3. YAPILACAK İŞLER

3.1. Drenaj Faaliyetleri

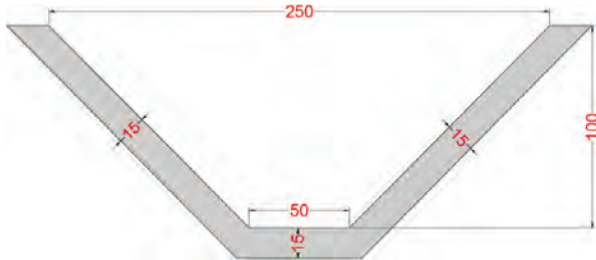
Heyelanlı bölgenin gelecek dönemde meydana gelecek aşırı yağışlar sonrasında yeniden harekete geçme olasılığı bulunmaktadır. Bu nedenle zarar azaltma çalışması olarak drenaj faaliyetleri büyük önem taşımaktadır. Drenaj faaliyetleri kapsamında ana kanallar ve bu ana kanalları besleyecek toplama kanalları haritası hazırlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Drenaj haritası.

3.1.1. Ana kanallar

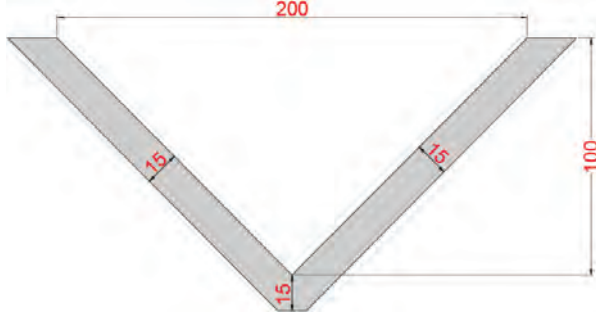
Heyelan bölgesinde drenajı sağlamak amacıyla ana iletim kanalları yapılacaktır. Ana iletim kanalları sahanın yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli temel alınarak ve sahada bizzat konumlandırılarak belirlenmiştir. Ana kanallar trapez şekilli olup kanalların üst genişliği 2,5 m, derinliği 1,0 m, taban düzlüğü 0,5 m ve et kalınlığı 15 cm olacaktır (Şekil 4.). Çalışma kapsamında 5 adet ana kanal yapılacaktır. Bunların en kısıtı 46,0 m en uzununu 285,9 m olup kanalların toplam uzunluğu 858,7 m'dir.



Şekil 4. Ana kanal kesiti.

3.1.2. Toplama Kanalları

Heyelan bölgesinde ana kanalların toplayamadığı mikro havzalardaki yüzey sularını ana kanallara iletmek amacıyla 21 adet toplama kanalı projelendirilmiştir. Toplama kanalları V şekilli olup kanallarının üst genişliği 2,0 m, derinliği 1,0 m ve et kalınlığı 15 cm olacaktır (Şekil 5). V şekilli toplama kanallarının en kısası 7,9 m en uzununu ise 97,5 m olup toplama kanallarının toplam uzunluğu 1.006,6 m'dir.

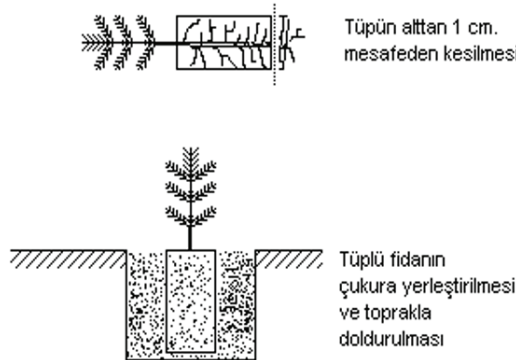


Şekil 5. Toplama kanalı kesiti.

3.2. Ağaçlandırma Faaliyetleri

Çalışma havzasında ağaçlandırma için uygun olan yerlerde karaçam, meşe, söğüt ve gelir getirici tür olarak dut, ceviz ve iğde dikimi yapılacaktır. Tahsisi Eskişehir Orman Bölge Müdürlüğüne alınmış 210/a, 204/b ve 209/c ada parsel numaralı sahalardan en alt kotta bulunan 210/a ada/parseline yalnızca ceviz; en üst kotta bulunan 209/c ada/parseline ceviz, iğde ve dut; orta kısımda bulunan 204/b ada/parseline ise karaçam, meşe, söğüt, dut, ceviz ve iğde karışık olarak dikilecektir. Söğüt ve iğdelerin dere içlerine dikilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür.

Dikilecek türler Eskişehir fidanlığından temin edilerek mümkünse yerel orijinli olması tercih edilmelidir. Fidanların dikimde "Adi Çukur Dikimi" metodu uygulanacaktır (Şekil 6). Adi çukur dikiminde çukurdan çıkan üst ve alt toprak ayrı ayrı yığılıştır. İstenilen derinlik ve genişlikte çukur açıldıktan sonra çukurun taban kısmı birkaç bel kürek vuruşu ile gevşetilir. Humusla karışık üst toprak fidan köklerine doğru serpilir ve kökler toprakla iyice beslenerek fidanın dik durması sağlanır. Çukurdan çıkan toprakla çukur iyice doldurulur, el veya ayakla bastırılarak sıkıştırılır. Toprak düzeltilir ve suyun tutulması için fidan çevresine sığ bir çanak şekli verilerek dikim tamamlanır (AGM, 1999).



Şekil 6. Adi çukur dikimi.

Dikim esnasında toprak tavda olmalıdır. Toprağın dikim derinliği olan 50-60 cm'lik kısmı, rutubetli ve tavda olacaktır. Fidanlıktan fidanın sökülmesi ile sahada fidanların dikilmesi arasındaki zaman çok kısa olmalıdır. Aşırı güneşli, rüzgârlı ve donlu günlerde dikim yapılmamalı, rüzgârsız bulutlu günler seçilmelidir.

4,42 hektar alanda, ekskavatörle toplam 3662 adet çukur açılmış olacaktır. 100 cm uzunluğunda, 80 cm genişlikte ve 60 - 80 cm derinlikte çukur açılarak çalışmanın maksadına uygun aralık x mesafede, dikim çukuru oluşturulacaktır. Bu şekilde oluşturulan çukurun dip kısmından en az 1/3'lük bölümü işlenmiş olacaktır.

Dikim yapılan sahalarda; dikimi takip eden 1. yılda; her türlü toplu kurumalarla, %15 oranını aşan dağınık kurumalarda aynı nitelikteki fidanlarla tamamlama dikimi yapılacaktır.

Fidanlar etrafındaki bakım çalışmaları dikimi takip eden en son ilkbahar yağışlarından sonra ve vejetasyon (bitkilenme) dönemi başında ot tohumlarının dökülmeden hemen önce (Mayıs sonundan Haziran ortasına kadar) yapılacaktır. İlk yılda fidan etrafında dışarıdan içeriye doğru ve fidan köklerini zedelemeyen yapılan çapa, ikinci ve üçüncü yılda içeriden dışarıya doğru yapılacaktır. Sahada fidanlar çevresinde işçi ile ot alma-çapa-teras onarımı (60-80 cm eninde 100 cm boyundaki alanda) şeklinde bakım yapılacaktır. Bakımlar işçi gücü ile ve (ot alma - çapalama) 1. 2. ve 3. yıllarda yapılacaktır.

4. SONUÇLAR

Mihalıççık Gürleyik Köyü asfalt yolunun alt tarafında oluşan kütle hareketi paleo (eski) heyelandır. Ancak heyelan aktivitesi devam etmektedir. Heyelanlı alan üzerinde yapılan etütler sonucunda zarar azaltma kapsamında kontrol çalışmalarının yapılması uygun görülmüştür. Bu çalışmalar drenaj ve ağaçlandırma faaliyetleri olarak belirlenmiştir.

Uygulama sahasında fidan dikim çalışmalarında yerel türlere ağırlık verilmelidir. Bölgede bulunan karaçam, dut, söğüt, iğde, ceviz, meşe gibi türleri ile saha yoğun bir şekilde ağaçlandırılmalıdır. Ağaçlandırma çalışmalarında uygulayıcı idare münasip gördüğü takdirde, arazi ve iklim şartlarına uygun tür değişikliği yapılmasında sakınca yoktur. Sahadaki doğal bitki örtüsünün korunmasına özen gösterilmelidir.

Drenaj çalışmalarının tamamlanması ile birlikte sahanın su tutma kapasitesi azaltılacak ve durağan konumdaki heyelanı tetikleyebilecek su varlığı alandan uzaklaştırılacaktır. Bu tür zarar azaltma çalışmaları ekonomik olmakla birlikte heyelanlı sahaların rehabilitasyonu için hayati önem taşımaktadır. Heyelanlı sahalar için zarar azaltma çalışmalarının daha yaygın olarak uygulanması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AGM, 1999. Erozyon Kontrolü Uygulamalarında Dikkate Alınacak Hususlar, Mülga Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Genel Müdürlüğü, Yayın No: 14, Ankara.
- Altınlı, I. E., 1973. Orta Sakarya Jeolojisi: Cumhuriyetin 50. Yılı Yerbilimleri Kongresi Tebliğleri Kitabı, 159-191
- Aşgım, V., 2007. Mayıslar (Eskişehir) ve Arzular (Gümüşhane) Bölgelerinin Jeolojik, Petrografik, Jeokimyasal Olarak İncelenmesi ve Altın Oluşumu Bakımından Değerlendirilmesi, 23-24
- ÇEM, 2016. Eskişehir Mihalıççık Gürleyik Köyü Heyelanlı Alanların Ağaçlandırma ve Drenaj ile Rehabilitasyonu Projesi, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Eriñç, S., 1965. Yağış Müessiriyet Üzerine Bir Deneme ve Yeni Bir İndis, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Dergisi, S. 1, s. 143-152, İstanbul.
- MGM, 2017. Meteoroloji Genel Müdürlüğü Eskişehir İli İstatistik Verileri URL: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ESKISEHIR>
- TÜMAS, 2012. Türkiye Meteorolojik Veri Arşiv ve Yönetim Sistemi. Eskişehir İli Meteorolojik Veri Kayıtları.

Güllübağ Göleti (Uşak) Sağ Sahil Mansap Heyelanının Mühendislik Jeolojisi İncelemesi

Engineering Geology Investigation of the Landslide Located in Left Abutment Downstream of Güllübağ (Uşak) Dam

H. Kumsar^{1*}, Ö. Aydan²

¹Pamukkale Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Denizli

²Department of Civil Engineering, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa, Japan
(*hkumsar@pau.edu.tr)

ÖZ: Uşak ili Eşme ilçesine bağlı Güllübağ köyü arazilerinin sulanması amacıyla yapılan Güllübağ göleti gövde türü kil çekirdekli kaya dolgudur. Kazı çalışmaları sırasında göletin mansap kesiminde sağ sahil yamaçlarında dairesel kayma meydana gelmiş ve kondüvi inşaatı olumsuz etkilenmiştir. Bu çalışmada, kütle hareketinin oluşum mekanizması ve nedenleri incelenmiş, ve yamaç duraylılığını artırmak için çözüm önerileri geliştirilmiştir. Güllübağ gölet gövde alanı ve yakın çevresinde Paleozoyik yaşlı şist ve Kuvaterner yaşlı alüvyon birimleri yayılım göstermektedir. Şist birimi yer yer ileri derecede ayrılmış seviyeler içerir ve dairesel kütle hareketi bu seviye içinde gelişmiştir. Heyelanın esas aynasından ayrılmış şist biriminden iki ayrı noktada örselenmemiş örnekler alınmış ve bu örneklerin fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrılmış şistin birim hacim ağırlığı 20 kN/m³ ve doğal nem içeriği %18.32 olarak elde edilmiştir. Doğrudan kesme deneyleri sonucunda bir nolu örneğin kohezyonu (c) 17.7 kPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 25°, iki nolu örneğin kohezyonu (c) 24.25 kPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 29° olarak elde edilmiştir. Ayrılmamış şistlerin birim hacim ağırlığı 26.5 kN/m³ ile 28 kN/m³ arasında değişmektedir. Limit denge yöntemleri ile yapılan duraylılık analizlerinde, dairesel yüzey üzerindeki yamaç kütesinin kazı öncesi güvenlik katsayısı 1.52 ve kazı sonrası güvenlik katsayısı 1.12 olarak hesaplanmıştır. Ayrık sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan duraylılık analizlerinde de, heyelanın topuk kesiminde ilk yerdeğiştirmenin gözenek suyu basıncı katsayısının 0.1 olduğunda başladığı ve bu katsayının artan değerlerinde yamaç kütesinin eğim aşağı yer değiştirdiği hesaplanmıştır. Yamaç kütleli yağışlı mevsimde gözenek suyu basıncının artması ile duraylılığını kaybetmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güllübağ göleti, dairesel kayma, duraylılık analizi, gözenek suyu basıncı

ABSTRACT: Güllübağ small dam, which was a clay cored rock fill dam, was built in order to supply irrigation water for lands of Güllübağ village people in Uşak city. A circular type slope failure developed during slope excavation in the right abutment of the dam site and negatively affected the conduit construction at the toe of the slope. In this study, mechanism and reasons of the slope failure was investigated and proposals for slope stabilization were discussed. Paleozoic aged schist and Quaternary aged alluvium formations outcrop in the study area and surrounding. Schist formation contains highly weathered zones where circular type of slope failure developed. Two undisturbed samples were taken from different locations on the main failure surface of the landslide and physio-mechanic parameters of the samples were determined. Unit weights of the samples were found as 20 kN/m³, natural water content was assessed as %18.32. As a result of direct shear tests, cohesion (c) of the sample one was determined as 17.7 kPa and its internal friction angle (ϕ) was found as 25°, cohesion (c) of the sample two was determined as 24.25 kPa and its internal friction angle (ϕ) was found as 29°. Unit weights of the non-weathered schists changes between 26.5 kN/m³ and 28 kN/m³. As a result of stability assessment using limiting equilibrium methods, the safety factor of the slope before the slope excavation was found as 1.52, and the factor of safety of the excavated slope was assessed as 1.12. Stability assessment using discrete finite element method showed that, displacement at the toe of the slope starts when pore water pressure coefficient is 0.1 and the displacement accumulates with increasing pore pressure coefficients during rainy season.

Keywords: Güllübağ small dam, circular failure, stability assessment, pore water pressure

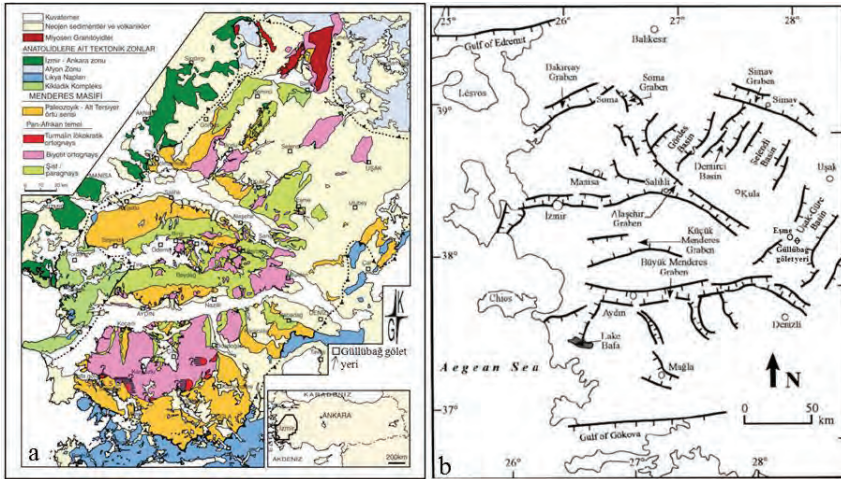
1. GİRİŞ

Uşak ili Eşme ilçesine bağlı Güllübağ köyü arazilerinin sulanması amacıyla yapılan Güllübağ göleti yeri, Güllübağ köyünün yaklaşık 3 km kuzeydoğusunda yer alır ve ulaşım Uşak-Eşme karayolundan sonra Güllübağ köy yolu ile sağlanmaktadır. Güllübağ göleti temelden yüksekliği 31.5 m olup, 105 ha tarım arazilerinin sulanması için inşa edilmiş kil çekirdekli kaya dolgu barajdır. Gölet inşaatının sıyırma kazıları yapıldıktan sonra sağ sahilde dere suyunu mansap kısmına aktarmak için planlama projesinde belirtildiği gibi inşaatına başlanan aktarma tüneli (kondüvi) kazısı sonucunda sağ sahilde mansap yamacında ayrıışmış şist birimi içinde dairesel kayma yüzeyi üzerinde bir kütle hareketi meydana gelmiştir. Bu çalışma kapsamında, kütle hareketinin oluşum mekanizması ve nedenleri ile yamacın uzun süreli duraylılığı için alınacak iyileştirme çalışmaları incelenmiştir.

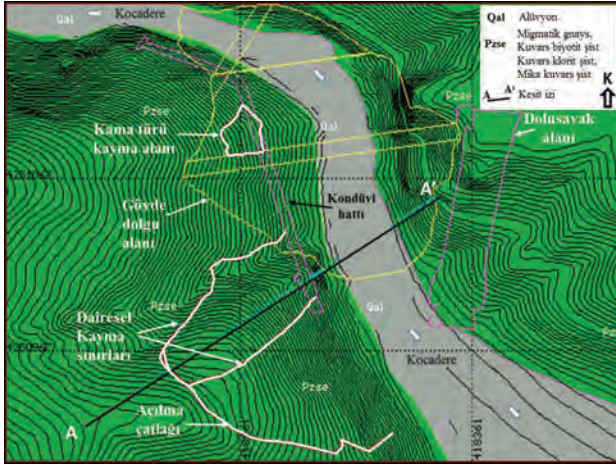
2. JEOLojİ VE TEKTONİK

Türkiye'nin batısında geniş bir alanda yayılım gösteren Menderes kütleli (Masifi) (MM) Alp Dağları oluşum kuşağı içerisinde yüzeyleyen bir başkalaşım karmaşığdır ve esas olarak, Prekambriyen yaşlı bir temel ve onu üzerleyen Paleozoyik-Erken Tersiyer yaşlı örtü serilerinden oluşur (Şekil 1a). Temel, kısmı migmatitleşme sunan paragnays ve yüksek dereceli mika şistlerden oluşan Geç Proterozoyik yaşlı metaklastikler, bunlar içine sokulum yapmış sin-/post-tektonik Pan Afrikan ortognayslar ve kısmen eklojitleşmiş metagabrolardan oluşmaktadır (Koralay vd, 2011). Batı Anadolu neotektonizması açılmalı tektonik rejimle temsil edilir. Bu açılma sonucunda D-B, KB-GD ve KD-GB doğrultulu çöküntü ve yükselti alanları oluşmuştur. Uşak ve yakın çevresindeki çöküntü alanları KD-GB doğrultulu aktif faylarla sınırlanmıştır (Şekil 1b).

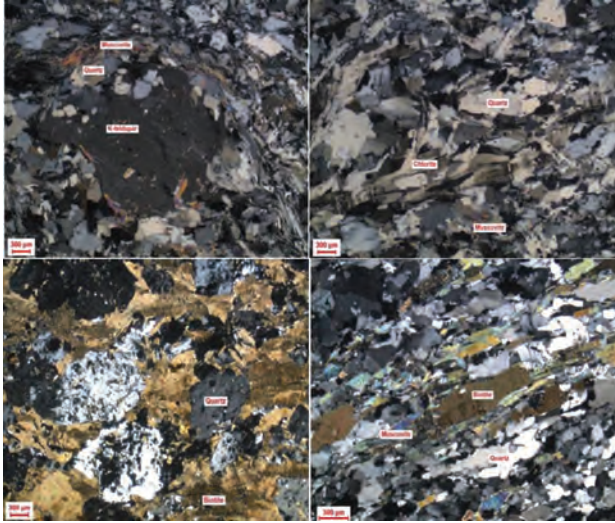
Güllübağ göleti alanında Paleozoyik yaşlı şist birimi ve alüvyon birimi yayılım göstermektedir. Suyarı (2010) tarafından yapılan mühendislik jeolojisi çalışmasında şist biriminin Eşme formasyonu olarak adlandırıldığı ve genellikle gözlü gnays, mikaşist, amfibolit şist ve klorit şistlerden oluştuğu belirtilmektedir. Çalışma sahasından alınan örnekler üzerinde yapılan ince kesitlerde migmatik gnays, kuvars biyotit şist, kuvars klorit şist, mika kuvars şist türü metamorfik kayaların varlığı belirlenmiştir (Şekil 2 ve 3). Metamorfik birimlerde topoğrafya yüzeyinden farklı derinliklerde ayrışma mevcuttur ve bu seviyelerde yapılan şev kazılarında duraylılık problemleri gelişmiştir. Alüvyon birimi kış ve yaz aylarında akışlı olan Kocadere'nin taşıdığı ve biriktirdiği metamorfik birimlerin blok, çakıl, kum, silt ve kil tortullarından oluşur (Şekil 2).



Şekil 1. a) Menderes Masifi metamorfik karmaşığının genel dağılımı (Koralay vd. 2011), b) Batı Anadolu grabenlerinin basitleştirilmiş haritası (Bozkurt, 2001).



Şekil 2. Güllübağ gölet alanının jeolojisi, kütle hareketi alanları ve mühendislik yapılarının yerleşimi.

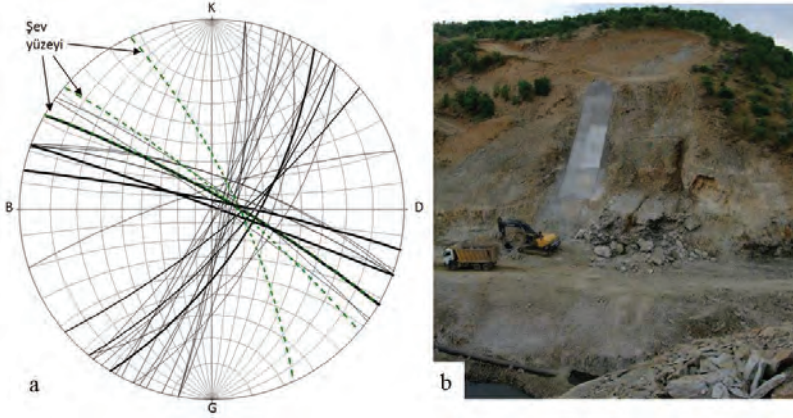


Şekil 3. Çalışma alanında Eşme Formasyonu'na ait metamorfik birimlerin ince kesit görüntüleri (Kumsar vd, 2014).

3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

Güllübağ gölet alanında tabanda göletin dere seviyesinde siyah mika şistler yüzeylemekte ve 0.5-2 cm arasında değişen kalınlıklarda yapraklanma göstermektedir. Bu birim dere suyunun da etkisiyle bozunmaya uğramış ve zayıf dayanım göstermektedir. Bu seviyenin üstünde yer alan migmatik gnayslar 50 cm ile 70 cm arasında şistosite kalınlığına sahiptir (Kumsar vd, 2014). Gölet gövdesi inşaatı sırasında Kocadere'nin suyunun mansap kesimine aktarılması için yapılmakta olan aktarma tüneli yapısının temel kazısı gölet taban seviyesi olan 650 m kotunda ve sağ sahil yamacı boyunca yapılması gerektiğinden sağ sahilde yapılan yamaç topuğu kazısı sonucu baraj eksenini ve menba kesiminde farklı boyutlarda kama türü kaymalar ve mansap kesiminde de ayrılmış şistler içinde dairesel kayma meydana gelmiştir.

Aktarma tüneli kazısı sonucu yamaç tabanında yer alan mikalı kuvars şistlerde iki eklem takımı yer almaktadır. Bunlar KB-GD doğrultulu (A1) ve KD-GB doğrultulu (A2) eklem takımlarıdır (Şekil 4a). 20 m'lik uzunluk boyunca KB-GD doğrultulu A1 çatlak takımının ortalama çatlak aralığı 101 cm, çatlak açıklığı 2 cm'den küçük olup, çatlaklar genellikle dolgusuz ve bazı çatlaklar dolguludur. KD-GB doğrultulu A2 çatlak takımında ise ortalama çatlak aralığı 53 cm, çatlak açıklığı 3.5 cm'den küçük ve genellikle dolgusuz olup bazı çatlaklarda dolguya rastlanmıştır. Bu eklem takımlarının birbirleriyle kesişmesi sonucu yüzeyleri arasında kama kütleleri oluşmaktadır. Genellikle arakesit doğrusunun eğim açıları 50°'den yüksek olduğu için doğal yamaç yüzeyini iki noktada kesmemektedir. Yamaçlarda yapılan yüksek eğimli şev kazılarında ise düzlemsel ve kama türü kaymalar meydana gelmiş (Şekil 4b) ve bunların duraylılığı Kumsar vd., (2014) tarafından incelenmiştir.



Şekil 4. a) Gölet sahası sağ sahil yamacındaki süreksizlik yüzeylerinin ekvatorial eş-alan stereonetinde gösterimi, b) gölet ekseninde meydana gelen kama türü kütle hareketi (Kumsar vd., 2014).

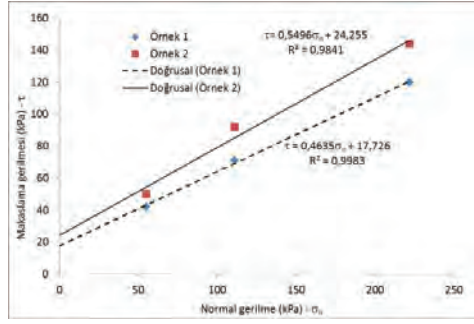
3.1. Limit Denge Analiz Yöntemleri ile Duraylılık Analizleri

Gölet projesinde sağ sahilde yer alan aktarma tüneli (kondüvi) inşaatı için yapılan kazı sonucunda mansap kesiminde sağ sahil yamacında dairesel kayma meydana gelmiştir. Yapılan arazi çalışmalarında, dairesel kaymanın meydana geldiği ayrılmış şist biriminin ileri derecede ayrıştığı ve yer yer killeştiği ve içerisinde farklı derecelerde ayrılmış şist blokları içerdiği gözlenmiştir (Şekil 5a). Duraysızlaşan yamaç kütlelerinin genişliği 127 m, uzunluğu 95 m'dir. Duraysız yamaçın doğu sınırından batıya doğru 40 m'lik kısmında dairesel kayma tamamen gerçekleşmiş ve yamaç kütleleri eğim aşağı hareket etmiştir. Geriye kalan alanda ise yamaç kütleleri içinde açılma çatlakları gelişmiştir. Bu alanda duraylı yamaç kütleleri ile duraysız yamaç kütleleri arasındaki açılma 21 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 5a).

Kayan kütlelerin duraysızlaşmasına etki eden faktörlerin incelenmesi için kayma yüzeyinden örselenmemiş örnekler alınmış ve bu örnekler üzerinde doğrudan makaslama, birim hacim ağırlığı, doğal su içeriği belirleme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, yamaçın kazı öncesi topoğrafik haritası, heyelan sınırları, çalışma alanının jeoloji haritası ve gölet alanında inşa edilecek mühendislik yapılarının yerleri aynı koordinat sisteminde SLOPAC programına (Kumsar, 1993) aktarılmıştır (Şekil 2). Ayrılmış şist birimi içindeki kayma yüzeyinin den iki ayrı yerinden alınan örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan doğrudan makaslama deneylerinde bir nolu örneğin kohezyon değeri (c) 17.7 kPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 25°, ve iki nolu örneğin kohezyon değeri (c) 24.25 kPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 29° olarak belirlenmiştir (Şekil 5b). Deneylerde artık değer elde edilmemiştir. Araziye yapılan eğimlendirme deneylerinde mikalı kalk şist yüzeyleri arasındaki ortalama sürtünme açısı (ϕ) 23.4°, biyotit şist yüzeyleri arasındaki ortalama sürtünme açısı (ϕ) 22.2° olarak ölçülmüştür. Makaslama örneklerinin doğal birim hacim ağırlığı 20 kN/m³ ve nem içeriği (w %) 18.32 olarak belirlenmiştir. Ayrılmamış şistlerin birim hacim ağırlığı 26.5 kN/m³ ile 28 kN/m³ arasında değişmektedir.



(a)

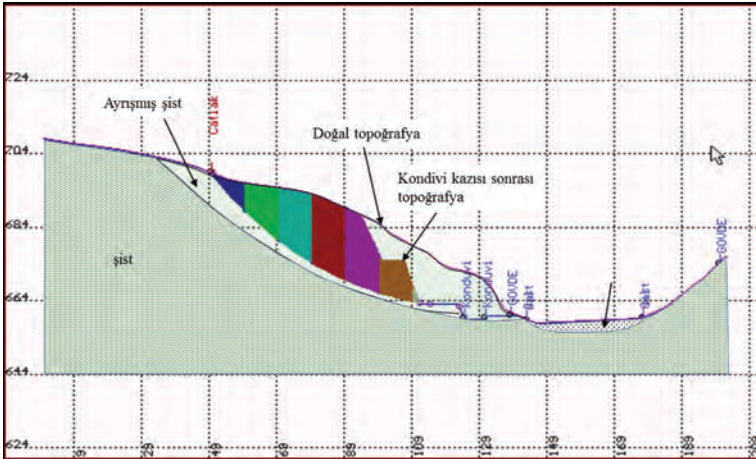


(b)

Şekil 5. Duraysızlaşan yamaç kütleinin görünümü (a) ve ayrılmış şist biriminden alınan iki ayrı örneğin makaslama dayanım grafiği (b).

Yamaç kütleinin duraylılık analizleri için SLOPAC programı üzerinde A-A' yönünde kazı öncesi ve kazı sonrası topoğrafik haritalardan kesit alınmış, kesitler üzerinde heyelan sınırlarının, jeolojik birimlerin ve gölet projesi mühendislik yapılarının izleri düşürülmüştür. Kayma yüzeyinin arazide ölçülen topoğrafik sınırları dikkate alınarak dairesel kayma yüzeyi, hem kazı öncesi, hem de kazı sonrası A-A' yönündeki topoğrafik kesitler üzerinde tanımlanmış (Şekil 6) ve duraylılık analizleri yapılmıştır.

Hesaplamalarda, Şekil 6'da verilen bir numaralı örneğin makaslama dayanım değerleri kullanılmış ve kayan kütleinin birim hacim ağırlığı ortalama değer olarak 24 kN/m^3 alınmıştır. Duraylılık analizleri Bishop (1955), Aydan vd, 1992 ve Kumsar 1993 limit denge yöntemleri kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Kesit üzerindeki kayma kütleinin alanı kondüvi kazısı öncesi 1115.91 m^2 'dir ve 1.52 güvenlik katsayısına (F) sahip olup duraylıdır. Aktarma tüneli kazısı sonrası yamacın topuğunda ve kayan kütleinin pasif bölümünde (kaymayı zorlaştıran kuvvetlerin fazla olduğu alanda) aynı kesit üzerinde 349.65 m^2 'lik ayrılmış şist kazılmış ve kesitteki alanı 766.27 m^2 olan kayma kütleinin güvenlik katsayısı 1.12'ye düşmüştür. Bu durumda yamaç duraylıdır ancak kayma koşuluna (F=1) çok yakındır.

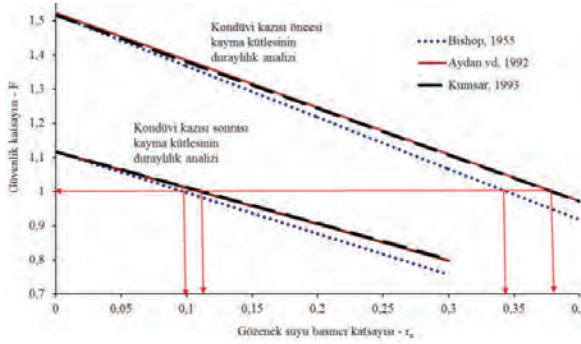


Şekil 6. A-A' kesiti üzerinde kazı öncesi ve kazı sonrası topoğrafik kesitler ve kayma kütleinin kazı sonrası kesitteki konumu.

Çizelge 1. Yamaç kütlelerinin kazı öncesi ve sonrası duraylılık analizi

Duraylılık analiz yöntemi	Güvenlik Katsayısı - F	
	Kazı öncesi	Kazı sonrası
Bishop (1955)	1.52	1.12
Aydan vd. (1992)	1.52	1.12
Kumsar (1993)	1.52	1.12

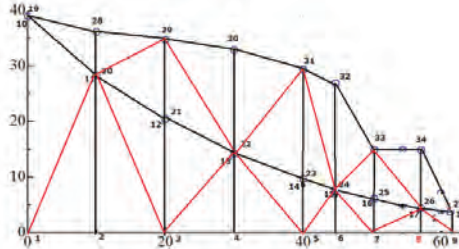
Kazı öncesi ve sonrası yamaç kütlelerinin duraylılığın yağışlar sonucu ayrıışmış şist içerisinde artan gözenek suyu basıncına bağlı olarak değişiminin incelenmesi için gözenek suyu basıncı (r_u) değeri 0 ile 0.4 arasında değiştirilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi kazı sonrası topoğrafik kesit üzerindeki kayma kütlesi $r_u=0.12$ değerinde duraysızlaşmaktadır. Kazı öncesi topoğrafyada ise 0.34 ile 0.38 r_u değerleri için yamaçın duraysızlaşması söz konusudur. Ayrıışmış şist biriminin geçirimsizliği düşük olduğu için yamaç içerisinde yüksek gözenek suyu basıncı oluşmayacağı dikkate alındığında, yamaçta kazı öncesi kaymanın meydana gelmeyeceği görülmektedir. Ancak kazı sonrası oluşan topoğrafyada düşük gözenek suyu basıncı etkisinde yamaç duraysızlaşmıştır.



Şekil 7. Heyelan kütlelerinin kazı öncesi ve sonrası topoğrafyadaki duraylılığının gözenek suyu basıncı katsayısına (r_u) göre değişimi.

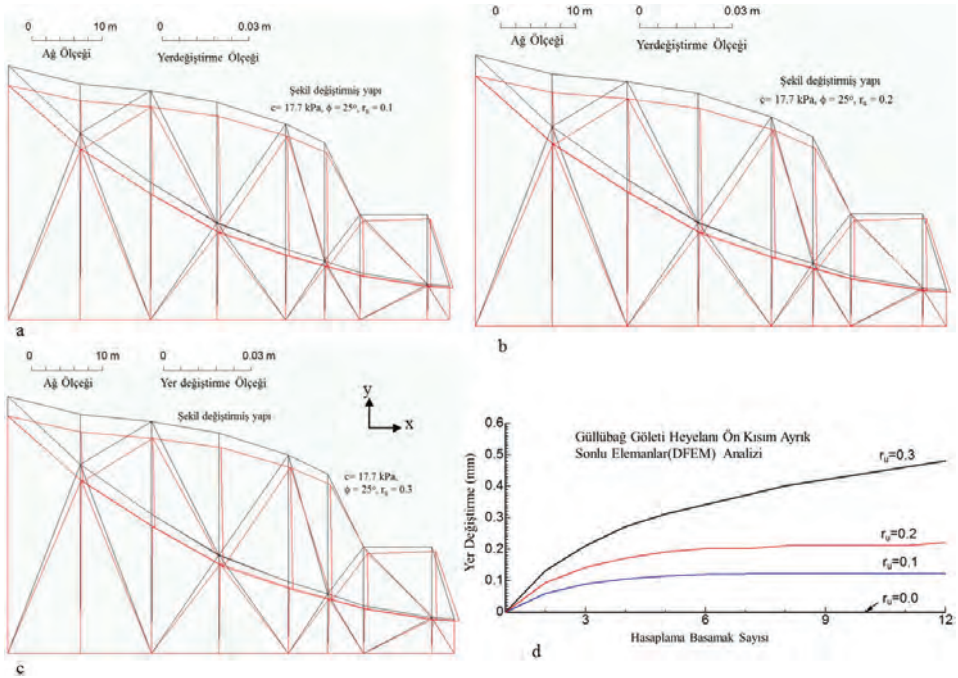
3.2 Ayrık Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Duraylılık Analizleri

Kazı sonrası topoğrafik kesitte tanımlanan kayma kütlelerinin statik koşullarda farklı gözenek suyu basıncı değerleri için duraylılık analizi ayrık sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir (Aydan vd., 1992; Aydan vd, 1996, 1997; Aydan vd, 2001, Atalar vd, 2016). Kayan kütlelerin ayrık sonlu elemanlar ağı Şekil 8'de verilmiştir. Dairesel kayma yüzeyinin içinde geliştiği ayrıışmış şist birinin makaslama dayanım parametreleri limit denge yöntemlerinde kullanılan verilerle aynı olup, kohezyon 17.7 kPa, içsel sürtünme açısı (ϕ) 25°, ve kayan kütlelerin ortalama birim hacim ağırlığı (γ_n) 24 kN/m³ olarak alınmıştır.



Şekil 8. Kazı sonrası topoğrafya üzerinde dairesel kayma için kullanılan ayrık sonlu elemanlar ağı.

Ayrık sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre, kayan kütle gözenek suyu içermediğinde ($r_u=0$) kazı sonrası topoğrafik kesit üzerinde duraylıdır. Ancak yağış aynı kesitteki kayma kütle içerisinde gözenek suyu basıncı katsayısı (r_u) 0.1 olduğunda (Şekil 9 a, d) küçük yerdeğiştirmelerle yamaçta kayma başlamakta ve yamaç gerisinde heyalanın taç kısmından kopma başlamakta ve çatlaklar oluşmaktadır. Eğer r_u değeri 0.2'ye ulaşırsa yamaç tamamen duraysızlaşmakta (Şekil 9 b, d) ve kayma daha büyük yerdeğiştirme ile gerçekleşmektedir. $r_u = 0.3$ olduğunda ise yamaç kütleindeki yerdeğiştirme daha da artmaktadır (Şekil 9c, d). Gözenek suyu basıncı katsayısına bağlı olarak heyelan kütleindeki yerdeğiştirmelerin hesaplama adımı sayısına göre değişimi Şekil 9d'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar limit denge analiz yöntemleri ile de uyumlu olup, her iki hesaplama yönteminde şevdeki kayma çok düşük gözenek suyu basıncı seviyesinde ($r_u = 1$) başlamaktadır.



Şekil 9. Ayrık sonlu elemanlar yöntemi ile kazı sonrası kesitin duraylılık analizi a) $r_u = 0.1$ için yer değiştirme, b) $r_u = 0.2$ için yer değiştirme, c) $r_u = 0.3$ için yer değiştirme, d) farklı r_u değerleri için hesaplama basamak sayısına göre yer değiştirme.

4. SONUÇLAR

Güllübağ gölet alanı Eşme Formasyonu olarak tanımlanmış Paleozoyik yaşlı metamorfik birimler üzerine inşa edilmiştir. Metamorfik birimler çalışma alanında genelde migmatik gnays, kuvars biyotit şist ve kuvars klorit şist ve mika kuvars şistten oluşmaktadır. Bu birimler içerisinde doğrultuları KB-GD ve KD-GB olan iki ana eklem takımı mevcuttur ve yüksek açılı yapılan şev kazıları sonucunda kama ve düzlemsel tür şev duraysızlıkları meydana gelmiştir.

Güllübağ göletinin mansap kesiminin sağ sahili yamacında ileri derecede ayrılmaya uğramış ve yer yer killeşmiş şist birimi içerisinde dairesel kayma meydana gelmiş ve yamacın topuğundaki aktarma tüneli inşaatını engellemiştir. Araziden alınan örselenmemiş örneklerin jeomekanik değerleri kullanılarak SLOPAC programında yapılan duraylılık analizlerinde, kazısı öncesi yamacın güvenlik katsayısının 1.52 ve duraylı olduğu hesaplanmıştır. Aktarma tüneli inşaatı için yamacın topuğunda

yapılan kazı sonrası yamaç kütlelerinin güvenlik katsayısının 1.12'ye düştüğü, yağışlı mevsimlerde yamaç içerisinde biriken suların oluşturduğu düşük gözenek suyu basıncı ile ($r_u=0.12$) dairesel kaymanın meydana geldiği belirlenmiştir.

Ayrık sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan duraylılık analizlerinde, heyelan kütlelerinin topuk kesimindeki yerdeğiştirme $r_u=0.1$ civarında başlamakta ve heyelanının taç kısmındaki açılma çatlaklarının oluşumu gelişmektedir. $r_u=0.2$ ve üzerindeki değerlerde ise heyelan kütlesi tamamen duraysızlaşmakta ve yamaç topuğundaki aktarma tüneli inşaat alanı heyelandan etkilenmektedir.

Yamaçtaki duraysız heyelan kütlesi aktarma tüneli ve vana odası mühendislik yapıları için uzun süreli tehdit oluşturmaktadır. Mühendislik yapılarının güvenliği için duraysız yamaç kütlelerinin ve ayrılmış şist seviyesinin kazılarak yamaçtan uzaklaştırılması, yamaçta basamaklandırma ve şevlendirme uygulaması ile toplam şev açısının düşürülmesi, basamaklarda kafa hendekleri yapılarak yamaçta biriken yağış sularının yüzey drenajının yapılması önerilmektedir.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışmaya desteklerinden dolayı Devlet Su İşleri İzmir Bölge Müdürlüğü'ne, Doğan İnşaat Kuruluşuna, ince kesit analizlerinin değerlendirilmesinde yaptığı katkılardan dolayı Doç. Dr. Tamer Koralay'a yazarlar teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

- Atalar C., Kumsar H., Aydan Ö., Ulusay R., Kılıç R. 2016. Investigation of the mechanism and causes of Serdarlı District landslide (Turkish Republic of Northern Cyprus – TRNC) Proceedings of The 2016 ISRM International Symposium, EUROCK 2016. Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future Volume 1. Editors: R. Ulusay, Ö. Aydan, H. Gerçek, MA Hindistan, E. Tuncay, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-03265-1, pp 635-640.
- Aydan, Ö., Shimizu, Y. and Kawamoto, T., 1992. The stability of slopes against combined shearing and sliding failures and their stabilization. Asian Regional Symposium on Rock Slopes, Oxford & IBH Publ., New Delhi, pp 1105-1117.
- Aydan, Ö., Mamaghani, I.H.P., Kawamoto, T. 1996. Application of discrete finite element method (DFEM) to rock engineering structures. NARMS'96, 2039-2046.
- Aydan, Ö., Kumsar, H., Ulusay, R., Shimizu, Y. 1997. Assessing limiting equilibrium methods (LEM) for slope stability by discrete finite element method (DFEM). IACMAG, Wuhan, 1681-1686.
- Aydan, Ö., Tokashiki, N., Shimizu, Y., Mamaghani, I.H.P. 2001. A stability analysis of masonry walls by Discrete Finite Element Method (DFEM). 10th IACMAG Conference, Austin, 1625-1628.
- Bishop, A.W. 1955. The use of slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, Vol 5, pp 7-17.
- Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey - a synthesis. Geodinamica Acta, 14, 3-30.
- Koralay O. E., Candan O, Akal, C., Dora O. Ö., Chen F., Satır, M. ve Oberanslı, R. 2011. Mendres Masifindeki Pan-Afrikan ve Triyas yaşlı metagranodiyoritlerin jeolojisi ve jeokronolojisi, Batı Anadolu, Türkiye, MTA Dergisi, 142, s 69-121.
- Kumsar, H. 1993. Mine Slope Stability Assessment by Using Inter-slice Force Transmission, PhD Thesis, Nottingham University, UK., 251 p.
- Kumsar, H., Aydan, Ö., Wiczowski, R. Grabowska, E., 2014. Güllübağ (Uşak) Göleti ekseninde yakınında meydana gelen kama türü kaymanın kaya mekaniği açısından incelenmesi, KAYAMEK'2014-XI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / ROCKMEC'2014-XIth Regional Rock Mechanics Symposium, Afyonkarahisar, Turkey, 7-9 Mayıs 2014, Edt. A. Sarıışık, E. Özkan, G. Sarıışık, s 293-298.
- Suyapı, 2010. Uşak İlçe Ovaları Sulama Projesi Güllübağ Göleti Mühendislik Jeolojisi Planlama Raporu, Yayınlanmamış, Su Yapı Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. 42 s.

Edirne - İpsala Hamzadere Barajı Sifon Yapısı Heyelanı Edirne - İpsala Hamzadere Dam Siphon Canal Landslide

C. Yıldız

*DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve YAS Dairesi Başkanlığı
Kaya ve Zemin Mekaniği Şube Müdürlüğü
(cemalyildiz@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Bu bildiriye 22 Mayıs 2015 tarihinde baraja ait H1 ana kanalı Km 3+900 - Km 3+980 arasındaki betonarme sifon inşaatında meydana gelen heyelanın meydana geliş sebepleri detaylı olarak incelenmiştir. Hamzadere Barajı, Edirne – İpsala sınırları içerisinde yer almakta olup, 34.356 ha alanın sulaması için 1993 yılında inşaatına başlanmış 2012 yılında tamamlanmıştır. Baraja ait 6 adet pompa istasyonu bulunmakta olup P6 numaralı pompa istasyonuna ait sifon yapısında, invert beton dökümü esnasında 80 m'lik kısımda heyelan meydana gelmiştir. Sifon yapısının Km 3+ 900 – Km 3+ 980 arasındaki bölgesinde Yenimuhacir Formasyonuna ait kiltası - kumtaşı - silttaşı birimleri yer almakta olup, kazı depo toprağı bunların üstüne biriktirilmiştir. Sifonun sağ ve sol sahilinde çalışmaları için banket bırakılmış olup, banketin arka kısmında suya doymuş olan çeltik tarlası bulunmaktadır. Bu bölgelerden sızma ihtimali olan suları toplamak amacıyla, sifon hattına paralel kazı depo toprağı arkasına su toplama kanalı açılmıştır. Bu kanalda biriken sular bir süre sonra şev içerisine eğimli olan kiltası – silttaşı tabakası arasından sızmaya başlamış ve o dönem olan aşırı yağışlar ve depo toprağının yükünün etkisiyle ani bir şekilde şev içerisine kaymıştır. Kayan malzemenin etkilediği alan yaklaşık 80 m genişliğinde ve 20 m yüksekliğinde olup, yüzeye yakın olan kiltası – silttaşı – kumtaşı birimlerinin arasında geliştiği için yaklaşık derinliği 5 m'dir. Heyelanı meydana getiren etmenlerden en önemlisi sol kısımda bulunan çeltik tarlasındaki suların, eğimi kanal içine doğru olan Yenimuhacir Formasyonuna ait kiltası - kumtaşı - silttaşı birimleri arasından sızarak şevdeki stabilizeyi azaltmasıdır. Heyelan malzemesinin arka kısmında yer alan su kanalının kurutulması, kazı şevinin temizlenmesi ve şev üstünde yük meydana getiren kazı malzemesinin uzaklaştırılarak yükün azaltılması önlemleri alınarak heyelanı meydana getiren etmenler uzaklaştırıldıktan sonra sifon yapısına ait invert beton geçişi hızlı bir şekilde tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yenimuhacir, stabilize, heyelan.

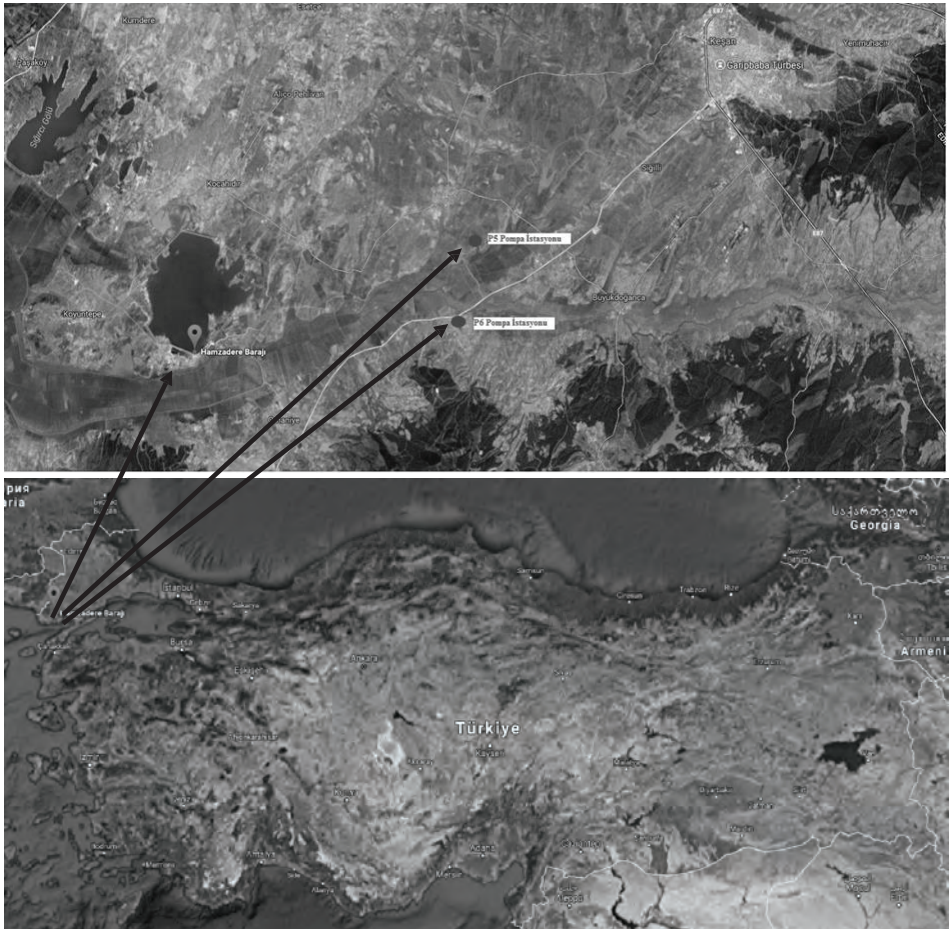
ABSTRACT: In this study, the reasons of the landslide during the construction of reinforced concrete siphon between Km 3 + 900 - Km 3 + 980 of the H1 main channel of the dam on May 22, 2015 are investigated comprehensively. The Hamzadere Dam locates within the boundaries of Edirne, İpsala. In order to irrigate 34.356 hectare area, the construction of the dam was started in 1993 and completed in 2012. There are 6 pumping stations belongs to the dam. During the invert concrete casting at the siphon construction of the pumping station P6, 80 m width landslide occurred. The area of siphon structure between 3+900 km and 3+980 km is composed of the siltstone, sandstone, claystone units of the Yenimuhacir Formation. Excavated material relocated over these units. The embankment was built to facilitate the siphon construction at the right and left bank of the siphon. Behind the embankment, there is a paddy field saturated with water. In order to canalize possible leakages from the upper elevations a drainage channel was dug parallel to the siphon line. The water on the left side of the paddy field, penetrated through the siltstone and claystone units which dip towards the canal, decreased the stability of the slope and eventually sudden failure occurred during the excessive rainfall period due to increase at the unit weight of the soil. The area affected by landslide material is estimated approximately 80 m width, 20 m high and 5 m depth because failure developed between claystone, siltstone, and sandstone units near the surface. The most effective factor of triggering landslide is penetration of the water at the paddy field through the claystone, sandstone and siltstone units of the Yenimuhacir Formation, so decreasing the stability of the slope. By taking measures such as desiccation of irrigation channel behind the landslide, degradation of the slope and decreasing overburden pressure by relocating excavated material far away the slope, the construction of siphon was completed rapidly.

Keywords: Yenimuhacir, stability, landslide.

1. GİRİŞ

İnceleme alanı Türkiye'nin Kuzeybatısında Edirne ili İpsala ilçesi sınırları içerisinde yer alan Koyuntepe mevkiinde yer almaktadır. Kil çekirdek zonlu kaya gövde dolgu tipi olan Hamzadere barajının gövde hacmi 12.000.000 m³, akarsu yatağından yüksekliği 48,00 m., normal su kotunda göl hacmi 207,37 hm³ normal su kotunda göl alanı 13,80 km²'dir. Baraj 34.356 ha bir alana sulama hizmeti vermesi planlanmaktadır. Hamzadere Barajı'nın imalatına 1993 yılında başlamış 2012 yılında yapımı bitmiştir.

Proje sahası 6 üniteye ayrılmıştır. Bunlar; Cimra Ünitesi 4329 ha, Telmata Ünitesi 1961 ha, Kızılkapan Ünitesi 1582 ha, Keşanalıt Ünitesi 1305 ha, Koyuntepe Ünitesi 362 ha ve Yamaç arazileri ünitesi 25 632 ha olmak üzere toplam brüt 34 171 ha'dır. P4 pompa istasyonunun 19,30 m kotlarına terfi ettiği sulama suyu H-1 ana kanalı başlangıç debisi 12,83 m³/sn dir. Söz konusu sulama suyu ile H-1 ana kanalı altında yer alan, Kızılkapan Ünitesi ve Keşanalıt Ünitesi ne ait taban arazilerin sulaması ile beraber P5 pompa istasyonu ve P6 pompa istasyonu ile de yamaç arazilerin sulanması tasarlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Hamzadere Barajı P5 ve P6 Pompa İstasyonları.

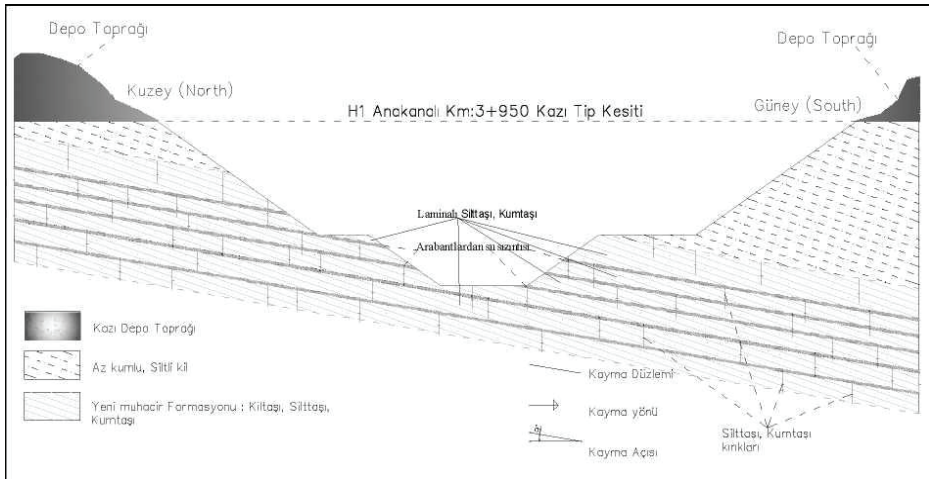
2. GENEL JEOLojİ

Saros Körfezinin kuzeyinde yer alan çalışma alanında sadece Senozoyik zamanına ait birimler Eosen'den Kuvaternere kadar uzanan bir zaman dilimi içerisinde meydana gelmiştir.

Proje alanındaki jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru; Eosen yaşlı Keşan (Tkş) ve Yenimuhacir Formasyonu (Ty), Oligosen yaşlı Danişment formasyonu (Td) ve Hisarlıdağı volkanitleri (Th), Miyosen yaşlı Ergene formasyonu (Te) ve Çanakkale formasyonu (Teç) ve en üstte ise Kuvaterner yaşlı alüvyonlar şeklinde sıralanabilir.

2.1. Jeoloji

Heyelanın meydana geldiği H-1 Anakanalı km 3+900 - 3+980 arasındaki jeolojik duruma bakıldığında; sifon yerinde yapılan kazılarda üstte 50-70 cm bitkisel toprak altında 2-4 m kalınlığa kadar kahverenkli renkli az kumlu kil, kilin altında kazı tabanına kadar olan kesimde ise Eosen yaşlı Yenimuhacir Formasyonuna ait kiltası-kumtaşı-silttaşı ardalanması yer almaktadır. Tabaka doğrultusu N80E olup, tabakalarda açık ve kapalı diagonal çatlaklar gelişmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Kazı bölgesi jeoloji en kesiti.

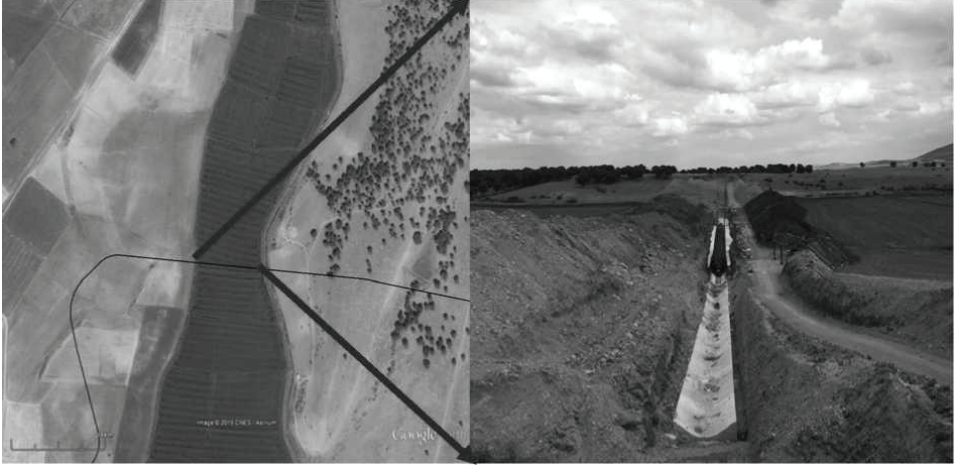
2.2. Deprem Durumu

Çalışma alanı ve çevresi Bakanlar Kurulu' nun 18 Nisan 1996 tarih ve 96/8109 sayılı kararı ile yürürlüğe konulan Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanan, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası' na göre 2. Derecede deprem bölgesine girmektedir. Heyelan günü herhangi bir deprem kayda geçmemiştir.

3. BULGULAR

3.1. İnceleme Alanında Yapılan Tespitler

İnceleme alanında yer alan H1 ana kanalının toplam uzunluğu 36+634,08 km olup sulama alanı 2780 (Ha)'dır. H1 ana kanalının km 3+900 ile km 3+980 arasındaki kısmı pompa istasyonu ve sifon vasıtasıyla geçilmek üzere ve sifon kısmı invert beton kaplama şeklinde yapılması kararlaştırılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. H-1 Anakanalı km 3+900 – km 3+980 arasındaki sifon yapısı.

Sifon yapısının invert beton kısmı imalatı sürerken 22.05.2015 tarihinde KM: 3+900 ile 3+980 arasında ani bir zemin hareketi gelişmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Km 3+900 - km 3+980 arasında gelişen heyelan.

Heyelan alanı incelendiğinde; invert beton kısmı imalatı yapılırken gelişen heyelanın arka kısmında çeltik tarlası olduğu tespit edilmiş ve tarlanın sürekli suyla dolu kalması için bir çiftçi arka yapıldığı tespit edilmiştir. Bu ark sifon tarafından kesilmiş olup kanal heyelan bölgesinin arka kısmından çevrilmiştir. Çevrilen kısımda kanaldan sızan sular kanal içi şev eğimiyle birleşince zemin kayması kaçınılmaz hale gelmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Heyelan bölgesi ve su kanalının çevrildiği bölge.

Kazıdan çıkan malzemenin şev üstüne konulması ve yağışlı bir sezon olması da büyük bir etken olarak göze çarpmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Kazıdan çıkan malzemenin depolandığı alan ve sızıntısının olduğu bölge.

Varnes (1978), heyelan yerine yamaç hareketi terimini kullanmıştır. Yamaç hareketlerinin farklı yollardan sınıflandırıldığını ve her bir sınıflamada tanıma, kontrol, ıslah veya diğer amaçların ön plana çıkarılabildiğini açıklamıştır. Tanıma ve sınıflama için seçilen kriterleri aşağıdaki şekilde gruplandırmıştır.

- Hareketin tipi
- Malzeme türü
- Hareketin hızı
- Yenilen malzemenin ve yenilen alanın geometrisi

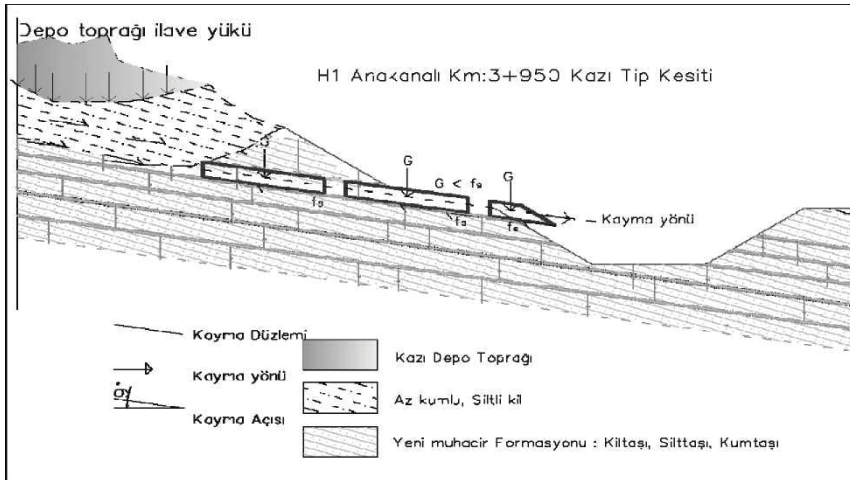
- Yaş
- Sebepler
- Yer değiştiren kütlelerin kopma derecesi
- Jeolojik yapı ile kayma geometrisi arasındaki ilişki
- Gelişme (oluşma) derecesi
- Tip örneğinin coğrafik konumu
- Etkinlik durumu

Tanıma ve sınıflama için hareketin tipi ve malzemenin türünün önemli olduğunu vurgulayarak; heyelanları hareketin tipine ve malzemenin türüne göre sınıflandırmıştır. Varnes, 1978 yılında bir heyelanın özelliklerini gösteren blok diyagram hazırlamıştır (Şekil 7).

HAREKETİN TİPİ		MALZEMENİN TÜRÜ		
		KAYAÇLAR	ZEMİNLER	
			İri taneli	İnce Taneli
DÜŞME		Kaya Düşmesi	Moloz Düşmesi	Zemin Düşmesi
DEVİRİLME		Kaya Devrilmesi	Moloz Devrilmesi	Zemin Devrilmesi
KAYMA	Dönel	Kaya Kayması	Moloz Kayması	Zemin Kayması
	Yanal			
YAYILMA		Kaya Yayılması	Moloz Yayılması	Zemin Yayılması
AKMA		Kaya Akması (Derin Krip)	Moloz Akması	Zemin Akması (Toprak Kribi)
KARIŞIK		İki veya daha fazla hareket türü		

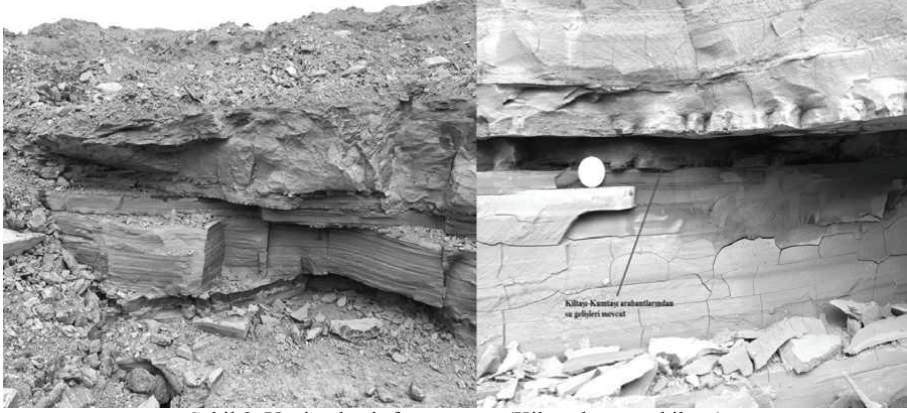
Şekil 7. Hareketin tipi ve malzemenin cinsine göre heyelanların sınıflandırılması (Varnes, 1978).

Kazı bölgesinin jeolojik en kesitlerine bakıldığında ve Varnes (1978)'e göre genel bir değerlendirme yapılacak olursa; heyelan kaya kayması olarak sınıflandırılabilir. Yeni muhacir formasyonunun (Kıltaşı-Silttaşı, Kumtaşı) içerisinde su sızmasıyla beraber sifon kazısından çıkan depo toprağının yüküyle birlikte sol sahildeki şev üzerine yığılması kaymayı meydana getirmiştir. Kayan malzeme yaklaşık 80 m genişliğinde, 20 m yüksekliğinde ve 5 m derinliğindedir (Şekil 8).



Şekil 8. Kayma düzlemini gösteren jeoloji en kesiti.

Kanal içerisine eğimli olan Yenimuhacir formasyonunda kaymayı meydana getiren diğer bir etkidir. Çiftçi arkından sızan suların bu formasyon içerisinden kanal içine doğru devam etmiş ve kıltaşının kohezyonunu kaybederek hareket etmesine neden olmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. Yenimuhacir formasyonu (Kiltaşı,kumtaşı,kiltaşı).

4. SONUÇLAR

Edime - İpsala Hamzadere Barajı Sulaması H1 Anakanalı sifon yapısı invert beton kısmında KM: 3+600 ve KM:3+ 680 arasında gelişen 80 m eninde 20 m yüksekliğinde ve 5 m derinliğindeki heyelan incelenmiştir.

Heyelan kıltaşı - kumtaşı - silttaşı tabakalarından oluşan Eosen yaşlı Yenimuhacir formasyonun içerisinde oluşmuştur.

Heyelanın oluş biçimi Varnes (1978)'e göre kaya kayması olarak nitelendirilebilir. Heyelan bölgesinde sifon yapısının invert beton kısmı eski bir su arkını kesmekte olup, arkın kesildiği bölgeden şev içerisine suların sızması, Yenimuhacir formasyonunda (kıltaşı – silttaşı - kumtaşı) yer alan birimlerin şev içine eğimli oluşları ve kazı depo toprağının kanal şevlerinin üstüne yığılmasıyla birlikte yamaç hareketi kaçınılmaz hale gelmiştir. Heyelan bölgesinde sifonun invert beton çalışmalarına devam etmek için; ilk olarak kayan bölgenin üstünde yük meydana getiren depo toprağı temizlenmiş, heyelan bölgesine su sızmasını engellemek amacıyla çiftçi arki pompa yardımıyla kurutulmuş ve kazı şevi temizlenerek hızlı bir şekilde invert beton kısım imalatı tamamlanmıştır.

5. KAYNAKLAR

- İmmet, İ.E., 2017. Kişisel görüşme. DSİ Genel Müdürlüğü
Khorstd, T., 2017. Kişisel görüşme. DSİ Genel Müdürlüğü
Koeri, 2007. <http://www.koeri.boun.edu.tr>: Kandilli seismological data search. Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, İstanbul
Topuz, E., 2010. Edirne - İpsala Hamzadere-Koyuntepe Barajı Sulaması Proje Yapım İş H1, H1C, H1CA, H3, H3P Ana Kanalı, P9 İletim Kanalı, P5, P5A, P6 Pompa İstasyonları Mühendislik Jeolojisi Raporu, Cilt-1.
Varnes, D. J., 1978. Slope Movement Types And Processes. In Landslides: Analysis and Control. Edited by R. L. Schuster And R. J. Krizek. Transportation Research Board, National Academy Of Science, Washington Special Report 176, Chapter 2, 11-33.

MÜHENDİSLİK UYGULAMALARINDA
HİDROJEOLOJİ

Aşağı Seyhan Ovası (Mersin-Adana) Yeraltı Sularının Tarımsal Sulama Suyu Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi

Assessment of Ground Waters in the Lower Seyhan Plain with Respect to Irrigation Water Quality

C. Akbulut Camuzcuoğlu*, C. Güler

*Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 33343 Çiftlikköy, Mersin
(*akbulutcn@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, Çukurova Deltası'nın büyük bir kısmını kapsayan Aşağı Seyhan Ovası'nda bulunan yeraltı sularının tarımsal sulama suyu olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, 2014 yılında 132 kuyudan alınan yeraltı suyu örneğinde çeşitli fizikokimyasal parametreler ölçülmüştür. Elde edilen veriler kullanılarak, tüm su örnekleri için sodyum yüzdesi (Na%) ve sodyum adsorpsiyon oranları (SAR) belirlenmiş, Wilcox ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramları oluşturulmuştur. Ayrıca, yeraltı sularının sulama suyu olarak kullanılabilirliği, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Teknik Usuller Tebliği'nde belirtilen sulama suyu kalite kriterleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; yeraltı sularının genelde elektriksel iletkenlik değerleri açısından II. (iyi) ve III. sınıf (kullanılabilir) sular sınıfına girdiği, B, Cl⁻, SO₄⁻² ve NO₃⁻ konsantrasyonları açısından ise I. sınıf (çok iyi) sular sınıfına girdiği belirlenmiştir. Bazı örneklerde, F⁻, Mn, Mo ve Zn konsantrasyonları sınır değerlerin üzerindedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; bölgede hâlihazırda tarımsal sulamada kullanılan yeraltı sularının oldukça iyi kalitede olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı suyu, tarımsal sulama suyu, hidrojeokimya, su kalitesi, Aşağı Seyhan Ovası.

ABSTRACT: In this study, suitability of ground waters as agricultural irrigation water has been investigated in the Lower Seyhan Plain, covering a large part of the Çukurova Delta. For this purpose, various physicochemical parameters were determined in 132 ground water samples that were collected in 2014. Using the acquired data, for each water sample, percent sodium (%Na) and sodium adsorption ratio (SAR) values were determined, Wilcox and U.S. Salinity Laboratory diagrams were constructed. Ground water samples were also evaluated for their suitability according to criteria defined in Water Pollution Control Directive, Technical Procedures Paper. According to data obtained, in terms of electrical conductivity values, groundwater samples are defined as Class II (good) and Class III quality (usable). Whereas, in terms of concentrations of B, Cl⁻, SO₄⁻² and NO₃⁻, they are defined as Class I quality (very good). F⁻, Mn, Mo and Zn concentrations of several water samples are above the limit values. According to the results obtained, it was determined that the ground waters already used in agricultural irrigation in the region are relatively good quality.

Keywords: Ground water, agricultural irrigation water, hydrogeochemistry, water quality, Lower Seyhan Plain.

1. GİRİŞ

İnsanlar yaşamlarını sürdürebilmek için, önemli doğal zenginlikler olarak kabul edilen toprak ve su kaynaklarından yararlanırlar. Türkiye, konumu itibarıyla, toprak ve su kaynakları açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak sulama, gübreleme ve ilaçlama uygulamalarının bilinçsiz bir şekilde yapılması ve tarım alanlarındaki drenaj yetersizliği nedeniyle ülkemizde elde edilen tarımsal ürün miktarı istenilen düzeyde değildir (Arslan vd., 2007; Köksal, 2007). Doğal koşullar altında, yağışlar bitkinin su ihtiyacının ancak küçük bir kısmını karşılayabildiği için sulama, bitki gelişiminde önemli bir yere sahiptir. Sulamadaki amaç, toprak-su ve bitki arasında bir denge kurularak yetiştirilen bitkinin gelişmesi için yeterli nem koşulunun sağlanmasıdır. Toprakta gereğinden fazla nem bulunması halinde, ürün miktarında azalma gözlenmekte ve tuzluluk, alkalilik ve taban suyu gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (Sönmez ve Kaplan, 2004; Şimşek ve Gündüz, 2007). Sulama suyu kalitesi, bitki gelişimi

analizleri için ayrılan ikinci şişeye ise asit eklenmemiştir. Alınan su örnekleri, buharlaşma etkilerini azaltmak açısından laboratuvara bir buzlukta taşınmış ve analizler yapılmaya kadar bir soğutucuda +4°C'de muhafaza edilmiştir.

2.2. Analitik Prosedür

Çalışma alanından alınan yeraltı suyu örneklerine ait 4 majör (Ca, Mg, Na ve K) ve 15 iz elementin (Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb ve Zn) konsantrasyonları Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezinde (MEİTAM) bulunan Agilent 7500ce marka ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) cihazı ile ölçülmüştür. Ayrıca kontrol amaçlı olarak, 4 majör (Ca, Mg, Na ve K) katyonun analizleri Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde bulunan Perkin Elmer 700 model Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi (AAS) cihazıyla da yapılmıştır. Klorür, sülfat, nitrat, nitrit, fosfat ve florür konsantrasyonları Hach Lange DR2800 marka spektrofotometre ile tayin edilmiştir. Karbonat ve bikarbonat konsantrasyonları ise EPA 310.1'e göre titrasyon yöntemiyle saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak, her bir örneğin sodyum yüzdesi (Na%) ve sodyum adsorpsiyon oranları (SAR) belirlenmiş, Wilcox ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramları çizilmiş ve incelenen yeraltı sularının sulama suyu olarak kullanılabilirliği, 7 Ocak 1991 tarihli ve 20748 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Teknik Usuller Tebliği'nde belirtilen sulama suyu kalite kriterleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. Ölçülen su kalitesi parametreleri ve kullanılan analitik yöntemler.

Parametre / Element	Birim	Analitik yöntem
pH	Standart	Sentik 41-3 cam pH probu
Eh	mV	Sentik 41-3 cam pH probu
Elektriksel İletkenlik (EC)	$\mu\text{S cm}^{-1}$	TetraCon 325 grafit prob
Majör iyonlar (Ca, Mg, Na ve K)	mg L^{-1}	Kütle Spektrofotometresi
Karbonat (CO_3^{2-})	mg L^{-1}	Titrasyon
Bikarbonat (HCO_3^-)	mg L^{-1}	Titrasyon
Klorür (Cl^-)	mg L^{-1}	Mercuric Thiocyanate metodu
Florür (F^-)	mg L^{-1}	SPADNS metodu
Sülfat (SO_4^{2-})	mg L^{-1}	Baryum sülfat bulanıklığı
Nitrat (NO_3^-)	mg L^{-1}	Kadmiyum indirgeme metodu
Nitrit (NO_2^-)	mg L^{-1}	Diazotizasyon metodu
Ortofosfat (PO_4^{3-})	mg L^{-1}	Fosformolibden Mavisi
İz elementler (Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb ve Zn)	$\mu\text{g L}^{-1}$	Kütle Spektrofotometresi

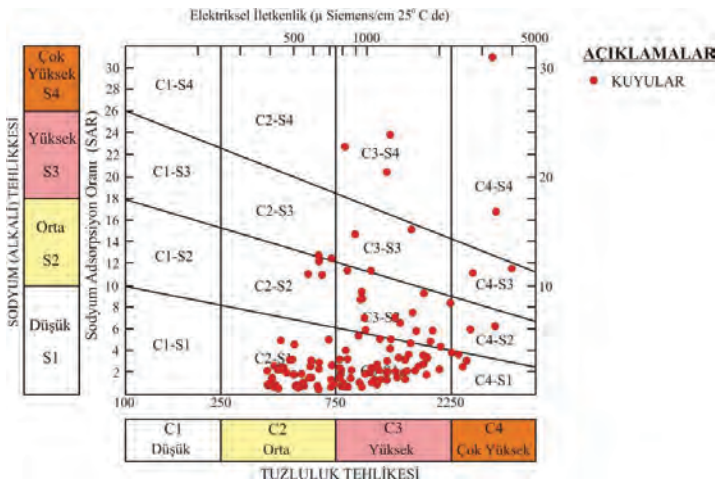
3. BULGULAR

Bu çalışmada, Aşağı Seyhan Ovası'nda bulunan yeraltı sularının tarımsal sulama suyu olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Alınan yeraltı suyu örneklerinin fiziko-kimyasal özellikleri Çizelge 2' de verilmiştir.

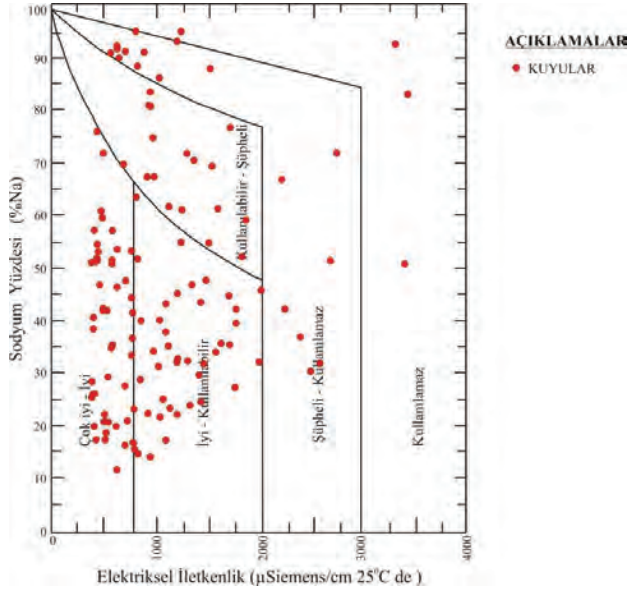
Çizelge 2. Yeraltı suyu örneklerinin fiziko-kimyasal özellikleri.

Parametre - Element	Birim	Minimum Değer	Maksimum Değer	Parametre - Element	Birim	Minimum Değer	Maksimum Değer
pH	Standart	7,11	8,73	Al	$\mu\text{g L}^{-1}$	1,94	389,4
Eh	mV	-131	-27	As	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,18	70,19
EC	$\mu\text{S cm}^{-1}$	387	5930	B	$\mu\text{g L}^{-1}$	37,26	1232,5
Ca	mg L^{-1}	1,87	319,25	Cd	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,43	4,93
Mg	mg L^{-1}	2,69	631,10	Co	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,12	9,16
Na	mg L^{-1}	18,05	1141,5	Cr	$\mu\text{g L}^{-1}$	0	32,12
K	mg L^{-1}	0,26	142,73	Cu	$\mu\text{g L}^{-1}$	0	33,23
CO_3^{2-}	mg L^{-1}	0	14,31	Fe	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,02	3022
HCO_3^-	mg L^{-1}	26,43	743,59	Li	$\mu\text{g L}^{-1}$	1,3	131,1
Cl^-	mg L^{-1}	7,6	2772	Mn	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,01	1308
F^-	mg L^{-1}	0,01	2,08	Mo	$\mu\text{g L}^{-1}$	1,52	59,34
SO_4^{2-}	mg L^{-1}	2,73	1996	Ni	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,01	48,17
NO_3^-	mg L^{-1}	0,004	36,4	Pb	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,37	113,20
NO_2^-	mg L^{-1}	0,001	3,124	Sb	$\mu\text{g L}^{-1}$	0,52	11,98
PO_4^{3-}	mg L^{-1}	0,004	1,360	Zn	$\mu\text{g L}^{-1}$	1,3	3013,5

Elde edilen sonuçlar kullanılarak, her bir su örneği için sodyum yüzdesi (Na%) ve sodyum adsorpsiyon oranları (SAR) belirlenmiş, Wilcox ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramları çizilmiştir (Şekil 2 ve 3). Yeraltı sularının SAR değerleri 0,493–0,99 arasında, EC değerleri ise 387–5930 $\mu\text{S/cm}$ arasında değişmektedir. ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramına göre, yeraltı sularının %40'ı C3-S1 sınıfı, %33'ü C2-S1 sınıfı, %12'si C3-S2 sınıfı ve geri kalan örnekler ise C3-S4, C4-S1, C2-S2, C3-S3, C2-S3, C4-S2, C4-S3 ve C4-S4 sınıflarındadır. Wilcox diyagramına göre örneklerin %38'i çok iyi-iyi sınıfına, %33'ü iyi-kullanılabilir sınıfına, %13'ü kullanılabilir-şüpheli sınıfına, %14'ü şüpheli-kullanılamaz sınıfına, geri kalanı ise kullanılamaz sınıfına düşmektedir. Kuyulardan alınan su örnekleri Teknik Usuller Tebliği'nde belirtilen sulama suyu kriterlerine göre değerlendirildiğinde, örneklerin genelinen elektriksel iletkenlik değerleri açısından II. (iyi) ve III. sınıf (kullanılabilir) sular olduğu, B, Cl^- , SO_4^{2-} ve NO_3^- konsantrasyonları açısından ise I. sınıf (çok iyi) sular olduğu belirlenmiştir. Ayrıca örneklerin Al, As, Cd, Co, Ni, Li, Fe ve Pb konsantrasyonlarının yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin altında olduğu, ancak bazı örneklerde F^- , Mn, Mo ve Zn konsantrasyonlarının yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin üzerinde olduğu saptanmıştır.



Şekil 2. Yeraltı suyu örneklerinin Wilcox diyagramındaki dağılımı.



Şekil 3. Yeraltı suyu örneklerinin ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramındaki dağılımı.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yerleşim, sanayi ve tarımsal faaliyetlere konu olan Aşağı Seyhan Ovası'ndaki 132 kuyudan alınan su örnekleri, tarımsal sulama suyu kalitesi açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen analitik sonuçlar kullanılarak her bir su örneği için sodyum yüzdesi (Na%) ve sodyum adsorpsiyon oranları (SAR) belirlenmiştir. Ayrıca Wilcox ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramları çizilmiş, bölgenin yeraltı sularının sulama suyu olarak kullanılabilirliği Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Teknik Usuller Tebliği'nde belirtilen sulama suyu kalite kriterleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, suların büyük bir kısmında tuzluluk tehlikesi bulunduğunu göstermiştir. Karşılaşılan tuzluluk probleminin etkisinin azaltılabilmesi için uygulanacak olan sulama suyu miktarı ve sulama suyu tuzluluğunun uygun yönetim teknikleri ile düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, yoğun yıkanma sonucunda, yeraltı suyuna karışan tuzun uzun vadede yeraltı suyu kalitesini olumsuz olarak etkileyeceği göz önünde bulundurulursa, tarımsal sulamada elektriksel iletkenlik değeri düşük olan suların tercih edilmesi gerekmektedir. Ayrıca tuza dayanıklı bitkiler yetiştirilerek verim kayıplarını azaltmak mümkündür.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: FBE JMB (CA) 2012-5 DR

6. KAYNAKLAR

- Arslan, H., Güler, M., Cemek, B., Demir, Y., 2007. Bafra ovası yeraltı suyu kalitesinin sulama açısından değerlendirilmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 219-226.
- Grismer, M.E., 1990. Leaching fraction, soil salinity and drainage efficiency. California Agriculture, 44/6, 24-26.
- Jalali, M., Merrikhpour, H., 2008. Effects of poor quality irrigation waters on the nutrient leaching and groundwater quality from sandy soil. Environmental Geology, 53, 1289-1298.

- Köksal, S.E., 2007. Sulama suyu yönetiminde uzaktan algılama tekniklerinin kullanımı. *Journal of the Faculty of Agriculture*, 22(3), 306-315.
- Sönmez, İ., Kaplan, M., 2004. Demre yöresi seralarında toprak ve sulama sularının tuz içeriğinin değerlendirilmesi. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17, 155-160.
- Şimşek, C., Gündüz, O., 2007. IWQ Index: A GIS-integrated technique to assess irrigation water quality. *Journal of Environmental Monitoring*, 128, 277-300.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 1991. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Teknik Usuller Tebliği, 7 Ocak 1991 tarihli ve 20748 sayılı Resmi Gazete.
- United States Salinity Laboratory Staff (USSLS), 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, Handbook 60, United States Department of Agriculture, 160.
- Villora, G., Moreno, A., Pulgar, G., Romero, L., 2000. Yield improvement in zucchini under salt stress: Determining micronutrient balance. *Scientia Horticulturae*, 86, 175-183.
- Wilcox, L.V., 1948. The quality of water for irrigation use. *US Department of Agriculture Technology Bulletin* 962, 40.

Karst Susuzlaştırmasının Obruk Oluşumuna Etkisi: Afşin-Elbistan Linyit Sahası Örneği

The effect of dewatering on sinkhole occurrence: Case study of the Afşin-Elbistan Coal Basin

Y. Mahmutoğlu^{1*}, R. Karagüzel¹, G. Şans¹, M. Erdoğan¹, E. Bozkurtoğlu¹,
H.S. Akyüz¹, T. İşseven², C. Taştekin³, E. Ata³

¹ İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, İstanbul

² İTÜ Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, İstanbul

³ EÜAŞ Maden Sahaları Daire Başkanlığı, Ankara

(*yilmazm@itu.edu.tr)

ÖZ: Afşin-Elbistan Çöllolar Açık İşletmesi'nde şev duraylılığını sağlamak amacıyla, 2015 yılı başında, karstik akiferde 6 adet yeraltısuyu drenaj kuyusu daha işletmeye alınmıştır. Bu uygulama ile karstik akiferden çekilen su miktarı bir önceki yılın aynı aylarındaki miktarlara oranla 2-3 kat arttırılmıştır. İlki, yeni kuyuların işletmeye alınmasından bir hafta sonra olmak üzere, Haziran 2015 tarihine kadar, 4 adet obruk oluşmuştur. Yeraltısuyu çekiminin azaltılmasına rağmen dört adet obruk daha oluşmuştur. Çalışma kapsamında bölgedeki hidrolojik, jeolojik, hidrojeolojik ve jeomekanik sınır koşulları tanımlanmış, susuzlaştırma süreci de göz önünde tutularak oluşturulan kavramsal model, analiz edilmiştir. Sayısal analizler sonucunda obrukların kümelendiği bölgede, karstik akiferden aşırı su çekimine bağlı olarak boşluk suyu basıncında azalma ve düşey efektif gerilmelerde artışların olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Plio-Kuvaterner istifin ve kömür düzeyinin altında taban kilinin sürekli olmadığı veya ince olduğu havza kenarında karstik akiferden su çekimine bağlı iç erozyon geliştiği, üstte bulunan malzemenin temel kaya içindeki karstik boşluklara göç ettiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Afşin-Elbistan, karst, obruk, sayısal analiz, susuzlaştırma.

ABSTRACT: Six drainage boreholes further operated about 20 days after the dewatering process, which increased 2-3 times compared with the amount discharge in the same period of the previous year, in the Afşin-Elbistan Çöllolar Open-pit Mine. The first one, week after the new wells put into operation, four sinkhole formed at the edge of the basin until June 2015. Later, four more sinkhole formed despite the reduction of groundwater withdrawal. In this study, the hydrological, geological, hydrogeological and geo-mechanical boundary conditions in the region presented and the conceptual numerical model built considering dewatering process analyzed. As a result of the numerical analysis, it was determined that there is a significant decrease in the pore water pressure due to extreme water withdrawal from the karstic aquifer and a significant increase in the vertical effective stresses on the sinkhole forming area. Moreover, it is understood that internal erosion develops between the contacts, and the weak upper cover composed of young sedimentary layers collapses into karstic cavities in the base rock due to the gravity effect.

Keywords: Afşin-Elbistan, karst, sinkhole, numerical analysis, dewatering.

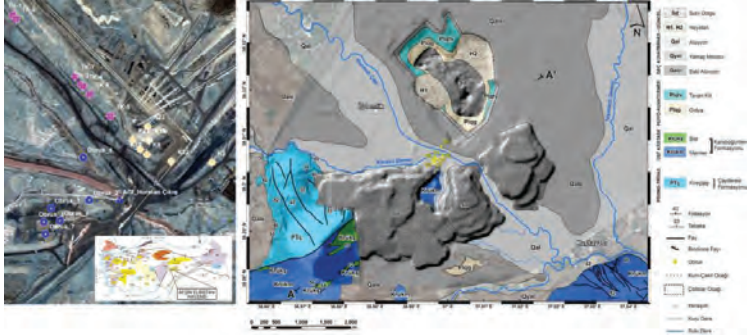
1. GİRİŞ

Dünyada karst ile ilişkili ovaların kenarlarında, yeraltısuyu çekimine bağlı seviye düşümleri sonucunda oluşmuş sayısız obruk kayda geçirilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nin Alabama bölgesinde 1900-1980 yılları arasında, susuzlaştırılan kömür sahasında bu tür nedenlerle oluşan obruk sayısı 4000'den fazladır (Newton, 1984). Çoğu durumda, konsolide olmamış yığının, temel kaya içindeki boşluğa doğru göçü; yüzdürme desteğinin kaybı, yeraltı suyunun hızının artırılması (iç erozyon), konsolide olmamış örtü altındaki su seviyesi salınımı ve yapay besleme gibi nedenlere bağlıdır. Obruk gelişimi, karst yapısı içeren karbonatlı kayaların varlığı ve bu tür kayaçları örten gevşek, zayıf ve doymun örtü malzemesinin olup olmasına bağlıdır. Üstte bulunan serbest su düzeyi, arazinin topoğrafyası, jeolojik özellikleri, suni besleme ve su çekimi ile ilişkilidir. Çöllolar Ocağı batı şevi ile obrukların oluştuğu havza kenarında geçerli jeolojik, hidrolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik ve jeomekanik koşullar yukarıda tanımlanan özelliklere benzerlik göstermektedir. 2015 yılı içerisinde oluşan obrukların bulunduğu sahada geçerli sınır koşulları bu bildiride açıklanmış ve oluşturulan sayısal modelin performansı, 2015 yılı Şubat ayında devreye alınan karst susuzlaştırması da göz önünde bulundurularak, aşamalı olarak irdelenmiştir.

2. OBRUKLARIN OLUŞTUĞU HAVZA KENARINDAKİ SINIR KOŞULLARI

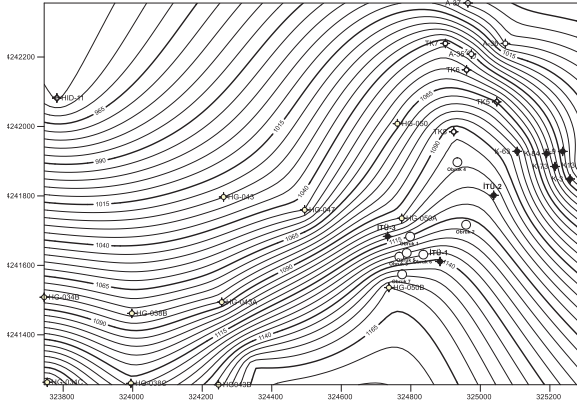
2.1. Jeolojik Durum

Havza kenarına yakın alanda temel kayayı, karstik yapıdaki Çayderesi Formasyonu oluşturmaktadır (Özgül, 1981; Yılmaz vd., 1997; Gökmenoğlu ve Aslan, 2013). Plio-Kuvaterner yaşlı, kalın kömür katmanları ve organik madde içeriği yüksek göl ve bataklık çökeli niteliğindeki kil, siltli kil ve gidyadan oluşan istif temel kayayı uyumsuz olarak örtmektedir (Şekil 1). Neojen istif tabanda yeşil kil (taban kili) ile başlamakta, tavanında ise mavi renkli kil düzeyi ile sonlanmaktadır. Plio-Kuvaterner yaşlı havza dolgusunun üzerinde ise kalınlığı değişken eski alüvyon (taraça), yamaç birikintisi ve Hurman Çayı ile Kuru Dere'nin güncel alüvyonları bulunmaktadır. Obruklar havza içine doğru uzayan kireçtaşı sırtı üzerinde, havza kenarına yakın bir noktada kümelenmiştir. Bu bölgede, arazi kotları 1165-1170 m, temel kaya derinliği ise 20-40 m arasındadır (Şekil 2).



Şekil 1. Araştırma alanının konumu ve jeoloji haritası.

Havzanın derin kesimlerinde Plio-Kuvaterner yaşlı istifin tabanında görülen taban kili (yeşil-gri kil) obrukların kümelenmediği bölgede açılan sondajlarda kesilmemiştir.

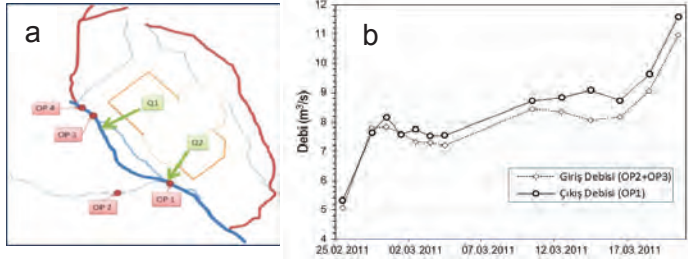


Şekil 2. Obrukların geliştiği bölgede temel kaya (Kireçtaşı) topografyası, oluşan obruklar, karst susuzlaştırması (K, TK), kömür rezervi belirleme (HG) ve araştırma kuyularının (İTÜ) konumları.

2.2. Hidrolojik Durum

Şubat 2015'de işletmeye alınan K kodlu susuzlaştırma kuyuları ocağın batı şevinin güney doğusunda, şev tepesinde ve birbirine yakın noktalarda açılmıştır (Şekil 1). Çalışma alanında yüzey suyunun obruk oluşumundaki etkisini ve debilerindeki değişimi belirlemek amacıyla Hurman Çayı ve yan kolu Kurudere üzerine akım gözlem istasyonu yerleştirilmiştir (Şekil 3a). İnceleme alanına yüzey suyu giriş

(OP2+Q3) ve çıkış (OP1) debileri 2011 yılına ait kayıtlar kullanılarak Şekil 3b'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3. İnceleme alanındaki akım gözlem istasyonları (a) ve 2011'de ölçülen akım debileri (b).

2.3. Hidrojeolojik Durum

Afşin Elbistan Kömür Havzası Çöllolar sahası ve dolayında haritalanan, stratigrafik birimler, fiziksel ve hidrojeolojik özellikleri dikkate alınarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Hidrojeolojik sistemler ve özellikleri.

Formasyon	Litoloji	Hidrojeolojik Sistem Tanımı	Akifer Türü
Alüvyon (Kuvaterner)	Yeni Alüvyon	Taneli	Serbest Akifer
	Eski Alüvyon	Zayıf tutturulmuş taneli	Serbest Akifer
Kömürlü Çökeller (Plio-Kuvaterner)	Mavi Kil	Kohezyonlu	Akitard
	Marn	Pekişmiş	Akitard
	Gıdya	Taneli-Kohezyonlu	Zayıf Akifer-Akitard
	Kömür Alt Gıdya Taban Kili	Fisürlü-Çatlaklı Taneli-Kohezyonlu Kohezyonlu	Serbest/Yarı basınçlı Akitard
Kırıntılı Çökeller (Eosen)	Kumtaşı-kiltaşı ve	Taneli	Yaygın -Zengin Basınçlı Akifer
	Kum-çakıl ara tabakaları	Zayıf tutturulmuş Tabakalı Çatlaklı	
Temel kayalar (Palezozyik)	Kireçtaşı Mermer Şist	Erime boşluklu Çatlaklı	Yaygın -Zengin Basınçlı Akifer

İnceleme alanında daha önceden açılan kuyularda yapılan pompaj deneylerinden, litolojik birimler için hesaplanan ortalama aritmetik ve geometrik hidrolik iletkenlik değerleri (K) Çizelge 2'de verilmiştir (MBEG, 2012).

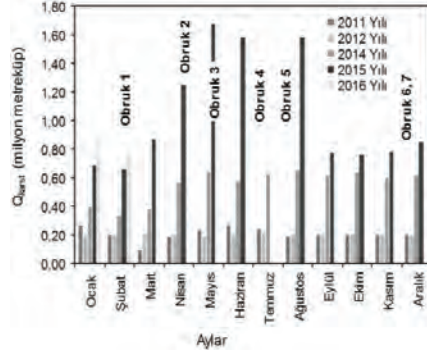
Çizelge 2. MBEG 2012 kuyularından ve İTÜ 2016 deneylerinden hesaplanan hidrolik parametreler.

Model Katmanı	K (m/s)			
	MBEG, 2012		İTÜ, 2016	
	Aritmetik Ort.	Geo. Ort.	Aritmetik Ort.	Geometrik Ort.
Alüvyon	3.33E-05		3.09E-4	2.92E-4
Tavan Kili	4.31E-05	4.27E-6		
Gıdya	8.80E-07	8.52E-7	3E-7	3E-7
Kömür	1.15E-07	1.73E-7	1.58E-4	1.58E-4
Taban kili	1.15E-06	1.05E-6	3.55E-4	3.59E-4
Temel Kaya (Kireçtaşı)	1.00E-3		2.98E-4*	2.97E-4*

*Kuyularda yükselim okumalarından hesaplanmıştır.

2.4. Karstik Akiferde Susuzlaştırma ve Etkileri

Şubat 2015-Haziran 2015 döneminde karstik akiferden toplamda yaklaşık 6,54 milyon m³ su çekilmiştir (Şekil 4). Mayıs 2015 ayında çekilen aylık toplam su miktarı ise 1,68 milyon m³ olup, bir önceki yılın aynı döneminde çekilen miktara göre 2,64 kat fazladır. Bu faaliyet sürdürülürken açık işletmenin kalıcı batı şevi güneyinde, karst kuyularından yaklaşık 200-350 m mesafelerde obruk türünde çökme yapıları gelişmeye başlamıştır. Bu durum fark edildikten sonra karst susuzlaştırma projesi kapsamında planlanan kuyuların açımı durdurulmuştur. 20 Ağustos 2015 tarihinden sonra ise yeni açılan K kodlu kuyulardan K-84 hariç diğerleri devre dışı bırakılmış, karstik sistemden yeraltısu çekimi azaltılmıştır. Bu tarihten sonra karst kuyularındaki aylık çekim 765-850 bin m³ aralığındaki mertebeye düşürülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4. 2011-2016 yıllarında karst akiferinden aylık su çekimleri ve obrukların oluşum süreci.

Karst kuyularına en yakın mesafedeki 4 numaralı obruk (Obruk-4) Hurman Çayı'nın ötelenen eski ve yeni yatakları arasında, diğerleri ise Kurudere'nin güneyinde, akarsu çökeltileri ile kaplı dar bir alanda kümelenmiştir.

2.5. Jeomekanik Durum

Çöllolar sektöründe Şubat 2011 ayında oluşan heyelanların nedenlerini analiz etmek için pompaj ve karotlu jeoteknik araştırma kuyuları açılmıştır (MBEG, 2012). Önceden açılan bu kuyularda karşılaşılan durum dikkate alınarak araştırma kuyularının planlanan derinliklerinden örselenmemiş numuneler alınmıştır. Tüm seviyeler için belirlenen boşluk oranı ($1.5 < e_v < 3.19$) oldukça yüksektir. Çok sayıda drenajlı (CD) ve drenajsız (CU) kesme deneyi verileri kontrol edilip, istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda litolojik birimler için belirlenen mühendislik parametreleri Çizelge 3'de özetlenmiştir.

Çizelge 3. Drenajlı (CD) ve drenajsız (CU) koşullarda örselenmemiş örnek için belirlenen maksimum (ϕ_p , c_p) ve kalıcı (ϕ_r , c_r) kesme mukavemeti parametreleri (MBEG, 2012).

Birim	Drenajsız Kesme Mukavemeti				γ_n (kN/m ³)	Drenajlı kesme Mukavemeti			
	ϕ_p (°)	c_p (kPa)	ϕ_r (°)	c_r (kPa)		ϕ_p (°)	c_p (kPa)	ϕ_r (°)	c_r (kPa)
Alüvyon	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Loam	21	31	14	18	17.6	27	31	19	22
Marn	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mavi Kil	23	33	15	12	18.1	16	42	9	31
Siyah Kil	28	11	26	6	19.2	15	46	9	15
Gidya	32	23	29	15	15.4	32	25	30	15
Gidya-Kömür	34	27	30	16	13.1	31	32	30	27
K. Gidya-Kömür	32	24	29	17	15	30	38	29	14
Kömür	28	36	21	26	12.4	33	30	27	21
Kil Ara Tabakası	20	19	12	9	15.9	17	32	7	15
Taban Kili	29	39	26	25	18.2				
Hey. Malzemesi			20	5	14.0				

Obrukların oluştuğu alanda geçerli jeolojik durum ve zemin parametrelerini belirlemek için araştırma kapsamında 3 adet sondaj daha açılmıştır. Bu kuyuların farklı derinliklerinden örselenmiş (SPT) ve örselenmemiş (UD) numuneleri alınmış, elek analizi, kıvam limitleri, dane birim hacim ağırlığı ve kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuştur.

Ayrıca, Obruk-3, -5 ve -7'nin duvarlarından alınan alüvyon örnekleri de ıslak elek analizine tabi tutulmuştur. Alüvyonun üzerini örten ve kalınlığı 0.5-2.0 m arasında değişen bataklık çökeli niteliğindeki kohezyonlu birimin ise orta plastisiteli killi siltten (MI) oluştuğu belirlenmiştir. İTÜ kodlu kuyulardan alınan gıyda örneklerinin yüksek plastisiteli silt (MH) oldukları, İTÜ-3 kuyusunun 37.50-38.00 m derinliğinden alınan UD-3 nolu numunenin doğal su içeriğinin ise likit limit değerini aştığı görülmüştür.

Çizelge 4'den görüleceği gibi gıydanın porozitesi genellikle % 60'ın üzerindedir. Ayrıca örselenmemiş 6 adet UD numunesi üzerinde drenajsız kesme kutusu deneyleri yapılmış, elde edilen maksimum kayma mukavemeti parametreleri aynı çizelgede verilmiştir.

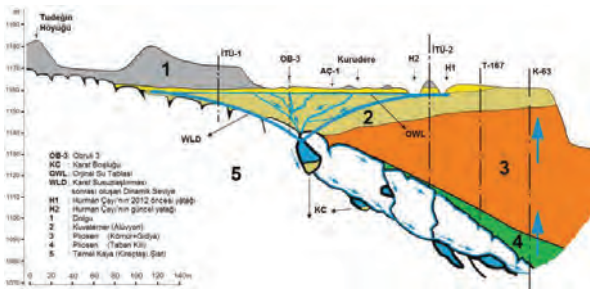
Çizelge 4. İTÜ kodlu kuyulardan alınan UD örneklerinin dane birim hacim ağırlığı (γ_s), porozitesi (n) ve drenajsız kesme mukavemeti parametreleri (İTÜ, 2017).

Örnek No	Derinlik (m)	γ_s (kN/m ³)	n	γ_n (kN/m ³)	c_p (kPa)	ϕ_p (°)	Tanım
İTÜ 1-UD1	7.00-7.50	27.0	0.48	18.1	20	31	Bataklık Çökeli
İTÜ 2-UD 1	7.50-7.95	23.6	0.61	14.3	20	34	Bej Gıyda
İTÜ 2-UD 2	33.50-34.00	24.5	0.59	15.8	60	33	Kömürlü Gıyda
İTÜ 3-UD 1	9.00-9.30	24.3	0.63	14.5	5	35	Bej Gıyda
İTÜ 3-UD 2	15.50-16.00	-	-	15.0	5	35	Bej Gıyda
İTÜ 3-UD 3	37.50-38.00	25.1	0.71	13.6	35	32	Kömürlü Gıyda

3. KAVRAMSAL MODEL VE SAYISAL ANALİZİ

Araştırma sonuçlarına göre oluşturulan kavramsal hidrojeolojik model Şekil 5'de verilmiştir. Modelde havza kenarındaki jeolojik ve hidrojeolojik ortamlar, bu ortamların birbirine göre konumları, ara yüzeyleri, taban kaya içerisinde gelişmiş karst boşlukları ve karst akiferinden yeraltısuyu çekimine bağlı üst akiferle (serbest akifer) etkileşim görülmektedir.

Arazi gözlemi ve sondaj verilerinden, gözenekli serbest akiferin havza temelini oluşturan karstik kireçtaşı ile yer yer dokanak oluşturduğu anlaşılmıştır. Yüzeyle gelişen drenaj ağına ait ana kollar, araştırma sondajları ve güncel arazi morfolojisi, genç ve genellikle ayrı nitelikteki alüvyonun obrukların oluştuğu bölgede kalınlaştığını gösterir (Şekil 5).



Şekil 5. Karstik akiferden aşırı yeraltısuyu çekimi nedeniyle gözenekli akifer ile karstik akifer arasında havza kenarında oluşan etkileşimin şematik gösterimi (İTÜ, 2017).

Şekil 5'de gösterilen kavramsal modeli kontrol amacıyla, 2006 Ağustos ayı içerisinde karst kuyularından (K-63) su çekimi sırasında, Kurudere'nin güneyinde, obrukların kümelendiği bölgede üst akiferdeki (alüvyon) yeraltısuyunun akım yönünü belirlemeye yönelik araştırma çukuru (AÇ-1) açılmıştır. Bu çukurda ölçülen yeraltısuyu seviyesi, çukur ile K-63 kuyusu arasındaki Kurudere'nin su

seviyesi ile karşılaştırılmıştır. Ölçümlerden, Kurudere'de su kotu 1157.23 m, AÇ-1 de ise 1156 m olarak belirlenmiştir. Aynı karşılaştırma, İTÜ-3 nolu kuyudaki seviye ile bu sondaja en yakın Kurudere üzerindeki su seviyesi için tekrarlanmıştır. Bu ölçümde ise İTÜ-3 kuyusunda yeraltısuyu kotu 1156.35 m, bu kuyuya en yakın noktadaki akarsu kotu ise 1158.15 m olarak belirlenmiştir. Buradan Karst kuyularından su çekimine bağlı olarak üst akifer ile karst akiferi arasında havza kenarında etkileşimin olduğu anlaşılmıştır.

Kavramsal modelde 5 numarayla gösterilen kireçtaşları havza ortasına doğru basınçlı karstik akifer niteliği taşır. Obrukların tabanında da yer alan temel kaya içerisinde karst boşluklarının olabileceği dikkate alınarak kavramsal modelde bu boşluklar KC simgesiyle gösterilmiştir. Modelde 3 numaralı ortam olarak belirtilen Plio-Kuvaterner istif, yüksek boşluk oranına sahip olmasına rağmen, hidrolik iletkenliği düşüktür. Bu istifin tabanında bulunan ve yeşil kil olarak isimlendirilen ortamın üst hidrojeolojik sistem ile karstik akifer arasında geçirimsiz bir sınır oluşturduğu, havza kenarına doğru incelenerek, paleo-topoğrafik yükseltilerin olduğu noktalarda sürekliliğini kaybettiği anlaşılmıştır. Temiz ve kaba çakıl cepleri içeren permeabilitesi yüksek üst akifer (alüvyon) modelde 2 rakamıyla gösterilmiştir. Havza kenarında biriktirilen kül ve dekapaj atığı malzeme modeldeki 1 numaralı ortama karşılık gelir.

Yukarıda tanıtilen kavramsal model sayısal hale getirilerek sonlu elemanlar yazılımı "Phase R9" yardımıyla analiz edilmiştir. Kavramsal modelin yazılıma entegrasyonunda karstik akiferlere özgü hidrojeolojik parametreler hız bağımlı olarak dikkate alınmıştır. Aşağıda tanıtilacak her iki senaryonun, incelenen kavramsal modeli, temsil etme yeterliliği sorgulanmıştır. Senaryolarda geometrik koşul olarak karstik boşluklar tanımlanmıştır. K kuyularında yapılan YAS çekimine bağlı olarak İTÜ-1 ve İTÜ-2 kuyularında ölçülen düşümler göz önünde tutularak obrukların oluştuğu tarihlerdeki yeraltısuyu seviyesi sayısal modele yaklaşık olarak taşınmıştır.

Jeomekanik parametreler seçiminde Çizelge 3 ve Çizelge 4'de verilen değerler göz önünde bulundurulmuştur. Modelde yer alan birimlerin deformasyon modülleri (E_d), Bowles (1996) tarafından SPT-N değeri ile E_d arasında önerilen eşitlikler kullanılarak belirlenmiştir. İTÜ-2 ve İTÜ-3 kuyularında yapılan SPT deneylerinden gıdya ve kömür için ortalama N_{30} değerleri hesaplanmıştır (İTÜ, 2017). Bu hesaplama sonucunda, gıdya için ortalama N_{30} değerinin 27, Kömür+Gıdya için ise 30 alınabileceği anlaşılmıştır. Daneli akiferi oluşturan alüvyonda SPT tüpü çakılmamış, bu birim için N_{30} değeri 100 varsayılmıştır. Bu değerlere göre anılan birimlerin deformasyon modülleri aşağıdaki şekilde hesaplanarak modele girilmiştir.

$$\text{Alüvyon; } E_d = 320 (N_{30} + 15) \text{ kN/m}^2 = 320 (100+15) = 36800 \text{ kPa} \quad (1)$$

$$\text{Gıdya; } E_d = 300 (N_{30} + 6) \text{ kN/m}^2 = 300 (27+6) = 9900 \text{ kPa} \quad (2)$$

$$\text{Kömür; } E_d = 300 (N_{30} + 6) \text{ kN/m}^2 = 300 (30+6) = 10800 \text{ kPa} \quad (3)$$

Temel kaya (kireçtaşı)'nın jeoteknik parametreleri ise modele Hoek-Brown (1988) yenilme ölçütünde ön görülen veriler girilerek elde edilmiştir. Modellemeye sağlam kayanın (temel kaya malzemesi) en düşük basınç direnci 60 MPa olarak alınmıştır. Üst akifere ait serbest, karstik akifere ait piezometrik seviyeler modele ayrı ayrı tanıtilmiştir. Modelde, Hurman Çayı'nın üst akiferi besleyecek şekilde seviyesi sabit tutulmuştur. İkinci aşamada, obrukların oluştuğu dönemdeki çekimler dikkate alınarak karst kuyularından Mart 2015 tarihinde yapılan çekim dikkate alınarak, K-84 numaralı kuyu için filtrasyon hızı hesaplanmıştır;

$$V=Q/(F_k.H_f.R.\pi) \quad (4)$$

Burada;

Q: Karst kuyularından toplam çekim (Mart 2015: 865670 m³/ay= 0,32 m³/s).

F_k : Filtre katsayısı (0,1)

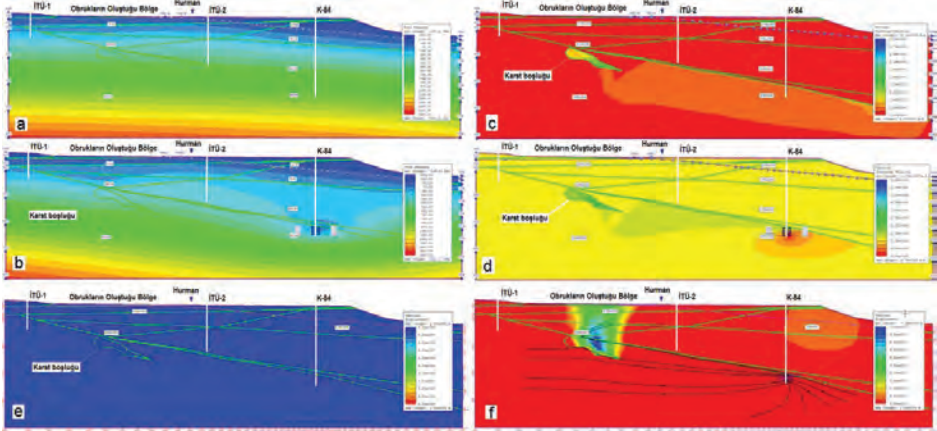
H_f : Toplam filtre boyu (104 m): TK-5, TK-6, TK-7, K9 ve K84 kuyularında toplam filtre uzunluğu

R: Kuyu çapı: 0,5 m alınmıştır.

Bu hesaplama sonucu karst kuyularındaki ortalama filtrasyon hızı 1,9.10⁻² m/s olarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz, modelleme parametreleri ve sınır koşulları aynı tutularak iki ayrı senaryo için tekrarlanmıştır.

Senaryo I

Karst boşluğu temel kayanın üst kısmında, Hurman Çayı ile dolu yığı arasında, obrukların oluştuğu alanın altında modellenmiştir. Model çalıştırdıktan sonra obrukların oluştuğu bölgede kayda değer hareket elde edilememiştir. Ancak anakaya içerisindeki karst boşlukları dikkate alınarak, obrukların oluştuğu bölgede yüzeyde göçme oluncaya kadar diğer model parametreleri değiştirilmeden, yalnızca karstik akiferinin başlangıçta girilen hidrolik iletkenliği, göçme oluncaya kadar artırılmıştır. Bu kalibrasyon sonucunda; yüzeyde göçmenin olabilmesi için karstik akiferin permeabilitesi ($2.32E^{-2}$ m/s) olarak elde edilmiştir. Düşey yöndeki efektif gerilmenin arttığı, obruk oluşan alanda üst hidrojeolojik sistemde yeraltısuyu akımının, taban kilinin kontrolünde havza kenarına doğru yöneldiği ve karstik akiferi beslediği, duvarları düşeye yakın olan obruk türü göçmenin oluştuğu kısımda düşey hidrolik eğimin arttığı ve YAS akımının düşey yönde geliştiği belirlenmiştir. Yeraltı boşluğuna doğru oluşan göçme nedeniyle, yüzeye yansıyan düşey yer değiştirme 3,5 m'yi aşmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Senaryo I için K kuyularından su çekilmeden önce ve sonra boşluk suyu basıncı değişimi (a, b), düşey akım hızları (c, d) ve düşey yerdeğiştirme (e, f).

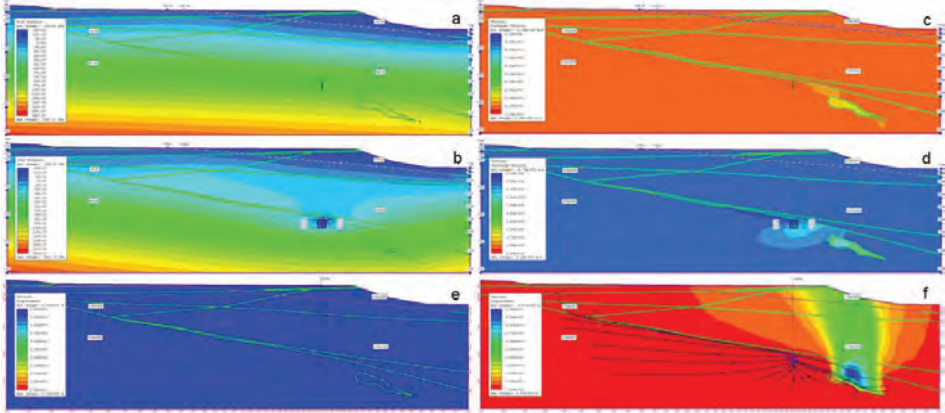
Senaryo II

Senaryo II de ilkinde ön görülen yeraltı boşluğu (mağara), modellenen kesitte karst kuyuları ile ocak kazısı arasında bir noktaya taşınmıştır. Karstik akiferin permeabilitesi Senaryo I den elde edilen kalibrasyon değeri ($2.32E^{-2}$ m/s) olarak alınmış, çözüm aynı jeomekanik ve hidrojeolojik parametreler kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu çözüm sonucunda ise; karst susuzlaştırmasına bağlı olarak karstik akiferde, boşluk suyu basıncında azalmanın olduğu, dolayısıyla düşey yöndeki efektif gerilmenin arttığı (Şekil 7), üst hidrojeolojik sistemde düşey yeraltısuyu akım hızının arttığı ve karstik akiferi beslediği, anakaya üzerindeki örtü birimlerinin yeraltı boşluğuna doğru yer değiştirdiği, göçme nedeniyle yüzeyde oluşan düşey yer değiştirmenin 1.5 m'ye ulaşabileceği anlaşılmıştır.

4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, 2015 yılında devreye alınan karst kuyularından yapılan YAS çekiminin havza kenarında karstik akiferde YAS akımını etkilediği anlaşılmıştır. Hurman Çayı'nın üst akiferi sürekli beslediği ve havza kenarında, üst akifer ile karstik akifer arasındaki dokanak boyunca mevcut etkileşimin arttırıldığı, aşırı çekim sırasında karst akiferinin üst hidrojeolojik sistemden beslediği saptanmıştır.

Karst susuzlaştırması çalışmaları sırasında, havza kenarında (obrukların kümelendiği bölge) boşluk suyu basıncında önemli düzeyde azalmanın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, üst akiferde yeraltısuyu düşey akıma zorlanmış, taban kilinin olmadığı veya ince olduğu alanlarda, kireçtaşı ile gıda ve kömürlü gıda dokanağında iç erozyona neden olan girişim geliştirilmiştir. Sayısal modelin çözümünden temel kaya içerisindeki karst boşluğunun tavanında yenilmenin oluştuğu, üstte bulunan malzemenin gravite etkisiyle karstik boşluklara göç ettiği anlaşılmıştır.



Şekil 7. Senaryo II için K kuyularından su çekilmeden önce ve sonra boşluk suyu basıncı değişimi (a, b), düşey akım hızları (c, d) ve düşey yerdeğiştirme (e, f).

5. KATKI BELİRTME

Yazarlar, çalışma kapsamındaki desteklerinden dolayı EÜAŞ Genel Müdürlüğü Maden Sahaları Dairesi'ne, EÜAŞ Elbistan Müessese Müdürü Sayın Ahmet YALDIZ, Maden Müh. Sayın Atilla DALBUDAK'a, Jeoloji Şube Müdürü Jeol. Müh. Sayın Mahmut PALA'ya ve diğer şube personeline, Park Teknik Çöllolar İşletme personeline teşekkürlerini sunar.

6. KAYNAKLAR

- Bowles, J. E., 1996. Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill, New York.
- ÇÜ MMF, 2015. Çöllolar kömür sahası entegre susuzlaştırma projesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Adana, s. 63.
- Gökmenoğlu, O., Aslan, M. 2013. Kahramanmaraş Afşin-Elbistan kömür havzası hidrojeoloji incelemesi projesi, Hurman Çayı doğu bölgesi drenaj raporu. MTA Genel Müdürlüğü Enerji Dairesi, Arşiv No: 1346, 236s., Ankara (Yayınlanmamış).
- Hoek, E., Brown, E. T. 1988. The Hoek-Brown failure criterion –a 1988 update. Proceeding 15th Canadian Rock Mechanics Symposium (ed.) H. Curran, Toronto: Civil Engineering Department, University of Toronto, pp. 31-38.
- İTÜ, 2017. Afşin Elbistan Kömür Havzasında Güncel Obruk Oluşumlarının Yerbilimsel Yöntemlerle Araştırılması, İTÜ Maden Fakültesi Vakfı, İktisadi İşletmesi, 217 sayfa ve ekleri, İstanbul (Yayınlanmamış).
- MBEG, 2012. Consultancy and engineering services for mine operation in Çöllolar open cast mine (Afşin Elbistan coal basin), Phase V: Mine plan for the restart of coal mining & status report 06/2012, Subprojects: Geological modelling/Hydrogeology/ Dewatering/Geotechnics and mine planning, p. 160 and Appendix.
- Newton, J. G., 1984. Sinkhole resulting from groundwater withdrawals in carbonate terranes -an overview. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, volume VI. pp. 195-202.
- Özgül, N., 1981. Munzur dağlarının jeolojisi. MTA Rapor no: 6995, 136 s. Ankara (Yayınlanmamış). Park Teknik, 2011-2016 Aylık Faaliyet Raporları.
- Yılmaz, A., Bedi, Y., Uysal, Ş. Aydın, N. 1997. 1:100 000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları, Elbistan-İ23 paftası. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.

Evaporitik Sahalardaki Karstik Boşlukların, Yer Radarı (GPR) Yönetimi ile Tespiti

The Detection of Karstic Spaces at Evaporitic Areas, by the Ground Penetrating Radar (GPR) Method

D. Erik^{1,*}, S. Koşaroğlu²

¹ TCK 16. Bölge Md. Taşınmazlar Başmühendisliği Sivas

² Cumhuriyet Üniversitesi, Müh-Fak. Jeofizik Müh. Böl. Sivas
(*derik@kgm.gov.tr)

ÖZ: Evaporitler içerisindeki bozunma zonları ve karstik boşluklar gibi mühendislik teknik girişimleri açısından sorunlu alanların tespiti uzun zaman ve maliyet gerektiren sondaj ve hidrojeolojik çalışmaları ile mümkündür. Jeofizik yöntemler ile bu şekilde bozunmuş alanların ve boşlukların hızlı ve düşük maliyetlerle tespit edilmesi mümkündür. Buna ek olarak kullanılan jeofizik yöntemlere göre bozunma bölgesinin ve/veya boşlukların yer altındaki sınırları belirlenerek üç boyutlu modelleri de oluşturulabilir. Sivas şehir yerleşiminin büyük bir bölümü anhidrit-jips litolojisine sahip evaporitik çökeller üzerinde bulunmaktadır. Bu çalışmada çok hızlı ölçümler ve yüksek çözünürlüklü yeraltı görüntüleri alınmasına imkân sağlayan GPR yöntemi kullanılmıştır. Bu nedenle Sivas şehir merkezi yakınlarında bulunan Seyfebeli mevkiindeki karstik boşluklar GPR yöntemi ile araştırılmıştır. Çalışma sahasındaki bozunma ve karstik boşlukların sınırları iki ve üç boyutlu olarak GPR kesitleri ile ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada yüzeyin 4 metre altında 8 m x 5 m x 4 m boyutlarında yüzeyden tespit edilmesi zor olan bir karstik boşluk ve farklı geometri yapılarında bozunma ve resedimantasyon zonları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer radarı, evaporitler, karstik boşluklar, Seyfebeli (Sivas).

ABSTRACT: In evaporites, such as voids and karst zones of dissension within the technical engineering and cost initiatives in terms of the identification of problematic areas that require a long time is possible with drilling and hydrogeological studies. Geophysical methods in this way with weathered areas and gaps to be detected quickly and at low cost is possible. According to the geophysical method used in addition, decomposition of the region and/or space in the ground and determined the boundaries of three-dimensional models can also be created. A large part of the town of Sivas is located on anhydrite-gypsum lithology have evaporitic sediments. In this investigation, used the GPR method, which, can be taken very rapid and high-resolution subsurface images to be taken. Because of these specifications the GPR method is used in Seyfebeli located near the city centre of Sivas in the area have been investigated in karst cavities. Weathering and karst cavities in the boundaries of the field of study two-and three-dimensional GPR sections demonstrated it. In this study, 4m from the surface of the surface under 8 m x 5 m x 4 m the size of a space in the structure that are difficult to detect karst zones and different geometry decomposition and sedimentation has been identified.

Key Words: Ground Penetration Radar, evaporites, carstic caves, Seyfebeli (Sivas).

1. GİRİŞ

Çoğunlukla lagün ortamında oluşan kimyasal sedimanter kayaların bir türü olan evaporitik çökeller, buharlaşma ve buna bağlı olarak konsantrasyondaki miktarlarının artması sonucu oluşurlar. Yaygın mineral türleri genellikle sülfat ve karbonat bileşimlidir. Sivas ve yakın civarında yaygın olarak gözlenen evaporit mineralleri kalsiyum sülfat içeren jips ve anhidrittir. Jips, sulu kalsiyum sülfat (CaSO₄ · 2H₂O) kimyasal bileşiminde olup monoklinal sistemde kristallenir. Mohs sertlik çizelgesine göre sertliği 2 olarak tanımlanmıştır. Jipsler renk olarak ise beyaz ve şeffaf renktedirler. Jipsler kil veya kumlarla beraber sert sedimanlar içinde çökebilir. Tünel gibi yeraltı teknik girişimlerinde, jipsli bölgelerle karşılaşılacak en büyük problem ise oluşumları esnasında gelişebilen karstik boşluklardır.

Yüzeyde yapılacak mühendislik yapılarında ise yeraltı boşlukları sonucu oluşan tasmanlar önemli yenilmelerdir. Bu alanlar önceden belirlenerek mühendislik projeleri için gerekli tedbirleri almak mümkündür. Ancak özellikle yeraltı sularının hareketleri ile jipsler kısa sürede bozunmaya uğramaya elverişlidir. Bu yüzden bu alanlarda yeraltındaki değişimlerin takip edilmesi, alanda yeraltı suyunun hareketinin sınırlandırılması ve gerekli drenaj koşulları sağlanarak bu riskli alanların koruma altına alınması üst yapılar için önem taşımaktadır. Bu kapsamda yapılacak farklı çalışmalar yanında GPR çalışmaları ile hem bozunma alanları hızlı bir şekilde belirlenebilmekte ve ayrıca bozunmaların yer altındaki boyutlarını da tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Yeraltında oluşan bozunma alanlarının belirlenmesinde farklı jeofizik yöntemlerle uygulamalar yapılmaktadır. Doolittle vd., (1998), yılında Florida ve Pensilvanya daki iki ayrı bölgede elektromanyetik (EM) ve yer radarı (GPR) yöntemlerini kullanarak araştırmalar yapmışlardır ve GPR yöntemi ile yüzey tabakalarının kalınlıklarını ve boşluklu yapıları tespit etmeye çalışmışlardır. Bölgede ise; Ulugergerli ve Akça, (2006), Sivas bölgesinde jipsli bir bölgenin üzerine inşa edilmiş okul binası çevresinde GPR, elektrik özdirenç ve sismik kırılma yöntemlerini kullanarak incelemeler yapmışlardır.

Crespo ve Ortiz (2007), GPR yöntemi ile yaptıkları çalışma da yüzeye yakın kesimlerde elektromanyetik dalganın zayıflaması nedeni ile sinyal gürültü oranının azaldığını ve kesitlerde gözlenen dalgalı ve düzensiz değişimlerin evaporit katmanlarındaki lokal çökmelerle ilişkili olabileceğini düşünmüştür. Geniş evaporitik çökeltiler içeren Sivas bölgesinde mühendislik yapılarının inşasında zaman zaman karstlaşma ile ilgili sorunların yaşanmaktadır. Bu alanların belirlenmesi amacı ile yüzeyde oturma izleri görünen Sivas'ın 17 km kuzey doğusunda yer alan Seyfebeli geçidi civarındaki karstik bölgede çalışma yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. İnceleme alanının uydu görüntüsü.

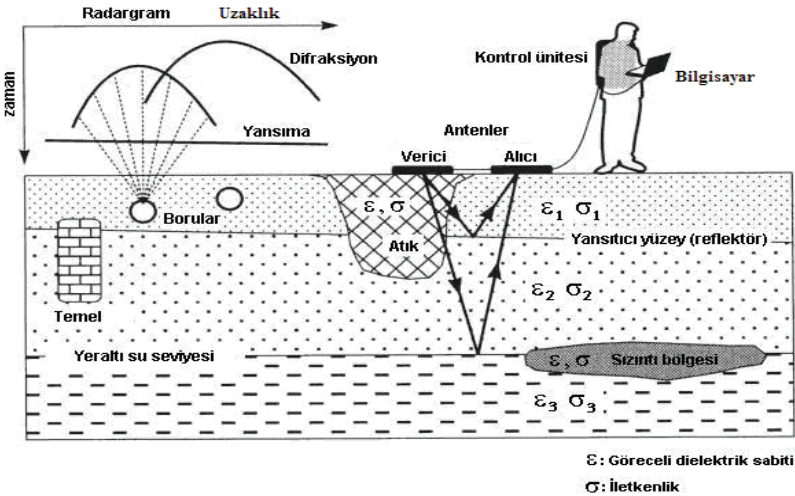
2. JEOLJİK BİRİMLER

İnceleme alanında, Pre-Maestrihtiyen yaşta platform karbonatları, metamorfik ve ofiyolitik kayalar yüzeylenmektedir. Sivas bölgesinde metamorfik ve ofiyolitik bu temelin üzerinde Maestrihtiyen-Paleosen yaşta kireçtaşları uyumsuz olarak yer alır. Bu birim yukarıya doğru Paleosen bazaltik lavlarına ve Eosen kırıntılı kayalarına geçiş gösterir. Alt Miyosen kırıntılı kayaları ve karbonat kayaları daha yaşlı birimleri yerel bir uyumsuzlukla üzerler ve üste doğru bazaltik ve karasal kırıntılı ara katkılı playa jipslerine geçer. Pliyo-Kuvaterner yaşta akarsu çökeltileri ve Kuvaterner yaşta alüvyonlar ise Miyosen ve daha yaşlı birimleri uyumsuz olarak örter (Yılmaz and Yılmaz, 2006). Sivas yerleşim alanı geneli Oligosen jipsleri, Alt Miyosen yaşta taban konglomerası, denizel kireçtaşı ve

karasal-denizel kırıntılı kayalar, Orta Miyosen yaşta, kırıntılı ara katkılı playta jips düzeyleri ile Pliyosen yaşlı kırıntılı akarsu çökelleri ve Kuvaterner yaşta pekişmemiş alüvyonlardan oluşmaktadır. Bölgede yaygın olarak Hafif jipsleri gözlenmektedir. Hafif jipsleri Sivas yerleşiminin doğu ve kuzeydoğu kesimlerinde yüzeylenmektedir. Genel görünüşleri beyaz, açık kahverengi ve açık yeşilimsi renktedir. Masif jipsler tektonik hareketler sonucunda kıvrılmış ve kırılmışlardır. Kıvrılmaların yoğun olduğu kesimlerde kırık ve çatlak yoğunlukları artmıştır. Ayrıca jipslerde iki yönde gelişmiş kırık ve çatlak sistemleri de gözlenmiştir.

3. GPR İNCELEMELERİ

Yer radarı (GPR) araştırılan ortamın sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen elektromanyetik bir yöntemdir (Davis ve Annan, 1989). GPR yöntemi temel olarak bir verici anten vasıtasıyla yeraltına gönderilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar ve yeraltındaki değişik elektromanyetik (dielektrik sabiti) özelliklere sahip çeşitli katmanlar içerisinde geçerek ve kırılarak geri yansıyan dalgaları alıcı anten yardımıyla toplayan bir yöntemdir (Şekil 2). Yeraltına gönderilen elektromanyetik dalgaların izlerinin birleştirilmesiyle yeraltı kesitleri elde edilir ve buradaki değişimleri içeren radargram kesitleri ham veriler olarak tanımlanır. Bu yöntemin tarihçesi incelendiğinde ilk çalışmaların donmuş toprak yapıları üzerinde yapılan araştırmaların olduğu görülmektedir (Annan ve David, 1976). Yöntemin üstünlük ve zayıflıklarının belirlenmesi ile farklı bir çok alanlarda kullanımları mevcuttur. GPR yönteminin ilk başarılı uygulamaları kutup bölgesindeki buz kalınlıklarının tespitinde kullanılmıştır (Jol, 1996). GPR yönteminde yer altındaki katmanların dielektrik sabiti, manyetik duyarlılık, elektriksel iletkenlik gibi fiziksel parametrelerine göre incelemeler yapılmaktadır. GPR yönteminde önemli olan fiziksel parametre dielektrik sabiti olup, temel olarak bir maddenin elektromanyetik bir yük üzerine uygulandığı zaman depolayabildiği yükü ifade etmektedir. Benzer olarak manyetik duyarlılıkta elektromanyetik dalga'nın hızını kontrol eder ve ortamda bulunabilecek metalik elementlerden etkilenir. Elektriksel iletkenlik ise esas olarak derinliği belirleyen elektriksel unsurdur (Yalçın, 2009). GPR yöntemi ile yeraltındaki değişimleri saptamak oldukça kolaydır. Yöntemde yeraltında bulunan farklı jeolojik tabakaların sınırlarından yansımalar elde edilirken, aynı zamanda tabakaların iç yapılarına yönelik bilgiler de sağlanmaktadır. Bu yöntemin diğer jeofizik yöntemlere göre en büyük avantajı, belirli bir hat boyunca çok hızlı ölçümler alınabilmesidir. Ayrıca ölçümlerin yer altındaki değişimleri yüksek çözünürlükle elde edilebilmesi açısından önemlidir.



Şekil 2. GPR yöntemi çalışma prensibi (Kesemen, 2007).

Yöntem, yeraltı verilerinin yorumlanabilmesi için bazı veri işlem aşamalarının uygulanmasını gerektirmektedir. Bu sırada çalışma alanından kaynaklanan gürültüler, çevresel faktörler, antenlerin yüzey ile temas sorunu gibi veri kalitesini düşürücü etmenlerin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

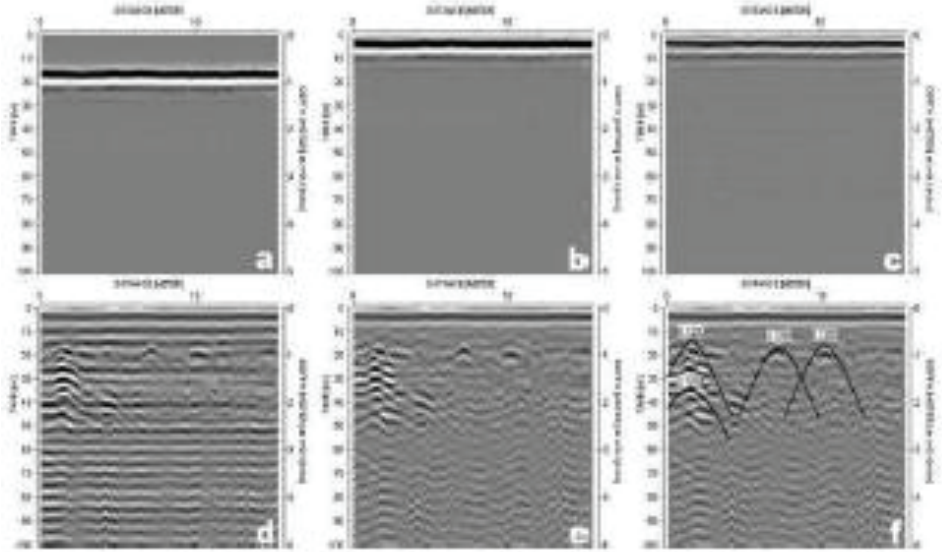
GPR yöntemi ile yer altında bulunan bozunmuş veya boşluklu yapıları tespit etmek mümkün olmaktadır. Yer altına gönderilen radar sinyalleri bozunmuş alanlara geldiklerinde hızlarında ve genliklerinde ortamın özelliklerine göre değişimler göstereceklerdir. Ayrıca sinyal/gürültü oranı da değişeceğinden yer altında bu alanları devamlılıklarıyla tespit etmek mümkündür. Bu çalışma da GPR yönteminin tercih edilmesinin en büyük nedeni yer altının 3 boyutlu görüntüsünün tespit edilmesidir. İnceleme alanı jeofizik yöntemler içerisinde sadece GPR çalışmalarının yapılmasına elverişlidir. Çarpık kentleşme bazı jeofizik yöntemlerin yerleşim içerisinde kullanımlarını ve kaliteli ölçü alımlarını zorlaştırmaktadır. Ayrıca yeterli miktarlar da açılım veya serim yapılamadığı zaman hedeflenen araştırma derinliklerine de ulaşılabilmesi en çok karşılaşılan problemlerdendir. Ancak GPR yöntemi antenlerin kullandıkları frekans derinliklerine göre inceleme yapabildiği için güncel çalışmalarda araştırmacılar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışma da olduğu gibi ölçü alanlarının sınırlı olduğu yerlerde uygulanacak diğer yöntemler derinlik bilgisi olarak araştırmacıların beklentilerini tam olarak karşılamaları mümkün değildir.

Arazi ortamında alınmış olan verilere temel veri işlem aşamaları uygulanmaktadır. Bu veri işlem aşamalarında ortamın dielektrik özellikleri ve elektromanyetik dalganın hız değeri öncelikle saptanmaktadır. Daha sonra veri işlem aşamaları elde edilerek kesitler değerlendirilir ve ölçüm yapılan alanlara ait 3 boyutlu yeraltı kesitleri elde edilir. Yapılan bu çalışmada kullanılan GPR antenleri 100 MHz ve 250 MHz temel frekans değerine sahip korumalı antenler kullanılarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümlerde kullanılan temel veri işlem aşamaları ve ham ölçünün değerlendirilmesi kısımları Şekil 3 de gösterilmektedir.

İyi bir verinin oluşması için dikkatli ölçüm sonrasında, yorumlamaya uygun, düzgün bir filtreleme gerekmektedir (Yalçınar, 2009). Bu işlemler için ticari olarak elde edilebilen ReflexW (Sandmeier, 2003) programı kullanılmıştır. Ana işlem basamakları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- a) İşlenmemiş veri (Şekil 3a),
- b) İlk zaman filtresi: Bu filtre her iz için ayrı ayrı uygulanarak hava boşlukları en aza indirgenir ve diğer filtrelemeler için ön hazırlık yapılır (Şekil 3b),
- c) Akım düzeltmesi (Dewow): Bu filtre her iz için ayrı ayrı uygulanır. Bu seçenek ile tüm izlerden ortalama olarak DC akım ile oluşmuş etkiler temizlenir (Şekil 3c),
- d) Enerji Geciktirme: Bu filtre her iz için ayrı ayrı uygulanır. Filtre aktivitesi ile seçilen artış eğrisi “y” ekseninde tüm profile uygulanır ve enerjideki gecikmeler ortaya çıkartılır. Tüm gerçek değerler tabii ki kayıp edilir. Ancak tüm profile uygulanan bu artış ve azalış toplamda gerçekçiliği etkilememekte sadece görünürlüğü arttırmaktadır. Tüm işlemler sonucunda izlerdeki enerjiler sabit bir değer ile çarpılır (Şekil 3d),
- e) Ortalama değer temizleme: Bu filtre belirlenen izlere uygulanır. Filtre her seferinde seçilen belirli bir sayıda iz üzerinde işletilir. Aynı zamanda bu filtre kaydırmalı arka plan filtresi olarak da adlandırılır. Belirlenen sayıdaki iz üzerine uygulanan filtrede belirlenen değer toplam olarak izlere uygulanır ortada bulunan iz sabit tutularak diğerlerine yayılır. Görsel olarak bir çerçeve içerisinde kalan izlerin ortasındakine göre değer almalarına dayanır (Şekil 3e),
- f) Hız analizi: Kırılma hiperbolları ölçümlere uygulanarak hız değerleri okunur (Şekil 3f),
- g) Topoğrafik düzeltme (gerek duyulduğunda) uygulanır.

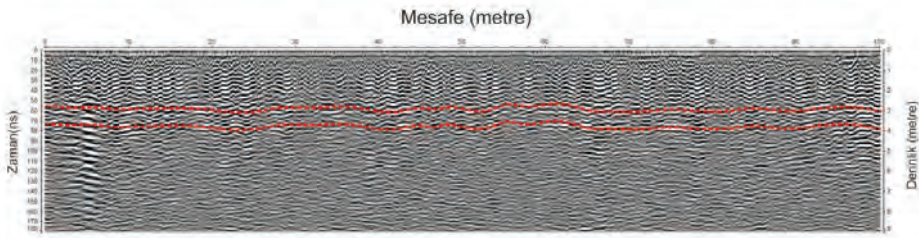
Yeraltındaki yapıların yerleşimini anlayabilmek için oluşturulacak görüntüleme haritaları, belirli zaman aralıkları ile hesaplanan yatay zaman kesitleri ile mümkün olabilir. Bu tarz veri değerlendirmeleri sayesinde yeraltındaki anomali yaratan yapıların yerleri ve şekilleri oldukça kolay olarak tespit edilebilir (Leucci ve Negri, 2006).



Şekil 3. Örnek bir GPR profili ve işlem basamakları, (a) Ham veri, (b) İlk zaman filtresi, (c) Akım düzeltmesi (dewow), (d) Enerji geciktirme, (e) Ortalama değer temizleme, (f) Hız analizi.

Yapılan incelemelerde öncelikle 100 MHz merkezi frekansa sahip alan ile bölgesel incelemeler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan bu değerlendirme sonucunda jipsli formasyonların yaklaşık derinlikleri saptanmıştır. Ayrıca jipsli birimlerin elektromanyetik dalga hız değerleri de elde edilmiştir. Sorunlu olduğu düşünülen bölge de ise 250 MHz anten kullanılarak detay çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu detay çalışma ile bozunma zonlarının olduğu düşünülen alanın sınırları tam olarak saptanmıştır.

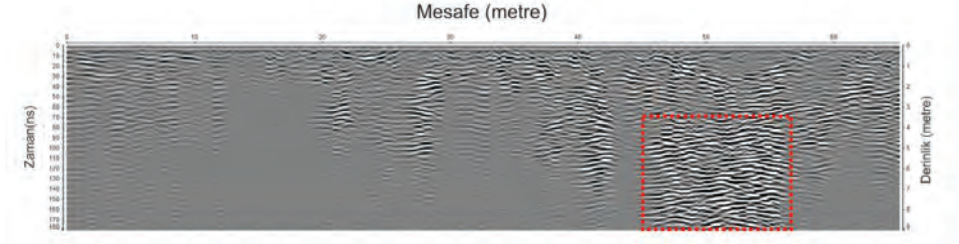
Temel veri işlem aşamaları sonucu elde edilen kesitlerde yapılan değerlendirme de yeraltında 3-4 metre derinlik seviyesinde bulunan düşük hız değerlerine sahip birimlerin sediman seviyeleri oldukları öngörülmektedir (Şekil 4). Bu birimin altında yaşlı jips seviyesi bulunurken yüzeyden itibaren güncel jips seviyesinin bulunduğu anlaşılmaktadır. Alanın genel olarak dağılımı bu jeolojik modele uymaktadır.



Şekil 4. İnceleme alanında alınmış olan radar ölçümlerinin 2 boyutlu gösterimi.

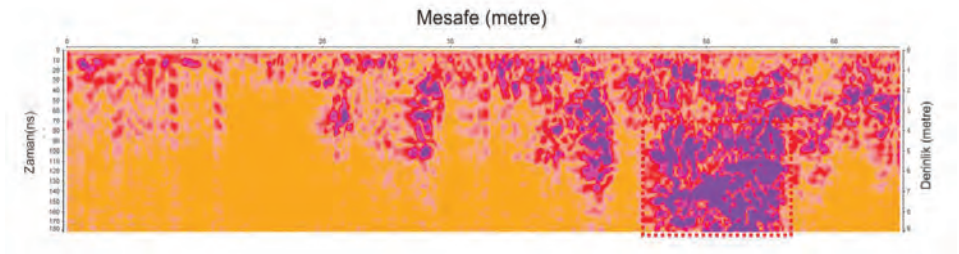
Çalışma yapılan alanda yüzey gözlemlerinde tespit edilen yüzey sularının boşalıklarının olduğu kesimdeki radar ölçümlerinde yeraltında bulunabilecek bozunma zonu olan alanlar tespit edilmiştir (Şekil 5). Kesit üzerinde yapılan incelemede migrasyon işlemi uygulanarak yansımalar gerçek yerlerine taşınmıştır. Kesit üzerinde özellikle 44 ile 58 metre arasında yeraltında yaklaşık olarak 4

metre derinlik seviyesinden kesitin en son derinlik noktası olan 9.8 metre derinliğe kadar takip edilen ve kırmızı kutu ile yeri tam olarak belirlenen bu anomali yapı içerisinde tekrarlı radar sinyallerinin yansıma özelliğinden dolayı oldukça önemlidir. Ayrıca bozunma zonu olan bu yapının üstündeki birimde de alanın daha önceden bir çökme ile birlikte jeolojik süreç içerisinde yeniden malzeme birikimi olduğu anlaşılmaktadır.



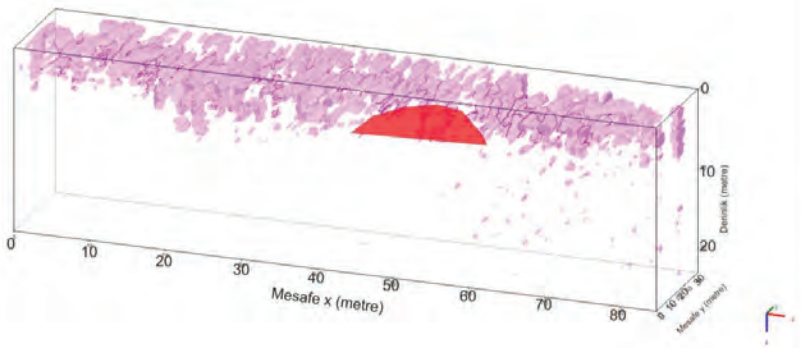
Şekil 5. Migrasyon uygulanmış GPR kesiti.

Elde edilen bulgulara ileri veri işlem aşamalarından olan “envelope prospection” veri işlem aşaması da uygulanmıştır. Bu işlem adımı ile de bozunma zonu olan yapının elektromanyetik dalga genlik değişimlerinin en yüksek düzeyde olduğu seviyeleri tespit edilmiştir (Şekil 6). Yapılan bu değerlendirme de ise bozunma zonu olarak düşünülen yapının bozunmaya uğramış jipsli seviye olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. Envelope veri işlem aşaması uygulanmış GPR kesiti.

Elde edilen ölçümlere yapılan 2 boyutlu değerlendirme aşamalarından sonra alana ait 3 boyutlu derinlik modeli de hazırlanmıştır (Şekil 7). Yapılan 3 boyut model ile de bozunma olduğu düşünülen alanın sınırları belirlenmiştir. 3 boyutlu model hazırlanırken bozunma zonuna ait olan elektromanyetik dalga değerleri kullanılmış kesitte bulunan diğer yansımalar ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 7. İnceleme alanından elde edilen 3B GPR kesiti.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında mühendislik teknik girişimlerinin önemli sorunlarından biri olan karstik boşlukların GPR ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda inceleme alanında yapılan jeofizik çalışmalar sonucu bölgede iki farklı zamanda çökelmiş jipsli seviye gözlemlenmiştir. Temel olduğu düşünülen ilk katman yaklaşık 4 metre derinlikte olup daha sonra üzeri sedimanlar ile örtülmüş ve tekrar jipsli bir seviye oluşmuştur. İnceleme alanında alınan 100 metrelik kesitte ilk 3 metrelik bölümdeki jipsli seviyede genliklerin yüksek olduğu bu alanın yüzey sularına maruz kalarak bozunmaya uğradıkları kesimler olduğu düşünülmektedir (Şekil 3).

İnceleme alanında yapılan alan taraması sonucu birbirine paralel 5 metre aralıklarla kesitler alınmıştır. Bu kesimde de iki aşamalı jips seviyesi gözlemlenmiştir. Bu alandaki ilk iki kesitte üst sınırı 4 metre derinlikte muhtemel bozunma zonu olabilecek bir yapı ile karşılaşmıştır (Şekil 5 ve Şekil 6). Bu kesimin üst kısmında ise çanak şeklinde sediman birikimi olması oldukça önemlidir. Özellikle ilk kesitte yapının üst kısmında jipsli birimler arasında sediman dolgunun olduğu düşünülmektedir. Bu alanda tespit edilen yapının üst sınırının uzunluğu yaklaşık 4 metredir. Yapının üst sınırı tespit edilmiştir ancak kullanılan antenin 250 mHz olmasından ötürü yapının alt sınırının daha derinde olduğu düşünülmekte ve bu sınırdan ne yazık ki yansıma alınmamıştır. GPR kesitleri incelendiğinde yapının yanal yönde 5 metre devam ettiği, üst sınır derinliğinin 4 metre civarında olduğu sonucuna varılmıştır ve 3B yeraltı görüntüsü ile yapının devamlılığı araştırılmıştır (Şekil 7).

Yapılan bu çalışma ile jipsli alanlarda yer alan yapısal unsurların hızlı bir şekilde değerlendirilebileceği görülmüştür. Yapılan bu öncel çalışma ile evaporitik sahalarda yapılacak yeraltı kazılarında karşılaşılacak, obruk, uvala, dolin vb. karstik boşlukların hızlı bir şekilde ortaya çıkarılabileceği, yüzeyde yapılacak büyük mühendislik yapılarında ise tasman oluşma risklerinin önceden belirlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

5. KATKI BELİRTME

Yazarlar, çalışmanın yorumlanması kısmında, değerli katkı ve eleştirilerini gördükleri Prof. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK'e (SDÜ) teşekkür eder.

6. KAYNAKLAR

- Annan, A.P. and Davis, J.L., 1976. Impulse Radar Soundings in Permafrost. *Radio Science*, Vol. 11, pp. 383-394.
- Crespo, M., T., and Ortiz, G., D. 2007. Collapse hazard assessment in evaporitic materials from ground penetrating radar: a case study. *Environ Geol*, 53:57-66.
- Davis, J.L., and Annan, A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, Vol. 37, pp. 531-551.
- Doolittle, J.A., and M.E. Collins. 1998. A comparison of EM induction site groupings using the soil physical data (1, 2, and 3) and GPR methods in areas of karst. *Geoderma* 85:83-102.
- Jol, H., 1996. Digital Ground Penetrating Radar (GPR): A New Geophysical Tool for Coastal Barrier Research (Examples from the Atlantic, Gulf and Pacific Coasts U.S.A.). *Journal of Coastal Research*, Fall.
- Kesemen, O. 2007. Yer Radarı (GPR) Verilerinin İşlenmesinde Yeni Yaklaşımlar. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ulugergerli E.U and Akça I 2006. Detection of cavities in gypsum; *The Journal of the Balkan Geophysical Society* vol .9, No 1, P. 8-19.
- Yalçiner, C. Ç., 2009. Investigation of buried objects with Ground Penetrating Radar: Application to archaeoseismology and palaeoseismology in the Büyük Menderes Graben (Turkey). PhD Thesis. University of Strasbourg.
- Yılmaz, A. and Yılmaz, H., 2006. Characteristic Features and Structural Evolution of a Post Collisional Basin: The Sivas Basin, Central Anatolia, Turkey: *Journal of Asian Earth Sciences*, 27, 164-176.

KAYA ve ZEMİNLERİN
JEOMÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Subaşı Viyadüğü İnşa Alanındaki Kaya Kütlelerinin Taşıma Gücü Açısından İncelenmesi (Hopa-Artvin)

Bearing Capacity Assessment of the Rock Masses at the Subası Viaduct Site (Hopa-Artvin)

A. Kaya^{1,*}, F. Bulut²

¹ Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

(*ayberk.kaya@erdogan.edu.tr)

ÖZ: Bu çalışmada, Subaşı viyadüğü inşa alanındaki kaya kütlelerinin taşıma gücü özellikleri mühendislik jeolojisi açısından incelenmiştir. Ayrışmış andezitik tüflerin taşıma gücü özelliklerini saptamak için Hoek-Brown yenilme kriterinin kullanıldığı ampirik eşitliklerinden yararlanılmış, viyadük temellerinden ve trafik yükünden kaynaklı kaya kütlelerinde oluşacak en büyük asal gerilme miktarı ise sonlu elemanlar (FEM) analizleri yapılarak belirlenmiştir. İzin verilebilir taşıma gücü değeri (q_a) ile en büyük asal gerilme değeri (σ_1) karşılaştırıldığında ve düşey deformasyonlar incelendiğinde taşıma gücü açısından bir sorunun oluşmayacağı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Subaşı viyadüğü, taşıma gücü, sonlu elemanlar yöntemi, Hoek-Brown yenilme kriteri.

ABSTRACT: In this study, the bearing capacity of the rock masses at the Subası viaduct site were investigated in terms of engineering geology. The allowable bearing capacity (q_a) of the weathered andesitic tuff was evaluated using the Hoek-Brown failure criterion based empirical equations. The major principal stress (σ_1) caused by the viaduct and traffic loadings at the level of the foundation excavations was determined by a finite element method (FEM). It was determined that any failure problems were not expected to occur in terms of the bearing capacity when q_a value were compared with σ_1 value and vertical displacements were investigated.

Keywords: Subası viaduct, bearing capacity, finite element method, Hoek-Brown failure criterion.

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründeki hızlı gelişmelere bağlı olarak özellikle Türkiye gibi gelişen ülkelerde büyük mühendislik yapılarının inşasına son yıllarda hız verilmiştir. Buna bağlı olarak otoyol, köprü, baraj, tünel, liman, havalimanı, hidroelektrik santralleri gibi alt ve üst yapı işlerinin sayısı Doğu Karadeniz Bölgesi'nde giderek artmaktadır. Artvin-Hopa devlet karayolunu iyileştirme projesi (KM: 6+500–13+787) kapsamında yapılması planlanan Subaşı viyadüğü, Cankurtaran ve T2 tünellerinin portal bölümlerini birbirine bağlayacaktır (Şekil 1). Tek ayak üzerine dengeli konsol yöntemi ile iki hat şeklinde inşa edilecek viyadük, temelden 43 m yüksekliğinde olup, gidiş hattının uzunluğu 122 m geliş hattının uzunluğu ise 105 m'dir. Viyadüğün ayaklardaki temel şekli kare (16.0 x 16.0 m) kesitli, konsol uçlarında ise dikdörtgen (16.0 x 8.4 m) kesitlidir.

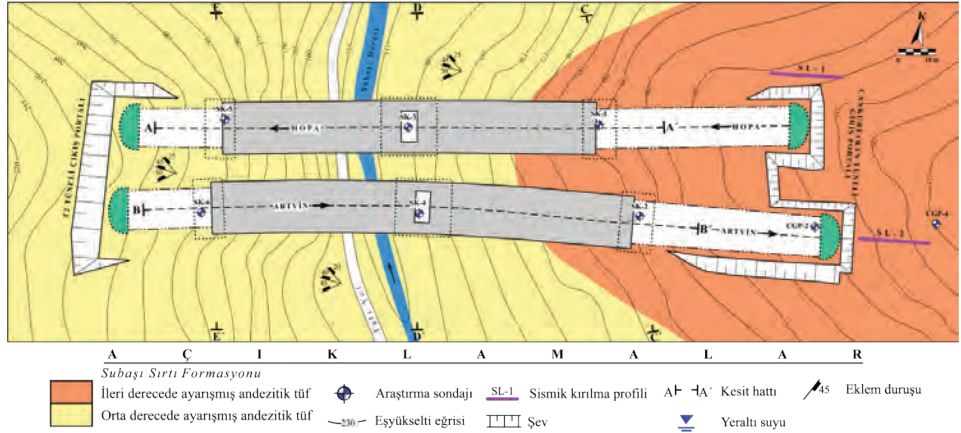
Bu çalışma kapsamında, Subaşı viyadüğü inşa alanındaki kaya kütlelerinin taşıma gücü özellikleri mühendislik jeolojisi açısından incelenmiştir. Bu amaçla jeolojik haritalama, sondaj, jeofizik ve hat-etüdü çalışmaları, presiometre ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler yardımıyla Hoek-Brown yenilme kriterinin kullanıldığı ampirik eşitliklerle ve sonlu elemanlar (FEM) tabanlı sayısal analizlerle kaya kütlelerinin taşıma gücü özellikleri araştırılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

Çalışma alanı ve çevresinde, Geç Kretase'den Eosene kadar değişen yaşlarda tortul ve volkanik kökenli kayalar bulunmaktadır. Subaşı viyadüğü inşa alanında Geç Kretase yaşlı Subaşı Sırtı Formasyonu'na ait birimler yüzeylenmektedir. Formasyon, tabanda piroklastiklerle başlayıp kireçtaşı, marl, kumtaşı, tuf, silttaşı arakatları içeren ve tavana doğru tekrar piroklastik seviyesi ile son bulan bir volkano-tortul istif özelliğindedir (Çapkınoğlu, 1981; Kaya, 2012). Formasyona ait andezitik tüfler Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümünde ileri ve orta derece ayrıışmış olarak, T2 tünelinin çıkış bölümünde ise orta derecede ayrıışmış olarak yüzeylenmektedir (Şekil 2)



Şekil 2. Subaşı Viyadüğü inşa alanı ve çevresine ait jeoloji haritası.

3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÇALIŞMALARI

Andezitik tüflerin jeoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla yüzey, yeraltı ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yeraltı suyu seviyesini, eklemlerin özelliklerini ve ayrışma zonunun derinliğini belirlemek, laboratuvar deneyleri için örnek derlemek ve presiometre deneyleri yapmak amacıyla toplam 284.5 m derinliğinde sekiz adet araştırma sondajı yapılmıştır.

ISRM (2007) ölçütlerine göre andezitlerin üst zonu ileri derecede, alt zonu ise orta derecede ayrılmış olarak tanımlanmıştır. Üst zonun özellikleri zemin mekaniği, alt zonun özellikleri ise kaya mekaniği prensiplerine göre belirlenmiştir. Orta derecede ayrılmış andezitik tüflerdeki eklemlerin özelliklerini saptamak için kazı şevlerinde uygulanan hat etütlerinden ve araştırma sondajlarından yararlanılmıştır. Eklemlere ait yönelim, ara uzaklık, açıklık, devamlılık, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığı, bozunma derecesi, dolgu malzemesinin özelliği ve yüzeylerindeki su durumu gibi özellikler tespit edilerek ISRM (2007) ölçütlerine göre tanımlamaları yapılmıştır. Pürüzlü özellikte olan eklem yüzeylerinin makaslama dayanımı parametreleri Barton ve Bandis (1990) tarafından önerilen yenilme ölçütü kullanılarak belirlenmiştir. Kaya kalite göstergesinin (RQD) tespitinde ise Deere (1964) tarafından önerilen yöntemden yararlanılmış ve % 84 olarak hesaplanmıştır. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerini saptamak için Hoek vd. (2013) tarafından önerilen sayısal GSI abağı kullanılmış ve GSI değeri 61.5 olarak belirlenmiştir. Hoek vd. (2002) tarafından önerilen eşitliklerle orta derecede ayrılmış andezitik tüflerin tek eksenli basınç dayanımı, kaya kütle sabitleri, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Ayrıca, RocLab v1.0 (Rocscience, 2002) programından yararlanılarak orta derecede ayrılmış andezitik tüfler için kaya malzemesi sabiti (m_i) 13 olarak seçilmiştir. Kazı işlemi sırasında mekanik kazı uygulanacağı varsayılmış ve örselene faktörü (D) 0 olarak kabul edilmiştir.

Andezitik tüflerin dinamik Poisson oranını belirlemek için elastik ses dalgasının boyuna (V_p) ve enine (V_s) yayılma hızlarından yararlanılmıştır. Bu amaçla, belirlenen iki profilde sismik kırılma etütleri yapılmıştır. Bowles (1996) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak dinamik Poisson oranı değerleri hesaplanmıştır. Deformasyon modülünü belirlemek için açılan iki sondaj kuyusunda ASTM (2000) standardına göre toplam 15 adet presiyometre deneyi yapılmış ve Menard (1975) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak deformasyon modülü değerleri hesaplanmıştır.

İleri derecede ayrılmış andezitik tüflerin birim hacim ağırlığını ve kayma dayanımı parametrelerini belirlemek için ASTM (2009, 2011) standartlarına göre laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Orta derecede ayrılmış andezitik tüflerin fiziko-mekanik ve elastik özellikleri ise ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenmiştir. Ayrılmış andezitik tüflere ait malzeme ve kütle özellikleri Çizelge 1 ve Çizelge 2'de eklemlere ait özellikler ise Çizelge 3'te özet olarak sunulmuştur.

4. TAŞIMA GÜCÜ ÖZELLİKLERİ

Taşıma gücü açısından bir sorunla karşılaşmamak için Subaşı viyadüğü orta derecede ayrılmış andezitik tüflerin üstüne inşa edilecektir. Bu birimin taşıma gücü özelliklerini araştırmak için Hoek-Brown yenilme kriterinin kullanıldığı ampirik eşitliklerden yararlanılmıştır (Bell, 1992; Kulhawy ve Carter, 1992; Wyllie, 1999; Serrano vd., 2000; Merrifield vd., 2006). Yapılan hesaplamalar sonucunda güvenlik sayısı 3 alındığında izin verilebilir taşıma gücü değerinin (q_a) 3.33-19.53 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir.

Viyadük ayaklarından ve trafik yükünden kaynaklı temel kazısı seviyesinde oluşacak en büyük asal gerilme (σ_1) miktarlarını belirlemek için sonlu elemanlar (FEM) tabanlı Phase² v8.0 (Rocscience, 2011) programından yararlanılmıştır. Kazı alanlarına paralel (A-A' ve B-B') ve dik (C-C', D-D' ve E-E') olacak şekilde (Şekil 2) 5 adet analiz modeli oluşturulmuştur. Orta ve ileri derecede ayrılmış andezitik tüflerden oluşan taşınan kaya kütleleri, Çizelge 1 ve 2'de verilen malzeme ve kütle özellikleri kullanılarak, eklemler ise Çizelge 3'te verilen özellikler kullanılarak modellerde tanımlanmıştır. FEM analizlerinde Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılmış ve yapılan analizler sonucunda temel kazısı seviyesindeki en büyük asal gerilme miktarının 0.17-0.32 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 3).

Ayrıca, viyadük ayaklarından kaynaklı orta derecede ayrılmış kaya kütlelerinde meydana gelecek düşey deformasyonlar FEM analizleri yardımıyla araştırılmış, D-D' kesitindeki oturma miktarının 0.0-0.015 cm arasında, E-E' kesitinde ise 0.175-0.245 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. A-A', B-B' ve C-C' kesitlerinde herhangi bir deformasyonun gelişmediği tespit edilmiştir (Şekil 4).

Çizelge 1. Ayrışmış andezitik tüflere ait malzeme özellikleri.

Özellikler	Üst zon	Alt zon
Kaya kalite göstergesi (RQD , %)	-	84
Nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(s)}$, MPa)	-	1.72
Tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci} , MPa)	-	25.47
Young modülü (E_i , GPa)	-	28.85
Poisson oranı (ν_i)	-	0.20
Doğal birim hacim ağırlığı (γ_n , kN/m ³)	17.67	24.26
Doygun birim hacim ağırlığı (γ_s , kN/m ³)	20.01	25.78
Kohezyon (c , kPa)	15	-
İçsel sürtünme açısı (ϕ , °)	28	-

Üst zon: İleri derecede ayrışmış andezitik tuf, Alt zon: Orta derecede ayrışmış andezitik tuf

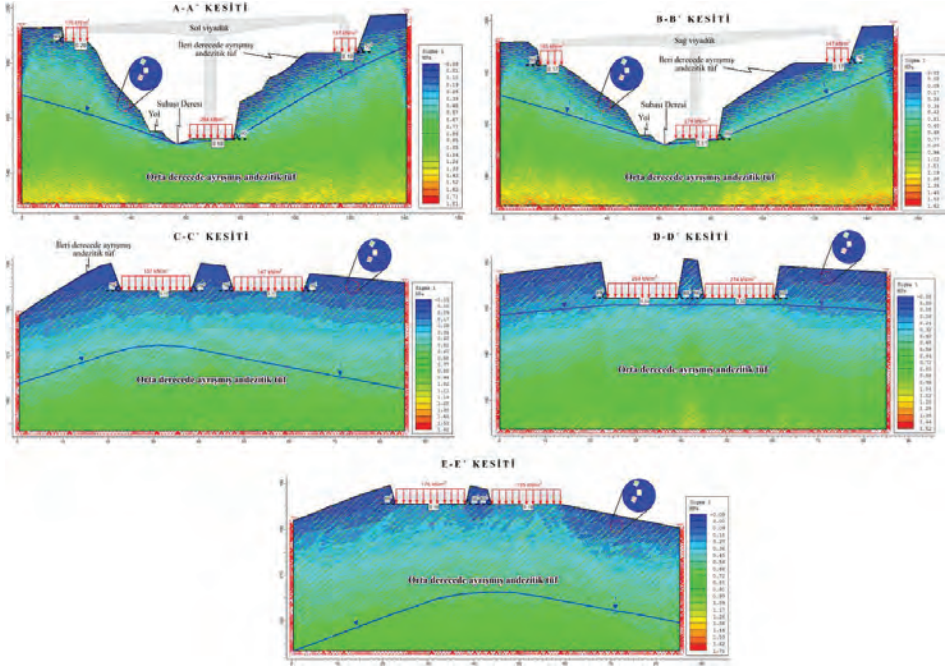
Çizelge 2. Ayrışmış andezitik tüflere ait kütle özellikleri.

Araştırmacılar	Eşitlikler	Not	Üst zon	Alt zon
Menard (1975)	$E_m = (1 + \nu) 2V \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right)$	MPa	16.37	2461.95
Bowles (1996)	$v_m = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$		0.41	0.23
Hoek vd. (2013)	$GSI = 1.5 JCond_{89} + RQD / 2$	RQD : % 84 $JCond_{89}$: 13	-	61.5
Hoek vd. (2002)	$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)}$ $s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)}$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$	m_i : 13 D : 0 GSI : 61.5	-	3.29
	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b / 4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$	MPa	-	6.53
	$c_m = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + [6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}] / [(1+a)(2+a)]}}$	kPa	-	1641
	$\phi_m = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$	derece	-	36

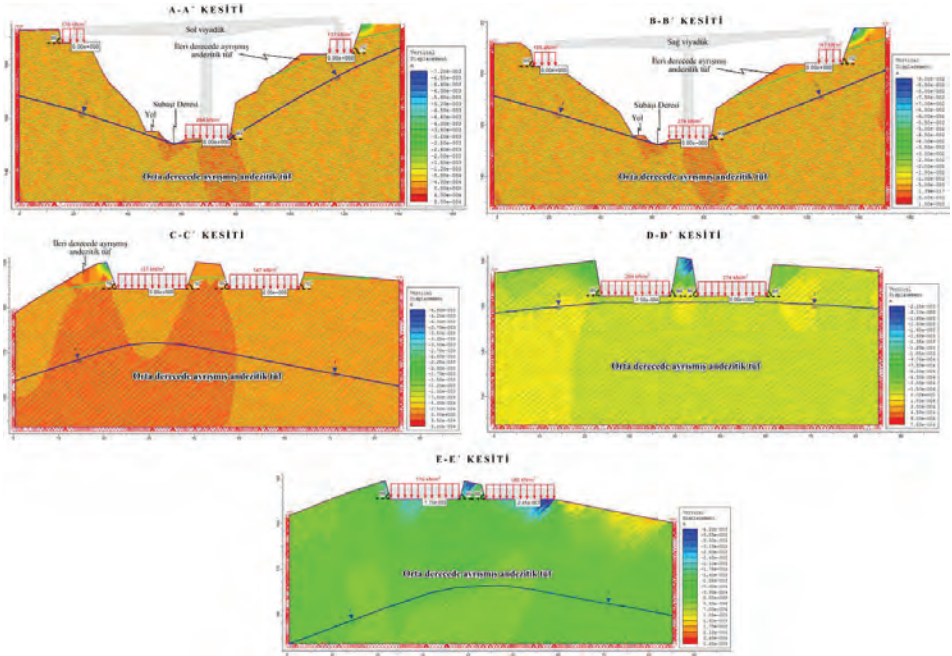
Çizelge 3. Orta derecede ayrışmış andezitik tüflerdeki eklemelerin özellikleri.

Özellikler	Değerler
Eklem takımı sayısı	3 + gelişi güzel
Eklem takımlarının duruşu	J1: 22/045 J2: 46/338 J3: 43/016
Ara uzaklık (cm)	(0.5-131) ^a 10.96
Devamlılık (m)	(0.2 -35) ^a 9.10
Açıklık (mm)	(0-24.0) ^a 1.92
Dolgu malzemesinin türü	<5 mm yumuşak kil
Pürüzlülük ve dalgalılık	Pürüzlü, dalgalı
Ayrışma durumu	Orta derecede ayrışmış
Su durumu	Damlama
Doruk sürtünme açısı (ϕ_p , °)	28
Doruk kohezyon (c_p , kPa)	44

^a: Ortalama



Şekil 3. Kesit hatları boyunca yapılan en büyük asal gerilme analizleri.



Şekil 4. Kesit hatları boyunca yapılan düşey deformasyon analizleri.

Sonuç olarak, en büyük asal gerilme değeri (σ_1) ile izin verilebilir taşıma gücü değeri (q_a) karşılaştırıldığında σ_1 değerinin q_a değerinden oldukça küçük ve düşey deformasyon miktarının ise sifra yakın olduğu belirlenmiş ve taşıma gücü açısından (kayma kırılması ve oturma) bir sorunun oluşmayacağı saptanmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Subaşı (Hopa-Artvin) viyadüğü inşa alanındaki andezitik tüflerin taşıma gücü özellikleri mühendislik jeolojisi açısından araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

- Subaşı viyadüğünün üzerine inşa edileceği orta derecede ayrılmış andezitik tüflerin izin verilebilir taşıma gücü değerinin (q_a), Hoek-Brown yenilme kriterinin kullanıldığı ampirik eşitliklere göre 3.33-19.53 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir.
- Viyadük ayaklarından ve trafik yükünden kaynaklı temel kazısı seviyesinde oluşacak en büyük asal gerilme miktarlarını (σ_1) belirlemek için sonlu elemanlar yönteminden (FEM) yararlanılmış ve 0.17-0.32 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir.
- Orta derecede ayrılmış kaya kütlelerinde meydana gelecek düşey deformasyonların yapılan FEM analizleri sonucunda 0.00-0.245 cm arasında değiştiği saptanmıştır.
- En büyük asal gerilme değeri (σ_1), izin verilebilir taşıma gücü değerinden (q_a) oldukça küçük ve düşey deformasyonların sifra yakın olması taşıma gücü açısından (kayma kırılması ve oturma) bir sorunun gelişmeyeceğini göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

- ASTM, 2000. Standard test method for prebored pressuremeter testing in soils, ASTM D4719-00, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2009. Standard test methods for laboratory determination of density (unit weight) of soil specimens, ASTM D7263-09, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2011. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM D2487-11, West Conshohocken, PA.
- Barton, N.R., Bandis, S.C., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice, Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, 603-610, Loen.
- Bell, G.F., 1992. Engineering in rock masses, Heinemann, London, 359 s.
- Bowles, J.E., 1996. Foundation analysis and design, fifth ed. McGraw-Hill Inc., New York.
- Capkinoglu, S., 1981. Geology of the district between Borcka and Cavuslu (Hopa), MSc. Thesis, Karadeniz Technical University.
- Deere, D.U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purpose, Rock Mechanics and Rock Engineering, 1, s.17-22.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proceedings of NARMS-TAC2002, Mining Innovation and Technology, Toronto, Canada, s. 267-273.
- Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., 2013. Quantification of the Geological Strength Index chart, 47th US Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, San Francisco, USA.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006, International Society of Rock Mechanics Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628 s.
- Kaya, A., 2012. The geotechnical investigation of the Cankurtaran (Hopa-Artvin) tunnel alignment and surrounding area, PhD Thesis, Karadeniz Technical University.
- Kulhawy, F.H., Carter, J.P., 1992. Settlement and bearing capacity of foundations on rock masses and socketed foundations in rock masses, In: Bell FG (ed) Engineering in rock masses. Butterworth-Heinemann, Oxford, s. 231-245.
- Menard, L., 1975. Interpretation and application of pressuremeter test results to foundation design, Sols Soils, No: 26.
- Merifield, R.S., Lyamin, A.V., Sloan, S.W., 2006. Limit analysis solutions for the bearing capacity of

- rock masses using the generalized Hoek-Brown criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, s. 920-937.
- Rocscience Inc., 2002. RocLab version 1.0 - rock mass strength analysis using the generalized Hoek-Brown failure criterion, Toronto, ON. <http://www.rocscience.com>
- Rocscience Inc., 2011. Phase² version 8.0 – finite element analysis for excavations and slopes, Toronto, ON. <http://www.rocscience.com>
- Serrano, A., Olalla, C., Gonzalez, J., 2000. Ultimate bearing capacity of rock masses based on the modified Hoek–Brown criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(6), s. 1013-1018.
- Wyllie, D.C., 1999. *Foundations on rock*, 2nd edn. E and FN Spon, London, s. 131-145.

Dane Boyu Dağılımında Ağırlık-Hacim İlişkisinin Zemin Sınıflaması Üzerine Etkisi

Research on Effects of Classification between By Weight-By Volume in Particle Size Distribution

M. Mutlutürk*, D. Hiçyılmaz

*Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
(*mutlu.mahmut@hotmail.com)*

ÖZ: Zemin sınıflamaları, dünyada yaygın bir şekilde zemin bileşenlerinin ağırlıkça yüzde dağılımlarına göre yapılmaktadır. Bu uygulanması basit, kolay ve başka sonuçlar ile karşılaştırılması mümkün olan bir uygulamadır. Ancak, mühendislik işlerinde, zemin davranışını denetleyen o zemine ait dane boyu dağılımı, kökeni, şekli ve dizilimidir. Bu nedenle diğer özellikleri göz ardı edip sadece ağırlıkça dane boyu dağılımına bakarak zemini sınıflandırmak bazı hatalı sonuçlar alınmasına neden olabilir. İri dane hacmi yüksek olan bir zeminde ince dane ağırlığı fazla ise bu durum sınıflamada fark edilmeyecektir. Bu çalışmada, iri daneleri pomzalardan oluşan 150 adet volkanik zemin örneği kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda iri ve ince dane ağırlıklarının birbirine yakın olduğu örneklerde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (USCS) göre, zemin sınıfı iyi derecelenmiş kum (SW) ya da siltli kum (SM) olan zemin örneklerinin hacimce yapılan sınıflamada iyi derecelenmiş çakıl (GW) oldukları gözlenmiştir. Mühendislik amaçlı zemin sınıflamalarında zemini oluşturan bileşenlerin, köken, yoğunluk gibi özelliklerinin yanı sıra, sınıflamada ağırlık-hacim ilişkisinin hatalı bir sonuca neden olup olmayacağını kontrol edilmesi, benzer çalışmaların değişik zeminlerde de denenerek sonuçların daha kapsamlı ele alınması gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması, hacimce zemin sınıflaması, volkanik zemin

ABSTRACT: Soil classifications are widely used in the world according to the weight percentages of soil components. This application is simple, easy to apply and possible to compare with other results. However, in engineering, examining of soil behavior are checked by distribution by particle size, origin and shape of grain and fabric. Therefore, soil classification only made by weight distribution and ignoring other features may cause wrong results. If soil sample contain low density and low weight coarse grain, may go unrecognized by a classification on weight. In this study, 150 volcanic soil samples have been used which are contained coarse pumice grains. In the laboratory works, in the limit weight values of fine-coarse grain different results has been obtained. Soil classified well graded sand (SW) or silty sand (SM) by weight, same samples classified well graded gravel (GW) by volume according to Unified Soil Classification System (USCS). As a result; in classification of soil in engineering, density and origin of soil components such as gravels, sand, silt, clay have to be checked first and determination of a possible error in terms of weight-volume relation have to be done. The results of similar studies tested on different soils have to be checked in a comprehensive way.

Keywords: Unified Soil Classification System, soil classification by volume, volcanic

1. GİRİŞ

Zeminler, mühendisler arasında ortak bir dil oluşması, araştırmalarda veri akışının sağlanması amaçları ile sınıflandırılırlar. Yapılan bütün sınıflandırmalarda önce zemin dane boyutuna göre ayrılır, daha sonra ayrılın boyutların toplam içindeki ağırlıkça yüzde dağılımına bakılarak değerlendirilir. Ancak dane boyutlarına göre yapılan sınıflamaların oldukça sık kullanılmasına rağmen danelerin jeolojik köken, şekil, yüzey gibi özelliklerinin farklılık göstermesi sonuçlara kuşku ile bakmamıza neden olabilmektedir. Eğer zemini oluşturan bileşenler arasında dane çaplarına bağlı belirgin bir farklılık var ise, bazı çaplarda farklı yoğunluğa sahip daneler toplanmışlarsa, bu bileşenlerin ağırlıkça yapılacak bir zemin sınıflaması yanlış algılara neden olabilecektir. Ayrıca 1984 yılından bugüne kadar Isparta Volkanik Zeminlerinde yapmış olduğumuz çalışmalarda (Muttutürk vd., 2003; Muttutürk, 2006) çakıl boyutlarında olan danelerin hacimce çoğunlukta olmasına rağmen zemin sınıflamalarında kum çıkması bir sorun olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, özellikle Isparta gibi volkanik zeminler

üzerinde yer alan bir alanda konunun ayrıntılı bir şekilde araştırılmasının gerekli olduğu sonucu da ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle Isparta volkanik zeminlerinde ağırlıkça ve hacimce yüzde dağılımlarının incelenmesi ve bunun zemin sınıflaması üzerine etkisinin incelenmesi bu çalışma kapsamında ele alınmıştır.

Zemin ile ilgili çalışmalarda MIT (Massachusetts Institute of Technology), ASTM (American Society for Testing and Material), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), USCS (Unified Soil Classification System) BS (British Standards Institution), ve TS (Türk Standartları)'nın kullanmış oldukları zemin sınıflama sistemlerinin tamamı ağırlıkça yüzde hesabına dayanmaktadır. Zeminler kullanılan sınıflama sistemine göre belirli dane çaplarına ayrılır ve belirli çap aralıklarında kalan malzemenin ağırlığının yüzdesine göre sınıflama yapılır. Zeminlerin ağırlıkça yüzdeleri belirlenmesi ve sınıflandırılması oldukça yaygın bir yöntem olmasına karşın, hacimce yüzde belirlenmesi ve sınıflandırma yapılması konusunda bir kaynağa ulaşılamamıştır.

Bu çalışmada, materyal olarak ağırlığı ile kapladığı hacim arasında farklılık olduğu önceki çalışmalarda belirtilmiş olan Isparta volkanik zeminini seçilmiştir. Temel yöntem olarak, herhangi bir dane boyu dağılımına sahip bir volkanik zeminin deneysel olarak minimum-maksimum birim hacim ağırlıkları belirlenerek, herhangi bir bağıl yoğunluk değeri için doğal birim hacim ağırlıklarının hesaplanması, ağırlıkça dane boyu dağılımı bilinen bu zeminin hesaplanan doğal birim hacim ağırlıktaki danelerin kapladığı hacimlerin belirlenmeye çalışılması seçilmiştir.

Bu amaçla, Isparta volkanik zemininde kazısı yapılan bir inşaat temel çukurundan alınan ve içinde pomza çakıllarının olduğu yaklaşık 180 kg ağırlığındaki numune kullanılmıştır. Alınan numune önce yıkama yolu ile çaplarına göre ayrılmış, her bir çapa ait dane birim hacim ağırlıkları belirlenerek değişik karışım oranlarında ağırlıkça yüzdeleri belli olan 20 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin hacimce yüzdelerinin belirlenmesi amacı ile ASTM D 4253 ve ASTM D 4254'e göre gevşek, sıkışık-kuru ve sıkışık-doygun toplam 150 adet deney yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlardan yararlanarak ağırlıkça-hacimce yüzde dağılımlar hesaplanmış, USCS'e göre zemin sınıflamaları yapılarak aradaki farklılıklar belirlenmiştir.

2. VOLKANİK ZEMİN VE ISPARTA VOLKANİK ZEMİNİ

Zeminlerin dane çaplarına ve kıvamlarına göre ayrılıp sınıflandırılması mühendislik hesaplamalarında önemli bir rehber olsa da, oluşum şekli, zeminin bileşenlerinin cins, şekil, boyut, yapı gibi özelliklerini denetleyen ve benzerleri ile karşılaştırılmasına olanak tanıyan bir özelliktir (Çizelge 1). Volkanik zeminler, volkanizmanın faaliyeti sırasında havaya püskürtmüş olduğu malzemenin birikmesi ile oluşmuş ve içinde iri/ince boyutta tamamen volkanik kökenli parçalar içermektedir. Bu nedenle volkanik zeminler dane birim hacim ağırlığı düşük olan pomza ile yüksek olan volkanik kaya/mineral parçalarını değişen oranlarda bir arada içerebilmektedirler.

Isparta ovasının büyük bir bölümü volkanik zeminlerden oluşmaktadır (Mutlutürk vd. 2003; Mutlutürk 2006) ve Totiç (2009) ovadaki volkanik zeminin ilk 20 m'sinin bir kesiti çıkarılarak 12 farklı seviye ayrılmıştır. Totiç (2009) tarafından ayrılan seviyeler görsel olarak belirgin renk ve yapı farklılıkları ile pomza/andezit çakıllarının miktarlarına dayanmaktadır. Bu ayrılan 12 seviyenin pomzalardan oluşan iki seviyesi hariç tamamı, değişik miktarlarda pomza, andezit çakılları içeren, zayıf tutturulmuş tüflerden oluşmaktadır ve bu seviyelerin USCS'e göre zemin sembolleri SM (siltli kum) olarak tanımlanmaktadır. Birçok seviyeden alınan örneklerde pomza miktarlarının hacimce fazla olmalarına rağmen sınıflamalarda SM olarak tanımlanması oldukça ilginçtir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar araziden numune alınması, alınan numunelerin çaplarına göre ayrılması ve değişik dane boyu dağılımlarına göre karışımların hazırlanmasını kapsayan numune hazırlama aşaması, dane ve kuru birim hacim ağırlıkların belirlendiği birim hacim ağırlık aşaması ve hacimce yüzde dağılımın belirlenmesi aşamalarından oluşmaktadır.

Çizelge 1. Zemin tipleri ve oluşum şekilleri (Mutlutürk, 2015).

ZEMİN TİPİ	OLUŞUM ŞEKLİ
Kalıntı Zemin	<i>Ayrışan zemin çok az yada hiç yer değiştirmemiş</i>
Alüvyal Zemin	<i>Zemin akarsu hareketi ile taşınıp depolanmış</i>
Kolüvyal Zemin	<i>Zemin oluşma yerinden yerçekimi etkisi ile hareket ederek birikmiş</i>
Buzul Zemin	<i>Zemin buzul hareketi ile taşınıp depolanmış</i>
Gölsel Zemin	<i>Zemin gölde oluşup depolanmış</i>
Denizel Zemin	<i>Zemin denizde oluşup depolanmış</i>
Organik Zemin	<i>Zemin organizmaların ve bitkilerin büyüüp çürümesi ile oluşmuş</i>
Eoliyen Zemin	<i>Zemin rüzgar hareketi ile taşınıp depolanmış</i>
Volkanik Zemin	<i>Kül, tüf, pomza gibi volkanik faaliyetler ile birikmiş</i>
Evaporitik Zemin	<i>Tuzlu, sülfatlı suların buharlaşması ile zemine karışması sonucu oluşmuş</i>
Antropojenik Zemin	<i>İnsanların her türlü faaliyetlerinden ortaya çıkan doğal oluşmayan atıklar</i>

3.1. Numune Hazırlama

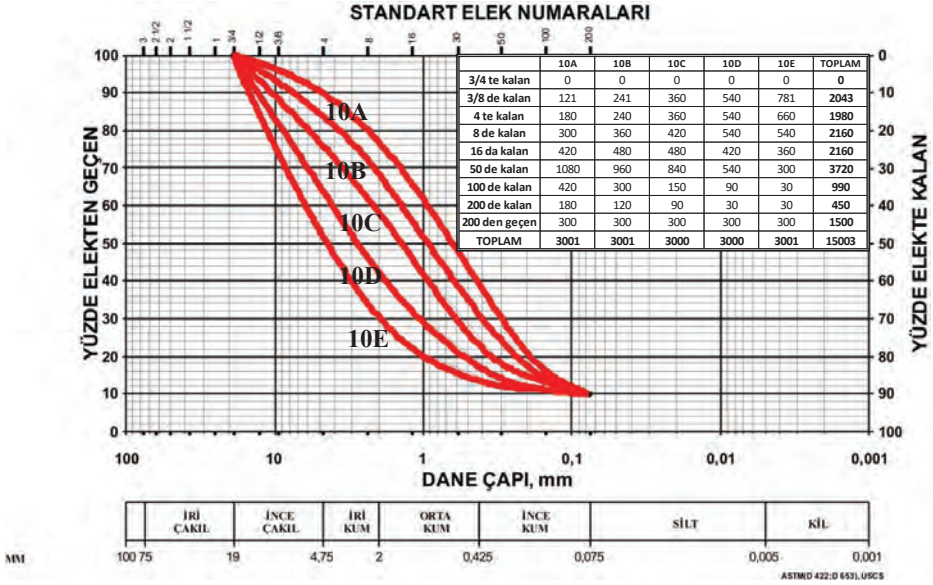
Deneyisel çalışmalarda kullanılacak numune temini için, Isparta şehir merkezinde, daha önceki değişik çalışmalarda dane içerikleri belli olan bir alanda açılan inşaat temel çukuru seçilmiştir. Temel çukuru içinden seçilen bir kazı yüzeyinden alınan yaklaşık 180 kg ağırlığındaki numune 1", ¾", 3/8" ve 4, 8, 16, 50, 100, 200 numaralı eleklerden ayrı ayrı yıkama yöntemi ile elenmiş, eleme işleminden sonra her bir elekte kalan ayrı ayrı önce havada sonra etüvde kurutulmuştur.

Deneyisel çalışmalarda kullanılacak numunelerin hazırlanmasında öncelikle kullanılacak numune kalıbına uygun maksimum dane çapı ve 200 numaralı elekten geçen malzeme yüzdeleri belirlenmiştir. 785 cm³ lük kalıp için maksimum dane çapı 3/4", 200 numaralı elekten geçen malzeme yüzdeleri ise %5, %10, %15 ve %20 olarak seçilmiştir. Sınır değerlerin belirlenmesinden sonra ters işlem yapılarak, her bir sınır değer arasında kalan 5 farklı karışım eğrisi çizilmiş (A, B, C, D, E) ve önce bu eğrilerden her bir elek aralığının yüzde dağılımı, sonra 3 kg standart karışım için ağırlıkları belirlenmiştir. Ağırlıkların belirlenmesinden sonra numuneler tartılarak hazırlanmış ve etüvde nem almadan düşük sıcaklıklarda muhafaza edilmiştir. Örnek olarak ince malzeme oranı %10 için hazırlanan eğriler, yüzde dağılımlar ve ağırlıklar Şekil 1'de verilmiştir.

3.2. Birim Hacim Ağırlık

Zeminlerde ağırlık-hacim ilişkisinde dane ve doğal birim hacim ağırlıkların belirlenmesi önemlidir. Deneyisel çalışmalarda dane birim hacim ağırlık TS EN ISO 17892, doğal birim hacim ağırlık ise ASTM D 4254 ve ASTM D 4253'e göre minimum ve maksimum birim hacim ağırlıkların belirlenmesi yardımı ile yapılmıştır. Dane birim hacim ağırlık deneyinde, deneyin 4 numaralı elek üstü ve altına uygulanması ve bunların ortalamalarının alınması şeklinde uygulanması istenmektedir. Bu çalışma kapsamında toplu halde birim ağırlık belirlenmesinin meydana getirdiği hatalar incelendiği için her bir çapın dane birim hacim ağırlığı deneysel olarak ayrı ayrı belirlenmiştir (Çizelge 2).

Birim hacim ağırlıkların belirlenmesinde kullanılan ASTM D 4254 ve ASTM D 4253 deney standartları için bu çalışma kapsamında özel deney düzeneği hazırlanmıştır. Deneyde standartta belirtildiği gibi özel imal edilmiş numune boşaltma hunisi, 785 cm³ hacminde kalıp ve düşey vibrasyon masası kullanılmıştır.



Şekil 1. İnce malzeme oranı %10 olan karışımlara ait ağırlıklar ve dane boyu dağılımı.

Çizelge 2. Kullanılan numuneler ait dane birim hacim ağırlıkları.

DANE ÇAPI ARALIĞI	DANE BİRİM HACİM AĞIRLIK (kN/m ³)		
	MAKSİMUM	MİNİMUM	ORTALAMA
3/4" – 3/8"	20.56	20.25	20.43
3/8" – No : 4	20.58	20.27	20.45
No : 4 – No : 8	21.25	20.13	20.69
No : 8 – No : 16	24.96	24.79	24.93
No : 16 – No : 50	26.69	26.36	27.13
No : 50 – No : 100	27.16	27.06	27.13
No : 100 – No : 200	27.26	26.82	27.03
No : 200 den geçen	27.28	26.33	27.05

Minimum birim hacim ağırlık belirlenmesinde yöntem A, Maksimum birim hacim ağırlık belirlenmesinde yöntem 2A ve yöntem 2B kullanılmıştır. Maksimum birim hacim ağırlık deney sonuçlarının değerlendirilmesinde bazı tutarsızlıklar olması nedeni ile 2A yöntemi ile elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.

3.3. Hacimce Yüzde Dağılım Belirlenmesi

Hacimce yüzde dağılımının belirlenebilmesi için o zemine ait dane ve kuru doğal birim hacim ağırlığın bilinmesi yeterlidir. Hesaplama kuru birim hacim ağırlığı belirlenen zeminin, birim hacimdeki ağırlığı o zemine ait dane birim hacim ağırlığı kullanılarak hacme dönüştürülerek hacimce yüzde dağılımı hesaplanabilir. Bu deneysel ve hesapsal işlemler kendi içinde bazı zorluklar ve bazı belirsizlikler içermektedir. Diğer taraftan, zeminin birim hacim ağırlığının belirlenmesinde örselenmemiş numune alınması temel yöntemdir. Ancak kohezyonsuz zeminlerde (ör. çakıl, kum, kumlu çakıllı) örselenmemiş numune alınması zor olduğu için yerinde birim hacim ağırlık belirlenmesi ile ilgili yöntemler geliştirilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında ise kohezyonsuz zeminlerin hacimleri minimum birim hacim ağırlık, maksimum birim hacim ağırlık, dane birim hacim ağırlık ve bağıl yoğunluk değerleri kullanılarak bulunabilmektedir.

Çizelge 3. Minimum ve maksimum birim hacim ağırlık deney sonuçları.

İNCE YÜZDESİ	KARIŞIM NO	MİNİMUM BİRİM HACİM AĞIRLIK (γ_{dmin} , kN/m ³)	MAKSİMUM BİRİM HACİM AĞIRLIK (γ_{dmax} , kN/m ³)
%5	05A	12.85	13.75
	05B	12.95	13.85
	05C	12.77	13.68
	05D	12.19	12.96
	05E	11.54	12.36
%10	10A	12.76	14.04
	10B	12.85	13.82
	10C	12.58	13.39
	10D	11.75	12.20
	10E	11.20	11.65
%15	15A	12.82	13.86
	15B	12.76	13.73
	15C	12.42	13.50
	15D	11.98	12.94
	15E	11.54	12.32
%20	20A	13.04	14.32
	20B	13.21	14.32
	20C	12.98	14.10
	20D	12.82	14.00
	20E	12.78	13.82

Bu çalışma kapsamında, önceden hazırlanmış olan volkanik zemin örneklerinin minimum ve maksimum birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve değişik sıklık değerleri için aşağıdaki Eşitlik 1 kullanılarak Eşitlik 2 ile doğal birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır (Çizelge 4).

$$D_d = \frac{\gamma_{dmax}(\gamma_d - \gamma_{dmin})}{\gamma_d(\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin})} \quad (1)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{dmin} \gamma_{dmax}}{\gamma_{dmax} - (D_d (\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}))} \quad (2)$$

Burada; D_d bağıl yoğunluk (%), γ_d kuru birim hacim ağırlık (kN/m³), γ_{dmin} minimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m³), γ_{dmax} maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m³)'dir.

Çizelge 4. Karışımların bağıl yoğunluklara bağlı hesaplanan doğal birim hacim ağırlıkları (kN/m³).

KARIŞIM NO	BAĞIL YOĞUNLUK (D_d , %)								
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
05A	12.94	13.01	13.10	13.19	13.29	13.38	13.47	13.56	13.66
05B	13.03	13.11	13.20	13.29	13.39	13.47	13.56	13.66	13.76
05C	12.85	12.94	13.02	13.11	13.21	13.30	13.40	13.48	13.58
05D	12.26	12.34	12.41	12.48	12.56	12.63	12.71	12.79	12.88
05E	11.62	11.70	11.78	11.86	11.94	12.01	12.10	12.18	12.27
10A	12.88	13.00	13.12	13.25	13.38	13.50	13.63	13.77	13.91
10B	12.94	13.03	13.12	13.22	13.32	13.42	13.51	13.61	13.71
10C	12.66	12.74	12.81	12.90	12.97	13.05	13.13	13.22	13.30
10D	11.79	11.84	11.88	11.93	11.96	12.01	12.06	12.10	12.15
10E	11.24	11.29	11.33	11.38	11.42	11.46	11.51	11.55	11.60
15A	12.92	13.01	13.11	13.21	13.32	13.43	13.53	13.64	13.75
15B	12.85	12.94	13.03	13.13	13.23	13.33	13.43	13.52	13.63
15C	12.51	12.61	12.72	12.83	12.94	13.04	13.15	13.27	13.39
15D	12.07	12.16	12.25	12.35	12.44	12.53	12.63	12.73	12.83
15E	11.61	11.69	11.76	11.84	11.92	11.99	12.07	12.15	12.24
20A	13.16	13.28	13.40	13.52	13.65	13.78	13.91	14.04	14.18
20B	13.31	13.42	13.52	13.63	13.74	13.85	13.97	14.08	14.20
20C	13.08	13.19	13.30	13.41	13.51	13.63	13.75	13.87	13.98
20D	12.93	13.03	13.15	13.27	13.39	13.50	13.62	13.75	13.88
20E	12.88	12.97	13.07	13.18	13.28	13.39	13.49	13.60	13.71

Hesaplamanın ikinci aşamasında önce ağırlıkça yüzde dağılımları bilinen karışımların deneyde kullanılan mold içinde çaplarına göre ağırlıkları bulunmuş ve sonra her bir dane çapı için belirlenen dane birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak, deneyde kullanılan kalıp içindeki danelerin hacimleri hesaplanmıştır. Son olarak hacimleri hesaplanan her bir dane çapının toplam içindeki hacimce yüzde dağılımları belirlenmiştir. Bütün karışımlara ait $D_d=0.30$ için ağırlıkça ve hacimce hesaplanan yüzde dağılımlar Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Bütün karışımlar için ağırlıkça (AY) ve hacimce (HY) yüzde dağılımlar ($D_d=0.30$).

ELEK NO	05AAY	05AHY	05BAY	05BHY	05CAY	05CHY	05DAY	05DHY	05EAY	05EHY
3/4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/8	4	5	8	10	12	14	18	20	26	28
4	10	12	16	19	24	28	36	41	47	51
8	20	25	28	34	38	44	52	58	63	68
16	32	37	42	47	52	58	66	71	76	81
50	70	72	76	78	82	84	87	89	90	92
100	85	86	89	90	92	93	93	94	94	95
200	95	95	95	95	95	96	95	96	95	96
ELEK NO	10AAY	10AHY	10BAY	10BHY	10CAY	10CHY	10DAY	10DHY	10EAY	10EHY
3/4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/8	4	5	8	10	12	14	18	20	26	28
4	10	12	16	19	24	28	36	40	48	52
8	20	25	28	33	38	44	54	60	66	71
16	34	39	44	49	54	59	68	73	78	82
50	70	72	76	78	82	84	86	88	88	90
100	84	85	86	87	87	89	89	91	89	91
200	90	91	90	91	90	91	90	92	90	92
ELEK NO	15AAY	15AHY	15BAY	15BHY	15CAY	15CHY	15DAY	15DHY	15EAY	15EHY
3/4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/8	4	5	8	10	12	14	18	20	26	29
4	10	12	16	19	24	28	36	41	48	53
8	20	25	28	33	38	44	52	58	62	68
16	34	39	44	49	54	59	64	69	72	77
50	66	68	72	75	76	79	79	82	82	85
100	78	80	80	82	82	84	83	86	84	87
200	85	86	85	86	85	87	85	87	85	88
ELEK NO	20AAY	20AHY	20BAY	20BHY	20CAY	20CHY	20DAY	20DHY	20EAY	20EHY
3/4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/8	3	4	6	7	9	11	14	16	23	26
4	6	8	12	15	18	22	28	33	38	43
8	10	13	18	22	28	34	40	46	50	57
16	18	21	28	32	38	44	50	56	60	66
50	50	52	60	62	66	69	72	75	74	78
100	70	71	74	76	76	78	78	81	79	82
200	80	81	80	81	80	82	80	82	80	83

4. AĞIRLIKÇA VE HACİMCE YÜZDE DAĞILIMLAR VE SINIFLAMA

Ağırlıkça ve hacimce yüzde dağılımlar karşılaştırıldığında ilk göze çarpan sonuçların eşit olmadığıdır. Bu farklılık dane çaplarının her birinin 20.43-27.13 kN/m³ arasında değişen farklı dane birim hacim ağırlığı değerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Pomza gibi boyutu iri ancak hafif olan daneler hacimce yer kaplamalarına rağmen ağırlıkları diğer danelere göre daha düşüktür. Bu farklılığın sınıflama sonuçlarına nasıl yansıdığını görebilmek için zemin mekaniğinde yaygın bir şekilde kullanılan Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması'na (USCS) göre sınıflama yapılmıştır (Çizelge 6).

Çizelge 6. Bütün karışımlardaki çakıl, kum, silt-kil yüzdeleri (ağırlıkça, AY ve hacimce, HY); Efektif Çaplar (D10, D30, D60); Üniformluk Katsayıları (Cu); Eğrilik Katsayıları (Cc).

DANE	05AAY	05AHY	05BAY	05BHY	05CAY	05CHY	05DAY	05DHY	05EAY	05EHY
ÇAKIL	10	12	16	19	24	28	36	41	47	51
KUM	85	83	79	76	71	68	59	55	48	45
SİLT-KİL	5	5	5	5	5	4	5	4	5	4
D ₁₀	0.1	0.1	0.15	0.15	0.19	0.20	0.20	0.29	0.30	0.40
D ₃₀	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.62	0.90	1.2	1.7	2.0
D ₆₀	0.9	1.0	1.2	1.8	2.0	2.9	4.0	4.9	6.0	7.0
Cu	9.00	10.00	8.00	12.00	10.50	14.50	20.00	16.90	20.00	17.50
Cc	1.00	1.225	0.889	0.750	0.658	0.663	1.013	1.013	1.61	1.43
USCS	SW-SM	SW-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP	SW-SM	SW	SW-SM	GW
DANE	10AAY	10AHY	10BAY	10BHY	10CAY	10CHY	10DAY	10DHY	10EAY	10EHY
ÇAKIL	10	12	16	19	24	28	36	40	48	52
KUM	80	78	74	72	66	63	54	51	42	40
SİLT-KİL	10	9	10	9	10	9	10	8	10	8
D ₁₀	0.075	0.080	0.075	0.085	0.075	0.1	0.10	0.20	0.10	0.30
D ₃₀	0.30	0.32	0.38	0.42	0.51	0.68	1.0	1.3	2.0	2.5
D ₆₀	0.98	1.1	1.4	1.8	2.1	2.8	4.0	5.0	6.0	7.0
Cu	13.07	13.75	18.67	21.18	28.00	28.00	40.00	25.00	60.00	23.33
Cc	1.225	1.163	1.375	1.153	1.651	1.651	2.50	1.69	6.667	2.976
USCS	SW-SM	SW-SM	SW-SM	SW-SM	SW-SM	SW-SM	SW-SM	SW-SM	GW-GM	GW-GM
DANE	15AAY	15AHY	15BAY	15BHY	15CAY	15CHY	15DAY	15DHY	15EAY	15EHY
ÇAKIL	10	12	16	19	24	28	36	41	48	53
KUM	75	74	69	67	61	59	49	47	37	35
SİLT-KİL	15	14	15	14	15	13	15	13	15	12
D ₁₀	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D ₃₀	0.25	0.28	0.31	0.40	0.40	0.58	0.70	1.1	1.2	2.0
D ₆₀	0.95	1.1	1.5	1.8	2.1	2.8	4.0	5.0	6.0	7.0
USCS	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	GM
DANE	20AAY	20AHY	20BAY	20BHY	20CAY	20CHY	20DAY	20DHY	20EAY	20EHY
ÇAKIL	6	8	12	15	18	22	28	33	38	43
KUM	74	73	68	66	62	60	52	50	42	40
SİLT-KİL	20	19	20	19	20	18	20	18	20	17
D ₁₀	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D ₃₀	1.5	1.55	0.18	0.20	0.21	0.30	0.35	0.45	0.40	0.70
D ₆₀	0.48	0.50	0.70	0.85	1.0	1.7	1.3	2.0	4.0	5.5
USCS	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	GM

Çizelge incelendiğinde, hacimce yüzde dağılımın, birim hacim ağırlığın düşük olduğu çakıl boyutunda (20.43-20.46 kN/m³) ağırlıkça yüzdeden daha büyük olduğu, birim hacim ağırlığın yüksek olduğu silt-kil boyutunda (27.05 kN/m³) ağırlıkça yüzdeden küçük olduğu, kum boyutunda ise birim hacim ağırlığın düşük olduğu boyutlarda (20.69-24.93 kN/m³) ağırlıkça yüzdeden büyük, yüksek olduğu boyutlarda (27.03-27.13 kN/m³) ağırlıkça yüzdeden küçük olduğu görülmektedir.

Zemin sınıflamalarında ise, sınır değerlerde zemin sembolü değişimleri olmaktadır. İncelerin sınırı olan %5 ve %12 ile çift sembol sınırı olan %5-12 değerlerine yaklaşıldığında önemli farklılıklar gözlenmektedir.

Çakıl yüzdesinin ağırlıkça çoğunluğa yakın fakat altında olduğu dağılımlarda (Ör. ağırlıkça çakıl %47) hacimce yüzde danenin birim hacim ağırlığına bağlı çoğunluğun üzerine çıktığı (aynı numunede hacimce çakıl %51) görülmektedir. Bu durumda ağırlıkça dağılıma göre kum olan zemin sembolü (SW-SM), hacimce çakıl (GW) olmaktadır.

5. SONUÇLAR

Zemin sınıflamaları dünyada yaygın bir şekilde zemin bileşenlerinin ağırlıkça yüzde dağılımlarına göre yapılmaktadır. Bu basit, uygulanması kolay ve başka sonuçlar ile karşılaştırma yapılması mümkün olan bir uygulamadır. Ancak mühendislik işlerinde bir zeminin davranışını denetleyen o

zeminin dane çaplarına göre dağılımı, danelerin cins, şekil ve dizilim gibi özellikleridir. Diğer özellikleri göz ardı edip sadece ağırlıkça dağılıma göre zemin sınıflamak bazı özel koşullarda yanlış sonuçlar alınmasına neden olabilir. İri dane yoğunluğu yüksek olan bir zeminde ince dane hacminin yüksekliği ya da iri dane yoğunluğu düşük olan bir zeminde iri dane hacminin yüksekliği ağırlığa dayalı bir sınıflamada fark edilmeyecektir.

Bu çalışma kapsamında, iri daneleri 19.61 kN/m^3 gibi pomzalardan oluşan yoğunluğu düşük Isparta Ovası volkanik zeminlerinde ağırlıkça yüzde dağılımla hacimce yüzde dağılım arasında, zemin sınıflamasında sınır değerlere yaklaşıldığında farklı sonuçlar çıkabileceği araştırılmış ve ağırlıkça sınıflamada (USCS-USCS), SW-SM (iyi derecelenmiş kum-siltli kum) zemin sınıfında olan bir zeminin, hacimce sınıflandırılırsa GW (iyi derecelenmiş çakıl) olabileceği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, zeminlerin mühendislik işlerinde sınıflandırılmasında öncelikle zemini oluşturan çakıl, kum, silt-kil gibi bileşenlerin cins, yoğunluk gibi dane özelliklerinin kontrol edilmesi, bunun sınıflamada ağırlık-hacim ilişkisi açısından hatalı bir sonuca neden olup olmayacağını rapor edilmesi, benzer çalışmaların değişik zeminlerde de denenip sonuçlarının daha kapsamlı ele alınması da gereklidir.

6. KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK Üniversite Öğrencileri Yurtiçi Araştırma Projeleri Destek Programı (2209/A) kapsamında yapılmıştır. Yazarlar katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

7. KAYNAKLAR

- AASHTO, 1995. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part I Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials Washington.
- AASHTO, 1995. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part II Tests, American Association of State Highway and Transportation Officials Washington.
- ASTM D 4253. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. American Society for Testing and Materials Philadelphia.
- ASTM D 4254. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. American Society for Testing and Materials Philadelphia.
- ASTM D 2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes Unified Soil Classification System). American Society for Testing and Materials Philadelphia.
- Mutlutürk, M., İsmailov, T., Yılmaz, K., 2003. Mühendislik Jeolojisinde Alüvyon Kavramı ve Isparta Ovası Alüvyonları. 20. Yıl Jeoloji Sempozyumu Isparta.
- Mutlutürk, M., 2006. Zemin Tanımı ve Haritalanmasının Önemi. Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu Denizli, 649-654.
- Totiç, E., 2009, Isparta Ovasındaki Volkanik Kökenli Zeminlerde Fiziksel ve Mekaniksel Özellikler Arasındaki İlişkilerin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 204s, Isparta.
- TS EN ISO 17892, 2016. Geoteknik Etüt ve deneyler-Zemin laboratuvar deneyleri. Türk Standartları Enstitüsü Ankara.

Yapay Bimrock Örneklerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Dayanım Oranı (Blok Dayanımı/Bağlayıcı Dayanımı) ile İlişkisinin Araştırılması

Investigation of the Relationship Between Strength Ratio (Block Strength/Matrix Strength) and the Physical and Mechanical Properties of Artificial Bimrock Samples

M.O. Sünnetci*, M. Karahan, H. Ersoy, O. Yazıcı

*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Trabzon
(*moguzsunnetci@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada yapay bimrock örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin dayanım oranı (blok dayanımı/bağlayıcı dayanımı) ve hacimsel blok oranı (HBO) ile olan ilişkisi araştırılmıştır. Çalışmada gerek bloklar gerekse de bağlayıcı yapay olarak oluşturulmuş, yapay örnekler hazırlanırken blokların dayanımı sabit tutulup farklı dayanımlara sahip bağlayıcılar kullanılarak %20 ve %30 HBO'larda toplam 77 adet örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin dayanım oranları 0.22 ile 1.45 arasında değişmektedir. Sonuç olarak dayanım oranı 0.73'ten küçük olduğunda bimrock dayanımının bağlayıcı kontrollü olduğu, dolayısıyla HBO değerlerinin bimrock dayanımı üzerinde bir etkisinin olmadığı; dayanım oranı 0.73'ten büyük olduğunda ise bimrock dayanımının blok kontrollü olduğu ve HBO değerlerinin bimrock dayanımında önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Dayanım oranı 0.73'ten büyük olduğunda HBO değerleri arttıkça bimrock dayanımı da artmaktadır. Son olarak boyuna dalga hızının dayanım oranı ile doğru orantılı, HBO ile ise ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bimrock, dayanım oranı, boyuna dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı

ABSTRACT: *In this study, the relationship between the physical and mechanical properties of the artificial bimrock specimens with the strength ratio (block strength/matrix strength) and the volumetric block proportion (VBP) was investigated. In the study, both the blocks and the matrix were artificially formed. When the artificial specimens were prepared, strengths of the blocks were kept constant and 77 samples were prepared with 20% and 30% VBP using matrixes with different strengths. Strength ratios of prepared specimens ranged from 0.22 to 1.45. As a result, when the strength ratio is less than 0.73, the bimrock strength is matrix controlled, so that the VBP values have no effect on the bimrock strength; when the strength ratio is greater than 0.73, it is seen that the bimrock strength is block controlled and the VBP values have an important effect on the bimrock strength. When the strength ratio is greater than 0.73, the bimrock strength also increases as the VBP values increase. Finally, longitudinal wave velocity is directly proportional to the strength ratio and inversely proportional to VBP.*

Keywords: *Bimrock, strength ratio, longitudinal wave velocity, unconfined compressive strength*

1. GİRİŞ

Nispeten dayanıklı kaya parçalarının daha az dayanıklı bir bağlayıcı içerisinde dağıldığı kaya ortamlarına literatürde bimrock (block-in-matrix rock) denilmektedir. Aglomera, konglomera, breş gibi kayaçlar yeryüzünde yaygın olarak bulunan bimrock'lara örnek olarak verilebilir. Bağlayıcı ve kaya bloklarının dayanımlarının değişken olması ve özellikle de bu iki bileşen arasındaki tutunma/çimentolanma mekanizmasının kesin bir şekilde ortaya konulamaması bimrock'ların dayanımlarının belirlenmesinde problemler ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca, bu tür malzemeler metrelerce hatta kilometrelerce çapta kaya blokları içerebildiğinden ve bağlayıcı malzemesinin çok gevşek olabilmesinden dolayı bunlardan standartlara uygun örnek alınması genellikle mümkün olamamaktadır (Lindquist, 1994; Lindquist ve Goodman, 1994). Bu nedenle araştırmacılar laboratuvarında ürettikleri yapay bimrock örnekleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu yöntem aynı zamanda blok ve bağlayıcı dayanımlarının kontrol edilebilmesine ve yapay bimrock'ın hacimce kaya bloğu oranının (hacimsel blok oranı) istenildiği gibi ayarlanabilmesine imkân vermektedir. Böylece bimrock dayanımına etkisi olan parametreler belli bir sistematik içerisinde incelenebilmektedir.

Medley (2002) blok ve bağlayıcı karışımından oluşan heterojen kayalara bimrock denilebilmesi için blok dayanımı/bağlayıcı dayanımı oranının 2'den büyük olması gerektiğini söylemiştir. Ancak sonraki yıllarda bu şartı sağlamadığı halde kayaç yapısını koruyan ve zemin-kaya karışımı (soil-rock mixture) ortamlardan bariz bir şekilde ayrılan kayalara da bimrock denilmiştir (Medley, 2004). Bu durum bağlayıcı dayanımının blok dayanımından daha büyük olması durumunda bimrock dayanımının nasıl bir değişim göstereceği sorusunu gündeme getirmiştir.

Literatürde hacimsel blok oranının bimrock dayanımı üzerine etkisini inceleyen birçok çalışma olmasına rağmen bağlayıcı dayanımı/blok dayanımı oranını göz önünde bulunduran çalışma sayısı çok azdır. Bu çalışmada laboratuvarda yapay olarak üretilen bimrock örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin farklı blok/bağlayıcı dayanım oranlarında nasıl bir değişim gösterdiği incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Hacimsel blok oranı, blok boyutu ve blok dayanımı/bağlayıcı dayanımı oranının (dayanım oranı) Bimrock'ların sıkışma dayanımı üzerine olan etkisini incelemek amacıyla çeşitli çimento-alçı-su karışımlarında yapay bağlayıcı ve blok örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin dayanımının belirlenmesi amacıyla bunlar üzerinde sonik hız ve tek eksenli basınç direnci deneyleri yapılmış, ayrıca örneklerin birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

Çizelge 1. Yapay bağlayıcı örneklerinin hazırlanmasında kullanılan çimento-alçı-su oranları.

Örnek Grubu	Örnek Sayısı	Çimento (%)	Alçı (%)	Su (%)
1	5	70	0	30
2	4	60	0	40
3	4	50	10	40
4	4	40	20	40
5	4	30	30	40
6	3	20	40	40

2.1. Yapay Bağlayıcı Örneklerinin Hazırlanması

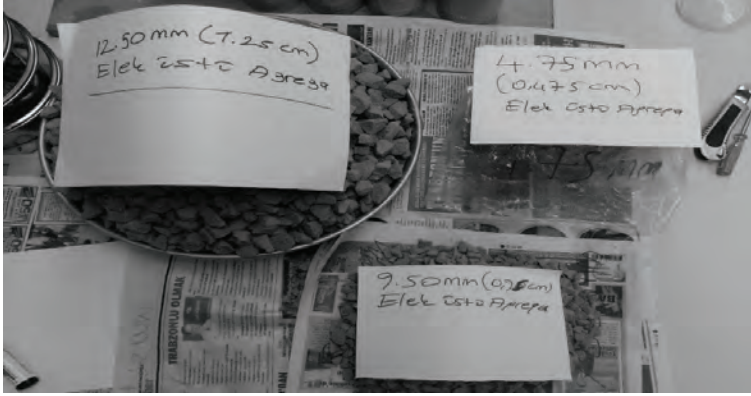
Çalışmanın ilk aşamasında yapay bimrock örneklerinin hazırlanmasında kullanılacak olan bağlayıcı karışımlarının dayanımlarının belirlenmesi amacıyla farklı oranlarda çimento-su-alçı karışımı kullanarak 6 farklı grupta tamamen bağlayıcıdan oluşan yapay karotlar hazırlanmıştır (Çizelge 1). 6x15 cm boyutlarındaki PVC kalıplardan çıkarılan yapay bağlayıcı karotlarının alt ve üst yüzeyleri düzeltilmiş ve deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Yapay bağlayıcı örneklerinin hazırlanması.

2.2. Yapay Agregaların Hazırlanması

Yapay bimrock örneklerinin hazırlanmasında kullanılacak olan agregalar %45 çimento, %15 alçı ve %40 su karışımından oluşturulmuştur. Böylece hazırlanacak olan bimrock örneklerinin blok dayanımlarının sabit olması ve değişen blok dayanımı/bağlayıcı dayanımı oranlarının bimrock dayanımını nasıl etkilediğinin sağlıklı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan agrega oluşturmak üzere 15 kg'lık 3 adet blok ve bu agregaların dayanımlarının belirlenmesi amacıyla aynı karışımdan karotlar hazırlanmıştır. Karotlar üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılarak agregaların dayanımı belirlenmiştir. Daha sonra agrega blokları kırıcıda parçalanarak sırasıyla 12.50 mm, 9.50 mm, 4.75 mm'lik açıklığa sahip eleklerden elenmiş ve 3 farklı boyutta agrega grubu oluşturulmuştur.



Şekil 2. Hazırlanan yapay agrega grupları.

2.3. Yapay Bimrock Örneklerinin Hazırlanması

Yapay bimrock örnekleri hazırlanırken yaklaşık 1 cm'lik agregalar kullanılmıştır. %80 bağlayıcı-%20 agrega (%20 hacimsel blok oranı, HBO) ve %70 bağlayıcı-%30 agrega (%30 HBO) içeren 2 grup yapay bimrock örneği oluşturulmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Yapay bimrock örneklerinin hazırlanışı.

Farklı HBO'lardaki yapay örneklerin çimento-alçı-su yüzdeleri Çizelge 2 ve 3'te verilmiştir. Her bir örnek grubunda 4'er adet olmak üzere toplamda 48 adet yapay bimrock örneği hazırlanmıştır.

Çizelge 2. %80 bağlayıcı ve %20 agrega karışımından oluşan yapay bimrock grupları.

Grup No	Toplam Malzeme (gr)	Toplam Bağlayıcı (gr)	Toplam Agrega (gr)	Çimento (%)	Alçı (%)	Su (%)
YÖ-1	5000	4000	1000	70	0	30
YÖ-2	5000	4000	1000	60	0	40
YÖ-3	5000	4000	1000	50	10	40
YÖ-4	5000	4000	1000	40	20	40
YÖ-5	5000	4000	1000	30	30	40
YÖ-6	5000	4000	1000	20	40	40

Çizelge 3. %70 bağlayıcı ve %30 agrega karışımından oluşan yapay bimrock grupları.

Grup No	Toplam Malzeme (gr)	Toplam Bağlayıcı (gr)	Toplam Agrega (gr)	Çimento (%)	Alçı (%)	Su (%)
YÖ-1	5000	3500	1500	70	0	30
YÖ-2	5000	3500	1500	60	0	40
YÖ-3	5000	3500	1500	50	10	40
YÖ-4	5000	3500	1500	40	20	40
YÖ-5	5000	3500	1500	30	30	40
YÖ-6	5000	3500	1500	20	40	40

3. BULGULAR

3.1. Yapay Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

3.1.1. Birim hacim ağırlık

Bu çalışma kapsamında 24 adet bağlayıcı örneği, 6 adet agrega örneği ve 48 adet yapay bimrock örneği üzerinde birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda agregaların ortalama BHA değerinin 11.52 kN/m³, bağlayıcı örneklerinin 10.79-11.36 kN/m³, %20 HBO'ya sahip bimrock örneklerinin 11.60-16.43 kN/m³, %30 HBO'ya sahip bimrock örneklerinin ise 12.36-13.96 kN/m³ arasında olduğu belirlenmiştir.

3.1.2. Sonik Hız Deneyi

Yapay bağlayıcı ve bimrock örneklerinin ultrasonik P-dalga hızları Pundit Plus marka 150 kHz'lik piezoelektrik alıcı ve vericiye sahip test cihazıyla belirlenmiştir. Deneyler sonucunda bağlayıcı örneklerinin ortalama P-dalga hızları 1783-3461 m/sn arasında, %20 HBO'ya sahip bimrock örneklerinin 1361-3490 m/sn arasında ve %30 HBO'ya sahip bimrock örneklerinin ise 1596-2668 m/sn olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Hazırlanan yapay bağlayıcı ve bimrock örneklerinin dayanım oranları, birim hacim ağırlıkları (BHA), tek eksenli sıkışma dayanımları ve P-dalga hızları

Grup No	Agrega BHA	Bimrock BHA	Dayanım Oranı	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı			P-dalga Hızı		
				Matriks (MPa)	%20 HBO (MPa)	%30 HBO (MPa)	Matriks (m/sn)	%20 HBO (m/sn)	%30 HBO (m/sn)
1	11.82	17.36	0.22	24.97	9.15	9.14	3461.16	3490.46	2668.00
2	11.57	14.98	0.28	19.40	9.11	8.88	2799.76	2884.57	2650.11
3	11.28	12.49	0.73	7.57	5.05	7.12	2018.67	2077.67	2267.44
4	11.52	11.60	1.18	4.74	4.56	5.55	1777.09	1985.67	2175.99
5	11.76	11.27	1.31	4.23	4.18	5.15	1744.35	1934.38	2153.14
6	11.15	10.82	1.45	3.83	3.31	5.14	1782.82	1361.24	1595.59

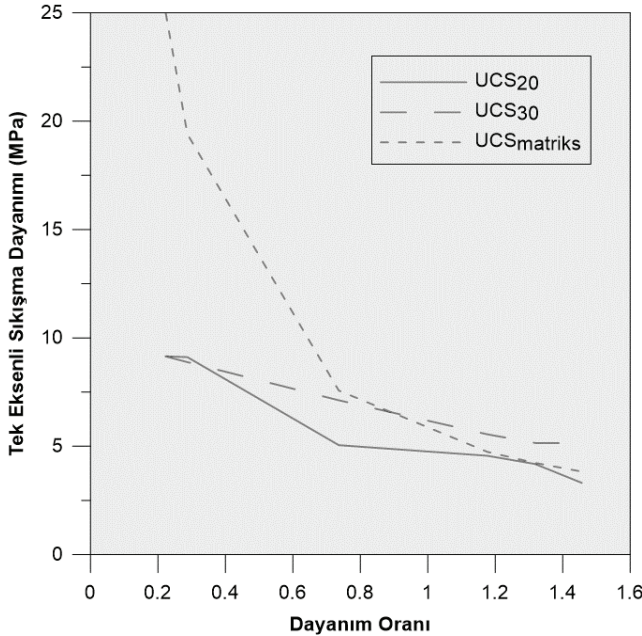
3.1.3. Tek Eksenli Basınç Direnci Deneyi

Hazırlanan tüm yapay örnekler üzerinde ASTM D7012-14 (ASTM, 2014) standardına uygun olarak tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda yapay agregaların tek eksenli sıkışma dayanımının ortalama 5.746 MPa, yapay bağlayıcı örneklerinin ortalama 3.83-24.97 MPa, %20 HBO'ya sahip bimrock'ların ortalama 3.31-9.15 MPa, %30 HBO'ya sahip bimrock'ların ise 5.14-9.14 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Çizelge 4).

4. SONUÇLAR

Çalışmanın son aşamasında yapay örnekler üzerinde yapılan deneyler ışığında dayanım oranının bimrock'ların tek eksenli sıkışma dayanımı ve P-dalga hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4'te yapay bağlayıcı ve %20-%30 HBO'ya sahip yapay bimrock örneklerinin dayanım oranıyla tek eksenli sıkışma dayanımı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

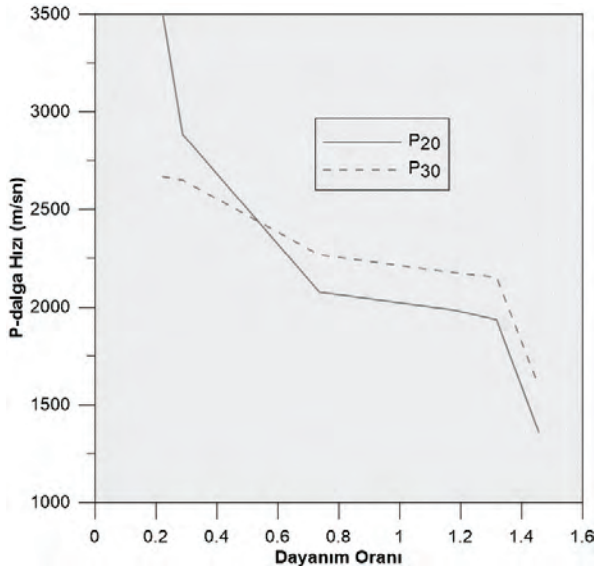
Şekil 4'te görüldüğü üzere dayanım oranı (blok dayanımı/bağlayıcı dayanımı) arttıkça bağlayıcı ve bimrock örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı düşmektedir. Örnekler hazırlanırken agregaların dayanımı sabit tutulduğundan, dayanım oranındaki yükselme bağlayıcı dayanımının düşmesine işaret etmektedir. Bağlayıcı dayanımı blok dayanımından düşük olduğunda bimrock dayanımı bağlayıcı kontrollü olmakta, dolayısıyla da sıkışma dayanımı azalmaktadır.



Şekil 4. Dayanım oranının yapay bimrock örneklerinin sıkışma dayanımı üzerine etkisi.

Ayrıca yine Şekil 4'te, düşük dayanım oranlarında %20 HBO'ya sahip örneklerin sıkışma dayanımının %30 HBO'ya sahip örneklere göre daha yüksekken dayanım oranı arttıkça bu durumun tersine döndüğü de anlaşılabilmektedir. Bu durum, bağlayıcı ve blok arasındaki dayanım farkının yüksek olduğu durumlarda HBO'nun kayacın dayanımında daha etkin bir rol oynadığının göstergesi olabilir. Bağlayıcı ve bloklar arasındaki dayanım farkı düşük olduğunda yüksek HBO'ya sahip örneklerin sıkışma dayanımlarının yüksek olması ise, HBO'nun artmasıyla örnekteki blok-blok dokanaklarının artması, böylece kayacın sıkışma dayanımının artmasıyla açıklanabilir.

%20 ve %30 HBO'ya sahip yapay bimrock örneklerinin P-dalga hızlarının dayanım oranına bağlı değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görülebileceği üzere her iki örnek grubunun P-dalga hızları dayanım oranının artmasıyla düşmektedir. Özellikle %20 HBO'ya sahip örnek grubunun P-dalga hızları düşük dayanım oranlarında oldukça yüksekken, yüksek dayanım oranlarında %30 HBO'ya sahip örnek grubunun P-dalga hızlarının altına inmiştir. Örneklerdeki blok dayanımları sabit olduğundan, bu durum, P-dalga hızı değerlerinin bağlayıcı dayanımıyla yakın bir ilişki içinde olduğunu ortaya koymaktadır. %30 HBO'ya sahip örnekler hacimce daha az bağlayıcıya sahip olduğundan dayanım oranındaki değişim bu gruptaki örnekleri çok fazla etkilememiş olabilir. Bir başka önemli nokta ise yaklaşık 1.35 dayanım oranı sınırından itibaren her iki örnek grubunun P-dalga hızlarında keskin ve aynı oranda bir düşüşün gözlenmesidir. 1.35 dayanım oranı bimrock'ların boyuna dalga hızlarının değişimi açısından bir sınır değer olabilir; gelecekteki çalışmalarda daha farklı HBO'ya sahip örnek grupları üzerinde aynı çalışmalar yapılarak bu durum daha net bir biçimde ortaya konulabilir.



Şekil 5. Dayanım oranının yapay bimrock örneklerinin P-dalga hızı üzerine etkisi.

5. KAYNAKLAR

- ASTM D7012-14, Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- Lindquist, E.S., 1994. The strength and deformation properties of melange, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley
- Lindquist, E.S. and Goodman, R.E., 1994. The strength and deformation properties of a physical model melange, Proc. 1st North American Rock Mechanics Conference (NARMS), Austin, Texas, eds. Nelson, P.P. and Laubach, S.E., A.A. Balkema, Rotterdam, 843-850.
- Medley, E.W., 1994. The engineering Characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (Bimrocks), Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Medley, E. W., 2002. Estimating Block Size Distributions of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks), Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), ed. Hammah, R., Bawden, W., Curran, J., ve Telesnicki, M., University of Toronto Press, pp. 509-606, Toronto, Kanada.
- Medley, E. W., 2004. Observations on tortuous failure surfaces in bimrocks, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling, 22-5.

Mersin Limanı'ndaki Zeminlerin İndeks ve Konsolidasyon Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Assesment of Index and Consolidation Properties of Sediments at Mersin Harbor

A. Alptekin^{1,*}, H. Tağa¹

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 33343, Yenişehir, Mersin
(*aydinalptekin@mersin.edu.tr)

ÖZ: Türkiye'nin artan ticaret hacminin karşılanabilmesi amacıyla, Mersin Limanı'nın kapasitesinin artırılmasına gerek duyulmuş ve 2013 yılında jeoteknik araştırmalar yapılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması'na göre düşük plastisiteli kil (CL) sınıfındaki 18 adet örselenmemiş deniz sedimanı üzerinde konsolidasyon, Atterberg limitleri ve doğal su içeriği deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon deneyinden belirlenen sıkışma indisi (Cc), şişme indisi (Cs) ve ön konsolidasyon basıncı (pc) ile indeks deneylerden elde edilen likid limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI), yoğunluk (ρ), ilksel boşluk oranı (e_0) ve doğal su içeriği (W_n) arasında basit ve çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilerek ilişkiler araştırılmış ve yüksek korelasyon katsayılı yeni eşitlikler önerilmiştir. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Tekniği kullanılarak oluşturulan dağılım haritalarında kıyıda uzaklaştıkça sıkışma indisi, şişme indisi, likid limit, plastik limit ve plastisite indisi ve doğal su içeriği değerlerinin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deniz sedimanları, regresyon analizi, konsolidasyon Pparametreleri, indeks özellikler

ABSTRACT: For the purpose of meeting the increasing trade volume of Turkey, Mersin Harbor's volume is required to increase and geotechnical research at 2013 was done. Consolidation, Atterberg limits and natural water content tests were done to the 18 undisturbed sea sediments which belong to low plasticity clay (CL) according to Unified Soil Classification System. Simple and multiple regression analysis between compression index (Cc), swelling index (Cs) and pre-consolidation pressure (Pc) which were obtained from consolidation test and liquid limit (LL), plastic limit (PL), plasticity index (PI), density (ρ), initial void ratio (e_0) and natural water content which were obtained from index tests were done and new equations with higher correlation coefficients are suggested. It is seen that compression index, swelling index, liquid limit, plastic limit, plasticity index and natural water content values increase when we go away from shoreline at the contour maps prepared by using Inverse Distance to a Power method.

Keywords: Sea sediments, regression analysis, consolidation parameters, index properties

1. GİRİŞ

Tipik Akdeniz iklimi etkisi altında bulunan Mersin ili, Türkiye'nin güneyinde nüfusu sürekli olarak artmakta olan bir ilimizdir. Mersin ilinde bulunan Mersin Limanı ülkemizin dünyaya açılan önemli bir ticaret kapısıdır (Şekil 1). Limanı genişletmek için 2013 yılında deniz sondajları yapılmış ve bu sayede deniz sedimanlarının jeoteknik bilgilerine ulaşılmıştır. Bu çalışma kapsamında deniz tabanından alınan 18 adet örselenmemiş deniz sedimanı üzerinde konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca zeminlerin kıvam limitleri, ilksel boşluk oranları ve doğal su içerikleri de belirlenmiştir.

Çalışma alanı Adana Baseni'nin batı kısmında bulunmaktadır. Mersin İli kuzeyinde Toros Dağları, güneyinde ise Akdeniz ile sınırlandırılmıştır. Örnekleme noktalarının çevresinde Tortoniyen yaşlı Kuzgun Formasyonu ve kuvaterner yaşlı delta çökelleri, alüvyon birimleri ve sert kalış tabakası gözlenmektedir (Şekil 2). Kızılçay Deresi tarafından getirilen sedimanlar Mersin Körfezi'ne dökülmektedir.

Bir mühendislik projesindeki zemin oturmasının belirlenebilmesi için konsolidasyon deneyinden elde edilen sıkışma ve şişme indisi değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Konsolidasyon deneyi ince taneli ve örselenmemiş örnekler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Denizden örselenmemiş zemin örneği

alabilmek zor bir iştir. Bu sebepten dolayı yapılması daha kolay olan indeks deneylerden elde edilen parametreler ile konsolidasyon deneyinden elde edilen sıkışma indisi, şişme indisi ve ön konsolidasyon basıncı arasında bir eşitlik bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla basit ve çoklu regresyon analizleri yapılarak parametrelerin aralarındaki ilişkiler belirlenmiştir.



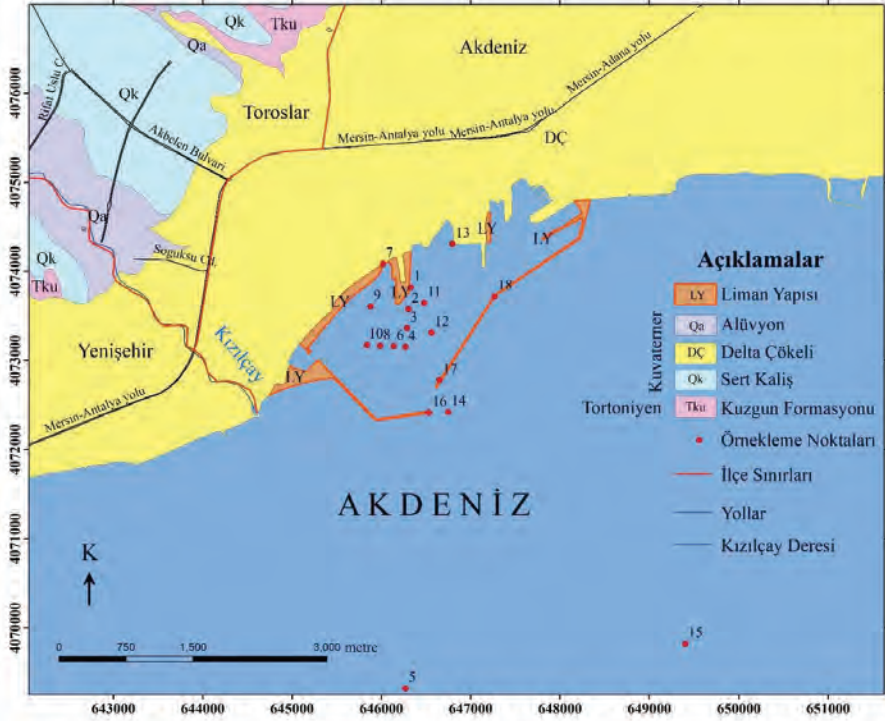
Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.

2. MALZEME ve YÖNTEM

18 adet deniz sondajından hidrolik sondaj makinesi yardımı ile farklı derinliklerde örselenmemiş deniz sedimanı örneği alınmıştır. Açılan sondajlarda ortalama 2-17 m deniz suyu, 4 m deniz tabanı çökeli ve bu birimin altında da killi birimler yer almaktadır. Sondajlardan elde edilen örnekler üzerinde TS 1900-1 standartına göre Atterberg limitleri ve nem içeriği deneyleri, TS 1900-2 standardına göre ise konsolidasyon deneyi yapılmıştır.

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sıkışma ve şişme indisleri için kara sondajından elde edilen örnekler üzerinde önerilmiş pek çok eşitlik olmasına rağmen, deniz sedimanları üzerinde yapılmış çok az çalışma bulunmaktadır (Çizelge 1). Yoon vd. 2004 yılında Kore' nin 3 farklı bölgesinden elde ettikleri 1237 adet örselenmemiş deniz sedimanı ile oluşturdukları veri setine basit ve çoklu regresyon analizleri uygulamışlardır. Oh ve Chai 2006 yılında deniz sedimanları üzerinde yapmış oldukları bir çalışmada sıkışma indisi ile indeks özellikler arasında yüksek korelasyon katsayılı eşitlikler önermişlerdir. Yoon ve Kim tarafından 2006 yılında yapılmış bir çalışmada 468 adet örselenmemiş deniz sedimanı kullanılarak hazırlanan veri setine çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Suneel vd. 2008 yılında deniz sedimanları üzerinde sıkışma ve şişme indisi için plastisite indisi parametresini kullanarak eşitlikler önermişlerdir. Kootahi ve Moradi tarafından 2017 yılında yapılmış olan bir çalışmada 500 adet örselenmemiş deniz sedimanı kullanılarak yüksek korelasyon katsayılarına sahip eşitlikler üretilmiştir.



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın civarının jeoloji haritası (Tağa ve Demirkol 1996 ile Şenol vd. 1998'den değiştirilerek).

Çizelge 1. Farklı araştırmacılar tarafından konsolidasyon özellikleri ile indeks özellikler arasında belirlenmiş olan eşitlikler.

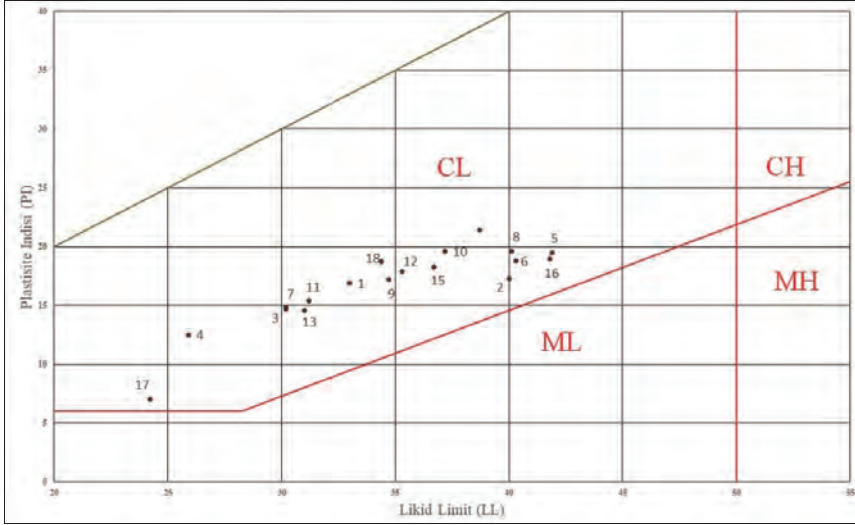
Eşitlik	r	#	Kaynak
$C_c = (-0.0003 * W_n) + (0.538 * e_0) + (0.002 * LL) - 0.3$	0.830	278	Yoon vd. 2004
$C_c = -0.0484 + (0.0134 * W_n)$	0.828	-	Oh ve Chai, 2006
$C_c = -0.1248 - (0.0074 * PI) + (0.5393 * e_0) + (0.0049 * LL)$	0.889	-	Oh ve Chai, 2006
$C_c = -0.404 + (0.341 * e_0) + (0.006 * W_n) + (0.004 * LL)$	0.680	468	Yoon ve Kim 2006
$C_c = (0.006173 * PI) / (1 - 0.0266 * PI)$	0.859	-	Suneel vd. 2008
$C_s = (0.0012 * PI) / (1 - 0.02427 * PI)$	0.870	-	Suneel vd. 2008
$C_c = -0.167 + (0.510 * e_0)$	0.959	500	Kootahi ve Moradi, 2017
$C_c = -0.151 + (0.364 * e_0) + (0.007 * PI)$	0.969	500	Kootahi ve Moradi, 2017

4. BULGULAR

Oluşturulan veri setindeki bütün örnekler plastisite diyagramına göre düşük plastisiteli kil (CL) sınıfına düşmektedir (Şekil 3). Örneklere ait parametrelerin istatistiksel değerleri Çizelge 2'de görülmektedir. MS Excel 2013 yazılımı kullanılarak basit ve çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Basit regresyon analizinde doğrusal, üs, üssel ve logaritmik eğilim çizgileri çizilmiş ve en yüksek korelasyon katsayısına sahip olan eşitlik önerilmiştir. Bulunan sonuçlar Çizelge 3 ve 4'te gösterilmektedir. Basit regresyon analizinde sıkışma ve şişme indisleri için elde edilen eşitliklerde yüksek korelasyon katsayılarına ulaşılmıştır (Şekil 4 ve 5). Ayrıca Surfer 11 programı kullanılarak veri setindeki parametrelerin dağılım haritaları Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Tekniği kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 6-9).

Çizelge 2. Veri setine ait istatistiksel bilgiler.

	Cc	Cs	LL (%)	PL (%)	PI (%)	ρ (g/cm ³)	e ₀ (%)	Pc (kg/cm ²)	Wn (%)
Örnek sayısı	18	18	18	18	18	18	18	18	18
En düşük	0.035	0.002	24.2	13.4	7.0	1.76	0.26	1.32	18.1
En yüksek	0.096	0.014	41.9	22.8	21.4	2.09	0.49	1.83	27.7
Ortalama	0.0599	0.0072	34.82	17.98	17.4	1.92	0.37	1.61	21.5
Standart Sapma	0.0162	0.0034	5.133	2.743	2.207	0.094	0.066	0.138	2.698



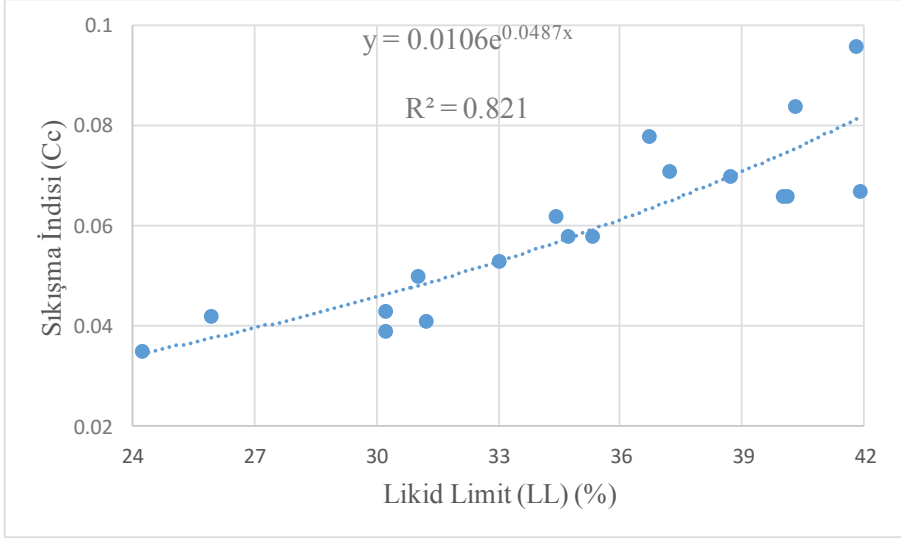
Şekil 3. Örneklerin Plastisite Diyagramı'ndaki dağılımı.

Çizelge 3. Basit regresyon analizi ile türetilmiş eşitlikler.

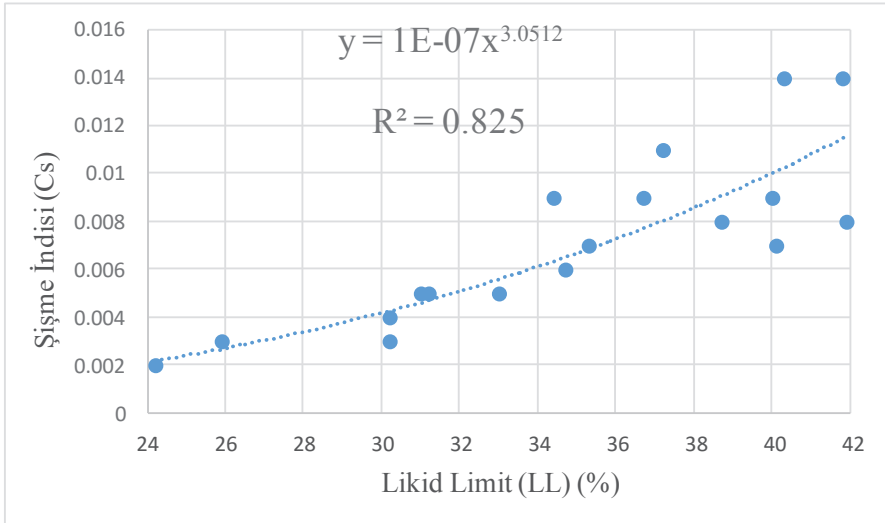
Eşitlik	Korelasyon katsayısı (r)	Örnek Sayısı
$Cc=0.0106*e^{(0.0487*LL)}$	0.906	18
$Cc=(0.0812*\ln(PL))-0.1738$	0.747	18
$Cc=0.0113*e^{(0.0938*PI)}$	0.750	18
$Cc=(0.061*\ln(Wn))-0.1267$	0.456	18
$Cc=0.0836*e^{(-0.976*e_0)}$	0.235	18
$Cc=0.0244*(p^{1.3223})$	0.233	18
$Cs=10^{-7}*LL^{3.0512}$	0.908	18
$Cs=0.0161*\ln(PL)-0.0391$	0.708	18
$Cs=2*10^{-6}*PI^{2.7744}$	0.706	18
$Cs=(0.01*\ln(Wn))-0.0234$	0.357	18
$Cs=0.0109*e^{(1.434*e_0)}$	0.183	18
$Cs=0.0018*p^{1.9225}$	0.179	18
$Pc=(-0.38*\ln(LL))+2.9585$	0.427	18
$Pc=(-0.329*\ln(PL))+2.5597$	0.355	18
$Pc=(-0.0158*PI)+1.8869$	0.252	18
$Pc=1.5759*e^{(0.0009*Wn)}$	0.026	18
$Pc=(0.3857*e_0)+1.4662$	0.186	18
$Pc=(-0.523*\ln(p))+1.9529$	0.184	18

Çizelge 4. Çoklu regresyon analizi ile türetilmiş eşitlikler.

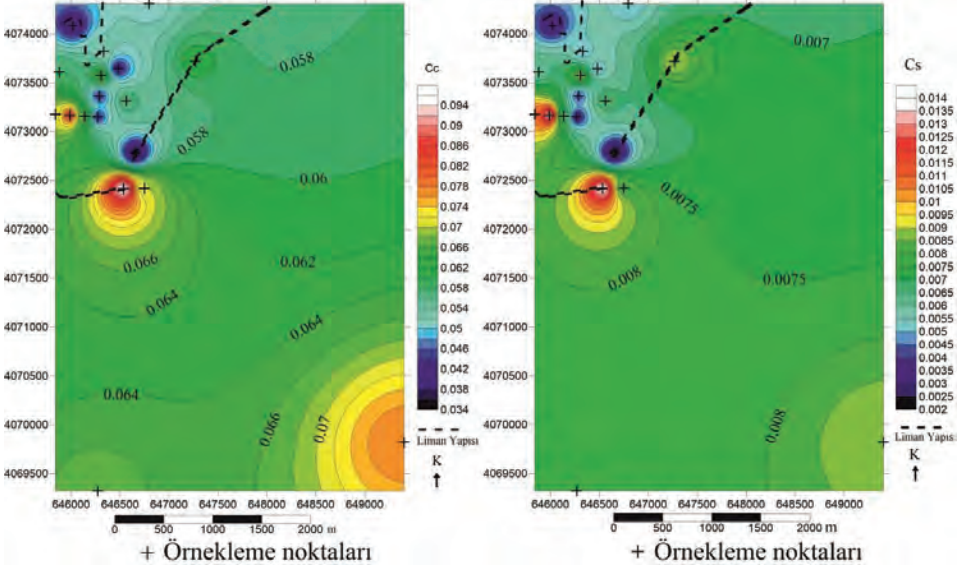
Eşitlik	Korelasyon katsayısı (r)	Örnek Sayısı
$Cc=2.54+(0.003*LL)-(1.056*p)-(1.472*e_0)$	0.914	18
$Cs=0.768+(0.0006*LL)-(0.319*p)-(0.445*e_0)$	0.915	18
$Pc=1.84-(0.017*LL)+(0.018*Wn)-(0.086*e_0)$	0.508	18



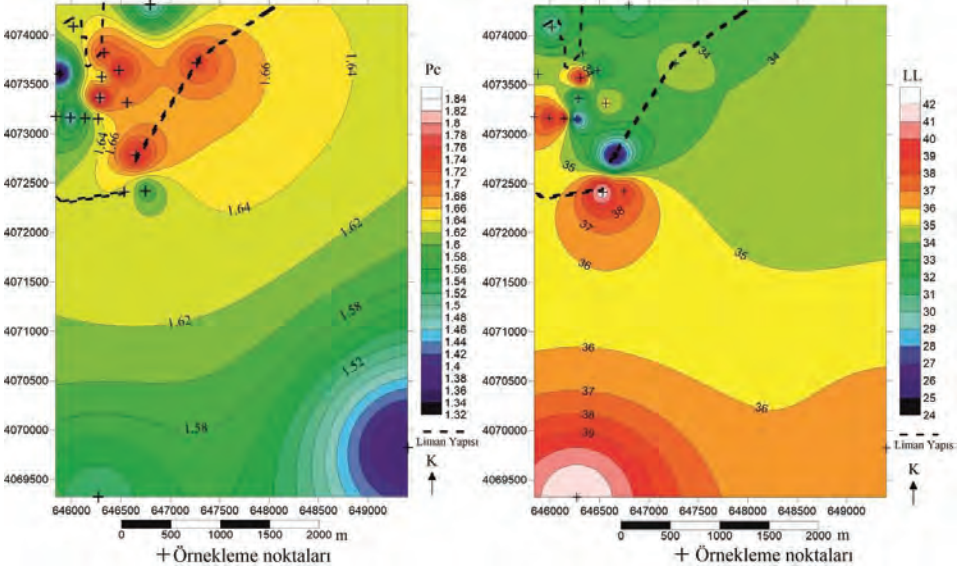
Şekil 4. Sıkışma indisi (Cc) ile Likid Limit (LL) arasındaki basit regresyon analizi.



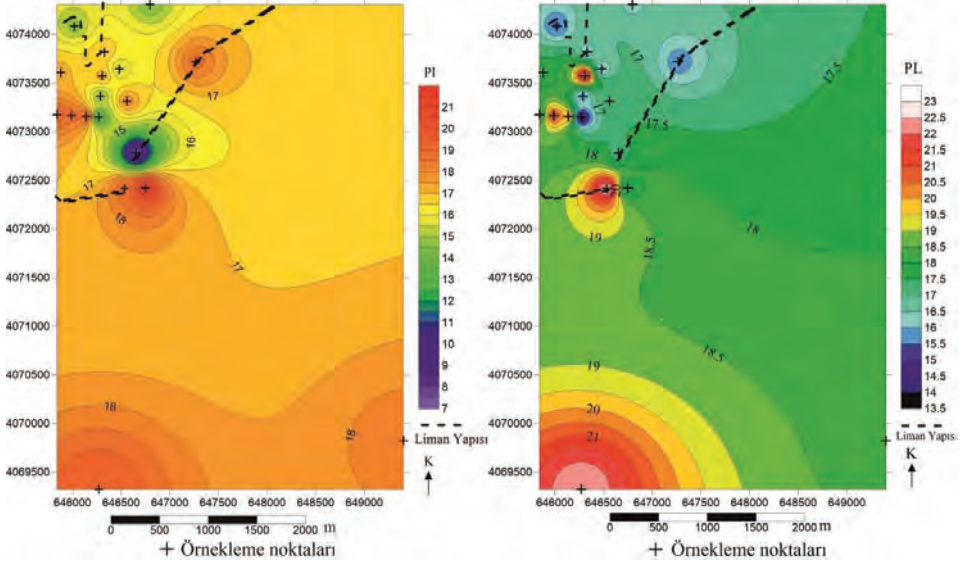
Şekil 5. Şişme indisi (Cs) ile Likid Limit (LL) arasındaki basit regresyon analizi.



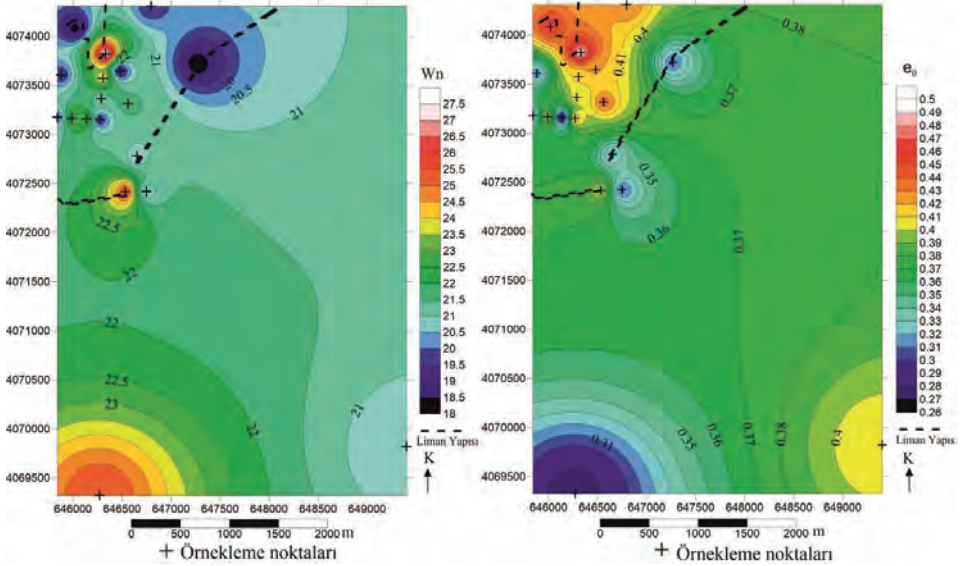
Şekil 6. Cc ve Cs parametrelerinin dağılım haritaları.



Şekil 7. Pc ve LL parametrelerinin dağılım haritaları.



Şekil 8. PI ve PL parametrelerinin dağılım haritaları.



Şekil 9. Wn ve e_0 parametrelerinin dağılım haritaları.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada sınırlı sayıda, birbirine yakın lokasyonlarda ve hepsi CL sınıfına düşen örnekler kullanılmıştır. 18 adet deniz sedimanının laboratuvar deney sonuçları ile oluşturulan veri setine uygulanan basit regresyon analizi sonuçlarına göre sıkışma ve şişme indisi ile likid limit arasında yüksek korelasyon katsayılarına ulaşılmıştır. Ön konsolidasyon basıncı ile hiç bir parametre arasında

anlamli bir korelasyon katsayısına sahip efitlik bulunamamıştır. Çoklu regresyon analizi sonuçlarına göre sıkışma ve şişme indisi parametreleri için önerilen efitliklerde korelasyon katsayısında çok az bir artış görülmektedir. Ön konsolidasyon basıncı için ise anlamli bir efitlik bulunamamıştır.

Örneklerin dar bir alandan alınmış olması ve yüksek korelasyon katsayılı efitlikler önerilmesi, önerilen efitliklerin o bölge için kullanılabileceğini göstermektedir. Kimyasal analiz yapılmamıştır, fakat örneklerin kimyasal analiz sonuçlarının birbirlerine çok yakın olacağı düşünölmektedir.

Oh ve Chai (2006) tarafından yapılan çalışmada su içeriği ile sıkışma indisi arasında yüksek korelasyon katsayısına ulaşılırken bu çalışmada düşük korelasyon katsayılı efitlik bulunmuştur. Suneel ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışma ile bu çalışmanın sonuçları birbirine benzerdir. Kootahi ve Moradi (2017) ilk boşluk oranı ile sıkışma indisi arasında yüksek korelasyon katsayılı bir efitlik önermişlerdir, fakat bu çalışmada düşük plastisiteli killerde boşluk oranı ile sıkışma indisi arasında düşük korelasyona sahip bir ilişki bulunmuştur.

Dağılım haritalarına bakıldığında kıyıdan uzaklaştıkça sıkışma indisi, şişme indisi, likid limit, plastik limit, plastisite indisi ve doğal su içeriği parametrelerinin arttığı; ilk boşluk oranı ve ön konsolidasyon basıncı değerlerinin ise azaldığı gözlenmektedir. Ön konsolidasyon basıncının kıyıdan uzaklaştıkça düşmesinin sebebinin örneklerin alındığı derinlik ve üzerindeki deniz sedimanın yüksekliği olduğu düşünölmektedir.

6. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nce 2015-TP2-1178 proje numarası ile desteklenmiştir.

7. KAYNAKLAR

- Kootahi, K., Moradi, G., 2017. Evaluation of compression index of marine fine-grained soils by the use of index tests. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35 (4), 548-570.
- Oh, E.Y.N., Chai, G.W.K., 2006. Characterization of marine clay for road embankment design in coastal area. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, California, USA, 560-563.
- Suneel, M., Park, L. K., Im, J.C., 2008. Compressibility Characteristics of Korean Marine Clay. *Marine Georesources & Geotechnology*, 26 (2), 111-127.
- Şenol, M., Şahin, Ş., Duman, T.Y., 1998. Adana-Mersin dolayının jeoloji etüd raporu (1/100.000 Ölçekli Mersin O33 Paftası). Maden Tetkik ve Arama Doğu Akdeniz Bölge Müdürlüğü, Adana.
- Tağa, H., Demirkol, C., 1996. Emirler-Çavuşlu (Mersin) yöresinin jeolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 11, 1-6.
- TS 1900-1, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Ankara.
- TS 1900-2, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Ankara.
- Yoon, G. L., Kim, B.T., Jeon, S. S., 2004. Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 1213-1221.
- Yoon, G. L., Kim, B. T., 2006. Regression analysis of compression index for Kwangyang marine clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10 (6), 415-418.

Farklı Kayalarda Ultrasonik Yöntem ile Belirlenen Poisson Oranının Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerle İlişkinin Belirlenmesi

Determination of the Relationship Between Poisson's Ratio and Physical, Mechanical and Chemical Properties of Different Type Rocks

İ. Akkaya¹, A. Özvan^{2,*}, M. Tapan³, M. Bor⁴, E. Erdeve Özvan⁵

¹Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, VAN

²Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, VAN

³Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, VAN

⁴Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, VAN

⁵Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ADANA

(*aozvan@yyu.edu.tr)

ÖZ: Bu çalışmada, ultrasonik hız yöntemi ile belirlenen sıkışma (V_p) ve kayma (V_s) dalga hızları kullanılarak, farklı mineraloji ve dokuya sahip sedimanter, magmatik ve volkanik kayalardan oluşan 25 adet küp örneği üzerinde Poisson oranı hesaplanmıştır. Bu çalışma için seçilen, boşluk oranları, dokusu ve kimyasal bileşimi farklı olan örneklerin ultrasonik hız yöntemi ile hesaplanan Poisson oranlarının 0.18 ile 0.33 arasında değiştiği belirlenmiştir. Boşluk ve yapısı farklı fakat kimyasal bileşimi birbirine yakın olan traverten ve kireçtaşı örneklerinin Poisson oranı değerlerinin genelde 0.25'den büyük olduğu göze çarpmaktadır ki bu değer kalsit minerali için literatürde verilen Poisson oranına yakın sonuçlar vermiştir. Ultrasonik hız yöntemine göre belirlenen Poisson oranının beklenen aksine fiziksel ve mekanik özellikler ile bir ilişkisi belirlenmemiştir. Bu çalışmada en anlamlı ilişki hesaplanan Poisson oranı değerleri ile malzemenin mineral özelliğini belirleyen CaO oranı ile elde edilmiştir. Bu ilişki kaya malzemelerin Poisson oranında element ve mineral bileşiminin doku ve yapı özelliklerinden daha etkili olabileceğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaya malzeme, Poisson oranı, ultrasonik hız, mineral, CaO.

ABSTRACT: In this study, poisson's ratio of 25 cube rock samples composed of sedimentary, magmatic and volcanic rocks with different mineralogical and texture characteristics was calculated using V_p (compressional) and V_s (shear) wave velocities obtained via ultrasonic velocity method. The poisson's ratio of the selected rock samples with different chemical composition, texture and porosity values was calculated to be between 0.18 and 0.33. The poisson's ratio of travertine and limestone rocks that have similar chemical compositions but different structures and porosity characteristics was found to be more than 0.25 which is the specified poisson's ratio of calcite mineral in the literature. The relationship between the calculated Poisson's ratio and physical, mechanical and chemical properties of cube samples were found to be statistically insignificant. The most significant relationship was found to be between Poisson's ratio and CaO content of rock materials. This finding points the fact that, the mineral and element composition of rock materials have more influence on the Poisson's ratio of rock materials than the texture and structure of rocks.

Keywords: Rock material, Poisson ratio, ultrasonic velocity, mineral, CaO.

1. GİRİŞ

Malzeme mekaniğinin önemli parametrelerinden biri olan Poisson oranı ile ilgili olarak bu parametrenin Simeon Denis Poisson (1781-1840) tarafından ortaya çıkarılmasından günümüze kadar birçok araştırma yapılmıştır. Poisson oranı günümüzde çoğu mühendislik alanında malzemenin yapısını belirlemeye yarayan önemli özelliklerden biridir (Poisson, 1829; Todhunter and Pearson, 1886; Timoshenko, 1983). Başlangıç olarak, Hooke yasasını içeren ifadelerde Poisson oranı ile karşılaşılmıştır. Başlangıçta birçok materyal için Poisson oranı değeri, Poisson tarafından 1/4 veya Wertheim (1815-1861) tarafından 1/3 olarak önerilmiştir (Gerçek, 2007). Fakat bugün bilinen bir gerçektir ki, izotropik bir materyal için teorik Poisson değeri -1 ile 0.5 arasında değişmektedir

(Poisson, 1829; Timoshenko, 1983; Love, 1944). Poisson oranının 0.5 değerini geçmediği ve bu değer 0.5'e yaklaştıkça malzemenin suya doygunluk oranının arttığı bilinmektedir. Öte yandan, Poisson oranı -1 değerine yaklaştıkça, malzeme son derece sıkıştırılabilir olurken, kesme gerilmeleri altında şekil değişikliğine karşı direnci aşırı bir şekilde artar. Poisson oranı, çubukların veya plakaların bükülmesinden, elastik cisimlerin temasına, dönen disklerden ve benzeri gerilmelere kadar malzemenin elastik özelliklerini etkilemektedir (Timoshenko, 1970).

Bazı elementlerin, minerallerin ve kayaların Poisson oranı birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Vutukuri, 1974; Hatheway, 1986; Lakes, 1987; Miyoshi, 1998; Bass, 1995; Winter, 2005; MaTeck GmbH, 2005; Gerçek, 2007). Bu çalışma için önemli olan bazı değerler Çizelge 1'de verilmiştir. Kaya mekaniğinde yol, tünel ve baraj gibi ortamlarda yapılan sayısal gerilme analizlerinde sıklıkla kullanılan bir parametredir. Çizelge 1 incelendiğinde görülmektedir ki, Poisson oranı kaya malzemeleri için elementler ve mineraller gibi sabit değerler ile ifade edilmek yerine farklı değer aralıkları ile ifade edilmektedir.

Çizelge 1. Bazı element, malzeme, mineral ve kayaların poisson oranları (Vutukuri, 1974; Hatheway, 1986; Miyoshi, 1998; Bass, 1995; Winter, 2005; MaTeck GmbH, 2005; Gerçek, 2007).

Element / Materyal / Mineral / Kaya	Poisson Oranı	Element / Materyal / Mineral / Kaya	Poisson Oranı
Demir (Fe)	0.27	Anhidrit (CaSO ₄)	0.273
Magnezyum (Mg)	0.29	Jips (CaSO ₄ .2H ₂ O)	0.336
Kalsiyum (Ca)	0.31	Albit (NaAlSi ₃ O ₈)	0.285
Sodyum (Na)	0.34	Dolomit (CaMg(CO ₃) ₂)	0.292
Alüminyum (Al)	0.34	Kalsit (CaCO ₃)	0.309
Silikat (Si)	0.42	Andezit	0.20 – 0.36
Cam (kuvars)	0.167	Bazalt	0.10 – 0.36
Cam (obsidiyen)	0.185	Konglomera	0.10 – 0.40
Beton (28-günlük)	0.10 – 0.21	Granit	0.10 – 0.32
α- Kuvars (SiO ₂)	0.079	Granodiyorit	0.15 – 0.25
Safir (Al ₂ O ₃)	0.234	Kireçtaşı	0.10 – 0.32
Tuz (NaCl)	0.253	Kumtaşı	0.05 – 0.40
Manyetit (Fe ₃ O ₄)	0.262	Tüf	0.10 – 0.27

Kaya mekaniği ile ilgili yapılan mühendislik jeolojisi çalışmalarında hem kayanın malzeme özellikleri hem de kaya kütlelerinin özellikleri Poisson oranının sabit değerlerde kalmasını güçleştirmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle gözeneklilik olasılığı dışında, Poisson oranı ve kaya malzemesinin diğer mekanik veya fiziksel özellikler ile anlamlı bir korelasyon ilişkisine rastlanılmamaktadır (D'Andrea et al., 1965; Lashkaripour and Passaris, 1995). Kaya malzemesinin gözenekliliğinin Poisson oranının değeri üzerinde bir rol oynayacağı tahmin edilse bile, gözeneklerin geometrisinin (boyut ve şekil), dağılımının ve bağlantısının bu ilişkiyi zorlaştırması beklenmektedir (Gerçek, 2007). Bu çalışmanın ana amacı da ultrasonik yöntem ile ölçülen sıkışma (V_p) ve kayma (V_s) dalga hızlarına bağlı olarak hesaplanabilen Poisson oranı ile bu çalışma için seçilmiş olan 25 adet farklı kaya örneğinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri arasında bir ilişkinin olup olmadığını mevcut çalışmalara ek olarak araştırılmasıdır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan 25 farklı kaya örneğinin ilk olarak XRF yöntemi ile kimyasal analizleri yapılarak ince kesit örnekler üzerinden mineralojik özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 2). Daha sonra her bir örneğin fiziksel özellikleri, ultrasonik hız değerleri ve tek eksenli basma dayanımı değerleri kenar uzunluğu 7 cm olarak kesilmiş olan küp şekilli numuneler üzerinden belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışmada kullanılan örneklere ait bir görüntü.

Fiziksel özellikler ISRM (2007) ölçütüne göre yapılmıştır. İlk olarak küp şekilli kaya örneklerinin kuru (KBHA), doymun (DBHA) birim hacim ağırlıkları ile porozite (n) değerleri belirlenmiştir. Örneklerin tek eksenli basma dayanımı değerleri de ISRM (2007) ölçütüne göre belirlenmiştir.

Bir kaya malzemesinin Poisson oranı statik deneylerle (ISRM 2007, ASTM 1998a) ölçülebildiği gibi, elastik dalga hızlarının ölçüldüğü dinamik deneylerle (ISRM 2007, ASTM 1998b) de dolaylı olarak belirlenebilmektedir (Krautkramer, 1977). Pratikte ise Poisson oranı genellikle tek eksenli basma deneyi ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada Poisson oranı (ν) değeri ultrasonik hız yöntemi ile belirlenmiştir. $7 \times 7 \times 7$ cm olarak kesilen küp örnekler üzerinde V_p (Sıkışma dalga hızı) ve V_s (Kayma dalga hızı) değerleri ölçülmüş ve Eş. 1 yardımıyla Poisson oranı hesaplanmıştır. Küp örneklerin her yüzeyinden üçer defa ölçüm alınmıştır. Alınan ölçümlerin ortalamasına göre her örneğe ait V_p ve V_s dalga hızı değerleri belirlenmiştir.

$$\nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2 \cdot (V_p^2 - V_s^2) \quad (1)$$

3. BULGULAR

Seçilen örnekler incelendiğinde, ignimbiritler ve traverten örneklerin boşluk oranlarının yüksek olduğu, bazı kireçtaşı örnekleri ile granitlerin porozitelerinin ise $n < \%1$ olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2). Örneklerin tek eksenli basma dayanımı (UCS) değerlerine bakıldığında, Deere and Miller (1966)'ya göre, ignimbiritler ve killi kireçtaşı örnekleri çok düşük, diğer kaya örneklerinin ise orta ve yüksek sınıfta olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2). Örneklerin V_p hız değerlerine bakıldığında ignimbiritler ve killi kireçtaşında 4000 km/s 'nin altında olduğu, aynı şekilde V_s hız değerlerinin de aynı örneklerde 2000 km/s 'nin altında olduğu belirlenmiştir. V_p ve V_s dalga hızlarından hesaplanan Poisson oranı (ν) değerlerine bakıldığında ise fiziksel ve mekanik değerler ile uyumlu olmadığı görülmektedir. Özellikle kireçtaşı ve traverten örneklerde hesaplanan Poisson oranının diğer örnek gruplarında elde edilen Poisson oranı değerlerinden daha yüksek çıktığı ($\nu > 0.25$) göze çarpmaktadır.

3.1. Bulguların Değerlendirilmesi ve Yorumlanması

Kayaların fiziksel özellikleri, kaya malzemesinin kimyasal bileşimine, mikroyapısına ve dokusuna bağlı olarak değişmektedir. Kaya malzemelerin fiziksel özellikleri ile mekanik özelliklerinin karşılaştırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Genelde kayanın tek eksenli basma dayanımı ve fiziksel özellikleri ile kayaların ultrasonik hız değerleri ve fiziksel özellikleri arasında birçok ilişki geçmiştir

belirlenmiştir. Kayaların mekanik özelliğini yansıtan Poisson oranı ile kaya malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri arasında ise bu tür karşılaştırmalara literatürde daha az rastlanılmaktadır.

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan kayalara ait XRF, fiziksel ve mekanik deneylerin ortalama sonuçları.

Örnek No	Kaya Adı	%					KBHA (kN/m ²)	DBHA (kN/m ²)	n (%)	UCS (MPa)	V _p (km/s)	V _s (km/s)	ν
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO							
1	BAZALT	47.12	18.63	10.25	5.24	11.82	26.27	26.81	3.50	103.38	5198	3096	0.23
2	KALKARENİT	1.77	0.52	0.56	0.86	53.41	26.78	26.83	0.34	74.69	5528	3020	0.29
3	TRAVERTEN	9.06	2.83	3.69	0.55	45.87	24.38	25.45	7.83	71.11	5722	2964	0.32
4	ANDEZİT	71.18	13.34	3.37	0.55	1.51	22.02	22.62	5.33	91.97	4149	2474	0.22
5	GRANİT	60.95	17.43	3.06	1.45	4.67	25.31	25.47	1.11	159.11	4474	2708	0.21
6	KİREÇTAŞI	1.22	0.38	0.14	2.96	51.70	25.69	26.06	2.56	127.41	5330	2856	0.30
8	KİREÇTAŞI	1.02	0.25	0.09	6.61	47.71	26.35	27.06	4.81	134.0	6169	3114	0.33
9	KİREÇTAŞI	0.22	0.07	0.01	0.23	57.14	26.97	26.99	0.14	140.40	6237	3194	0.32
10	GRANİT	69.39	14.05	2.50	1.35	3.62	24.36	24.45	0.79	184.09	5124	3097	0.21
11	KİREÇTAŞI	0.36	0.13	0.86	0.24	55.05	27.08	27.10	0.16	154.98	6152	3243	0.31
12	TRAVERTEN	0.05	0.02	0.06	0.17	55.96	25.78	26.07	2.06	60.97	5540	2919	0.31
13	TRAVERTEN	0.03	0.0	0.79	0.33	55.41	24.47	24.83	2.75	62.54	5238	2800	0.30
14	TRAVERTEN	0.23	0.07	0.07	0.52	54.71	26.05	26.39	2.30	99.01	5473	2863	0.31
15	BAZALT	46.63	17.42	12.95	4.47	9.35	30.14	30.54	2.61	139.46	5303	3083	0.24
16	BAZALT	53.45	1.12	0.63	0.41	13.04	25.78	26.40	4.17	89.70	5178	3024	0.24
17	ANDEZİT	60.08	13.11	4.35	1.28	10.52	22.56	23.13	5.36	91.87	4228	2492	0.23
18	ANDEZİT	64.68	15.38	4.54	1.46	6.09	22.57	23.39	6.45	74.87	3849	2304	0.22
19	TRAVERTEN	0.35	0.13	0.19	0.61	54.58	21.39	21.75	3.24	27.45	4844	2753	0.26
20	KİREÇTAŞI	0.69	0.18	0.09	0.48	55.32	24.70	24.94	1.74	126.19	5663	3059	0.29
21	BAZALT	46.25	18.55	10.13	5.46	12.57	27.90	28.46	3.80	101.14	4986	2850	0.26
22	KONGLOMERA	27.77	0.09	6.63	29.21	16.23	21.48	21.80	2.61	52.64	4158	2368	0.26
23	GRANİT	70.34	14.41	2.72	0.67	2.79	23.43	23.52	0.73	159.63	4715	2885	0.20
24	KİLLİ KİREÇTAŞI	0.44	0.14	0.04	0.31	54.69	19.79	21.71	20.55	10.08	3678	2030	0.28
25	İGNİMBİRİT	66.43	14.19	4.50	0.19	1.66	13.00	16.56	62.74	10.50	2197	1320	0.22
26	İGNİMBİRİT	66.76	14.16	4.71	0.15	1.61	15.26	18.58	32.92	11.65	1885	1181	0.18

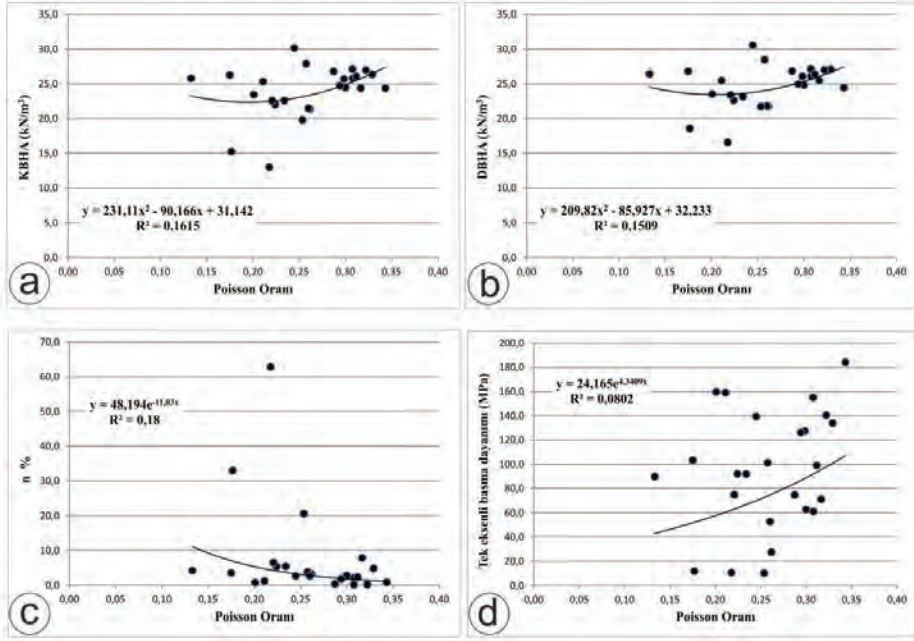
Bu çalışmada küp örnekler üzerinde yapılan testler sonrasında farklı kayaların kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin Poisson oranı ile olan ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar arasındaki korelasyonlar incelenerek küp şekilli kaya örneklerde Poisson oranı ile kayanın KBHA, DBHA, porozite ve UCS değerleri arasındaki ilişkiler irdelenmiştir.

Ultrasonik yöntemle elde edilen V_p ve V_s hızları ile kaya örneklerinin Poisson oranı hesaplandıktan sonra ilk olarak Poisson oranı ile kayaların kuru ve doymuş birim hacim ağırlıkları ilişkilendirilmiştir. Tüm kayalar için hesaplanan Poisson oranı değerinin kayanın kuru ve doymuş birim hacim ağırlıkları ve porozite değerleri ile ilişkili olmadığı belirlenmiştir (Şekil 2a,b,c).

Aynı örnekler için ortalama tek eksenli basma dayanımı (UCS) değerleri ile ortalama Poisson oranları tüm kaya örnekleri için karşılaştırıldığında da bu iki değer arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır (Şekil 2d).

Ultrasonik hız yöntemine göre belirlenen Poisson oranının beklenen aksine fiziksel ve mekanik özellikler ile bir ilişkisi belirlenmemiştir. Poisson oranını belirleyen ana etkenin kayacın iç yapısındaki boşluk ve damar yapısı gibi faktörler olduğu düşünülse de bu gibi yapısal unsurların Poisson oranı ile yüksek ilişkili olmadığı ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada seçilen boşluk oranı, dokusu ve kimyasal bileşimi farklı olan örneklerin ultrasonik hız yöntemi ile hesaplanan Poisson oranlarının 0.18 ile 0.33 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu örnekler incelendiğinde boşluk ve damar yapısı farklı fakat kimyasal bileşimi birbirine yakın olan traverten ve kireçtaşı örneklerinin Poisson oranı değerlerinin genelde 0.25'den büyük olduğu göze çarpmaktadır ki bu değer Çizelge 1'de kalsit minerali için verilen Poisson oranına yakın sonuçlar vermektedir. Bu durum fiziksel ve mekanik özellikleri farklı olan ve kalsit mineralinden oluşan bu kayaların Poisson oranının kimyasal bileşimden mi yoksa mineral sertliğinden mi etkilendiği sorusunu ortaya çıkartmaktadır.

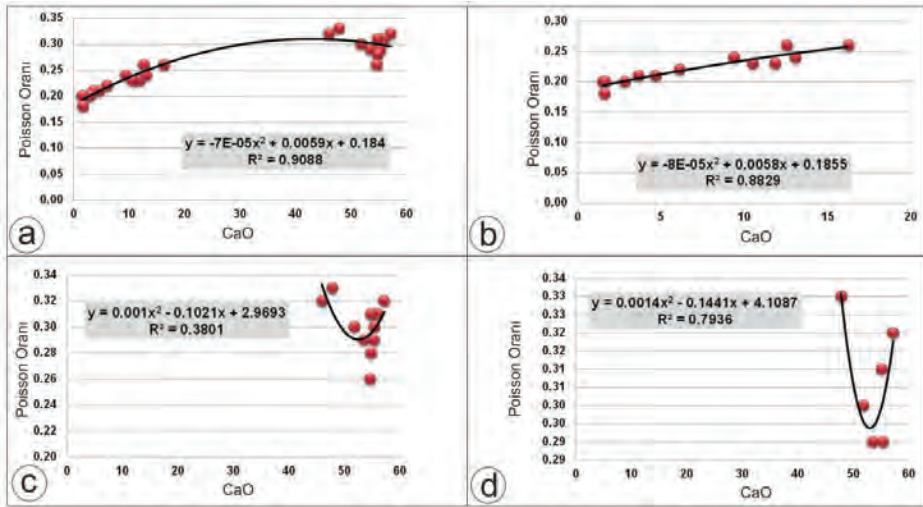


Şekil 2. KBHA(a), DBHA(b), porozite (c) ve tek eksenli basma dayanımı (d) ile Poisson oranı arasındaki ilişkiler.

Örneklerin XRF sonuçlarından elde edilen CaO (%) oranları incelendiğinde Poisson oranı ile kimyasal bileşim arasında bir ilişkinin olabileceği gözlenmiştir. Literatür çalışmalarına bakıldığında CaO, ZnO ve benzeri bileşikler ile gerek Poisson oranının gerekse dalga hızı değerlerinin ilişkili olduğuna yönelik bulgulara ulaşıldığı görülmektedir. Sarpün vd., (2009) tarafından yapılan bir çalışmada seçilen örneklerin CaO (%) oranları ile V_p ve V_s hızları arasında bu çalışmadakine benzer olarak yüksek korelasyona sahip ilişkilerin elde edildiği belirtilmiştir. Srivastava vd., (2012) 45S5 biyoaktif camda NDT yöntemiyle V_p ve V_s değerlerini ölçmüştür. Yapmış olduğu çalışmada CuO, Fe₂O₃, MnO₂ ve ZnO içeriğinin malzemenin yoğunluğu ve elastik modülünü artırırken, Poisson oranını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Gaafar vd. (2009) ve Kannappan vd. (2009) ise genel olarak, camların ultrasonik dalga hızlarındaki (sıkışma ve kayma) ve elastik modülündeki artışın, cam ağının bağlantısındaki artış ile ilgili olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, CuO, Fe₂O₃, MnO₂ ve ZnO içeriğinin artması nedeniyle sıkışma ve kayma ultrasonik dalga hızları ile 45S5 biyoaktif camın Young, shear ve bulk modülünde bir artışın, atomlar arası aralıktaki azalma ile açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Atom çapları ile Poisson oranı arasındaki ilişkiye yönelik en çarpıcı çalışma ise Wang vd. (2014) tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada atom boyut farkı ile fiziksel özellikler arasındaki ilişkinin önemsiz olduğu belirtilirken, metalik cam oluşturan elementlerin atomik boyut farklılığının metalik camların Poisson oranı üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Atomik yarıçapın artması ile Poisson oranının arttığını ortaya koydukları bu çalışmalarında bazı elementlere ait vermiş oldukları atomik yarıçapı değerlerine

bakıldığında en yüksek ilk üç değerin Sr (215), Ca (197) ve Yb (193) olduğu görülmektedir (Wang vd., 2014). Atomik yarıçapı büyük olan elementlerin Poisson oranlarının yüksek olacağı düşünüldüğünde farklı fiziksel yapıdaki traverten ve kireçtaşı Poisson oranını birbirine yakın ve yüksek olmasının nedeninin Ca olduğu düşünülebilir.

Bu çalışmada da fiziksel ve mekanik özellikler arasında anlamlı bir ilişkinin belirlenememesi ve kireçtaşı ile traverten gibi farklı yapısal özellikler sunan kayaların aynı ve yüksek oranda Poisson oranına sahip olmaları, Poisson oranı ile bu çalışmada kullanılan kayaların kimyasal bileşimi arasında bir ilişkinin olabileceğini düşündürmektedir. Çalışmada seçilen kaya örneklerine ait CaO ve Poisson oranı arasındaki ilişkiler sedimanter kökenli ($R^2=0.38$), magmatik kökenli ($R^2=0.88$) ve tüm örnekler ($R^2=0.90$) için ayrı ayrı incelendiğinde anlamlı ilişkilerin olduğu gözlenmiştir (Şekil 3). Fakat, kalsit içeriği yüksek olan sedimanter kökenli kayalar (kireçtaşı ve traverten) tek başlarına incelendiğinde CaO ile Poisson oranı arasındaki ilişkilerin magmatik kayalardaki gibi yüksek oranda olmadığı belirlenmiştir (Şekil 3b). Porozite oranı yüksek olan Travertenler değerlendirme dışında tutulduğunda bu oranın yükseldiği belirlense de bu sonuçların yeterli olmadığı düşünülmektedir (Şekil 3d). Travertenlerdeki boşluk yapısının, düzeninin ve oranının bu sonuçları etkileyen en temel faktör olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kireçtaşlarına bakıldığında bu örneklerin bazılarındaki fosil içeriğinin de bu ilişkiyi etkilediği söylenebilir.



Şekil 3. Tüm örneklerin (a), Magmatik (b), Sedimanter (c) ve sadece kireçtaşı örneklerine (d) ait ortalama CaO (%) ile Poisson oranı arasındaki ilişkiler.

4. SONUÇLAR

Poisson oranı, elastik malzemelerin deformasyonunda önemli rol oynayan mekanik bir parametredir. Poisson oranının literatürde birçok tanımı olmasına rağmen bu konuda özellikle kayalar için veriler hala eksiklik göstermektedir. Bir malzemenin elastik sabitlerinin malzemenin sertliği ile ilişkili olduğu düşünüldüğünde, kaya malzemeyi oluşturan minerallerin sertliğinin Poisson oranında etkili olabileceği düşünülebilir.

Bu çalışmada, ultrasonik yöntemle farklı kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklere sahip kayaların V_p ve V_s hızları belirlenmiştir. Doğrudan elastik sabitlerle ilişkili olan V_p ve V_s hızlarından hesaplanan Poisson oranının seçilen kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerle bir ilişkisi olmadığı belirlenirken, Poisson oranının CaO oranı ile anlamlı bir ilişkisinin olabileceği ortaya çıkarılmıştır. Bu ilişkinin

literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında elementin atom yarıçapı ve bağ yapısıyla da ilişkili olduğu söylenebilir.

Kaya malzemeleri için fiziksel ve mekanik özellikler ile Poisson oranı arasında anlamlı bir ilişkinin bulunmadığı, Poisson oranını ile mineral sertliği ve mineral dağılımları arasında bir ilişkinin ise olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, izotropik bir yapıya sahip olmayan kaya malzemelerin Poisson oranlarının belirlenmesinin güç olduğu ve kayaların elastik parametrelerinin belirlenmesinde kayaların kimyasal bileşimi ve mineral sertliğinin de rolünün olduğu ve analizlerde üzerinde durulması gerektiği bir kez daha ortaya konmuştur. Bu çalışmanın çeşitli amaçlar için önemli olabileceği düşünülmektedir. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar, bu durumu ileri düzeyde incelemek için kullanılabilir.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, 2014-MİM-B182 numaralı proje ile Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, finansal desteği için Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı'na teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

- Wang, A., Wang, S., Xue, R., Liu, G., Zhao, K., 2014. Correlation between Atomic Size Ratio and Poisson's Ratio in Metallic Glasses. *Chin. Phys. Lett.* Vol. 31, No. 6 (2014) 066102.
- Kannappan, A.N., Thirumaran, S. and Palani, R., 2009. "Elastic and Mechanical Properties of Glass Specimen by Ultrasonic Method", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 4(1), pp. 27-31.
- ASTM D3148-02, 2002. Standard test method for elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression. In: *Annual book of ASTM standards*. Vol. 04.08 soil and rock, West Conshohocken PA.
- ASTM. D2845-95, 1998. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. In: *Annual book of ASTM standards*. Vol. 04.08 soil and rock, West Conshohocken PA: ASTM, p. 254-9.
- Bass J. D., 1995. Elasticity of minerals, glasses and melts. In: Ahrens TJ, editor. *Mineral physics and crystallography: a handbook of physical constants*. Washington DC: American Geophysical Union.
- D'Andrea D.V., Fischer R.L., Fogelson D.E., 1965. Prediction of compressive strength from other rock properties. *US Bur Min Rep Invest*, 6702.
- Deere, D.U. and Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. *Air Force Weapons Lab.Tech. Report. AFWL-TR 65-116*. Kirtland Base. New Mexico.
- Gerçek, H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44;1-13.
- Hatheway A. W, Kiersch G. A., 1986. Engineering properties of rocks. In: Carmichael RS, editor. *Handbook of physical properties of rocks*. Vol. 2, Boca Raton FL: CRC Press; p. 289-331.
- ISRM, 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006*. Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson.
- Krautkramer, J. and Krautkramer, H., 1977. *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag, Berlin, 1977.
- Lakes, R.S., 1987. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science* 235, 1038-1040.
- Lashkaripour G.R. and Passaris E.K.S., 1995. Correlations between index parameters and mechanical properties of shales. In: Fujii T., editor. *Proceedings of the 8th international congress on rock mechanics*, vol. 1, Rotterdam: ISRM, AA Balkema; p. 257-61.
- Love A. E. H., 1944. *A treatise on the mathematical theory of elasticity*, 4th edn. New York: Dover Publications.
- Gaafar, M.S., EL-Batal F.H., EL-Gazery and, M., Mansour, S.A., 2009. Effect of Doping by Different Transition Metals on the Acoustical Properties of Alkali Borate Glasses, *Acta Physica Polonica A*, vol. 115, pp. 671-678, 2009.

- MaTeck GmbH., 2005. Materials technology and crystals for research, development and production. 2005; <http://www.mateck.de/>
- Miyoshi, K., 1998. Structures and mechanical properties of natural and synthetic diamonds. NASA/TM-1998-107249, Cleveland OH: Lewis Research Center; (Chapter 8).
- Poisson S. D., 1829. Memoire sur l'équilibre et le mouvement des corps elastiques. Mem. del'Acad. Paris, p. 8.
- Sarpün, H., Özkan, V. and Tuncel, S., 2009. Ultrasonic Determination of Elastic Modulus of Marbles Relation with Porosity and CaO . The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering" September1-3, 2009, Ljubljana, Slovenia, 119-125.
- Timoshenko, S.P., 1970. Theory of elasticity. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Timoshenko, SP., 1983. History of strength of materials. New York: Dover Publications.
- Todhunter, I., and Pearson, K., 1893. A history of the theory of elasticity and of the strength of materials from Galilei to the present time. Vol. II, part II, Cambridge: Cambridge University Press.
- Vutukuri, VS, Lama RD, Saluja SS., 1974. Handbook of mechanical properties of rocks, vol. 1. Clausthal: Trans Tech Publications.
- Winter, M., 2005. Web Elements TM, the periodic table on the www. 2005; <http://www.webelements.com/>

Dinamik Eksenel Yük Uygulanan Kumlu Marn ve Marnlı Kumtaşı Örneklerinin Dayanım ve Deformasyon Özelliklerinin İncelenmesi *Investigation of Strength and Deformation Characteristics of Sandy Marl and Marly Sandstone Samples Under Dynamic Axial Load*

T. Kadakçı Koca*, M.Y. Koca

DEÜ, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390, Tınaztepe, İzmir
*(*tumaykoca@gmail.com)*

ÖZ: Kaya malzemelerinin dinamik tek eksenli tekrarlı yükler altındaki dayanımları ve elastik özelliklerindeki değişimler birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Bu çalışmada, sabit dinamik yükleme koşullarında, kuru ve suya doymun durumdaki kumlu marn ve marnlı kumtaşı karot örneklerinin, tek eksenli sıkışma dayanımları ve elastik özelliklerinin, fiziksel ve kimyasal özelliklerle birlikte değişimi araştırılmıştır. Frekansı 0.3 Hz, genliği ± 10 MPa olan dinamik çevrimler, beş yükleme seviyesinde (20, 22, 24, 26, 28 MPa) uygulanmıştır. Her yükleme kademesinde 50 çevrim olmak üzere, toplamda 250 adet çevrim uygulanmış ve sonrasında örnekler statik yükleme koşullarında yenilmişlerdir. Kimyasal analizlerle karot örnekleri içerisindeki yüzde oksitler belirlenmiş, 360°C ve 1000°C'de kızdırma kayıpları (LOI) saptanmıştır. Porozite, yoğunluk ve yüzde oksit değerleriyle, tek eksenli sıkışma dayanımı, tanjant elastisite modülü ve dinamik elastisite modülü arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Dinamik tekrarlı yüklerle maruz kalan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Dayanımdaki artış miktarı, CaO miktarı arttıkça, Na₂O ve Fe₂O₃ değeri azaldıkça daha belirgin olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tek eksenli sıkışma dayanımı, dinamik yükleme, elastisite modülü, kumlu marn, marnlı kumtaşı

ABSTRACT: *The variations of strength and elastic properties of rock materials under dynamic uniaxial cyclic loading have been studied by many researchers. In this study, the change in uniaxial compressive strength and elastic properties of dry and water saturated sandy marl and marly sandstone core samples under constant dynamic cyclic loading conditions was investigated in conjunction with their physical and chemical properties. Dynamic cycles with frequency of 0.3 Hz, amplitude of ± 10 MPa were applied on five loading levels (20, 22, 24, 26, 28 MPa). 50 cycles for each loading level, totally 250 cycles were applied on the samples and after they failed under static loads. Percentage of oxides, loss on ignition (LOI) values for 360°C and 1000°C were determined within the context of chemical work. Relations between porosity, unit weight, % oxides and uniaxial compressive strength, tangent elasticity modulus, dynamic elasticity modulus were examined. Strength and elasticity modulus of samples subjected to dynamic cyclic loading were determined to be increasing. The amount of strength increment is more significant as the amount of CaO increases and the amount of Na₂O and Fe₂O₃ decreases.*

Keywords: *Uniaxial compressive strength, dynamic loading, elasticity modulus, sandy marl, marly sandstone*

1. GİRİŞ

Kaya kütleleri, patlatma, deprem veya kaya patlamasına bağlı olarak oluşan titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle, dinamik yüklerin, kayacın elastik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması mühendislik tasarımları açısından önemlidir. Kaya malzemesinin dinamik tek eksenli yükleme koşullarındaki davranışı ve dayanımı statik koşullardakinden farklıdır.

Bu çalışmada kullanılan örnekler, Akhisar'ın 22 km GD'sunda yer alan, planlama aşamasındaki Çağlayan Barajı rezervuar alanında yüzlek veren Neojen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı tortul kayalardan alınmıştır. Marnlı kumtaşı örnekleri, kuvars, biyotit, feldispat mineralleri, karbonat ve metamorfik kaya kırıntıları içerir. Tane küreselleşmesi kötü, boylanması orta ve kalsit çimentoludur. Kumlu marn

örnekleri ise, kuvars, kalsit, mika, feldispat mineralleri ve çok az miktarda kuvars kumu içermektedir. Kumlu marn örnekleri, disklenme ve suda dağılma özelliğine sahiptir. Bu örnekler üzerinde deformasyon kontrollü statik ve dinamik tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Burdine (1963), dinamik koşullardaki dayanımın tane boyundan etkilendiğini ortaya koymuştur. Daha sonraki çalışmalarda, farklı türdeki kayaların dinamik koşullardaki dayanımını başlıca, mineralojisi, porozitesi, birim hacim ağırlığı ve iç yapısının (mikrofisür, doku) kontrol ettiği belirtilmiştir (Bagde ve Petros, 2009; Demirdağ vd., 2010; Mohd Salim ve Mohamed, 2012; Mohd Salim vd., 2013). Bunun yanı sıra, dinamik yükleme koşullarının (genlik, frekans, yükleme hızı, yükleme seviyesi, çevrim sayısı) da kayanın dayanımı ve elastik özelliklerindeki etkileri araştırılmıştır. Genlik, çevrim sayısı ve yükleme seviyesi arttıkça; yükleme hızı ve frekans azaldıkça tek eksenli sıkışma dayanımının azaldığı ortaya konulmuştur (Burdine, 1963; Haimson ve Kim, 1972; Attewell ve Farmer, 1973; Singh, 1989; Ishizuka vd., 1990; Zhenyu ve Haihong, 1990; Ray vd., 1999; Lajtai vd., 2001; Zhao vd., 1999; Li vd., 2001; Li vd., 2003; Bagde ve Petros, 2005a, 2005b, 2005c; Bagde ve Petros, 2009; Fuenkajorn ve Phueakphum, 2009; Bagde ve Petros, 2011; Mohd Salim ve Mohamed, 2012; Mohd Salim vd., 2013; Zou vd., 2016). Bu çalışmalara göre, dinamik tek eksenli sıkışma dayanımı, yükleme koşullarına bağlı olarak, statik dayanımın %35'i ile %87'si arasında değerler almaktadır. Buna karşın; Singh (1989), grovak örnekleri üzerinde yaptığı çalışmalarda %29'a varan deformasyon sertleşmesi gözlemlemiştir. Demirdağ vd. (2010) ve Zou vd. (2016) ise, karbonatlı örneklerde ve jipslerde, yüksek deformasyon hızı kullanılarak yapılan deneyler sonucunda dinamik tek eksenli sıkışma dayanımının arttığını bulgulamıştır.

Bu çalışmada, dinamik yükleme koşulları sabit tutularak, farklı fiziksel özelliklere ve kimyasal bileşime sahip kumlu marn ve marnlı kumtaşı karot örneklerinin statik ve dinamik koşullardaki dayanım ve elastik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, dinamik koşullardaki tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modüllerinin, porozite, birim hacim ağırlık ve kimyasal içerikleriyle ilişkileri incelenmiştir.

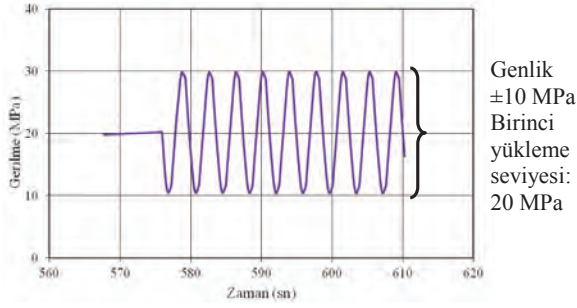
2. YÖNTEM

Yükleme ve/veya boşaltmaya tepki olarak kayalar deformasyona uğrarlar. Kayaların deformasyon özellikleri laboratuvarında statik ve dinamik deneylerden elde edilir. Statik ve dinamik koşullarda, deformasyon kontrollü tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri, ASTM (2000)'ye göre boy/çap (L/D) oranı iki olan örnekler üzerinde, Tira Test 28500 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın uyguladığı maksimum yük 500 kN, yükleme hızı ise 200 mm/dk'dır (Şekil 1).



Şekil 1. Tira test 28500 tek eksenli sıkışma deneyi cihazı.

Bu çalışmada, kumlu marn ve marnlı kumtaşı örnekleri kullanılarak, kuru koşullarda iki adet statik (T-4, T-12), dört adet dinamik (T-13, T-17, T3, T-18) ve suya doygun koşullarda iki adet dinamik deney (T-2, T-16) yapılmıştır. Statik deformasyon hızı 0.05 mm/dk, dinamik yükleme hızı ise 0.20 mm/sn olarak uygulanmıştır. Dinamik yükleme, frekansı 0.3 Hz ve genliği ± 10 MPa olan sinüs dalgası biçimli tekrarlı sıkıştırma şeklinde uygulanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. T-13 örneğinin dinamik çevrimlerinin birinci yüklenme seviyesine ait gerilme-zaman grafiği.

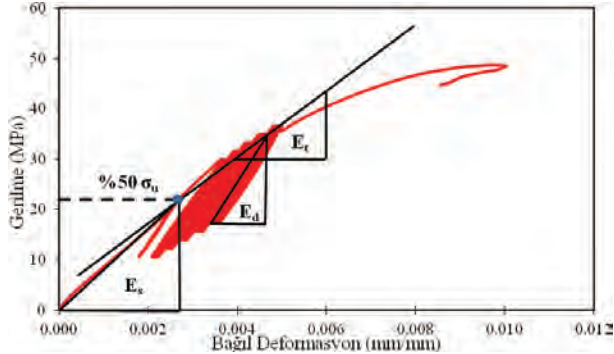
Bu dalgalar, beş yüklenme seviyesinde (20, 22, 24, 26, 28 MPa), her yüklenme seviyesinde ise 50 çevrim olmak üzere toplamda 250 adet çevrim eksenel yük üzerine etmiştir. 250 adet çevrim sonunda yenilmeyen örnekler statik koşullarda yüklenmeye devam etmiştir.

Tüm kayaç kimyasal analizleri, Avanta Σ model Atomik Absorbsiyon Spektrometre (AAS) cihazında gerçekleştirilmiştir.

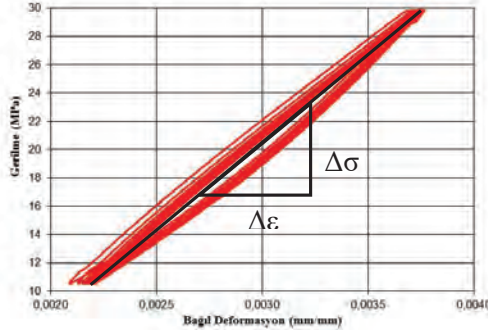
Dinamik tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülleriyle, fiziksel ve kimyasal özellikler arasındaki ilişkinin incelenmesi için korelasyon analizleri SPSS v.16 kullanılarak yapılmıştır. Korelasyon katsayısı, iki değişken arasındaki ilişkinin kuvveti hakkında bilgi vermektedir. Az sayıda örneklemin bulunduğu korelasyon analizlerinde, parametrik olmayan korelasyon analizi (Spearman) kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, aralarındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı araştırılmıştır. Değişkenlerin arasındaki ilişkinin kuvvetli sayılabilmesi için korelasyon katsayısının (r) en az 0,71 olması gerekmektedir.

2.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi

Statik ve dinamik koşullarda gerçekleştirilen tek eksenli sıkışma deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri çıkartılmıştır. Bu eğrilerden, ASTM (2000)'ye göre Poisson oranı ve tanjant, sekant elastisite modülleri, kırılma gerilmesinin %50 seviyesi kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3). Dinamik tekrarlı yükler uygulanırken değişen elastisite modülü değerleri de aynı yöntemle her bir yüklenme seviyesi için ölçülmüştür (Şekil 4). Dinamik elastisite modülünün, farklı yüklenme seviyelerinde anlamlı değişim göstermediği gözlenmiştir. Bu nedenle tek bir dinamik elastisite modülü değeriyle temsil edilmiştir.

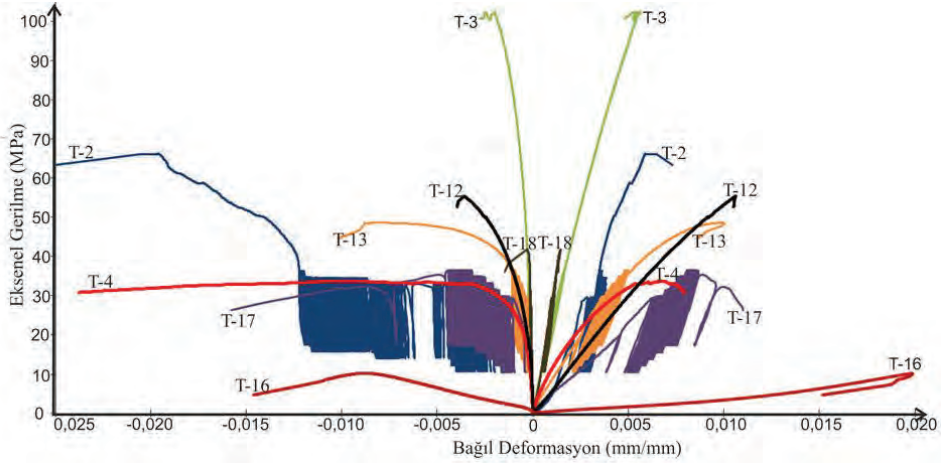


Şekil 3. T-13 örneğine ait gerilme-deformasyon grafiğinde tanjant, sekant ve dinamik elastisite modüllerinin bulunması.



Şekil 4. T-13 örneğine uygulanan bir yükleme kademesine ait dinamik çevrimlerin gerilme-deformasyon grafiği ve dinamik elastisite modülünün bulunması.

Toplam sekiz adet karot örneğine ait gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 5'te verilmiştir. Kumlu marn ve marnlı kumtaşı örneklerinde, dinamik elastisite modüllerinde artış olduğu gözlenmiştir.



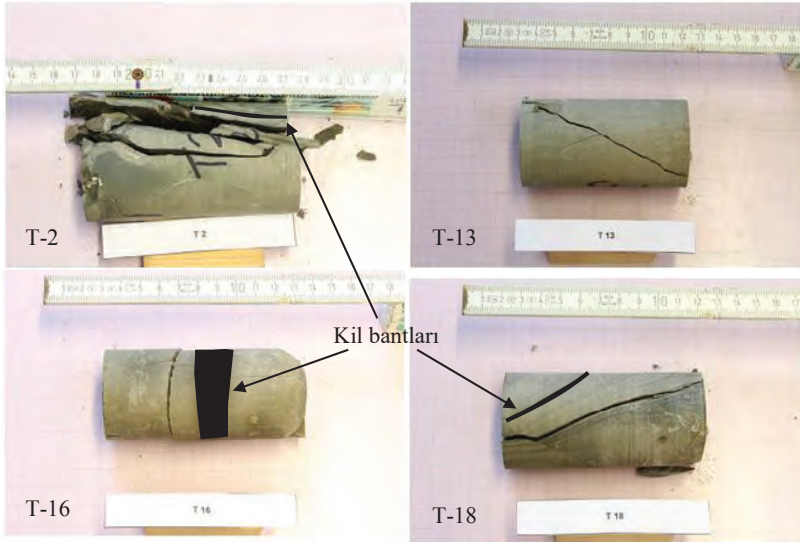
Şekil 5. Marnlı kumtaşı ve kumlu marn örneklerinin statik ve dinamik koşullarda elde edilen gerilme-deformasyon grafikleri.

Eberhardt (1998), sekant elastisite modülünün, ilk yükleme sırasındaki doğrusal olmayan eksenel deformasyonu ve bunu takip eden mikro çatlakların kapanmasını içerdiğini, numunedeki çatlak yoğunluğunun bir göstergesi olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Tanjant ve sekant elastisite modülleri arasındaki farkın fazla olması, ilksel çatlak yoğunluğunun da fazla olduğunu göstermektedir. Kuru koşullarda gerçekleştirilen dört adet dinamik deneyin (T-13, T-17, T-3, T-18) sonuçlarına göre, T-13 ve T-17 örneklerinde, beklenenin aksine sekant elastisite modülü tanjant elastisite modülünden büyüktür. Bir başka anlatımla, ilksel mikro çatlak kapanması gerçekleşmemiştir. T-3 ve T-18 örneklerinde ise, tanjant elastisite modülü, sekant elastisite modülünden büyüktür ve aralarındaki farkın fazla olduğu örnekte (T-18) ilksel çatlak yoğunluğunun fazla olduğu söylenebilir. Buna karşılık, tek eksenli sıkışma dayanımının da düşük olduğu görülmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Marnlı kumtaşı ve kumlu marn örneklerinin statik ve dinamik koşullarda incelenen fiziksel, mekanik ve elastik özellikleri.

Örnek		Tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_u) (MPa)	Tanjant elastisite modülü (E_t) (MPa)	Sekant elastisite modülü (E_s) (MPa)	Dinamik elastisite modülü (E_d) (MPa)	Poisson oranı (ν)	Görünür Porozite (n) (%)	Birim hacim ağırlık (γ) (kN/m ³)
Marnlı kumtaşı	T-4	33,7	6710,55	9504,14	-	0,28	12,20	23,41
	T-13	48,6	8000,00	8553,25	12685,71	0,41	17,20	22,10
	T-17	36,56	4345,67	4444,44	16000,00	0,36	9,60	22,86
	T-16	10,28	591,48	369,00	-	0,44	16,07	22,44
Kumlu marn	T-12	55,44	5711,34	6059,90	-	0,34	17,60	20,92
	T-3	102,81	20000,00	19915,00	26281,00	0,35	3,10	21,65
	T-18	41,84	30066,11	28206,84	36787,29	0,30	1,38	25,05
	T-2	66,27	10645,00	10000,00	26838,71	0,50	5,13	24,10

Suya doymun T-16 örneği dinamik yüklemeler gerçekleştirilemeden 10,28 MPa gerilme altında yenilmiştir. Suya doymun T-2 örneği ise, dinamik yük altında 250 çevrim tamamlanmadan 66,27 MPa gerilme altında yenilmiştir. Buna ek olarak, sünümlü bir davranış gösterdiği, Poisson oranının ise 0,5 değerine ulaştığı görülmektedir. T-17 örneği, 250 adet çevrim tamamlanmadan yenilmiştir. T-3 örneği ise, diğer örneklerden farklı olarak yüksek dayanım değerleri vermiştir. Numunelerde kil bantlarının varlığı, özellikle kumlu marn örneklerinde dayanım değerlerini ve yenilme şeklini etkilemektedir (Şekil 6).



Şekil 6. T-2, T-13, T16 ve T18 örneklerinin yenilme düzlemleri.

2.2. Kimyasal Analizler

Kimyasal analizler kapsamında, toplam oksit miktarı ve kızdırma kayıpları (LOI) belirlenmiştir (Çizelge 2). Salehi vd. (2011), belli miktarda kil içeriğine sahip karot örneklerinde, organik madde içeriğinin araştırılması için kızdırma kayıplarının 360 °C'de ölçülmesini önermişlerdir. Buna göre elde edilen LOI değerleri %5'ten düşük olduğu için, organik madde içeriğinin dayanım üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. 1000 °C sıcaklıkta tekrarlanan kızdırma kaybı

deneyi sonuçları ise, örnek içerisindeki organik ve inorganik karbonu temsil etmektedir. Numunelerin bünyesindeki oksit miktarları Çizelge 2’de verilmiştir. Buna göre; numunelerdeki SiO₂ miktarı %27-%57; CaO miktarı %7-%20 arasında değişmektedir. Karbonatlı kayalarda, CaO miktarı azaldığında, SiO₂ miktarının göreceli arttığı; bunun sağlanmadığı durumlarda ise; Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂ miktarının artmasıyla, kumlu marn örneklerinde disklenme ve suda dağılma özelliğinin arttığı düşünülmektedir. Buna benzer bir sonuç, Beyhan (2008) tarafından Soma ve Tunçbilek’ten alınan marn örnekler için elde edilmiştir. Beyhan (2008), suda dağılabilirliği yüksek ve disklenme özelliği gösteren örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarının düştüğünü ve kayaçtaki kil ve karbonat oranlarının dayanımı kontrol ettiğini belirtmiştir.

Çizelge 2. Tüm kayaç kimyasal analiz sonuçları.

Örnek	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	K ₂ O	LOI
T4	50,443	6,370	13,417	2,250	11,911	2,087	0,001	0,334	1,892	11,31
T13	47,032	7,110	9,442	5,684	12,401	0,658	0,003	0,210	2,230	15,27
T17	52,004	6,112	11,586	3,534	10,943	1,918	0,061	0,211	1,409	12,31
T16	57,070	6,118	12,333	3,178	4,152	0,838	0,007	0,187	3,793	12,32
T12	47,615	9,948	12,581	4,219	7,575	0,981	0,002	0,168	3,868	13,02
T3	30,803	1,103	2,367	7,506	20,368	0,252	0,001	0,060	0,127	37,50
T18	31,022	3,375	10,279	7,522	14,769	1,175	0,070	0,193	0,631	30,83
T2	27,625	15,332	8,327	4,535	19,507	1,785	0,028	0,130	0,821	21,70

2.3. İstatistiksel Analizler

Bu çalışmada, veri sayısının az olması nedeniyle parametrik olmayan korelasyon analizleri (Spearman) yapılmıştır.

Dinamik yüklere maruz bırakılan dört adet örneğin tek eksenli sıkışma dayanımıyla (σ_u), fiziksel ve kimyasal özellikleri arasındaki Spearman korelasyonu sonucunda, Fe₂O₃ ve Na₂O arasında negatif doğrusal, %99 güven düzeyinde anlamlı ilişki belirlenmiştir (r:1). Tek eksenli sıkışma dayanımı ile porozite (n), birim hacim ağırlık (γ), SiO₂ ve CaO arasında 0,7’den büyük korelasyon katsayısı bulunmuş, ancak istatistiksel olarak anlamlı doğrusal bir ilişki tespit edilememiştir (Çizelge 3). Buna rağmen, SiO₂ miktarıyla dayanım ve elastisite modülü değerleri arasındaki ters orantı dikkat çekmektedir. Kimyasal analizler ile elde edilen SiO₂ miktarı, sadece serbest kuvars mineralini temsil etmediğinden, dayanım ve deformasyon özelliklerini tahmin etmek için geçerli bir ölçüt olmamaktadır. Karot örneklerinin yenilme düzlemlerine bakıldığında, tek eksenli sıkışma dayanımının kil bantlarının kalınlığı ile ilişkili olduğu görülmektedir.

Dinamik elastisite modülünün (E_d), gerilme-deformasyon eğrisinin tamamını temsil eden tanjant elastisite modülünden (E_t) büyük olduğu belirlenmiştir. Aralarındaki yüzde fark, kayaçtaki MgO miktarı arttıkça azaldığı görülmektedir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Jeokimyasal analiz sonuçları, fiziksel özellikler ve kuru koşulda yapılan dinamik yüklemeye elde edilen dayanım ve deformasyon özelliklerinin korelasyonları.

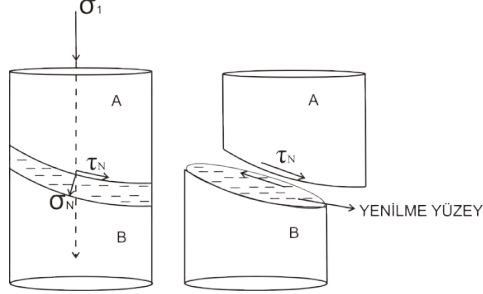
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	LOI	n (%)	γ (kN/m ³)
σ_u (Mpa)	-0,80	-0,40	-1,00*	0,40	0,80	-1,00*	-0,80	-0,40	0,80	0,00	0,00
E_t (Mpa)	-0,80	-0,60	-0,40	1,00*	0,80	-0,40	-0,80	-0,60	0,80	-0,80	0,80
$E_d - E_t$ (%)	0,80	0,60	0,40	-1,00*	-0,80	0,40	0,80	0,80	-0,80	0,80	-0,80
ν	0,60	0,80	0,00	-0,80	-0,60	0,00	0,60	0,80	-0,60	1,00*	1,00*

*Korelasyon, %99 güven aralığında anlamlıdır (p<0.01).

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Statik koşullarda düşük-orta dayanıma sahip kumlu marn ve marnlı kumtaşı örneklerinin, kuru koşullarda, dinamik tek eksenli tekrarlı yükler altında deformasyon sertleşmesi gösterdikleri belirlenmiştir. Dinamik koşullarda, elastisite modülü değerlerindeki artış oranı, tek eksenli sıkışma

dayanımı değerlerindeki artıştan yaklaşık 2,5 kat daha fazladır. Dayanım ve elastisite modülü değerlerindeki artış, kimyasal içerik, porozite ve birim hacim ağırlık dikkate alınarak korelasyon analizleriyle incelenmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı ile porozite (n), birim hacim ağırlık (γ), SiO_2 ve CaO arasında 0,7'den büyük korelasyon katsayısı bulunmuş, ancak istatistiksel olarak anlamlı doğrusal bir ilişki tespit edilememiştir. Buna karşın; porozite, birim hacim ağırlık, kimyasal içerik ve iç yapı (mikro çatlaklar, kil bantlarının dağılımı), kayacın dinamik tek eksenli sıkışma dayanımını ve dinamik elastisite modülünü birlikte etkilemektedir. Ayrıca, kil bantlarının, numunelerin yenilme şekli ve dayanımını doğrudan etkilediği belirlenmiştir (Şekil 7). Yataya yakın konumda, göreceli kalın kil bantlarına sahip karot örneklerinde yenilme (kırılma) daha kolay gerçekleşmektedir.



Şekil 7. Kil bantlarının yenilme üzerindeki etkisinin şematik gösterimi

Kuru örneklerin dinamik aksel tekrarlı yükler altındaki dayanım ve elastik özellikleriyle, SiO_2 miktarı arasında istatistiksel olarak anlamlı olmayan negatif bir ilişki bulunmuştur. Mohd Salim vd. (2013), ayrılmış kayaların dinamik koşullardaki tek eksenli sıkışma dayanımının taze kayalara göre daha yüksek olduğunu saptamıştır. Bu durumu, kil ve feldispat minerallerinin, kuvars mineraline göre daha fazla enerji soğurma özelliğine bağlamıştır. Buradan yola çıkarak, kumlu marn ve marnlı kumtaşı örnekleri için, dinamik koşullarda, kimyasal analizden elde edilen SiO_2 miktarı arttıkça dayanım ve elastisite modülü değerlerinin azaldığı söylenebilir. T-3 örneğinin, diğer örneklerden farklı olarak yüksek dayanım değerleri vermesinin nedeni, bağıl olarak yüksek CaO içeriğine, düşük poroziteye sahip olması ve diğer örneklerle oranla daha ince kil bantları içermesidir. Bunun yanı sıra, CaO miktarı arttıkça, yükleme seviyeleri ve çevrim sayısının etkisi azaldığından T-3 ve T-2 deneylerinde yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Dinamik elastisite modülü ve tanjant elastisite modülü değerleri arasındaki fark, kimyasal analizlerden elde edilen MgO miktarı azaldıkça artmaktadır. Dinamik yüklere maruz kalan örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımları ise, CaO miktarı arttıkça artmakta, Na_2O ve Fe_2O_3 değerleri azaldıkça da artmaktadır.

Suya doymuş koşulda, dinamik yüklere maruz kalan T-2 örneğinde, Poisson oranı 0,5'e ulaşmıştır. Suya doymuş kumlu marn örneğinin dinamik yükleme koşullarında sünümlü davranış göstermesi, yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olması, içerisindeki kil minerallerinin dinamik enerjiyi soğurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Örnek sayısının artırılmasıyla istatistiksel analizlerin daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

4. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi tarafından, 2012.KB.FEN.044 proje numarasıyla desteklenmiştir. Statik ve dinamik tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri, Almanya TU Bergakademie Freiberg Institut für Geotechnik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- ASTM (American Society for Testing and Materials), 2000. Annual Book of ASTM Standards, 04.08, Philadelphia, PA, USA.
Attewell, P.B., Farmer, I.W., 1973. Fatigue behaviour of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 10, 1-9.

- Bagde, M.N., Petros, V., 2005a. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42 (2), 237–250.
- Bagde, M.N., Petros, V., 2005b. Waveform Effect on Fatigue Properties of Intact Sandstone in Uniaxial Cyclical Loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38 (3), 169–196.
- Bagde, M. N., Petros, V., 2005c. The effect of machine behaviour and mechanical properties of intact sandstone under static and dynamic uniaxial cyclic loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(1), 59–67.
- Bagde, M.N., Petros, V., 2009. Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 200-209.
- Bagde, M.N., Petros, V., 2011. The Effect of Micro-Structure on Fatigue Behaviour of Intact Sandstone. *International Journal of Geosciences*, 2, 240-247.
- Beyhan, S., 2008. G.L.İ. ve E.L.İ. Marn Kaya Malzemelerinin Üç Eksenli Basınç Dayanımına Bağlı Özelliklerinin Belirlenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Burdine, N.T., 1963. Rock failure under dynamic loading conditions. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3, 1–8.
- Demirdağ, S., Tüfekçi, K., Kayacan, R., Yavuz, H., Altındağ, R., 2010. Dynamic mechanical behavior of some carbonate rocks. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47, 307–312.
- Eberhardt, E., 1998. Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression. College of Studies and Research, Department of Geological Sciences, Univ. of Saskatchewan, Saskatoon.
- Fuenkajorn, K., Phueakphum, D., 2009. Effect of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Suranaree Journal of Sciences and Technology*, 16 (2), 91-102.
- Haimson, B.C., Kim, C.M., 1972. Mechanical behaviour of rock under cyclic fatigue. Cording, E.J. (Ed.), *Stability of rock slopes: Proceedings of 13. Symposium on Rock Mechanics*. New York: ASCE, 845–63.
- Huang, B., Liu, J., 2013. The effect of loading rate on the behavior of samples composed of coal and rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 23–30.
- Ishizuka, Y., Abe, T., Kodama, J., 1990. Fatigue behaviour of granite under cyclic loading. ISRM International Symposium, Mbabane, Swaziland, 139–146.
- Lajtai, E.Z., Scott Duncan, E.J., Carter, B.J., 1991. The effect of strain rate on rock strength. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24, 99–109.
- Li, N., Chen, W., Zhang, P., Swoboda, G., 2001. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 1071–1079.
- Li, N., Zhang, P., Chen, Y., Swoboda, G., 2003. Fatigue properties of cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 145–150.
- Mohd Salim, N.A.M., Mohamed, Z., 2012. Cyclic Loading Effect on the Uniaxial Compressive Strength of Weathered Rock. 6. *International Symposium on Advances in Science and Technology*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Mohd Salim, N.A.M., Mohamed, Z., Berhan, M.N., 2013. Behaviour of weathered granite under cyclic loading. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 2 (2), 7-22.
- Ray, S.K., Sarkar, M., Singh, T.N., 1999. Effect of loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (4), 543-549.
- Salehi, M.H., Hasssemi Beni, O., Beigi Harchegani, H., Esfandiarpour Borujeni, I., Motaghian, H.R., 2011. Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere*, 21(4), 473-482.
- Singh, S.K., 1989. Fatigue and strain hardening behaviour of graywacke from the flagstaff formation, New South Wales. *Engineering Geology*, 26, 171– 179.
- SPSS Inc. Released 2007. SPSS for Windows, Version 16.0. Chicago, SPSS Inc.
- Zhang, Q., Zhao, J., 2014. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1411-1478.
- Zhao, J., Li, H.B., Wu, M.B., Li, T.J., 1999. Dynamic uniaxial compression tests on a granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (2), 273–277.
- Zhenyu, T., Haihong, M., 1990. An experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 27(1), 51–56.
- Zou, C., Wong, L.N.Y., Lo, J.J., Gan, B.S., 2016. Different mechanical and cracking behaviors of single-flawed brittle gypsum specimens under dynamic and quasi-static loadings. *Engineering Geology*, 201, 71-84.

Bazik Volkanik Kayaçlardan Türeme Regolitik Zeminlerin (Trabzon) Jeoteknik Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of the Geotechnical Properties of the Regolithic Soils (Trabzon) Originated from
the Basic Volcanic Rocks

B. Kul Yahşi^{1*}, H. Ersoy¹, M. Karahan¹, M.O. Sünneci¹

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
(bilgehankul@ktu.edu.tr)

ÖZ: Jeoteknik projelerin birçoğunda, yerinde oluşmuş regolitik zeminlerin homojen olduğu kabul edilmekte ve ayrışma derecesinin derinlikle değişimi ihmal edilmektedir. Bu çalışmada, Trabzon ilinde yüzeylenen regolitik zeminlerin fiziksel, mineralojik ve mekanik özellikleri araştırılmış, ayrışma derecesinin ve derinliğinin bir fonksiyonu olarak zemin profilindeki değişimler incelenmiştir. Yapılan incelemede zemin profilindeki 3 farklı zon (A, B ve C zonları) net olarak görülmektedir. Sırasıyla bu zonların yaklaşık 1 m, 4.5 m ve 2 m kalınlığında olduğu tespit edilmiştir. Yerinde oluşmuş zeminlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri derinliğin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu değişimin malzemenin kayma direnci parametreleri üzerinde bir etkisinin olup olmadığının belirlenmesi amacıyla c ve ϕ değerlerinin derinlikle değişimi incelenmiş, c değerlerinin 17.4-73.0 kPa ve ϕ değerlerinin 9-49° arasında değiştiği saptanmıştır. Elde edilen veriler neticesinde kil yüzdesinin artmasıyla kohezyon değerinin de arttığı anlaşılmıştır. Birçok mühendislik projesinde girdi parametresi olarak kullanılan kayma direnci parametrelerinin dane dağılımı ve kimyasal bileşimdeki değişimlerle ilişkili olarak derinliğin bir fonksiyonu olarak değiştiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Regolit, derinlik, kayma direnci, Trabzon.

ABSTRACT: In most of the geotechnical projects, it is assumed that the regolithic soils are homogeneous and the change in the degree of weathering with depth is neglected. In this study, the physical, mineralogical and mechanical properties of the regolithic soils in the province of Trabzon (Turkey), and the changes in the soil profile as a function of the depth and degree of decomposition were investigated. In the investigation, 3 different zones (A, B and C zones) in the soil profile are clearly visible. It has been determined that these zones are approximately 1 m, 4.5 m and 2 m thick respectively. The physical and chemical properties of residual soil vary as a function of depth. In order to determine whether this change has an effect on the shear strength parameters of the material, a change of c and ϕ values with depth was investigated, and c values were changed between 17.4-73.0 kPa and ϕ values were changed between 9-49°. As a result of the obtained data, it was understood that the cohesion value increased with increasing clay percentage. Shear strength parameters, which are used as input parameters in many engineering projects, appear to change as a function of depth in relation to grain distribution and changes in chemical composition.

Keywords: Regolith, depth, shear resistance, Trabzon.

1. GİRİŞ

Yer yüzeyindeki veya yer yüzeyinin yakın kısımlarındaki kayaçlar su, hava ve sıcaklık değişimlerinden sürekli olarak etkilenmektedir. Yer değişme olmaksızın kayaçların fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştiren bu yıkıcı süreçler ayrışma olarak tanımlanır. Kayaçların ayrışması ile yerinde oluşan regolitik zeminler, yüzeyden ana kayaya kadar olan kesimde fiziksel ve jeokimyasal olarak farklı özellik sunan belirgin zonlara ayrılır. Bu zonların kalınlığı bölgenin topoğrafik, jeolojik ve iklim özelliklerine göre değişiklik gösterir. Ayrışma sırasında çözünen tuzlar ve organik bileşikler kurak bölgelerde yüzeyde toplanırken, sulak bölgelerde ise alt tabakalara iner ve yağışların akışa geçmesiyle yikanarak uzaklaşır. Farklı fiziksel ve kimyasal özellik gösteren bu zonlarda kimyasal ayrışmanın ve derinliğin fonksiyonu olarak malzemenin mühendislik davranışı da farklıdır (Taylor ve Eggleton, 2001).

Birçok mühendislik yapısı sığ sayılabilecek derinliklerde, genellikle kısmen ve/veya tamamen ayrıışmış kaya kütleleri üzerinde inşa edilir. Bu nedenle ayrıışmamış ana kayadan çok farklı mühendislik özelliklerine sahip olan ayrıışmış kaya ve kalıntı zeminlerin (regolitler) mühendislik özelliklerinin belirlenmesi jeoteknik uygulamalarda büyük önem taşır.

Jeoteknik projelerde, genel olarak yamaç molozları, gösel ve sığ denizel çökeller gibi jeolojik ortamlar, yanal ve düşey yöndeki devamsızlıklarından dolayı heterojen olarak kabul edilirken, yerinde oluşan regolitik zeminlerin jeoteknik özelliklerinin değişmediği ve bu ortamların homojen olduğu varsayılır. Bu yaygın görüş günümüzde birçok projede oturma, taşıma gücü ve şev duraylılık problemlerine neden olmaktadır. Oysaki regolitik zeminlerde, ayrışma derecesine ve derinliğine bağlı olarak ortam farklı fiziksel ve mineralojik özellik gösterir (Taylor ve Eggleton, 2001). Bu durum direk olarak mekanik özelliklere de yansır. Bu nedenle belirli bir derinlik için belirlenmiş olan zemin parametrelerinin farklı derinlikler için kullanılması jeoteknik projelerin uygulama aşamasında büyük sorunlara neden olur. Özellikle bu tür ortamlarda projelendirilen şevlerin stabilite analizlerinde ortam tek bir veriyle karakterize edilmekte ve bu durum tehlikeli sonuçları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, jeoteknik uygulamalarda genellikle laboratuvar deneylerinden ziyade yerinde arazi deneylerini tercih edilmektedir. Ancak arazi deneylerinde de regolitik zeminlerin jeoteknik özelliklerinin derinliğin ve buna bağlı olarak ayrışma derecesinin bir fonksiyonu olarak değiştiğine dikkat edilmemekte, belli derinlikler için elde edilen veriler bağımsız olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen eksikliklerin giderilmesi amacıyla oluşumunda aşınma, taşınma ve depolanma gibi tortul süreçlerin söz konusu olmadığı ve yerinde ana kayanın ayrışması ile oluşan regolitik zeminler ele alınmış, Trabzon ilindeki Neojen sonrası regolitik zeminler pilot bölge olarak seçilmiştir. Çalışmada regolitik zeminlerin fiziksel, kimyasal ve buna bağlı olarak dayanım özelliklerinin derinlikle değişimi araştırılmıştır.

2. JEOLÖJİ

İl merkezi ve yakın çevresinde yüzeylenen Senozoyik yaşlı volkano-tortul istif ilk olarak Güven (1993) tarafından Kabaköy Formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Tortul ara katkılı bazaltlar, bazaltik andezitler, trakitler ve piroklastitlerinden oluşan bu birimler ilk çalışmalarda Paleosen-Eosen yaşlı olarak kabul edilmiştir. Aydın vd. (2008) ve Yücel (2013) tarafından bu birimler detaylı olarak ayrıtlanmış ve tabanda Eosen yaşlı tuf ve breşlerle başlayan birimlerin üzerinde uyumsuz olarak Miyosen yaşlı volkanitlerin bulunduğu belirlenmiştir. İstifin en üst kısmını Neojen yaşlı volkanitlerin alterasyonu sonucu oluşmuş kırmızı renkli saprolitik killer (Arslan vd., 2006) ve Holosen-Pleyistosen olarak yaşlandırılan denizel taraçalar (Keskin, 2007) oluşturmaktadır. Bu projenin çalışma konusunu oluşturan saprolitik killer üzerinde yapılan çalışmalarda bu birimlerin saprolitten ziyade kum, silt ve kilden oluşan rezidüel regolit oldukları ortaya koyulmuştur (Baykan, 2011, Ersoy vd., 2013).

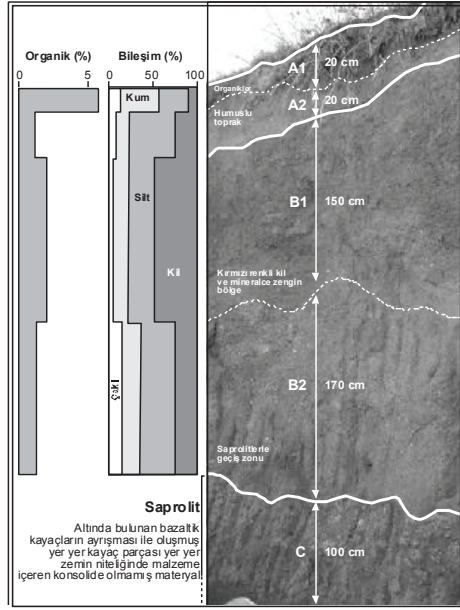
3. REGOLİTLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Temeldeki volkanik kayaların ayrışması sonucu oluşan regolitler, derine doğru ayrıışmamış volkanik kayalara geçiş gösterir. İnceleme alanında tabakalı yapı göstermeyen regolitlerin, fosil faunası içermemesi nedeni ile karasal kökenli olduğu düşünülmektedir. Regolitler içinde volkanik çakılların varlığı, bunların kaynağının Neojen yaşlı volkanik kayalar olduğunu göstermektedir.

Bir regolit profili incelendiğinde yüzeyden alta doğru fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişiklik gösterdiği görülür ve zemindeki bu değişimlere göre regolitler zonlara ayrılarak sınıflandırılır. Yapılan incelemelerde, çalışma konusu regolitik zeminlerde bu zonlar tespit edilerek, zeminlerin organik madde içerikleri ile dane boyutu dağılımları belirlenmiştir (Ersoy vd., 2013). En üst seviye olan A zonu yaklaşık 40 cm kalınlıktadır. Organik maddeler nedeniyle rengi koyu kahverengiye yakın olan bu zonda yıkanmaya bağlı olarak humus ve kil gibi maddelerin bir kısmı taşınmıştır. A1 zonunda organik madde oranı %5'ten, kum ve silt oranı % 80'den fazladır. A2 zonunda ise organik madde oranı % 1'in altına düşerken silt oranı % 50'ye yükselmiştir. Çalışma alanında B zonu 3 m'den fazladır. Ayrışmanın devam ettiği B zonunda A zonundan sızan suların taşıdığı kil, demir, tuz gibi maddeler birikmiştir (Şekil 1).

Yaklaşık 1.5 m kalınlığa sahip B1 zonunda organik madde oranı yaklaşık % 2'dir. Bu alanda kil oranı % 50'ye ulaşmıştır. 1.7 m kalınlığa sahip B2 zonunda kil oranı % 20'ye düşerken silt oranı % 40'a kadar yükselmiştir. Saprolitlerden oluşan ve yaklaşık 1 m kalınlığa sahip C zonunda ana kayayı oluşturan bloklara rastlanmıştır.

Günümüzde jeoteknik projelerde arazi deney programı ile planlanacak araştırma programının içeriği henüz standartlara bağlanmamıştır. Regolitlerin derinlik profilinin çıkarılması amacıyla sondaj yapılmış, laboratuvar da fiziksel, mekanik ve mineralojik özelliklerin belirlenmesi aşamasında kullanılmak üzere 50 cm de bir örselenmemiş blok örnek temin edilmiştir.



Şekil 1. Neojen sonrası volkanitlerinin ayrışması sonucu oluşmuş yaklaşık 4 m kalınlığındaki regolitik zemin profili (Baykan, 2011; Ersoy vd., 2013)

Çalışmada 3 farklı lokasyonda sondaj yapılmış, sondajlarda sırasıyla 8 m'de, 7,2 m'de ve 7,5 m'de ana kayaya ulaşılmış ve her 50 cm de bir örselenmemiş örnek temin edilmiştir. Örnekler alınırken örselenmenin en aza indirilmesi açısından 86 mm çapında 50 cm lik özel tüpler kullanılmış, sondaj susuz ve sadece baskı ile (dönme olmaksızın) gerçekleştirilmiştir. Sondajlardan temin edilen örnekler de zeminin fiziksel ve dayanım parametreleri belirlemek için ASTM D422-63 standardına uygun olarak elek analizi ve hidrometre deneyi, plastik özellikleri için ASTM D 4318-10e1 standardına göre likit limit ve plastik limit deneyi, özgül ağırlığının belirlenmesi için ASTM D 854-14 standartına göre piknometre deneyi ve kayma direnci parametrelerinin tespiti için, konsolidasyonsuz-drenajsız direkt kesme deneyi uygulanmış ve deneyde ASTM D 3080 standartları kullanılmıştır (Çizelge 1). Örnekler üzerinde tüm kayacık analizleri yapılarak mineralojik bileşim belirlenmiştir (Çizelge 2).

Elde edilen veriler değerlendirildiğinde A zonunun yaklaşık olarak 1 m, B zonunun 4.5 m ve C zonunun ise yaklaşık 2 m kalınlığında olduğu tespit edilmiştir. Dane boyunun derinlikle değişimi Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Sondaj yoluyla 50 cm de bir temin edilen örselenmemiş örneklerin bazı indeks ve dayanım özelliklerinin derinlikle değişimi.

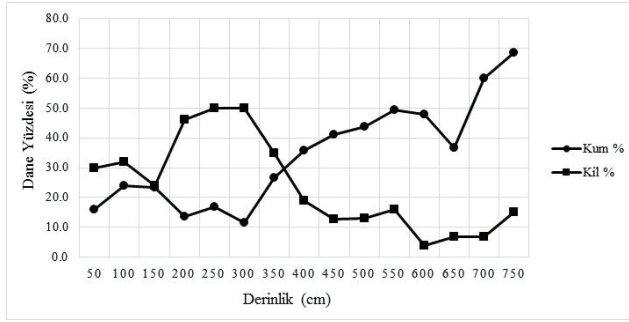
Derinlik (cm)	Toprak profilini	Kohezyon (kPa)	İçsel sürtünme Açısı ($^{\circ}$)	Tane Dağılımı				γ_n (kN/m ³)	γ_k (kN/m ³)
				Çakıl %	Kum %	Silt %	Kil %		
0-50	A	43,20	28,48	11,9	16,1	42,0	30,0	17,2	14,4
50-100		73,00	30,57	7,0	24,0	37,0	32,0	15,1	12,7
100-150	B1	53,00	39,00	10,7	23,3	42,0	24,0	16,3	6,9
150-200		69,99	10,21	4,3	13,7	36,0	46,0	14,5	10,2
200-250		54,64	22,85	3,0	17,0	30,0	50,0	15,7	12,1
250-300		17,22	30,28	3,3	11,7	35,0	50,0	15,4	11,8
300-350	B2	31,19	9,20	1,5	26,5	37,0	35,0	12,5	7,5
350-400		22,54	44,90	1,3	35,7	44,0	19,0	12,9	7,9
400-450		23,90	15,89	4,8	41,2	41,2	12,8	15,3	11,3
450-500		43,63	29,64	7,4	43,6	36,0	13,0	13,4	9,7
500-550		17,40	24,16	11,8	49,2	23,0	16,0	13,4	9,9
550-600		29,90	49,89	23,0	48,0	25,0	4,0	14,5	11,1
600-650	C	38,77	20,81	12,5	36,5	44,0	7,0	12,6	8,1
650-700		24,96	28,39	5,1	59,9	28,0	7,0	17,6	12,5
700-720		32,23	17,96	1,4	68,6	15,0	15,0	13,4	8,3

Çizelge 2. Sondaj yoluyla 50 cm de bir temin edilen örselenmemiş örneklere ait tüm kayaç analiz sonuçları.

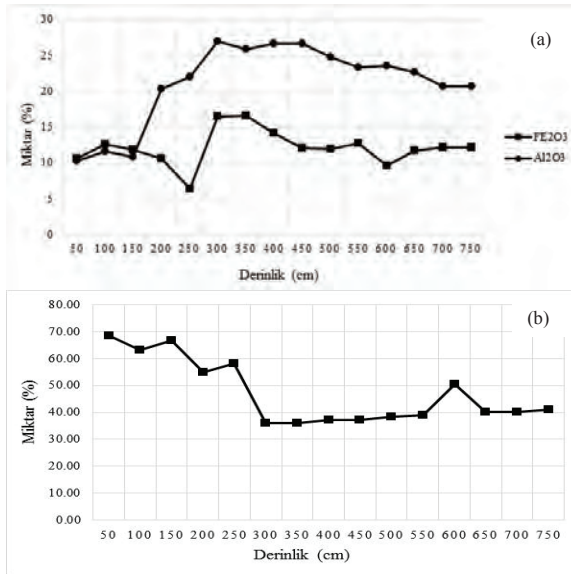
Derinlik (cm)	Toprak Profili	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	MnO %
0-50	A	68,39	10,23	10,6	0,46	0,26	0,12	0,58	0,09
50-100		63,09	11,57	12,58	0,63	0,44	0,16	0,59	0,09
100-150	B1	66,67	10,83	11,86	0,35	0,16	0,05	0,53	0,31
150-200		54,87	20,39	10,61	0,51	0,14	0,03	0,72	0,02
200-250		58,03	21,98	6,44	0,61	0,13	0,06	1,67	0,02
250-300		36,06	26,94	16,45	0,6	0,2	0,03	0,19	0,1
300-350	B2	36,11	25,92	16,64	1,01	0,25	0,03	0,24	0,13
350-400		37,34	26,61	14,1	0,81	0,21	0,04	0,34	0,19
400-450		37,26	26,69	12,01	0,93	1,12	0,11	0,6	0,18
450-500		38,44	24,73	11,93	1,48	1,86	0,24	1,06	0,21
500-550		39,05	23,3	12,72	1,57	3,25	0,47	1,35	0,24
550-600		50,33	23,57	9,57	0,68	0,3	0,05	0,63	0,06
600-650	C	40,19	22,64	11,73	2	4,42	0,7	1,23	0,27
650-700		40,30	20,63	12,17	2,67	5,77	0,73	0,96	0,29
700-720		41,00	20,65	12,20	2,70	5,80	0,75	0,97	0,30

Şekil 2 incelendiğinde özellikle B1 zonunda kil yüzdesinin % 50'lere ulaştığı görülmektedir. A zonundan kaynaklanan ve toprak zonunun derinliklerine doğru taşınan bileşenlerden kolay çözülemeyenler bu zonda birikir. Bu nedenle element zenginleşmesinin olduğu bu zona birikim zonunda denilir. Bu zon bu nedenle kil, demir ve mangan ve alüminyum oksitler bakımından zengindir. Bu nedenle kırmızımsı koyu kahvemsii renk alır.

Yapılan tüm kayaç analizleri sonucunda bu zonda Al oksit miktarının % 25'ten, Fe oksit miktarının ise % 15'ten fazla olduğu görülmektedir (Şekil 3a). B zonundan tabana doğru yaklaşıldığında kil içeriği ve Fe miktarında bir miktar azalma görülmüştür. Bu zonların altında bulunan C zonunda ise artık kaba taneli materyal (kum) içeriği artmış, Fe ve Al içeriği azalmıştır. Derinliğin artmasına bağlı olarak ise silis miktarı giderek azalmıştır (Şekil 3b). Bu veriler literatürde verilen tipik toprak profiline ait özellikler ile net olarak uyusmaktadır.



Şekil 2. Kil ve kum yüzdelерinin derinlikle değişimi



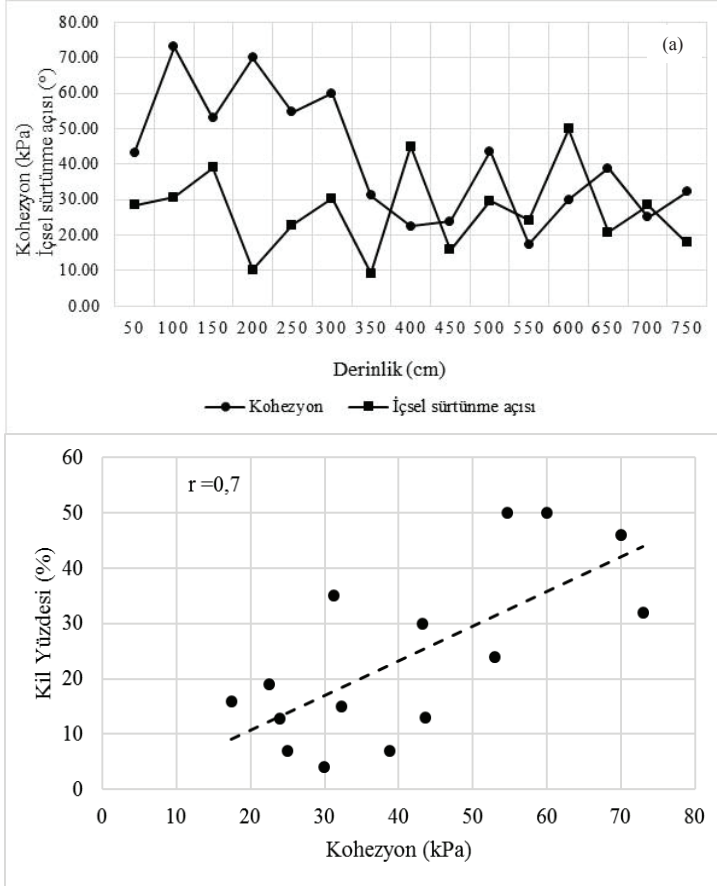
Şekil 3. Alüminyum ve demir oksitlerin derinlikle değişimi (a) ve Silisyum miktarının derinlikle değişimi (b).

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmaların neticesinde yerinde oluşmuş zeminlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin derinliğin bir fonksiyonu olarak değiştiği görülmektedir. Bu değişim artış ve azalış şeklinde değildir. Özellikle B zonunda kil, Fe ve Al oksit miktarının yüksek olduğu görülmüştür. Bu değişimin malzemenin kayma direnci parametreleri üzerinde bir etkisinin olup olmadığını belirlemek amacıyla kohezyon ve içsel sürtünme açısı (toplam gerilmeler cinsinden) değerlerinin derinlikle değişimi incelenmiştir (Şekil 4a).

Şekil 4a incelendiğinde kohezyon değerinin 100-300 cm derinlikte en yüksek değer aldığı görülmektedir. Bu durum ise bu bölgede (B1) kil yüzdesinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle kil ve kum içeriğindeki değişime bağlı olarak kohezyon ve içsel sürtünme açısının ters orantılı olduğu da şekilde net olarak görülmektedir. Kohezyon ve kil yüzdesi arasındaki doğrusal ilişki

ise Şekil 4b'de verilmiştir. Korelasyon katsayısının 0.7 çıkması kohezyon değerindeki artışın kil yüzdesi artışı ile ilişkilendirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4. Kayma direnci parametrelerinin derinlikle değişimi (a) ve kil yüzdesine bağlı kohezyon değişimi (b)

Yapılan sondajlar ile elde edilen veriler yardımıyla özellikle heyelanlı bölgelerde tek bir derinlikten alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen indeks ve dayanım özellikleri kullanılarak yapılan değerlendirmelerin hatalı olacağı net olarak görülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Akgün, A. and Bulut, F. 2001. Engineering geology of the Arsin-Trabzon section of Trabzon South Expressway possible route. Fourth International Turkish Geology Symposium.
- Arslan, M., Kadir, S., Abdioglu, E. ve Kolayli, H. 2006. "Origin and formation of kaolin minerals in saprolite of Tertiary alkaline volcanic rocks", Eastern Pontides, NE Turkey, 41, 597-617.
- ASTM D422-63 (2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org
- ASTM D4318-10e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org

- ASTM D3080 / D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org
- ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- Aydın, F., Karlı, O. ve Chen B. 2008. "Petrogenesis of the Neogene Alkaline Volcanics with Implications for Post-Collisional Lithospheric thinning of the Eastern Pontides, NE Turkey", *Lithos*, 249-266.
- Baykan, İ. 2011. "Trabzon İli Kırmızı Killerinin Jeoteknik Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ersoy, H., Karlı, M. B., Çellek, S., Kul, B., Baykan, İ., ve Parsons, R. L. 2013. "Estimation of the soil strength parameters in Tertiary volcanic regolith (NE Turkey) using analytical hierarchy process", *Journal of Earth System Science*, 122, 1545-1555.
- Güven, D. H. 1993. "Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250 000 ölçekli kompilasyonu", MTA, Ankara.
- Keskin, S. 2007. "Güney Doğu (GD) Karadeniz Sahil Kesminin (Trabzon Yöresi) Taraçaları ve Aktif Tektoniği", Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 111.
- Taylor, G. and Eggleton, R. A. 2001. *Regolith Geology and Geomorphology*. John Wiley & Sons. Ltd. 375.
- Taylor, G. M. and Eggleton, R. A. 2001. *Regolith Geology and Geomorphology: Nature and Process*, Wiley, 384.
- Yücel, C. 2013. "Trabzon-Giresun Arasındaki Tersiyer Volkanitlerinin Petrografisi, 40Ar-39Ar Jeokronolojisi, Petrokimyası, Sr-Nd-Pb İzotop Jeokimyası ve Petrolojisi", Doktora tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 368.

Darbe Etkisi Altında Granit Türü Farklı Kaya Malzemelerinin Çatlak İlerleme Enerjisinin Belirlenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma

An Experimental Study on Determination of Crack Propagation Energies of Granite Type Different Rock Materials Under Impact Effect

E. Kömürlü*, A. Kesimal

Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

(ekomurlu@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, metal, polimer, beton gibi çok çeşitli malzemelerin darbe dirençlerini ölçmek için yaygın kullanılan Charpy darbe deneyi ile 13 farklı granit malzemesinin çatlak ilerleme enerjileri belirlenmiştir. Ayrıca, test edilen granit malzemelerin çatlak ilerleme enerjileri statik yük altında da dinamik (darbe) yük koşulları ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Mod-1 türü (çekme gerilmesi altında) çatlak ilerleme enerjilerinin statik yük altında, darbe testinde ölçülen değerlere nazaran 39 ile 200 kat daha düşük olduğu görülmüştür. Yapay çatlak içeren numunelerin çatlak ilerleme süreleri kontak mikrofon ve profesyonel bir ses kayıt programı yardımı ile ölçülmüştür. Çatlak ilerleme süreleri ve çatlak ilerleme enerjileri arasında anlamlı bir ilişki bulunamamış, bu sebeple enerji seviyesine bağlı çatlak ilerleme sürelerinin kaya malzemesine bağlı değişen, içsel özelliklerden olduğu sonucuna varılmıştır. Charpy darbe deneyinin kaya malzemeleri için pratik olarak kullanılabilir olduğu görülmüş ve kaya malzemeleri için özel Charpy darbe deneyi düzeneklerinin geliştirilmesine yönelik bazı detaylar bu çalışma ışığında önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çatlak direnci, kaya malzemelerinde çatlak ilerlemesi, Charpy darbe deneyi, darbe dayanımı, dinamik yük.

ABSTRACT: *The Charpy impact test, a widely applied impact strength determination test for various materials such as metals, polymers, cementitious materials was performed to evaluate the crack propagation energy of 13 different granite type rock materials under the impact load condition. Additionally, crack propagation energies of the granite materials were determined under the static load condition to compare the results with those of the Charpy impact test. The energy levels measured from static load tests were significantly lower than those obtained from the dynamic load test that the ratio of energy level under the dynamic loading to energy level under static loading condition was measured to change between 39 and 200 for different 13 type of granite materials tested in this study. Crack propagation time for the chevron notched specimens under static loading was also measured using professional sound recording systems. As results of this study have not indicated that the crack propagation speed and energy values measured from different granite materials have a direct relationship, energy dependent crack propagation speed was found to be an inherent property of rock materials. The Charpy impact test was assessed usable for being a sensitive crack propagation energy determination method for rock materials. In the context of improvement of the Charpy impact test for rock materials, some issues were pointed out in this study.*

Keywords: *Crack propagation in rock materials, Impact strength of rock materials, Charpy test, Impact energy, Dynamic loading, Fracture toughness*

1. GİRİŞ

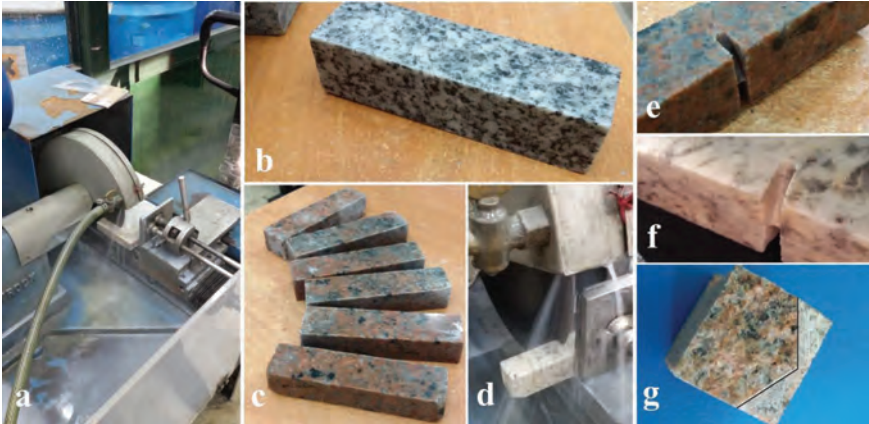
Kaya malzemelerinin kırılma tokluğunun statik ve dinamik yükleme koşulları altında test edilmesi için birçok farklı standart, ISRM önerileri ve farklı araştırmacıların yöntemleri mevcuttur (ISRM, 2014; ISRM, 2007; ISRM, 1995; ISRM, 1988; Backers, 2004; Funatsu vd., 2014; Tutluoğlu ve Keleş, 2011; Zhou vd., 2012; Whittaker vd., 1992; Shetty vd., 1985). Tekrarlı yükler ve statik yük koşulları altında kaya malzemelerinin çatlak ilerleme özelliklerinin kıyaslamalı olarak incelenmesi konusunda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş olsa da kaya malzemelerinin bir diğer dinamik yükleme türü olan darbe etkisi altında çatlak ilerleme dirençlerinin incelenmesi için standart bir yöntem yoktur. Bu çalışmada, farklı malzemelerin darbe etkisi altında çatlak ilerleme enerjilerinin belirlenmesi için kullanılan Charpy darbe deneyi ile 13 farklı granit türü kaya malzemesi test edilmiştir. Charpy darbe

deneyi ucuz ve pratik bir deney olması sebebi ile kaya malzemelerinin çatlak ilerleme dirençlerinin belirlenmesinde potansiyel bir yöntem olarak düşünülmüştür. Charpy darbe deneyinde iki mesnet içine oturtulan çentik açılmış numuneye belirli bir yükseklikten düşen çekiç vurarak çatlağın numune kesiti boyunca ilerlemesi sağlanmaktadır. Çekiğin bırakıldığı yükseklik ve numuneyi kırıldıktan sonra sahip olduğu yükseklik arasındaki fark çatlak ilerlemesi için harcanan enerjinin belirlenmesi için ölçülmektedir. Gösterge üzerindeki ibre çekiğin numuneyi kırıldıktan sonra yükseldiği konuma kadar ilerlemekte ve numune kırıldıktan sonra sahip olunan enerji belirlenmektedir. Numunenin 3 noktadan eğilme ile darbe etkisi altında kırılması sebebi ile Charpy darbe deneyinde Mod-1 türü, çekme gerilmelerinin kontrolünde çatlak ilerlemesi için harcanan enerji ölçülmektedir. Bu çalışmada, çentik açılmış yapay çatlaklı numuneler hem statik yük altında üç noktadan eğilme dayanımı testi, hem de Charpy darbe deneyi için hazırlanmıştır. Böylece, statik ve dinamik (darbe) yük koşullarında test edilen granit türü kaya malzemelerinin çatlak ilerleme dirençleri kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

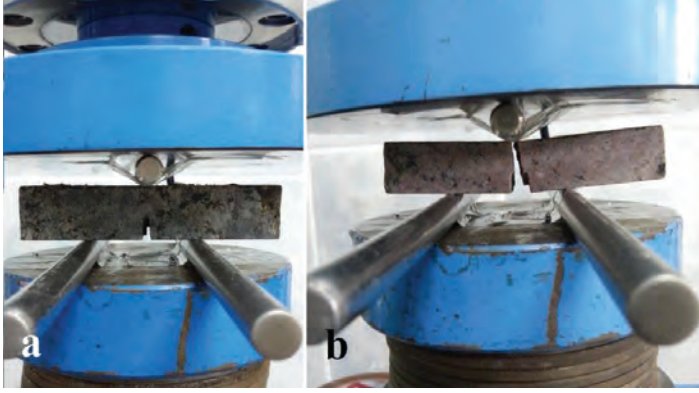
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzeme ve Metot

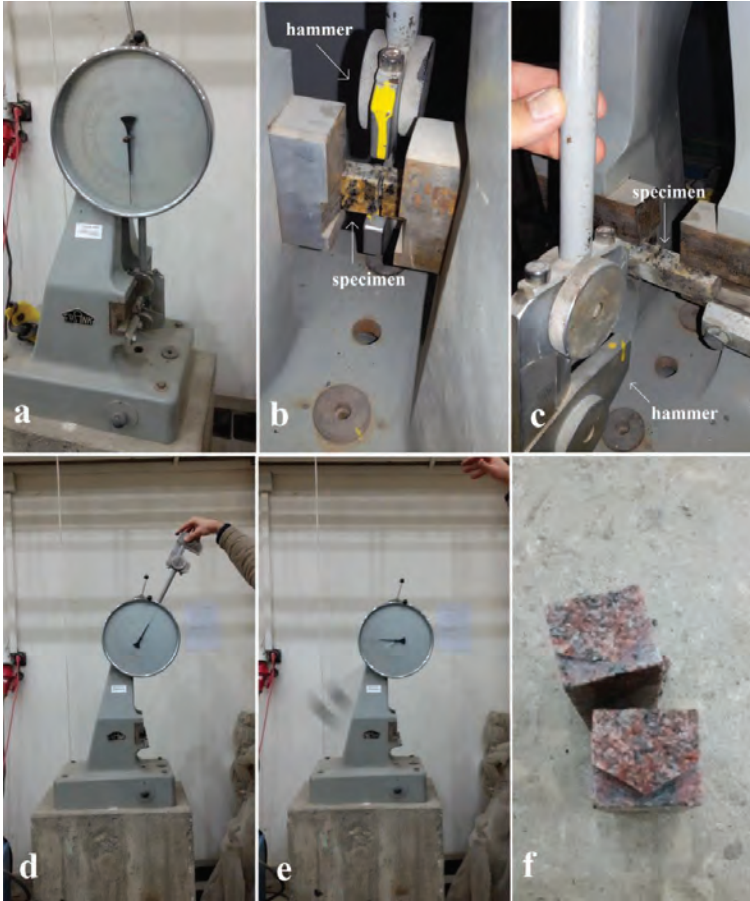
Bu çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerinden granit blokları 25 mm x 25 mm x 80 mm boyutlarında numuneler üretmek üzere kesilmiştir. Statik yük ve dinamik yük testlerinde kullanılan numuneler aynı boyut ve diğer fiziksel özelliklere sahiptir. Numune hazırlama işlemlerini gösteren Şekil 1'de görüldüğü üzere 20 cm çapında ve 1,3 mm kalınlığa sahip dairesel testere ile yapay çatlak (çentik) hazırlanmıştır. Çentik açma esnasındaki aşınma sebebi ile çentik genişliği kaya malzemesine bağlı olarak 2 mm ve 3 mm arasında değişmiş olup çentik kesme derinliği 8 mm olarak seçilmiştir. Statik yük altında Mod-1 türü çatlak ilerleme direncinin belirlenmesi için 50 kN yük kapasiteli, elektrik motorlu hassas yükleme ekipmanı 1 mm/dakika yükleme hızında kullanılmıştır. Statik yük testinde alt iki mesnet arası mesafe 40 mm olarak seçilmiştir (Şekil 2). Benzer şekilde, Charpy darbe deneyinde de mesnetler arasında 40 mm açıklık mevcuttur (Şekil 3). Kullanılan Charpy darbe deneyi düzeneğinde, 5 kg kütleyle sahip çekiç 1 metre yükseklikten bırakıldığında numuneye çarpma esnasında yaklaşık 50 Joule değerinde bir enerjiye sahip olmaktadır. Charpy darbe deneyinde numune kırıldıktan sonra çekiğin kaybettiği yüksekliğe bağlı olarak harcanan enerji değerleri okunmuştur. Statik yük testinde kırılma sesini kaydetme yolu ile çatlak ilerleme hızının ölçülmesi için numuneler üzerine yapıştırılan kontak mikrofon kullanılmıştır. Çatlak ilerleme süresince ses 0,01 milisaniye hassasiyet ile profesyonel müzik kayıt programı ve ses kartı kullanımı marifetiyle ölçülebilmektedir. Kayıt edilen örnek bir çatlak sesi dalgası Şekil 4'te görülmektedir. Granit 1'den Granit 13'e kadar isimlendirilen 13 farklı granit malzemesi için deformasyon kontrollü uygulanan statik yük testlerinde maksimum yük, yük-sehimlenme ilişkisi, yük-sehim grafiklerinden hesaplanan enerji (kN.mm= Joule) değerleri, çatlak ilerleme süreleri belirlenmiş ve Charpy darbe deneyinden elde edilen enerji seviyeleri ile statik yük testi verileri arasındaki ilişki incelenmiştir. Statik yük testinde, LVDT (Linear variable differential transformer) kullanılarak üç noktadan eğilme altında sehimlenme ölçülmüştür.



Şekil 1. Blok kesme (a, b, c), çentik oluşturma ve çentik dizaynı (d, e, f, g).



Şekil 2. Üç noktadan eğilme dayanımı deneyi (a), yenilmiş bir numune (b).



Şekil 3. Charpy darbe deneyi düzeni (a), düzeneğe yerleştirilmiş numune (b), çekiğin kaldırılması (c, d), çekiğin düşmesi ve numune kırıldıktan sonra çekiğin çıktığı yüksekliğin okunması (e), yenilmiş bir Charpy darbe dayanımı deneyi (f) [Şekillerdeki hammer: çekiç, specimen: numune].

2.2. Bulgular

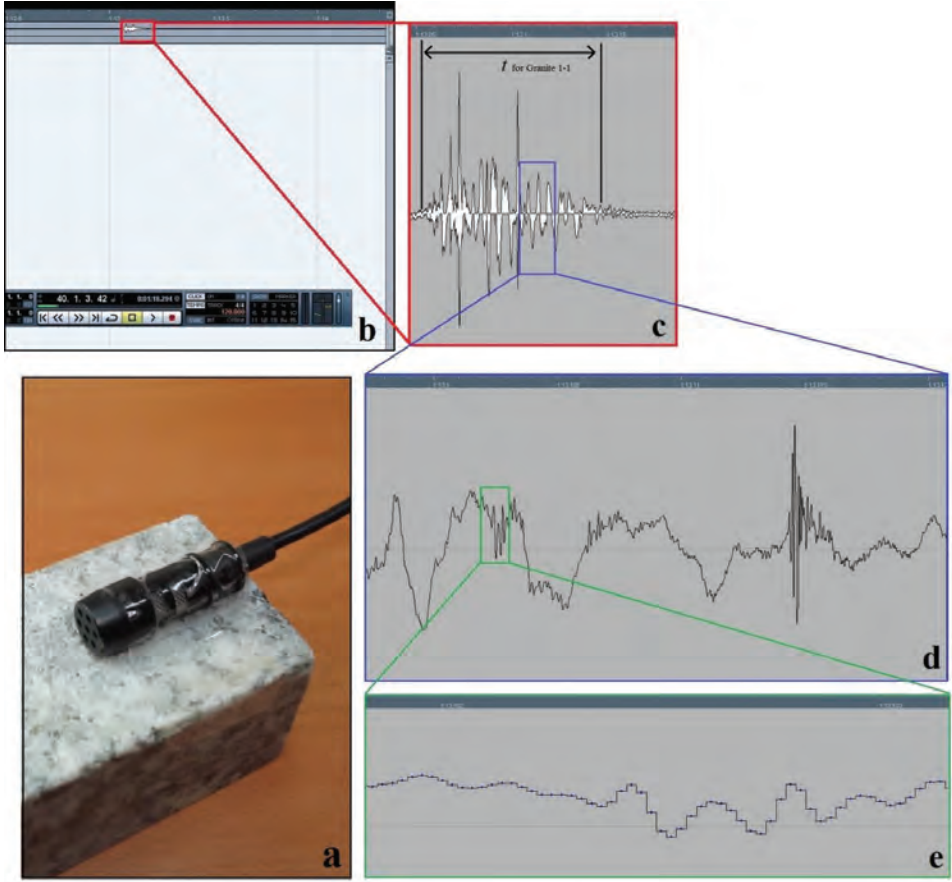
Statik yük testlerinden elde edilen maksimum yük ve yük-sehim eğrileri altında kalan alan değerleri Çizelge 1'de verilmektedir. Çizelge 1'deki alan verileri çatlak ilerlemesi için numunelerin sahip olduğu enerjinin belirlenmesi amaçlı değerlendirilmiştir (Şekil 5). Bir diğer parametre olarak, ölçülen çatlak ilerleme süreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çatlak boyu, çatlak ilerleme süresi ve çatlak ilerleme için harcanan enerji seviyelerine bağlı olarak çeşitli parametreler: Watt ($J/s=Joule/saniye$) birimine sahip çatlak ilerlemesi için zamana bağlı enerji tüketimi değeri, enerjiye bağlı çatlak ilerleme süreleri ($m/Js=1/Ns$) ve birim çatlak yüzey alanı için harcanan enerji değerleri (J/m^2) Çizelge 3'te verilmiştir. Çentik ucundan itibaren çatlak ilerleme uzunluğu 23 milimetredir. Tüm test edilen numunelerin çatlak yüzey alanları eşit olduğu için birim çatlak yüzey alanı başına harcanan enerji değerleri numunelerin çatlak ilerleme enerjileri ile orantılıdır. Çizelge 3'teki değerler hesaplanması için numunelerin iki taraflı toplam çatlak yüzeyi alanı 10 cm^2 ($5\text{ cm}^2 \times 2$) olarak belirlenmiştir. Charpy darbe deneyinden elde enerji değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 1. Statik yük testinden elde edilen maksimum yük (F_{max}), yük ve sehim eğrileri altında kalan alan (E) değerleri ve standart sapmalar (S.D.).

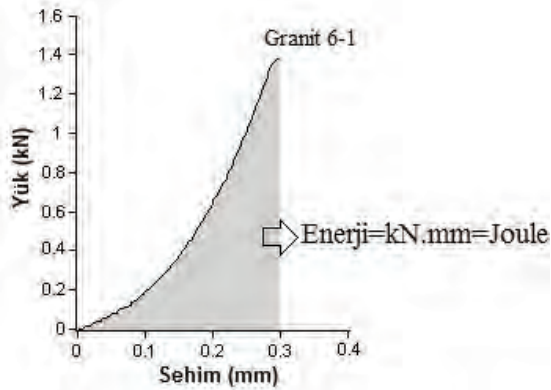
Numune türü	F_{max} (kN)	S.D. (kN)	E (miliJoule)	S.D. (miliJoule)	Numune sayısı
Granit 1	1,26	0,07	441	20	3
Granit 2	1,20	0,11	399	34	3
Granit 3	0,92	0,10	93	10	3
Granit 4	1,17	0,11	357	36	3
Granit 5	1,02	0,08	219	19	3
Granit 6	1,95	0,06	486	27	3
Granit 7	0,41	0,09	204	15	3
Granit 8	0,54	0,07	90	7	3
Granit 9	0,63	0,05	126	23	3
Granit 10	0,35	0,02	105	11	3
Granit 11	1,34	0,10	204	12	3
Granit 12	1,26	0,13	354	10	3
Granit 13	0,38	0,05	60	7	3

Çizelge 2. Çatlak ilerleme süreleri.

Numune türü	t (milisaniye)	S.D. (milisaniye)	Numune sayısı
Granit 1	90	8	3
Granit 2	65	7	3
Granit 3	105	7	3
Granit 4	157	10	3
Granit 5	119	5	3
Granit 6	18	2	3
Granit 7	29	4	3
Granit 8	26	2	3
Granit 9	323	34	3
Granit 10	305	23	3
Granit 11	40	3	3
Granit 12	61	9	3
Granit 13	246	16	3



Şekil 4. a) Numuneye yapıştırılmış kontak mikrofon, b, c, d, e) Granit 1 türü bir numunenin kayıt edilen ses dalgası (t : çatlak ilerleme süresi).



Şekil 5. Bir yük-sehim eğrisi ve statik yük altında harcanan enerji gösterimi.

Çizelge 3. Statik yük testinde enerji tüketimi ve çatlak ilerleme hızları, çatlak yüzey alanına bağlı enerji tüketimi.

Numune türü	Enerji tüketimi hızı (Watt)	Çatlak ilerleme hızı (m/s)	Enerjiye bağlı çatlak ilerleme hızı (1/Ns)	Çatlak yüzey alanı başına enerji tüketimi (mJ/cm ²)
Granit 1	4,90	0,26	0,59	44,1
Granit 2	6,14	0,35	0,88	39,9
Granit 3	0,89	0,22	2,37	9,3
Granit 4	2,27	0,15	0,42	35,7
Granit 5	1,84	0,19	0,87	21,9
Granit 6	27,00	1,28	2,63	48,6
Granit 7	7,03	0,79	3,87	20,4
Granit 8	3,46	0,88	9,78	9,0
Granit 9	0,39	0,07	0,56	12,6
Granit 10	0,34	0,08	0,76	10,5
Granit 11	5,10	0,58	2,84	20,4
Granit 12	5,80	0,38	1,07	35,4
Granit 13	0,24	0,09	1,50	6,0

Çizelge 4. Charpy darbe deneyinde ölçülen enerji tüketimi değerleri (E: Enerji, S.D: Standart sapma).

Numune türü	E (Joule)	S.D. (Joule)	Numune sayısı
Granit 1	26	1,5	3
Granit 2	29	1,7	3
Granit 3	14	0,6	3
Granit 4	23	1,0	3
Granit 5	16	2,1	3
Granit 6	19	1,2	3
Granit 7	20	1,5	3
Granit 8	12	1,5	3
Granit 9	11	1,0	3
Granit 10	21	2,5	3
Granit 11	33	2,7	3
Granit 12	24	3,1	3
Granit 13	10	1,2	3

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan örneklerin statik ve dinamik yükleme koşullarında çatlak ilerleme karakteristiğinin farklı olduğu görülmüştür. Örneğin, Granit 6 türü numuneler statik yükleme koşulunda Granit 11 türü numunelere nazaran oldukça yüksek çatlak tokluğu ve yüksek enerji seviyesine sahip iken dinamik yükleme koşulunda ise nispeten oldukça düşük değerlerde çatlak ilerleme direncine sahip olduğu görülmüştür. Bu durumda, yükleme şeklindeki değişim neticesinde kaya malzemesine bağlı olarak farklı oranlarda çatlak dirençlerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Çatlak ilerlemesi için gereken enerji tüketimi ve maksimum yük değerleri arasındaki ilişki kaya malzemelerine göre değişiklik göstermekte olup, bu iki parametre arasında genel bir ilişkilendirme önerisinin uygun olmadığı belirlenmiştir. Dinamik (darbe) ve statik yükleme koşullarında ölçülen enerji seviyelerinin arasındaki oranın da benzer şekilde kaya malzemesine bağlı olarak geniş aralıkta değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Test edilen 13 farklı granit türü malzeme için dinamik (darbe) yükleme koşulunda ölçülen enerjinin statik yük koşulundakine nazaran 39 ile 200 kat arasında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Statik yük testlerinden elde edilen yük deformasyon grafiklerine göre hesaplanan enerji seviyelerinin Charpy darbe deneyinden elde edilen değerlere nazaran düşük olması yükleme hızındaki artışa bağlı olarak çatlak ilerlemesi esnasındaki enerji tüketimi değerlerinin arttığını doğrulamaktadır (Zhang ve Zhou, 2014; Zejian ve Yulong, 2010; Marsavina vd., 2013; Fuenkajorn vd., 2012). Yükleme hızının düşmesi neticesinde çatlak ilerleme süresindeki yaşanan artış statik yük altında ölçülen enerji seviyelerinin Charpy darbe deneyinden elde edilen değerlere nazaran düşük olması için bir neden olarak kabul edilebilir (Hsieh ve Wang, 2004; Sahin ve Yayla, 2005; Liang vd., 2016). Statik yük testlerinde belirli bir süre zarfında etkiyen yükün basamaklı olarak artışı neticesinde

çatlak üzerine enerji etkimektedir. Ancak, Charpy darbe deneyinde çatlakın ilerlemesi için gerekli olan enerji bir anda etkimektedir. Yükleme hızındaki artışın numunenin müsaade edebileceği maksimum yük değerlerindeki artışa sebebiyet vermesi darbe etkisi altında daha yüksek enerji seviyelerine çıkılması için bir diğer nedendir (Chen vd., 2009; Zhang, 2014). Çatlak ilerleme şekli statik yüklemelerde bir majör çatlakın ilerlemesi biçimindeyken, darbe etkisi altında çatlak önünde sık fisür ve mikro çatlakların oluşumu ardından majör çatlakın ilerlemesi, plastik yayılma bölgesinin genişlemesi ekstra enerji tüketimine sebebiyet vermektedir. Bu olgu da Charpy darbe deneyinde ölçülen nispeten yüksek enerji değerleri için bir neden olarak değerlendirilebilir (Osovski vd., 2015; Murthy vd., 2009). Zamana bağlı enerji tüketimi ve enerji seviyesine bağlı çatlak ilerleme hızı patlatmalı kazılar, darbeli mekanik kazılar gibi birçok kaya mühendisliği uygulamasında önemli özelliklerdendir. Bu çalışmanın çıktılarında biri olarak, zamana bağlı enerji tüketimi (Watt) değerlerinin çatlak tokluğu ve gerek statik gerek dinamik yüklemeye testlerinden elde edilen enerji değerleri ile ilişkili olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, çatlak ilerleme hızı ve çatlak tokluğu arasında da doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Enerji seviyesine bağlı çatlak ilerleme hızının kaya malzemesinin içsel, kendine has mekanik özelliklerinden olduğu, bulunmuştur. Çatlak ilerleme hızının kazı veriminin artırılması için patlatma delikleri arasındaki gecikme sürelerinin belirlenmesi gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kaya kütlesi özelliklerine bağlı olarak dikkate alınması gereklidir (Ergun vd., 2012; Wang vd., 2013; Johansson and Ouchterlony, 2013; Uyar Aldaş, 2010a; Uyar Aldaş, 2010b). Çentikte çatlak ilerlemesi için gerekli enerji seviyesinin çekicinin numuneye etkilediği enerji seviyesine bağlı bir değişken olması sebebi ile kaya malzemeleri için Charpy darbe deneyi standartları önerme çalışmalarında çekici ağırlığı ve düşüş yüksekliğinin üzerinde durulmalı ve genel bir enerji seviyesi belirlenmelidir (Lucon, 2016; Lowe, 1990; Shukla, 1983). NX boyutu gibi sıkça kullanılan çaptaki karot numuneleri için, bu çalışmada kullanılan düzeneğe nazaran daha yüksek enerjiye sahip düzeneklerin kaya mekaniği laboratuvarlarında kullanımı önerilmektedir. Basit bir enerji dönüşümü yaklaşımına göre, 1 metre yükseklikten bir çekicinin düşmesi neticesinde numuneye çarpma esnasındaki hızının 4.4 m/s olduğu hesaplanabilmektedir. Eğer doğal çatlak ilerleme hızı bu değerden düşük ise yapay olarak çatlakın ilerleme hızının artırıldığı ve çatlak ilerleme enerjisinin kaya malzemesinin doğal özelliğini yansıtmayacağı öngörülmektedir. Deneydeki çekicinin enerji seviyesini düşürmeden kaya malzemesinin doğal çatlak ilerleme hızında enerji değerinin belirlenmesi için ağır çekici ve alçak düşüş mesafesine sahip düzeneklerin kullanılması önerilmektedir. Mekanik kazı için kullanılan çeşitli araç/ekipmanların dış etkisi altında çatlak ilerleme hızları yapay olarak artırılabilir (Zhang, 2004; Hemphill, 2013; Bazant vd., 1993; Bertram and Kalthoff, 2005). Enerji seviyesinde artış olmadan çekicinin hızını artırmak, dış etki ile doğal çatlak ilerleme hızından daha yüksek hızda çatlakın ilerlemesi için hafif çekici ve yüksek düşüş mesafesine sahip deney düzenekleri kullanılmalıdır. Gelişmiş Charpy deney düzenekleri üretmek için, numune çatlak ilerlemesinin mikrosaniyeler mertebesinde basamaklar halinde izlenmesini sağlayan yüksek hızlı kameralar gibi birçok ekipman kullanılabilir (Zhang and Zhao, 2014; Kharchenko vd., 2006; Zou and Wong, 2014; Kömürlü vd., 2016; Durif vd., 2012). Kısaca, Charpy darbe deneyinin kaya mekaniği deneyleri arasında hassas çatlak direnci belirlemek amaçlı kullanılabilir olduğu, yaygınlaşması için kaya malzemelerine yönelik modifiye edilmesi ve geliştirilmesi amaçlı yeni çalışmalara ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır.

4. KAYNAKLAR

- Backers, T. 2004. Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading. PhD Thesis, University of Potsdam, Germany
- Bazant, P.Z., Bai, S.P., Gettu, R., 1993. Fracture of rock: effect of loading rate. Eng. Fract. Mech., 45, 393-398
- Bertram, A., Kalthoff, J.F., 2005. Fracture toughness of fast propagating cracks in rock. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/267948043>
- Chen, R., Xia, K., Dai, F., Lu, F., Luo, S.N., 2009. Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure test. Engineering Fracture Mechanics, 76, 1268-1276
- Durif, E., Réthoré, J., Combescure, A., Fregonese, M., Chaudet, P., 2012. Controlling stress intensity factors during a fatigue crack propagation using digital image correlation. Experimental Mechanics, 52, 1021-1031
- Ergun, A., Alpsar, M., Elmacı, E., Halıcılar, G., İnal, H.S., İşçen, H.İ., Ögün, O., Özkazanç, M.O., Patır, O., 2012. Explosives and Blasting Techniques (in Turkish). Nitromak Education Publications, Ankara
- Fuenkajorn, K., Sriapai, T., Samsri, P., 2012. Effects of loading rate on strength and deformability of Maha Sarakham salt. Engineering Geology, 135-136, 10-23

- Funatsu, T., Shimizu, N., Kuruppu, M., Matsu, K., 2014. Evaluation of mode I fracture toughness assisted by the numerical determination of K-resistance. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 48, 143–157
- Hemphill, G.B., 2013. *Practical Tunnel Construction*. John Wiley & Sons, New Jersey
- Hsieh, C.T., Wang, C.L., 2004. The measurement of the crack propagation in rock slabs. In: *Proceedings of the 2004 ISRM International Symposium: 3rd Asian Rock Mechanics Symposium*, Kyoto, Japan, pp. 341-346
- ISRM, 2014. *The Orange Book-The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014* (ed. by Ulusay R). Springer, Cham, Switzerland
- ISRM, 2007. *The Blue Book-The complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterisation, Testing and Monitoring: 1974–2006* (ed. by Ulusay R, Hudson JA).
- ISRM, 1995. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disk (CCNBD) specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32, 57–64
- ISRM, 1988. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25, 71–96
- Johansson, D., Ouchterlony, F., 2013. Shock wave interactions in rock blasting: the use of short delays to improve fragmentation in model-scale. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 1-18
- Kharchenko, V.V., Kondryakov, E.A., Zhmaka, V.N., Babutskii, A.A., Babutskii, A.I., 2006. The effect of temperature and loading rate on the crack initiation and propagation energy in carbon steel Charpy specimens. *Strength of Materials*, 38, 535-541
- Komurlu, E., Kesimal, A., Demir, S., 2016. Determination of Indirect (Splitting) Tensile Strength of Cemented Paste Backfill Materials. *Geomechanics and Engineering*, 10, 775-791
- Liang, C.Y., Zhang, Q.B., Li, X., Xin, P., 2016. The effect of specimen shape and strain rate on uniaxial comp. behavior of rock material. *Bull. of Eng. Geol. Env.*, 72, 1669-1681
- Lowe, L.A., 1990. Factors influencing accuracy of Charpy impact test data. In: *Charpy impact test: Factors and Variables* (ed. by Holt, M). ASTM Publication, Chelsea, Michigan
- Lucon, E., 2016. Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data. *Materials and Design*, 97, 437–443
- Marsavina, L., Linul, E., Voiconi, T., Sadowski, T., 2013. A comparison between dynamic and static fracture toughness of polyurethane foams. *Polymer Testing*, 32, 673–680
- Murthy, A.R.C., Palani, G.S., Iyer, N.R., 2009. State-of-the-art review on fracture analysis of concrete structural component. *Sadhana*, 34, 345-367
- Osovski, S., Srivastava, A., Ponson, L., Bouchaud, E., Tvergaard, V., Ravi-Chandar, K., Needleman, A., 2015. The effect of loading rate on ductile fracture toughness and fracture surface roughness. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 76, 20-46
- Sahin, S., Yayla, P., 2005. Effects of testing parameters on the mechanical properties of polypropylene random copolymer. *Polymer Testing*, 24, 613–619
- Shetty, D.K., Rosenfield, A.R., Duckworth, W.H., 1985. Fracture toughness of ceramics measured a chevron-notched diametral-compression test. *J. of American Ceramic Society* 68, C325-C327
- Shukla, A., 1983. Comparison of static and dynamic energy release rates for different fracture specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 18, 725-730
- Tutluoglu, L., Keles, C., 2011. Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 1248-1261
- Uyar Aldas, G.G., 2010a. Explosive charge mass and peak particle velocity (PPV)-frequency relation in mining blast. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7, 223–231
- Uyar Aldas, G.G., 2010b. Investigation of blast design parameters from the point of seismic signals. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 24, 80-90
- Wang, Z., Fang, C., Chen, Y., Cheng, W., 2013. A comparative study of delay time identification by vibration energy analysis in millisecond blasting. *Int J. of Rock Mech. Mining Sci.*, 60, 389–400.
- Whittaker, B.N., Singh, R.N., Sun, G., 1992. *Rock Fracture Mechanics: Principles, Design and Applications*. Elsevier, Amsterdam
- Zhang, Z.X., 2004. Estimate of Loading Rate for a TBM Machine Based on Measured Cutter Forces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37, 239–248
- Zejian, X., Yulong, L., 2010. Study of loading rate effect on dynamic fracture toughness of high strength steel under impact loading. *Strength, Fracture and Complexity* 6, 17-23
- Zhang, Q.B., 2014. *Mechanical Behaviour of Rock Materials under Dynamic Loading*. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Lausanne
- Zhang, Q.B., Zhao, J., 2014. A Review of Dynamic Experimental Techniques and Mechanical Behaviour of Rock Materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1411-1478
- Zhang, Q.B., Zou, Y., 2014. Effect of loading rate on fracture behaviour of rock materials. In: *Proceedings of Eurock 2014*, Vigo, Spain, pp. 119-124
- Zhou, Y.X., Xia, K., Li, X.B., Li, H.B., Ma, G.W., Zhao, J., Zhou, Z.L., Dai, F., 2012. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 49, 105-112
- Zou, C., Wong, L.N.Y., 2014. Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading. *Engineering Geology*, 173, 19-31

Zeminlerin Yerinde İyileştirilmesinde NovoCrete® Teknolojisi ve Uygulamaları

NovoCrete® Technology and Applications in Stabilization of In-Situ Soils

B. Yemenici, Ö. Coruk*

*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
(*coruk@kocaeli.edu.tr)*

ÖZ: Çimento stabilizasyonu zeminlerin yerinde iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak mevcut zeminin çimento ile reaksiyona girmesi çoğu zaman mümkün olmamakta, iyileştirme başarıya ulaşamamaktadır. Yeni bir teknoloji ürünü olan NovoCrete® mevcut zemin ile çimentonun en hızlı şekilde birleşimini sağlayan granüler bir malzemedir. Doğal oksitler, sülfatlar ve karbonat mineralleri içeren NovoCrete® alkalın ve toprak alkalın niteliklere sahiptir. Çimento stabilizasyonunda NovoCrete® katkısı kristalleşmeyi ve devam eden puzolonik reaksiyon işlemi sırasında yeni kristal oluşumlarını sağlamaktadır. Böylece, iyileştirilen zemin tabakasında mukavemeti ve esnekliği artmaktadır. Yapılan bu iyileştirme nakliye masraflarını önemli ölçüde düşürerek ekonomiye ve çevreye önemli yararlar sağlamaktadır. Dünyada farklı ülkelerde birçok projede kullanılan bu teknoloji ülkemizde de farklı karayolu ve demiryolu projelerinde uygulanmaktadır. Samsun-Kalın Demiryolu Hattının Modernizasyonu projesi kapsamındaki zemin iyileştirme çalışmalarında mevcut demiryolu dolgu tabakası yaklaşık 30 kilometrelik kesimde bu teknoloji ile iyileştirilmiştir. Zemin özelliklerine göre belirlenen karışım oranındaki iyileştirilmiş tabakada proje kriterlerinin üzerinde değerlere ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zeminlerin iyileştirilmesi, NovoCrete®, çimento stabilizasyonu.

ABSTRACT: *Cement stabilization soil is one of the methods used in improving the place. However, the current subfloor with cement from entering most of the time do not reach the success of the improvement be possible. NovoCrete® is a new state-of-the-art existing floor with cement in the fastest way, providing a combination of granular material. Natural oxides, sulfates and NovoCrete® containing alkaline carbonate minerals and soil is alkaline qualities. NovoCrete® additive in cement stabilization distention and ongoing puzolonik provides the formation of new crystals during reaction. Thus, improved strength and flexibility in the ground layer. This improvement made by reducing transport costs significantly, providing significant benefits to the economy and the environment. Used in several projects in different countries around the world, this technology is implemented in different road and railway project in our country. Samsun-Kalın Railway Modernization Project in soil improvement in the work of approximately 30 kilometers of existing railway at the fill layer with this technology. The mixing ratio is determined based on the characteristics of the soil improved layer in the project has been reached on the criteria values.*

Keywords: *Improvement of soils, NovoCrete®, cement stabilization.*

1. GİRİŞ

Klasik yol yapımında zayıf zeminler kaldırılarak yerlerine dışarıdan malzeme getirilerek yol altyapısı ve üst yapısı oluşturulmaktadır. Daha alt tabakalarda zemin özelliklerinin daha az miktarlarda katkı (kireç, cüruf, çimento, uçucu kül) ve atık malzemelerle (muhtelif atıklar, cüruf, uçucu kül) iyileştirilebilmesine rağmen yol üst yapısı tabakalarında bu tür katkılar yetersiz kalmakta ve özellikle terasman, alt temel ve temel tabakalarında klasik yöntemler dışında uygulamalar yapılamamaktadır. Zemin iyileştirmede problemlerin çözümü için kullanılan ve bilinen yöntemlerinden olan çimento stabilizasyonunda çimentonun mevcut zeminle reaksiyona girmesi çoğu zaman mümkün olmamakta, iyileştirme başarıya ulaşamamaktadır. Özellikle yol ve demiryolu türü üst yapılar altındaki temel ve alt temel tabakaları çimento stabilizasyonu sonrası bu tabakalar daha gevrek davranış göstererek esnek üst yapı ile uyum sağlayamamaktadır.

NovoCrete® mevcut zemin ile çimentonun en hızlı şekilde birleşimini sağlayan, %100 saf mineral içerikli, alkalin ve toprak alkalin grubundaki doğal oksitler, sülfatlar ve karbonat mineralleri içeren granüler, doğal bir malzemedir. Zeminin optimum su muhtevasında portland çimentosu ile birleştiğinde kristalleşmeyi ve puzolonik reaksiyonu arttıran ayrıca yerinde iyileştirme imkanı veren teknoloji ürünüdür. Uygulama arazide parçalayıcı ve bağlayıcı makinelerle, arazi ve laboratuvar sonuçları takip edilerek yapılmaktadır. İyileştirilen tabaka kalınlığı 25 cm ile 45 cm arasında değişmektedir. Genelde 35 cm tabaka kalınlığı tercih edilir. Eğer daha kalın zemin istifinde ve/veya daha yüksek dayanım değerlerine ulaşmak gerekir ise sandviç adı verilen tekrarlı tabaka tasarımları uygulanmaktadır. Çimento miktarı, zeminin kuru birim hacim ağırlığının %8 ile %12'ü arasında değişmekte ve çoğunlukla %10 oranı tercih edilmektedir. NovoCrete® ise çimento miktarının ağırlıkça %2 oranındadır. Uygulamada iyileştirme yapılacak zemin üzerine belirlenen oranda çimento ve daha sonra çimentonun %2 oranında NovoCrete® serilir. Daha sonra iyileştirme derinliğine veya iyileştirilecek tabaka kalınlığına göre uç yüksekliği ayarlanan yüksek kapasiteli özel makinelerle zemin üzerine serilen çimento ve NovoCrete® zeminle yüksek hız ve devirde optimum su muhtevasında karıştırılır. Karışım frezelenme sonrası, önce keçi ayak silindiri ile sıkıştırılır, greyder ile düzeldildikten sonra düz silindire 2 pas tekrar sıkıştırılır. Kristalleşme, kür ve puzolonik reaksiyonu desteklemek amacıyla ve hava koşulları da dikkate alınarak sulama işlemi gerçekleştirilir. Böylelikle %100 homojen bir karışım sağlanarak planlanan kalınlıkta esnek homojen, daha yüksek dayanım değerlerine sahip ve geçirimsiz bir tabaka oluşturulur. Bu teknolojiyle nakliye masraflarını önemli ölçüde düşürerek proje tasarımında istenilen kriterlerde iyileştirilmiş zemin tabakası esnek bir yapı kazanır ve NovoCrete® katkısı ile birbiri ile bağdaşmayan malzemeleri birbiri ile bağlanması da sağlanmaktadır.

Bu teknoloji dünyada ve ülkemizde farklı karayolu ve demiryolu projelerinde uygulandığı gibi Samsun-Kalın Demiryolu Hattının Modernizasyonu kapsamındaki mevcut zemininin iyileştirilmesinde de uygulanmıştır. Bu çalışmada Samsun-Kalın Demiryolu Hattının Modernizasyonu kapsamındaki uygulamaların sonuçları değerlendirilecektir.

2. ÇALIŞMA YÖNTEMİ

Samsun-Kalın Demiryolu yaklaşık yüz yıldır hizmet veren ortalama 60 km/h proje hızına sahip ve genelde yük taşıma hizmeti veren bir hattır. Demiryolu hattının modernizasyonu projesi kapsamında mevcut rayların, traverslerin sökülmesi balast ve subbalast tabakasının kaldırılması, daha sonra ise mevcut doğal ve dolgu zeminin iyileştirilerek yeni subbalast, balast tabakası imalatı ile yeni travers ve rayların montajı öngörülmektedir. Sivas Kalın beldesinden Samsun Karadeniz sahiline ulaşan güzergâh yaklaşık 378 kilometre uzunluğundadır. Modernizasyon kapsamında güzergâhın mevcut zemin koşulları mühendislik jeolojisi ve jeoteknik çalışmalarla belirlenmiş, modernizasyon projesi kapsamında istenilen kriterleri sağlayacak farklı iyileştirme yöntemleri önerilmiştir ve projelendirilmiştir. Bu kapsamda farklı kesimler için tanımlanan iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Ancak proje süresinin yetersizliği ve kısıtlılığı dikkate alındığında ortaya çıkan zamana bağlı bu olumsuz koşulları gidermek amacıyla öncelikle Zile Artova arasındaki yaklaşık 30 kilometrelik kısmın değişik kesimlerinde 2,00 ve 3,00 metre kalınlıkta kaya dolgu ile öngörülen iyileştirme yerine NovoCrete® ile çimento stabilizasyonu yapılması kararlaştırılmıştır. Böylece projenin daha hızlı bir şekilde sonuçlandırılması ve daha önceki bölümde belirtilen NovoCrete® ile çimento stabilizasyonun avantajlarından yararlanılması öngörülmüştür.

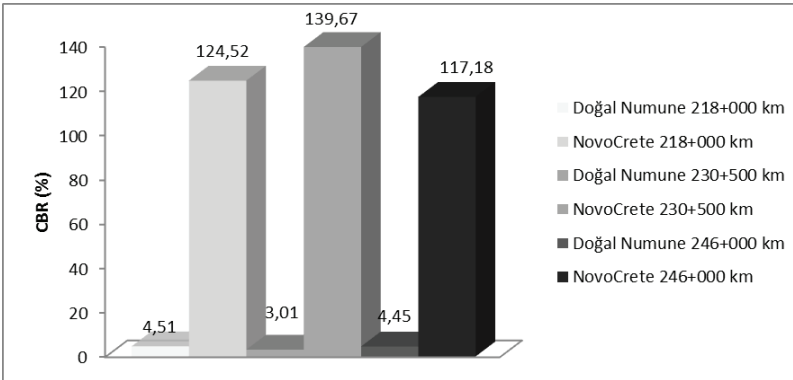
Zile-Artova arasında güzergâhta temel birim çoğunlukla Eosen yaşlı Çekerek formasyonudur. Birim kumtaşı-çamurtaşı aralanmasından oluşmaktadır. Bu birim üzerinde Çekerek Irmağı ve kollarının taşıdığı alüvyon tabakaları ile yamaç molozu bulunmaktadır. Alüvyon kalınlığı ve litolojisi alüvyonu taşıyıp biriktiren akarsuyun debisi, akış rejimi ve vadi özelliklerine göre değişim sunmaktadır. NovoCrete® teknolojisi ile yapılan iyileştirmede genelde kalınlığı 2,00 metre ile 10,00 metre arasında değişen alüvyon tabakasının kil ve killi çakıl düzeylerinden gerçekleştirilmiştir. Bu kesimdeki km: 218+000, km: 230+500 ve km: 246+000 NovoCrete® ile yapılan çimento stabilizasyonuna ait çalışmalar ve çalışmalar sonucu ortaya çıkan iyileştirme performansları bu bildiri kapsamında arazi ve laboratuvar çalışmaları ve/veya deneylerine göre değerlendirilmiştir.

Samsun-Kalın Demiryolu Modernizasyonu Projesi kapsamında güzergâhının Zile-Artova arasındaki km:218+000, km:230+500 ve km:246+000 NovoCrete® ile yapılan çimento stabilizasyonunda tabaka kalınlığı 35 cm olarak belirlenmiş ve proje kriterleri dikkate alınarak yapılan laboratuvar deneylerine göre 1 m² zemin için 60 kg çimento ve kullanılan çimento miktarının %2 oranı olan 1,12 kg NovoCrete® karışımı kullanılmıştır. Bu karışım oranlarını belirlenmesinde öncelikle mevcut zeminin indeks özellikleri, CBR değerleri ile Proktor deneyleri sonucu belirlenen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevaları dikkate alınmıştır. Deney sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre zeminler Birleştirilmiş Zemin Sınıfına (USC) göre CH ve CL sınıfında maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 15,00 kN/m³ dolayında, optimum su muhtevaları %20 dolayında, CBR değerleri ise %5 değerinin altındadır. CBR testleri sonucunda bulunan %3-4,5 arasında değişen değerlerin yol yapım standartlarında temel tabaka için önerilen sınırların çok altındadır.

Çizelge 1. Mevcut zemine ait deney sonuçları.

Km	LL (%)	PL(%)	PI(%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Optimum Su Muhtevaları (%)	CBR (%)
218+000	62,4	21,4	41,1	15,02	22,60	4,51
230+500	66,51	2,8	44,3	15,34	22,14	3,01
246+000	41,08	19,6	22,1	15,70	20,00	4,45

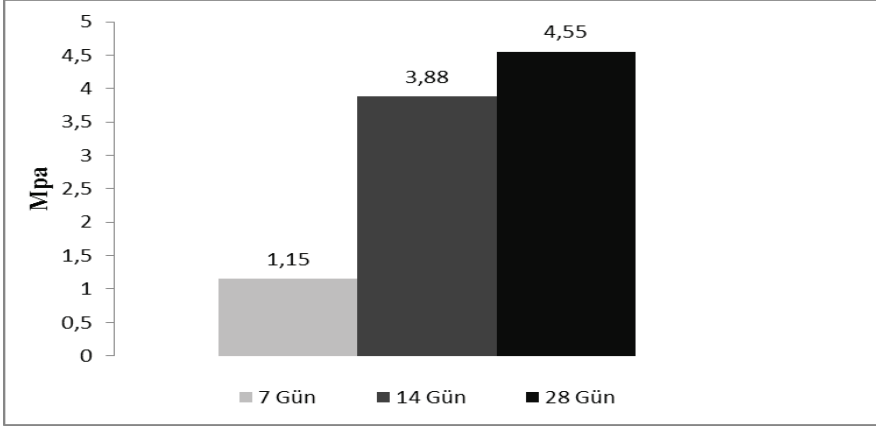
Güzergâh üzerinden alınan karışım uygulanacak mevcut zemine, 60 kg/m² çimento ve kullanılan çimentonun %2 oranında olan NovoCrete® ile uygun şekilde karışım yapıldıktan sonra aynı standartlara göre farklı kür süreleri sonrası yapılan CBR deney sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Karışım sonrası hazırlanan numunelerin 7 günlük kür sonrası CBR değerlerinde önemli artışlar izlenmiştir.



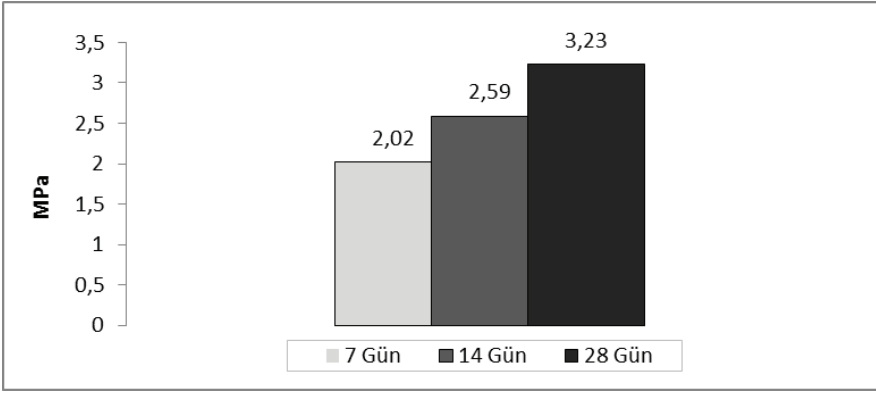
Şekil 1. Mevcut zemine NovoCrete eklenerek elde edilen CBR deney sonuçları.

Çimento+NovoCrete® ekleyerek hazırlanan numunelerde CBR deney sonucunda bulunan değerler, 218. kilometrede %4,51'den %124,52, 230. kilometrede %3,01'den %139,67 ve 246. kilometrede ise %4,45'den %117,18 değerine ulaşmıştır.

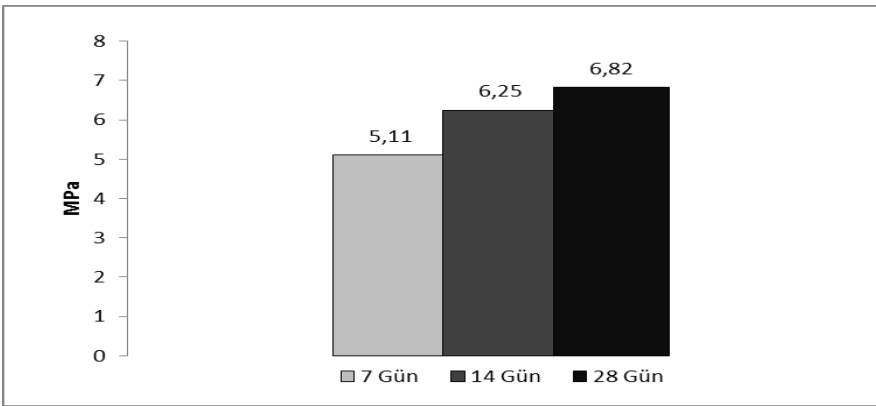
Ayrıca çalışmada aynı orandaki karışımlarda hazırlanan silindirik numunelerin 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonrası serbest basınç deneyi sonuçlarının, dayanıma etkisini aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Şekil 2, 3 ve 4).



Şekil 2. 218. kilometredeki kür süresi ve serbest basınç dayanım ilişkisi.



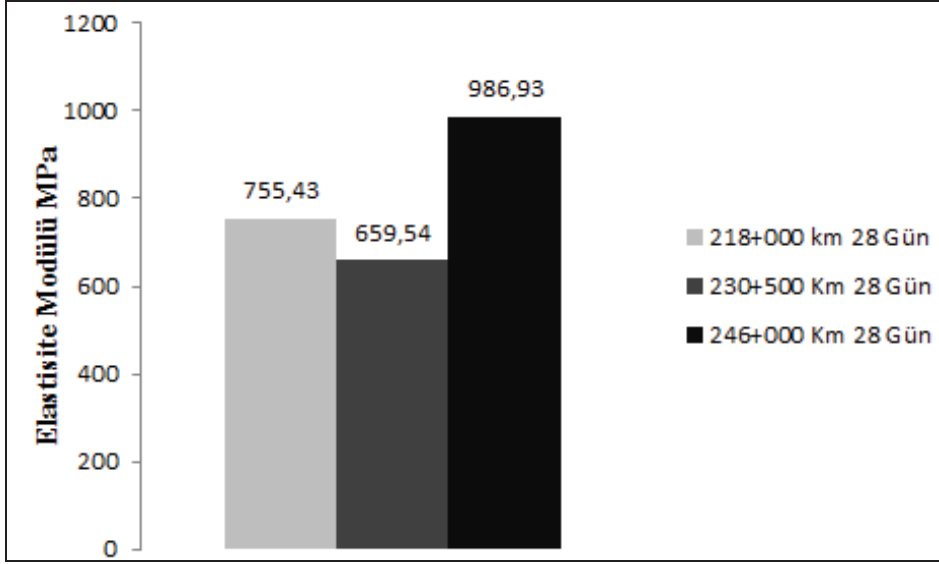
Şekil 3. 230. kilometredeki kür süresi ve serbest basınç dayanım ilişkisi.



Şekil 4. 246. kilometredeki kür süresi ve serbest basınç dayanım ilişkisi.

Yukarıda belirli kilometre aralığından alınan farklı numuneler üzerinde yapılan dayanım test sonuçları verilmiştir. Şekil 2'de gösterilen 218 kilometredeki numunenin 7 günlük kür sonucunda 1,15 MPa olarak bulunmuş ve en yüksek dayanıma 28 günlük kürde 4,55 MPa değere ulaşmıştır.

Şekil 3'de 230. kilometrede alınan numunede sırasıyla 2,02 MPa, 2,59 ve 3,23 MPa olarak bulunmuş ve en yüksek dayanıma 28 gün sonunda ulaşmıştır. Aynı şekilde 246. kilometredeki deney sonuçlarına bakıldığında ise dayanımı 7 gün 5,11 MPa iken en yüksek sonuca 28 gün sonucunda 6,82 MPa olarak bulunarak kür günleri arttıkça dayanımda da aynı oranda artış olduğu gösterilmiştir. Farklı kilometrelerdeki zeminler üzerinde laboratuvar da 28 günlük kür süresi sonrası yapılan statik elastisite modülü deneylerinde ise elastisite modülü değerleri sırasıyla 755,43 MPa, 659,54 MPa ve 986,93 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Farklı kilometrelerdeki 28 günlük kür sonrası laboratuvar deneyleri ile bulunan elastisite modülü değerleri.

Güzergadaki uygulama sonrası Çimento+NovoCrete® kullanılarak imal edilen 35 cm kalınlığındaki tabaka üzerinde 2 gün sonra yapılan statik plaka yükleme deneylerinde E_{v2} değerleri km:218+000 dolayında 100 MPa, km:230+000 dolayında 250 MPa ve km:246+000 dolayında ise 200 MPa olarak ölçülmüştür. Yine aynı kilometrelerdeki dinamik plaka yükleme deneylerinde E_{v2} değerleri benzer aralıklarda ölçülmüştür.

3. SONUÇLAR

-Çimento+NovoCrete® kullanılarak farklı özelliklerdeki zeminlerin iyileştirilmesi sonucu imal edilen zemin tabakası yüksek dayanım değerlerine ulaşmaktadır.

-Bu teknoloji ile hem mevcut zeminin yerinden kaldırılarak taşınması hem de iyileştirmede kullanılacak daha iyi mühendislik özelliklere sahip yeni malzemenin ocaktan getirilmesine gerek kalmamaktadır. Böylece nakliye giderleri azalmakta ayrıca trafik yoğunluğunun çevreye olumsuz etkileri ortadan kalkmaktadır.

-Çimento+NovoCrete® kullanılarak oluşturulan temel, alt temel veya taşıyıcı tabaka homojen, geçirimsiz, yüksek dayanımlı ve düşük deformasyon değerlerine ulaşmaktadır.

-Samsun-Kalın Demiryolu Modernizasyonu Projesi kapsamında güzergâhının Zile-Artova arasındaki farklı kesimlerinde NovoCrete® ile yapılan çimento stabilizasyonunda 1 m² zemin için 60 kg çimento ve kullanılan çimento miktarının %2 oranı olan 1.12 kg NovoCrete® karışımı ile 35 cm kalınlığında tabaka imal edilmiş, bu tabaka üzerinde yapılan arazi deneyleri ve mevcut zeminle aynı orandaki karışımlarla hazırlanan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde dayanım ve elastik parametrelerde önemli ölçüde artışlar tespit edilmiştir.

4. KAYNAKLAR

- Bahar, E., Benazzouz, M., Kenai, S. 2004. Cement and Concrete Composites, Volume 26, Issue 7, Pages: 811–820
- Sulieman, I. A., Siddig, M. A., Elbadawi, A. A. Structural, 2008. Optical and Electrical properties of Novocrete Material, neelain.edu.sd
- Kavak, A., Coruk Ö., Aydın A., 2016, A New Binder Mineral for Cement Stabilized Road Pavement Soils World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol: 3, No: 11.
- Kavak, A., Baykal, G., 2012. Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay, Environmental Earth Science 66:1943–1955, 2012
- Kavak A., Akyarlı, A., 2007. A field application for lime stabilization. Engineering Geology 51-6 Pages: 987–997
- Kök, B., Yılmaz, M., Geçgil A., 2012. Çimento Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Maliyetine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 18, Sayı 3, Sayfa 165-172.
- Yong, R. N., Ouhadi, V. R., 2007. Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils, Applied Clay Science Volume 35, Issues 3–4, Pages 238–249

İstanbul'daki Mağmatik Kayaların Dayanım ve Deformasyon Özellikleri ile Yan Kayaçlar ile İlişkileri

Strength and Deformation Characteristics of Magmatic Rocks from İstanbul and their Relation with the Surrounding Rocks

Ö. Ündül^{1,*}, B. C. Çobanoğlu²

¹ İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Avcılar – İstanbul

² İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Vezneciler – İstanbul

(*oundul@istanbul.edu.tr)

ÖZ: İstanbul'da değişik amaçlı mühendislik yapılarının inşaatı artarak devam etmektedir. Bu projelerin pek çoğu İstanbul'un Paleozoyik istifinde ve/veya içerisinde yer almaktadır. Farklı mekanik özellikler sunan pek çok dayk İstanbul Paleozoyik istifini kesmektedir. Ayrıca daykların dışında İstanbul'un kuzeyinde ve güneydoğusunda farklı magmatik kayalar (volkanikler ve sığ magmatikler) geniş alanlar kapsamaktadır. Pek çok durumda tüm bu magmatik kayalar yan kayalarına göre daha dayanımlı ve daha az süreksizlik içermektedir. Böylece, mühendislik çalışmaları sırasında dayanım ve deformasyonda ani değişimler gözlenmektedir. Dayanım ve deformasyondaki ani değişimin sonucu olarak, çeşitli sorunlar bildirilmektedir (Örneğin, TBM sıkışmaları, kesici uçların zarar görmesi vb.). Yan kayalar ve magmatik kayalar üzerinde yapılan mekanik deneylerden elde edilen sonuçlarına göre, daykların tek eksenli sıkışma dayanımları 46-305 MPa arasında ve çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri 19-81 MPa arasında değişmektedir. Young modülleri ise 16-99 GPa aralığındadır. Sedimenter kökenli olan yan kayaların tek eksenli sıkışma dayanımları 33-173 MPa arasında, çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri ise 17-42 MPa aralığındadır. Young modülleri ise 5-57 GPa arasında değişmektedir. Sonuçların değerlendirilmesine göre daykların çevre kayalardan oldukça yüksek dayanım değerleri verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, pek çok durumda dayklar daha gevrek kırılma davranışı göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Dayk, İstanbul, jeo-mühendislik özellikler, kavlaklanma

ABSTRACT: Construction of varying engineering structures for different purposes are increasing in İstanbul. Most of these projects are constructed on and/or within the Paleozoic sequence of İstanbul. Many dykes of different mechanical properties interrupt İstanbul Paleozoic sequence. Besides, magmatic rocks (volcanic and shallow intrusive rocks) other than the dikes in the northern and southern parts of İstanbul comprise wide areas. For many cases all these magmatic rocks are more competent and have less discontinuities than the surrounding rocks. Thus sudden changes of strength and deformation characteristics are encountered during engineering studies. As a consequence, many problems related to this sudden change of strength and deformation characteristics were reported (e.g. stuck of TBM, failure of TBM cutterhead etc.). The data obtained from mechanical tests conducted on host rocks and magmatic rocks suggested that the UCS for dykes rocks vary between 46-305 MPa and crack initiation stress levels are between 19-81 MPa. Youngs modulus are in a range of 16-99 GPa. For the host-rocks which are all sedimentary UCS values varies from 33-173 MPa. Crack initiation stress levels stand between 17-42 MPa and Youngs modulus values range from 5-57 GPa. The analysis of results strongly suggest that dykes exhibit considerably higher strength values than the host rock. Besides in many cases failure behaviour of dykes are more brittle than the host rocks.

Keywords: Dyke, İstanbul, geo-engineering properties, spalling

1. GİRİŞ

Dünyanın en büyük şehirlerinden olan İstanbul nüfus ve yerleşim alanı bakımından sürekli büyümektedir. Böylece pekçok mühendislik yapısı şehrin altyapı ihtiyaçlarını karşılamak üzere inşa edilmekte ve/veya planlanmaktadır.

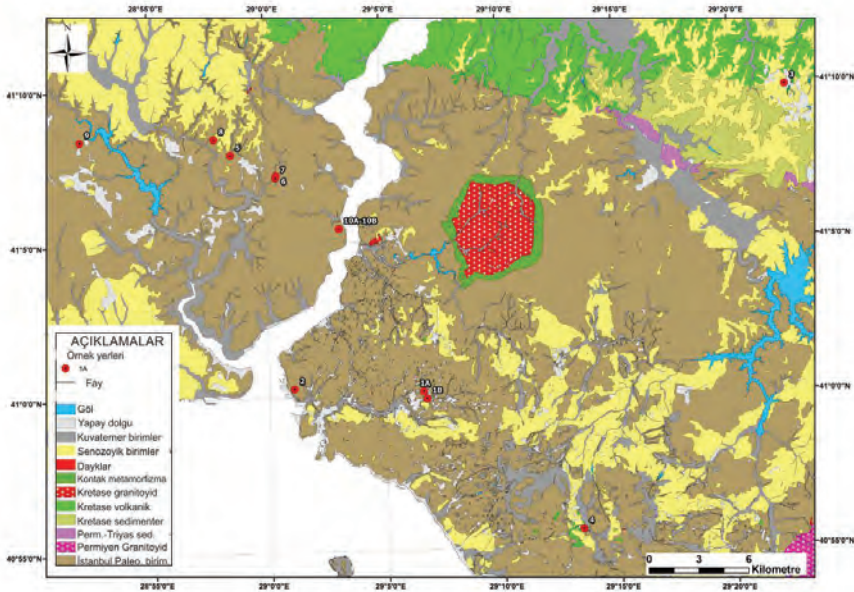
Şehirde, Paleozoyik birimler oldukça geniş alanlar kaplamaktadır. Pek çok noktada dayklar ve sığ magmatik kayalar genelde sedimenter olan bu Paleozoyik istif ile birlikte bulunurlar. Şehirdeki

daykların varlığı bölgedeki ilk jeolojik çalışmalardan beri ifade edilmektedir (Penck vd., 1919). İstanbul'da inşa edilen ve planlanan mühendislik projelerinin boyutları ve derinlikleri arttıkça mühendisler daha fazla dayk ve diğer magmatik kayalar ile karşılaşmak durumunda kalmaktadırlar. Bununla beraber, çeşitli çalışmalarda dayklara bağlı bazı özel sorunlarda ifade edilmektedir (Örneğin, TBM sıkışması, kazıcı uçlarda beklenmeyen aşınmalar, stabilite problemleri vb.) (Bilgin vd., 2016). Benzer olarak Kaiser ve Cai (2012), daykları yeraltı kazılarında destek sistemlerini etkileyen ve uygun olmayan gerilim koşullarının oluşmasına neden olan gerilim artırıcı unsurlar olarak tanımlamışlardır.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

İstanbul Paleozoyik istifi genel olarak farklı fasiyeslerde kırıntılı ve karbonatlı kayalardan oluşmaktadır. Bu kayalar birbirleri ile yanal ve düşey geçişli ve/veya ara tabakalı olarak gözlenmektedirler. Pek çok noktada karbonatlı ve kırıntılı sedimenter kayalar mercekler şeklinde de bulunurlar (Önalın, 1981). Bu birimler Geç Karbonifer'de Hersiniyen orojenezi ve Geç Mesozoyikte Alpin orojenezleri ile kıvrılmış ve faylanmışlardır. Bu birimlerin yanında, İstanbul'un kuzeyi boyunca Üst Kretase yaşlı volkano-sedimenter yüzlekler geniş alanlar kaplamaktadır (Şekil 1). İstanbul'un Anadolu ve Avrupa yakalarında gerçekleştirilen mühendislik çalışmalarına ait kazılarda ve pek çok araştırma sondajında elde edilen jeolojik bulgular magmatik kayaların (dayklar ve diğer magmatik kayalar) geniş yayılımını ortaya koymaktadır. Bölgede, 58.9-72.5 Ma yaşında olduğu bildirilen dayklara (Aysal vd., 2015) İstanbul Paleozoyik istifi içinde sıklıkla ve belli bir düzen içinde olmadan rastlanmaktadır. Dayklar geniş bir bileşim aralığında bulunmaktadır (Örneğin andezit, diyabaz, lamprofir, dasit). Geç Kretase-Erken Tersiyer dönemine ait sığ magmatik kayalar ise şehrin güney doğu kesimlerinde yer almaktadır (Yakacık magmatik karmaşığı, YMK).

Araştırma sırasında, sondajlardan ve kazı alanlarında taze-az ayrışmış seviyelerden alınan bloklardan elde edilen karotlar üzerinde çalışılmıştır. Araştırılan dayklar genel olarak dasit, lamprofir ve andezit bileşimindedir (SL 1, 2, 5 vd.). İstanbul'un kuzey kesimlerinde elde edilen magmatik kaya örnekleri diyorit-granodiyorit bileşimli, YMK'dan elde edilen örnekler ise mikro-granodiyorit bileşimlidir (Şekil 1 ve 2).



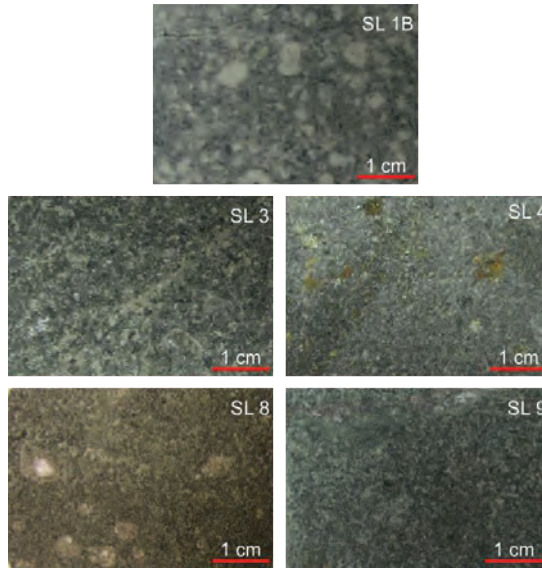
Şekil 1. Örnek yerlerinin İstanbul'un sadeleştirilmiş jeoloji haritası üzerinde gösterimi (Harita İBB 2011'dan değiştirilmiştir).

3. YÖNTEMLER

Birim ağırlıklar, etkin gözeneklilik ve P dalga hızı değerlerini içine alan fiziksel özellikler ISRM (1981 ve 2007)'nin önerileri doğrultusunda tanımlanmıştır. Tek eksenli sıkışma deneyleri (UCS) ile Brezilyan çekme deneyleri (BTS) 2000 kN kapasiteli bilgisayar kontrollü servo-hidrolik deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Enine ve boyuna şekil değiştirmeler hassas bir şekilde karot örneklerinin orta kısımlarından ölçülmüştür. Karot örneği üzerine gelen yükün sabit artması için enine deformasyonun 0.05 mm/dk'da sabit tutulması ile deney gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli sıkışma deneylerinde kullanılan karot örneklerinin alt ve üst yüzeyleri ISRM (1981 ve 2007) önermelerine uygun olup tek eksenli sıkışma deneyi için boy/çap oranı 2, Brezilyan çekme deneyi için ise bu oran 0.5 olarak alınmıştır. UCS ve BTS değerleri Hucka ve Das (1974) ve Altındağ (2000) tarafından önerilen eşitliklerde kullanılarak çalışılan kayaların gevreklikleri hakkında değerlendirme yapılmasına olanak sağlanmıştır. Bunların yanında, önemli bir kaya parametresi olan çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri (σ_c , Bieniawski, 1967; Nicksiar ve Martin, 2013) yanal şekil değiştirme yöntemi (Lajtai, 1974) kullanılarak hesaplanmıştır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Petrografik ve mineralojik çalışmalara göre çalışılan dayklar Lamprofir, diyabaz, andezit ve dasit bileşimindedir. Lamprofir daykları koyu-yeşil renkte olup, bol miktarda plajiyoklas iri kristali (fenokristal) ve klorit içerirler. Plajiyoklasların kristal boyutlarının 1-3 mm arasında olduğu el örneklerinde dahi belirgindir. Hamur malzemesinde kloritleşme ve karbonatlaşma belirgindir.



Şekil 2. Çalışılan kayaların bir kısmının el örneklerine ait görüntüler.

Diyabaz bileşimli (SL9, Şekil 1) dayklar da yeşil-koyu yeşil renkleri ile karakteristiktir. Feldispat iri kristalleri belirgin olup bazı örnek yerlerinde mikrolitik plajiyoklas kristalleri gözlenmektedir. Killeşme ve karbonatlaşma tipik alterasyon tipleridir. Yer yer sparitik damarlar belirgindir. Ataşehir ve Levent bölgelerindeki (sırasıyla SL 1B ve 10B, Şekil 1) andezitik dayklar gri-beyaz renklidir. Kristal yapısı gözle görülebilir netliktedir. 1-5 mm boylarındaki feldispat kristalleri örneğin büyük kesimini kapsamaktadır. Amfibol ve biyotit taneleri daha az miktarda gözlenmektedir. Ayrıca SL10 (Şekil 1) örnekleme bölgesindeki dayklar klorit ve epidot damarlar içermektedir.

Mikrodiyorit ve mikro-granodiyorit kayalar Şile bölgesinden elde edilmiştir (SL 3, Şekil 1). Bu örnekler feldispat fenokristalleri ve yer yer kloritlemiş mafik mineraller içermektedir. Kristaller gözle tespit edilebilmekte olup izotrop bir görüntü sergilerler. Kartal bölgesinden elde edilen (SL 4 – YMK, Şekil 1) örnekler mikro-granodiyorit bileşimindedir. Bu kayalar genelde gri-siyah renklerde olup, hamurunda bolca feldispat mineralleri gözlenir. Camsı dokusu ve kırıklarda gelişen pirit çok belirgindir.

Fiziksel özelliklere (birim hacim ağırlıklar, etkin gözeneklilik, P dalga hızı) ait veriler Çizelge 1'de, özetlenmiştir. Kayaların tek eksenli sıkışma dayanımı, Brezilyan çekme dayanımı değerleri ve elastik özelliklere ait veriler ile gevreklik değerlerine bilgiler Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1. İncelenen kayaların petrografik tanımları, yan kaya ilişkisi ve fiziksel özellikleri.

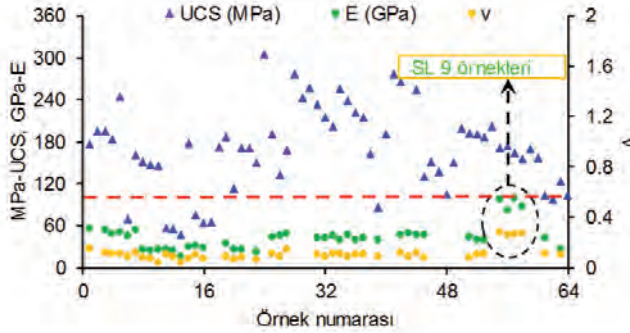
SL	Kaya türü	Bulunduğu formasyon ve yan kaya türü	Örnek sayısı	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Etkin porozite	P dalga hızı (km/s)
1A	Lamprofir	Kurtköy fm., kumtaşı	9	26.37	1.01	5.39
1B	Andezit	Kurtköy fm., kumtaşı	9	24.32	2.72	4.80
2	Lamprofir	Trakya fm., kumtaşı-şeyl	4	27.16	3.99	4.73
3	Mikrodiyorit	Garipçe fm.	7	26.67	0.57	5.79
4	Microgranodiyorit	Yakacık magmatik kompleksi	5	27.04	0.97	5.70
5	Lamprofir	Trakya fm., kumtaşı-şeyl	5	27.56	1.45	5.41
6	Dasit	Trakya fm., kumtaşı-çamurtaşı	4	28.37	0.53	6.44
7	Lamprofir	Trakya fm., kumtaşı-çamurtaşı	4	26.90	1.58	4.3
8	Lamprofir	Trakya fm., çamurtaşı	5	27.47	0.80	5.99
9	Diyabaz	Trakya fm., çamurtaşı	5	28.26	0.31	5.62
10 A	Lamprofir	Tuzla fm. kireçtaşı	2	28.94	1.29	5.08
10 B	Andezit	Tuzla fm. kireçtaşı	2	27.83	1.22	5.14

Çizelge 2. İncelenen kayaların mekanik özellikleri ve gevreklik değerleri.

Örnek noktası	Young Modülü (GPa)	Poisson oranı	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	Çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyesi (MPa)	Brezilyan çekme dayanımı (MPa)	Gevreklik değerleri	
						B ₁	B ₂
1 A	44.5	0.10	169	54	13	14	1209
1 B	25.4	0.07	95	30	7.25	28.6	874
2	27	0.07	158	46	10.9	14.4	852
3	46	0.11	224	57	10.44	20.12	1170
4	43	0.1	229	57	16	14.3	1847
5	41	0.09	175	53	11.5	14.9	1050
6	47	0.10	240	67	9	28	1230
7			136		14.0	10.02	937
8	41	0.09	194	55	8.7	23	852
9	92	0.27	165	65	12	14.3	1010
10A	42	0.11	100	34	8.8	11.02	426
10B	26	0.1	113	37	11.2	10.98	688

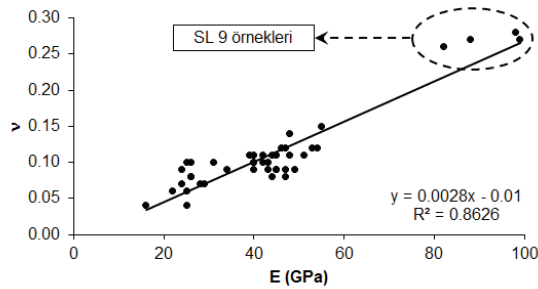
Bu çalışmada değerlendirilen magmatik kayalar 170 MPa ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değeri sunmaktadırlar. UCS değerleri farklı örnekleme bölgeleri için değişkenlikler sunsa da aynı lokasyon içerisindeki dayanım değerleri birbirleri ile uyumludur. Bunun yanında, UCS değerlerindeki farklılıkların temel sebebi çalışılan kayaların iç yapıları ile ilişkilidir. Bu bulguyu açıklar nitelikte, Tapponier ve Brace (1976) mineralojik ve petrografik özelliklerdeki küçük değişimlerin kaya davranışında önemli değişiklikler yapabileceğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada mikro-yapısal değişiklikler hamur/iri kristal oranı ve mineralojik özellikler ile açıklanabilir. Buna ek olarak, karot alımı sırasında dahi gözlenemeyen kılcal çatlakların etkisi unutulmamalıdır.

İncelenen magmatik kayalara ait Young modülü ve Poisson oranları UCS değerleri ile karşılaştırıldığında nispeten daha dar bir aralıktadırlar (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışılan kayaların mekanik özelliklerinin gösterimi. Dikkat edilmelidir ki, Young modülündeki ölçek etkisi düzeltildiğinde de benzer bir dağılım elde edilmektedir.

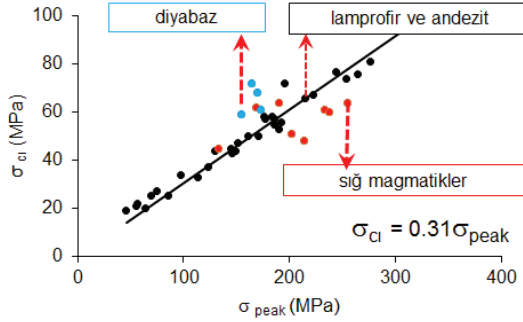
Çalışılan magmatik kayalar için Young modülü arttıkça Poisson oranında artış gözlenmektedir. Böylece yanal deformasyon düşey deformasyona oranla daha hızlı artmaktadır (Şekil 4). Bu durum kayanın gevrekliğini etkilemektedir. Aydın vd., (2001) benzer ilişkilerinden bahsetmiştir. SL 9 noktasından alınan Young modülü ve Poisson oranı değerleri diğer örneklerden oldukça yüksek değerler sunmaktadır. Bu durum Şekil 4'te de görülmektedir. Bu farklılık büyük olasılıkla diyabaz bileşimli bu örneklerin diğer örneklere göre farklı petrografik ve mineralojik içeriğinden meydana gelmektedir.



Şekil 4. Magmatik kayalar için Poisson oranı ve Young modülü arasındaki ilişki.

Çalışılan magmatik kayalarda çatlaklanmalar tek eksenli gerilme koşullarının ortalama 0.31'i seviyelerinde başlamaktadır. Diyabaz ve diğer sığ magmatik kayalara (SL3 ve SL4, Şekil 1) ait veriler diğer örneklere ait verilere göre farklılık göstermektedir (Şekil 5). Bu durum diyabazın ve diğer sığ magmatik kayaların iç yapılarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle sığ magmatik kayaların mikro süreksizlikleri içerisinde pirit mineralleri bulunmaktadır ve mineraller

boyunca çok gevrek kırılmalar meydana gelmektedir. SL 4 örneklerinin farklı davranması bu süreksizliklerdeki pirit gelişimi ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5. İncelenen kayalar için çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasındaki ilişki.

Kayaların gevreklikleri yeraltı kazılarında kazı performansında ve destek sistemlerinin belirlenmesinde değerlendirilen önemli bir kaya parametresidir. Çalışma sırasında, literatürde gevreklik değerlerini bulmada sıklıkla kullanılan eşitlikler (Eşitlik 1 ve 2) kullanılmıştır. Bu bağlamda kullanılan formüller yardımı ile bulunan gevreklik değerleri mekanik özellikler arasındaki ilişkiler çoklu regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. Gevreklik değerlerinin tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme gerilmesi, Young modülü ve poisson oranı ile değiştiği ortaya konmuştur. Bununla birlikte B_1 değeri, Lee vd. (2004) ve Diederichs (2007) tarafından orta çatlaklıdan masife kadar olan kaya kütlelerinde, 15'ten büyük olduğu durumlarda kavlaklanma analizlerinde kullanılabilirliklerini önermişlerdir. Kavlaklanma analizleri özellikle düşük çevre gerilmeli ortamlardaki derin tünellerin uzun dönem duraylılıklarını değerlendirmede kullanılmaktadır. Bunun yanında, Altındağ (2000) artan B_2 değerleri ile kayaların gevreklik özelliklerinin arttığını ifade etmiştir

$$B_1 = \sigma_c / \sigma_t \quad (1)$$

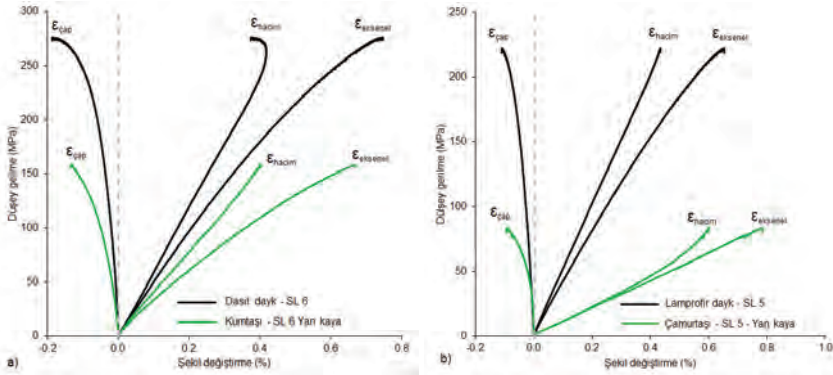
$$B_2 = (\sigma_c / \sigma_t) / 2 \quad (2)$$

Bu çalışmada değerlendirilen magmatik kayalar sokulum yaptıkları yan kayalar veya sınırlarındaki sedimanter kayalara göre oldukça gençtirler (Aysal vd., 2015). Bu sebeple taze ve ayrışma etkisinden uzak olan bu magmatik kayalar çok daha az süreksizlik içermektedirler (Şekil 6). Bu durum özellikle tünellerde kavlaklanma analizlerinin yapılmasının önemini ortaya koymaktadır. Şekil 6 felsik bileşimli bir dayk ile yanındaki çamurtaşının dokanağını ve blok örnek alınan yerleri de göstermektedir.



Şekil 6. Daykların ve yan kayaların alındığı örnek noktalarından bir görünüm. SL: Örnek noktası

Çalışılan dayklar ve diğer magmatik kayalar yan kayalarından daha farklı dayanım ve deformasyon özellikleri sunmaktadır. Bu farklılıklar özellikle daha yüksek tek eksenli sıkışma dayanımı ve Young modülü şeklindedir (Şekil 7).



Şekil 7. Daykların ve yan kayalara ait gerilme şekil değişime diyagramları a) Dasit daykı-çamurtaşı ilişkisi b) andezit daykı-kumtaşı ilişkisi.

Şekil 7a'da Dasit bileşimli daykın tek eksenli sıkışma dayanımı 276 MPa, Young modülü ise 49 GPa içine sokulum yaptığı kumtaşının tek eksenli sıkışma dayanımı 158 MPa, Young modülü ise 29 GPa'dır. SL5 örnek yerinden elde edilen andezit daykının tek eksenli sıkışma dayanımı 276 MPa Young modülü 49 GPa, içine sokulum yaptığı çamurtaşının tek eksenli sıkışma dayanımı 83 MPa, Young modülü ise 10 GPa'dır (Şekil 7b). Her iki durumda da daykların yan kayalardan oldukça yüksek dayanım değerleri verdiği ve Young modüllerinin dikkate değer şekilde yüksek olduğu belirgindir.

5. SONUÇLAR

İstanbul'un altyapı ihtiyaçlarının giderilmesi için pek çok yeraltı yapısı inşa edilmekte ve planlanmaktadır. Böylece dayk, diğer magmatik kayalar ve bunların yan kayalar ile ilişkileriyle daha fazla karşılaşılmakta ve çeşitli sorunlar oluşmaktadır. Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar ortaya koymuştur. Çalışılan tüm magmatik kayalar yan kayalara göre daha az süreksizlik içermektedir. Bu kayalarda, çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri 0.22-0.44 UCS arasında değişmekte olup ortamala 0.31 UCS gerilme seviyelerinde gerçekleşmektedir. Bunun yanında magmatik kayaların Young modülleri yan kayalara göre oldukça yüksektir. Çalışılan kayalarda açılacak derin tünellerde

kavaklanma analizlerinin yapılması tünellerin uzun dönem performanslarının değerlendirilmesinde önemli olacağı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre İstanbul Paleozoyik istifinde yapılacak yeraltı çalışmalarında çeşitli boyutlarda dayklar ile karşılaşılması kaçınılmazdır. İstanbul genelinde rastgele dağılmış bu daykların boyutları, bileşimleri ve yönelimleri hakkında ön bilgiler edinilmesi yeraltında yapılacak kaya yapılarının açılması sırasında ve uzun dönem performansları açısından maliyet ve zaman tasarrufu sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 116Y349 numaralı proje ile desteklenmektedir. Yazarlar, mekanik deneylerin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı İsviçre Yüksek Teknoloji Enstitüsü (ETH) Mühendislik Jeolojisi Kürsüsünden Florian Amann ile iç yapı özelliklerinin tanımlanmasındaki yardımlarından dolayı İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Öğretim Üyesi Namık Aysal'a teşekkür ederler.

7. KAYNAKLAR

- Altındağ, R. 2000. The role of rock brittleness on the analysis of percussive drilling performance (in Turkish). Proc. 5th Turkish National Rock Mechanics Symp. Isparta, Turkey pp.105-112.
- Aydan, Ö., Geniş, M., Akagi, T. and Kawamoto, T. (2001) Assessment of susceptibility of rock bursting in tunnelling in hard rocks. Proc. of the International Symposium on Modern Tunneling Science and Technology (eds. Adachi), Swets & Zeitlinger, Vol. 1, pp.391-396.
- Aysal N., Keskin M., Peytcheva I., Duru O., Akgündüz S. 2015. Geochronology, Geochemistry and Isotope Systematics of a Mafic-Intermediate Dyke Complex in the İstanbul Zone, Northern Turkey, Goldschmidt 2015, Prague, pp.155-155.
- Bieniawski, Z.T., 1967. Mechanism of brittle failure of rock part I—theory of fracture process. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanical Abstracts 4 (4), 395–406.
- Bilgin, N., Çopur, H., Balci, C. 2016. TBM Excavation in Difficult Ground Conditions: Case Studies from Turkey. Wiley, p. 354. ISBN: 978-3-433-03150-6.
- Diederichs, M.S., 2007. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling. Canadian Geotechnical Journal. 44, 1082–1116.
- Hucka, Y., Das, B., 1974. Brittleness determination of rocks by different methods. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanic Abstracts 11:389–392.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1981. In: Brown, E.T. (Ed.), Rock Characterization Testing and Monitoring — ISRM Suggested Methods. Pergamon, New York.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. Kozan, Ankara, pp 1974–2006.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi Jeoloji Haritası. 2011.
- Kaiser, P.K. and Cai, M., 2012. Design of rock support system under rockburst condition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 4 (3): 215–227.
- Lajtai, E.Z., 1974. Brittle fracture in compression. International Journal of Fracture 10 (4), 525–536.
- Lee, S.M., Park, B.S. and Lee, S.W. 2004. "Analysis of rockbursts that have occurred in a waterway tunnel in Korea". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Volume 41, Supplement 1, p. 911–916 - Proceedings of the ISRM SINOROCK 2004 Symposium
- Nicksiar, M., Martin, C.D., 2013. Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks. Engineering Geology 154, 64–76.
- Önalın, M., 1981, İstanbul Ordovisiyen ve Silüriyen İstifinin Çökme Ortamları, İstanbul Yerbilimleri Dergisi. c. 2, 3-4, 161-177.
- Penck, W., 1919. Grundzüge der Geologie des Bosphorus, Veröffentlichungen Des Instituts Für Meereskunde, Geol.- Naturw, Reihe, H. 4, Berlin.
- Tapponnier, P., Brace, W.F., 1976. Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanic Abstracts 13, 103–112.
- Ündül, Ö., Amann, F., Aysal, N., Plötze, M., 2015. Micro-textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks. Engineering Geology 193, 267–275.

Güzelbahçe Balıkçı Barınağında Anroşman Olarak Kullanılan Kayaçların Kalite Açısından Değerlendirilmesi (Güzelbahçe/İzmir)

The Investigation of Armourstones Quality used in Rubble Mound Breakwater (Güzelbahçe/İzmir)

M.H. Aboubacar, A.B. Yavuz*

*Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35397 Buca-İzmir
(*bahadir.yavuz@deu.edu.tr)*

ÖZ: Kayaçlar sahip oldukları erişilebilirlik, dayanıklılık, kalite ve sert çevre koşullarında sundukları performans nedeniyle eski çağlardan beri hidrolik yapıların korunması amacıyla zırh taşı olarak deniz, baraj, gölet ve nehir kıyılarında kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, 2012-2015 yılları arasında Güzelbahçe'de (İzmir/Türkiye) yapılan balıkçı barınağı inşaatında kullanılan zırh taşlarının kalitelerinin araştırılmasıdır. Güzelbahçe balıkçı barınağı zırh taşlarının kalitesinin saptanması amacıyla taş ocakları ve bu ocaklardan temin edilen kaya blokları üzerinde yürütülen arazi ve laboratuvar çalışmalarında, Hidrolik Mühendisliğinde Kaya Kullanımı (CIRIA / CUR / CETMEF 2007) ve Kaya Mühendisliği Değerlendirme Sistemi (RERS) olmak üzere iki farklı kaya kalite değerlendirme sisteminde öngörülen prosedür uygulanmıştır. Üç farklı taş ocağında malzeme özellikleri açısından 4 ayrı kaya grubu tanımlanmış ve laboratuvar çalışmaları bu 4 farklı kaya türü üzerinde yürütülmüştür. Sonuç olarak Haynes kireçtaşı, breşik kireçtaşı ve Doğanbey kireçtaşı iyi kaliteli, serpantin it ise mükemmel kaliteli kaya malzemesi olarak nitelendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zırh taşı; kalite; CIRIA/CUR/CETMEF, 2007; RERS; dalgakıran; taş ocağı.

ABSTRACT: Stones have been used for protection of hydraulic structures since ancient times and continue to be used in the modern era because of their accessibility, durability, quality, and good performance. Amourstones are used in harsh environmental conditions such as marine, coastal, fluvial etc. The aim of this study is to investigate the quality and suitability of armourstones provided from 3 different quarries and used in Rubble mound breakwater which was constructed between 2012 and 2015 in the district of Güzelbahçe (Izmir). In this study, the quality of armourstones is assessed according to CIRIA/CUR/CETMEF 2007 Rock manual, and Rock Engineering Rating System (RERS). The study was conducted in field and in the laboratory. Four different types of stones were indentified in the three quarry and the laboratory experiments were carried out on them. Based on the two quality classification methods used Haynes limestone, brecciated limestone and Doganbey limestone were considered good quality materials and serpentinite was qualified as excellent quality rock material.

Keywords: Armourstones; quality; CIRIA/CUR/CETMEF, 2007; RERS; breakwater; quarry.

1. GİRİŞ

2012-2015 yılları arasında İzmir Körfezi güney kıyısında yer alan Güzelbahçe İlçesi'nde 775 m uzunluğu olan 250 tekne kapasiteli bir balıkçı barınağı inşaa edilmiştir (Şekil 1). Oldukça büyük çaplı bir kıyı yapısı olan bu projenin ihtiyaç duyduğu zırh taşları yörede yer alan Karabacak mermer ocağı ile Haynes ve Doğanbey taş ocakları olmak üzere 3 farklı kaynaktan temin edilmiştir. Haynes ve Doğanbey taş ocaklarında delme ve patlatma yöntemi ile kırmataş üretimi yapılırken, Karabacak mermer ocağında ise tel kesme yöntemi ile blok mermer üretimi yapılmaktadır. Bu nedenle balıkçı barınağı inşaatında, Karabacak mermer ocağının pasa sahasında birikmiş olan kaya blokları anroşman olarak kullanılmıştır. Taş ocakların tamamı yörede geniş bir yayılım sunan Bornova filiş karmaşığı içerisinde tek taş konumunda bulunan irili ufaklı kaya bloklarında yer almaktadır. Güzelbahçe ilçesinin güneyinde yer alan Karabacak mermer ocağı balıkçı barınağına yaklaşık 5 km mesafededir. Ofiyolitik melanj niteliğindeki kaya bloğunda yer alan mermer ocağında, mermer sektöründe Teos

ateşi ve Teos yeşili isimleri verilen kırmızı ve gri renkli kireçtaşı çakılları içeren ve volkanik bir matriks ile çimentolanmış breşik karelerdeki siyah renkli kireçtaşları ile yeşil renkli serpantinler içerisinde blok mermer üretimi yapılmaktadır (Şekil 1). Güzelbahçe ilçesinin güneyinde bulunan Seferihisar ilçesi sınırlarında yer alan Haynes taş ocağı, Güzelbahçe balıkçı barınağına yaklaşık 20 km uzaklıkta bulunmaktadır. Bu ocaktan gri renkli kristalin kireçtaşları üretilmektedir. Doğanbey taş ocağı ise Seferihisar ilçesi'nde ve balıkçı barınağından yaklaşık 27 km uzakta yer almaktadır. Bu taş ocağından da gri renkli kristalin karelerde kireçtaşları üretilmektedir (Şekil 1). Bu çalışmada Güzelbahçe balıkçı barınağı inşaatında zırh taşı olarak kullanılmış olan ve üç farklı kaynaktan temin edilmiş olan dört farklı kaya türünün zırh taşı (anroşman) olarak kaliteleri saha ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar ilgili standartlarda öngörülen kriterler baz alınarak araştırılmıştır.



Şekil 1. a. Malzeme temin edilen taş ocaklarının konumları: 1. Karabacak mermer ocağı; 2. Haynes taş ocağı ve 3. Doğanbey taş ocağı ve b. Güzelbahçe balıkçı barınağı (Google EarthTM).

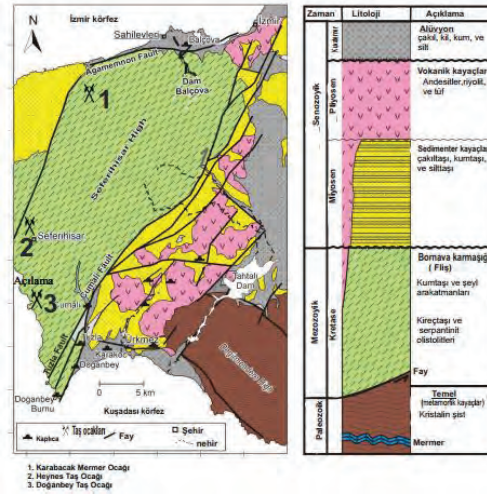
Zırh taşları değişik araştırmacılar veya değerlendirme sistemleri tarafından farklı şekillerde tanımlanmıştır. ASTM D653-14 (2014)'e göre zırh taşı erozyon kontrolünde kullanılan, patlatma, kesme veya diğer yöntemle elde edilen ve ağırlıkları genellikle 1-3 ton arasında olan kaya blokları şeklinde tanımlanmıştır. CIRIA / CUR (2007) kaya kalite belirleme sisteminde zırh taşları hidrolik yapılarda ve diğer kıyı mühendisliği projelerinde kullanılan kaba agrega olarak tanımlanmıştır. CEN, (1996)'de zırh taşları, hidrolik koruma ve düzenleme yapılarında kullanılan 0.25 tondan daha ağır farklı ebat ve düzensiz şekillerdeki kaya blokları olarak tanımlanmıştır. Latham (1991), zırh taşlarını kıyı yapılarında kullanılan ve ağırlıkları 1-20 ton arasında değişen şekilsiz kaya blokları olarak tanımlamıştır. Příkryl (2017), zırh taşlarını tercihen magmatik ve metamorfik, alternatif olarak yoğun sedimanter kayalardan üretilmiş, düzensiz şekle sahip büyük kaya blokları olarak tanımlamıştır.

Kıyı yapılarında zırh taşı olarak kullanılan kayaların kalite ve performans değerlendirmeleri konusunda çok sayıda araştırma yapılmıştır (Smith, 1999; Lienhart, 1998; Latham, 1998; Acır vd., 2010; Ertaş vd., 2007; Özden vd., 2009). Bu çalışmalarda zırh taşı kalitesinin belirleme testlerinin, kullanılması planlanan kayaların kalitesinin belirlenmesinin yanısıra iki veya daha fazla kayanın zırh taşı olarak kalitesinin karşılaştırması yapılmıştır.

1.1. Bölgesel Jeoloji

Çalışma alanı Bornova Fliş Zonu'nda (Bornova Mélange veya BFZ) bulunmatadır. Bornova Fliş Zonu, Menderes Masifi ile İzmir-Ankara Kenet Kuşağı arasında 50 ile 90 km genişliğinde ve 230 km uzunluğunda bir tektonik zon oluşturmaktadır (Okay vd., 2012). Bornova Fliş Zonu, Mastrichtiyen-Erken Paleosen döneminde Anatolid-Torid karbonat platformunun hızlı bir şekilde kumtaşı-şeyl ardalanmasından oluşan radyolaritli derin deniz çökelleri içine yıkılması ile oluşmuştur. BFZ, İzmir-Ankara Kenet Kuşağı'nın bir parçasıdır ve Kütahya-Bolkardağ Kuşağı batı uzantısını temsil eder (Göncüoğlu vd., 1992). Değişik metamorfizma derecelerine sahip ofiyolitlerden ve yığılma karmaşığında meydana gelmektedir. İçyapısını çoklu tektonik dilimler halinde ve bu dilimlerin kırıntılı sedimanter birimleri içeren İzmir-Ankara Okyanusu'nun melanj kompleksi ile Anatolid-Torid Platformu (ATP) ait kıymıkları oluşturmaktadır. Matriks içinde değişik boyutlarda (birkaç m ile km)

kireçtaşı olistostromları bulunmaktadır (Göncüoğlu vd., 1996; 2003). Kaotik olarak deforme olmuş Geç Mاستrihtiyen-Erken Paleosen yaşlı kumtaşı, bant ve mercerler şeklinde Mesozoyik kireçtaşı, okyanus ortası mafik volkanik kaya, radyolarye çört ve serpantinit mercer veya bloklarından oluşur (Erdoğan 1990; Okay vd, 1996). BFZ'da kuzeye doğru, olistostromatik matriksin miktarı azalır, ofiyolit ve kireçtaşı blokları fliš (kumtaşı-şeyl aralanması) içinde baskınlaşmaktadırlar. Bornova Filiş Zonu kayaları uyumsuz olarak Erken-Orta Miyosen Yamanlar andezitik-dasitik bileşimdeki volkanikler ve volkanoklastikler tarafından örtülmektedir (Uzel vd., 2012). Çalışma alanı içindeki önemli yükseltiyi oluşturan Seferihisar horstu, 30 km uzunluğundaki Seferihisar fayı, 35 km uzunluğundaki Tuzla fayı ve 50 km uzunluğundaki İzmir fayı gibi üç aktif fay tarafından sınırlanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Basitleştirilmiş jeolojik harita ve Seferihisar bölgesinin genelleştirilmiş stratigrafisi şeması (Magri vd., 2010; Kaftan vd., 2011; Uzel vd., 2012).

2. YÖNTEM

Çalışmanın ilk aşamasında Güzelbahçe Balıkçı Barınağı'nda yapılan saha gözlemleri neticesinde, barınak inşaatında kullanılan kaya türleri yerinde tespit edilmiştir. Daha sonra Ulaştırma Bakanlığı İzmir Bölge Müdürlüğü ile yapılan görüşmeler neticesinde bu kayaların temin edildiği taş ocakları ve lokasyonları belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında zırh taşı (anrozman) temin edilen taş ocakları şev aynalarında yerden 1.5 m mesafedeki yatay bir hat boyunca yürütülen detay süreksizlik düzlemi ölçümleri ile kaya kütlelerinin içerdiği süreksizlik düzlemlerinin türü, ara uzaklıkları, konumları, devamlılıkları, ayrışma durumları ve yeraltı suyu varlığı gibi parametreler saptanmıştır. Çalışmanın üçüncü aşamasında, taş ocaklarından blok kaya numuneleri alınmıştır. Karabacak mermer ocağında breşik kireçtaşları (BK) ile serpantinitler (S) içerisinde üretim yapıyor olması nedeniyle bu ocağın farklılık sunan iki ayrı bölümünden de blok kaya numuneleri alınmıştır. Alınan kaya bloklarından elde edilen kaya numuneleri üzerinde yürütülen laboratuvar çalışmaları ile kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri ve kimyasal bileşimleri saptanmıştır. Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yürütülen çalışmalarda kaya numunelerinin mineralojik ve petrografik özellikleri ince kesitler üzerinden petrolojik (polarizan) ve paleontolojik (flüoresan) mikroskoplar yardımı ile belirlenmiştir. Kayaların kimyasal bileşimleri ise GBC avatanta Σ marka atomik absorpsiyon spektrometre cihazı ile saptanmıştır. Daha sonra kayaların gözeneklilik, atmosfer basıncında ağırlıkça su emme, kuru P dalga hızı gibi fiziksel özellikleri ile tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme indeksi, Brazilian indirek çekme dayanımı ve kırılma tokluğu

gibi mekanik özellikleri saptanmıştır. Kırılma tokluğu Zhang vd. (2002), tarafından önerilen ampirik yöntemle belirlenmiştir.

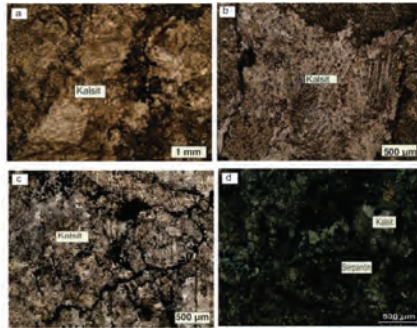
3. BULGULAR

3.1. Kayaçların mineralojik ve petrografik özellikleri

Haynes Taş Ocağı: Bu taş ocağından kristalin doku ve izotropik yapıda, ince- orta taneli kireçtaşları (HK) üretilmektedir. Kireçtaşlarının mineral şekilleri prizmadan amorf şekle kadar değişmekte ve tane sınırları boylamasına ve düzensizdir. İnce kesitin rengi kahverengidir. Minerallerin çevresinde ve mikro çatlakların çevresinde kırmızı demir oksit boyası görülmektedir. Kayada esas olarak kalsit ve aksesuar mineral oksitler, kil ve kuvars bulunmaktadır. Dolgu malzemeleri ağırlıklı olarak opak mineraller, kalsit ve kil mineralleridir. Opak mineraller çatlaklar boyunca ve matriks içinde dağılmış şekilde görülmektedir (Şekil 3a).

Doğanbey Taş Ocağı: Doğanbey Taş Ocağı'ndan ince- orta taneli kristalin yapı ve izotropik dokuya sahip kireçtaşları (DK) üretilmektedir. Kireçtaşlarının kristal şekilleri düzensiz-prizmatiktir. Tane sınırları boyuna ve düzensizdir. Çoğunlukla kalsit mineralinden oluşan kayaç içerisinde opak mineral oksitleri ile kil mineralleri tespit edilmiştir (Şekil 3b).

Karabacak Mermer Ocağı: Ofiyolitik melanj niteliğindeki bir kaya bloğunda yer alan mermer ocağında, mermer sektöründe Teos ateşi ve Teos yeşili isimleri verilen kırmızı ve gri renkli kireçtaşı çakılları içeren siyah renkli volkanik bir matrikse kireçtaşları (BK) ile serpantinler (S) içerisinde blok mermer üretimi yapılmaktadır. Kaya bloğunun breşik kireçtaşı niteliğindeki bölümünün ince-orta taneli kristalimsi kireçtaşı olduğu ve izotropik doku sunduğu saptanmıştır. İnce kesitteki renk kahverengiden kırmızıya değişmektedir. Başlıca kalsit mineralinden oluştuğu saptanan kayacın, hematit, manyetit, amfibol, klorit ve kuvars minerallerini de içerdiği belirlenmiştir. Tane şekilleri düzensiz -prizmatik olan kayacın tane sınırları uzunlamasına ve düzensizdir. Breşik kireçtaşının dolgu malzemelerinin bazaltik ürünler ile kalsit ve manyetit mineralleri olduğu görülmüştür (Şekil 3c). Karabacak Mermer Ocağı'nın serpentin niteliğindeki kısmının ise izotropik dokulu ince taneli kristalimsi karbonatlı serpentin olduğu belirlenmiştir. İnce kesitteki kaya örneğinin rengi yeşil ile kahverengidir. Kristal şekilleri prizmatik, iğnemi, lifli ve düzensizdir. Tanelerin sınırları boyuna ve düzensizdir. Kayacın esas olarak serpantin, kalsit, dolomit (ankerit) ve azınlık amfibol, talk ve opak minerallerden oluştuğu belirlenmiştir. Dolgu malzemeleri ise talk ve kalsittir. Matriks içerisinde dağılmış amorf opak mineraller gözlenen kayaç kalsitik damarlar içermektedir (Şekil 3d). Kayaçların kil içeriklerinin tespit edilmesi için kaya örnekleri üzerinde metilen mavisi deneyi ile XRD analizleri yapılmıştır. Metilen mavisi testi değerlerinde tüm kayaçlar için benzer değerler elde edilmiştir. Düşük metilen mavisi emme değerleri dikkat çekicidir ancak tüm kaya türleri için metilen mavisi test sonuçları pozitifdir. Kayaçlar içerisinde düşük miktarda kil minerali varlığı, numuneler üzerinde yürütülen XRD analizleri ile teyit edilmiştir.



Şekil 3. İnce kesit görüntüleri: a. Haynes kireçtaşı (HK), b. Doğanbey kireçtaşı (DK), c. Breşik kireçtaşı (BK), ve d. Serpantin (S).

3.2. Kayaçların Fiziksel Özellikleri

Yapılan laboratuvar incelemeleri sonucunda Güzelbahçe Balıkçı Barınağı'nda kullanılan kayaçların tamamının görünür porozitelerinin % 1'den düşük değerlerde oldukları ve Anon (1979)'a göre düşük poroziteli kayaçlar grubunda yer aldıkları, ağırlıkça su emme değerlerinin % 0.5'in altında olduğu saptanmıştır (Çizelge 1). Kütle yoğunluğu açısından incelenen kayaçların tamamı, zırh taşı olarak kullanılması düşünülen kayaçlar için belirtilen kütle yoğunluğu sınır değeri olan 2.3 t/m^3 'nin üzerinde olduğu belirlenmiştir (EN 13383). Kayaçların kuru haldeki P dalgası hızlarının 5764 ile 6198 m/s arasında değiştiği saptanmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Fiziksel özellikler test özeti.

Deney	Standartlar ve Yöntemler	Numune sayısı	Deney (Ortalama ±STD)		Sonuçları (±STD)	
			HK	DK	BK	S
Etkin porozite (%)	ASTM C 97-83	30	0.08 ± 0.03	0.19 ± 0.09	0.15 ± 0.06	0.72 ± 0.55
Ağırlıkça su emme (%)	ASTM D6473-15	30	0.03 ± 0.01	0.07 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.27 ± 0.21
Kütle yoğunluğu (t/m^3)	ASTM D6473-15	30	2.71 ± 0.02	2.72 ± 0.00	2.79 ± 0.06	2.74 ± 0.04
Kuru P dalga hızı (m / s)	ASTM D2845-00	20	6198 ± 135	5989 ± 192	6025 ± 185	5764 ± 415
Donma-çözünme den sonra sonik hız azalması (%)	EN1367-1:2000	8	28.39	21.23	19.19	3.69
Metilen mavisi (g / 100)	AFNOR 1993	1	0.33	0.33	0.33	0.33

3.3. Kayaçların Mekanik Özellikleri

Güzelbahçe Balıkçı Barınağı'nda zırh taşı olarak kullanılan kaya türlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yürütülen laboratuvar çalışmaları sonucunda HK, DK, BK ve S numunelerinin kuru haldeki tek eksenli basınç dayanımlarının sırasıyla 78.5 MPa, 80.09 MPa, 86.58 MPa, ve 134.84 MPa olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2). ISRM (1981)'ye göre HK, BK ve DK yüksek dayanımlı kayaçlar, S ise çok yüksek dayanımlı kayaçlar grubuna girmektedir (Çizelge 2). Nokta yükleme dayanım indeksi test sonuçlarına göre kayaçlar Bieniawski (1984)'e göre sınıflandırılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Mekanik özellikleri test sonucunun özeti.

Deney	Standart ve Yöntemler	Test sonuçları (Ortalama±STD)			
		HK	DK	BK	S
Tek eksenli basınç, kuru, (MPa)	ISRM, 1981	78.57 ± 12.14	80.09 ± 11.45	86.58 ± 11.99	134 ± 16.53
Nokta yükleme indeksi, kuru, (MPa)	ASTM D5731-08	3.73 ± 1.77	3.89 ± 1.54	5.48 ± 0.87	10.87 ± 2.43
Brazilian çekme direnci, kuru (MPa)	ISRM, 1981	8.48 ± 1.41	8.74 ± 1.41	9.07 ± 1.36	13.84 ± 3.16
kırılma tokluğu (MPa.m 1/2)	ISRM, 2007-2014	1.23	1.27	1.32	2,01
Los Angeles (%)	BS EN 1097-2	30.15	24.35	22.85	14.02
Mikro-Deval (%)	TS EN 1097-1	28.44	22.28	24.05	16.58

Bu sınıflandırmaya göre HK ve DK orta dayanımlı, BK yüksek dayanımlı ve S'nin ise çok yüksek dayanımlı kayaçlar grubuna girdiği belirlenmiştir. Numunelerin Brazilian indirek çekme direnci değerlerinin 8.48 MPa ile 13.84 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Çizelge 2). Kayaçların zırh taşı

olarak kullanılabilirliğinin değerlendirildiği sınıflandırmalarda kırılma tokluğu değeri incelenmesi gereken bir parametredir. Bu çalışmada kayaçların kırılma tokluğu değeri Zhang vd. (2002)'tarafından önerilen eşitlik ve kayaçların Brazilian indirek çekme dayanım değerleri kullanılarak, ampirik yöntemle saptanmış ve kayaçların kırılma tokluğu değerlerinin 1.23 ve 2.01 KIC (MPa.m^{1/2}) arasında olduğu belirlenmiştir. Los Angeles darbeli aşınma kaybı değerlerinin % 14.02 ile % 30.15 arasında ve micro-deval aşınma kaybı değerlerinin ise % 16.58 ile % 28.44 arasında değiştiği belirlenmiştir.

3.4. Kayaçların Durabilite Özellikleri

Güzelbahçe Balıklı Barınağı'nda kullanılan kayaçlar durabilitelerinin saptanması amacıyla donma-çözünme, ıslanma-kuruma ve tuz kristallenmesi (MgSO₄) gibi hızlandırılmış ayrıştırma deneylerine tabii tutulmuştur (Çizelge 3). Donma-çözünme ve ıslanma-kuruma deneyleri sonrasında kaya numunelerinde son derece düşük değerlerde kütle kaybı geliştiği saptanmıştır (Çizelge 3). Donma-çözünme deneyi sonrasında kayaçlarda % 0.05 ile % 0.07 arasında, ıslanma-kuruma deneyleri sonrasında ise % 0.03 ile % 0.06 arasında kütle kaybı geliştiği belirlenmiştir (Çizelge 3). Tuz kristallenmesi deneyinde ise kaya malzemelerinde gelişen kütle kaybı değerlerinin %6.47 ile % 17.45 arasında değiştiği belirlenmiştir. EN 13383-1:2002 standardına göre zırh taşı olarak kullanılması düşünülen kaya malzemelerinin magnezyum sülfat tuz kristallenmesine bağlı kütle kayıplarının %25'in altında olması gerektiği belirtilmiştir.

Çizelge 3. Hızlandırılmış ayrıştırma deney sonuçları.

Deney	Numune sayısı	Deney Sonuçları			
		HK	DK	BK	S
Donma-çözünme (%)	8	0.05	0.07	0.05	0.07
Islanma-kuruma (%)	8	0.04	0.06	0.03	0.05
Magnezyum sülfat (%)	2	9.79	12.66	6.47	17.45

3.5. Kayaçların Anroşman Olarak Kullanılabilirlikleri Açısından Kalite Sınıfları

Güzelbahçe Balıklı Barınağında kullanılan kayaçların anroşman olarak kullanılabilirlikleri açısından kaliteleri CIRIA / CUR (2007) ve RERS kalite sınıflandırma sistemlerinde öngörülen parametreler göz önüne alınarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4'de sunulmuştur. Kayaçların kütle ve malzeme özelliklerinin baz alındığı CIRIA / CUR kalite sınıflandırma sisteminde kayaçlar mükemmel, iyi, marjinal ve düşük gibi kalite sınıflarına ayrılmaktadırlar. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre Haynes, Breşik ve Doğanbey kireçtaşı CIRIA / CUR kalite sınıflandırma sisteminde iyi ve mükemmel kategorisinde yer alırken, serpantin ise mükemmel sınıfta yer almıştır (Çizelge 4). Zırh taşlarının RERS sınıflandırma sistemine göre saptanan anroşman kalite derecelerinin (AQD) 2.84 ile 3.66 arasında değerler aldığı belirlenmiştir. Bu verilere göre AQD kalite sınıfı açısından Haynes, Breşik ve Doğanbey kireçtaşları marjinal-iyi, serpantin ise iyi ile mükemmel arasında kalite değerleri sunmaktadırlar (Çizelge 4).

4. SONUÇLAR

İzmir Güzelbahçe Balıklı Barınağının inşasında zırh taşı (anroşman) olarak kullanılan ve üç ayrı ocaktan temin edilen 4 farklı kayacın bu amaç için sahip oldukları kalite sınıfları CIRIA / CUR ve RERS zırh taşı sınıflandırma sistemlerine göre ayrı ayrı saptanmıştır. CIRIA/CUR kalite sınıflandırma sistemine göre Haynes ve Doğanbey taş ocaklarından üretilen kireçtaşları ile Karabacak mermer ocağından üretilen ve mermer sektöründe Teos ateşi olarak bilinen breşik kireçtaşlarının genellikle iyi ve mükemmel kalite sınıfta yer aldığı, Karabacak mermer ocağından üretilen ve Teos yeşili ismi ile bilinen serpantinlerin ise mükemmel kalite sınıfta yer aldıkları belirlenmiştir. RERS sınıflandırma sistemine göre Haynes taş ocağından üretilen kireçtaşlarının marjinal-iyi kalite sınıfta, Karabacak Mermer Ocağı'ndan üretilen breşik kireçtaşlarının (Teos ateşi) ve Doğanbey Taş Ocağı'ndan üretilen kireçtaşlarının iyi kalite sınıfta ve Karabacak Mermer Ocağı'ndan üretilen serpantin (Teos yeşili) ise iyi-mükemmel kalite sınıfta yer aldığı saptanmıştır. Sonuç olarak test edilen kayaçların iki farklı

sınıflandırma sistemi sonuçları doğrultusunda zırh taşı malzemesi olarak kullanım açısından uygun oldukları saptanmıştır.

Çizelge 4. Alan ve laboratuvar kriterlerine dayanan CIRIA / CUR kalite sınıflandırması.

Kriterler	Kalite sınıfları			
	HK	DK	Bk	S
Litolojik sınıflandırma	İyi	İyi	İyi	Mükemmel
Bölgesel yerinde stres	Marjinal	Marjinal	Marjinal	Marjinal
Ayrışma derecesi	İyi	İyi	İyi	İyi
Yeraltı su durumu	Marjinal	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Üretim yöntemi	İyi	İyi	Mükemmel	Mükemmel
Taş şekli ve ayrışma derecesi	İyi	İyi	İyi	Mükemmel
Zırh taşı bütünlüğü	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Petrografik değerlendirme	İyi	İyi	İyi	Mükemmel
Kütle yoğunluğu (t/m^3)	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Su emme (%)	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Etkin gözeneklilik (%)	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Metilen mavi emilmesi (g/100g)	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Basınç dayanımı (MPa)	Marjinal	İyi	İyi	Mükemmel
Sonik hız (km/s)	Mükemmel	İyi	Mükemmel	İyi
Nokta yükleme direnci (MPa)	Marjinal	Marjinal	İyi	Mükemmel
Kırılma tokluğu (MPa.m ^{1/2})	İyi	İyi	İyi	Mükemmel
Brazilian çekme direnci (MPa)	İyi	İyi	İyi	Mükemmel
Los Angeles (% Kaybı)	Marjinal	İyi	İyi	Mükemmel
Micro-Deval (% Kaybı)	Marjinal	Marjinal	Marjinal	İyi
Donma-çözünme (% Kaybı)	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Donma-çözünmesiyle düşürülmüş sonik hız (% değişim)	Marjinal	Marjinal	Marjinal	Mükemmel
Islanma-Kurunma (% Kaybı)	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
MgSO ₄ sağlamlık (% Kaybı)	İyi	Marjinal	İyi	Marjinal
AQD Değerleri ve sınırı	2.84 (Marjinal- İyi)	3.10 (İyi)	3.13 (İyi)	3.66 (İyi – Mükemmel)

5. KAYNAKLAR

- Acir, O., Kılıç, R., 2010. A new approach to estimate armourstone abrasion: modified slake durability test. WIT Transaction on Ecology and the environment, Vol 130.
- Adnan Aydin Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique, 255–259, 2014.
- AFNOR, 1993. Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse (Norme française NF pp.68-94). Association française de normalisation (AFNOR), la defense, Paris, France.
- Anon, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part I: Rock and soil materials, report of the commission of engineering geological mapping. Int. Ass. Engg. Geol., No. 19, 364-71, Krefeld.
- ASTM D 653-14 Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids.
- ASTM D5313-04 Standard Test Method for evaluation of the durability of rock for erosion control under wetting and drying conditions.

- ASTM D5731-08 Standard Test Method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classification.
- ASTM D6473-15 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Rock for Erosion Control.
- CEN European Standard E 383 1996. Draft European Standard as submitted to CEN members March 1996.
- EN 13383-1: 2002: Armourstone specification.
- Erdogan, B., 1990. Tectonic relations between İzmir-Ankara Zone and Karaburun belt. Bulletin of the Mineral Research and Exploration of Turkey. 111, pp.1-20.
- Ertas, B., Topal, T., 2007. Quality and durability assessment of the armourstone for two rubble mound breakwaters (Mersin, Turkey). Environmental Geology, 2008, 53:1235-1247.
- Göncüoğlu, M.C., Dirik, K., Kozlu, H., 1996. Pre-alpine and alpine terranes. An. Géol. Pays Héll., 37: 515-536.
- Göncüoğlu, M.C., Özcan, A., 1992. Stratigraphy of the Kutahya region: A geotraverse across suture zones in NW Anatolia, Guide Book, pp. 3-8.
- Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., Tekin U.K., 2003. Evidence for the Triassic rifting and opening of Neotethyan İzmir-Ankara Ocean, northern edge of the Tauride-Anatolide platform, Turkey, Boll. Soc. Geol.It., Spec.Vol., 2, pp.203-212.
- ISRM Suggested Methods Rock Characterization, Testing and Monitoring, Editor E.T. Brown, Pergamon Press 1981, 119 to 121.
- Kaftan, I., Şalk, M., Şenol, Y., 2011. Evaluation of gravity data by using artificial neural networks case study: Seferihisar geothermal area, Journal of Applied Geophysics 75 (2011) 711-718.
- Latham, J.-P., 1998. Assessment and specification of armourstone quality: from CIRIA/CUR (1991) to CEN (2000). In: Latham, J.-P. (ed.) 1998. Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation. Geological Society, London, Engineering Special publications, 13, 65-85.
- Latham, J.-P., 1991. Degradation model for rock armour in coastal engineering: Quarterly Journal Engineering Geology, vol. 24, pp.101-118.
- Lienhart, D., 1998. Rock Engineering Rating System for assessing the suitability of armourstone sources. Geological Society London Engineering Geology Special Publications.
- Magri, F., Akar, T., Gemici, U., Pekdeğer, A., 2010. Deep geothermal groundwater flow in the Seferihisar-Balçova area: Turkey: result simulations of coupled fluid flow and heat transport process. Geofluids 10(3), 388-405.
- Okay, A.I., İşintek, I., Altiner, D., Özken-Altiner, S., Okay, N., 2012. An olistrostrome-mélange belt formed along a suture: Bornova Flysch zone: Tectonophysics 568-569 (2012) 282-295.
- Okay, A.I., Levent, E.J., 1996. Stratigraphy and paleontology of the Upper Paleozoic sequence in the Pulur (Bayburt) region, Eastern Pontides. Turkish Journal of Earth Sciences, 5: 145-155.
- Ozden, A., Topal, T., 2007. Quality assessment of the armourstone for some Black Sea rubble mound breakwaters, Turkey, Journal of Coastal Research, Special Issue 50, 2007.
- Ozden, A., Topal, T., 2009. Evaluation of andesite source as armourstone for a rubble mound breakwater (Hisarönü, Turkey). Environmental Earth Science, 2009, 59:39-49.
- Přikryl, R., 2017. Construction Geomaterials: versatile resources in the service of humankind—introduction to the thematic set of papers on: challenge to supply and quality of geomaterials used in construction. Bull Eng Environ (2017) 76:1-9.
- Smith, M., (Author, Editor), 1999. Stone: Building Stone, Rock Fill and Armourstone in Construction (Geological Society Engineering Geology Special Publication, 16) First Edition Edition.
- The Rock Manual. 2007. The use of rock in hydraulic engineering CIRIA, CETMEF, C683, London.
- TS EN 1097-1 Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1 Determination of resistance to wear (Micro-Deval).
- TS EN 1097-2 Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2 methods for the determination of resistance to fragmentation (Los Angeles).
- Ulusay, R (ed), 2014. The ISRM suggested Methods for rock Characterization, Testing and Monitoring 2007-2014 ISBN978-3-319-07712-3 Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.
- Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., 2009. Neotectonic evolution of and actively growing super imposed basin in western Anatolia: the inner Bay of İzmir, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, vol.21, 2012, pp.439-471.
- Zhang, Z.X., 2002. An empirical relation between mode I fracture toughness and tensile strength of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 39 (2002) 401-406.

Kışlaköy Açık Ocak Kömür İşletmesi'nde (Elbistan / Kahramanmaraş) Yer Alan Jeolojik Birimlerin Jeomekanik Parametrelerinin Karşılaştırılması *Comparison of Geomechanical Parameters of the Geological Units in Kışlaköy Open Pit Lignite Mine (Elbistan / Kahramanmaraş)*

E. Pınarcı^{1*}, H. Çetin¹, S. Ural²

¹ Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Sarıçam / ADANA

² Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 01330 Sarıçam / ADANA
(*epinarci@cu.edu.tr)

ÖZ: Afşin-Elbistan havzasında 1981 yılından itibaren faaliyette bulunan Kışlaköy Açık İşletmesi 578 milyon ton linyit rezervi ile ülkemizin en büyük açık ocak kömür işletmeleri arasındadır. Ocakta doğu ve batı şevleri kalıcı şevler olarak tasarlanmıştır. Şev duraylılığı açısından ocakta yapılan susuzlaştırma faaliyetleri, birimlerin yapısal ve jeomekanik özelliklerinin doğru bir şekilde elde edilmesi önem taşımaktadır. Kışlaköy ocağında şev duraysızlıkları zaman zaman önemli işletme sorunlarına yol açmıştır. Ocakta gerçekleştirilen kazı ve döküm çalışmaları nedeniyle değişen koşullar şev duraylılığının incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Kalıcı şevlerde duraylılık analizlerinde kullanılmak üzere elde edilen kayma direnci parametreleri ile daha önce sahada yapılan jeoteknik çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ocaktaki birimlerin yatay ve düşey yönde heterojenliği ve ocağın yapısal özelliklerinin değişkenliğinden dolayı elde edilen parametrelerin de değişken olduğu görülmüştür. İşletmenin mevcut konumuna göre şev duraylılığında kullanılmak üzere elde edilen parametreler ve işletmede daha önceden yapılmış jeoteknik çalışmalarda elde edilen parametreler ile karşılaştırılmış ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Probabilistik analizlerde kullanılmak üzere bir veri seti oluşturulmuştur. Parametreleri en iyi temsil eden istatistiksel dağılımlar belirlenmiştir. Buna göre bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile önceki çalışmalar arasında uyum olduğu gözlenmiştir. Ancak Gıdya biriminin kendi içerisinde Gri Gıdya, Bej Gıdya, Kalk Gıdya, Kömürlü Gıdya gibi seviyelerden oluşması ve Linyit biriminin farklı kömürleşme derecelerine sahip olmasından dolayı diğer birimlerden daha yüksek standart sapma değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Şev duraylılığı, jeomekanik parametreler, deterministik yöntem, probabilistik yöntem, açık işletme

ABSTRACT: Operating since 1981 with 578 million ton capacity, Kışlaköy Open-Pit Mine in the Afşin-Elbistan basin is the among the largest open-pit mining facilities in Turkey. The east and west slopes have been designed as permanent slopes in the mine. For the stability of these slopes, dewatering and the geomechanical and structural characteristics of the units in the mine are crucial. Occasionally, instability problems have caused problems in the mining activities in the Kışlaköy mine. With the changing excavation and inner dump conditions, investigation of the stability in the mine has become an important task. In this study, the shear strength parameters obtained for the stability of the present permanent slopes and the parameters obtained in the previous studies have been compared. It was noticed that the parameters vary with respect to the vertical and horizontal heterogeneity and the structural characteristics. The parameters obtained for the present stability of the slopes and the ones obtained by the various previous studies have been compared by means of the statistical analysis. A database has been composed to use for the probabilistic analysis. The best statistical distribution have been determined for the parameters. It was determined that there is a reasonable match within the two data groups. However, because the Gytja unit is made up of different levels namely Grey Gytja, Beige Gytja, Calc Gytja, Lignite Gytja, and the lignite unit has varying degree of coal forming processes, they have the highest standart deviation.

Keywords: Slope stability, geomechanical parameters, deterministic method, probabilistic method, open pit mine

1. GİRİŞ

Kışlaköy Açık Ocak İşletmesi, Kahramanmaraş ilinin Afşin-Elbistan ilçeleri sınırları içerisinde, Afşin ilçesinin kuzeydoğusunda ilçe merkezine 15 km uzaklıkta yer almaktadır. Kışlaköy Açık Ocak İşletmesi, Afşin Elbistan A ve B Termik Santrali linyit gereksinimini karşılayan dünyanın dördüncü, ülkemizin ise en büyük açık işletmesi olma özelliğini taşımaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.

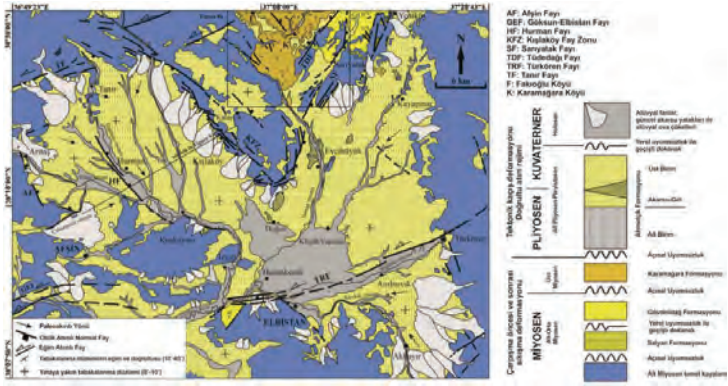
Ocakta işletilebilir linyit kalınlığı 40-80 m arasında, örtü kalınlığı ise 80-110 m arasında değişmektedir. Kuzey-güney yönünde yaklaşık 2,8 km, doğu-batı yönünde ise yaklaşık 2,5 km uzanımına sahiptir. Ocakta doğu ve batı şevleri kalıcı şevler olarak tasarlanmıştır. Yeraltı suyu; karstik akifer ve Gıdya akiferi olmak üzere iki temel akifer ile tanımlanmaktadır. Bu akiferlerdeki yeraltı suyu ocak çevresinde açılan kuyularla ocak dışına drene edilmektedir. Şev duraylılığı açısından ocakta yapılan susuzlaştırma faaliyetleri ile birimlerin yapısal ve jeomekanik özelliklerinin doğru bir şekilde elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Kışlaköy ocağında şev duraysızlıkları zaman zaman önemli işletme problemlerine yol açmıştır. Ocakta gerçekleştirilen kazı ve döküm çalışmaları nedeniyle değişen şartlar şev duraylılığının incelenmesini daha önemli bir konuma getirmektedir.

Ocaktaki birimlerin düşey ve yatay yönde heterojenliği ve ocağın yapısal özelliklerinin değişkenliğinden dolayı elde edilen parametrelerin de değişken olduğu görülmüştür. Bu değişkenliğin deterministik yöntemlerle yapılan duraylılık analizlerinin sonuçlarını önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir. İşletmenin mevcut konumuna göre şev duraylılığında kullanılmak üzere elde edilen

parametreler (birim hacim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısı) ve işletmede daha önceden yapılmış jeoteknik çalışmalarda elde edilen parametreler karşılaştırılmış ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda Kışlaköy Açık işletmesinde jeoteknik amaçlı yapılan toplam 7 adet çalışma incelenmiştir (Koçak, 1985; Kılıç, 1996; Ural ve Yüksel, 2004; Akbulut vd., 2007; Akbulut vd., 2008; Akbulut vd., 2009; RWE, 2009; Nasuf vd., 2011; Tutluoğlu vd., 2011). Bu çalışmanın sonucunda bulunan jeomekanik parametreler de eklenerek istatistiksel yorumlarda bulunulmuştur.

2. GENEL JEOLJİ

Afşin-Elbistan havzası, Doğu Toros'ların iç kesiminde etrafı dağlar ile çevrili tektonik bir çöküntü havzasıdır. Havza dolgusu linyit içeren Pliyo-Kuvaterner göl-akarsu çökellerinden oluşur. Havzanın üzerinde geliştiği temel kayaları, birbirleriyle tektonik ilişkili Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı metakarbonat, metakırınıtlılar ve Üst Kretase ofiyolitik kayaları ile bunları kesen granitoidler oluşturup, tüm bu kaya birimleri çok az alanda gözlenen Erken Tersiyer yaşlı birimler tarafından açısız uyumsuzlukla üzerlenir (Şekil 2). Afşin - Elbistan havzası stratigrafik, sedimantolojik ve yapısal özelliklerine göre farklı iki ayrı evrede tektonik gelişim göstermektedir (Yusufoğlu vd., 2005).



Şekil 2. Afşin Elbistan Havzasının Genel Jeoloji Haritası (Yusufoğlu, 2013'den değiştirilerek).

İnceleme alanındaki Neojen birimleri alttan üste doğru; kırmızı kahve renkli killi-kumlu-çakıllı birim, turkuvaz renkli taban kili, linyit horizonu, gri gıyda, bej gıyda ve gösel kireçtaşlarıdır. Kuvaterner yaşlı birimler çalışma sahasının batısında akarsu çökelleri, doğusunda ise çoğunlukla yamaç molozu olarak temsil edilmektedir. Çalışma sahasının doğusu havza kenarı olup, yaklaşık Kışlaköy fayına paralel, eğim atımlı, BKB-DGD doğrultulu normal fayların denetiminde şekillenmiştir. Kalıcı doğu şevleri bu faylara yaklaşık paralel olarak oluşturulmuştur (Şekil. 3). Havza ortasında yer alan kalıcı batı şevlerinde ise büyük ölçekli tektonik bir hareket gözlenmemiştir (Akbulut vd., 2007).



Şekil 3. Doğu şevinin panoramik görünümü.

Kışlaköy Linyit İşletmesi'nde jeoteknik amaçlı yapılan çalışmalar incelendiğinde birimlerin isimlendirilmesinde farklılıklar görülmüştür. Örneğin gıyda birimi için gri gıyda, bej gıyda, kalk gıyda,

kömürlü gıdya, kalkerli kömürlü gıdya, gıdya (ara kesme), gıdya (kontakt zonu) olmak üzere 7 farklı isimlendirme kullanılmıştır. Ocağın belirli bölgelerinde bu birimler gözlenebiliyor olsa da duraylılık analizlerinde bu birimlerin birleştirilerek ya da sadeleştirilerek duraylılığa esas kesitlere işlenmesi mümkün olmaktadır. Bu nedenle arazi gözlemleri ve önceki çalışmaların da incelenmesi sonucunda bu tür birim adlandırmaları benzer jeoteknik özelliklere sahip olan birimler sadeleştirilerek 6 adet birime indirgenmiştir. Kazı tabanında linyitin tabanını oluşturduğundan taban kili olarak adlandırılan birim yer almaktadır. Taban kili turkuvaz renkli olup yer yer karbonat yumrukları kil seviyelerinden oluşmaktadır. İçerisinde yer yer silt seviyeleri ile yer yer turkuvaz renkli kumtaşı tabakaları gözlenmiştir. taban kili içerisindeki karbonat yoğunluğunun arttığı seviyelerde gri renkli orta sertliğe sahip marn seviyeleri gelişmiştir. Taban killeri düşük plastisiteli olup ince-orta tabakalanmalıdır. Havza kenarına yaklaştıkça içerisinde sarımsı kahve renkli kumtaşı mercekleri gözlenmiştir. Havza kenarında birim içindeki çakılların boyutu ve miktarı artmaktadır. Taban kilinin üzerinde 5-100 cm kalınlığında bol bitümlü siyah renkli, yüksek plastisiteli siyah kil yer almaktadır. Siyah kil seviyesi şev aynalarında çoğunlukla gözlenmemekle birlikte ocak tabanında yapılan kazılarda ve sondajlarda kesilmektedir. Siyah kil seviyesi daha önce meydana gelen heyelanlar ve laboratuvar deney sonuçları göz önüne alındığında ocaktaki şevlerin duraylılığı açısından kritik öneme sahip olduğu düşünülmektedir. Taban kili üzerinde uyumlu olarak linyit yer almaktadır. Birim siyah-açık kahverenkli, orta sertlikte olup, orta-ince tabakalanmalıdır. Bünyesinde bulunan kil miktarı ve diyajenez derecesine bağlı olarak oldukça heterojen bir yapı sunmaktadır. Batı şevinde linyitler gri gıdya birimiyle aralanma gösterirken, doğuda tamamen linyite dönüşmektedir. Araziye linyitin kalınlığı doğruya doğru artmakta olup yaklaşık 40-80 m arasında değişen kalınlığa sahiptir. Linyit seviyeleri üzerinde uyumlu olarak gri gıdya birimi yer almaktadır. Birim kahvemsi gri-koyu gri renkli, bol gastropod fosili içeren killi seviyelerden oluşmaktadır. Kavkılar bazı seviyelerde yoğunlaşmakta ve sadece kavkılardan oluşan seviyeler de gözlenmektedir Birim orta-kalın tabakalanma sunmakta olup, çok yumuşaktır. Gri renkli gıdya birimi en fazla kalınlığa çalışma sahasının batısında ulaşmaktadır. İçerisinde 5-50 cm kalınlığında linyit ve bej gıdya seviyeleri gözlenmiştir. Birimin kalınlığı havza kenarı olan doğruya doğru gidildikçe azalmaktadır. Birimin kalınlığı yaklaşık 10-15 m arasında değişmektedir. Gri gıdya biriminin üzerine uyumlu olarak bej gıdya gelmektedir. Birim bej renkli, bol gastropod içeren killi siltlerden oluşmaktadır. Doğu şevinde doğusunda haritalanamayacak kadar incelen ve bant şeklinde devam eden birim, ince-orta tabakalıdır. Yaklaşık kalınlığı 10 m'dir Mavi kil arazide gri gıdya birimi üzerinde ve çoğunlukla havza ortasında yer almaktadır. Birimin gösel kireçtaşları ile yanal geçişe sahiptir. Çökme ortamının karbonatları taşıdığı durumlarda gösel kireçtaşlarının, aksi takdirde mavi killerin çökeldiği düşünülmektedir. Ortalama kalınlığı 4-6 m arasındadır. Kuvaterner yaşlı lehim birimi, inceleme sahasında geniş bir yayılım göstermektedir. Birim kırmızımsı kahverenkli, yer yer çakıllı kumlu killerden oluşmaktadır. Birim, arazinin batısında içerisinde yoğun bir şekilde karbonat yumruları gözlenmesinden dolayı yer yer kalıcı özelliği göstermektedir. Batı şevinde yer yer açık yeşil renkli olarak da gözlenmektedir. Birim akarsu ortamında çökelmiş olup, çalışma sahasının doğusu olan havza kenarında yamaç molozu çökelleriyle giriftir bir şekildedir. Lehim birimi havza kenarında alüvyon yelpazesiyle beraber gözlemlendiğinden kalın bir istif sunmaktadır. Ocak içerisindeki kalınlığı 10-15 m'dir (Akbulut vd., 2007).

3. ŞEV DURAYLILIĞI ANALİZLERİNDE PROBABİLİSTİK YÖNTEMLER

Probabilistik yöntemler belli şartlar altında şev yenilme olasılığını inceler. Analizlerde rastgele değişkenler olarak göz önüne alınan farklı değerlerin dağılım fonksiyonları bilinmelidir. Malzeme özelliklerine dair belirsizlikler çok fazla miktarda veriye ihtiyaç duyulması anlamına geldiği için bu yöntemlerin kullanımı daha zordur. Emniyet katsayısı tekrarlı süreçleri kullanarak bu fonksiyonlardan hesaplanır. Olasılık yoğunluk fonksiyonları ve emniyet katsayısının olasılık dağılımı oluşturulabilir ve emniyet katsayısının özel bir oluşma olasılığı için şev duraylılık eğrileri elde edilebilir (De Vallejo ve Ferrer, 2002).

Probabilistik analizlerin şev duraylılığı uygulamalarındaki mevcut durumu tasarım sürecinde şev yenilmesi durumunda hesaplanan güvenlik katsayısı kullanılarak, bilgi yetersizliği, zemin parametreleri ve saha stratigrafisi ile ilişkili belirsizliklerin hesaba katılmasına dayanmaktadır. İdeal

koşullarda güvenli tasarım için güvenlik katsayısının 1 olması gerekmektedir fakat bütün bu belirsizliklerden dolayı güvenlik katsayısının daha yüksek değerlerde alınması önerilmektedir. Geçmiş tecrübelerle dayanılarak 1,3 ile 1,5 arasında bir güvenlik katsayısı yenilmeleri en aza indiren güvenlik katsayısı olarak kabul edilir. Güvenlik katsayısı tasarımının böyle tek bir değerinin kullanılması etkili bir şekilde sahanın karakterizasyonu için yeterli değildir. Başka bir deyişle, bir saha geniş kapsamlı yerinde testlerle kapsamlı bir jeoteknik saha araştırması ve yüksek kalite laboratuvar deneyleriyle tanımlanmadıysa düşük güvenlik katsayılarıyla tasarım yapılmasına neden olur. Bu belirsizlikler probabilistik analiz yöntemiyle giderilebilir (Abramson vd., 2002).

Saha karakterizasyonu ile ilgili farklı belirsizlik seviyelerini kapsayan tüm durumlar için sıklıkla aynı minimum güvenlik katsayısı gereklidir. Benzer şekilde, aynı güvenlik katsayısına sahip iki şey, belirsizlikleri en aza indirmek amacıyla sahanın ne kadar iyi karakterize edildiğine bağlı olarak oldukça farklı güvenlik seviyelerine sahip olabilir. Bu tür belirsizlik seviyelerini hesaba katarak şevin performansını değerlendirmek için probabilistik yöntem dikkate alınmalıdır (Li ve Lumb, 1987; Chowdhury ve Xu, 1994). Probabilistik analizlerde son sonuç yenilme olasılığı (PF) veya yetersiz performans olasılığı olacaktır (Abramson vd., 2002). Jeoteknik çalışmalarda belirsizliklerin bir kısmının giderilmesi mümkün iken bir kısmının giderilmesi mümkün olmamaktadır.

Bir şevin duraylılığını etkileyen belirsiz parametreler, probabilistik formülasyonda rastgele değişkenler olarak ele alınır. Parametrelerin deterministik analizlerde tek bir değere sahip olduğu varsayılmaktadır ancak probabilistik analizlerde olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ile tanımlanan bir dizi değere sahip olacaktır.

4. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER

İstatistiksel analizlerde Kışlaköy Açık İşletmesinde daha önce yapılan 7 adet jeoteknik çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen jeoteknik parametreler de eklenerek istatistiksel analizlere tabii tutularak tanımlayıcı istatistikleri belirlenmiştir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi ocaktaki birimlerin kohezyon değerlerinin standart sapmaları makul sınırlar içerisinde olmasına rağmen Linyit biriminin standart sapmasının diğerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. Standart sapmanın bu derece yüksek olmasına (51,98 kPa) linyit biriminin farklı kömürleşme derecelerine sahip olması ve değişken oranlarda kil ihtiva etmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda linyit biriminin çok yüksek bir varyans değerine sahip olması da bu heterojenliği doğrulamaktadır. İçsel sürtünme açılarına bakıldığında en yüksek standart sapmaların gıyda, linyit ve taban kili birimlerinde karşımıza çıktığı görülmektedir. Gıyda biriminin bol miktarda iri kavrular ve bitki kalıntıları içermesinin içsel sürtünme açısı değerlerindeki bu farklılığa yol açtığı söylenebilir. Aynı şekilde gıyda biriminin yüksek bir varyans değerine sahip olduğu görülmektedir. Gıyda birimine göre daha homojen bir birim olan taban kili birimindeki bu yüksek standart sapma değerinin birimin yer yer çakıl içermesi, ocağın tabanında yer alması nedeniyle arazide yüksek bir örtü gerilmesine maruz kalması ve drenajlı kesme kutusu deneylerinde uygulanan normal gerilmelerin çalışmalarda birbirinden farklılık göstermesi olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 1. İstatistiksel analizlere tabii tutulan parametreler ve standart sapmaları.

Birim	Veri Sayısı (N)	Birim Hacim Ağırlık (KN/m ³)	Varyans	Kohezyon (kPa)	Varyans	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Varyans
Lehim	17	17,87±1,03	1,06	34,90±14,68	215,61	21,24±3,85	14,83
Mavi kil	9	17,35±0,70	0,49	40,99±29,67	880,34	19,46±3,77	14,21
Gıyda	22	14,93±1,26	1,67	34,09±24,52	629,99	30,19±9,38	92,18
Linyit	14	12,95±2,62	6,84	71,19±51,98	2701,65	29,69±6,70	44,94
Siyah kil	21	15,75±0,72	0,52	33,90±21,28	453,01	11,55±4,19	17,55
Taban kili	17	17,02±1,68	2,82	33,83±17,48	305,38	20,42±5,91	34,98

4.1. Jeomekanik Parametrelerin Olasılık Yoğunluk Dağılımları

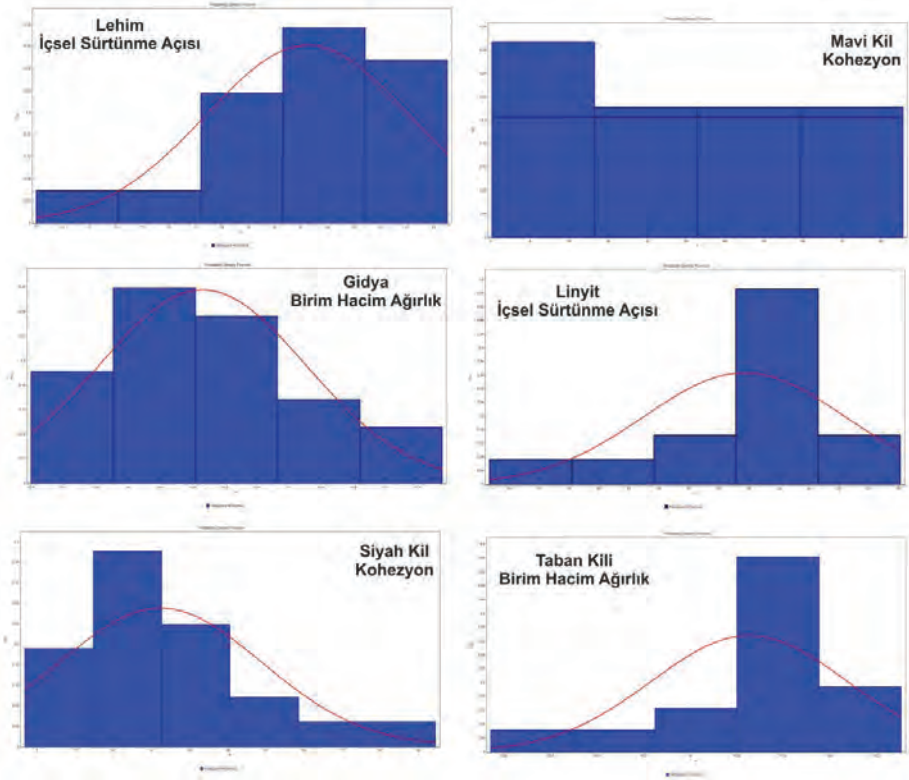
Bu kapsamda 7 adet çalışmadan elde edilen verilerin EasyFit yazılımı ile istatistiksel dağılımları belirlenmiştir. Probabilistik analizlerde kullanılacak jeomekanik parametreleri en iyi temsil eden olasılık yoğunluk dağılımının belirlenmesi önemlidir. Jiang vd., (2011) şevin yenilme olasılığının seçilen olasılık yoğunluk dağılımına göre oldukça değişken olabileceğini göstermiştir. Şev duraylılığı analizlerinde kullanılan bilgisayar yazılımları jeoteknik parametreleri en iyi temsil eden dağılımın seçilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak bu dağılımın kullanıcı tarafından tespit edilmesi gerekmektedir. Şev duraylılığı yazılımları rastgele değişkenlerden örnekleme yaparken (Monte-Carlo simülasyonu, Latin Hypercube metodu) seçilen olasılık yoğunluk fonksiyonunu dikkate alır ve yenilme olasılığını bu fonksiyonu esas alarak belirler.

Olasılık yoğunluk fonksiyonu rastgele değişkenin dağılımını tanımlar ve birçok şekil alabilir, ancak üçgen dağılımı da popülerlik kazansa da jeoteknik uygulamalarda en yaygın olanları normal ve lognormal dağılımların olduğu kabul edilir (Abramson vd., 2002, Baecher ve Christian, 2003, Slide, 2015).

Birimlerin istatistiksel dağılımları incelendiğinde çoğu parametrenin normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir. Ancak bazı parametrelerin normal dağılıma uymasına karşın Kolmogorov-Smirnov testi ve histogramlardan lognormal veya uniform dağılım ile daha iyi uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4, Çizelge 2). Probabilistik analizlerde lognormal veya uniform dağılım ile daha doğru sonuçlar elde edileceği belirlenmiştir.

Çizelge 2. Parametreleri en iyi temsil eden olasılık yoğunluk fonksiyonları.

Birim	Birim Hacim Ağırlık	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı
Lehim	Normal	Lognormal	Normal
Mavi kil	Uniform	Normal	Uniform
Gidya	Normal	Lognormal	Normal
Linyit	Lognormal	Normal	Normal
Siyah kil	Normal	Normal	Normal
Taban kili	Normal	Normal	Normal



Şekil 4. Birimlere ait bazı jeoteknik parametrelerin istatistiksel dağılımları.

5. SONUÇLAR

Kışlaköy Açık İşletmesinde bulunan birimleri jeoteknik açıdan inceleyen 7 adet çalışma incelenerek elde edilen parametreler karşılaştırılmıştır. Parametreler karşılaştırılırken birimlerin isimlendirilmesinde meydana gelen farklılıkların giderilebilmesi için benzer jeoteknik özelliklere sahip birimler tek bir birim olarak istatistiksel analizlere tabii tutulmuştur. İstatistiksel analizlerde birim hacim ağırlık değerlerinin her birimin kendi içerisinde çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Kohezyon değerleri makul standart sapma değerlerine sahipken linyit biriminde bu değer oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun arazi gözlemlerinden de anlaşıldığı üzere birimin heterojenliğinden kaynakladığı düşünülmektedir. İçsel sürtünme açısı değerlerinde en yüksek standart sapma değerine beklendiği gibi bol miktarda kavkı içeren Gıda biriminde rastlanmıştır. Birimlerin istatistiksel dağılımlarına bakıldığında çoğu parametrenin normal dağılıma uyduğu gözlenirken bazı parametrelerin lognormal ya da uniform dağılım ile daha iyi temsil edildiği görülmüştür. Probabilistik analizlerde bu durumun göz önüne alınması gerektiği tespit edilmiştir.

6. KATKI BELİRTME

Yazarlar değerli katkılarından dolayı EÜAŞ Afşin-Elbistan Linyitleri İşletme Müdürlüğü personeline teşekkür ederler.

7. KAYNAKLAR

- Abramson, T.G, Lee T.S., Sharma., And Boyce G. M., 2002. Slope Stability and Stabilization Methods, 2nd Edition., Wiley, Hoboken, NJ.
- Akbulut, A., Aksoy, T., Onak A., Çağlan D., Çam, İ., Ölmez, T., Yurtseven, N., Arıcı, N., 2009. Afşin-Elbistan Kışlaköy Açık Kömür İşletmesi 2. Kısım II. ve III. Bölüm Şev Stabillitesi Çalışması. MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı Jeoteknik Araştırmalar Koordinatörlüğü, Ankara.
- Akbulut, A, Aksoy, T., Ölmez, T., Çağlan D., Onak A., Çam, İ., Sezer, S., Çevik, M., Çalışkan, V., Yurtseven, N., Sülükçü, S. 2008. Afşin – Elbistan Kışlaköy Açık Kömür İşletmesi 2. Kısım I. Bölüm Şev Stabillitesi Çalışması. MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı Jeoteknik Araştırmalar Koordinatörlüğü, Ankara.
- Akbulut, İ., Aksoy, T., Çağlan, D., Ölmez, T., 2007. Afşin-Elbistan Kışlaköy Açık Kömür İşletmesi Şev Stabillitesi Çalışması. MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı Kaya ve Zemin Mekaniği Birimi, Ankara.
- Baecher G. B. And Christian J. T. 2003. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons Inc., Chichester, West Sussex, England.
- Chowdhury, R. N., and D. W. Xu, 1994. Slope System Reliability with General Slip Surfaces,” Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 34, No. 3, pp. 99-105.
- De Vallejo, F.I.G., ve Ferrer, M., 2002. (Çeviri: Kayabaşı, K., 2014). Mühendislik Jeolojisi, Ankara Üniversitesi Yayınevi, 674 s.
- EasyFit Professional, version 5.5, 2010. MathWave Technologies.
- Jiang, T., Liu, J., Yuan, B., Wang, S. 2011. Influence of Probability Distribution of Shear Strength Parameters on Reliability-Based Rock Slope Analysis. Slope Stability and Earth Retaining Walls. Geotechnical Special Publication No. 216. ASCE.
- Kılıç, A. M., 1996. Analyse de la Stabilité Des Talus de la Mine de Lignite D’Afşin-Elbistan. Pour Obtenir la Grade de Docteur de l’école Nationale Supérieure Des Mines de Paris en Géologie de L’ingénieur. Paris.
- Koçak, S., Ulusay R., Selçuk Ş., İder, H. 1985. TKİ-AEL Kışlaköy Linyit İşletmesi Batı Şevi Stabillite Etüdü. MTA Fizibilite Etütleri Dairesi, Kaya ve Zemin Mekaniği Servisi, Ankara.
- Li, K. S., and P. Lumb, 1987. “Probabilistic Design of Slopes,” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp. 520-535.
- Nasuf, E., Erçelesi, S.G., Öztürk, A., Yavuz, V., Özkan, M., Önsel, İ.E. 2011. Kışlaköy Açık İşletmesi İç Döküm Sahası Şev Stabillizasyonu ve Açık İşletme Genel Şev Açılarının Optimizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, İstanbul.
- Rocscience Slide 6.0. Probabilistic Analysis Tutorial
- RWE, 2009. Slope Stability Calculations for Mid-term planning, 2009, Jörg Bürkle, Re GmbH. Ref No: P-0636A.
- Tutluoğlu, L., Öge, İ.F., Karpuz, C. 2011. Two and three dimensional analysis of a slope failure in a lignite mine. Computers & Geosciences 37 (2011) 232–240.
- Ural, S., Yüksel, F., 2004. Geotechnical Characterization of Lignite-Bearing Horizons in the Afsin-Elbistan Lignite Basin, SE Turkey. Engineering Geology 75, 129-146.
- Yusufoğlu, H., Bedi, Y., Usta, D., Özkan, M.K., Beyazpınar, M., Yıldız, H., 2005. Afsin-Elbistan Neojen Havzasının Tektonik Evrimi, Doğu Toroslar, Türkiye. 58. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri, Ankara, pp. 264–265.
- Yusufoğlu, H., 2013. An Intramontane Pull-Apart Basin in Tectonic Escape Deformation: Elbistan Basin, Eastern Taurides, Turkey. Journal of Geodynamics, Volume 65, April 2013, p 308-329.

SU YAPILARINDA MÜHENDİSLİK
JEOLJİSİ ve JEOTEKNİK

Dispersif Killerin Tanımlanması ve Dispersivitenin Kestirimi

Identification of Dispersive Clays and Prediction of Dispersivity

A. Turgut^{1*}, N.S. Işık², K.E. Kasapoğlu³

¹*Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Stratejileri ve Piyasa İzleme Daire Başkanlığı,*

Türk Ocağı Caddesi, No:2, Çankaya 06100, Ankara, Türkiye

²*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Beşevler 06500, Ankara, Türkiye*

³*Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe 06800, Ankara, Türkiye*

(*aturgut@hacettepe.edu.tr)

ÖZ: Bu çalışma, killerde dispersivitenin tanımlanmasına yönelik farklı yöntemlerin araştırılması ve dispersivitenin kestirimine yönelik bazı istatistiksel yaklaşımların geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla; Ankara ve çevresinde yer alan farklı lokasyonlardan derlenmiş yirmi dokuz adet örneğin fiziksel ve indeks özellikleri ve dispersivite dereceleri belirlenmiş ve dispersivite sınıflarının kestirimi için bazı istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Aynı kil örneği üzerinde saf su kullanılarak gerçekleştirilen dispersivite deneylerinden elde edilen dispersivite sınıflarının farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu farklılığın giderilerek en güvenilir dispersivite sınıfının kestirilebilmesi amacıyla, karar ağacı, lojistik regresyon gibi kestirim yöntemleri ile istatistiksel modeller oluşturulmuştur. İstatistiksel analizler sonucunda, toplam çözünmüş tuzlar (TDS) ve sodyum yüzdesinin (SP) dispersivite derecesini büyük ölçüde etkilediği ve bu iki parametrenin dispersivitenin kestiriminde güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dispersivite, dispersif kil, toplam çözünmüş tuz, sodyum yüzdesi, istatistiksel analiz

ABSTRACT: *This study aims to investigate different methods used for identification of dispersivity and to develop some new statistical approaches for prediction of dispersivity. For this purpose; physical and index properties and dispersivity classes of twenty-nine clay samples taken from different locations around the city of Ankara were determined and some statistical prediction models were developed. It was determined that dispersivity classes obtained from dispersivity tests performed on the same clay samples using distilled water were different from each other. To eliminate these differences and predict the most reliable dispersivity class, some statistical models such as decision tree and logistic regression analyses were established. Based on analysis and results; it is concluded that total dissolved salts (TDS) values and sodium percentage (SP) remarkably effect the degree of dispersivity and the use of these two parameters give more reliable results for determining dispersivity.*

Keywords: *Dispersivity, dispersive clay, total dissolved salt, sodium percentage, statistical analysis*

1. GİRİŞ

Dispersif killer (dağılgan killer) boşluk suyunda yüksek oranda çözünmüş sodyum iyonu içeren ve su ile temas ettiğinde önemli derecede erozyona uğrayan killerdir (Sherard vd., 1972; Mitchell, 1976). Bu tip killerde kolloidal kil mineralleri, diğer normal killerden farklı olarak su içinde dağılmaktadır. Bu durum, özellikle hidrolik yapılar, dolgu tipi barajlar ve yol dolgularında dispersif killerin kullanımı sırasında ciddi mühendislik sorunlarına yol açabilmektedir (Knodel, 1991). Dispersif killerin tanımlanabilmesi için fiziksel ve indeks deneylerin yeterli olmadığı yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur (Sherard vd., 1972; Sherard vd., 1976a; Haliburton vd., 1975; Nontananandh vd., 2006; Tosun, 1997; Düzceer, 1984). Bu nedenle killerde dispersivitenin belirlenmesi amacıyla bazı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Dispersif killeri tanımlamak amacıyla fiziksel (çift hidrometre deneyi, dağılma deneyi, iğne deliği deneyi) ve kimyasal (boşluk suyu analizi) deneyler olmak üzere dört farklı deney yöntemi önerilmiştir.

Killi zeminlerin dispersif erozyona uğrama eğilimi, zeminin mineralojisi, kimyası ve boşluk suyu içinde çözülmüş halde bulunan tuzların kimyasına bağlıdır (Knodel, 1991). Bu nedenle, dispersivitenin tanımlanmasında boşluk suyu analizi ve kimyasal değerlendirmeler oldukça önemlidir. Sherard vd. (1972) zeminlerin boşluk suyunda içermiş oldukları sodyum iyon konsantrasyonu ile çözülmüş halde bulunan katyonlar arasındaki ilişkinin dispersivite sınıflarının belirlenmesinde etkili olduğunu belirtmişler ve dispersivitenin belirlenmesine yönelik bir abak önermişlerdir. Toplam çözülmüş tuzlar (TDS) ve sodyum yüzdesi (SP) değerlerine göre zeminler dispersif, dispersif olmayan ve ara zemin olmak üzere üç grupta değerlendirilmektedir. Gerber ve Harmse (1987), dispersiviteyi belirleyebilmek için kullanılan deneyler ve bunların güvenilirliği üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar, dispersivitenin killi zeminlerin boşluk suyu kimyası ile yakından ilişkili olduğunu belirterek, özellikle değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) ve katyon değişim kapasitesi (CEC) parametrelerinin dispersiviteyi kontrol ettiklerini öne sürmüşlerdir. Buna dayanarak, araştırmacılar ESP ve CEC arasındaki ilişkiyi esas alan dispersivite abağını önermişlerdir. Söz konusu abakta "tamamen dispersif değil" ve "çok dispersif" arasında değişen altı farklı dispersivite sınıfı yer almaktadır.

Dispersif killer ve bu killeri tanımlama yöntemleri ve belirlenen dispersivite derecelerinin sınırları konusundaki belirsizlikler günümüzde halen devam etmektedir. Ayrıca, sınırlı sayıdaki çalışmada deneylerde kullanılan suyun kimyasının dispersivite derecesi üzerindeki etkisi araştırılmış olup, sodyum iyonunun dispersivite derecesi üzerindeki etkisi tam olarak ortaya koyulmamıştır. Bu çalışmada, mühendislik uygulamalarında içsel erozyon ve borulanma gibi sorunlara yol açan dispersivite özelliğinin çeşitli deney yöntemleri ile araştırılması, dispersiviteyi kontrol eden etmenlerin ve su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve iyon konsantrasyonu ile dispersivite sınıfı arasındaki ilişkinin ortaya konulması ve farklı istatistiksel modellerle dispersivitenin kestirimi amaçlanmıştır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada incelenen örneklerin derlenmesi amacıyla öncelikle, dispersif ve ara zemin özellikleri gösteren killerin bulunduğu lokasyonlar belirlenerek Ankara ve çevresinde yer alan 5 farklı örnekleme yerinden 29 adet örselenmiş kil örneği alınmış ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Daha sonra birden fazla deneyin sonucunu esas alan ağırlıklı bir puanlandırma sistemi kullanılarak, deneysel yöntemlerle belirlenen dispersivite sınıfları yeniden tayin edilmiş ve istatistiksel analizler yapılarak dispersivite sınıflarının kestirimi amaçlanmıştır.

2.1. Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneyleri fiziksel ve indeks özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılmış zemin mekaniği deneyleri, fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleri ve su kimyası değiştirilerek yapılan dispersivite deneyleri olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

2.1.1. Fiziksel ve indeks özellikler

Araziden alınan 29 adet kil örneği üzerinde özgül ağırlık ve Atterberg limitleri tayinleri ile tane boyu dağılımı çözümlenmeleri yapılmıştır. Söz konusu deneyler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Mühendislik sınıflaması için gereksinim duyulan likit limit (LL), plastik limit (PL), büzülme limiti (SL) ve plastisite indeksi (PI) değerleri de ASTM D4318 (2000)'ye göre belirlenmiş, ayrıca aktivite değerleri de hesaplanmıştır. İncelenen örneklerin 2 tanesi düşük plastisiteli silt, 3 tanesi yüksek plastisiteli kil olup, diğer örneklerin ise düşük plastisiteli kil oldukları belirlenmiştir. Örneklerin likit limitleri %40 ve %55, arasında değişirken, plastik limit değerleri ise %21 ve %29 arasında değişmektedir. Örneklerin sıkışabilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D698 (2000) yöntemi kullanılarak standart proktor deneyleri yapılmış ve örneklerin optimum su içeriği değerlerinin (w) %18-26 arasında, en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerlerinin ise (γ) 17-21 kN/m³ arasında değişim gösterdiği görülmüştür (Çizelge 1).

Çizelge 1. Zeminlerin fiziksel ve indeks özellikleri.

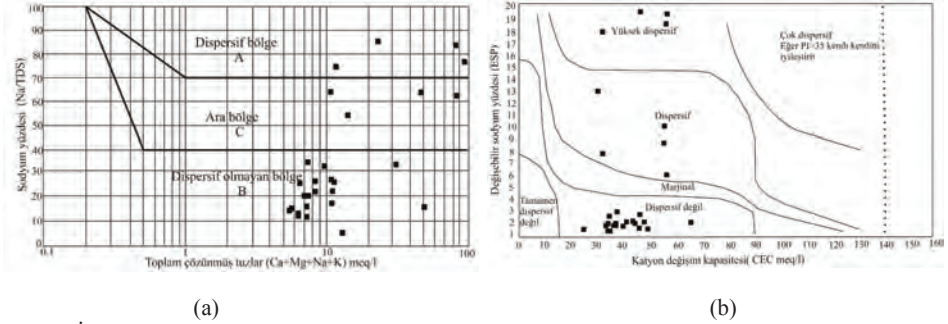
Örnek no	Tane boyu (%)				Kıyım limitleri (%)				Özgül ağırlık	Zemin sınıfı	Aktivite	w (%)	γ (kN/m ³)
	Kil boyutu (<2µm)	Silt	Kum	Çakıl	PI	PL	LL	SL					
KB1	28	32	35	5	20	25	45	15	2.40	CL	0.71	26	18
KB2	30	20	42	8	17	25	42	15	2.45	CL	0.56	22	17
KB3	32	38	30	0	14	29	43	16	2.40	CL	0.43	25	20
KB4	32	18	40	10	16	27	43	17	2.40	CL	0.50	23	19
KB5	32	33	35	0	19	26	45	17	2.42	CL	0.59	24	18
KB6	55	30	15	0	25	25	50	16	2.47	CH-CL	0.45	24	17,6
KB7	72	16	12	0	27	28	55	17	2.42	CH	0.37	26	18
S1	30	58	12	0	14	26	40	17	2.40	ML	0.46	24	18
S2	32	55	13	0	17	25	42	17	2.40	CL	0.53	24	18
SY1	35	45	15	5	22	24	46	17	2.43	CL	0.62	24	19
SY2	37	43	15	5	19	24	45	17	2.45	CL	0.51	23	19
SY3	33	57	5	5	17	26	43	15	2.43	CL	0.51	22	19,5
SY4	35	52	10	3	19	24	43	16	2.50	CL	0.54	23	20
SY5	37	51	8	4	19	26	45	17	2.51	CL	0.51	21	19
SY6	20	40	40	0	20	25	45	16	2.45	CL	1.0	24	18,5
SY7	25	42	33	0	20	25	45	15	2.50	CL	0.80	22	19
A1	38	34	28	0	14	27	41	16	2.45	ML	0.38	24	19
A2	40	32	28	0	17	25	45	17	2.50	CL	0.42	23	19
A3	40	30	27	3	16	24	40	17	2.41	CL	0.40	23	19
G1	28	60	12	0	19	21	40	13	2.60	CL	0.67	20	17
G2	25	30	40	5	21	21	42	18	2.58	CL	0.84	18	17
G3	25	65	15	0	22	25	47	16	2.47	CL	0.88	19	19
G4	30	52	18	0	20	22	42	17	2.60	CL	0.66	19	19,5
T1	22	28	40	2	22	25	47	18	2.59	CL	1.0	19	21
T2	32	64	4	0	25	25	50	15	2.60	CH-CL	0.78	20	19
Ç1	15	55	25	5	23	22	45	17	2.52	CL	1.53	25	19,5
Ç2	18	50	27	5	25	21	46	17	2.51	CL	1.38	24	19
AS1	15	45	33	7	17	25	42	16	2.45	CL	1.13	24	19,5
AS2	17	48	30	5	20	24	44	17	2.42	CL	1.17	21	19

Dispersif özellik gösteren killerin içerdiği minerallerin belirlenmesi amacıyla örnekler üzerinde tüm kaya ve kil bileşeni analizleri olarak iki aşamalı X-ışınları kırınım analizleri ICCD (1993)'e göre gerçekleştirilmiştir. X-ışınları difraktogram örnekleri Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü X-ışınları mikro analiz laboratuvarındaki Philips PW-1140 model X-ışınları difraktometresi ile çekilmiştir. X-ışınları kırınım analizleri sonucunda belirlenen difraktogramlardaki piklerin yüzdeleri ise Gündoğdu (1982) tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre örneklerin ağırlıklı olarak kil mineralleri, kuvars, kalsit ve feldispat minerallerini içerdiği saptanmıştır. Analiz sonuçlarından örneklerde en fazla bulunan kil minerali grubunun simektit olduğu ve ayrıca illit, kaolinit ve klorit minerallerinin de buldukları belirlenmiştir.

2.1.2. Dispersivite deneyleri

İncelenen kil örneklerinin dispersivite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleri yapılmıştır. Fiziksel deneyler kapsamında çift hidrometre, dağılma ve iğne deliği deneyleri Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Kimyasal dispersivite deneyleri kapsamında boşluk suyu analizleri DSİ Genel Müdürlüğü, Etüt ve Tesis Planlama Daire Başkanlığı Su ve Toprak Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Söz konusu deneylerin tamamında saf su kullanılmıştır. ASTM D4221 (2000) yöntemi esas alınarak yapılan çift hidrometre deneylerinde örneklere ait dispersiyon yüzdeleri ve sınıfları Sherard ve Decker (1977) tarafından önerilen dispersivite sınıflandırması kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre; 26 örnek dispersif olmayan, 1 örnek ara ve 2 örnek dispersif zemin olarak tanımlanmıştır. Kil örneklerinin dispersivite sınıfının belirlenmesi amacıyla yapılan fiziksel dispersivite deneylerinden biri olan dağılma deneyi ASTM D6572 (2000) yöntemi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre örneklerin 23 tanesi Kategori 3 (K3, Dispersif), 3 tanesi Kategori 4 (K4, Yüksek Dispersif), 3 tanesi Kategori 2 (K2, Ara) olarak belirlenmiştir. Ayrıca tüm örnekler üzerinde ASTM D4647 (2000) standartlarına göre iğne deliği deneyleri yapılmıştır. Buna göre 7 örnek dispersif (D1-D2), 20 örnek ara (ND3-ND4), 1 örnek dispersif değil (ND1-ND2) ve 1 örnek de şişen zemin (SP) olarak sınıflandırılmıştır.

Kimyasal dispersivite deneyleri kapsamında, 29 örneğe ait toplam çözünmüş tuzlar (TDS), sodyum yüzdesi (SP), sodyum adsorbsiyon oranı (SAR), değişebilir sodyum yüzdesi (ESP), değişebilir katyon kapasitesi (CEC), pH derecesi ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri belirlenmiştir. İncelenen kil örneklerine ait TDS ve SP veri çiftlerinin Sherard vd. (1972) tarafından önerilen dispersivite abağındaki dağılımı Şekil 1(a)'da görülmektedir. Bu dağılıma göre örneklerin 4 tanesi dispersif, 4 tanesi ara ve 21 tanesi dispersif olmayan zemin olarak tanımlanmıştır. Örneklerin kimyasal dispersivite deney sonuçları Gerber ve Hamse (1987) tarafından önerilen ve ESP ile CEC arasındaki ilişkiyi esas alan dispersivite abağı kullanılarak da değerlendirilmiştir (Şekil 1 (b)). Buna göre; örneklerin 5 tanesi dispersif, 4 tanesi yüksek dispersif ve 20 tanesi de dispersif olmayan zemin olarak sınıflandırılmıştır. Sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) değerleri esas alınarak yapılan dispersivite sınıflamasında (Aitchison ve Wood, 1965; Bell, 1994) örneklerin 9 tanesi dispersif, 4 tanesi ara ve diğerleri ise dispersif olmayan zemin olarak tanımlanmıştır. ESP değeri esas alınarak Aitchison ve Wood (1965) tarafından önerilen dispersivite sınıflandırmasına göre ise örneklerin 5 tanesi dispersif, 3 tanesi ara, 21 tanesi ise dispersif olmayan zemin olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. İncelenen örneklere ait veri çiftlerinin dispersivite sınıfları dağılımı (a) Sherard vd. (1972) tarafından önerilen TDS-SP abağı, (b) Gerber ve Hamse (1987) tarafından önerilen ESP-CEC abağı.

3. İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER KULLANILARAK DİSPERSİVİTENİN KESTİRİMİ

Dispersif killeri tanımlamak amacıyla fiziksel (dağılma deneyi, çift hidrometre deneyi, iğne deliği deneyi) ve kimyasal (boşluk suyu analizi) deneyler olmak üzere farklı deney yöntemleri önerilmiştir. Killerin dispersivite sınıfını güvenilir olarak belirleyen tek bir deney yöntemi henüz mevcut değildir. Killerin dispersivite özelliğini güvenilir bir biçimde belirlemek için örnekler üzerinde fiziksel ve kimyasal deneylerin tümünün yapılarak sonuçların birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Bell ve Walker (2000) birden fazla deneyin sonucunu esas alan ağırlıklı bir puanlandırma sistemi önermişlerdir. Bu çalışmada da söz konusu puanlandırma sistemi ile belirlenen dispersivite sınıfları esas alınarak istatistiksel analiz ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu nedenle, çalışmada incelenen kil örneklerine ait tüm dispersivite deney yöntemlerinden (saf su kullanılarak yapılan dispersivite deneyleriyle) belirlenen dispersivite sınıfları Bell ve Walker (2000) tarafından önerilen puanlandırma sisteminde puanlandırılarak her örnek için tek bir dispersivite sınıfı belirlenmiştir (Çizelge 2).

Dispersivitenin kestirimi için yapılan istatistiksel çözümlerinde belirlenen bu yeni sınıfların kullanılabilmesi amacıyla, elde edilen sınıflara "dispersif değil" sınıfından "yüksek dispersif" sınıfına kadar olmak üzere, 1'den 5'e kadar değişen rakamlar verilerek örnekler sınıflandırılmıştır (Çizelge 3). Dispersivitenin kestirimi için yapılan istatistiksel çözümlerinde yeniden belirlenen bu dispersivite sınıfları kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 2. Dispersif killerin tanımlanması için Bell ve Walker (2000) tarafından önerilen puanlandırma sistemi.

Dispersivite deney ve yöntemleri	Sınıf puanı	Dispersivite sınıfı				
		Dispersif	Orta disp.	Az disp.	Dispersif değil	
İğne deliği	Puan	5	3	1	0	
Dağılma	Puan	3	2	1	0	
CEC-ESP	Puan	4	3	1	0	
TDS-SP	Puan	2	1	1	0	
SAR	Puan	2	1	1	0	
Toplam puan		=16	≥12	8-11	5-7	≤4
Yeni sınıf		Yüksek disp.	Dispersif	Orta Disp	Az disp.	Dispersif değil
Yeni sınıf no		5	4	3	2	1

Çizelge 3. İncelenen örneklerin Bell ve Walker (2000) tarafından önerilen puanlandırma sistemi kullanılarak belirlenen yeni dispersivite sınıfları.

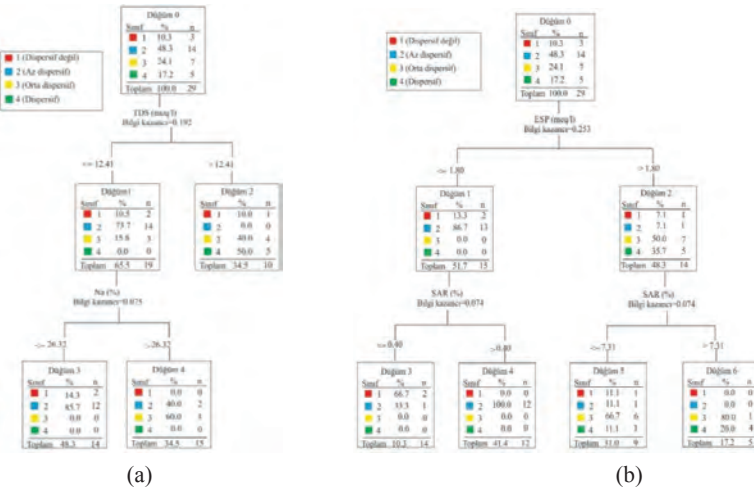
Örnek no	Dispersivite deney ve yöntemleri										Toplam puan	Yeni sınıf
	İğne deliği		Dağılma		TDS-SP		ESP-CEC		SAR			
	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan		
K1	ND3	3	K2	1	B	0	ND	0	ND	0	4	1
K2	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	7	2
K3	SP	0	K3	2	C	1	D	3	D	2	8	3
K4	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
K5	ND3	3	K3	2	C	1	D	3	D	2	11	3
K6	D2	5	K3	2	A	2	HD	4	D	2	15	4
K7	ND3	5	K4	3	C	1	HD	4	D	2	13	4
S1	ND4	5	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
S2	ND4	3	K2	1	B	0	ND	0	ND	0	4	1
SY1	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	I	1	6	2
SY2	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
SY3	ND1	0	K2	1	B	0	ND	0	ND	0	1	1
SY4	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
SY5	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
SY6	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	I	1	8	3
SY7	D2	5	K3	2	B	0	D	3	D	2	12	4
A1	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
A2	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
A3	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
G1	D2	5	K4	3	A	2	D	3	D	2	15	4
G2	ND3	3	K4	3	A	0	HD	4	D	2	14	4
G3	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
G4	ND4	3	K3	2	C	1	D	3	D	2	11	3
T1	ND4	3	K3	2	B	0	HD	4	ND	0	9	3
T2	ND4	3	K3	2	A	2	ND	0	D	2	9	3
Ç1	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
Ç2	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	I	1	6	2
AS1	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	7	2
AS2	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	I	1	8	3

3.1. Dispersivitenin Karar Ağacı Yöntemi İle Kestirimi

Çalışmanın bu bölümünde, yeniden belirlenen sınıf değerlerinin (Çizelge 3) karar ağacı modeli ile kestirimi amaçlanmıştır. Karar ağacı modeli, en kuvvetli ve en iyi kestirimi gerçekleştirebilmek için

bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki tüm ilişkilerin incelenmesine dayanmaktadır (Ma, 1998). Model oluşturulurken Çizelge 3'te verilen dispersivite sınıflarının en az değişken kullanılarak kestirimi amaçlanmıştır. Bunun için dispersivite sınıfları bağımlı değişken ve boşluk suyu analizi sonuçlarından elde edilen sayısal değişkenlerden sodyum adsorbsiyon oranı (SAR), değişebilir sodyum yüzdesi (ESP), toplam çözülmüş tuzlar (TDS ve sodyum yüzdesi (SP) değerleri ise bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Bağımsız değişkenlerden birbirleriyle yüksek ilişkiye sahip veriler modele aynı anda dahil edilemediği için iki farklı karar ağacı modeli oluşturulmuştur.

Şekil 2'de TDS ve SP bağımsız değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modeli sunulmuştur. Modelde, dispersivite sınıfları kök düğümü olarak atanmış ve toplam çözülmüş tuzlar ile yüzde sodyum değerlerine göre dispersivite sınıflarını belirleyen kurallar üretilmiştir (Şekil 2 (a)). Oluşturulan modelin yeterliliğinin kontrol edilmesi amacıyla modelden kestirilen dispersivite sınıfları ve çalışmadan belirlenen dispersivite sınıfları karşılaştırılmıştır (Çizelge 4 (a)). Buna göre, oluşturulan modelin dispersif sınıfını (4. sınıf) %100 doğru tahmin etmiş olduğu görülmektedir. Ayrıca, az dispersif sınıfını da (2. sınıf) %686 oranında doğru tahmin etmiştir. Modele ait genel tahmin yüzdesi ise %69 olarak belirlenmiştir. İkinci karar ağacı modelinde ise, dispersivite sınıflarının kestirimi amacıyla sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) ve değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerleri bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Şekil 2b'de sunulan ve SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modelinde kök düğümü olarak atanan dispersivite sınıflarından SAR ve ESP değerlerine göre kurallar oluşturularak alt dallar üretilmiştir. Modelden kestirilen ve çalışmadan belirlenen dispersivite sınıfları karşılaştırıldığında modelin az dispersif (2. sınıf) ve orta dispersif (3. sınıf) sınıfında oldukça iyi tahminlerde bulunduğu görülmektedir. Modelin genel tahmin yüzdesi ise %82,8 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4b) SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak oluşturulan modelin TDS ve SP değişkenleri kullanılarak oluşturulan modelden daha kuvvetli kestirim performansına sahip olduğu görülmüştür. Oluşturulan her iki model üzerinde yapılan yeterlilik kontrolleri değerlendirildiğinde, dispersivite sınıfı üzerinde sodyum iyonunun etkili olduğunu söylemek mümkündür. TDS, SP, ESP, SAR değerlerinin artışına koşut olarak, dispersivite sınıfında da bir yükselme belirlenmiştir.



Şekil 2. Boşluk suyu analizinden belirlenen sayısal değişkenler kullanılarak oluşturulan karar ağacı modelleri (a)TDS ve SP bağımsız değişkenleri kullanılarak oluşturulan model, (b)SAR ve ESP bağımsız değişkenleri kullanılarak oluşturulan model.

3.2. Dispersivitenin Lojistik Regresyon Yöntemi İle Kestirimi

Dispersivite deneyleri sonucunda belirlenmiş olan sınıflar ve boşluk suyu analiz sonuçlarından elde edilen sayısal değişkenler lojistik regresyon analizi için oldukça uygun veri kümeleri oluşturmaktadırlar. Bu nedenle, ağırlıklı puanlandırma sistemiyle yeniden belirlenmiş dispersivite

sınıflarının (Çizelge 3) lojistik regresyon modeli kullanılarak boşluk suyu analiz sonuçlarından elde edilen önemli sayısal değişkenlerden kestirimi amaçlanmıştır.

Çizelge 4. Karar ağacı modelinden tahmin edilen dispersivite sınıfları ile çalışmadan belirlenen dispersivite sınıflarının karşılaştırılması,

(a) TDS ve SP değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modelinden tahmin edilen sınıfların karşılaştırması, (b) SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modelinden tahmin edilen sınıfların karşılaştırması.

(a)

Deneysel yöntemle elde edilen dispersivite sınıfları	Tahmin edilen dispersivite sınıfları				Doğru sınıflama (%)
	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4	
Sınıf 1	0	2	0	1	0.0
Sınıf 2	0	12	2	0	85.7
Sınıf 3	0	0	3	4	42.9
Sınıf 4	0	0	0	5	100.0
Genel yüzde (%)	0.0	48.3	17.2	34.5	69.0

(b)

Deneysel yöntemle elde edilen dispersivite sınıfları	Tahmin edilen dispersivite sınıfları				Doğru sınıflama (%)
	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4	
Sınıf 1	2	0	1	0	66.7
Sınıf 2	1	12	1	0	85.7
Sınıf 3	0	0	6	1	85.7
Sınıf 4	0	0	1	4	80.0
Genel yüzde (%)	10.3	41.4	31.0	17.2	82.8

Çizelge 3'de dispersif değil (1. sınıf) ve az dispersif (2. sınıf) olarak tanımlanan sınıflar dispersif olmayan zeminler olarak birleştirilmiş ve (1 no.lu sınıf), orta dispersif (3. sınıf) ve dispersif (4. sınıf) olarak tanımlanan sınıflar ise dispersif zeminler (2 no.lu sınıf) olarak birleştirilmişlerdir. Buna göre, incelenen örnekler için belirlenmiş olan dört dispersivite sınıfı dispersif değil (1 no.lu sınıf) ve dispersif (2 no.lu sınıf) olmak üzere iki sınıf olarak yeniden tanımlanmıştır. Modelde, bağımlı değişken olarak seçilen dispersivite sınıfları üzerinde boşluk suyu analizi sonuçlarından elde edilen TDS ve SP bağımsız değişkenleri arasındaki ilişki kestirilmeye çalışılmıştır. Analizler SPSS Statistics istatistiksel paket programı kullanılarak yapılmıştır. Modelden elde edilen lojistik regresyon eşitliği;

$$\text{Sınıf olasılığı} = -10.548 + 0.190 \text{ TDS} + 0.270 \text{ Na} \quad (r^2=0.866) \quad (1)$$

olarak bulunmuştur. TDS ve SP bağımsız değişkenlerine ait risk değerlerine bakıldığında TDS ve SP değerleri arttıkça örneklerin dispersif sınıfa (2. sınıf) geçme eğiliminin yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca modele ait Nangelkerke belirleme katsayısı $r^2= 0.866$ olarak bulunmuş ve modelin anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır. Model yeterliliğinin kontrolü amacıyla lojistik regresyon analizi yapılarak tahmin edilen sınıflarla deneysel sınıflar karşılaştırılmıştır (Çizelge 5).

Çizelge 5. İki değişkenli lojistik regresyon modelinden tahmin edilen dispersivite sınıfları ile çalışmadan belirlenen dispersivite sınıflarının karşılaştırılması.

Deneysel yöntemle elde edilen dispersivite sınıfları	Tahmin edilen dispersivite sınıfları		Doğru sınıflama (%)
	Sınıf 1	Sınıf 2	
Sınıf 1	16	1	94.1
Sınıf 2	1	11	91.7
Genel yüzde (%)			93.1

Buna göre, dispersif olmayan sınıfta (1. sınıf) yer alan 17 örneğin 16 tanesinin ve dispersif sınıfta (2. sınıf) yer alan 12 örneğin 11 tanesinin doğru sınıflandığı görülmektedir. Kurulan modelin genel olarak doğru sınıflama oranı %93.1 olarak belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında yapılan deney ve çözümlenmeler sonucunda killi zeminlerin fiziksel ve indeks özellikleri ile dispersivite arasında bir ilişki olmadığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, dispersif özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan fiziksel dispersivite deneylerinden elde edilen dispersivite sınıfları farklılık gösterirken, kimyasal dispersivite deneyleri kapsamında yapılan sınıflamalar karşılıklı incelendiğinde elde edilen sonuçların genel anlamda birbirleriyle uyumlu olduğunu söylemek mümkündür. Fiziksel dispersivite deneylerinden iğne deliği ve dağılma deneyi sonuçlarına göre dispersif ve ara zemin olarak sınıflandırılan örneklerin tümünde simektit grubu kil mineralleri %50 ve bu değer üzerinde yer almaktadır. Aynı kil örneği üzerinde yapılan fiziksel ve kimyasal dispersivite deney sonuçlarının farklılık göstermesi ve dispersiviteyi belirlemeye yönelik tek ve güvenilir bir deney yönteminin olmaması sebebiyle farklı istatistiksel kestirim ve esnek hesaplama yöntemleri kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Lojistik regresyon yöntemi kullanılarak önerilen model, TDS ve SP değişkenlerine bağlı olarak örneklerin dispersif veya dispersif olmayan sınıfa geçme olasılığına ilişkin kuvvetli kestirimler yapma olanağı sunmuştur. Bu çalışmadan elde edilen bulgular dikkate alınarak bundan sonraki dönemde örnek sayısı ve çeşitliliği artırılarak dispersivitenin incelenmesi ve istatistiksel modellerin sınanması önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Aitchison, G.D., Wood, C.C., 1965. "Some interactions of compaction, permeability and post-construction deflocculation affecting the probability of piping failures in small dams", Proceedings, 6th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, Int. Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cilt II, 442, 1965.
- ASTM, D4318, 2000. Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. Section-4, Construction, V.04.08, ASTM Publication, 972.
- ASTM, D698, 2000. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Building stones, Section-4, Construction, V.04.08, ASTM Publication, 972.
- ASTM, D4221, 2000. Standard test methods for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer. Building stones, Section-4, Construction, V.04.08, ASTM Publication, 972.
- ASTM D6572, 2000. Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soil by the crumb test. Building stones, Section-4, Construction, V.04.08, ASTM Publication, 972
- ASTM D4647, 2000. Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soil by the crumb test. Building stones, Section-4, Construction, V.04.08, ASTM Publication, 972
- Bell FG, Maud RR, 1994. Dispersive soils: a review from a South African perspective. Q J Eng Geol 27: 195–210
- Bell, F. G., Walker, D.J.H., 2000. A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa", Quaterly J. of Engineering Geology and Hydrogeology, Cilt 33, 187-199, 2000.
- Düzceer, R., 1984. An investigation on internal erosion phenomenon in earth dams, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gerber, A., Harmse, H. J., 1987. Proposed procedure for identification of dispersive soils by chemical testing. Civil Eng S Afr. 9: 397–399.
- Gündoğdu, M. N., 1982. Geological, mineralogical and geochemical investigation of Neogene aged Bigadic sedimentary basin. PhD thesis, Hacettepe University, Institute of Geosciences.
- Haliburton, T. A., Petry T. M., Hayden, M. L., 1975. Identification and treatment of dispersive clay soils, Report to Bureau of Reclamation, Denver, CO, pp. 12–13.
- ICCD, 1993. Mineral powder diffraction file databook sets 1–42, Int. Centre for diffraction data.
- Knodel, P. C., 1991. Characteristics and problems of dispersive clay soils, USBR Materials Engineering Branch, Report no: R-91-09, 17, Denver.
- Mitchell, J. K., 1976. Fundamentals of soil behavior. Wiley, New York, p 560.
- Ma, Y., 1998. Data Warehousing, OLAP and data mining: an integrated strategy for use at FAA, Department of Electrical Engineering and Computer Science, MIT.
- Nontananandh, S., Thongmit, C., Jotikansa, A., Suriyavanagul, P., Chantawaran, K., 2006. A preliminary study of dispersive soil erosions of reservoirs and road embankments in Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon province campus, Kasetsart University Project, 1–10.
- Sherard, J. L., Decker, R. S., Ryker, N. L., 1972. Piping in earth dams of dispersive clays, Proc., Specialty Conf. on Perf. of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol1, part 1, pp 584–626.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., Steele, E. F., 1976a. Pimhole test for identifying dispersive soils. J Geotech Eng Division ASCE 102:69–85.
- Sherard, J. L., Decker, R. S., 1977. Dispersive clays related piping, and erosion in Geotechnical Projects, STP 623. ASTM, Philadelphia.
- Tosun, H., 1997. Comparative study on physical tests of dispersibility of soils used for earth fill dams in Turkey. ASTM Geotech Test J 20(2):242–251.

Atatürk Barajı Kil Çekirdeğinde Kullanılan Malzemenin Dispersivite Özelliğinin Araştırılması

Investigation of Dispersivity Properties of the Material Used for Clay Core of the Atatürk Dam

M. Belen^{1*}, E. Pınarcı², H. Çetin²

¹ Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü, 33220 Toroslar/MERSİN

² Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Sarıçam ADANA
(*mbelen@kgm.gov.tr)

ÖZ: Bu çalışmada Atatürk Barajı'nın kil çekirdek inşasında kullanılan malzemesinin dispersivite (dağılganlık) özelliği belirlenmiş olup, bu özelliğin barajın uzun süre stabilite durumuna etkisi araştırılmıştır. Kullanılan killi zeminden alınan örselenmiş zemin numunelerine sınıflama deneyleri yapılmıştır. Zeminin üzerinde yapılan XRF, XRD ve SEM analizleri ile zeminin vermikülit, kaolinit ve simektit türü kil minerallerince zengin olduğu belirlenmiştir. Standart Proctor Deneyi yapılarak zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği belirlenmiş olup bu değerler kullanılarak iğne deliği, çifte hidrometre ve dağılma deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, kil çekirdek malzemesinin dispersif (dağılgan) olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dispersivite, kil, Atatürk Barajı, dolgu baraj.

ABSTRACT: In this study, the dispersivity of the material used for the clay core of the Atatürk Dam and its effect on the long term stability of the dam have been investigated. Soil classification tests have been performed on disturbed samples of clay material used in the clay core. XRF, XRD and SEM analysis show that the clay material is rich in vermiculite, kaolinite and simectite type clays. The pinhole and double hydrometer and crumb tests have been performed according to maximum dry unit weight and optimum moisture content determined by the Standart Proctor test. In conclusion, it was determined that the clay core material is a non-dispersive material.

Keywords: Dispersivity, clay, Atatürk Dam, fill-dams

1. GİRİŞ

Barajlar, bir akarsu vadisini kapatan ve arkasında su biriktiren; enerji üretimi, içme ve/veya sulama suyu temini ve akarsuların düzenlenmesi gibi pek çok gayeye hizmet eden ekonomik faydası büyük olan tesislerdir (Erguvanlı, 1982).

İnşa edilen barajın tipi ve boyutu ihtiyaca, mevcut olan suya, sahanın topoğrafya ve jeolojisine ve kolaylıkla elde edilebilir inşaat malzemesine bağlıdır. Barajlar, yapıldıkları malzemeye göre beton ve dolgu barajlar olarak ikiye ayrılırlar (Bell, 2004).

Dolgu barajlar toprak dolgu, kaya dolgu ve/veya ikisinin bileşimi olmak üzere çeşitli şekillerde inşa edilebilirler. Atatürk Barajı kil çekirdekli kaya dolgu baraj olarak inşa edilmiş olup Adıyaman ve Şanlıurfa illeri arasında, Fırat Nehri üzerinde kurulu, enerji ve sulama amaçlıdır. 1983 yılında inşaatı başlamış olan baraj 1992 yılında işletmeye açılmıştır. Atatürk Barajı'nın genel özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Atatürk Barajı'nın genel özellikleri (Çetin vd., 2000)

Tip	Kil çekirdekli kaya dolgu
Amaç	Sulama ve enerji
Hacim	84.5 x 10 ⁶ m ³
Kret yüksekliği	549 m
Kret uzunluğu (dolgu)	1664 m
Kret genişliği	15 m
Temel genişliği	184 m
Talvegden yükseklik	169 m
Maksimum su seviyesi	542 m
Minimum su seviyesi	526 m
Minimum kullanılabilir su seviyesi	513 m
Maksimum rezervuar hacmi	48.7 km ³
Minimum rezervuar hacmi	29.4 km ³
Rezervuar alanı	817 km ²
Drenaj alanı	92338 km ²
Türbin Sayısı	8
Kurulu kapasite	2400 MW
Yıllık enerji üretimi	8900 GWh

Dolgu barajlarda barajın en önemli yapısı kil çekirdek olarak adlandırılan kısımdır. Bu bölümün stabilitesini etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar malzemenin sıkıştırılması, kullanılan kil zeminin cinsi, plastikliği ve dispersivitesi olarak söylenebilir.

Dispersif (dağılgan) killer, su ile temas ettiğinde ciddi şekilde erozyona uğrayan ve boşluk suyundaki çözünmüş sodyum iyonu yüzdesi yüksek olan zeminlerdir. Bu tür zeminlerde koloidal kil mineralleri, durgun su içinde dahi dağılma ve ayrışmaya uğrayarak süspansiyon oluşturur. Dispersif killerin sedde ve dolgu barajlar gibi yapılarda geçirimsiz malzeme olarak kullanımı, ciddi içsel erozyon (borulanma) problemlerine ve buna bağlı göçmelere neden olmaktadır (Şahin, 2004).

2. DISPERSİVİTEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Killerin dispersivite karakteristiklerini etkileyen değişik faktörler vardır. Bu faktörlerin etki derecesi değişik zamanlarda farklı şekilde değerlendirilmiştir.

2.1 Kıyım Karakteristikleri ve Kil Muhtevası

Zeminin plastisite indisi 4'ten küçük ($PI < 4$) olması halinde zeminin dispersif olmayacağı ve dispersif olan numunelerin hiçbirinin "yüksek elastisiteli silt" olmadığı ve "%10'dan daha az kil ihtiva eden zeminlerin dispersif borulanmanın oluşması için gerekli koloidal yapıya sahip olmadıkları" tespit edilmiştir (Sherard vd., 1972; Ryker, 1977).

2.2 Kilin Mineralojik Yapısı

Dispersiyon göçmesine, montmorillonit tipi kilin varlığının önemli ölçüde etkili olduğunu belirlenmiştir (Stapledon ve Casinader, 1972). Bazı illitler, yüksek dispersif kil özeliği taşımaktadır. Çok miktarda kaolinit içeren kil zeminlerde, dispersif davranış yaygın değildir. (Bell ve Walker, 2000).

2.3. Sıklık ve Su Muhtevası

En düşük erozyonun optimum su muhtevasının %2-3 ıslak yönünde olduğu görülmektedir. Kuru yoğunluğunun artmasıyla, erozyon oluşumunun azalma eğilimi gösterdiği ortaya konulmuştur (Lewis ve Schmit, 1977; Wan ve Fell, 2004).

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Şanlıurfa Bozova ilçesinde Sam-Tekin kil ocağından alınmış Atatürk Barajı kil çekirdek malzemesi olarak kullanılan kırmızı renkli kalıçilli killi zemin numuneleri ana materyal olarak kullanılmıştır. Ayrıca bu numunelerin indeks ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde elek ve hidrometre seti, Casagrande likit limit cihazı, kompaksiyon (Standart Proctor) deney aletleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), XRD, XRF cihazları ve rutin laboratuvar araç gereçleri kullanılmıştır.

Bu çalışma; arazi öncesi çalışmalar, arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları (zemin mekaniği, kimyasal analizler, SEM görüntüleri ve XRF, XRD analizleri) ve büro çalışmaları olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

Zeminlerin dispersivite özelliğini tek bir deneyle belirlemek güvenilir olmamaktadır. Bu nedenle numune üzerinde fiziksel deneyler ve kimyasal analizler yapılmış olup elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek dispersivitesi belirlenmiştir.

4.1. Fiziksel Deneyler

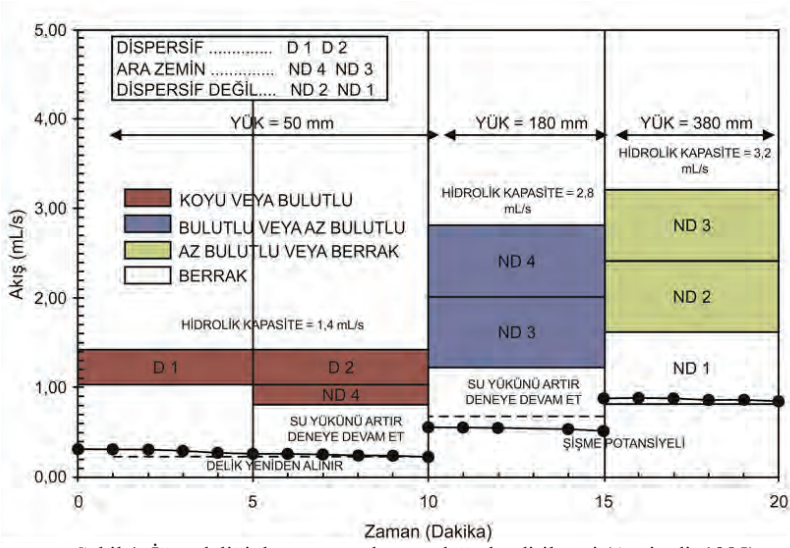
Numunenin dispersivitesini belirlemek için bir dizi fiziksel deney (iğne deliği, çifte hidrometre ve dağılma deneyi) yapılmıştır. Bu deneyler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

4.1.1. İğne deliği deneyi

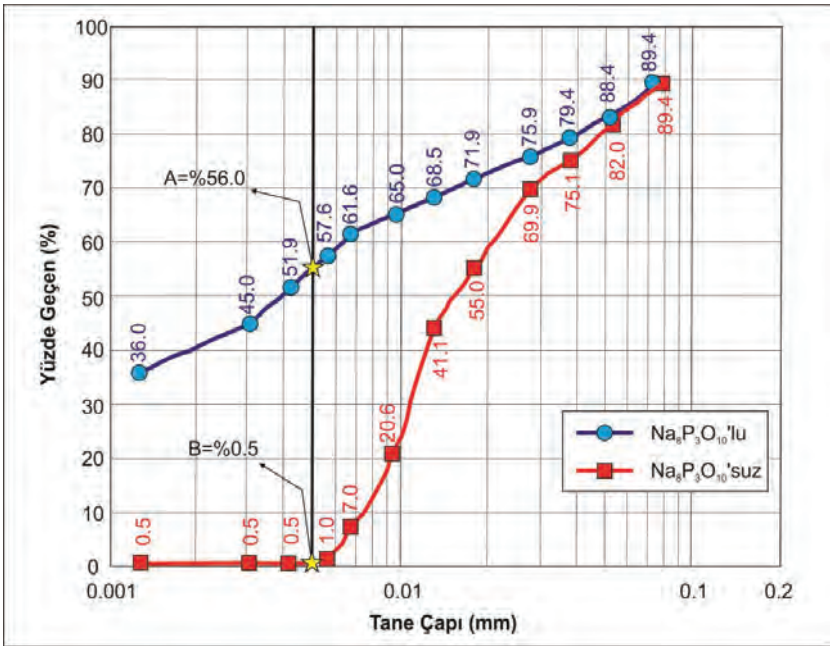
Sıkıştırılmış killi zeminlerin dispersifliğini belirlemek amacıyla Sherard vd. (1976) tarafından geliştirilmiştir. ASTM D 4647-87 standardında belirtildiği şekilde, 25 mm uzunluğunda ve 35 mm çapında sıkıştırılmış silindirik bir zemin numunesinin ortasından 1 mm çapında bir delik açılarak bu delikten 50, 180, 380 ve 1020 mm düşülerde saf su geçirilir ve deşarj olan suyun akış hızı, bulanıklılığı ile deliğin ne kadar genişlediği kaydedilir. Deney sonucunda malzeme 50 mm su yükü altında hızla dağılıyorsa “dispersif”, 50 veya 180 mm yük altında yavaşça erozyona uğruyorsa “ara zemin”, 380 veya 1020 mm yük altında erozyon gözlenmiyorsa “dispersif değil” olarak rapor edilir (Şahin, 2004). İğne deliği deneyi sonucunda zemin ND1 (non-dispersif) çıkmıştır (Şekil 1).

4.1.2. Çifte hidrometre deneyi

Deney ASTM D 4221-90 standardında belirtildiği şekilde yapılmıştır. Öncelikle mekanik karıştırıcı (mikser) ve kimyasal ayrıştırıcı kullanılarak yapılan standart hidrometre deneyi ile numunenin tane büyüklüğü dağılımı belirlenir. Aynı malzemeden hazırlanmış ikinci numune üzerinde ise mekanik mikser ve kimyasal ayrıştırıcı kullanılmadan hidrometre deneyi yapılır. Her iki numuneye ait tane dağılım eğrileri çizilerek 0.005 mm'den küçük tanelerin ikinci deneydeki yüzdesi, birinci deneydekine oranlanarak dispersiyon yüzdesi bulunur. Dispersiyon yüzdesi %30'dan az ise malzeme “dispersif değil”, %30-%50 arasında ise “ara zemin”, %50'den fazla ise “dispersif” olarak rapor edilir (Şahin, 2004). Çifte hidrometre deney sonucunda dispersiyon yüzdesi % 0.9 çıktığı için numunenin dispersif olmadığı belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. İğne deliği deney sonuçlarının değerlendirilmesi (Acciardi, 1985).

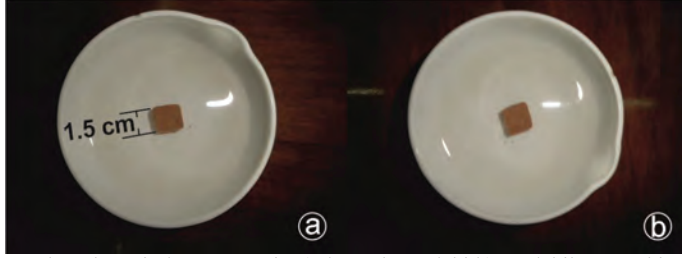


Şekil 2. Çifte hidrometre deneyi tane boyu dağılım grafikleri.

4.1.3. Dağılma deneyi

Bu deneyde her bir kenarı 15 mm ebadında kübik bir zemin numunesi veya hacmi buna eşit bir zemin parçası hazırlanarak 250 ml saf su dolu kap içerisine dikkatlice yerleştirilir. Malzemenin su ile nasıl bir reaksiyon yaptığı, kolloidal kil parçacıklarının suyun içinde ayrışarak süspansiyon yapıp yapmadığı 5-

10 dakika süreyle gözlenir. Sudaki bulanıklık veya bulutluluk ve reaksiyonun derecesi yok denecek kadar zayıf ise “dispersif değil”, az ise “ara zemin”, orta derecede ise “dispersif” ve kuvvetli ise “aşırı dispersif” olarak tanımlanır (Şahin, 2004). Standartlara uygun olarak yapılan deneyde hiçbir bulanıklık ve süspansiyon gözlenmediği için dağılma deneyine göre dispersif olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Dağılma deneyinde numunenin a) deney başındaki b) 10 dakika sonraki görünümü.

4.2. Kimyasal Analizler

Kimyasal deneylerde zemin numunesi likit limit kıvamına gelinceye kadar saf su ile karıştırılır ve malzemeden vakum yardımıyla bir boşluk suyu örneği (saturation extract) filtre edilir. Bu boşluk suyundaki Ca, Mg, Na ve K gibi katyonların miktarı kimyasal yöntemlerle meq/l (milliequivalent/liter) cinsinden belirlenir. Zeminlerin dispersiflik derecesini tayin edebilmek için değişebilir sodyum yüzdesi (ESP), sodyum absorpsiyon oranı (SAR), sodyum yüzdesi (%Na), toplam çözülmüş tuzlar (TDS), katyon değişim kapasitesi (CEC) gibi bazı parametreler geliştirilmiştir ve bu parametreler analizler sonucunda tespit edilmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kimyasal analiz sonuçları.

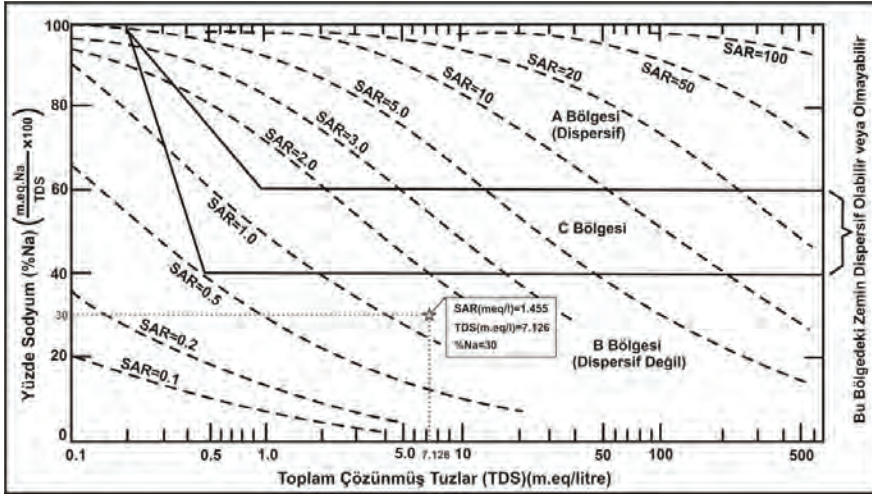
ESP	CEC	SAR	TDS	%Na
(meq/100 g)	(meq/100 g)	(meq/l)	(meq/l)	
5.627	37.990	1.455	5.627	30

ESP değeri 7’den küçük ise malzeme “dispersif değil”, 7-10 arasında ise “ara zemin” ve 10’dan büyük ise “dispersif” olarak tanımlanır (Çizelge 3). Deney sonucunda ESP değeri 5.627 meq/100 g olarak bulunmuş olup zeminin dispersif olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 3. Değişebilir sodyum yüzdesine bağlı nitel sınıflama (Knodel, 1991).

ESP (meq/100 g)	Dispersiyon derecesi
<7	Dispersif değil
7-10	Geçiş zemini
>10	Dispersif

Şekil 4’de SAR, %Na ve TDS değerleri göz önünde bulundurulduğunda yine malzeme dispersif olmayan bölgede çıkmıştır.



Şekil 4. TDS, %Na ve SAR parametrelerine göre dispersiflik derecesi grafiği (Sherard vd., 1976).

4.3. SEM Görüntüleri, XRD ve XRF Analizleri

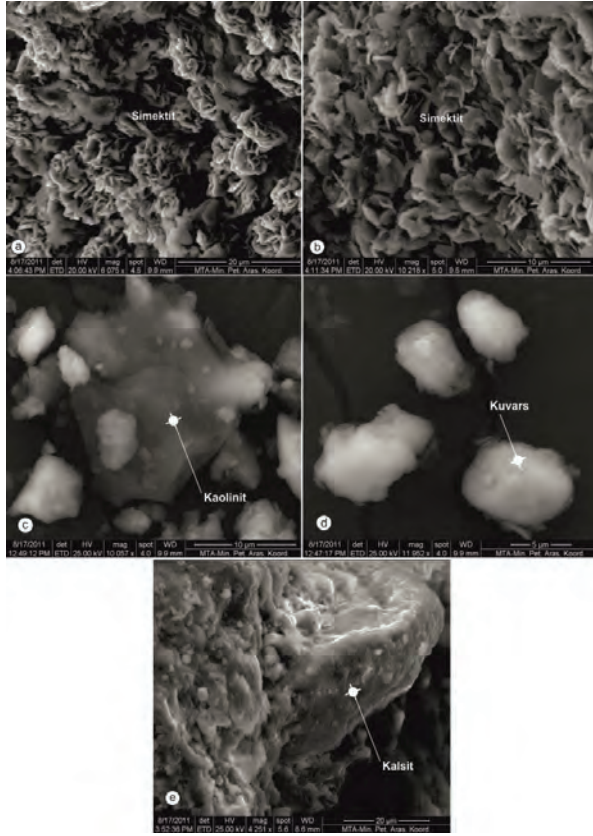
Cu X-ışın tüplü Bruker D8 Advance XRD cihazı ile 2-70° arasında gerçekleştirilen XRD detay kil analiz sonucunda numune içerisinde kalsit, kuvars ve kil grubu mineralleri (simektit, kaolinit ve vermikülit) tespit edilmiştir.

THERMO marka XRF Spektrometresinin UQ programı kullanılarak XRF sonuçları Çizelge 4'deki gibi “%” cinsinden elde edilmiştir.

Çizelge 4. XRF analiz sonuçları.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	LOI (%)
41.45	10.85	6.75	16.55	3.55	0.05	1.20	0.80	0.15	0.15	18.45

FEI Quanta 400 MK2 model taramalı elektron mikroskop (SEM) altında elektron dedektör görüntüsü çekilmiş olup XRD sonuçlarını destekleyen kuvars, kalsit, kaolinit ve büyük oranda simektit türü kil minerali görüntüleri Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. SEM görüntüleri a-b) simektit, c) kaolinit, d) kuvars, e) kalsit.

Numunenin kimyasal bileşenlerine göre Çizelge 5’de görüldüğü üzere çoğunlukla montmorillonit türü kil mineralinden oluştuğu görülmüştür. İçerisindeki CaO miktarının aralığın dışında kalma nedeni numunede bulunan kalıçilerden ileri gelmektedir. Aynı zamanda CaO'nun yüksek olması şişme büzülme özelliğini azaltıp aktivitenin düşmesine neden olduğu söylenebilir. MgO, K₂O ve TiO₂ değerlerinin aralık içerisinde çıkmaması zeminin sadece montmorillonit türü kil mineralinden oluşmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 5. Kil minerallerinin kimyasal bileşimi (ağırlığa göre %) (Scheffer ve Schachtschabel, 1970).

Kil minerali	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Kaolinit	45-48	38-40	-	-	-	-	-	-
Montmorillonit	42-55	0-28	0-30	0-0.5	0-3	0-2.5	0-0.5	0-3
İllit	50-56	18-31	2-5	0-0.8	0-2	1-4	4-7	0-1
Vermikülit	33-37	7-18	3-12	0-0.6	0-2	20-28	0-2	0-0.4
Klorit	22-35	12-24	0-15	-	0-2	12-34	0-1	0-1

5. SONUÇLAR

XRF analizi neticesinde numunenin kimyasal bileşiminde %41,45 SiO₂, %10,85 Al₂O₃, %6,5 Fe₂O₃, %16,55 CaO, %3.55 MgO, %0.05 Na₂O, %1,2 K₂O, %0,8 TiO₂, %0.15 P₂O₅, %0.15 MnO tespit edilmiştir. Dispersivite özellikleri belirlenirken tek bir deneye dayalı kesin bir sonuç mümkün olmadığından kimyasal ve fiziksel deneyler olmak üzere numunenin dispersivitesi araştırılmıştır. Buna göre; Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi kimya laboratuvarında yapılan kimyasal deneyler sonucunda CEC 37.99 meq/100 g, ESP 5.627 meq/100 g, TDS 5.627 meq/l, SAR 1.455 meq/l, %Na 30 olarak bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak numunenin dispersif olmadığı tespit edilmiştir.

Yapılan iğne deliği deneyi sonucunda numune "ND1" bulunmuş olup dispersif olmadığı belirlenmiştir. Çifte hidrometre deneyinde bulunan sonuçta da numunenin dispersif olmadığı görülmüştür. Gözleme dayalı dağılma deneyinde numune de dağılma derecesine bakılarak yine numunenin dispersif olmadığı sonucuna varılmıştır. Fiziksel ve kimyasal deneylerinin tümü bir arada değerlendirildiğinde malzemenin büyük çoğunluğu montmorillonit türü kil minerallerinden oluşmasına rağmen dispersif özellikte olmadığı belirlenmiştir.

6. KATKI BELİRTME

Bu Çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. (Proje No: MMF2010YL13).

7. KAYNAKLAR

- Acciardi, R.G., 1985, Pinhole test equipment design and test result evaluation, United States Department of The Interior Bureau of Reclamation, REC- ERC-85-3, p.76.
- Bell, F. G., 2004. Mühendislik Jeolojisi ve İnşaat, Gazi Kitabevi, Ankara, 797 s. (Çeviri: Kayabalı, K., 2006).
- Bell, F. G., and Walker, D. J., 2000. A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, V.33, pp. 187-1999.
- Çetin, H., Laman, M., Ertunç, A., 2000. Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Atatürk Dam in Turkey. Engineering Geology 56: pp. 225-242.
- Erguvanlı, K., 1982. Mühendislik Jeolojisi, Seç Kitabevi, İstanbul, 575s
- Knodel, P.C., 1991, Characteristics and problems of dispersive clay soils, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Materials Engineering Branch, Denver, USA, R91-09, p.17
- Lewis, D. A., ve Schmit, N. O., 1977. Erosion of unsaturated clay in pinhole test, ASTM STP 623, pp. 260-273.
- Ryker, N. L., 1977. Encountering Dispersive Clays On Soil Conservation Service Projects in Oklahoma, ASTM STP 625, pp.370-389.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., 1970. Lehrbuch der Bodenkunde seventh edition. Enke, Stuttgart.
- Sherard, J. L., Decker, R. S., and Ryker, N. L., 1972. Piping in earth dams of dispersive clay, Proceedings, Speciality Conference on the Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, pp. 589-626.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L.P. and Decker, R.S., 1976. Identification and nature of dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol:102, n.GT2, pp. 287-301.
- Stapledon, D. H., and Casinader, R. J., 1972. Dispersive Soils at Sugarloaf Dam Site, near Melbourne, Australia, ASTM STP 623, pp. 432-466.
- Şahin, M., 2004. Dispersif killerle projelendirmeye bir örnek Koyunbaba Barajı, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 430 s. 48-54.
- Wan, C. F., and Fell, R., 2004. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, April, pP. 373-379.

Bey pazarı Gölet Yerindeki Tüfün Temel Kaya Olabilirliğinin İncelenmesi, (Ankara) *Investigation of Tuff as Foundation Material at Bey pazarı Reservoir Site (Ankara)*

K. Ulaşım^{1*}, R. Temiz², R. Kılıç¹

¹ Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara

² Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara

(*ulamis@ankara.edu.tr)

ÖZ: Jeolojik birimlerin geçirimsizlik, dayanım ve kazılabilirliklerinin belirlenmesi baraj yeri seçiminde önemlidir. Bu çalışmada, Ankara ili, Bey pazarı İlçesinin kuzeyinde planlanan Bey pazarı Gölet yerindeki birimlerin kaya kütle özellikleri değerlendirilmiştir. Temel birim Miyosen yaşlı Hırka Formasyonu'na ait litik tüftür. DSI tarafından eksen yerinde ve sondajlar ve basınçlı su (Lugeon) deneyleri yapılmıştır. Litik tüf "geçirimsiz" ve "çok geçirimsiz" dir. Tek eksenli sıkışma dayanımına göre "yüksek modül oranlı, çok düşük ve düşük dayanımlı", birleşik ayrışma indeksine (UAI) göre "son derece ayrılmış" ve "az ayrılmış", RMR ile Q sınıflamalarına göre "zayıf-orta" ve GSI değerine göre "bloklı-örselenmiş kaya" olarak tanımlanmıştır. Litik tüfün kazılabilirlik sınıflamasında süreksizlikler ve kaya kütle sınıfları kullanılmıştır. Sağlam karotların dayanımı ile süreksizlik açıklığının karşılaştırılması veya sonik dalga hızına göre kazılabilirliğin yorumlanması anizotropi dikkate alındığında yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Kaya kütle dayanımı ve süreksizlik özelliklerini dikkate alarak geliştirilen kazılabilirlik indeksine göre litik tüf " orta- zor kazılabilir" sınıfındadır.

Anahtar Kelimeler: Tüf, Kaya Kütle sınıflaması, Geçirimsizlik, Kazılabilirlik, Bey pazarı Göleti

ABSTRACT: Investigation of permeability, strength and slope stability characteristics of geological units is a key factor for dam site selection. This study aims to assess the rock mass properties of the units at the Bey pazarı reservoir place, located at northern Bey pazarı, Ankara. Main unit is lithic tuff of Miocene aged Hırka Formation. Boreholes were drilled by DSI with Lugeon Testing program. The lithic tuff is "permeable" and "highly permeable". Same unit is also classified as "rock with high modulus ratio with very low and low strength" based on uniaxial compressive strength; "extremely altered" and "slightly altered" based on unified alteration index (UAI); "weak-moderate" based on RMR and Q; "blocky-disturbed rock mass" based on GSI classifications. Excavability of the lithic tuff is investigated based on discontinuity and rock mass characteristics instead of using sonic wave velocity or comparison of discontinuities with intact rock strength due to anisotropy. Lithic tuff is classified as "hard ripping rock" regarding to excavability index, which takes the rock mass strength and discontinuities into account.

Keywords: Tuff, rock mass classification, permeability, excavability, Bey pazarı Reservoir

1. GİRİŞ

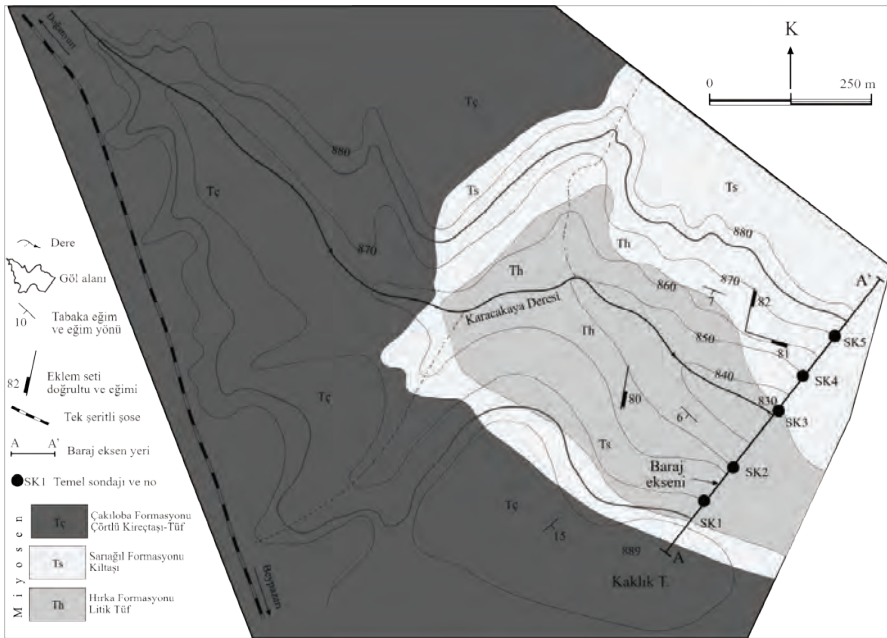
Kaya kütlelerinin jeolojik ve jeoteknik değerlendirmesi, inşa edilecek mühendislik yapılarının güvenli olarak ekonomik ölçülerde yapılabilirliği açısından önemlidir. Baraj yeri planlamasında jeolojik birimlerin taşıma gücü, geçirimsizlik, kazılabilirlik ve kazı şevlerinin duraylılıklarının belirlenmesi gereklidir. Kaya ve zeminlerin kazılabilirlik özellikleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Weaver, 1975; Church, 1981; Abdullatif ve Cruden, 1983; Smith, 1986; Pettifer ve Fookes, 1994; Basarir ve Karpuz, 2004; Tsiambos ve Saroglu, 2009).

Bu çalışmada; Bey pazarı Göleti eksen yerindeki Miyosen yaşlı litik tüflerin RMR, Q ve GSI kaya kütle sınıflamalarını belirlemek için sondajlar ve arazide hat incelemeleri yapılmıştır. Lugeon deneyleri ile tüflerin geçirimsizlikleri belirlenmiş olup, aks yeri bölgelendirilmiştir. Litik tüflerin indeks ve jeomekanik özellikleri laboratuvarında incelenmiştir. Arazi ve laboratuvar verilerini birarada dikkate

alan kazılabilirlik indeksi hesaplanarak aks yerinin ve diğer baraj yapılarının oturacağı temel birim olan tüfün kazılabilirlik/sökülebilirlik derecesi belirlenmiştir.

2. JEOLJİ

İnceleme alanı ve çevresi ile ilgili genel jeoloji amaçlı çalışmalar yapılmıştır (Stchepinsky, 1942; Erol, 1955; Türkecan vd., 1999). İnceleme alanında temel birimler Beypazarı Neojen havzası içinde yer alan Miyosen yaşlı Hırka, Sariağıl ve Çakılba formasyonlarıdır. Hırka formasyonuna ait birimler eksen yeri ve göl alanı civarında yaygın olarak gözlenir. Hırka formasyonu tipik olarak ismini aldığı Hırka Köyü'nde görülmektedir. Formasyon ilk kez Aziz (1976) tarafından tanımlanmıştır. İnceleme alanında yapılan jeoteknik amaçlı sondaj verilerine göre bu formasyona ait tabanda kiltası ve üstte litik tüf mevcuttur. Karacakaya deresinde talvegten itibaren üst kotlarda kahverengi turuncu rengeyle litik tüfler yer almaktadır. En altta bulunan Hırka formasyonu'nun üstüne gelen Sariağıl ve Çakılba formasyonları kiltası ve kireçtaşından oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Beypazarı Göleti eksen yeri ve göl alanının jeoloji haritası (Temiz, 2011).

3. ARAZİ ÇALIŞMALARI

İnceleme alanında litik tüflerde hat incelemeleri yapılarak süreksizlik karakteristikleri incelenmiştir. Süreksizliklerin yönelim, aralık, açıklık, devamlılık, pürüzlülük ve dolgu maddesi özellikleri ISRM (2007) esas alınarak belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır. DSİ tarafından eksen yerinde 5 adet toplam 600 m jeoteknik amaçlı sondaj yapılarak karot örnekleri alınmış ve yeraltı suyu seviyesi belirlenmiştir. Ayrıca, basınçlı su testi yapılarak geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir (Şekil 2).

4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Litik tüflerden alınan karot örneklerinin fiziksel (Çizelge 1) ve jeomekanik özellikleri (Çizelge 2) incelenmiştir. Toplam 25 adet karot örneğinin birim ağırlık, ağırlıkça/hacimce su emme ve gözeneklilikleri belirlenmiştir. Litik tüf, gözeneklilik değerlerine göre "çok fazla gözenekli" olarak değerlendirilmiştir (Moos ve Quervain, 1948). Kaya kütle sınıflamalarında, jeomekanik değerlendirme

ve kazılabilirlik sınıflamasında kullanılmak üzere litik tufün tek eksenli sıkışma dayanımı ile teğetsel elastisite modülü, poisson oranı ve P-dalga hızı aralıkları belirlenmiştir. Litik tuf, tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülüne göre "yüksek modül oranlı, çok düşük ve düşük dayanımlı" olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 1. Litik tufün fiziksel özellikleri.

	En düşük	En yüksek	Ortalama
Kuru birim ağırlık, kN/m ³	14.17	17.30	15.81
Doygun birim ağırlık, kN/m ³	16.64	20.07	18.26
Ağırlıkça su emme, %	12.15	20.09	15.51
Hacimce su emme, %	21.21	30.96	24.90
Gözeneklilik, %	21.21	30.96	24.90

Çizelge 2. Litik tufün jeomekanik özellikleri.

	En düşük	En yüksek	Ortalama
Tek eks. MPa	10.08	33.93	20.42
Teğetsel el. mod. MPa	6.70	40.0	21.97
Poisson oranı	0.23	0.47	0.39
V _p , m/s	2137	3157	2760

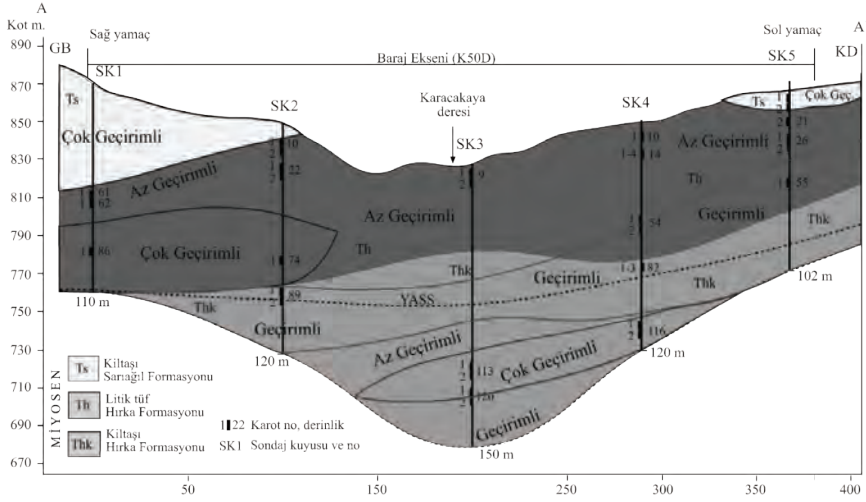
5. JEOMEKANİK DEĞERLENDİRME

Kaya kütle sınıflamasında kullanılmak üzere litik tufün RQD değerleri belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır (Çizelge 3). Özellikle talvegdeki sondajlarda RQD değeri %19 ile %43 arasında olup, "çok zayıf-zayıf" kaya grubundadır (Deere, 1964). Tufün tek eksenli basınç dayanımı 10.08 MPa ile 33.93 MPa arasında değişmekte olup birleşik ayrışma indeksine (UAI) göre "son derece ayrılmış" ve "az ayrılmış" sınıftadır (Kılıç, 1999).

Çizelge 3. Litik tufün ortalama RQD değerleri.

Sondaj	Lokasyon	Derinlik, m	RQD, %
SK1	Sağ yamaç	110	23.50
SK2	Sağ yamaç	120	38.21
SK3	Talveg	150	33.20
SK4	Sol yamaç	120	74.41
SK5	Sol yamaç	100	43.04

Süreksizlikler "orta aralıklı", "orta derecede geniş", "çok yüksek devamlı" ve "düzensel-pürüzlü" olarak sınıflandırılmıştır. Yeraltı suyu seviyesi 79 m ile 108 m arasında değişmektedir. Litik tufün geçirimsizlik katsayısı 5 Lugeon ile 30 Lugeon arasında olup, "az geçirimli" ve "çok geçirimli" dir (Şekil 2). Hırka Formasyonu'na ait litik tüflerin altındaki kıltaşları da talvegde 100-116 m arası haricinde "az geçirimli-geçirimidir". Litik tuf ve kıltaşı laboratuvar deneylerinde düşük dayanımlı ve yüksek gözenekli olarak sınıflandırılmıştır. Bölgeleme yapılırken bu durum dikkate alınarak çok kısa aralıklarda değişen ani geçirimsizlik sınıfı değişimleri gözardı edilmiştir. Anizotropi, tufteki eklem takımları ve bozunma da dikkate alındığında, sağ sahilde litik tufün kıltaşına geçiş zonuna kadar yüksek geçirimli bir kesim bulunmakta olup sol sahilde aynı seviyelerde çok geçirimli kesimler bulunmamaktadır.



Şekil 2. Baraj aks yerinde yapılan Lugeon deneylerine göre geçirirlilik bölgelendirmesi.

6. KAYA KÜTLE SINIFLAMASI

Litik tüflerin RMR (Bienawski, 1989), Q (2002) ve GSI (Hoek vd., 2002) kütle sınıflamaları en iyi ve en kötü koşullar dikkate alınarak yapılmıştır. RMR puanına göre en kötü koşullarda "zayıf kaya", en iyi koşullarda "orta", Q puanına göre "olağanüstü zayıf" ve "orta" kaya kütesidir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Litik tufün en düşük ve yüksek RMR ve Q sınıfları.

Parametreler	En düşük	Puan	En yüksek	Puan
Tek eksenli sıkışma dayanımı, MPa	10.08	2	33.93	4
RQD, %	18.20	3	74.41	13
Süreksizlik aralığı, cm	20-6	8	60-200	15
Süreksizlik devamlılığı, cm	>20	0	3-10	2
Süreksizlik açıklığı, mm	>5	0	1-5	1
Süreksizlik yüzey pürüzlülüğü	Az pürüzlü	3	Pürüzlü	5
Dolgu malzemesi	<5mm	2	-	6
Bozunma	Çok	0	Orta	3
Su gelimi, l/dk	Islak	7	Nemli	10
RMR		25		59
Parametreler	En düşük		En yüksek	
RQD, %	18.2		74.4	
Eklem seti sayısı	12		6	
Eklem pürüzlülük sayısı	2		1	
Eklem alterasyon sayısı	4		1	
Su azaltma faktörü	0.66		1	
Gerilim azaltma faktörü	10		1	
Q	0.05		4.94	

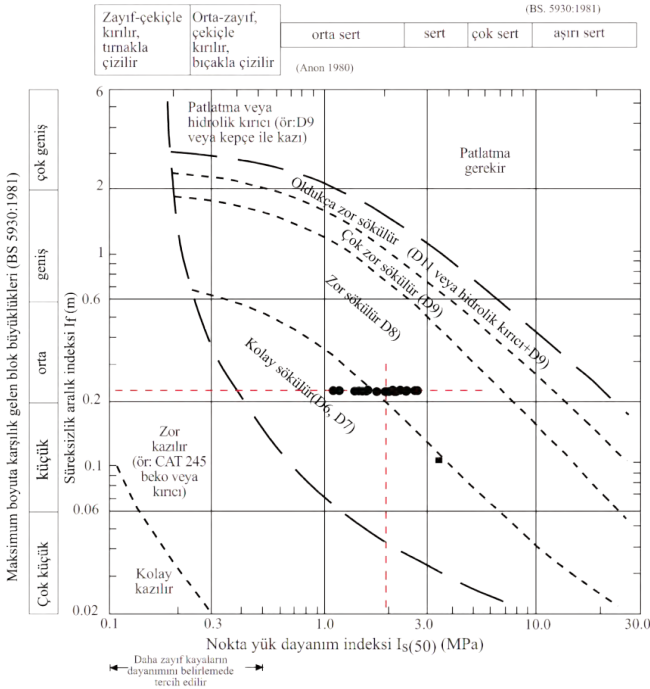
Litik tufün kaya kütle dayanımının belirlenmesi amacı ile GSI değeri Hoek vd. (2013) tarafından yapılan değişiklikler de dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Roclab programı ile yapılan değerlendirme sonucunda kütle dayanım parametreleri belirlenmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Litik tufün kaya kütle dayanımı özellikleri.

Tek eksenli sıkışma dayanımı, MPa	20.42
GSI	47
Örselenme faktörü, D	0.7
Malzeme sabiti, mi	13
S, kütle sabiti	5.10-5
m, kütle sabiti	0.707
a, kütle sabiti	0.507
Kohezyon, MPa	0.731
İçsel sürtünme açısı	23.60
Kütle sıkışma dayanımı, MPa	0.416
Kütle deformasyon modülü, MPa	1950.26

7. KAZILABİLİRLİK

Kayaçların kazılabilirliklerine yönelik süreksizlik özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımı, nokta yük dayanım indeksi, P-dalgı hızı gibi parametreleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır (Franklin vd. 1971; Scoble, ve Müftüođlu, 1984; McLean, ve Gribble, 1985; Karpuz, 1990; Pettifer ve Fookes, 1994). Kazılabilirlik ile ilgili yapılan çalışmalarda özellikle kaya kütleinde kazıda ne tür yöntem kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada Kirsten (1982) tarafından önerilen ve farklı jeolojik malzemelerin kazılabilirlik özelliklerini Q sınıflama sistemini esas alan yöntem ile nokta yük dayanım indeksi ve süreksizlik aralık indeksini dikkate alan Pettifer ve Fookes (1994) yöntemi kullanılmıştır (Şekil 3, Çizelge 6). Litik tufün kazılabilirliği sağlam karot örnekleri, arazi incelemeleri ve kaya kütle özelliklerini bir arada değerlendirerek belirlenmiştir.



Şekil 3. Kayaçların kazılabilirliği (Pettifer ve Fookes, 1994).

Çizelge 6. Kazılabilirlik indeksi sınıflaması (Kirsten, 1982'den sadeleştirilerek).

N	Kazılabilirlik
<0.01	El ile
0.01-0.099	Basit ekipman ile
0.1-0.99	
1.0-9.99	Kolay
10.0-99.9	Zor
100.0-999.9	Çok zor
1000.0-9999.9	Aşırı zor
>10000	Patlatma

Litik tüfün hat incelemeleri, sondaj verisi, laboratuvar deney sonuçları ve kütle sınıflama sonuçları birarada dikkate alınarak kazılabilirlik sınıflaması en zayıf kütle için "kolay", en iyi kütle koşulu için ise "zor" kazılır/sökülür aralığındadır. En kötü koşullarda ($N_{ort}=4.85$) kırıcılarla ve/veya buldozerler ile kazı yapılması uygun iken, en iyi koşullarda ($N_{ort}=29.63$) sistematik patlatma gerekecektir. Özellikle patlatma tercih edildiğinde ilgili güvenlik önlemleri ve çevresel etkileri dikkate alınmalıdır.

8. SONUÇLAR

Litik tüfün boşluk oranı %27 ile %45 arasındadır. Gözenekliliği ise %21.21 ile %30.96 arasında ve "çok fazla boşluklu" sınıfındadır. Litik tüfün tek eksenli sıkışma dayanımı 10.08 MPa ile 33.93 MPa arasında, elastisite modülü 6.70 GPa ile 40 GPa arasında, poisson oranı 0.13 ile 0.47 arasında, olup "yüksek modül oranlı çok düşük ve düşük dayanımlı" kayadır. Birleşik ayrışma indeksine (UAI) göre "son derece ayrılmış" ve "az ayrılmış" sınıfındadır.

Litik tuf RQD'ye göre "zayıf kaya", RMR'a göre en iyi şartlarda "orta", en kötü şartlarda "zayıf kaya" grubunda, Q'ya göre en kötü şartlarda "olağanüstü zayıf kaya" en iyi şartlarda "orta kaya" grubundadır. GSI değeri 47 olarak hesaplanmış ve "bloklu-örselenmiş kaya" olarak tanımlanmıştır.

Litik tüfün kazılabilirliği "kolay sökülür ile zor sökülür" arasındadır. Kaya kütesinin üç yönlü ve gelişigüzel kırık ve çatlaklı yapıya sahip olması ayrışmayı artırmakta ve dayanımlarının düşük olmasında ve kazılabilirlikte etkili olmaktadır.

Litik tüflerde süreksizlik yönelimleri su kaçaklarına neden olmayacak konumda olup, kazılabilirlik açısından bir problem beklenmemektedir. Fakat; kaya malzemesindeki yüksek gözeneklilik, kütle içinde özellikle geçirimsizliğin kiltasına yakın kesimlerde yüksek olması ve kaya kütesi dayanımının düşük olması gölet yeri ve temel kayası olması açısından uygun olmadığı düşünülmektedir.

9. KAYNAKLAR

- Abdullatif, O. M., Cruden, D. M., 1983. The relationship between rock mass quality and ease of excavation. Bulletin of International Association of Engineering Geologists, 28, 183-187.
- Aziz, A., 1976. Beypazarı-Yeniçayırhan ve Karaköy arasındaki sahanın jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Gen. Müd. Raporu, 4461 (yayımlanmamış).
- Basarı, H., and Karpuz, C., 2004. A Rippability Classification system for marls in lignite mines. Journal of Engineering Geology, 74 (3-4), 303-318.
- Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley and Sons, New York. 237 pp.
- Church, H. K., 1981. Excavation Handbook. McGraw-Hill, New York, USA.
- Deere, D. U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1, 17- 22.
- Deere, D. U., and Miller, R. P., 1966. Classification and index properties of intact rock. Tech. Report AFWL-TR- 65-116, AF Special Weapons Center, Kirtland Air Force Base, New Mexico.

- DSİ, 2008. Ankara-Beyazırma Beyazırma Göleti, Mühendislik Jeolojisi Ön inceleme Raporu, 11 s, Ankara (yayımlanmamış).
- DSİ, 2009. Ankara-Beyazırma Beyazırma Göleti, Temel Sondaj Raporu, 75 s, Ankara (yayımlanmamış).
- Erol, O., 1955. Köroğlu-Işık dağları volkanik kütesinin orta bölümleri ile Beyazırma-Ayaş arasında Neojen havzasının jeolojisi hakkında rapor. M.T.A Raporu. Derleme No:2279
- Franklin, J. A., Broch, E., and Walton, G., 1971. Logging the mechanical character of rock. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 80A, 1-9.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., and Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 1, 267-273.
- Hoek, E., Carter, T. G., Diederichs, M. S., 2013. Quantification of the geological strength index chart. Proceedings of the 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, No: ARMA 13-672. CA, USA.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, eds: Ulusay, R., J.A. Hudson, Kazan Offset Press, Ankara, 628 p.
- Karpuz, C., 1990. A classification system for excavation of surface coal measures. Mining Science Technology, 11, 157- 163.
- Kılıç, R., 1999. A Unified Alteration Index (UAI) for mafic rocks. Environmental & Engineering Geoscience, 4, 475-483.
- Kirsten H. A. D., 1982. A classification system for excavation in natural materials. The Civil Engineer in South Africa, 24, 293-308.
- McLean, A. C., and Gribble, C. D., 1985. Geology for Civil Engineers, 2nd ed. London: E & FN Spon.
- Moos, A. V., and Quervain, F. De, 1948. Technische Gesteinkunde, Verlag Birkhauser, Basel.
- Pettifer, G.S, Fookes, P.G, 1994. A revision of the graphical method for assessing the excavability of rock. Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, 145- 164.
- Smith, H. J., 1986. Estimating rippability of rock mass classification. The 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics. University of Alabama, 443-448.
- Scoble, M. J., and Muftuoglu, Y. V., 1984. Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection. Mining Science and Technology 1, 305-322.
- Stchepinsky, V., 1942. Beyazırma-Nallıhan-Bolu-Gerede bölgesi jeolojisi hakkında rapor. MTA Raporu, No: 1363.
- Temiz, R., 2011. Beyazırma (Ankara) gölet yerindeki kaya kütlelerinin jeoteknik değerlendirilmesi. AÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 98 s. Ankara
- Tsiambaos, G., Saroglou, H., 2009. Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69(1), 13-27.
- Türkecan, A., Hepsen, N., Papak, İ., Akbas, B., Dinçel, A., Karatas, S., Özgür, B., Akay, E., Bedi, Y., Sevin, M., Mutlu, G., Sevin, D., Ünay, E., ve Saraç, G., 1991. Seben-Gerede (Bolu), Gündül-Beyazırma (Ankara) ve Çerkeş-Orta-Kurşunlu (Çankırı) yörelerinin jeolojisi ve volkanik kayaların petrolojisi. MTA Raporu. Derleme No:9193.
- Weaver, J. M., 1975. Geological factors significant in the assessment of rippability. The Civil Engineer in South Africa, 17 (12), 313-316.

Yusufeli Barajı ve HES Projesi, Sağ Sahil Kret Üstü Kazılarında Kaya Şevlerinin Tahkimat Tasarımının Belirlenmesi

Yusufeli Dam and HEPP Project, Designing Support of Rock Slopes during Right Bank above Crest Elevation

M.Ö. Ünal

*DSİ Çoruh Projeleri 26. Bölge Müdürlüğü Artvin
(muozgehan@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Çalışma alanı, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Artvin ilinin 70 km güneybatısında bulunan Yusufeli Barajı ve HES Projesi'dir. Baraj gövdesi, Çoruh Nehri ile bu nehrin ana kollarından olan Oltu Çayı kavuşumunun 800 m mansabındadır. Baraj, ince kemer beton tipinde ve temelden 270 m yüksekliği ile tamamlandığında ülkemizdeki en yüksek baraj olma unvanına sahip olacaktır. Baraj, hidroelektrik enerji üretimi için planlanmıştır. Kurulu gücü 558 MWh'tır. Baraj aksı ve çevresi; dik ve apik bir topoğrafyaya sahiptir. Yaklaşık 145 m kazı yüksekliği planlanan sağ sahil 715 kret kotu üstünde oluşabilecek duraylılık problemlerinin kret üstü ve sıyırma (cut-off) kazıları ile birlikte toplam 400 m'den fazla kazı yüksekliğine sahip baraj alanında, yeterli ve tekniğine uygun kazı – destekleme imalatlarının yapılması, güvenli ve emniyetli bir inşaat ve işletme koşulları için zorunlu hale gelmektedir. Desteksiz ve destekli kazı şevlerinin paket program (Slide v6.032) yardımıyla, depremsiz ve depremlü yükler altındaki duraylılıkları ve en uygun destekleme patterninin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yusufeli Barajı, Mühendislik Jeolojisi, Kaya Şevleri Stabilitesi, Öngermeli Ankraj.

ABSTRACT: Study area is the Yusufeli Dam and HEPP Project which is located at the East Black Sea region, at 70 km southwest of Artvin City. The dam body is located at 800 m downstream of intersection point of the Çoruh River and Oltu Creak, which is one of the main branch of Çoruh River. The dam type is thin arch dam with a height of 270 m The dam is being constructed for production of hydro-electric energy and the installed capacity is 558 MW. Dam axis and its surrounding area has a steep and apeak topography. For stability issues that might occur above right bank 715 m crest elevation due to planned approximately 145 m high excavation, performing adequate and technically appropriate excavation – support has become a necessity for safe and secure construction at dam site with an excavation height of more than 400 m together with above crest and cut-off excavations. Determining stability of supported and unsupported cut slopes under seismic loads and static conditions with obtaining most appropriate support patterns by means of package software (Slide v.6.032) is aimed.

Keywords: Yusufeli Dam, Engineering Geology, Rock Slope Stability, Prestressed Anchorage

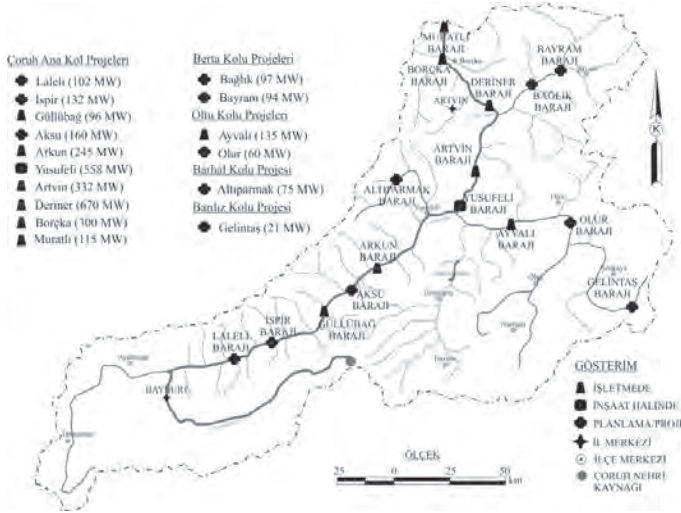
1. GİRİŞ

Enerji, insanların yaşam kalitelerini yükselten, sosyo-ekonomik süreçlerin ilerlemesinde katkısı bulunan ve gelişen dünyada ülkelerin rekabet edebilme gücünü arttıran temel unsurlardandır. “Enerji, sanayileşmenin ve kalkınmanın temel taşıdır.” diyen Mustafa Kemal ATATÜRK, bu sözü ile enerji sektöründeki gelişimin, ülkenin gelişimindeki önemini vurgulamıştır.

2006 yılı itibarı ile Dünya üzerinde uzunluğu 1000 km'yi aşan yaklaşık 175 nehirden sadece 21 tanesinin denize doğrudan bağlantısı kalmıştır. Bu veri, ülkelerin teknik değerlendirilebilir hidroelektrik potansiyelinin kullanılması konusunda doğru adımlar attıklarını göstermektedir. Bu kapsamda ülkemiz 25 adet havzaya ayrılarak gelişim planları yapılmıştır veya yapılmaktadır. Çalışma konusu olan Yusufeli Barajı ve HES Projesi, adını Çoruh Nehri'nden alan 23 no'lu Çoruh Havzası'nda bulunmaktadır. Çoruh Havzası'nda ilk çalışmalara 1938 yılında EİE (Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel

Müdürlüğü) tarafından debi ölçümleri ile başlamıştır. Çoruh Nehri 431 km uzunluğundadır ve ülkemizin en hızlı akan nehridir. Nehrin 410 km'si ülkemiz sınırlarında akmaktadır. Yıllık ortalama 6 milyar m³ akış hacmine sahip ve 5.8 milyon m³ rusubat taşımaktadır. Çoruh Nehrinde, Mayıs-Temmuz ayları arasındaki 3 aylık dönemde, yıllık toplam akışın %85'i meydana gelmektedir. Çoruh Havzası'nın yağışları genel anlamda düzensizdir. Havza eğiminin fazla olması sebebiyle hidroelektrik enerji potansiyeli yüksektir.

Çoruh Havzası gelişim planı (Şekil 1), 6446 sayılı "Elektrik Piyasası Kanunu" ile özel sektörün su kullanım hakkı anlaşmaları yolu açıldıktan sonra gelen proje teklifleri ve Devlet Su İşleri'nin çalışmaları ile; 10 adedi ana kolda, 2 adedi Berta kolunda, 2 adedi Oltu kolunda, 1 adedi Barhal kolunda, 1 adedi Bardız kolunda olmak üzere toplam 16 adet baraj ve 163 adet nehir tipi HES projesi planlanmıştır. Bu projelerin toplam kurulu gücü yaklaşık 5.840,931 MW ve yıllık enerji üretimi ise 17.821,27 GWh/yıl'dır.



Şekil 1. 23 No'lu Çoruh Havzası gelişim planı.

2. YUSUFELİ BARAJI VE HES PROJESİ

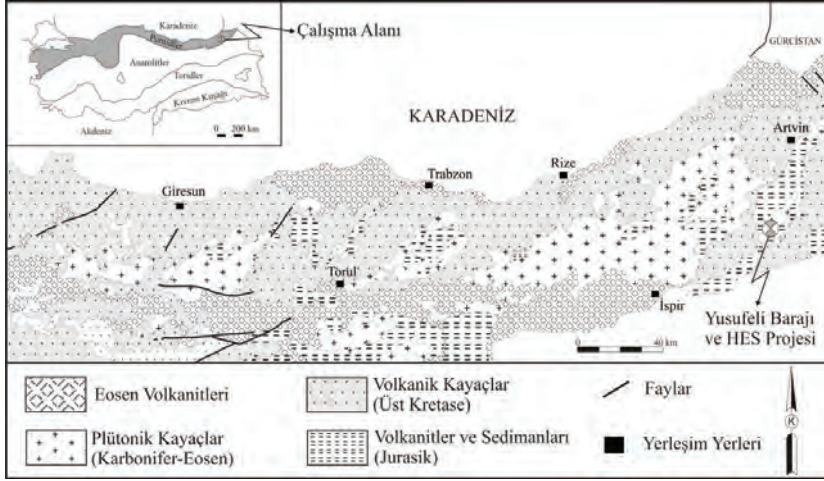
Yusufeli Barajı ve HES Projesi; Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Artvin ilinin 70 km güneybatısında bulunmaktadır. Çoruh Havzası'nda bulunan büyük projelerden biridir.

2.1. Seçilmiş Proje Bilgileri ve Baraj Çevresi Jeolojisi

Çizelge 1. Seçilmiş karakteristik proje bilgileri.

Baraj gölü maksimum su seviyesi (m)	710.00
Baraj gölü yüzey alanı 710 kotunda (km ²)	33
Baraj tipi	Çift Eğrilikli İnce Kemer Beton
Talveg kotu (m)	495
Kret kotu (m)	715
Talvegden yükseklik (m)	220
Temelden yükseklik (m)	270
Kret genişliği (m)	8
Kret uzunluğu (m)	490

Baraj aksı ve çevresi; dik ve apik bir topoğrafyaya sahiptir. Jeolojik açıdan bu kesim, Pontidler adı ile tanınan (Ketin, 1966) tektonik ayırıldın doğusunda yer alır (Şekil 2). Bölge Alpin orojenezinin etkilerini en erken hissetmiş ve evrimini ilk önce tamamlamıştır. Orta Çoruh havzasında yer alan Yusufeli Barajı ve göl alanını çevreleyen bölgede, Alt Jura'dan Üst Kretase'ye kadar birimler yer almaktadır. Baraj aksı, Rize plütünü içerisindeki Tersiyer yaşlı granitik kayalar üzerinde yapılacaktır. Bu birimler değişik kalınlıklarda, diyabaz daykaları ile kesilmiş granit, granodiyorit ve tonalit grubundan oluşmaktadır. Yüze yakın kısımları genellikle kırıklı, derinlerde ise oldukça masif bir görünüme sahiptir. Baraj yerinde alüvyon kalınlığı yaklaşık 50 m civarında olup, her iki sahilde de anakaya yer yer Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ile kaplıdır.



Şekil 2. Doğu Karadeniz Bölgesinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (Güven, 1998).

Kaya türlerinin farklı özelliklere ve kökenlere sahip olmaları nedeniyle bunların içsel jeolojik özellikleri de farklılıklar sunar. Örneğin şist ve şeyl gibi yumuşak ve zayıf kayalarda şev duraylılığını denetleyen başlıca faktör malzemenin kendisi iken, Yusufeli Barajı aksı ve çevresinde gelişen granit, granodiyorit gibi sert kayalarda bunların içerdiği ana süreksizlik takımları duraylılığı kontrol ederler.

2.2. Süreksizlik Yönelimleri ve Süreksizlik Verileri

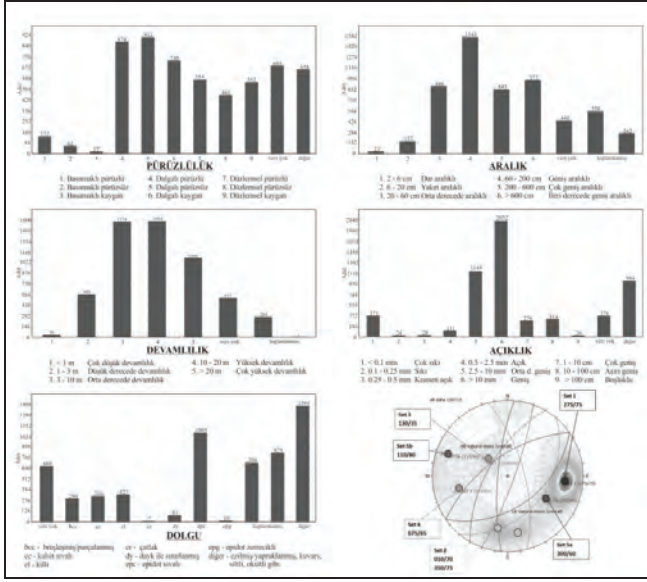
Baraj aksı ve çevresinde süreksizlik setlerini belirlemek amacı ile açılan tünel ve açık kazı şevlerinde yapılan jeolojik haritalama çalışmaları ile toplam 6 ana süreksizlik seti belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kazı şevi tasarımı için kullanılan karakteristik süreksizlik yönelimleri.

Set	Azimut / Eğim	Değişkenlik (Azimut / Eğim)	Sağ Sahil İçin Jeoteknik Önemi
1a	275/75	245-305 / 50-90	Kayma düzlemi
2	350/75	025-325 / 45-90	Kayma düzlemi
3	130/35	100-160 / 20-55	Serbest bırakma düzlemi
4	075/65	055-085 / 40-85	-
5a	300/60	280-325 / 50-85	Kayma düzlemi
5b	110/80	100-145 / 60-90	-

Bunlardan sağ sahil kret üstünde şev duraylılığını kontrol eden 3 ana süreksizlik seti (5a, 2 ve 5b) bulunmaktadır. Bu setler şev dışına (vadiye doğru) eğimlidir ve bu nedenle birleştiklerinde düzlemsel veya kama kayması tipinde yenilme düzlemleri oluşturabilir. Düzlemsel ve/veya dairesel olmayan kayma riski, kret üstü kazılarında daha kritik olduğundan, çalışmamızda sadece bu kayma tipine

yönelik araştırma ve çözümlere yer verilmiştir. Varlığı belirlenen süreksizlikler ağırlıklı olarak fay, fay düzlemi ve eklemlerden oluşmaktadır (Şekil 3). Süreksizliklerde yeraltı suyu sadece yağışlı dönemler ve sonrasında “çok az sızıntı” şeklinde görülmektedir.



Şekil 3. Süreksizlikleri için ortalama yönelimler ve ilgili büyük daireler ile beraber, süreksizlik verilerinin kontur çıktısı (n=5685 adet).

2.3. Jeoteknik Tasarım ve Süreksizlik Parametreleri

Çizelge 3. Jeoteknik tasarım parametreleri.

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 [°]
D	0.400	28.00	0.320	23.04	0.364	25.80	0.400	28.00
C	1.400	31.00	1.120	25.67	1.273	28.64	1.400	31.00
B	3.000	36.00	2.400	30.17	2.727	33.44	3.000	36.00
A2	5.500	39.00	4.400	32.94	5.000	36.36	5.500	39.00
A1	9.000	46.00	7.200	39.64	8.182	43.27	9.000	46.00
Q	0.000	33.00	0.000	27.45	0.000	30.56	0.000	33.00
Eklem	0.100	45.00	0.080	38.66	0.091	42.27	0.100	45.00

A1: Hafif tektonize-sağlam kırıklı kaya kütlesi, GSI (60-75), RMR Sınıfı II

A2: Hafif tektonize, kırıklı kaya kütlesi, GSI (45-65), RMR Sınıfı II-III

B: Orta derecede tektonize kaya kütlesi, düzenli C ve D zonları içerir, GSI (35-55), RMR Sınıfı III-IV

C: Son derece tektonize kaya kütlesi, breşik, GSI (25-40), RMR Sınıfı IV

D: Yoğun ezik, killi, siltli değişken kumlu ve çakıllı fay malzemesi, GSI (<30), IV-V

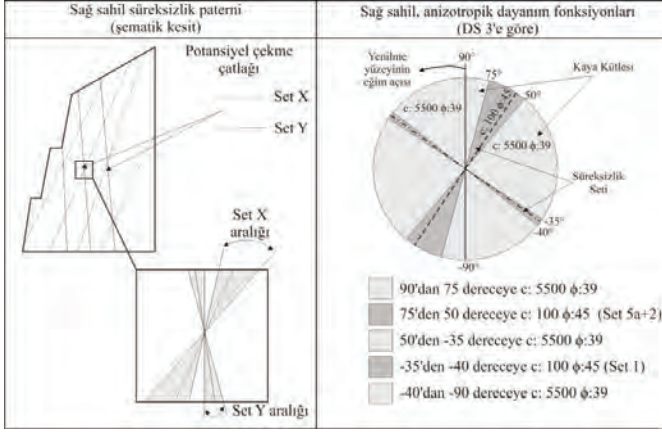
Q: Alüvyon ve yamaç molozu, siltli, killi

DS: Eurocode 7'ye göre tasarım durumları (DS1: Kalıcı, DS2: Geçici, DS3: Tesadüfi (Arızı) – Bölüm-3'te detaylı anlatılmaktadır.

3. HESAP MODELLERİ

3.1. Dairesel Olmayan Kaymalar İçin Limit Denge Hesapları (2D)

Kazı şevi duraylılığı limit denge hesapları Slide (Rocscience Inc.) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Kaya kütlelerinin anizotropisinin dikkate alınması için Spencer ve Janbu yöntemleri kullanılmıştır. Belirli değer aralıklarındaki süreksizlikler boyunca indirgenmiş kesme dayanımını dikkate almak için Slide programında anizotropik dayanım fonksiyonları, kaya kütleleri bölümlerine uygulanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Sağ sahil A2 tipi kaya parametrelerinde anizotropik fonksiyonun kullanılması.

3.2. Destekleme Çeşitleri, Drenaj Durumu, Yükler ve Proje Tasarım Yaklaşımları

Kaya bulonları; donatı sınıfı S420a (TS 500'e göre) olan $\phi 32$ mm'lik kaya bulonlarının;

- $F = \Gamma$ (bulon kapasitesi)*A (Alan) $420 / ((\pi * r^2) / 4) = 338$ kN
- Donatı çeliğin kısmi güvenlik katsayısı (γ_s) $338 / 1.15 = 294$ kN
- Önem sınıfına göre katsayı (CC) (η) $294 / 1.3 = 226$ kN

$F_k = 226$ kN, çekme kapasitesi $F_{yk} = 338$ kN'dur.

Püskürtme beton; saha gözlemleri sonucu yapılan haritalama sonucu çıkan RMR puanlamasına göre, kazı şevlerine çeşitli kalınlıkta püskürtme beton uygulanacaktır. Püskürtme beton ile birlikte bindirmeli çelik hasırlarda şev yüzeyini kaplayacaktır.

Öngermeli ankrajlar; 7 tel sarımlı 12 adet halattan oluşmaktadır.

- Her bir halatın kopma dayanımı 1860 MPa
- Her bir halatın çapı 150 mm²
- Her bir halatın son çekme kapasitesi $1860 * 150 = 279$ kN
- 12 halatın son çekme kapasitesi (F_{yk}) $12 * 279 = 3348$ kN
- Servis kapasitesi (F_k) (0.55-0.65 arası) $3348 * 0.55 = 1842$ kN

Öngermeli ankraj kök boyu tayini,

- Çekme dayanımı (deneyime dayalı) $1.00 - 1.50$ MN/m²
- Delik çapı 152 mm
- Sürtünme mukavemeti $0.152 * \pi * 1.25 = 600$ kN/m
- Gerekli kök boyu $3348 / (600 / 1.25) = 7$ m

Yusufeli Barajı mansabında bulunan Deriner Barajı'ndaki 12 halatlı öngermeli ankrajlarda kök boyu 8 metre uygulandığından, bu projede de bu değer uygulaması devam etmiştir. Tüm ankraj uygulamaları, aksi belirtilmedikçe, 10°'lik eğimle yapılmaktadır.

Drenaj delikleri; ankraja enjeksiyon uygulanması, bu enjeksiyonun yapıldığı alanlarda bir “enjeksiyon perdesi” oluşturarak, kaya kütlelerinin geçirgenliğini kayda değer miktarda azaltabilir. Gelişebilecek bir su basıncının önüne geçmek amacıyla tesis edilen öngermeli ankrajların toplam uzunluğunu 1 m geçecek şekilde drenaj delikleri açılarak, sızan suların şevden uzaklaştırılması amaçlanmıştır.

Sismik yükler; bütün saha çalışmalarında kullanılmak üzere 3 farklı pik yer ivmesi belirlenmiştir. OBE (işletme esası deprem), MDE (maksimum proje depremi) ve MCE (beklenen en şiddetli deprem) olarak sırası ile 0.11 g, 0.16 g ve 0.36 g maksimum yatay yer ivmeleri hesaplanmıştır. Yatay yer ivmelerinin 0.67 oranında da düşey yer ivmesi hesaba katılarak duraylılık analizleri yapılmıştır.

Yeraltı su seviyesi; sağ sahil temel sondajlarında yakalanan yeraltı su seviyesi, 495 m talveg kotundan güneye doğru hızla yükselerek 560 m kotunda maksimum düzeyde görülmüştür. Hesaplarda, 715 m kotu ve üzeri dikkate alındığı için, tespit edilen yeraltı su seviyesi dikkate alınmamıştır.

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 (Çizelge 4).

- **DS 1** – Tasarım Durumu 1 – Kalıcı durum, işletme safhaları
- **DS 2** – Tasarım Durumu 2 – Geçici durum, inşaat safhaları
- **DS 3** – Tasarım Durumu 3 – Tesadüfi/arızı durum, deprem safhaları

Çizelge 4. Kısmi emniyet faktörleri ULS GEO, (CC3 önem sınıfına göre).

Nihai Limit Durumu GEO	Kalıcı Durumlar DS1	Geçici Durumlar DS2	Tesadüfi Durumlar DS3
Kalıcı etkiler	$\gamma_G = 1.00$		
Değişken etkiler	$\gamma_Q = 1.10$		$\gamma_Q = 1.00$
Kesme direnci açısı ($\tan \phi$)	$\gamma_\phi = 1.30$	$\gamma_\phi = 1.20$	$\gamma_\phi = 1.10$
Etkin kohezyon	$\gamma_c = 1.30$	$\gamma_c = 1.20$	$\gamma_c = 1.10$
Özgül ağırlık	$\gamma_v = 1.00$		
Öngermeli ankrajın direnci	$\gamma_a = 1.00$		
Toprak direnci	$\gamma_R = 1.00$		

$$\eta = \frac{\gamma_G + \gamma_Q}{2} * \frac{\gamma_\phi + \gamma_c}{2} * \gamma_v * \gamma_a * \gamma_R \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1.00 + 1.10}{2} * \frac{1.30 + 1.30}{2} * 1.00 * 1.00 * 1.00 = 1.37$$

Eşitlik (1)'de DS1 durumu için genel emniyet faktörü hesabı görülmektedir. EC 7'ye göre genel emniyet faktörü; kısmi emniyet faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Çizelge 5'te de Deriner Barajı ile karşılaştırılması yapılmaktadır.

Çizelge 5. Emniyet faktörlerinin karşılaştırılması.

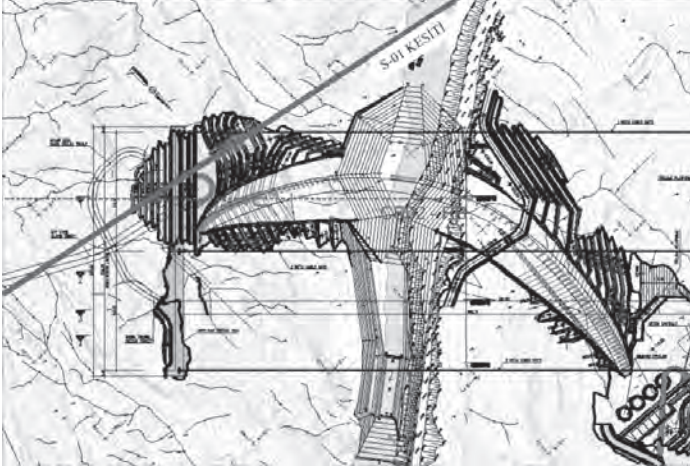
Tasarım Durumu	Genel Emniyet Faktörü (η)	
	Deriner Barajı	Yusufeli Barajı ULS GEO (Duraylılık)
DS 1 - Kalıcı Durum	1.50	1.37
DS 2 - Geçici Durum	1.30	1.26
DS 3 - Tesadüfi Durum	1.10	1.10

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 analiz sonucunu esasen FS=1.37'ye, DS2 durumunda FS=1.26'ya ve DS3 durumunda FS=1.10'a tekabül etmektedir.

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.



Şekil 5. Analiz kesitinin yeri (S-01).

Kret kotu üzerinde kazı şevleri, set 1'in potansiyel yenilme düzlemlerine yaklaşık 40° eğimli olduğu için, analiz kesiti S-01, kazı şevlerine dik değildir (Şekil 5). Bu nedenle bazı ilave basitleştirmeler gerekmektedir. Kret kotunda üzeri kazı şevlerinde tüm aktif destekler kazı şevlerine dik tesis edileceği için, destekleme basıncı ve ankraj uzunluğu hesap düzlemine iz düşürülmeli ve $[1/(\cos 315-275)]$ oranında faktör ile azaltılmalıdır. 139 kN/m²'lik destekleme basıncı S-01 kesiti için yeterli bulunmuştur (Çizelge 6 ve Çizelge 7).

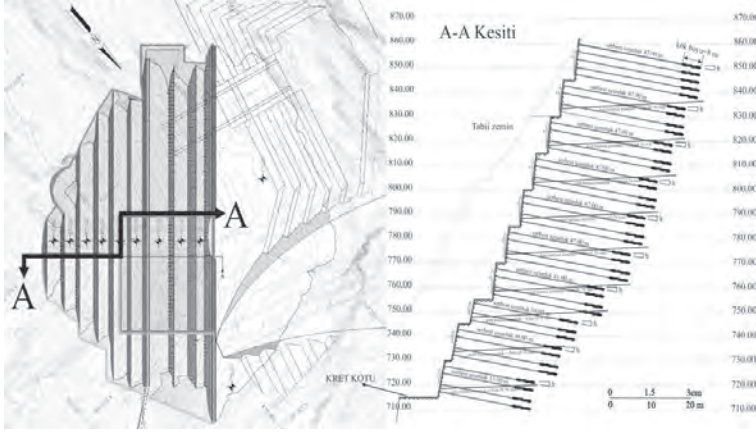
Çizelge 6. Kazı şevinde elde edilebilen destekleme basıncı

Elde edilebilen destekleme basıncı kN/m ²		1842 kN					
		Yatay mesafe (m)					
		3.5	4	4.5	5	5.5	6
Her bir palyede	4	139.2	121.6	106.2	96.3	87.5	78.7
ankraj sıraları	5	174.0	152	132.7	120.3	109.3	98.3

Çizelge 7. Desteksiz ve destekli analiz sonuçları (Spencer methodu).

Hesap Durumu			FS		Görüşler
Hidrojeolojik Koşullar	Yatay Yer İvmesi	Projelendirme Durumu	Güvenlik Katsayısı		
Kuru	Depresiz	DS1	0.782	Desteksiz	
Kuru	Depresiz	DS1	1.069	Düşeyde 4 sıra: yatayda 3.5 m aralık	
Kuru	OBE (0.11g)	DS2	0.742	Desteksiz	
Kuru	OBE (0.11g)	DS2	1.024	Düşeyde 4 sıra: yatayda 3.5 m aralık	
Kuru	MDE (0.16g)	DS3	0.749	Desteksiz	
Kuru	MDE (0.16g)	DS3	1.035	Düşeyde 4 sıra: yatayda 3.5 m aralık	

Analizler Rocscience ürünü olan Slide (v6.032) programında “anizotropik fonksiyon” modülü ile yapılmıştır. Yapılan hesaplar sonunda çıkan pattern Şekil-6’da gösterilmektedir.



Şekil 6. Sağ sahil kret üzeri plan ve A-A kesiti.

4. SONUÇLAR

Bu makalede sunulan hesaplar; Yusufeli Barajı ve HES Projesi sağ sahil kret kotu üzeri kazı şevlerinde, kalıcı yükler, işletmeye dayalı deprem (OBE) ve maksimum proje depremi (MDE) koşulları için dairesel olmayan kayma riskine karşın alınması gereken destekleme önlemlerini içermektedir. Yatay yer ivmesine ilave olarak; OBE depremi için 0.073 ve MDE depremi için 0.1066 mertebesinde düşey yer ivmesi de uygulanmaktadır. Görülmektedir ki, yaklaşık 145 m kazı yüksekliğine sahip kaya şevlerini oluştururken öngermeli ankrajlar ile sistematik destekleme yapılmadığı analizlerde, şevlerin duraylılığı elde bulunan verilere göre mümkün gözükmemektedir. Bu makalede sunulan tasarım, beklenen tüm jeoteknik koşulları yansıtan emniyetli bir yaklaşımı temsil etmektedir. Kazı şevlerinde bir jeoteknik izleme sistemi tesis edilmiş olup, sürekli olarak takibi yapılmaktadır. Bugün itibari ile sağ sahil kret kotu üzeri kazılarda herhangi bir olumsuzluk tespit edilmemiştir. Yusufeli Barajı gibi dik ve apik bir topografyaya sahip çalışma alanlarında, göz ardı edilen duraylılık risklerinde, barajın işletme sürecine ulaşmadan dahi, daha büyük maliyetli ilave destekleme çalışmalarına sebep olmaktadır. Belirlenen kazı ve destekleme metodolojilerine harfiyen uyulması gereklilik arz etmektedir (Çizelge 7).

5. KATKI BELİRTME

Katkılarından dolayı Su-Yapı Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.’de Jeoloji Mühendisi Sayın Teoman HIZAL’a ve Limak Holding A.Ş. Teknik Koordinatörü İnşaat Mühendisi Sayın Fatih ÇEVİK’e teşekkür ederim.

6. KAYNAKLAR

- IC Consulenten, 2014, Yusufeli Barajı ve HES Şev Projelendirme Raporu-Sağ Sahil Memba Bölümü Raporu.
- Güven, İ. H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, MTA Yayınları, Ankara.
- Ketin, İ., 1966. Anadolu’nun Tektonik Birlikleri, MTA Dergisi, 66, 20-44.
- Ulusay, R., 2014. Kaya Şev Duraylılığının Değerlendirilmesinde Mühendislik Jeolojisinin Önemi, Sayı 1, Sayfa 24-28.

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİNDE TEHLİKE
ve RİSK

Süttaşı Heyelanının (Giresun/Doğankent) Aslancık Barajına ve Doğankent İlçesine Etkilerinin Araştırılması

The Investigation of the Effect of Süttaşı Landslide (Giresun/Turkey) on Aslancık Dam and Doğankent District

A. Akgün^{1,*}, M. Karahan¹, H. Ersoy¹, A. Taflan²

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

²DSİ 22. Bölge Müdürlüğü

(* muratkarahan21@gmail.com)

ÖZ: Sulama suyu ve enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla akarsular üzerine baraj, gölet ve hidroelektrik santral (HES)'leri inşa edilmektedir. Özellikle işletme aşamasında rezervuarda yükselen su seviyesi yeni heyelanların oluşmasına ve paleo-heyelanların yeniden hareket etmesine neden olmaktadır. Böyle bir durumda gerek kütle hareketi sonucu oluşan dalga ve gerekse rezervuar alanını doldurup ölü hacmin dolmasına neden olan heyelan malzemesi sel ve taşkın gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu çalışmada, Giresun ili Doğankent ilçesinde Aslancık barajı rezervuar alanının sol sahilinde, baraj gövdesinden 500 m uzaklıkta Doğankent'in karşısındaki yamaçta bulunan paleo-heyelan malzemesinin olası hareketinin baraja ve ilçeye olan olumsuz etkileri araştırılmıştır. Heyelan kütlelerinin geometrik, fiziko-mekanik karakteristikleri ve havzanın özellikleri kullanılarak 2 boyutlu analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarında hareket edecek olan heyelan kütlelerinin hacmi, hareket sonucu oluşacak olan dalganın boyu, hızı ve ilçeye doğru ilerleme mesafesi hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda heyelan kütlelerinin suya çarpma hızı 23 m/sn, dalganın hızı 20.2 m/sn, dalganın yüksekliği 27 m, dalganın karşı kıyıdaki ilerleme mesafesi 165 m, dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi 24 sn ve yüksekliği 3 m olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında olası bir hareket sonucunda Doğankent ilçesi ve Aslancık barajı için olumsuz sonuçların ortaya çıkabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Aslancık Barajı, dalga etkisi, Süttaşı heyelanı, sel, taşkın.

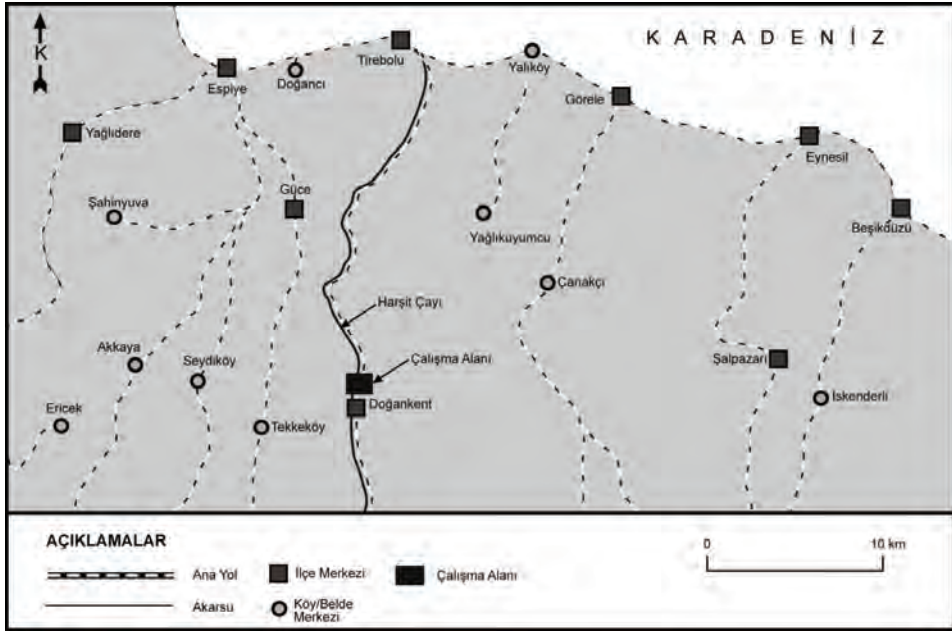
ABSTRACT: Dams, ponds, and hydroelectric power plants (HEPP) are built upon streams in order to meet irrigation water and energy needs. These structures trigger natural events such as floods, overflows, or landslides during or after the construction. Especially after the construction of dams, the rising water level can cause new landslides or reactivate paleo-landslides. In such a case the sliding material fill the dam reservoir, rising the water level and creating huge waves which eventually cause negative consequences like floods and overflows. In this study, the hazardous effects of a possible reactivation of a paleo-landslide at the left bank of dam reservoir, 500 m from the dam girder of Aslancık Dam, which was built as a dam-type HEPP in Doğankent district of Giresun city, have been investigated. Two-dimensional analyzes were carried out using the geometric, physico-mechanical characteristics of the landslide mass and the properties of the basin. In the analyzes, the volume of the landslide mass to move, the size and speed of the waves to be generated by the slide and their travel distance to the district were calculated. As a result, the velocity of the landslide mass is calculated as 23 m/sec, the velocity of the wave as 20.2 m/sec, the height of the wave as 27 m, the run-up as 60.70 m, the time to reach the dam girder as 24 seconds and their height as 3 m. Taking into consideration the results obtained, it is predicted that negative results may occur for the Doğankent district and the Aslancık dam in case of a mass movement.

Keywords: Aslancık Dam, wave effect, Süttaşı landslide, flood, overflow.

1.GİRİŞ

Günümüzde içme ve sulama suyu temini, taşkın kontrolü ve enerji üretmek amacıyla akarsular üzerine baraj, gölet ve hidroelektrik santral (HES)'leri inşa edilmektedir. Bu yapılar su biriktirmek amacı ile

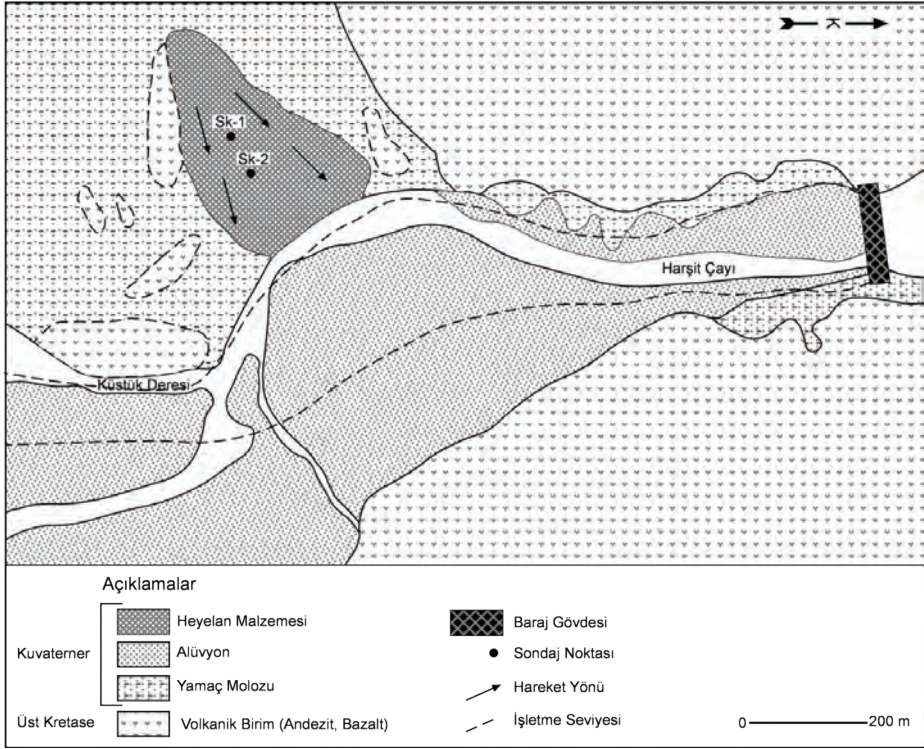
hazne oluşturmak üzere bir akarsu vadisini kapatarak akışı engelleyerek su seviyesini yükseltmeye ve geniş su yüzeyi meydana getirme gibi iki önemli fonksiyonu vardır. Yükselen su seviyesi yeni heyelanların oluşmasına ve paleo-heyelanların yeniden hareket etmesine neden olmaktadır. Böyle bir durumda gerek kütle hareketi sonucu oluşan dalga ve gerekse rezervuar alanını doldurup ölü hacmin artmasına neden olan heyelan malzemesi sel ve taşkın gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu çalışmada, Giresun ili Doğankent ilçesinde baraj tipi bir HES olarak inşa edilen Aslancık barajı rezervuar alanında sol sahilde, baraj gövdesinden 600 m uzaklıkta Doğankent'in karşısındaki yamaçta bulunan paleo-heyelan malzemesinin olası hareketinin baraja ve ilçeye olan olumsuz etkileri araştırılmıştır (Şekil 1). Heyelan kütlelerinin geometrik, fiziko-mekanik karakteristikleri ve havzanın özellikleri kullanılarak 2 boyutlu analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarında hareket edecek olan heyelan kütlelerinin hacmi, hareket sonucu oluşacak olan dalganın boyu, hızı ve ilçeye doğru ilerleme mesafesi hesaplanmıştır. Barajın tipi; beton ağırlıklı, gövdenin talvegten yüksekliği 20.00 m, temelden yüksekliği 29.00 m ve aktif depolama hacmi 1.63 hm³ olarak tasarlanmıştır. Olası hareket riski bulunan paleo-heyelan kütlelerinin baraj aksına yaklaşık 600 m mesafede, sol sahilde 180 m ile 360 m kotları arasında bulunmak olup kütlelerin yaklaşık 1.5 milyon m³ lük kısmının Aslancık barajı gölününün 183 m kotu üzerinde kaldığı hesaplanmıştır.



Şekil 1. Çalışma Alanının Yerbulduru Haritası.

2. ÇALIŞMA ALANI VE ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

İnceleme alanının temel kayası Üst Kretase yaşlı bazalt, andezit ve diyabaz oluşturmaktadır (Şekil 2). Bu volkanik birimler genelde koyu gri, yeşilimsi-siyah renkli, sert ve sağlam özelliktedir. Birimler Aslancık barajı ve civarında Tersiyer yaşlı granodiyoritlerin etkisiyle yer yer metamorfize olmuşlardır. Temel kaya olan volkanitlerin üzerinde 0.5-4.0 metreler arasında değişen kalınlıkta bitkisel toprak ve yamaç molozundan oluşan bir örtü yer almaktadır.



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin jeolojik haritası (DSİ, 1986'dan değiştirilerek).

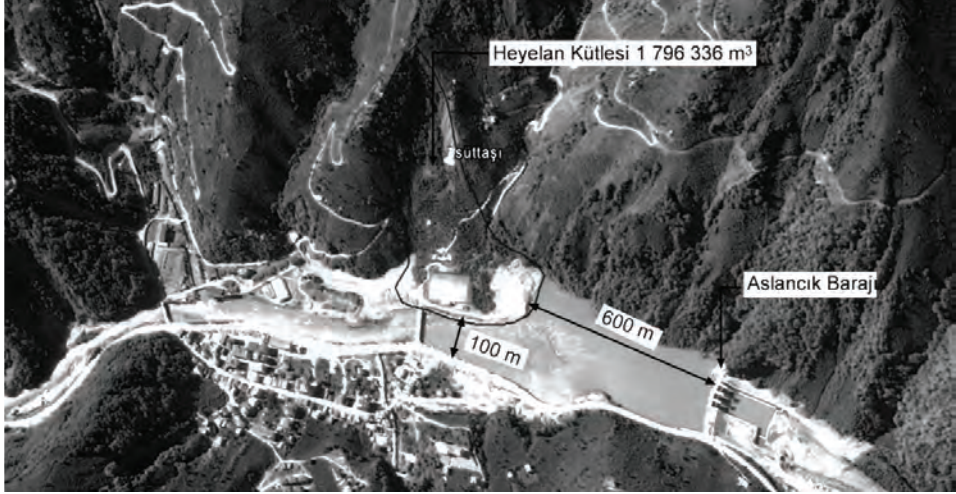
3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÇALIŞMALARI

Enerji temini amaçlı olarak yapılmış olan Aslancık barajı göl alanı sol sahilde gövdeden yaklaşık 600 m uzakta Doğankent ilçesinin karşısında Süttaşı heyelanı bulunmaktadır (Şekil 3). Gerek heyelanın kütleli gerekse konumu nedeniyle olası bir kütle hareketi sonucunda olumsuz sonuçlar doğuracağı düşünülmektedir. Meydana gelebilecek olumsuz sonuçların ve heyelan kütlelerinin fiziksel özelliklerinin tespiti amacıyla heyelan kütleleri üzerinde toplamda 142 m derinlikte iki adet sondaj yapılmıştır.

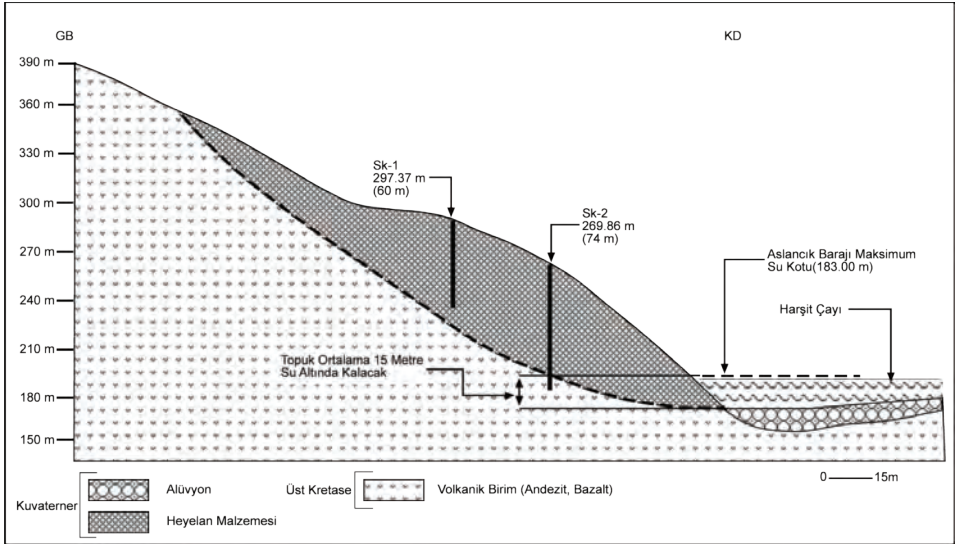
Sk-1 numaralı temel sondaj kuyusu 297 m kotunda 60 m derinliğinde heyelanın kabarma bölgesinde açılmıştır. Sondajda 60 m boyunca kil, çakıl ve blok geçilmiştir. Blok ve çakıllar volkanik kökenli köşeli ve yarı yuvarlak kırıklı yüzeyleri ayrılmış durumdadır. Sk-2 numaralı temel araştırma sondajı 269 m kotunda 82 m derinliğinde kabarma bölgesinde açılmıştır. Sondajda 0.00-74.00 metreler arasında kil, kum, çakıl ve bloklardan oluşan heyelan malzemesi geçilmiştir. Blok ve çakıllar köşeli, yarı yuvarlak ve volkanik kökenlidir.

74.00-80.00 metreler arasında açık yeşil, gri renkli bazaltlar geçilmiştir. Bazaltlar kırıklı ve çatlaklı olup yüzeyleri demir ve kil sıvımalı olup yer yer pirit kristalleri görülmüştür. Yapılan sondajlardan elde edilen veriler doğrultusunda ana kaya derinliği, heyelanın derinlere doğru geometrisi ve heyelan malzemesinin türü tespit edilmiştir (Şekil 4). Yüzeysel çalışmalarından sınırları tespit edilen heyelan kütlelerinin yüzey alanının tespit edildikten sonra sondaj verilerinden belirlenen ortalama derinlik kullanılarak heyelanın toplam hacmi hesaplanmıştır. Heyelan malzemesinden örselenmemiş örnek almak mümkün olmadığı için kayan malzemenin zemin türü dikkate alınarak birim hacim ağırlık değeri 20,5-22 KN/m³ arasındadır (Coduto, 1999). Heyelan sonucu oluşacak dalgalanım özelliklerinin ve

olumsuz etkilerinin araştırılması için hesaplamalarda kullanılacak değerler Çizelge 1'de verilmiştir. Baraj maksimum işletme seviyesine ulaştığı zaman heyelan kütlelerinin topuğu ortalama 15 m su altında kalacaktır (Şekil 4). Böyle bir durumda topuğun doygun hale geleceği ve bu kısımlarda kaymaların başlayacağı, topuktan bu şekilde yıkılmaların ardından büyük kütlelerin hareket edeceği düşünülmektedir.



Şekil 3. Gövdeden 600 m uzaklıktaki heyelan ait Google Earth görüntüsü.



Şekil 4. Heyelan kütlelerinin kesiti.

4. DALGA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Elde edilen veriler yardımıyla heyelan kütesinin su kütesine çarpma hızı, çarpma ile oluşacak dalganın boyu, karşı kıyıya çarpma hızı, yüksekliği ve karşı kıyıdaki ilerleme hızı hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Heyelan ve baraj gölünün geometrik bilgileri ile kayan malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikler	
Heyelan en üst nokta kotu	370 m
Heyelan en alt nokta kotu	175 m
Heyelan malzemesinin uzunluğu	332 m
Heyelan malzemesinin ortalama genişliği	126 m
Heyelan malzemesinin maksimum genişliği	196 m
Heyelan malzemesinin ortalama kalınlığı	38 m
Birim hacim ağırlık	22 kN/m ³
Heyelan malzemesinin eğim açısı	35 ⁰
Karşı yamacın ortalama eğimi	16 ⁰
İçsel sürtünme açısı	28 ⁰
Heyelan malzemesinin yüzey alanı	47,272 m ²
Heyelan malzemesinin maksimum hacmi	1,796,336 m ³
Rezervuardaki maksimum su derinliği	18 m
Minimum su kotu	180 m
Maksimum su kotu	183 m
Normal su kotu	181 m

Heyelan Kütesinin Hızı

Kayan malzemenin suya çarpma hızı oluşan dalganın hızını, yüksekliğini, baraj gövdesine dalganın ulaşma hızı, gövdeye uyguladığı basıncı ve karşı kıyıdaki ilerleme miktarı etkileyen en önemli parametredir. Bu nedenle çalışma kapsamında, heyelan hızı Vought (1979) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Heyelan kütesinin suya çarpma hızı Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanır;

$$v_s = v_0 + [2g s(\sin\alpha - \tan\phi \cos\alpha)]^{1/2} \quad (1)$$

v_s : heyelan hızı, v_0 : ilk hız, g : yer çekimi ivmesi (9.81 ms⁻²), s : heyelan hareket miktarı (topuktan su yüzeyine), α : yamaç eğimi, ϕ : heyelan malzemesinin içsel sürtünme açısıdır.

Dalga Yüksekliği

Heyelan kütesinin aniden suya çarpması ile rezervuar alanında dalga oluşmaktadır. Oluşan dalga karşı kıyıya yada baraj gövdesine ulaştığı zaman ciddi zararlar vermektedir. Zararın boyutu dalganın boyutuna bağlıdır (Huber, 1980; Huber and Hager, 1997; Vischer and Hager, 1998). Çarpma sonucu oluşan dalganın boyutu Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanır;

$$H = 0.88 \sin\alpha \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)^{1/4} \left(\frac{V_s}{b}\right)^{1/2} \left(\frac{h}{x}\right)^{1/4} \quad (2)$$

H : dalga yüksekliği, α : yamaç eğimi, ρ_s ve ρ_w : malzemenin ve suyun yoğunluğu, V_s : malzeme hacmi, b : malzeme genişliği, h : su derinliği, x : karşı kıyıya olan uzaklık (m).

Dalğanın Hızı

Heyelan kütesinin suya çarpması ile su yüzeyinde birçok farklı yönde ve yüksekliklerde hızlarda dalga oluşmaktadır. Çarpma yönü boyunca oluşan dalganın momenti en büyük olup dalganın hızı Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmaktadır;

$$C = (g * (H + d))^{0.5} \quad (3)$$

C dalganın yayılma hızı, g yerçekimi ivmesi, H dalga yüksekliği ve d (m) su derinliğidir.

Dalğanın Karşı Kıyıda İlerleme Miktarı

Heyelan kütesinin ürettiği dalga karşı kıyaya ulaştığı zaman dalğanın hızı, yüksekliği ve karşı yamacın eğim açısına bağlı olarak dalga karşı kıyıda ilerler dalğanın karşı kıyıdaki ilerleme miktarı Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanır;

$$R/d = 2.831(Cot\beta)^{0.5}(H/d)^{1.25} \quad (4)$$

R dalğanın karşı kıyıda ilerleme miktarı, d su derinliği, β karşı kıyının eğim açısı, H (m) dalğanın yüksekliğidir.

Dalğanın Baraj Gövdesine Etkisi

Kütle hareki sonucu oluşan ve baraja ulaşan dalga baraj gövdesini aşma riski bulunmaktadır. Böyle bir durumda mansap tarafındaki yerleşim alanlarında ciddi zararlar doğurabilmektedir. Bu gibi olumsuz etkilerin önceden tahmin edilmesi gerekmektedir. Baraja ulaşan dalğanın yüksekliği eşitlik 5 yardımıyla hesaplanır;

$$H/h = 2 \times 0.88 \sin \alpha \cos^2 \left(\frac{2\gamma}{3} \right) (\rho_s/\rho_w)^{1/4} \left(V_s/bh^2 \right)^{1/2} (r/h)^{-2/3} \quad (5)$$

Burada;

H: dalga yüksekliği, α : yamaç eğimi, ρ_s ve ρ_w : malzemenin ve suyun yoğunluğu, V_s : malzeme hacmi, b: malzeme genişliği, h: su derinliği, x: karşı kıyıya olan uzaklık, H/h: göreceli dalga yüksekliği, γ : dalga yönü, r: radyal seyahat mesafesidir (m).

5. SONUÇLAR

Olası bir kütle hareketi sonucunda ilk etapta çarpma etkisi ile oluşan dalga Doğan kent ilçesine ve barajın gövdesine doğru ilerleyerek ilçeye ve barajın gövdesine zarar verecektir. Rezervuar alanına dolan ortalama 1 milyon metre küplük malzeme rezervuar alanında ikinci bir set oluşturarak geriye doğru su seviyesinin yükselmesine neden olacaktır. Böyle bir durumda taşkın sonucu dalğanın etki etmediği kısımlarda su altında kalacaktır (Şekil 5a, b, c.) Yapılan hesaplamalar sonucunda heyelan kütesinin suya çarpma hızı 23 m/sn, dalğanın hızı 20.2 m/sn, dalğanın yüksekliği 27 m, dalğanın karşı kıyıdaki ilerleme mesafesi 165 m, dalğanın baraj gövdesine ulaşma süresi 24 sn, yüksekliği 3 m ve olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak heyelanın oluşturacağı dalğanın ve rezervuar alanını dolduran heyelan malzemesinin oluşturacağı doğal setin Doğan kent ilçesine hasar vereceği ön görülmektedir.



Şekil 5. Normal su seviyesi (a), Maksimum işletme seviyesindeki su seviyesi (b) Kütle hareketi sonucu 10 metre yükselen su seviyesi (c).

6. KAYNAKLAR

- DSİ, 1986. Aslancık Barajı Göl Alanı Süttaşı Mahallesi Heyelan Raporu, Trabzon.
- Erdik, M., Demircioğlu, M., Şeşetyan, K., ve Durukal, E., 2006. Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları Limanlar ve Hava meydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği için Deprem Tehlikesi Belirlenmesi, B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü.
- Ertunç, A., 2003. Mühendislik Jeolojisi. SDÜ Yayınları, Isparta.
- Gelişli, K., Ersoy, H., 2017. Landslide Investigation with the use of Geophysical Methods: A Case Study In Northeastern Turkey, *Advances in Biology and Earth Sciences*, 2(1), 52-64.
- Huber, A., 1980. Schwalzellen in seen als flogevon felssturzen. Technical Report Mitteilung 47, VAW-Mitteilung, 180, Vischer D. (ed.), Zurich, Switzerland.
- Huber, A., and Hager, W. H., 1997. Fore casting impulse waves in reservoirs, in Dix-neuvieme Congres des Grands Barrages, Florence, Commission Internationale des Grands Barrages, 993-1005.

Adana'da Afet Risk Yönetimi ve Sakınım Planı Urban Mitigation Plan and Disaster Risk Management in Adana

G. Keskin

Adana Büyükşehir Belediyesi, Afet Risk Yönetimi Şube Müdürü V., Adana.
(gulcanuluturk@gmail.com)

ÖZ: Afet yönetimi ile ilgili 1990 sonrasında yeni bir anlayış yaygınlaşmaktadır. Yeni anlayış, afetler karşısındaki önceliği afet öncesi etkinliklerine, yani 'sakınım' çalışmalarına vermektedir. Uluslararası kuruluşlar, doğal afetlere karşı sakınım konusunu sürdürülebilir kalkınmanın bir önkoşulu olarak tanımlamıştır. Birçok ülke bu doğrultuda yasal ve kurumsal yapısını yenilemiştir. Türkiye'de, afet yönetimi daha çok afet sonrasında başvuru bir etkinlik modelini kapsamaktadır. 1999 depremlerinden sonra afet tehlikelerine karşı önlemler alınması gereği anlaşılmış; önemli adımlar atılmıştır. Ancak acilen çalışmalar yapılması gereken asıl konu, 'sakınım planı' çalışmalarıdır. Adana'nın öncelikle olası bir afet karşısında hangi zayıflık ve kusurları içerdiği tespit edilmeli ve 'sakınım planı' geliştirilmelidir. Kentte olası afet kayıplarını azaltmak amacı ile atılacak adımlar, risk azaltacak yöntemlerin benimsenmesini sağlayacak etkinliklerin düzenlenmesi, kurumlar arası işbirliklerin geliştirilmesi, afet bilgi altyapısının oluşturulması, mikrobölgeleme etütlerinin yapılması, risk analizlerinin yapılması, sakınım planının hazırlanması ve planların 'kentsel güvenlik' açısından yeniden değerlendirilmesidir. Belediyelere ise afet risk yönetimi çalışmalarını üstlenebilmesi için kaynak ve uzman işgücü desteği sağlanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Afet risk yönetimi, zarar azaltma, sakınım planı, büyükşehir belediyesi.

ABSTRACT: Global policies in disaster management have radically changed since 1990s, shifting the previously entrenched emphasis on emergency management, into risk management. Disasters are seen as events that could be avoided by means of proactive investments. A series of international declarations expressed the determination to reduce risks at every level, which was recently followed by legal and organizational revisions of many national governments. The disaster management system in Turkey, though it seems to tend towards this attitude, it is not necessarily based on an awareness of the global trends. Risk management and planning at every level is yet far from being at a satisfactory state. A confusion of responsibilities, and authorities are observed. A whole range of activities are therefore in need of being streamlined into the tasks of urban planning in the reduction of disaster risks. Preparing a mitigation plan for Adana and the training of planners are expected.

Keywords: Disaster risk management, disaster risk reduction, mitigation plan, metropolitan municipality.

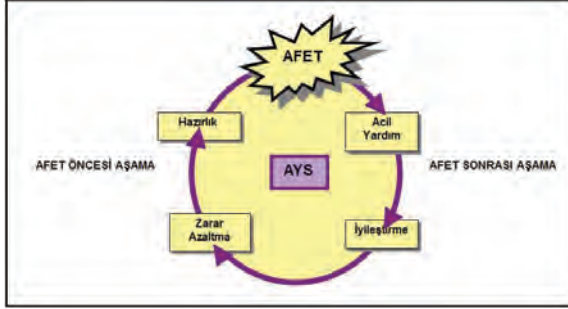
1. GİRİŞ

Üzerinde görüş birliği sağlanmış olan afet tanımı; "insanlar ve insan yerleşmeleri üzerinde fiziksel, ekonomik, sosyal ve çevresel kayıplara neden olan, normal yaşamı ve insan faaliyetlerini durdurarak veya kesintiye uğratarak, toplulukları etkileyen doğal, teknolojik veya insan kökenli olayların sonuçları"dır.

Risk ise, kaybedilme olasılığı bulunan bir değeri temsil etmektedir. Kaybedilmesi olası bir değer yoksa yalnızca bir tehlikeden söz edilebilir. Dolayısıyla risk soyut bir kavramdır ve toplumsal ortama geleceğe ilişkin bir kestirim kapasitesi gerektirmektedir. Risk kavramı sınıflandırılacak olunursa;

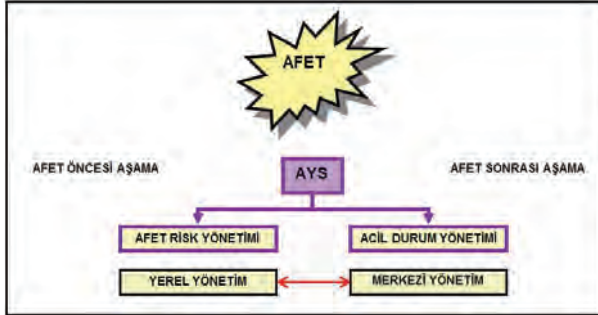
- Tehlike Türlerine göre (su baskını, deprem, heyelan, sıvılaşma, tsunami, vb)
- Tehlikeye Maruz Değerlere göre: (insanlar/sabit yatırımlar/diğer değerler)
- Tehlike Etkisine göre: (fiziki zarar, yangın, önlenen hizmetler, vb)
- İlgili Mesleklere göre: (yerbilimsel değerlendirmeler, mühendislik hesapları, acil durum yetkilileri, vb)
- Tehlikeye Maruz Yerlere göre: (faylar, akarsu yatakları, dik yamaçlar, kıyılar, vb)
- Düzeylerine göre: (ulusal, bölgesel, kentsel, yerel, vb)

Afet yönetimi, afetlerin önlenmesi ve zararlarının azaltılması amacıyla afet öncesi ve sonrasında yapılması gereken etkinliklerin planlanması, yönlendirilmesi, desteklenmesi, koordine edilmesi ve uygulanması için tüm kurum ve kuruluşlarla, kaynaklarının bu ortak amaç doğrultusunda kullanımını gerektiren bir yönetim şekli olarak tanımlanmaktadır. Afet yönetimi ile ilgili önceki yaklaşımına bakıldığında bu alandaki çalışmalar, 1950'lerden bu yana kullanılan döngüsel bir modelin (Şekil 1) öngördüğü dört ana bölümde yürütülür. Bu modelin süreklilik, otorite ve kurumsal teklik varsayımları nedeniyle yanıtıcı olduğu, daha çok acil durum yönetimi ve yara sarma etkinlikleri ile ilgili olduğu gözlenmektedir (Balamir, 2001).



Şekil 1. Afet yönetim sisteminde önceki yaklaşım (<https://www.quora.com/What-is-disaster-management-cycle>).

Dünya genelinde yaşanan afetler sonucu ekonomik, sosyal ve çevresel kayıpların giderek artması ve afetlerden sonra yapılan yardımlara olan gereksinimlerin aşırı büyümesi geleneksel 'yara sarma' politikasının sorgulanmasına neden olmuştur. 1990'ların başlarında bilim çevreleri ve uluslararası kuruluşların da aracılığıyla afet yönetim politikasına yeni bir yaklaşım (Şekil 2) getirilmiştir. Bu yaklaşımda hedeflenen, afet yönetim politikalarının sadece acil durumlara yönelik hazırlıklar ve afet sonrası yardımlarla sınırlı bırakılmayıp, afet öncesinde risklerin ve olası kayıpların belirlenmesi, bu risklerin sistemli bir biçimde yönetilmesidir. Yeni yaklaşım, afet tehlikeleri karşısındaki önceliği afet sonrası etkinliklerinden daha çok, afet öncesi etkinliklerine, yani risk yönetimi ve 'sakinim' çalışmalarına vermektedir.



Şekil 2. Afet yönetim sisteminde yeni yaklaşım (Balamir, 2010; Ulutürk 2012).

Yeni yaklaşımın uygulanmasında, olası kayıpları afet öncesinde çok yönlü önleme çabaları, özel bir planlama kapsam ve yöntemi gerektirmektedir. Bu ayrıcalıklı yeni planlama etkinliğine, 'sakinim planlaması' denmektedir. Sakinim planı, kentsel risk sektörlerinde, risk azaltma çalışmalarının eşgüdüm içinde yürütülmesi için hazırlanan, sosyo-ekonomik, yönetsel ve mekansal içerikli bütüncül plandır. Planda, kentin fiziki, ekonomik ve sosyal özelliklerinin sistemli birlikteliği gözetilerek bilimsel yöntemlerle çözümler üretilmeli, önlemler alınmalıdır. Sakinim planının amacı, kaynaklar ile can ve mal varlığını tehlikelerden sakınmaktır.

Sakınım planlaması, sadece imar ya da arazi planlamasından oluşmamaktadır. Sakınım çalışmaları, afet sonrası uzmanlarının yetkinlik alanı olmadığı gibi, yalnızca bir yapı mühendisliği, ya da zemin araştırmaları konusu da değildir. Sakınım, çok disiplinli bir yapı içerisinde, sosyo-ekonomik-mekansal kararların uygulanması ve bunun kurumsallaştırılması işidir. Türkiye’de sadece mekansal Planlar Yapım Yönetmeliğinde geçen sakınım planlaması, farklı bir içerik, teknik ve araçlar gerektirmektedir. Bu planlama biçimi, disiplinler arası ilişkileri kurabilen uzmanlaşmış plancı kadrolarına ihtiyaç göstermektedir. Günümüzde en büyük risklerin yer aldığı kentlerimizde bugüne kadar geliştirilmemiş bulunan sakınım planlamasının geliştirilmesi ve uygulamalara konu edilmesi gerekmektedir (Balamir, 2007).

2. TÜRKİYE’DE AFET RİSK YÖNETİMİ

BM öncülüğündeki uluslararası afetler politikası, 1990 sonrasında bir hedef değişimi ve uygulama içine girmiştir. Yeni uygulama, düşünce ve eylemleri yalnızca afet sonrası yardımlarla sınırlı bırakmayıp, etkinliklerin ağırlığını afet öncesine vermiş; ölçüğü ne olursa olsun hazırlanan planlarda risklerin göz önüne alınması gerektiğini belirtmiş; özellikle kentsel alanların ve dar gelirli kesimlerin risklerinin azaltılmasına öncelik verilmesini sağlamıştır. Bu doğrultuda, BM, 1990-2000 dönemini ‘Doğal Afetleri Azaltma Onyılı’ (IDNDR) ilan etmiş; bu sırada Yokohama Konferansı (1994) düzenlemiş; bu alanda ‘Afet Azaltma Uluslararası Stratejisi’ni (ISDR) uygulamak amacı ile bir yeni organ (UNISDR, 1999) oluşturmuş; 2005 yılında gerçekleştirdiği Dünya Konferansı’nda (Kobe) 2005-2015 on yılının, 2015 yılında gerçekleştirdiği Dünya Konferansı’nda (Sendai) ise 2015-2030 onbeş yılının, yeni bir eylem dönemi olarak tanınmasını sağlamıştır.

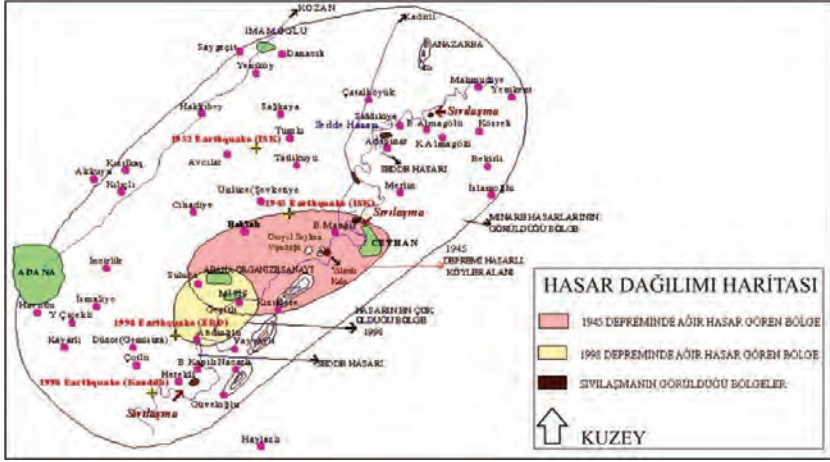
Toplantılarda ağırlık kazanan ortak görüşler ise şöyle özetlenebilir:

- “Afetlerin nedeni, doğa değil, plansız ve denetimsiz gelişmelerdir”.
- “Risk azaltma, bir maliyet değil, pişmanlık yaratmayacak yatırımlardır”.
- “Afet öncesinde risklerin azaltılması, afet kayıplarını da azaltacaktır”
- “Risk azaltmada asıl hedef, Büyükşehirler / Yerel Yönetimlerdir”.
- “Yeni politika ve etkinliklerin ağırlığı afet öncesinde olmalıdır ve özellikle kentsel alanların risklerinin azaltılmasına öncelik verilmelidir”.

Bugün çok sayıda ülke bu çabaları takiben önemli adımlar atmıştır. Japonya 1950’li yıllardan itibaren bütçesinin %5 ila %8’ini risk azaltan önlemlere ayırmakta; yasal yapı ve planlama sistemlerini sürekli güncellemektedir (Sudo, 2000; Fernandez, 2005). Ayrıca Yeni Zelanda (2002), Avustralya (2002), Yunanistan (2003), Kanada (2004) ve İngiltere (2004) gibi ülkeler yeni yasal düzenlemeler yapmakta; afet risk yönetimi anlayışına uygun risk azaltma çalışmaları hedefine yönelmektedir (Britton, 2000; Balamir, 2007). Amerika 2000 yılında çıkardığı yeni bir yasayla (Disaster Mitigation Act) ilk kez sakınım (mitigation) konusunu ön plana çıkartmış ve risk azaltma çalışmalarında yeni mekanizmalara işlerlik kazandırmıştır.

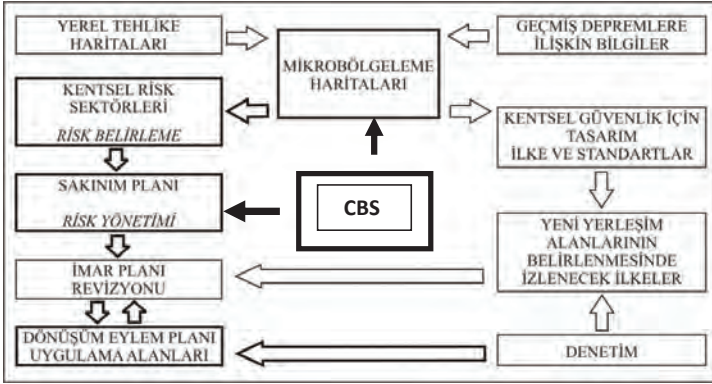
Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP, 2004) tarafından yapılan araştırma sonuçlarına göre, Türkiye yüksek risk gösteren ülkelerin ön sıralarındadır. Türkiye’deki afet yönetimi daha çok afet sonrası yardım ve finansal destekler sağlama etkinlikleri ile sınırlı kalmıştır. Bu nedenle Türkiye, yeni politikanın gereklerinden uzak kalmıştır. Özellikle afet risk yönetimi ve sakınım alanında yetersiz uygulamalara gidilmiştir (Balamir, 2007).

Türkiye’nin ilgili uluslararası toplantılardaki katılım, sunuş ve vermiş olduğu raporların değerlendirilmesi de bu sonucu doğrulamaktadır. Bu konferans ve bildirgelere Türkiye de katılmış ve imza koymuştur. Ancak bu toplantılara Türkiye’den katılmış bulunan ‘afetler’ ile ilgili temsilciler, genelde afet sonrası etkinliklerin uzmanları oldukları için yeni politikanın felsefesi tam anlaşılmamış; Türkiye’de bu yönde etkinlikler başlatılamamış ve gereken düzenlemelere geçilememiştir.



Şekil 4. Adana'da yaşanan 1945 ve 1998 depremlerinin hasar dağılım haritası (Adana İl Özel İdaresi).

Yapılması gereken, önce kısa bir süre içerisinde genel bir ana sakınım planının hazırlanması, daha sonra ise bu ana plan üzerinde kimi öncelikli ve yüksek riskli küçük alanlarda ayrıntılı plan ve projeler geliştirilerek pilot uygulamalara geçilmesi olacaktır. Sakınım planı kentsel riskleri belirleyerek, bunları azaltmak üzere alınan temel kararları gösterecektir. Yerbilimsel tespitlerin gösterildiği mikrobölgeleme harita ve bilgileri sakınım planının birincil verileridir. Ancak bunun üzerine diğer insan yapısı kentsel kusurlar işlenmeli ve tüm veriler birlikte değerlendirilmelidir. Kentsel kusur analizlerinin neleri kapsayacağı yerine göre değişiklik göstermekle beraber, bunlar makroform, kentsel doku, arazi kullanım, alt yapı, yapı stoku analizleri ile kent yönetimi ve işletme yetersizlikleri ana konu başlıkları altında toparlanabilir (Balamir, 2001). Ayrıca kent ölçeğinde hazırlanan sakınım planı doğrultusunda imar planları yeniden düzenlenmeli, acil durum planları güncellenmeli ve bu planların uygulanabilir olup olmadığı denenmelidir (Şekil 5).



Şekil 5. Kentsel risk yönetimi ve planlama (Ulutürk, 2012).

Uluslararası etkinlik ve çalışmalarda mevcut sistemin çoğunlukla afet sırasındaki ve sonrasındaki döneme ait çalışmalarla sınırlı kaldığı (yara sarma); afet öncesi, afet sırası ve afet sonrası dönemlerde yerine getirilmesi gereken eylemlerin bütünleşmiş bir planlama yolu ile gerçekleştirilemediği fikir birliğine varılmıştır. Bu ana fikirden yola çıkarak, Adana'da olası bir deprem öncesinde mümkün olan en az zarara uğramak üzere; afet öncesinde alınabilecek somut ve bütünleşmiş önlemler ile uygulama biçimleri, il sınırları ölçeğinde, Çizelge 1'de, yerel ölçekte ise Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Adana il sınırları kapsamında olası bir afet öncesi alınması gereken önlemler (Balamir, 2007; Ulutürk, 2008).

<ul style="list-style-type: none">◆ Kentin orman alanları, su havzaları ve tarım alanlarının (doğal kısıtlayıcılarının) tehlike bölgemeleri (sismik ve meteorolojik veriler ışığında hazırlanan) ile birlikte taşıdığı risklerin belirlenmesi;<ul style="list-style-type: none">○ Kuraklığın tarım alanları ve tarımsal üretim üzerindeki etkisinin analiz edilmesi;○ Olası bir orman yangınında, bu alanlara erişme ve müdahale kolaylıkları ile ulaşım/araç-gereç ve koruma tedbirlerinin belirlenmesi;○ Olası bir deprem ya da su baskınında Seyhan Barajı alt havzasında yer alan yapılar ve barınan nüfusun zarar görülebilirlik düzeyinin tespit edilmesi:<ul style="list-style-type: none">● Seyhan Barajı'nın yapısal niteliği, ömrü ve konumuna göre sismik tehlike duyarlılığı belirlenmesi,● Bu veriler ışığında baraj alt havzasında olası tehlike altındaki nüfus, yapılar, kullanım türleri, sanayi ve tesislerin belirlediği risk düzeylerinin saptanması,● Ayrıca yüzey suyu baskınlarına konu olabilecek diğer alanların tespit edilmesi ve bu alanlarda risk belirleme çalışmaları yapılması,● Deprem nedenli sıvılaşma, alüvyon vadi tabanları, kıyı çökmeleri vb. zemin hareketlerine konu olabilecek alanların ve burada yer alan olası değer kayıplarının belirlenmesi,● Potansiyel faylanma alanlarının kestirilmesi gibi.
<ul style="list-style-type: none">◆ Belirleyici büyük noktasal kullanım ve tesislerin (Örneğin;<ul style="list-style-type: none">○ Büyük sanayi tesisleri,○ Askeri tesisler,○ Çöp toplama alanı,○ Kimyasal depolar gibi)<ul style="list-style-type: none">● Konumları ve risk etki alanlarının belirlenmesi;● Bu tesislerin büyüme ve yer değiştirme/seçimi konusundaki tasarımların belirlenmesi/bilinmesi;● Deprem tehlike senaryo bilgilerine göre taşıdıkları risklerin analiz edilmesi gibi.
<ul style="list-style-type: none">◆ Kentin ana altyapı ve ulaşım arterlerinin olası bir deprem, ikincil bir patlama/yangın ya da su baskınında karşı karşıya olduğu risklerin tespit edilmesi:<ul style="list-style-type: none">○ Olası bir depremde elektrik ve haberleşme ağı, içme suyu ve kanalizasyon şebekesinin zarar görülebilirlik düzeyinin tespit edilmesi ve sonrasında:<ul style="list-style-type: none">● Altyapı sağlamlaştırma (güzergah/ şebeke/ kapasite/ malzeme açısından) çalışmaları yapılması;○ Olası bir deprem ya da büyük ölçekli ikincil bir patlamada acil müdahale açısından kent içi erişilebilirliğin sağlanması:<ul style="list-style-type: none">● Kentsel ve şehirlerarası ulaşım sisteminin deprem tehlike senaryo bilgilerine göre taşıdıkları risklerin analiz edilmesi;● Alternatif ulaşım/erişim seçenekleri oluşturulması;● Yol ağı düzeltilmesi ve genişletme çalışmaları yapılması gibi.
<ul style="list-style-type: none">◆ Başlıca riskli yerleşim alt bölgelerinin, alansal ve diğer (kaçak, yaşlı, gecekondular vb) özellikleri ile taşıdıkları risklerin analiz edilmesi; (kentimizin tarihi ve kültürel değerlerini korumak önceliği ile)<ul style="list-style-type: none">○ Tepebağ, Seyhan ve Cumhuriyet Mahallesi'nde (deprem ve su baskını açısından risk taşıdığı, tarihi değere sahip olduğu ve karma kullanım alanları -sanayi tesisi, akaryakıt istasyonu, resmi kurum, hastane, otel, merkezi dini tesis, tarihi/kültürel yapılar, konutlar- yer aldığı için) analiz çalışmaları, yerel eylem planları ve dönüşüm projeleri yapılması:<ul style="list-style-type: none">● Bölgesel zemin etütlerinin yapılması;● Yapıların kullanım türlerinin saptanması;● Kullanım türü sanayi ya da akaryakıt/ LPG istasyonu ise taşıdığı ikincil bir afet riskinin tespit edilmesi (patlama gibi);● Yapı ölçeğinde detaylı incelemelerin yapılması (kaçak, yaşlı, gecekondular, tescilli gibi);● Gece/gündüz nüfusunun belirlenmesi;● Olası üretim/ticari kaybın hesaplanması gibi.

Çizelge 2. Büyük ölçekte Adana kent merkezinde olası bir afet öncesi alınması gereken önlemler (Balamir, 2007; Ulutürk, 2008).

<p>◆ Kentteki tehlikeli madde içeren kullanımların <u>Yerel 'Afet Etki Senaryosu'</u> ve değerlendirmelerine göre taşıdıkları risklerin analiz edilmesi:</p> <ul style="list-style-type: none">○ Patlayıcı, yanıcı, kirletici, kimyasal, organik, vb. konsantrasyon noktalarının belirlenmesi, etki alanlarının tespit edilmesi ve izlenmesi;○ Elektrik santralleri, enerji nakil hatları, akaryakıt ve LPG istasyonları, çöplük alanı, kömür yığınlarının konumları, ölçekleri, komşuluk ilişkileri, farklı noktalardaki birimler arası ilişkilerin incelenmesi yoluyla (CBS) mekansal analizlerinin yapılması gibi.○ Atık sistemleri ve depolarının belirlenmesi, yürürlükteki işletme standartları ve sorumluluk kurallarının netleştirilmesi;○ Farklı tehlike konsantrasyon türleri için eşikler (hacimler, debiler) ile mekansal dağılım standartları belirlenmesi ve depreme duyarlı olan ve olmayan türleri için kısa, orta ve uzun dönemli risk azaltma programlarının geliştirilmesi;
<p>◆ Mevcut kentsel dokunun mikrobölgeleme haritaları ve deprem tehlike senaryo bilgilerine göre taşıdıkları risklerin analiz edilmesi:</p> <ul style="list-style-type: none">○ Kentte mikrobölgeleme haritaları üretilmesi ve mevcut doku analizi çalışmaları yapılması;○ Yapılan mikrobölgeleme haritaları temel alınarak mevcut doku risklerinin tespit edilmesi (özellikle zemin açısından riskli alanlardaki planlı eski yerleşim alanları ile plansız yerleşim alanları ve kaçak yapılaşmaların görüldüğü alanlar riskli):<ul style="list-style-type: none">• Riskli Alanlarda yapı seyreltme /boşaltma ve yoğunluk azaltma çalışmaları yapılması;• Bu alanlara erişme ya da tahliye kolaylıkları için ön çalışmaların yapılması;• Yol ağı düzeltmeleri ve genişletme çalışmaları yapılması;• Deprem sırasında olası yapı yıkımlarının yaratabileceği zorlukların kestirimi;• Deprem zararlarını azaltma çalışmaları kapsamında, mevcut dokunun güçlendirme ve iyileştirme çalışmalarında oluşabilecek direncin saptanması gibi (yapılaşma kusurlarının tespiti (proje/imalat), a/b/c sınıflandırılması, güçlendirme ve iyileştirme çalışmaları için önceden fayda-maliyet analizi yapmak, vatandaşlara bu bilgiler doğrultusunda anketler yapmak, vb).
<p>◆ Acil Durum Görevlileri (ADG) elemanlarının sınıflanması ve önceliklerin tanımlanması;</p> <ul style="list-style-type: none">○ ADG'ler deprem sırasında çalışır ve kullanılabilir durumda kalmaları yaşamsal önem taşıyan personel, araç-gereç ve kentsel sistemlerdir. (İtfaiye istasyonları, karakollar, fırın, kuru depo, soğuk hava deposu, kimi kamu yapıları gibi hizmet birimleri, stadyum, sinema-tiyatro vb. gibi) Ayrıca, hastane ve okul binaları gibi kimi taşınmazlar da bu statüde düşünölmek zorundadır.<ul style="list-style-type: none">• Bu elemanların yapı taşıma ve dayanım standartlarının belirlenmesi;• Çevresel koşulların ve kullanımların acil durum işleyişinde zorluklar ya da ikincil tehlikeler yaratması açısından değerlendirmesi;• Acil durum hizmet alanı ve kullanım yoğunluk düzeyinin belirlenmesi;• Yapı olağan işletim özellikleri ile özel donanımlarının belirlenmesi ve sürdürülebilirliğinin sağlanması;• Güvenlik/itfaiye/sağlık/ulaşım/iletişim/dağıtım açısından: araç-gereç-personel, filo varlığı, yeterli hizmet alanı ve doğru konumlandırma konularının irdelenmesi gibi.
<p>◆ Kentteki açık ve yeşil alanlar sisteminin deprem tehlike senaryo bilgilerine göre yeniden değerlendirilmesi:</p> <ul style="list-style-type: none">○ Acil durum gereksinmelerine (çadır alanları/barınma) dayalı olarak açık alan yüzölçümü ya da erişim yetersizliği görölen alanların belirlenmesi:<ul style="list-style-type: none">• Mevcut açık alanlar envanterinin konum, yüzölçümü ve sahiplik bilgileriyle çıkarılması;• Mevcut açık alanlar envanterinde kullanım ve işletme biçimlerinin belirlenmesi;• Bu alanlara erişim kolaylığının sağlanması;• Ayrıca kent içinde açık alanların genişletilmesi ve sürekliliğinin sağlanması;
<p>◆ <u>Proje paketleri</u> ve eylem programının belirlenmesi;</p>
<p>◆ Kamu-Özel girişim ortaklıkları ile kaynak geliştirme uygulamalarının yapılması.</p>

4. AFET RİSK YÖNETİMİ VE YEREL YÖNETİMLER

Doğal afetler genellikle yerel olaylardır ve yerel sorunlar doğurmaktadır. Bu nedenle afet yönetimi konusunda özellikle risk azaltma çalışmalarının asıl uygulayıcısı yerel yönetimlerdir. Yerel yönetimler düzeyinde, yasaların görev olarak verdiği sakınım planlarını hazırlamak/hazırlatmak, risk azaltma çalışmaları kapsamında imar planlarının yeniden değerlendirmek, bakanlıkça yürütülen programları izlemek, yerel platformların kurulmasını desteklemek, toplu yenileme ortaklıkları kurulmasını öncülükler etmek, başlıca risk azaltma etkinlikleri olarak tanımlanabilir.

2014 yılında kentte risk azaltma etkinliklerini gerçekleştirmek ve olası afet kayıplarını azaltarak güvenli kentsel çevreler elde etmek amacı ile Adana Büyükşehir Belediyesi bünyesinde, Afet Risk Yönetimi Şube Müdürlüğü kurulmuştur. Müdürlüğün hedefleri, hazırlanacak sakınım planı kapsamında, i) Afetler meydana gelmeden kentin zarar görülebilirlik düzeyini belirlemek, ii) Risklerin nerelerde yoğunluk kazandığını kestirmek, iii) Afet risklerini azaltacak önemleri almaktır.

Yukarıda belirtilen amaç ve hedeflerden hareketle, kentin olası afetler (deprem, su baskını, toprak kayması, kaya düşmesi vb. gibi) karşısında hangi zayıflık ve kusurları içerdiği, kentsel risk analizleri doğrultusunda tespit edilecek; kent bütününe yönelik ana sakınım planı geliştirilecektir. Sakınım planı çalışmaları, kent bütününe yönelik sektörel master planlar, ulaşım master planı ve kentsel dönüşüm master planı çalışmaları ile eşgüdümlü yürütülmelidir. Belediyelere kentlerin risklerine odaklanan sakınım çalışmalarını üstlenebilmesi için kaynak ve uzman işgücü konusunda üç tür desteğe gereksinim duyacaktır: Kaynak destekleri (deprem sigortası kaynakları kullanılabilir ve başarılı uygulama projeleri merkezi yönetim tarafından ödüllendirilebilir), Yetkilendirme destekleri (sigorta yaptırmaya zorlama ve güçlendirme projelerine katılımı zorlama gibi), Teknik destekler (Coğrafi Bilgi Sistemi, uzay görüntüleri ve sayısal haritalar gibi).

5. KAYNAKLAR

- Balamir, M., 2001. Recent Changes in Turkish Disaster Policy: A Strategic Reorientation?, in Kleindorfer, Mitigation and Financing of Seismic Risks: Turkish and International Perspectives, Paul and Sertel (eds.), Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Balamir, M., 2007. Afet Politikası, Risk ve Planlama, TMMOB Afet Sempozyumu, 31-43.
- Balamir, M., 2010. Türkiye'de Kentleşme ve Deprem, TBMM Raporu, 20.
- Ergünay, O. ve Gülkan, P., 1991. Seismic Risk Reduction and Disaster Management, Co-operative Project for Seismic Risk Reduction in the Mediterranean Region (SEISMED), Workshop III on Seismic Risk Reduction and Disaster Management held in Rome/Castelnuovo di Porto, United Nations.
- Gündoğdu, O., 1999. The Adana-Ceyhan Earthquake of June 27, 1998, International Workshop On Recent Earthquakes and Disaster Prevention Management, METU Disaster Management Implementation and Research Center.
- UNISDR, 2004. Living with Risk: Turning the Tide on Disasters towards Sustainable Development, Final Version, Geneva.
- Ulutürk, G., 2008. Afet Öncesi Alınacak Önlemler, Adana Afet Eylem Planı ve Senaryoları, 97-101, Adana.
- Ulutürk, G., 2012. Afet Risk Yönetimi ve Yerel Yönetimler, Güney Mimarlık Dergisi, Sayı 7, 13-18.

DOĞAL YAPI MALZEMELERİ

Doğal ve Ergitilmiş Bazaltların Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Comparison of Physico-Mechanical Properties of Natural and Melted Basalts

S. Er*, A. Tuğrul

*İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul
(selmaner@gmail.com)*

ÖZ: Ülkemizde geçmişten günümüze kullanılan yapı malzemelerinden biri de bazaltlardır. Ülkemizde yaygınca bulunan bazaltların kullanım alanları, teknolojik gelişmelerle beraber her geçen gün artmaktadır. Son dönemlerde bazaltlar ergitilerek farklı ürünlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır (taş yünü, fren balatası, bazalt fiber vb.). Ancak bu ergitmelerde farklı katkı malzemeleri kullanılmaktadır (dolomit, kil vb.) Bu çalışmanın amacı da, katkı kullanılmadan ergitilecek ve soğutulacak farklı bazaltların fiziko-mekanik özellikleri ile doğal bazaltların fiziko-mekanik özelliklerini karşılaştırmaktır. Bu amaçla, Türkiye'nin farklı bölgelerinden 3 farklı bazalt derlenmiştir. Örnekler üzerinde öncelikle kimyasal, mineralojik, petrografik ve fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirilerek örnek sayısı üçe indirilmiştir. Uygun işlem geliştirildikten sonra elde edilen örnekler üzerinde tekrar kimyasal, mineralojik, petrografik ve fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Son olarak doğal bazaltlarla ergitilmiş bazaltların kimyasal, mineralojik ve fiziko-mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Doğal ve ergitilmiş bazaltların özellikleri karşılaştırıldığında, ergitilmiş bazaltlar doğal bazaltlara göre daha iyi sonuç vermektedir. Sonuçta, en önemli parametrenin doğal bazaltların kimyasal özellikleri olduğu belirlenmiştir. Yoğunluk, kuru birim hacim ağırlık, toplam porozite, atmosfer basıncında su emme, P dalga hızı, Vickers sertliği ve nokta yük dayanım deney sonuçlarına göre, ergitilmiş bazaltların doğal bazaltlara göre daha iyi sonuç verdikleri saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt, ergitme, fiziko-mekanik deneyler

ABSTRACT: *In our country, basalt is one of the building materials that are used daily from the past. The usage areas of basalts, which are widespread in our country, are increasing day by day with technological developments. In recent times, melted basalts have been used to obtain different products (rock wool, brake pads, basalt fiber, etc.). However, different additive materials are used in these melts (dolomite, clay, etc.). The purpose of this work is to compare the physico-mechanical properties of melted and cooled without additives different basalts. With the physico-mechanical properties of natural basalts. For this purpose, three different basalts were collected from different parts of Turkey. Chemical, mineralogical, petrographic and physico-mechanical tests were performed on the samples. The number of samples was reduced to three by evaluating the data obtained. After the appropriate process was developed, chemical, mineralogical, petrographic and physico-mechanical experiments were carried out again on the obtained samples. Finally, chemical, mineralogical and physico-mechanical properties of molten basalts were compared with natural basalts. Compared with the properties of natural and melted basalts, molten basalts yield better results than natural basalts. In this result, the most important parameter is the chemical properties of natural basalts. It was found that the melted basalts yielded better results than the natural basalts according to density, dry unit volume weight, total porosity, water absorption at atmospheric pressure, P wave velocity, Vickers hardness and point load strength tests results.*

Keywords: *Basalt, melting, physico-mechanical properties*

1. GİRİŞ

İnsanların tarih öncesi dönemden beri kullandığı doğal taşlardan biri de bazalttır. Hitit Döneminde bugünkü Gaziantep (Yesemek) de bulunan dönemin en büyük antik heykel okulunda kullanılan ana yapı malzemesinin bazalt olması şartıtcı değildir (Duru, 2004). Anadolu yarımadasının jeolojik özelliği gereği birçok bölgede bulunan ve tarih boyunca kullanılan bazaltlar günümüzde de

kullanılmaya devam edilmektedir. Bazaltlar özellikle II. Dünya Savaşından sonra makina sanayinde metale alternatif bir malzeme olarak da bir süre kullanılmıştır. Metale alternatif malzeme olarak kullanılmak üzere ergitme ve soğutma süreci gibi bir işlemden geçmesi gerekmiştir. Ancak üretilirken bazalt içine dolomit ve kil gibi başka malzemeler de katılmıştır (Kopecky ve Voldan, 1965). Bazaltların mineralojik, fiziksel, mekaniksel vb. özelliklerinin birçok taştan üstün olması bunların gelecekte de kullanılmaya devam edeceğini göstermektedir. Bazaltları daha fazla ve doğru kullanmak için doğal taşların hepsinde olduğu gibi mineralojik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Doğal bazaltların fiziko-mekanik özellikleri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır (Tuğrul, 1995; Korkanç, 2003; Greene, 2004; Temmur vd. 2007). Ancak literatürde bazaltların katkı kullanılmadan ergitilmesi ve katılaştıktan sonraki özelliklerinin belirlenmesi üzerine araştırma mevcut değildir. Bu çalışmanın amacı, farklı kimyasal ve petrografik özellikteki bazaltların katkısız ergitilerek, elde edilen numunelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemektir. Böylece literatürde eksik olan ergitilmiş bazaltların kimyasal, petrografik, fiziksel ve mekanik özelliklerine etki eden faktörler belirlenmiş olacaktır.

2. MALZEME ve YÖNTEM

Çalışma kapsamında farklı kimyasal ve petrografik özelliklere sahip bazaltların doğal haldeki özellikleri ile ergitilmiş ve soğutulmuş haldeki özelliklerinin belirlenebilmesi için, araştırma kapsamında büro, arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılabilir yerler ofis çalışmalarında belirlendikten sonra, ilgili sahalar gezilerek örnekleme yerleri belirlenmiştir. Örnekler ağırlıklı olarak Batı Anadolu dan getirilmiştir. Tekirdağ Muratlı, Bursa Orhangazi ve Düzce örnek yerleridir (Şekil 1). Örnekleme yapılırken ayrılmış bölgelerden örnek almamak için aktif olarak çalışan taş ocakları öncelikle tercih edilmiştir. Bu sayede hem numune temininde hem de kalitesinde problem yaşanmamıştır.



Şekil 1. Örnek yerlerini gösteren yer buldurma haritası. (BI :Bursa Orhangazi, DI: Düzce ve TII: Tekirdağ Muratlı).

Laboratuvar çalışmaları kapsamında, ilk aşamada bazaltların fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi sonraki aşamada ise fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır (birim hacim ağırlık, toplam porozite, su emme, nokta yük dayanımı, P dalga hızı, Vickers sertliği).

2.1 Ergitme İşlemi için Hazırlık Çalışmaları

Örneklerin ergitme işlemlerine başlamadan öncelikle ergitme işlemlerinin nasıl yapılacağı ve nasıl bir malzeme içinde (pota çeşidi) yapılacağı konusunda ön araştırmalar yapılmıştır. Ergitme işlemi sırasında kullanılmak üzere uygun potanın seçilmesi için çeşitli potalar denenmiştir. Bunlar içinde

Alüminyum silikat pota ve grafit potalar hazır alınırken, gazbeton ve şamot tuğladan potalar ise laboratuvarında üretilmiştir. Yapılan çeşitli deneme çalışmalarında şamot tuğlanın yüksek sıcaklıkta fiziksel ve kimyasal özelliğini kaybetmediği için daha uygun olduğu belirlenmiştir (Şekil 2)



(a)



(b)



(c)

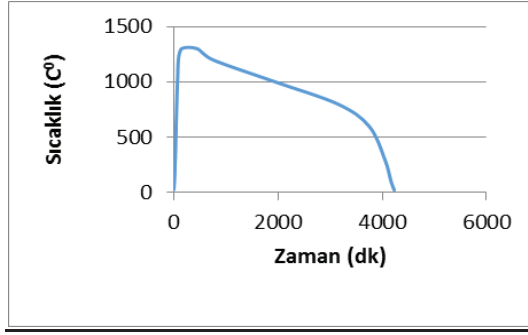


(d)

Şekil 2. Ergitmede kullanılan potalar a) alüminyum silika pota b) grafit pota c) gaz beton tuğla d) şamot tuğla.

2.2 Ergitme Çalışmaları

Ergitme sıcaklığının belirlenmesinde DTA analiz sonuçları kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre bazaltlar yaklaşık 600 °C de kısmi ergimeye başladıkları ve 1200-1300 °C arasında tam ergimeye ulaştıkları saptanmıştır. Çeşitli denemeler sonucunda ergitme sıcaklığı olarak 1300 °C çıkılması ve saatde 10 °C soğumasının uygun olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Bütün bazalt örneklerine bu işlem uygulanmıştır. Çizelge1'de detaylı zaman-sıcaklık değerleri verilmiştir.



Şekil 3. Ergitme işlemlerinde kullanılmasına karar verilen sıcaklık ve soğutma hızı grafiği.

Çizelge 1. Ergitme işleminde kullanılan zaman-sıcaklık verileri.

Aşama	Zaman (saat)	Sıcaklık (derece)
1	2	1200
2	1	1300
3	5	1300
4	5	1200
5	20	1000
6	20	800
7	10	600
8	5	300
9	2	100
10	1	25

3. BULGULAR

Ocaklardan getirilen BI, DI ve TII bazaltları üzerinde kimyasal analiz, petrografik, mineralojik ve fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Daha sonra bu bazaltlardan 300 µm boyutunda toz numuneler hazırlanmış ve potalara yerleştirilerek belirlenen işlemde ergitilmiştir. Elde edilen ergitilmiş numuneler üzerinde de kimyasal analiz, petrografik, mineralojik ve fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Elde edilen veriler aşağıda çizelgeler halinde verilmiştir (Çizelge 2-6).

BI, DI ve TII örneklerinin ergitilerek BIE, DIE ve TIIIE örneklerinin elde edildiği çalışmada BI-BIE, DI-DIE ve TII-TIIIE üzerinde yapılan XRF sonuçları karşılaştırıldığında SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, SO₃, K₂O, Na₂O değerlerinde anlamlı bir değişim belirlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar çeşitli araştırmacıların verileri ile kıyaslandığında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak Fe₂O₃, KK ve H₂O değerlerinde belirgin değişimler belirlenmiştir. Fe₂O₃ bileşiğinin BI değeri %8,86 iken BIE örneğinde % 11.17'e, DI örneğinde %6.72 iken DIE örneğinde %11.61'e ve TII örneğinde %10.32 iken TIIIE örneğinde % 15.02'ye yükseldiği görülmektedir. Bunun nedeni araştırıldığında, FeO'de yaşanan indirgenme olayıdır. Bu indirgenme ağıdaki gibi gelişmektedir.



Çizelge 2. Bazaltların mineral içeriği, dokusu, hamur özellikleri, ayrışma durumu ve sınıflandırılmaları.

Örnek Kodu	Mineral İçeriği	Doku	Hamur	Ayrışma	*Sınıflama
BI	Plajiyoklas, piroksen, olivin, opak mineral	Hipokristalin porfirik	Plajiyoklas mikrolit Volkan camı, Volkan camı,	Hidrotermal alterasyon, karbonatlaşma	Bazalt
DI	Plajiyoklas, opak mineral	Holohyalin porfirik	piroksen, plajiyoklas	Hidrotermal alterasyon	Bazalt
TII	Plajiyoklas, Alkali Feldispat, olivin, piroksen, plajiyoklas,	Hipokristalin porfirik	Plajiyoklas mikrolit, piroksen, opak	Serisitleşme	Olivinli Bazalt
BIE	Plajiyoklas, piroksen, opak mineral		Volkan camı, plajiyoklas mikrolitleri	Yok	Bazalt
DIE	Plajiyoklas, opak mineral		Piroksen, opak mineral, volkan camı	Yok	Bazalt
TIIE	Plajiyoklas, piroksen, opak mineral		Opak mineral, piroksen, volkan camı	Yok	Bazalt

* Streckeisen ve Le Bas (1986)' ya göre

Çizelge 3. Bazaltların mineral ve hamur içeriği.

Örnek	Piroksen (%)	Plajiyoklas (%)	Olivin (%)	Biyotit (%)	Opak Min. (%)	Hamur (%)
BI	4.8	30.8	1.4	-	1.1	61.6
DI	2.1	38.7	-	-	0.8	58.5
TII	9.1	13.1	16.5	-	0,6	60.7
BIE	3.1	62.1	-	-	9.7	25.6
DIE	-	44.6	-	-	5.2	50.2
TIIE	52.8	9.4	-	-	15.6	22.2

Çizelge 4. Bazaltların ortalama mineral boyutları.

Örnek	Piroksen (µm)	Plajiyoklas (µm)	Olivin (µm)	Biyotit (µm)	Opak Min. (µm)
BI	150	400	80	-	90
DI	350	500	-	-	100
TII	250	350	110	-	100
BIE	130	650	-	-	70
DIE	-	800	-	-	50
TIIE	450	250	-	-	40

Çizelge 5. Doğal ve ergitilmiş bazaltların ana element oksit içerikleri (%).

Örnek Kodu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	K.K*	H ₂ O
BI	54.28	19.93	8.96	7.70	2.76	0.16	1.12	3.51	2.09	0.76
DI	58.12	18.16	6.72	6.51	3.14	0.11	1.28	3.49	1.05	0.00
TII	45.22	13.17	10.32	9.44	12.36	0.21	1.72	3.17	3.66	0.00
BIE	53.39	19.28	11.17	9.18	3.36	0.1	1.24	2.56	0.37	-
DIE	55.74	17.26	11.61	7.78	3.42	0.12	1.22	2.54	0.26	-
TIIE	45.18	12.48	15.02	9.15	12.6	0.09	1.86	2.16	0.68	-

K.K*: Kızdırma kaybı

Çizelge 6. Doğal ve ergitilmiş bazaltların fiziko-mekanik değerleri

	Yoğunluk (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	n_t (%)	w_a (%)	V_p (km/sn)	HV (Vickers sertliği)	$I_{s(50)}$ (MPa)
BI	26.74	26.63	1.28	0.61	5.428	447	7.52
DI	27.56	27.14	0.21	0.12	5.806	476	8.23
TII	28.72	28.78	0.94	0.26	6.374	508	11.24
BIE	27.26	27.15	0.09	0.12	5.765	494	9.51
DIE	27.88	27.67	0.10	0.08	6.164	523	10.03
TIIE	29.84	29.51	0.05	0.09	6.405	579	14.96

γ : kuru birim hacim ağırlık, n_t : toplam porozite, w_a : atmosfer basıncı altında ağırlıkça su emme, V_p : P dalga hızı, HV: Vickers sertlik değeri, $I_{s(50)}$: nokta yük dayanımı.

H₂O bileşiği ise BI örneğinde %0,76 iken BIE örneğinde %0'dır. Ancak DI-DIE ve TII-TIIE örneklerinde H₂O içeriği belirlenememiştir. Böylece H₂O bileşiğinin ergitme esnasında örneklerden buharlaşarak ayrıldığı anlaşılmaktadır. KK değerinin ise BI örneğinde %2.09 iken BIE örneğinde %0.39'a, DI örneğinde %3.05 iken DIE örneğinde %0.26'ya ve TII örneğinde %3,66 iken TIIE örneğinde %0.68'e düştüğü belirlenmiştir. Bu değişimde örnek içerisinde yer alan H₂O, CO₂, F, Cl, S vb. uçucu bileşenlerin ergitme esnasında örnekten ayrılmasından kaynaklanmaktadır

Mikroskop analizi sonuçlarına göre ise BI-BIE örneği mineral içeriği kıyaslandığında BI örneğinde %30.8 olan plajiyoklas minerali, BIE örneğinde %62.1'e ve opak mineral içeriği ise %1.1'den %9.7'ye çıktığı belirlenmiştir. Hamur içeriği ise BI örneğinde %61 iken, BIE örneğinde %25.6'ya düşmektedir. Piroksen içeriğinde önemli bir değişime rastlanmazken BI örneğinde tanımlanan olivin BIE örneğinde bulunmamaktadır. DI-DIE örneklerinin mineral içerikleri kıyaslandığında DI örneğinde %38.7 olan plajiyoklas minerali, DIE örneğinde % 44.6'ya ve opak mineral içeriği ise %0.8'den % 5.2'ye çıktığı belirlenmiştir. Hamur içeriği ise BI örneğinde %58.5 iken BIE örneğinde % 50'ye düşmektedir. DI örneğinde belirlenen piroksen içeriği DIE örneğinde belirlenememiştir. Plajiyoklas minerallerinin ince uzun fakat geniş olmaması ve hamur içeriğinin BIE örneğine göre yüksek olması soğuma hızının bu örnek için BIE e göre fazla olduğunu göstermektedir. Buna rağmen plajiyoklas minerallerinin boyutu ortalama 800 μ m ile DI örneğinden daha fazladır. DI örneği % 57.12 SiO₂ içeriği ile en yüksek SiO₂ içeriğine sahip örnektir. Hamur içerisinde yer alan cam mikrolitleri de SiO₂'nin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. TII-TIIE örneklerinin mineral içerikleri kıyaslandığında, TII örneğinde %13.1 olan plajiyoklas minerali, DIE örneğinde % 9.4'e düştüğü belirlenmiştir. Fakat TII örneğinde piroksen içeriği %9.1 iken TIIE örneğinde %52.8'e çıkmaktadır. Ayrıca, opak mineral içeriğine TII örneğinde rastlanmazken, TIIE örneğinde %15.6'ya çıkmaktadır. Tam tersi durum ise TII örneğinde %16.5 olan olivinin TIIE örneğinde hiç olmamasıdır. Hamur içeriği ise TII örneğinde %60.2 iken, TIIE örneğinde % 22.2'ye düşmektedir.

Elde edilen sonuçlara baktığımızda ergitilmiş bazaltların doğal bazaltlardan daha yüksek yoğunluk ve birim hacim ağırlık değerleri verdiği belirlenmiştir. En yüksek yoğunluk ve birim hacim ağırlık değerinin TIII- TIIIe örneklerinde olmasının nedeni, Mg ve Fe içeriklerinin yüksek olmasıdır. Başka bir deyişle, olivin ve piroksen gibi yoğunlukları 3-3.5 gr/cm³ olan minerallerin bazaltların içinde bulunma miktarı, yoğunluğu ve birim hacim ağırlığı etkilemektedir. Bu sonuçlar ışığında yoğunluğu ve birim hacim ağırlığı yüksek olan bazaltların ergitilmesi ile yoğunluğu ve birim hacim ağırlığı daha yüksek bazaltların elde edilebileceği açıktır. Toplam porozite değerlerinin ergitilmiş bazaltlarda çok düştüğü görülmektedir. Bunda ilksel (gaz boşluğu vb.) ve ikincil olan porozitelerin (ayırışma vb.) ergitme esnasında ortadan kalktığı anlaşılmaktadır. En büyük değişimin BI (ayırışmanın en yüksek olduğu örnek) – BIE örneklerinde olması bu bulguyu desteklemektedir. Ayrıca ergitilmiş bazaltların doğal bazaltlardan daha iyi P dalga hızı verdikleri görülmektedir. Bunda kayaçların içindeki porozite, ayırışma, süreksizlik vb. özelliklerin ergitilmiş bazaltlarda olmaması ya da çok az olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışma kapsamında doğal ve ergitilmiş bazaltlara ait Vickers sertlik değerleri de belirlenmiştir. Ergitilmiş bazaltlar doğal bazaltlardan daha yüksek değerler verdiği saptanmıştır. Tek eksenli basınç deneyi yeraltı ve yerüstü yapılarının tasarımında kayaçların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yaygınca kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada numune hazırlamak ve uygun deney ortamı hazırlamak oldukça zordur. Bu zorlukları aşmak için ISRM (2007) tarafından da önerilen nokta yük dayanım indeksi geliştirilmiştir (Kahraman, 2001; Sönmez vd., 2006; Karaman ve Kesimal, 2012). Çalışma esnasında yapılan nokta yükleme deneylerinden elde edilen veriler incelendiğinde ergitilmiş bazaltların doğal bazaltlara göre daha yüksek dayanım verdikleri görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Yapılan değerlendirmelerden elde edilen sonuçlara göre;

- Doğal ve ergitilmiş bazaltların kimyasal özellikleri kıyaslandığında benzer sonuçlar verdiği saptanmıştır. Sadece bütün örneklerde Fe₂O₃ içeriğinde O₂ ile indirgenme olduğundan kayda değer artışlar belirlenmiştir.
- Doğal bazaltların mineralojik özellikleri, ergitilmiş bazaltların mineralojik özelliklerine etki etmektedir. Plajiyoklasca ve piroksence zengin olan doğal bazaltların ergitildiğinde yine plajiyoklasca ve piroksence zengin oldukları saptanmıştır.
- Yoğunluğu yüksek bazaltlar yüksek demir ve magnezyum içerdiklerinden ergitme sonrası bazı problemler (kalıp-örnek sınırı boyunca çatlama) yaşanabilmektedir.
- Yüksek H₂O içeren bazaltlar çalışılırken suyun genleşmesi ile oluşacak hacimsel büyümenin dikkate alınması gerektiği saptanmıştır.
- Doğal bazaltlardaki boşluk, ayırışma, mikro çatlaklar gibi olumsuz özellikler ergitilmiş bazaltlarda ya hiç ya da daha az görülmektedir. Ergitilmiş bazaltlarda bu olumsuz özelliklerin görülmemesi nedeniyle doğal bazaltlardan daha iyi fiziko-mekanik özellikler sunduğu saptanmıştır.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 40405 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 2015/1 dönemi, 2211D programı ile desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Duru, R., 2004. Eski Önasya Dünyasının En Büyük Heykel Atelyesi Yesemek, TURSAB. İstanbul, 107s
- Greene, K. A., 2004. Design note on post-tensioned cast basalt. reston, engineering, construction, and operations in challenging environments: Earth and space, 45-50.
- ISRM, 2007. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, Springer, 628p

- Kahraman, S., 2001. A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Cilt 38, 729-733.
- Karaman, K. ve Kesimal, A., 2012. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı tahmininde nokta yükü deney yöntemleri ve porozitenin değerlendirilmesi. *Madencilik*, 51(4), 3-14.
- Kopecky, L. ve Voldan, J., 1965. The cast basalt industry. *Ann. N.Y. Acad. Sci*, 123(2), 1086-1105.
- Tuğrul, A., 1995. Niksar Yöresindeki Bazaltların Mühendislik Özelliklerine Ayrışmanın Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü, 183s
- Korkanç, M., 2003. Niğde Yöresi Bazaltlarının Alternatif Agregata Olarak Değerlendirilmesi. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü, 190s
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Medley, E. W., Tuncay, E., ve Nefeslioğlu, H. A., 2006. Estimating the uniaxial compressive strength of volcanic bımrock. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 43(4), 554-561.
- Temmur, S., Temmur, Y. ve Kansun, G., 2007. Erkilet bazaltı'nın jeolojik, petrografik ve teknolojik incelemesi, Kayseri, Orta Anadolu. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 1-7.

Alkali-Silika Reaksiyonu Sonucu Harçlarda Görülen Genleşmeler Üzerine Uçucu Kül Katkısının Etkisi

The Effect of Fly Ash Addition on the Expansions of Mortar due to Alkali-Silica Reaction

A. Binal

*Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe-Ankara
(adil@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, üç farklı termik santralle ve bu santrallerinde farklı yanma kazanlarına ait uçucu küllerin kullanılmasıyla, betonda amorf silis içeren agregalarla çimento hidroksitleri arasında meydana gelen alkali-silika reaksiyonunun gelişiminin önlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Kangal (Sivas), Soma (Manisa) ve Çayırhan (Ankara) termik santrallerinden alınan uçucu küller, reaktif agrega olarak çört içeren beton karışımı içine farklı oranlarda (karışımda kullanılan çimento miktarının %10, %20, %30 ve %40'ı kadar olacak şekilde) katılarak alkali-silika reaksiyonunun gelişimi incelenmiştir. Hızlandırılmış harç prizması deneyleri sonucu harç prizmalarının boyca uzama miktarı uçucu kül katılımıyla %0.3'den %0.02'ye indirilmiştir. Alkali-silika reaksiyonu sonucu en az boyca genleşme, karışımda kullanılan çimentonun %40'ı kadar uçucu kül katılmış harç prizmalarında ölçülmüştür. Hızlandırılmış harç prizması deneyleri sonunda örneklerden ince kesitler hazırlanarak, floresan mikroskopta ultraviyole ışık altında incelemeler yapılmış ve alkali silika jelin gelişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, alkali-silika reaksiyonu, harç prizması deneyi, floresan mikroskop, tek eksenli sıkışma dayanımı.

ABSTRACT: In this study, fly ashes of three different coal-burning power plants and different combustion furnace of them were used for preventing expansion due to alkali-silica reactions in mortar. In this scope, fly ashes of Kangal (Sivas), Soma (Manisa) and Çayırhan (Ankara) coal-burning power plants were added in different proportions (fly ash replace from 10 to 40 percent of the Portland cement) in mortar including chert (reactive aggregate) and the developing of alkali-silica reactions in mortar was observed. The expansions in mortar bars were reduced from 0.3% to 0.02% by addition of fly ash. At least expansion in mortar bar tests was achieved when fly ash at 40 percent was used in the mix. At the end of the accelerated mortar bar tests, thin sections were prepared from the samples, and the development of alkali-silica gel was investigated under ultraviolet light in the fluorescence microscope.

Keywords: Fly ash, alkali-silica reaction, mortar bar test, fluorescent microscope, fluorescence microscopy, uniaxial compressive strength.

1. GİRİŞ

Günümüzde her geçen gün enerjiye duyulan ihtiyaç katlanarak artmaktadır. Bu nedenle ülkeler yeni enerji kaynakları araştırmakta veya elde var olan enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması için çaba sarfetmektedirler. Ülkemizde de kullanılan elektrik enerjisinin %31.5 gibi yüksek bir oranı kömür yakan termik santrallerden sağlanmaktadır. Bu santrallerde elektrik üretimi için Türkiye'nin linyit kömür üretiminin %80'ni (~65 Milyon ton) kullanılmaktadır (EUAS, 2015). Termik santrallerin yanma kazanlarında linyit kömürü tüketimi sonucu büyük miktarlarda ortaya atık malzeme çıkmaktadır. Atık malzemenin, bir kısmı termik santrallerin bacalarında kül partikülleri şeklinde elektrotreler aracılığıyla tutulmakta, geri kalan kısmı ise cüruf ve iri taneli kül şeklinde yanma kazanlarının tabanlarından çıkmaktadır. Bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğine neden olmakta parasal açıdan da kayıplara sebep olmaktadır. Bu nedenle termik santrallerden çıkan atık malzemenin çeşitli endüstri alanlarında kullanılarak tüketilmesi üzerine birçok araştırma yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Uçucu kül puzolanik özelliğinden dolayı çimento sektöründe hammadde, klinkere ek katkı malzemesi olarak, inşaat sektöründe kül-kül tuğlası yapımında, hafif agrega (sinter) üretiminde, beton üretiminde katkı malzemesi ve uçucu küllü gaz betonu üretiminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, üç farklı termik santrale ait uçucu küllerin

kullanılmasıyla harçta gelişen alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelen genişlemenin engellenmesi ve uçucu kül katkısının harç örneklerinin dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. MALZEME

Deneylerde Sivas-Kangal, Manisa-Soma, Ankara-Çayırhan termik santrallerine ait uçucu küller, Portland çimentosu (CEM-I), zararsız agrega olarak Ankara-Beytepe köyü taşocağından alınan kireçtaşı ve zararlı agrega olarak da Ankara-Güvenç köyünden alınan Çört kullanılmıştır.

2.1. Uçucu Kül

Genelde, uçucu küller içerdiği kireç (CaO) ve SO₃ içeriğine göre sınıflandırılmaktadır. ASTM C 618 standartında bitümlü kömürlerin yakılması sonucu ortaya çıkan ve kimyasal kompozisyonunda SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşiklerinin oranı > %70 den fazla olan uçucu küller F sınıfı kül olarak ve linyit ve yarı bitümlü kömürlerin yakılmasından elde edilen ve kimyasal kompozisyonunda SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşiklerinin oranı >%50 den fazla olan uçucu küller C sınıfı kül olarak sınıflandırılmıştır. Her iki tip kül sınıfı içinde sülfat (SO₄) üst sınırı %5 ve ateşte kayıp üst sınırı %6'dır. Avrupa ülkelerinde kabul gören uçucu kül standardında (TS EN 450) ise uçucu kül içerdiği kireç (CaO) miktarına göre sınıflandırılmaktadır. Bu standartta ise düşük oranda kireç içeren uçucu küller (CaO% <8) "F", orta derecede kireç içeren uçucu küller (CaO% = 8-20) "CF" ve yüksek oranda kireç içeren uçucu küller (CaO% = 8-20) "CH" olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları belirlenmiştir (Çizelge 1). TS EN450' ye göre deneylerde kullanılan bütün uçucu küller yüksek oranda kireç içeren küller (CH) olarak ve ASTM C618 ne göre ise Çayırhan külü "C" sınıfı, Soma "B" ve Kangal külleri ise "F" sınıfı olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan uçucu küllerin major oksit değerleri (%).

Uçucu Kül	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
Çayırhan	23.6	6.9	6.0	0.06	3.0	10.4	0.8	1.7	0.3	0.15	2.40
Soma B	46.20	21.17	4.16	0.041	1.44	20.75	0.45	1.23	0.65	0.22	0.93
Kangal	34.7	13.8	5.58	0.04	3.17	28.11	0.43	1.05	0.67	0.31	4.98

LOI: Ateş kaybı

Uçucu küllerin inceliği, termik santrallerde tutulduğu mekanizmaya göre değişmektedir. Elektrofiltrelerde tutulan uçucu külün tane boyu, her zaman siklonlarda tutulan uçucu külün tane boyundan daha ince olmaktadır. Beton içine katılan uçucu küllerin inceliği, betonun dayanımını ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir (Lane ve Best, 1982). Wagner, Blaine vb. çimentonun inceliğinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler her uçucu külün inceliğinin belirlenmesinde doğru sonuçlar vermemektedir (Dhir vd., 1988; Tokyay, 1990). Bu yöntemler yerine ACI 226 tarafından önerilen, 45 µm elek açıklığına sahip eleğin üzerinde kalan kül tane boyunu esas alan bir yöntem genelde uygulamalarda kullanılmaktadır. Lazer tane boyu sayıcıyla yapılan elek analizinde, Çayırhan uçucu küllerinin %50'si, Soma-B uçucu küllerinin %45'i, Kangal uçucu küllerinin %37'si 45 µm elek açıklığına sahip elek üstünde kalmıştır.

2.2. Çimento

Deneylerde kullanılan normal Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu ve ana bileşenlerinin oranı, ASTM C 150 standardında, tip "I" Portland çimentosu için belirtilen değerlere uymaktadır (Çizelge 2).

2.3. Agrega

Deneylerde zararlı agrega olarak Ankara-Güvenç köyü çevresinden elde edilen çört kullanılmıştır. Reaktif olmayan agrega olarak ise Ankara-Beytepe köyü taş ocağından temin edilen kireçtaşı kullanılmıştır. Agregaların 5-35° XRD difraktogramları çekilmiş ve yarı-nicel mineral yüzdeleri

saptanmıştır (Çizelge 3). Agregaların mineralojik değerlendirmesi ve bazı fizikomekanik özellikleri Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 2. Deneyleerde kullanılan Portland çimentosunun (PÇ 42.5) kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşim (%)*	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	20.45	İncelik (Blaine), m ² /kg**
Al ₂ O ₃	5.20	Özgül Ağırlık
Fe ₂ O ₃	3.41	Basınç Dayanımı, (MPa)
CaO	63.30	2 günlük (ASTM C 109)
MgO	1.25	7 günlük
SO ₃	2.95	28 günlük
Kızdırma Kaybı	1.50	Çekme Dayanımı, (MPa)
Çözünmeyen Kalıntı	0.30	7 günlük
Diğerleri	0.26	28 günlük
Na ₂ O	0.42	Tane Boyu ***
K ₂ O	0.56	
Toplam Alkali (Na ₂ O+0.658*K ₂ O)	0.79	
Çimento Bileşikleri, (%)		
C ₃ S	54.2	
C ₂ S	17.8	
C ₃ A	8.0	
C ₄ AF	10.4	

Çizelge 3. X-ışınları kırınım çözümlenmelerine göre yarı-nicel mineral yüzdeleri

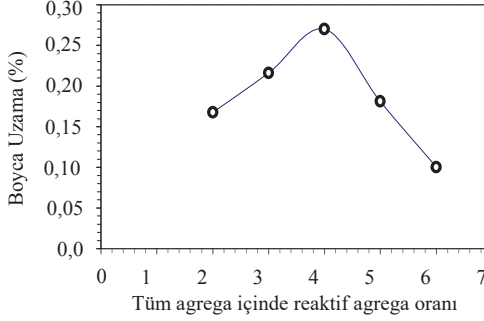
Agrega türü	Yarı nicel mineral yüzdeleri
Çört	%92.6 ±0.4 Kuvars, %7.4±0.4 Kalsit
Kireçtaşı	%99 Kalsit

Çizelge 4. Agregas makroskopik-mikroskopik özellikleri ve bazı fizikomekanik özellikleri.

Agrega Türü	Görünüm	Makroskopik-mikroskopik özellikleri	Fiziksel ve mekanik özellikleri
Çört		Açık kahverengi - kahverengi renkte, kırılğan ve gözenekli. Konkoyidal şekilde kırılmakta ve kayacın içinde yer yer kalsit bantları izlenebilmektedir. Kayaç tanelel dokuda kriptokristalin kuvars kristalleri ve eser miktarda tipik basınç ikizlenmesi gösteren kalsit mineralleri içermektedir.	Kuru Birim Hacim Ağırlık: 25.33 kN/m ³ Nokta Yüku Dayanım İndeksi I _{S(50)} : 8.24 MPa
Kireçtaşı		Kireçtaşı, gri renkte, sert ve masif yapıdadır. Kayacın ana bileşenlerini kalsit mineralleri ve fosil kavkaları oluşturmaktadır. Bağlayıcı malzeme mikritlerden oluşmaktadır.	Kuru Birim Hacim Ağırlık: 26.04 kN/m ³ Nokta Yüku Dayanım İndeksi I _{S(50)} : 10.41 MPa

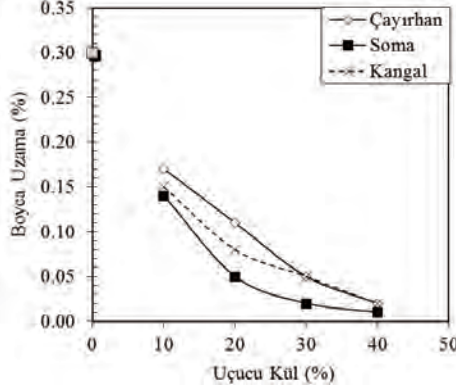
3. HIZLANDIRILMIŞ HARÇ PRİZMASI DENEYLERİ

Deneylerde reaktif agrega olarak çört, zararsız agrega olarak kireçtaşı kullanılmıştır. Tüm agrega içinde en yüksek genişlemeye neden olan reaktif agrega oranını belirlemek için hızlandırılmış harç prizması deneyleri yapılmıştır. Tüm agrega içine farklı oranlarda çört katılarak pesimum grafiği elde edilmiştir. En yüksek genişlemeye neden olan tüm agrega içinde çört agrega oranı %40'dır (Şekil 1).



Şekil 1. Çört agregası pesimum grafiği.

Harç prizmaların karışımlarında çimento ile ağırlıkça %10 ile %40 oranında yer değiştirerek uçucu kül eklenmiştir. ASTM C 1260 hızlandırılmış harç prizması deneyi için 285 mm uzunluğunda 25x25 mm kesit boyutlarına sahip her deney aşaması için dört harç prizması hazırlanmıştır. Prizmalar bir gün süresince %80 bağıl neme sahip kür odasında kür edildikten sonra, 80°C'deki su havuzuna yerleştirilmiş ve bir gün boyunca su havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra örneklerin ilk boy ölçümü yapıldıktan sonra 80°C'deki 1N NaOH çözeltisi içine yerleştirilmiştir. Harç prizmalarının boyu en az hafta bir olmak üzere 0.001 mm hassasiyetindeki komparatörle ölçülmüştür. 14 gün sonunda ilk boy ölçümüyle son boy ölçümü arasındaki fark, harç prizmasının ilk boyuna oranlanarak yüzde cinsinden boyca genişleme bulunmuştur. Deney örneklerine %20 oranında uçucu kül katılmasından sonra alkali-agrega reaksiyonu sonucu meydana gelen genişleme değerlerinde yüksek oranda azalmalar olduğu saptanmıştır. %40 uçucu kül deney örneklerinde boyca uzama değerleri ise %0.02 değerine kadar gerilemiştir. Boyca uzama değerlerinde en fazla azalma Kangal termik santraline ait uçucu külleri içeren harç prizmalarında görülmüştür (Şekil 2).

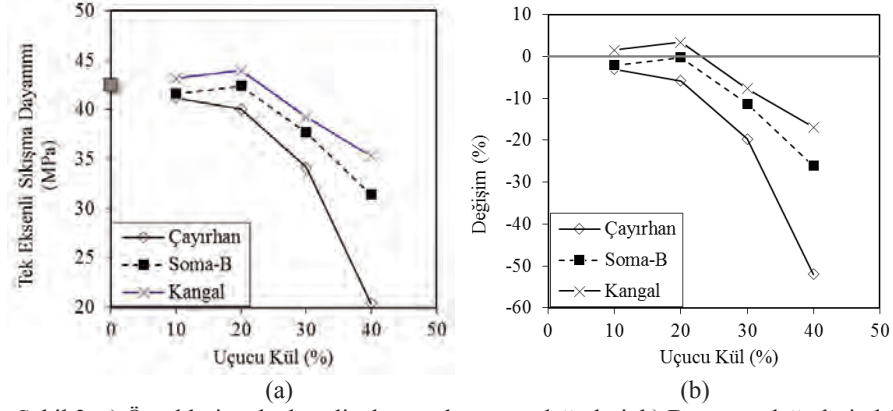


Şekil 2. Farklı oranlarda uçucu kül içeren harç prizmalarının boyca uzama oranları.

4. DAYANIM DENEYLERİ

5x5x5 cm boyutlarında kalıplar kullanılarak hızlandırılmış harç prizması karışım oranlarında küp örnekler dökülmüştür. Reaktif agrega olarak çört ve zararsız agrega olarak kireçtaşı kullanılmıştır. 14 gün süresince 80°C 1N NaOH çözeltisinde bekletilen küp örnekler daha sonra 100 kN'luk

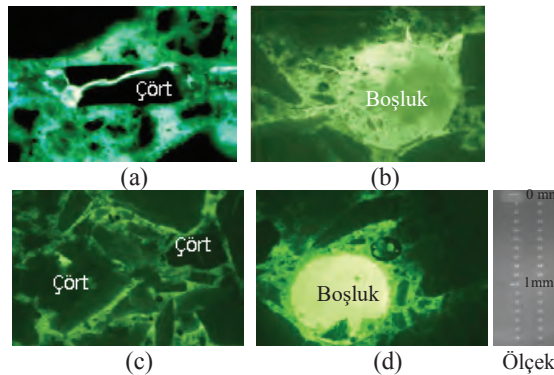
preste kırılmıştır. Örneklerin tek eksenli sıkışma değerleri 43.9 Mpa ile 20.4 MPa arasında değişmektedir. Dayanım değerlerinde en fazla artış Kangal termik santrali uçucu külü kullanılmış örneklerde belirlenmiştir (Şekil 3a). Dayanım değerlerinde, %20 uçucu kül içeriğine kadar artış sonra azalma belirlenmiştir (Şekil 3b).



Şekil 3. a) Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri, b) Dayanım değerlerindeki değişim.

5. FLUORESANS MİKROSKOP İNCELEMELERİ

ASTM C 1260 hızlandırılmış harç prizması deneyleri sonunda, harç örnekleri içinde alkali silika jelin gelişip gelişmediğini belirlemek ve alkali-silika reaksiyonunun deneylerde kullanılan reaktif agregatlar üzerindeki etkisini saptamak amacıyla optik floresans mikroskop incelemesine uygun olarak ince kesitler hazırlanmıştır. İnce kesitler hazırlanırken, Jakobsen (1998) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Hazırlanan ince kesitler optik floresans mikroskopta x25 büyütmede ultraviyole ve polarizan ışık altında incelenmiştir. Uçucu kül içermeyen harç örneklerindeki çört agregalarında alkali-silika jel gelişimi sonucu kırılmalar ve boşluklarda jel gelişimleri saptanmıştır (Şekil 4a-b). %40 oranında kül içeren örneklerde çört agregaları çevresinde çok az oranda jel gelişimi ve boşluklarda ise jel gelişimi gözlemlenmemiştir (Şekil 4c-d).



Şekil 4. Floresans mikroskop altında incekesit görüntüleri, a-b) Uçucu kül katılmamış, c-d) %40 Kangal uçucu külü içeren.

6. SONUÇLAR

Yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlara varılmıştır.

- 1) Deneylede reaktif agrega olarak kullanılan Ankara-Güvenç köyünden temin edilen çört agregasının pesimum oranı %40'dır.
- 2) Harç prizmalarında alkali agrega reaksiyonu sonucu meydana gelen genleşme miktarları, %20 uçucu kül içeriğinden sonra ani olarak düşmektedir.
- 3) %40 oranında uçucu kül katılan harç prizmalarında genleşme miktarı %0.02'ye kadar düşürülmüştür. Genleşme değerlerindeki en fazla azalma Soma-B uçucu külü eklenmiş örneklerde saptanmıştır.
- 4) Uçucu kül içeren harç örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri %20 kül içeriğinden daha fazla kül içerdiğinde düşmüştür. Dayanım değerlerinde %20 uçucu kül içeriğine kadar artış görülmüştür.
- 5) En fazla dayanım değerlerindeki azalma Çayırhan termik santrali uçucu külü içeren örneklerde gözlemlenmiştir.

7. KAYNAKLAR

- ACI Committee 226, 1987. Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete, ACI 226-IR-87. ACI Materials Journal, 84(4), 327-342.
- ASTM C 1260-94, 1997. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method). Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Mineral Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 650-653.
- ASTM C618, 2003. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, USA.
- Dhir, R.K., Munday, J.G.L., and Ho, N.Y., 1988. PFA in Structural Precast Concrete: Engineering Properties. Cement and Concrete Research, 18, 852-862.
- EUAS (Electricity generation company), 2010. Annual report. http://www.euas.gov.tr/Documents/sektor_raporlari/EUAS-Sektor_Raporu2015.pdf (Last access: 15/05/2017).
- Jakobsen, U.H., 1998. Understanding the features observed in concrete using various fluorescence impregnation techniques, Proceedings of the Twentieth International Conference on Cement Microscopy, Guadalajara, Mexico, 281-301.
- Lane, R., O., Best, J. F., 1982. Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete. Concrete International: Design & Construction, 4(7), 81-92.
- Tokyay, M., 1990. Betonda uçucu kül kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu. İMO, Ankara, 29-36.
- TS EN 450, 1998. Fly ash for concrete-definitions, requirements and quality control. TS EN 450, National Standard, Turkish Standard Institution, Ankara, Turkey (Turkish).

Agrega Kimyasal Bileşiminin Yüksek Dayanımlı Betonlar Üzerindeki Etkisi *The Effects of Chemical Composition of Aggregate on High Strength Concretes*

E. Gürsel, C. Erenson*

Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, AKSARAY
(*canerenson@hotmail.com)

ÖZ: Kayaçlar, beton içerisindeki iskeleti oluşturan ve bağlayıcı malzemenin elde edildiği önemli bir beton bileşenidir. İnşaat sektöründe agrega olarak tanımlanan kayaç parçalarının kimyasal bileşim özellikleri, beton elemanlarının dayanımlarını ve davranışlarını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bundan dolayı yapı, temel, dolgu vb. elemanlarda kullanılan malzemelerin kimyasal bileşim açısından incelenmesi önem taşımaktadır. Nüfus artışına bağlı ihtiyaç duyulan yüksek katlı binalar, köprüler, barajlar gibi yapılarda yüksek dayanımlı beton (YDB) kullanılması gerekebilmektedir. Kayaç türü ve kimyasal bileşim özelliklerinin YDB üretimine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada 24 farklı kayaç kullanılarak numuneler üzerinde basınç, çekme, ultrasonik ses iletim hızı ve Schmidt çekiçi deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, magmatik kayaçlar için $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının ve genel kireçtaşı türlerinde MgO/CaO oranı bulunma yüzdelerinin basınç-çekme dayanımını ne denli değiştirdiği korelatif bağlantılar kurularak değerlendirilmiştir. Kayaçların kimyasal bileşim karakteristikleri ve sonuçlar arasında kuvvetli korelatif bağlantılar oluşmamış, YDB'larda kullanılacak agregaların kimyasal bileşim incelemiden önce, mekanik yeterliliğe sahip olup olmadıklarının kontrol edilmesinin, betondan istenilen performansın alınması konusunda daha sağlıklı sonuçlar vereceği kanısına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Basınç testi, Mohs sertliği, kimyasal bileşim, yüksek dayanımlı beton.

ABSTRACT: Rocks are an important concrete component that constitute the skeleton of concrete and provide the binding material. The petrographic properties of rock particles, which are named aggregate in construction sector, significantly affect the strength and behavior of concrete components. For this reason, it is very important to examine the materials, which are used in components such as structure, foundation, filling, etc. from the petrographic aspect. Because of the increase in population, it may be needed to use the high-strength concrete (HSC) in structures such as high-rise buildings, bridges, and dams. In this study, where the effects of type and petrographic properties of rock on the production of HSC, 24 different rocks were used in pressure, tension, ultrasonic sound transmission speed, and Schmidt hammer experiments. According to the results, the effects of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ level of magmatic rocks and MgO/CaO percentage of common limestones on the pressure-tension strength were examined through the correlative relationships. No strong relationship could be established between the petrographic characteristics of rocks and the results and it was concluded that, before the petrographic examination of aggregates to be used in HSC, checking if they have sufficient mechanical properties would be more beneficial for obtaining better performance from the concrete.

Keywords: Pressure test, Mohs hardness, petrography, high strength concrete.

1. GİRİŞ

Beton, esas olarak kum, çakıl, çimento ve suyun belirli oranlarda bir araya getirilerek üretildiği bir yapı malzemesidir. İçerisine donatı adı verilen çelik çubukların dahil edilmesiyle birlikte beton, standartlara ve yönetmeliklere uygun bir biçimde döküm ve bakım işlemlerinden geçerek insanlığın barınma, ulaşım, eğitim, sağlık vb. gereksinimlerini rahat bir şekilde karşılamasına yardımcı olmaktadır. Çelik ile güçlendirilmiş beton olarak lügata geçmiş betonarme terimi, yapı elemanlarına aktarılan gerilmelere güvenli bir biçimde karşı koyması için tasarlanan bir sistem olarak nitelendirilmektedir. Ancak, günümüzde hızla artan nüfus ve dolayısıyla artan şehirleşme problemi sınırlı alanlara sahip bölgelere yüksek katlı binalar, yüksek kapasiteli geçişleri karşılayabilecek geniş açıklıklı köprüler, çok sayıda bireyin ihtiyacının giderilmesi için inşa edilecek mega yapılar, elektrik, su ve enerji vb. gereksinimlerin elde edilmesi için büyük barajlar ve pek çok daha hizmet elemanları

yapılmasını gerektirmektedir. Tüm bu koşullar doğrultusunda daha yüksek taşıma kapasitesine sahip yapı elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde 55 MPa'nın üzerinde dayanıma sahip bu tür elemanlar için Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) ismi kullanılmaktadır (ACI, 2010). YDB elde etmek için geleneksel beton üretiminde kullanılan karışım bileşenine ek olarak mineral katkıları (silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu vb.) ve kimyasal katkıları eklenmektedir. Ancak, beton hacminin %75'ini oluşturan (Erdoğan, 2003) agregaların mekanik özellikleri de beton dayanımını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, çeşitli kayaç türleri kullanılarak elde edilen yüksek dayanımlı beton numuneleri üzerinde basınç, çekme ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Ayrıca her bir numunenin içerdiği kayaç türünün kimyasal bileşim incelemesi yapılarak deneyler sonucu elde edilen verilerle karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

Beton, eski zamanlarda "taştan taş yapma" sanatı olarak tanımlanmıştır. Bu tabirin sebebi, beton iskeletinin ve bağlayıcı malzemesinin genellikle doğal kayaçlardan elde edilmesi olmasına dayanmaktadır. Günümüzde, agregaların yapay olarak (metal cüruf agregaları) elde edilmesi söz konusu olsa da hali hazır sistemde %99 oranında maden ocaklarından elde edilen kırmatas ve dere yataklarından alınan kırılmış agregalar kullanılmaktadır. Nasıl ki, kayaçların fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini mineralojisi ve kimyasal bileşim belirliyor ise, aynı durum beton için de geçerlidir.

Yüksek dayanımlı betonlar (YDB), isimlerini alışılmışın dışındaki basınç dayanımı ve yüksek kalicilik (durabilite) özelliklerinden almaktadır. Mühendislik disiplininin kalifiye şekilde kullanılması ve içerisindeki malzemelerden efektif şekilde faydalanılması açısından yüksek dayanımlı betonlar önemli bir beton türünü temsil etmektedir. Dünya nüfus artışına bağlı olarak beton kullanımı her geçen gün kaydadeğer ölçüde artmaktadır. Bu duruma bağlı olarak, gelecek nesillere kaynak bırakılması açısından "sürdürülebilirlik" kavramı günümüzde büyük önem taşımaktadır. YDB'ler ekonomiklik ve kalicilik konularında yapı malzemeleri içerisinde gelecekte yerini alarak mineral maden ve çimento kullanımını azaltacak, içerisinde barındıracağı endüstriyel atıklar (yapay mineral katkıları) sayesinde sürdürülebilirliğe hizmet edecektir. Öyle ki, C20 kalitesinde ki betonun maliyeti 1 birim kabul edilirse, C130 kalitesindeki betonun maliyeti 2 ile 4 birim arası, C20 betonunun ekonomik servis ömrü 50 yıl iken, C130 betonunun ekonomik servis ömrü yaklaşık 83 yıl olmaktadır. Araştırmacılar, YDB' larda çimento yerine %35'e kadar ikame eşdeğer bağlayıcı mineral katkı kullanımının, beton servis ömrünü %65'e kadar artırdığını Life-365 programını kullanarak hesaplamışlardır (Gürsel ve Kaya, 2016).

YDB üretiminde temel etken, kaliteli malzeme seçimidir. Betonda kullanılan malzemelerin başında, hacmin büyük kısmını agregalar oluşturmaktadır. Beton toplam hacmi içinde ortalama %75'lik yer tutan agreganın fiziksel (kimyasal bileşim yapısı, granülometrik bileşimi, yoğunluk ve su emme yüzdesi, birim ağırlığı, organik ve yıkanabilir malzeme miktarı, alkali-agrega reaktivitesi, aşınma dayanımı vb.) ve mekanik (basınç dayanımı, elastik modülü, poisson oranı) özellikleri betonun dayanımını, dayanıklılığını, zaman içinde stabilitesini, görünüşünü, ağırlığını ve işlenebilme özelliğini etkilerken, diğer taraftan betonun birim malzeme maliyetinde de önemli ölçüde bir pay oluşturmaktadır (Manzak vd., 1996). Bu çalışmada, agregaların sahip oldukları mekanik özelliklerin, kullanıldıkları YDB'ların mekanik özelliklerini ne denli etkilediği araştırılarak, genel bir klasman oluşturulmaya çalışılmıştır.

2. ÇALIŞMANIN AMACI, KAPSAMI VE YÖNTEM

Kayaçlardan elde edilen agregaların, beton malzemesine önemli ölçüde etkide bulunan mekanik özellikleri basınç dayanımı, tek zonlu kopma dayanımı (kesme dayanımı dahil), basınç altında birim şekil değiştirme ve sertlik değerleridir. Bu özelliklerin tamamı, oluşum şekline ve mineralojik bileşenlere bağlıdır. Kayacı oluşturan minerallerin kompozisyonu o kayacın mekanik özellikleri hakkında bir yaklaşımda bulunulmasına yardımcı olabilmektedir. İçeriğinde SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi major mineralleri bolca barındıran kayaçların genelde sağlam bir yapıya sahip oldukları söylenebilir. Çünkü bahsedilen minerallerin -genellikle- yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında kayaç oluşturduğu bilinmektedir. Ayrıca bahsi geçen mineraller yüksek sertlik (Mohs ≥ 5) değerine sahiptir. Sertlik kavramı, minerali oluşturan atomsal yapıtaşlarının birbirleri ile olan bağ kuvvetlerini simgeler.

Bağlar ne kadar kuvvetli ise, yük altında şekil değiştirmeye karşı gösterilen mukavemet fazla, yüzeysel etkilerde aşınma-yüzeysel kopma o denli azdır. Oluşumları tortul biçimde olan bazı kayaların, oluşumları sırasında üzerlerine etkileyen basınç-sıcaklık ve organik malzeme içerikleri çok farklı olabilir. Kayaların mekanik özellikleri konusunda yaklaşımda bulunmak için kimyasal bileşim incelemesi yapmak zorunludur. Bu çalışmada, yüksek dayanımlı beton kullanılması ihtiyacı duyulan alanlarda doğru agrega tipi seçimi sürecinde bir referans oluşturulması hedeflenmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Yöntem

Beton mineralojik yapısı, iç iskeletin ve bağlayıcı malzemesinin kayalardan elde edilmesi sebebiyle, kimyasal bileşim açıdan kayalara oldukça benzemektedir. Yapmış olduğumuz bu çalışmada, kayaç mineral kompozisyonuna bağlı kimyasal bileşim özelliklerinin agrega mekanik özelliklerine, dolayısı ile agrega mekanik özelliklerinin, beton mekanik özelliklerine ne denli yansıdığı araştırılmış ve bulgular deneylerle desteklenmiştir. Deneylerde test edilmek üzere, beton ve agrega mekanik özelliklerini en iyi şekilde temsil ettiği bilinen yüksek dayanımlı beton tercih edilmiştir. Normal dayanımlı betonlarda, çimento hamuru ve agrega dayanımları arasında genellikle büyük farklılıklar olmasından dolayı normal dayanımlı betonlardaki agregalar, mekanik özelliklerini beton yapısına tam manasıyla aktaramamaktadır. Yüksek dayanımlı betonlarda, çimento hamuru ve agrega komplike biçimde çalışmakta ve daha üniform bir davranış sergilenmektedir. Ayrıca, YDB numuneleri üzerinde, gerilme altındaki davranışların test edilmesi için; basınç ve çekme dayanımı testleri, sertlik ve malzeme iç yapısının anlaşılması için; Schmidt geri sıçrama ve ultrasonik ses iletim hızı deneyleri yapılmıştır.

Deney sonucunda elde edilen veriler, jeoloji ve inşaat mühendisliği disiplinlerine göre değerlendirilmiş, YDB'larda kullanılması gereken agregaların seçimi konusunda kimyasal bileşim yaklaşımlarda bulunulmuştur.

3.1 Malzeme Özellikleri

Tüm numunelerde TS EN 197-1-12 standardına uygun CEM 52,5R Portland çimentosu kullanılmıştır ve fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. CEM I 52,5R PÇ fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık	Özgül Yüze (Blaine)	0,045 mm Elekte Kalan	0,090 mm Elekte Kalan	2 Günlük Basınç Dayanımı	28 Günlük Basınç Dayanımı
CEM I 52,5R PÇ	3,05	6100 (cm ² /gr)	1,3 (%)	0,1 (%)	32,8 (N/mm ²)	59,2 (N/mm ²)

Tüm numuneler içerisinde mineral katkı olarak ASTM C1240 standardına uygun 1. Sınıf silis dumanı, ASTM C989 standardına uygun 80 sınıfı türünde öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve kimyasal katkı olarak ASTM C494 standardına uygun F tipinde yeni nesil süper akışkanlaştırıcı-plastikleştirici kullanılmıştır.

Kullanılan agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2'de, kimyasal bileşimi ise Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 2. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Agrega Kodu	Özgül Ağırlık	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Mohs)	Parçalanma Direnci (Los A. 500 devir "%")	Su Emme (Ağırlıkça) "%"	Basınç Dayanımı (N/mm ²) "f _{100x100} "
A1 (Bazalt)	2,62	2,56	5	29	2	78
A2 (Mafik Bazalt)	2,91	2,86	6,5	5	0,3	192
A3 (Diyabaz)	2,98	2,87	6,5	7	0,5	229
A4 (Afanitik Granit)	2,69	2,64	6,5	12	0,3	132
A5 (Granit)	2,95	2,91	6,5	10	0,2	205
A6 (Siyenit)	2,86	2,79	6	6	0,4	152
A7 (Diyorit)	3,05	2,95	6	9	0,2	239
A8 (Gabro)	3,08	3,06	7	10	0,3	260
A9 (Andezit)	2,67	2,43	5,5	15	0,9	121
A10 (Granodiyorit)	2,74	2,68	6	9	0,6	126
A11 (Dolomit-1)	2,77	2,66	3,5	17	0,5	94
A12 (Kireçtaşı-1)	2,68	2,65	3	41	1,2	51
A13 (Dolomit-2)	2,8	2,78	4	16	0,7	100
A14 (Traverten)	2,71	2,55	4	26	1,4	65
A15 (Kuarsit)	2,64	2,59	7	13	0,9	138
A16 (Çört)	2,68	2,67	7	4	0,2	178
A17 (Grovak)	2,55	2,31	6	27	2,8	71
A18 (Mermer)	2,73	2,66	3,5	35	0,4	63
A19 (Kuvars Sıst)	2,84	2,7	6,5	16	1,1	162
A20 (Granitik Gnays)	2,83	2,81	7	4	0,1	198
A21 (Kireçtaşı-2)	2,8	2,69	3,5	10	0,3	149
A22 (Kireçtaşı-3)	2,79	2,66	3,5	13	0,3	128
A23 (Silttaşı)	2,64	2,47	4,0	28	1,3	73
A24 (Kireçtaşı-4)	2,79	2,61	3,5	21	0,7	119

Çizelge 3. Agregalara ait major oksit tablosu.

Agrega Kodu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A1 (Bazalt)	54,3	11,5	5,6	12,5	2,1	1,5	0,5
A2 (Mafik Bazalt)	51,6	16,2	6,4	8,5	5,9	2,0	1,7
A3 (Diyabaz)	46,7	10,5	10,1	8,1	7,5	1,5	0,9
A4 (Afanitik Granit)	63,2	16,9	7,1	3,6	3,1	2,9	3,1
A5 (Granit)	49,9	14,2	9,7	8,3	10,1	1,8	1,8
A6 (Siyenit)	64,1	14,1	3,9	2,6	2,4	4,1	5,7
A7 (Diyorit)	51,5	17,2	1,9	7,0	2,0	1,4	5,3
A8 (Gabro)	52,9	18,2	10,0	9,8	7,2	0,6	0,3
A9 (Andezit)	54,1	21,4	3,9	4,0	1,7	3,0	5,2
A10 (Granodiyorit)	65,2	13,5	5,3	2,0	0,4	2,6	4,3
A11 (Dolomit-1)	0,5	1,1	-	17,3	25,3	-	-
A12 (Kireçtaşı-1)	0,7	1,2	-	38,4	16,3	-	-
A13 (Dolomit-2)	0,5	0,3	0,2	14,2	28,3	-	-
A14 (Traverten)	-	-	0,2	56,7	1,2	-	-
A15 (Kuarsit)	84,3	1,6	1,7	0,5	-	0,1	-
A16 (Çört)	74,5	12,6	1,7	-	-	-	-
A17 (Grovak)	66,2	13,2	2,6	3,7	1,8	2,3	1,1
A18 (Mermer)	0,2	-	0,4	56,2	3,7	-	-
A19 (Kuvars Sıst)	77,5	19,5	0,3	-	1,5	1,1	0,4
A20 (Granitik Gnays)	54,2	21,9	5,1	6,2	3,1	2,5	3,6
A21 (Kireçtaşı-2)	1,0	0,2	0,6	30,3	17,3	1,5	0,9
A22 (Kireçtaşı-3)	0,3	0,1	-	51,9	2,1	4,1	3,7
A23 (Silttaşı)	40,2	16,8	7,9	5,2	-	3,6	5,5
A24 (Kireçtaşı-4)	14,2	4,2	3,1	36,0	4,7	1,5	2,0

Deneyler çerçevesinde, agrega farklılığının beton mekanik özelliklerine etkisinin daha üstün düzeyde sergilenebilmesi için, basınç dayanımı 160 N/mm² olarak belirlenmiştir. Hazırlanan 200x100 mm silindirik numuneler, 28 gün süre ile uygun bekletilmiş, 28. gün sonunda gerekli testlere maruz bırakılmışlardır. C160 sınıfı üretilen betona ait karışım bileşenlerine ait veriler Çizelge 4'te belirtilmiştir.

Çizelge 4. C160 sınıfı üretilen betona ait karışım bileşenleri.

Dayanım Sınıfı	Çimento (kg)	ÖYFC (kg)	Silis Dumanı (kg)	Kimyasal Katkı (kg)	Su (kg)	Su/Bağlayıcı (Eşdeğer)
C160	560	70	80	21,0	141	0,20

*ÖYFC : Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

4. SONUÇLAR

Agregaların ve beton özelliklerinin yeterli düzeyde değerlendirilebilmesi ve yaklaşımlarda bulunulabilmesi için, betonda kullanılacak agregalar üzerinde; kimyasal bileşim inceleme ve mekanik özellik testleri, beton numuneleri üzerinde; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, Schmidt sertlik ve ultrasonik ses iletim hızı deneyleri yapılmıştır. Çekme dayanımı ilk düşünüldüğünde beton basınç dayanımı ile bağdaştırılmama da, basınç altındaki beton elemanlarının makro yapılarında oluşan şekil değiştirmeden kaynaklı, basınç kuvvetine genellikle dik yönlü çekme kuvvetlerinin oluştuğu bilinmektedir. Beton içerisinde, harici çekme kuvvetlerinin karşılanabilmesi, agrega kopma mukavemeti ve agrega yüzeyi-çimento hamuru aderans kuvvetine bağlıdır. Çizelge 2 incelendiğinde, basınç dayanımından bağımsız olarak, yeterli basınç dayanımına sahip olmayan agregaların, yeterli basınç dayanımına sahip agregalar kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı betonlar ile yakın çekme dayanımı sergilediği görülmektedir. (Örn: A12 (Kireçtaşı-1), A1 (Bazalt), A18 (Mermer)). Tüm beton numunelerine ait mekanik test sonuçları ise Çizelge 5, 6, 7 ve 8'de verilmiştir.

Çizelge 5. Tek eksenli basınç dayanımı değerleri.

Tek Eksenli Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Agrega Kodu
60-70	A12
70-80	-
80-90	A14
90-100	A18
100-110	A17
110-120	A1, A23
120-130	-
130-140	A11
140-150	A13
150-160	A9, A15
160-170	A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10, A16, A19, A20, A21, A22, A24

Çizelge 6. Yarmada çekme dayanımı değerleri.

Yarmada Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Agrega Kodu
4,5 – 5,0	A18
5,0 – 5,5	A13, A20
5,5 – 6,0	A2, A4, A5, A6, A7, A8, A10, A12, A15, A16, A19, A21, A23
6,0 – 6,5	A1, A3, A9, A14, A17, A22, A24
6,5 – 7,0	A11

Çizelge 7. Schmidt sertlik değeri.

Schmidt Sertlik Değeri	Agrega Kodu
45 – 50	A12
50 – 55	A14, A18
55 – 60	A11, A13, A17, A22, A23
60 – 65	A1, A21, A24
65 – 70	A2, A4, A6, A7, A9, A10, A15
70 – 75	A3, A5, A8, A16, A19, A20

Çizelge 8. Ultrasonik ses iletim hızı değerleri.

Ultrasonik ses İletim Hızı (m/sn)	Agrega Kodu
4700-4800	A12
4800-4900	A14, A17, A18, A23
4900-5000	A1
5000-5100	-
5100-5200	A19, A11, A13, A22, A24
5200-5300	A21
5300-5400	A4, A6, A10, A15
5400-5500	A2, A3, A5, A8, A7, A16, A19, A20

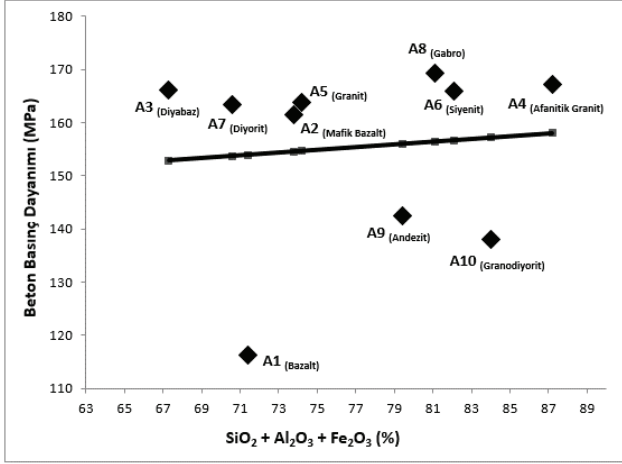
5. DEĞERLENDİRME

Yapılan değerlendirme sonucunda;

- Kayaçlar üzerindeki kimyasal bileşim inceleme, elde edilen agrega kalitesi hakkında ön bilgi verse de yüksek dayanımlı betonlarda kullanılacak agregalar için istenilen performansın elde edilememesi tahmini konusunda tek başına yeterli olmamaktadır.

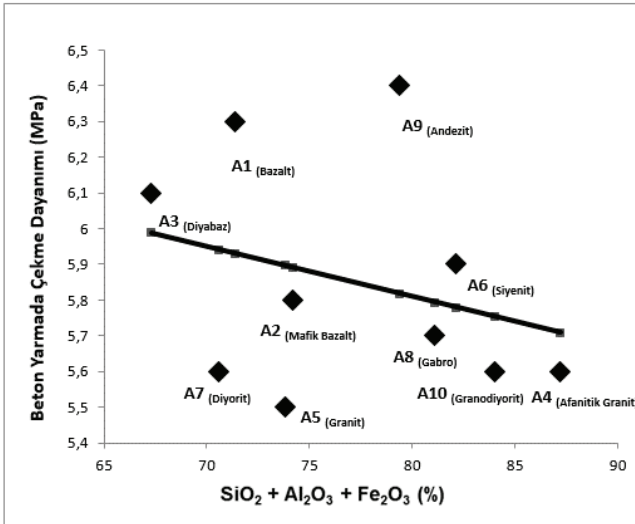
- Yüksek dayanımlı betonlarda kullanılması planlanan agregalar için iki yönlü inceleme yapılmalıdır. Mekanik yeterlilik sağlanması halinde, kimyasal bileşim inceleme yapılarak beton kullanım ömrünü kısıtlayıcı ya da azaltıcı etki yapan minerallerin varlığı tespit edilmelidir. Tek başına kimyasal bileşim değerler üzerinden yorumlama yapmak agrega kalitesi konusunda doğru sonuçlar vermeyebilir.

- Magmatik kayaçlar için, $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ oranının arttıkça kayacın basınç dayanımının arttığı kanısı doğru değildir. Agreganın mekanik özellikler çizelgesi ve Şekil 1, 2, 3 ve 4 incelendiği zaman, plütonik kayaçların (A8_(Gabbro), A3_(Diyabaz), A5_(Granit) vs.) $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O$ oranlarında büyük farklılıklar olmasına karşın mekanik test sonuçları ve basınç dayanım değerleri yakınlık göstermektedir (Şekil 1).



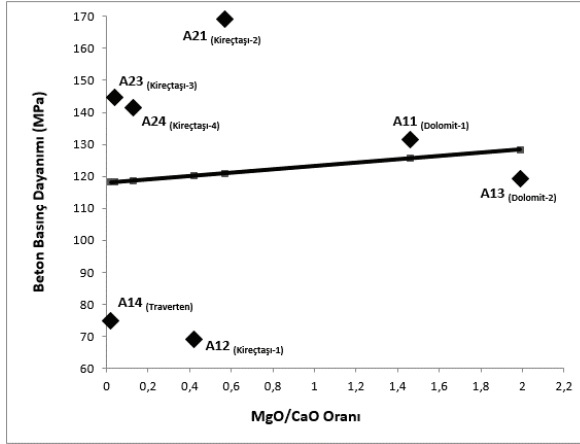
Şekil 1. Magmatik kayalara ait $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O$ toplamı ve beton basınç dayanım regresyon grafiği (Korelasyon katsayısı: 0.79).

Magmatik kayalar için, parlak agrega yüzeyi-düşük aderans kanısı yüksek dayanımlı betonlar için etkili bir kavram olsa da istisnai durumlar ortaya çıkabilmektedir. Regresyon grafikleri incelendiğinde korelasyon değerinin negatif değere gittiği görülmektedir. A9 (Andezit), A6 (Siyenit) ve A8 (Gabro) agregaları için $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ toplam değerleri %2 gibi ufak bir farklılık gösterse de, yarmada çekme dayanım değerleri oldukça farklı değerler almaktadır.



Şekil 2. Magmatik kayalara ait $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O$ toplamı ve beton yarmada çekme dayanım regresyon grafiği (Korelasyon katsayısı: -0.41).

- MgO mineralinin kayaç içerisinde bulunma yüzdesinin artması, kireçtaşı ve dolomitlerin basınç dayanımını arttırmamaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Kireçtaşı çeşitleri ve dolomit çeşitlerine ait MgO/CaO oranı ile beton basınç dayanım regresyon grafiği (Korelasyon katsayısı:0.82).

- Agrega sertliği, beton basınç dayanımına göre geri sıçrama (Schmidt çekici) deneyi sonuçlarına daha çok etkide bulunmaktadır. Schmidt çekiç testi, yüksek dayanımlı betonlarda yanıltıcı sonuçlara sebebiyet verebilmektedir. A21, A22 ve A24 agregaları yeterli basınç dayanımına ulaşmışlar fakat Schmidt çekici testi sonuçlarına göre Mohs sertlik değeri ≥ 5 olan kayalara oranla daha düşük değerler almışlardır.

6. KAYNAKLAR

ACI, 2010. Report on high-strength concrete. ACI 363R-10, Farmington Hills, MI.

Turhan, E. Y., 2003. Beton. Ankara, sy.183.

Gürsel, E., Kaya, M., 2016. The effect of the use of mineral additives on early and advanced age compressive strength of high strength concretes, Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ) Vol.3, No.2, June 2016.

Manzak, O., Dondurmacı, A., Köylüoğlu, Ö.S., Arıoğlu, E., 1996. Quality assurance and evaluation of concrete aggregate in Yapı Merkezi Prefabrication Inc., 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu'96, İstanbul.

Gelingüllü Barajındaki (Yozgat) Riprap Bloklarının Jeolojik ve Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Geological and Engineering Properties of Riprap Blocks at Gelingullu Dam (Yozgat)

E. Kolay^{1*}, M.Ö. Atay²

¹ Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, YOZGAT.

² Devlet Su İşleri 4. Bölge Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve YAS Şube Müdürlüğü Meram/KONYA (*kolayersin@gmail.com)

ÖZ: Bu çalışmada, yaklaşık yirmi yıldır kullanımda olan Gelingüllü Barajının riprap malzemesinin jeolojik ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Baraj aksının yakın çevresinde yüzeyleyen granit blokları gövdede riprap malzemesi olarak kullanılmıştır. Riprap katmanı, göl tabanından krete doğru, su altında kalma süreleri dikkate alınarak, dört zona ayrılmıştır. Zonlardan alınan örneklerin petrografik, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Zonlardaki bloklar üzerinde yerinde Schmidt sertlik çekici deneyi gerçekleştirilmiştir. Blokların şekil özellikleri ise fraktal boyut yöntemiyle belirlenmiştir. Su ile temas halinde olan A, B ve C zonlarının Schmidt sertlik geri sıçrama değerleri ile V_p değerleri dikkat çekici şekilde D zonundan daha düşük çıkmıştır. A, B ve C zonlarına ait riprap bloklarının bazı mühendislik parametrelerinin minimum değerlerinin sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Maksimum su kotunun üzerindeki D zonu için parametrelerin tamamı sınır değerlere uygundur. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, bozunma süreçlerinin riprap bloklarının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Duraylılık, Dolgu Gövdeli Baraj, Gelingüllü Barajı, Riprap, Yozgat

ABSTRACT: In this study, it was aimed to determine the geological and engineering characteristics of the riprap material of the Gelingüllü Dam which is used for twenty years. The granite blocks, which are exposed around the dam axle, were used as riprap material in the body. The riprap layer is divided into four zones, from the bottom of the lake to the crest, taking into account the dwell time. The petrographic, physical, chemical and mechanical properties of the samples taken from the zones were examined. In situ Schmidt stiffness test was carried out on the blocks in the zones. The shape characteristics of the blocks were determined by the fractal dimension method. The Schmidt hardness rebound values and V_p values of zones A, B and C in contact with water are remarkably lower than zone D. It is seen that the minimum values of some engineering parameters of the riprap blocks of zones A, B and C are below the limit values. All parameters for zone D above the maximum water gauge are suitable for limit values. According to the results obtained from the study, it is understood that the weathering processes affect the physical and mechanical properties of riprap blocks.

Keywords: Durability, Earth Fill Dam, Gelingüllü Dam, Riprap, Yozgat

1. GİRİŞ

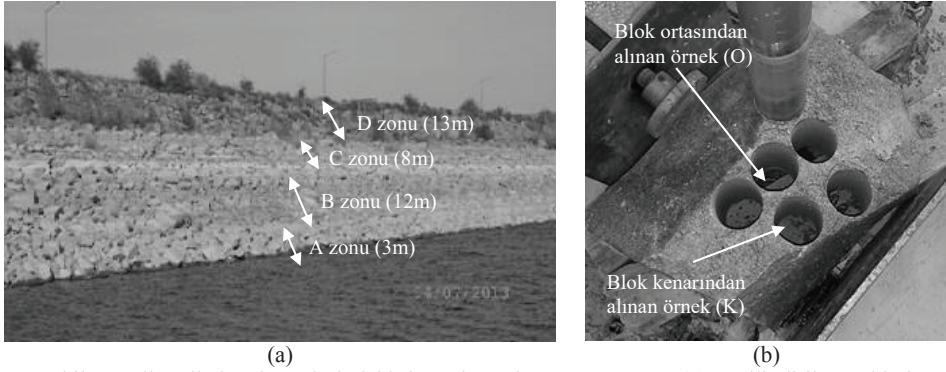
Dolgu gövdeli barajların özellikle memba şevlerinin rüzgar ve dalga aşındırmasında korunması gereklidir. Şev yüzeyinde böyle bir koruma ya beton kaplama inşası ya da riprap kaplama ile sağlanır (Bell, 2004). Kıırma taş yüksek kaliteli ve ucuz olması sebebiyle, toprak dolguları dalga etkisinden korumada en çok kullanılan malzemedir (Ahrens, 1981). Riprap malzemesinin suyun aşındırma etkisine olan direnci; ortalama büyüklük, şekil, dane dağılımı, gözeneklilik ve birim ağırlık gibi malzeme özelliklerine, hidrolik karakteristiklere veya gövde mansap yüzünün eğimi ve birim debiye bağlı olarak değişmektedir. Kaş ve Yıldız (2002), köşeli taşların köşeli olmayan taşlara göre boşlukların dolması açısından avantaj sağladığını belirtmektedir. Akçalı ve Arman (2008), baraj dolgularında kullanılan doğal malzemenin seçim kriterleri ve limit aşımının doğuracağı tehlikeler konusunda araştırma yapmışlardır. Laboratuvar deneyleri, limit değerler, limit aşımının sakıncaları konuları hakkında bilgiler vermişlerdir. Yüzey korunmasında olarak kullanılacak kaya malzemesinin

boyut, derecelenme, şekil, yoğunluk, su emme, aşınma direnci, çarpma direnci, dayanım ve kararlılık, kayaç türü, bozunma derecesi ve zayıflık düzlemleri gibi özelliklerinin göz önüne alınması gerekmektedir (Latham, 1998; Thorne vd., 1995). Doğal yapı taşları, doğal veya insan kaynaklı etkilerle zayıflatılmaya ve parçalanmaya maruz kalmaktadır. Bu etkiler anlık, tekrarlı ve zaman içinde yavaş yavaş olabilmektedir. Kayaçları bozunmaya uğratan fiziksel etkilerin en önemlileri tuz kristallenmesi, ısınma-kuruma, ısınma-soğuma ve donma-çözülmedir. Acır (2007), Doğu Karadeniz limanlarında kullanılan anroşman kayaçlarında, deniz suyunun ve dalganın etkisiyle killeşme, tuzlanma, ufalanma, çatlama gibi aşınmaların oluştuğunu ve anroşmanın görev yapamaz duruma geldiğini belirtmektedir. Çetin vd. (2000), Atatürk Barajı gövdesinde kullanılan vesiküler dokulu bazaltlar sebebiyle gövdede kayda değer boyutlarda farklı oturmalarda meydana geldiğini belirtmektedir. Yakın tarihte farklı etkiler sonucunda yıkılan veya hasar gören barajların yarısına yakını, gövde inşaatında kullanılan doğal yapı malzemesi problemlerine bağlı olarak yıkılmıştır (Akçalı ve Arman, 2008; Baykan ve Saf, 2004). Biswas ve Chatterjee (1971), baraj yıkılmalarının %40'nun kötü inşaat malzemesi kullanımı, dalga etkisi ve yetersiz bakım gibi sebeplerden gerçekleştiğini belirtmektedir.

Gelingüllü Barajı'nın inşaatı sırasında aks çevresinden toplanan granitik kaya blokları riprap malzemesi olarak kullanılmıştır. İnceleme alanında sert karasal iklim hâkim olup, yılda 25-30 kez donma-çözülme olayı gerçekleşmektedir. Ergüler ve Shakoor (2009), donma-çözülmenin kayaç parçalanmasında ısınma-soğumadan daha etkili bir iklim olayı olduğunu belirtmektedir. Donma-çözülme sonucunda kayaçların parçalanması, yollar, demiryolları, boru hatları ve bina inşaatı gibi bazı projeler için çok önemlidir (Zhang vd., 2004; Grossi vd., 2007). Gözenek suyu kayaç içerisinde 0°C'nin altında donduğunda, hacminde %9 artış olur. Bu durum muazzam bir boşluk suyu basıncı artışı oluşturur (Rahn, 1996; Bell, 2004). Donma şartları altında hidrostatik basınç kayacın çekme dayanımından daha büyüktür ve bu da ilksel çatlakların oluşması için yeterlidir (Lienhart, 1988). Su gözenek içinde -22°C'de donup katlaştığında 200 MPa basınç uygular. Kayacın tane boyutu arttıkça donmaya karşı direnci de artmaktadır (Bell, 2004). Takarlı vd. (2008) granit gibi kristalin kayaçlarda küçük sıcaklık değişimlerinin bile termal kırılmaya sebep olduğunu belirtmektedir. Literatürde, riprap malzemelerinin sahip olması gereken özelliklerinden bahsedilmiş ve bu özelliklerin önemi vurgulanmıştır. Barajlar uzun yıllar hizmet veren projeler olarak tasarlanmaktadır. Bu süre içerisinde bulundukları bölgenin özelliklerine göre iklim koşulları, su etkisi, deprem vb. etkenler baraj rezervuarındaki kayaçları ve gövde inşaatında kullanılan doğal yapı taşlarını etkileyecektir. Bu etki doğal yapı taşlarının dayanımını azaltma yönünde olmaktadır. Dayanım kaybının oranı, zamana, dış etkenin ve doğal yapı materyalinin özelliğine bağlıdır. Coduto (1998), baraj mühendisliğinin geleceğinde, küçük barajların yapımı ile mevcut barajların bakımının ve güncellenmesinin önemli yer tutacağını belirtmektedir. Bu çalışmada, Gelingüllü Barajı'nda riprap malzemesi olarak kullanılan granitik kayaçların 20 yıllık süreç sonucunda içyapısında ve dayanımında meydana gelen kimyasal, fiziksel ve mekanik değişimler incelenmiş ve sınır değerlerin neresinde olduğu araştırılmıştır.

2. GELİNGÜLLÜ BARAJI'NIN ÖZELLİKLERİ

Kanak Çayı üzerinde inşa edilen zonlu toprak dolgu gövdeli Gelingüllü Barajı, 1979 yılında projelendirilmiş olup yapımı 1986-1996 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Sulama amacıyla inşa edilen barajın talvegden yüksekliği 44.4 m olup gövde hacmi 1.362 hm³ ve normal su kotunda göl hacmi 272.35 hm³'tür. Baraj aksı ve rezervuar alanında Üst Kretase yaşlı Orta Anadolu granitoidine ait granitik kayaçlar geniş yayılım göstermektedir (Akçay vd., 2008). DSİ (1979) sondajlarında aks bölgesindeki granitik kayaçların 0-8 m derinliğinde oldukça kırıklı ve bozunmuş durumda olduğu, 8 m'den sonra ise sağlam granitik kayaçlara geçildiği belirtilmektedir. Baraj aksının yakın çevresinde, kuzeyinde ve batısında yüzeyde dağılmış vaziyette sağlam görünümlü granitik kayaç blokları bulunmaktadır. DSİ (1979) raporunda bu kayaçların riprap malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiş ve gövdede buradan toplanan kaya blokları riprap olarak kullanılmıştır. Riprap zonu geçirimsiz malzemenin üzerinde 30-70 cm kalınlıkta olup, bloklar rastgele dökülerek yerleştirilmiştir. Bu çalışmada, riprap katmanı talvegden krete doğru su altında kalma süreleri dikkate alınarak, dört farklı zona ayrılmıştır (Şekil 1a). A zonu devamlı su altında kalan zon, B zonu nispeten uzun süre su altında kalan zon, C zonu çok kısa süre su altında kalan zon ve D zonu hiç su altında kalmayan dolu savak seviyesinin üstünde kalan zon olarak tanımlanmıştır. Her zonda blok boyutlarını belirlemek için ölçümler yapılmış ve zonlardaki ortalama blok boyutları A, B, C ve D zonları için sırasıyla 50 cm, 44 cm, 51 cm ve 46 cm olarak bulunmuştur.



Şekil 1. Gelingüllü baraj gövdesindeki riprap kayaçlarının görünümü (a) ve silindirik örneklerin hazırlanması (b).

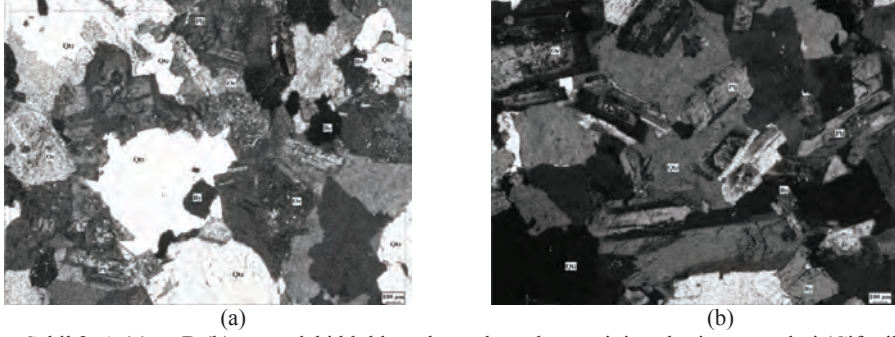
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın materyalini, riprap kaplamanın A, B, C ve D zonlarından alınan granitik kaya blokları oluşturmuştur. Her zonun temsilen alınan riprap bloklarının bozunma etkisi altında olan dış yüzeyine yakın kısımlarından (kenar) ve bozunmadan daha az etkilenecek iç kısımlarından (orta) ince kesitler hazırlanmış ve polarizan mikroskop yardımıyla petrografik incelemeye tabi tutulmuştur. Her zondan kaya bloklarının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için taşınabilecek boyutlarda 10'ar adet blok laboratuvar çalışmaları için seçilmiştir. Bu blokların mümkün olduğunca kenar (K) kısımlarından ve orta (O) kısımlarından 10'ar adet olmak üzere, her zon için 20 karot örneği hazırlanmıştır (Şekil 1b). Bu şekilde hazırlanan örnekler üzerinde kuru yoğunluk (ρ_d), görünür gözeneklilik (n), ağırlıkça su emme (A_w), ultrasonik hız (V_p), nokta yükü dayanım indeksi ($I_s(50)$) ve serbest basınç deneyleri (UCS) ASTM (2002) ve ISRM (2007) yöntemlerine uygun şekilde yapılmıştır. Sahada her zondaki bloklar üzerinde L tip Schmidt çekici ile 100 adet sıçrama değeri (N) ölçülmüştür. Ayrıca blokların kenar ve orta kısımlarından alınan 24 örneğin XRF yöntemiyle temel oksit analizleri, XRD yöntemiyle de 16 örneğin mineralojik analizleri yapılmıştır. Granit bloklarındaki günlenmenin en belirgin etkilerinden birisi bloklardaki yuvarlaklaşmadır. Bu sebeple zonlardaki blokların fotoğrafları yardımıyla, fraktal analiz yöntemi kullanılarak blokların yuvarlaklıkları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda her zon için 50 blok fotoğrafı kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular zonlara göre karşılaştırmalı olarak incelenmiş sonuçlar yorumlanmıştır.

4. PETROGRAFİK VE KİMYASAL İNCELEMELER

Baraj gövdesindeki granitler, el örneklerinde çoğunlukla faneritik bazen de porfiro-faneritik dokuya sahiptir. Bloklardan hazırlanan 16 ince kesit incelemesine göre, granitler çoğunlukla holokristalin, hipidiyomorf, taneler doku göstermektedir. Granitler bolluk sırasına göre, kuvars, ortoklaz, plajjiyoklaz, biyotit, amfibol, sfen ve opak mineraller içermekte olup orta-iri tanelidir. A, B ve C zonlarındaki blokların kenar kısımlarından hazırlanan ince kesitlerde orta kısımlardan hazırlanan kesitlere göre; feldispatların daha çok killeştiği, serisitleştiği ve kirlendiği; biyotitlerin daha fazla hidrobiyotite dönüştüğü, kloritleştiği ve serisitleştiği; amfibollerin daha çok kloritleştiği ve opaklaştığı ve kuvarsların daha çatlaklı olduğu gözlenmiştir (Şekil 2a). Daha fazla bozunma etkisi gösteren kenar kısımlar karot örneklerinde 0.5-1 cm genişliğinde daha açık zonlar olarak izlenmektedir (Şekil 3a). D zonunda ise blokların kenar ve orta kısımlarında yukarıda anlatıldığı gibi belirgin bir farklılık gözlenmemiştir (Şekil 2b). XRD analizleri sonucunda, A, B ve C zonlarındaki blokların kenar kısımlarında orta kısımlara göre daha çok kaolinit minerali içermektedir. D zonunda ise kenar ve orta kısımlardaki kaolinit içerikleri hemen hemen aynı değerden olup diğer zonlardan daha düşüktür. A, B, C ve D zonlarındaki blokların günlenmeye bağlı kimyasal değişimleri ortaya koymak için kimyasal günlenme indislerinden faydalanılmıştır. Bu amaçla XRF sonuçlarına göre, Parker indisi (W_p), silika-

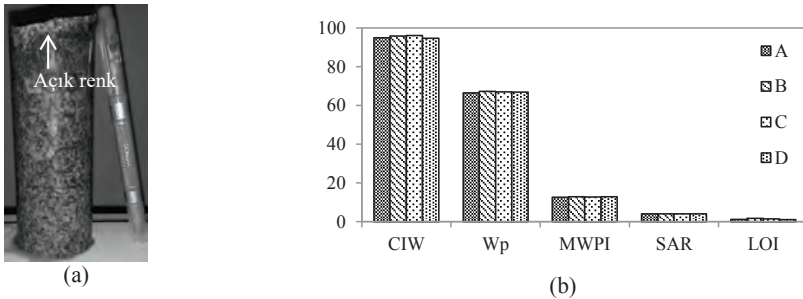
alümina oranı (SA), değiştirilmiş günlenme potansiyel indeksi (MWPI), kimyasal günlenme indisi (CIW) ve ateşte kayıp değerleri (LOI) hesaplanmıştır. Literatür verileri incelendiğinde (Arel ve Tugrul, 2001; Heidari vd., 2010; İrfan, 1994), kayaların günlenme derecesi arttıkça Wp, SA, MWPI'nın azaldığı, CIW ve LOI'nin ise arttığı görülmektedir. Şekil 3b'de görüldüğü üzere, A, B, C ve D zonlarındaki blokların günlenme indisleri arasında önemli bir farkın oluşmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2. A (a) ve D (b) zonundaki blokların kenar kısımlarına ait ince kesit görüntüleri (Çift nikol)
(Kuvars: Qtz, ortoklaz: Or, plajiyoklas: Plj, biyotit: By).

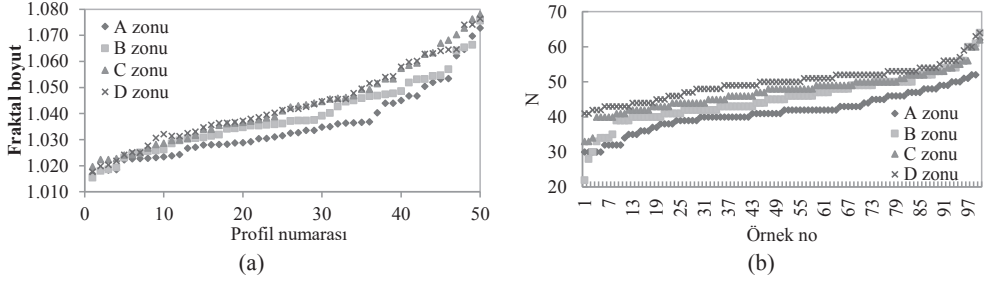
5. RİPRAP BLOKLARININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

A, B, C ve D zonlarından çekilen 50'şer adet blok fotoğrafı için, blokların şekil ve köşelliliğini ifade eden fraktal boyut hesaplamaları Kolay ve Kayabalı (2005)'e göre yapılmıştır. Fraktal boyut değerinin yüksek olması bloğun köşeli olduğunu ve küresellikten uzaklaştığını ifade etmektedir. Her zonu temsil eden Fraktal boyut değerleri Şekil 4'de gösterilmiştir. A, B, C ve D zonlarındaki bloklar sırasıyla ortalama 1.035, 1.039, 1.043 ve 1.043 fraktal boyut değerlerine sahiptir. Buna göre A zonundaki kaya bloklarının, daha yuvarlak ve pürüzsüz olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4a).



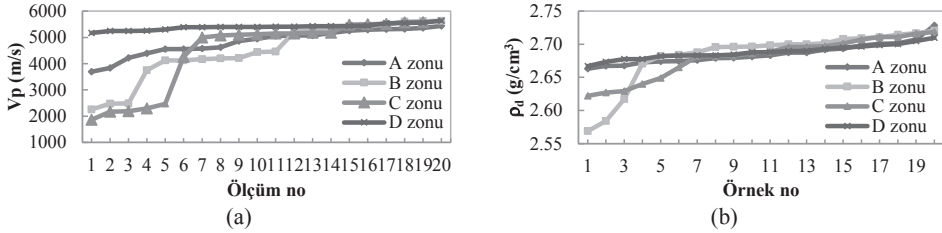
Şekil 3. Karot örneklerinin kenar kısımlarında bozunmalara bağlı renk değişimleri (a) ve A, B, C ve D zonlarındaki blokların kimyasal günlenme indisleri (b).

A, B, C ve D zonlarında yapılan Schmidt sertlik deneylerinden elde edilen geri sıçrama değerlerinin ortalamaları sırası ile 41.54, 45.36, 47.29 ve 49.8 olarak hesaplanmıştır. Buna göre devamlı su altında kalan A zonunun sıçrama değerlerinin diğer zonlardan belirgin oranda daha düşük olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4b). Karot örnekleri üzerinde kuru şartlar altında ultrasonik hız (V_p) ölçümleri yapılmış ve A, B, C ve D zonlarındaki numunelere ait ortalama ultrasonik hız değerleri sırasıyla 4831, 4491, 4478 ve 5403 m/s olarak bulunmuştur (Şekil 5a). Zonlardaki bloklara ait kuru yoğunluk (Şekil 5b), görünür gözeneklilik (Şekil 6a) ve ağırlıkça su emme değerleri (Şekil 6b) incelendiğinde D zonu dışındaki diğer zonlarda, bazı numunelerde belirgin oranda düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik ve su emme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Baraj gövdesindeki blokların kenar ve orta kısımlarına ait nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) değerleri zonlara göre Şekil 7a, b, c ve d'de görülmektedir.

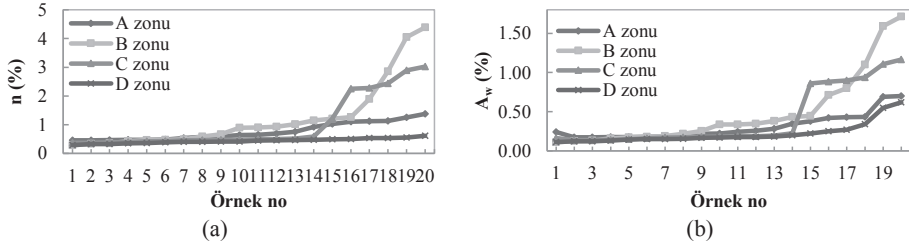


Şekil 4. Zonlardaki blokların fraktal boyut (a) ve Schmidt sertlik deneyi geri sıçrama (N) değerleri (b)

A, B ve C zonlarındaki blokların serbest basınç dayanımları (UCS) D zonundakilerden daha düşük çıkmıştır (Şekil 8). A, B, ve C zonlarında, blokların kenar kısımlarındaki UCS değerleri (UCS_K) orta kısımlara (UCS_O) göre daha düşük çıkarken, D zonun da ise değerler birbirine yakın çıkmıştır (Şekil 9). Zonlardaki blokların kenar ve orta numunelerinin dayanım anizotropisi oranları (UCS_K/UCS_O) ve zonlara göre dayanım anizotropisi oranları (UCS_i/UCS_D) Çizelge 1’ de verilmiştir.



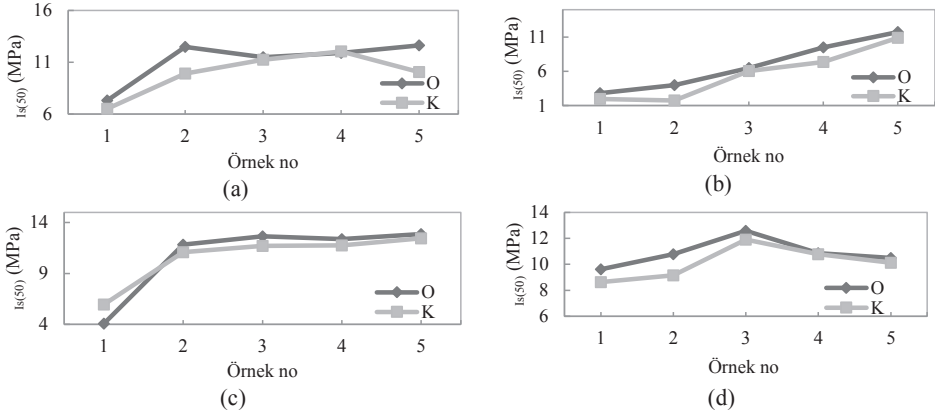
Şekil 5. Farklı zonlardaki örneklerin ultrasonik hız (V_p) (a) ve kuru yoğunluk değerleri (ρ_d) (b).



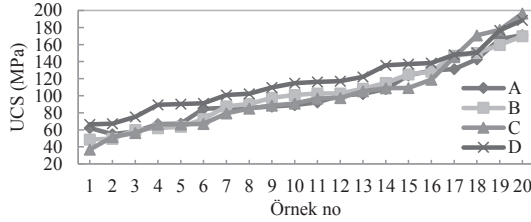
Şekil 6. Zonların görünür gözeneklilik (n) (a) ve ağırlıkça su emme (A_w) (b) değerleri.

Çizelge 1. Blokların serbest basınç dayanım (UCS) sonuçları.

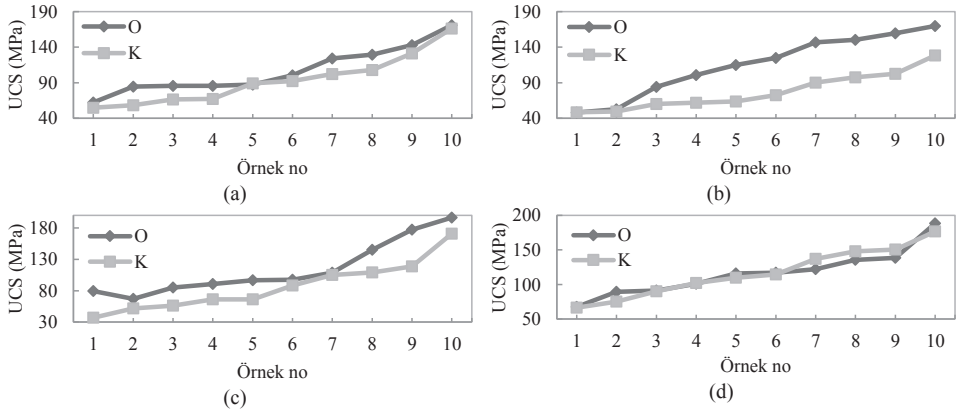
Zonlar		UCS (MPa)			Dayanım Anizotropisi Oranı (UCS_K/UCS_O)	Dayanım Anizotropisi Oranı (UCS_i/UCS_D)
		En az	En çok	Ortalama		
A	Kenar (K)	54.8	166.21	93.56	0.87	0.86
	Orta (O)	62.11	170.94	107.3		
B	Kenar (K)	48.54	108.27	77.52	0.67	0.83
	Orta (O)	48.15	169.86	115.23		
C	Kenar (K)	36.96	170.88	87.02	0.76	0.86
	Orta (O)	79.45	196.32	114.42		
D	Kenar (K)	66.52	176.79	117.07	1.00	-
	Orta (O)	67.39	188.47	116.66		



Şekil 7. A (a), B (b), C (c) ve D (d) zonlarına ait blokların kenar (K) ve orta (O) kısımlara ait nokta yükü dayanım indeksi değerleri.



Şekil 8. A, B, C ve D zonlarındaki örneklerinin serbest basınç dayanımları.



Şekil 9. A (a), B (b), C (c) ve D (d) zonlarına ait blokların kenar ve orta kısımlara ait serbest basınç dayanımı (UCS) değerleri.

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

A zonunda ıslanma-kuruma, donma-çözülme süreçleri, dalga enerjisi ve baraj suyunun etkisiyle bloklarda yuvarlaklaşma meydana gelmiş ve Fraktal boyut değerleri daha küçük hesaplanmıştır. Bu mekanizma A zonundaki blokların boyutlarının zaman içinde küçülme eğiliminde olduğunu da göstermektedir. A zonunda Schmidt sertlik geri sıçrama değerleri diğer zonlardan belirgin oranda daha düşüktür. Bu durum, devamlı su altında kalan A zonundaki blokların yüzey kısmındaki biyotit ve

feldispat gibi minerallerin daha fazla bozunmaya uğradığının bir göstergesidir. A, B ve C zonlarının V_p değerleri dikkat çekici şekilde D zonundan daha düşük çıkmıştır. Bu da su ile temas eden zonlardaki blokların bozunma süreçlerinden daha çok etkilendiğinin bir ifadesidir.

Riprap bloklarının yoğunluk değerleri $2.57-2.73 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmekte olup, yoğunluğu 2.66 g/cm^3 'ten küçük olan bloklar sulu zonlarda ortam şartlarından daha çok etkilenecek belirgin oranda yoğunluk kayıplarına uğramıştır. Riprap bloklarının görünür gözeneklilik değerleri, A zonunda %0.64-%1.37, B zonunda %0.24-%4.34, C zonunda %0.37-%3.02 ve D zonunda %0.29-%0.61 arasındadır. Blokların ağırlıkça su emme değerleri, A zonunda %0.24-%0.70, B zonunda %0.11-%1.72, C zonunda %0.16-%1.16 ve D zonunda %0.11-%0.62 arasındadır.

A, B ve C zonlarında kenar örneklerinin nokta yükü dayanım indeksleri biraz daha düşük çıkarken D zonunda örneklerinin kenar ve orta örneklerinde değerler birbirine yakın çıkmıştır. Kenar ve orta örneklerine ait serbest basınç dayanımları sırasıyla, A zonunda $93.56-107.30 \text{ MPa}$, B zonunda $77.52-115.23 \text{ MPa}$, C zonunda $87.02-114.42 \text{ MPa}$, ve D zonunda $117.07-116.66 \text{ MPa}$ 'dır. Blokların kenar (UCS_K) ve orta (UCS_O) kısımları arasında dayanım anizotropisini incelemek için UCS_K/UCS_O oranı hesaplanmıştır. Çizelge 4'te açıkça görüldüğü üzere oran A, B ve C zonlarında 1'den oldukça düşük çıkmıştır. Bu da bozunmaya bağlı olarak kenar kısımlarda, orta kısımlara göre daha fazla dayanım kaybının meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca A, B ve C zonundaki UCS değerleri D zonundan belirgin oranda düşük çıkmıştır. D zonuna göre dayanım anizotropisi değeri A zonunda 0.86 , B zonunda 0.83 ve C zonunda 0.86 'dır.

Akçalı ve Arman (2008) tarafından riprap kayaçları için yoğunluk ve serbest basınç dayanımının kabul edilebilir minimum değerleri sırasıyla 2.65 g/cm^3 ve 49.05 MPa , su emme ise maksimum %1.8 olarak verilmiştir. Çalışmada test edilen bloklara ait bahsedilen parametrelerin ortalama değerlerine bakıldığında yukarıdaki sınır şartlarını sağladığı görülmektedir. Ancak A, B ve C zonlarında kuru yoğunluk için minimum değerler sırasıyla 2.66 g/cm^3 , 2.57 g/cm^3 ve 2.62 g/cm^3 olarak kabul edilebilir sınırlardan daha düşük olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde B ve C zonlarındaki minimum UCS değerleri de kabul edilebilir sınır değerlerden daha düşüktür. A zonuna ise sınır değerine çok yakındır. Ancak bu zonda bozulan kenar zonlar dalga etkisiyle aşınarak bloklardan uzaklaştırıldığı için kenar zon örnekleri B ve C zonuna göre göreceli taze örnekler ile yapılmıştır. Bu sebeple minimum UCS değerlerinin B ve C zonlarından biraz daha yüksek elde edildiği düşünülmektedir. Göl suyunun etkisinde bulunmayan D zonuna için parametrelerin tamamı sınır değerlere uygundur. Su emme oranı açısından yine B ve C zonları sırasıyla maksimum %1.72 ve %1.16 değerleri ile sınır değere en yakın zonlar olmuştur. D zonunda ise maksimum %0.62 ile su emme oranı en düşük seviyededir.

Özellikle A, B ve C zonlarındaki bazı bloklar daha yüksek gözeneklilik ve su emme değerlerine sahiptir. Bölgede gerçekleştirilecek ıslanma-kuruma ve donma-çözülme gibi fiziksel olaylar bu blokları daha fazla etkileyecek ve parçalanmalarını ve zayıflamalarını hızlandıracaktır.

7. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminin desteklediği 2014 MMF/A83 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmamıza destek olan DSİ 123. Şube (Yozgat) Müdürü Avni YILMAZ ve harita teknikeri Mustafa ATİK'e teşekkürlerimizi sunarız.

8. KAYNAKLAR

- Acır, Ö., 2007. Doğu Karadeniz Limanlarında Anroşman Olarak Kullanılan Bazaltların Kalite ve Dayanıklılığının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yayımlanmamış), Ankara.
- Ahrens, J.P., 1981. Design of Riprap Revetments for Protection Against Wave Attack. Technical paper no: 81-5, U.S Army, Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center, Kingman Building.

- Arel, E., Tugrul, A., 2001. Weathering and its relation to geomechanical properties of Çavuşbaşı granitik rocks in Northwestern Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60:123–133.
- Akçalı, E. ve Arman, H., 2008. Baraj Dolgularında Kullanılan Doğal Malzemenin Seçim Kriterleri ve Limit Aşımının Doğuracağı Tehlikeler, DSİ Teknik Bülteni, Sayı 103, 1-9.
- Akçay, A.E., Dönmez, M., Kara, H., Yergök, A.F., Esentürk, K., 2008. Türkiye Jeoloji Haritaları, Yozgat İ-34 Paftası, MTA.
- ASTM, 2002. Standard test method for unconfined strength of intact rock core specimens. ASTM Standard D2938-95.
- Baykan, N.O., Saf, B., 2004. “Barajların yıpranma ve elden çıkma nedenleri ile güvenlik sınamaları”, 1. Ulusal Barajlar ve HES Sempozyumu, DSİ Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, Sayfa 395-401, Ankara.
- Bell, F.G., 2004. *Engineering Geology and Construction*. Spone Press, USA, 797p.
- Biswas, A.K., Chatterjee, S., 1971. Dam Disasters- An Assesment. *Engineering Journal (Canada)*, Vol. 54, No. 3, pp.3-8.
- Cetin, H., Laman, M., and Ertunç, A., 2000. Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Atatürk Dam in Turkey. *Engineering Geology*, 56 (3-4): 225-242.
- Coduto, D.P., 1998. *Geotechnical Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 759 p.
- DSİ, 1979, Delice Irmak Projesi, Gelingüllü Barajı Proje Aşaması Doğl Yapı Gereçleri Araştırma Raporu.
- Erguler, Z. A., Shakoor, A., 2009. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. *Engineering Geology*, 108:36-42.
- Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Harris I., 2007. Predicting long term freeze–thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Sci Total Environ* 377 (2):273–281.
- Heidari, H., Khanlari, G.R., Momeni, A.A., 2010. Weathering indices and its relation to uniaxial compressive strength of Hamedan hololeucogranite rocks in west of Iran. *World Applied Sciences Journal*, 11 (2): 142-150.
- Irfan, T.Y., 1994. Mineralogy and fabric characterization of weathered granitic rocks in Hong Kong. Geo Report no: 41. Geotechnical Engineering Office, Civ. Eng. Dep. Hong Kong.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay R, Hudson JA (eds) *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*. International Society for Rock Mechanics (ISRM), Ankara.
- Kaş, İ., Yıldız, E., 2002. Toprak Baraj Dolgusu Üzerinden Suların Savaklanması Durumunda Kullanılan Gövde Koruma Metotları, Türkiye Mühendislik Haberleri, 420-421-422.
- Kolay, E., Kayabalı, K., 2005. Agregaların köşeliliğinin ve pürüzlülüğünün belirlenmesinde fraktal boyut yönteminin kullanılması. *Yerbilimleri*, 26(2): 49-61.
- Latham, J.P., 1998. Assesment and specification of armourstone quality: from CIRIA/CUR (1991) to CEN (2000). In: *Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation*. *Engineering Geology*, Special Publication No: 13. Latham, J.P (ed.), The Geological Society, London, 91-106.
- Lienhart, D.A., 1988. The geographic distribution of intensity and frequency of freeze–thaw cycles. *Environmental & Engineering Geoscience*, 25(4): 465–469.
- Rahn, P.H., 1996. *Engineering Geology*. Prentice-Hall, New York.
- Takarlı, M., Prince, W., Siddique, R., 2008, Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw condition. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45, 1164–1175.
- Thorne, C.R., Abt, S.R., Batends, F.B.J., Maynord, S.T. and Pilarczyk, K.W., 1995. *Coastal and Shoreline Portection*, Wiley, Chichester.
- Topal, T., Sozmen, B., 2003. Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument. *Engineering Geology*, 68: 201–223.
- Zhang, S.J., Lai, Y.M., Zhang, X.F., Pu, Y.B., Yu, W.B., 2004. Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze–thaw cycle condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19: 295–302.

Yazar İndeksi / Author Index

- Aboubacar, M.H. 253
Akbulut Camuzcuoğlu, C. 158
Akgün, A. 74, 82, 300
Akkaya, İ. 208
Akkuş, Ç. 12
Akyüz, H.S.164
Alptekin, A. 200
Altuntaş, A.27
Anrı, O. S. 58
Ata, E. 164
Atay, M.Ö. 338
Aydan, Ö. 143
Balaban, B. 127
Becer, M. M. 111, 127
Belen, M. 277
Beyaz, T. 43
Binal, A. 324
Bor, M. 208
Bozkurtoğlu, E. 164
Bulut, F. 179
Bulut, İ. 135
Coruk, Ö. 27, 239
Çan, T. 103, 111, 119
Çetin, H. 261, 277
Çobanoğlu, B. C. 245
Dizdar, M. 96
Duman, T. 103
Er, S. 316
Erdeve Özvan, E. 208
Erdoğan, M. 164
Erenson, C. 330
Erik, D. 172
Ersoy, H. 74, 82, 194, 224, 300
Gök, M. 5
Güler, C. 158
Günaydın, O. 12
Gürsel, E. 330
Habibzadeh, F. 35, 43
Hiçyılmaz, D. 186
Işık, N.S. 269
İşseven, T. 164
Kadakçı Koca, T. 216
Karagüzel, R. 164
Karahan, M. 74, 82, 194, 224, 300
Karakaya, S. 135
Kasapoğlu, K.E.269
Kaya, A. 179
Kayabalı, K. 35, 43
Kesimal, A. 231
Keskin, G. 308
Kılıç, R. 285
Koca, M.Y. 216
Kolay, E. 338
Koşaroğlu, S. 172
Kömürlü, E. 231
Kul Yahşi, B. 224
Kumsar, H. 143
Küçükdöngül, A. 135
Mahmutoğlu, Y. 50, 58, 164
Mutlutürk, M. 186
Nefeslioğlu, H.A. 5
Özcan, A. K. 135
Özmen, I. E. 58
Özvan, A. 208
Peker, S. 74
Pınarcı, E. 261, 277
Sayın, E. 127
Solak, K.C. 66
Sünnetci, M.O. 74, 194, 224
Şans, G. 164
Şentürk, C.H. 20
Taflan, A. 74, 300
Tağa, H. 88, 200
Tapan, M. 208
Taştekin, C. 164
Tekin, S. 111, 119
Temiz, R. 285
Tezel, K. 82
Tuğrul, A. 316
Tuncay, E. 66
Turgut, A. 269
Ulamış, K. 285
Ulusay, R. 66
Ural, S. 261
Ünal, M.Ö. 292
Ündül, Ö. 245
Üstüner, H. 96
Vardar, M. 1
Yavuz, A.B. 253
Yazıcı, O. 194
Yemenici, B. 239
Yeşilkaya, Z. 58
Yıldız, C. 151
Yılmaz, D. 35, 43
Zorlu, K. 35, 43



Kara Sondajları



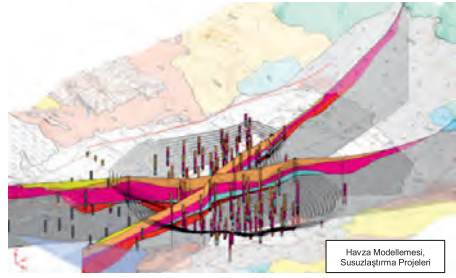
Sığ Deniz Sondajları



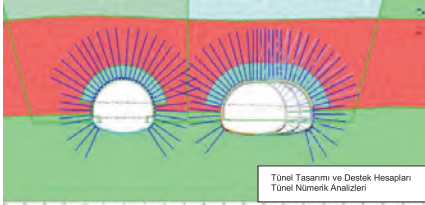
Derin Deniz Sondajları



Akifer Fay Kazıları



Havza Modellemesi,
Susuzlaştırma Projeleri



Tünel Tasarımı ve Destek Hesapları
Tünel Numarık Analizleri



CPT Deneyi

HİZMET ALANLARI

Jeolojik, Jeoteknik ve Jeomorfolojik Araştırmalar

- Baraj ve hidroelektrik santralleri
- Nükleer enerji santralleri
- Karayolu ve demiryolu güzergahları
- Karayolu, demiryolu ve su temin tünelleri
- Köprüler ve viyadükler
- Atık depolama tesisleri
- Boru hatları
- Altyapı projeleri
- Maden ocak ve tesisleri
- Jeotehlike etüt ve önlemleri

Hidrojeolojik Araştırmalar

- Havza bazında hidrojeolojik planlama
- Maden saha ve tesisleri için su temini
- Susuzlaştırma

Tünel Tasarımı

- Karayolu, demiryolu ve su tünelleri için jeoteknik modelleme
- FLAC 3D, PLAXIS ve PHASE 2D kullanarak sayısal modelleme
- Kazı ve iksa tasarımı

Jeoteknik / Geoteknik Tasarım İşleri

- Dolgu ve temel zemin iyileştirme
- Şev stabilitesi önlemleri
- Jeoteknik deprem mühendisliği hizmetleri
- FLAC 3D Dynamic kullanarak Zemin yapısal etkileşim analizleri

Sondaj, CPT, Jeofizik Etüt ve Yerinde Deneyler

- Kara sondajları
- Deniz sondajları
- Batimetrik etütler
- 2B / 3B yüksek çözünürlüklü jeofizik etütler ve GPR
- Havadan ve karadan LİDAR etütleri

Deprem Mühendisliği

- Sismoteknik modelleme çalışmaları
- Karada ve denizde jeolojik araştırmalar
- Jeolojik ve jeomorfolojik haritalama
- Paleosismolojik araştırmalar, hendek açılması
- Deterministik ve olasılıksal sismik tehlike analizleri
- Deprem tehlike analizleri
- Sivilaşma analizleri
- Dinamik zemin-yapı etkileşim analizleri
- Zemin iyileştirme ve tesis tasarım parametreleri danışmanlığı

"Su Gibi Aziz, Kaya Gibi Sağlam"



SUMER



► SÜMER MÜHENDİSLİK İNŞ. TİC. VE SAN. LTD. ŞTİ.
Merkez Ofis İSTANBUL
Çamlık mah. Şenel Güneş Biv. Kıran Apt. No:46 Kat:5 D:11 Ümraniye / İSTANBUL
Teli: 0216 594 7650 Faks: 0216 594 7209 E-Mail: sumer@sumermuhendislik.com.tr
GAZIANTEP ŞUBE OFİSİ
Emek Mah. Şehiye Taşgözü Sk. Bilgi Apt. No:18-A Şahkamil / GAZIANTEP
Tel: 0342 321 9852 Faks: 0342 321 9898

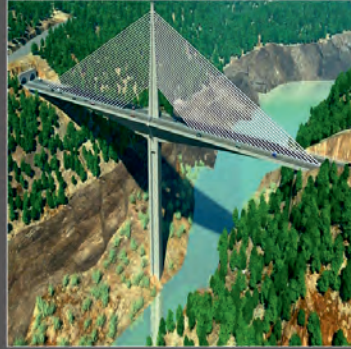
► LOGISTIC CENTER - 1
Çaşırtıp Ödemiş: Balı Çukçu (Göller Yanı)
E-Mail: logistic@sumermuhendislik.com.tr
LOGISTIC CENTER - 2
Ebaan (Gölcük) / İSTANBUL
E-Mail: logisticistanbul@sumermuhendislik.com.tr

Çevreye ve insana Duyarlı



Environmentally Responsible

www.sumermuhendislik.com.tr



TTS MÜHENDİSLİK
ENGINEERING
"Tremendous Technical Solutions"

SOİLTEKNİK

ETÜT MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK İNŞAAT VE TİCARET A. Ş.



MARKA	MODEL	YIL	KAPASİTE
SANNY	XCHS60	2016	60 ton
JINTAI	SD28W	2016	280 kNm
LEIBHERR	Lb28	2011	286 kNm
CASSAGRANDE	B180 HD	2008	180 kNm
COMACCHIO	MC 15	2015	1.3/2.0 daNm
CASSAGRANDE	C6	2010	1.8 ton-m-tork
CASSAGRANDE	C6	2003	1.2 ton-m-tork
TECHNIWELL	TW 352	2010	650 bar
TECHNIWELL	TW 352	2010	650 bar
TECHNIWELL	TW 400	1999	650 bar
TECHNIWELL	TWM 20	2010	20 m/saat
TECHNIWELL	TWM 20	2010	20 m/saat
TECHNIWELL	TWM 20	1999	20 m/saat
CASSAGRANDE	M3D	2001	45 kw
SONDAJ MAK.	HİDROLİK		500 m
PRESİYOMETRE	MENARD	2010	
INKLONOMETRE	RST	2011	50 m/0,5 m prob



Cemalpaşa Mah. Fuzuli Cad. 63015 Sk. Gülsa Apt. No:1/A Seyhan/ADANA

Tf: 0322 458 25 88 Fax: 0322 459 25 88 e-pasta:info@soilteknik.com web: www.soilteknik.com

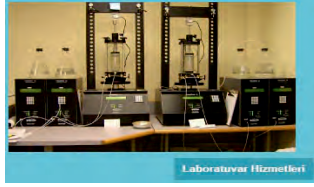


Alfa

Yapı ve Zemin Mekazi Laboratuvar



Jeolojik Arazi Çalışmaları



Laboratuvar Hizmetleri



Kentsel Dönüşüm ve Proje Merkezi



Gürselpaşa Mahallesi 75492 Sok. Akgül 14 Sitesi No: 4/A Seyhan / ADANA

Tel/Fax:0(322) 232 22 00-0 (322) 232 20 80

www.alfazemin.com.tr alfa@alfazemin.com



TÜMAŞ
TÜRK MÜHENDİSLİK MÜŞAVİRLİK VE MÜTEAHHİTLİK A.Ş
BÜTÜNLEŞMİŞ BİR MÜHENDİSLİK MÜŞAVİRLİK ŞİRKETİ



- ✦ Master Planlar
- ✦ Fizibilite Etüdüleri
- ✦ Jeodezi ve Topografik Çalışmalar
- ✦ Temel ve Detay Mühendislik Hizmetleri
- ✦ İhale Dokümanlarının Hazırlanması
- ✦ İhale ve Sözleşme Aşaması Teknik Destek Hizmetleri
- ✦ Proje ve Sözleşme Yönetimi
- ✦ Satın Alma Hizmetleri
- ✦ İnşaat ve Saha Kontrollük Hizmetleri
- ✦ Deneme ve İşletmeye Alma Hizmetleri
- ✦ Kurumsal Güçlendirme Çalışmaları
- ✦ Güçlendirme Proje Hizmetleri

TÜMAŞ 1969 YILINDAN BUGÜNE
PROJE, MÜHENDİSLİK VE MÜŞAVİRLİK HİZMETLERİNİZDE...



ANKARA MERKEZ OFİSİMİZ

Tunus cad. No:43 06680 Kavaklıdere/ANKARA - TÜRKİYE
Tel: +90 (312) 417 60 25 (Pbx) - 417 02 38 - 417 02 42
Faks: +90 (312) 417 02 41 - 417 54 76
E-mail: tumas@tumas.com.tr

İSTANBUL-AVRUPA OFİSİMİZ

Avcılar Sok. Şenlik Mah.
No:40/A
Florya/ İSTANBUL
Tel: +90 (212) 663 93 10
Faks: +90 (212) 663 93 12
E-mail: florya@tumas.com.tr

PROJELERİMİZ

ADANA - KOZAN YOL ÇALIŞMASI



ADANA-MERSİN HIZLI TREN PROJESİ



İSTANBUL-KADIKÖY / YENİTEPE PROJESİ



ANKARA / CUBES PROJESİ



İZMİR / MARİNERA ÇEŞME PROJESİ



İSTANBUL AKVARYUM



İSTANBUL FLORYA CROWNE PLAZA



KAZAKİSTAN / PRİME PLAZA





ARHAL
ARHAL İNŞAAT ve
TİC. LTD. ŞTİ.

Recep ARSLAN
Yusuf HALDIZOĞLU


MyCAR
car rental services
MAY CAR TURİZM ORGANİZASYON HİZM. TİC. LTD. ŞTİ.



HB

H. BİLGE AKDOĞAN

DORSE / DAMPER / NAKLİYAT /

İNŞAAT SAN. TİC. LTD. ŞTİ

www.hbainsaat.com

Traverten

hayatınıza değer katan
doğal bir güzelliştir.



KÖMÜRÇÜOĞLU MERMER TARIM ÜRÜNLERİ SAN. VE TİC. A.Ş.
Pamukale yolu 4 km Kömürçüoğlu Cad. Körucuk Mah. No:10
Denizli / TÜRKİYE • E-mail: traverten@komurcuoglu.com.tr
Tel: 0090 258 279 21 32 - 33 - 36 • Fax: 0090 258 279 23 02

www.traverten.com.tr



ZEMKA ADANA 124
MERSİN 181

**ZEMİN MEKANİĞİ VE YAPI MALZEMELERİ
KALİTE KONTROL LABORATUARI**

Doğru Yere, Doğru İnşaat



THE TOWER PROJECT



World's tallest building with deep barrette foundations by Soletanche Bachy & Zetaş, Dubai, UAE.



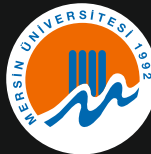
ZETAŞ[®]
ZEMİN TEKNOLOJİSİ A.Ş.

Reşadiye Cad. No: 69/A 34794
Alemdağ - Çekmeköy - İstanbul / Türkiye
Tel: 0216 430 06 00 Faks: 0216 484 41 74
www.zetas.com.tr

MÜHJEO'2017

Ulusal Mühendislik
Jeolojisi ve Jeoteknik
Sempozyumu

National
Symposium on
Engineering
Geology and
Geotechnics



Çukurova Üniversitesi
Çukurova University
Mithat Özsan Amfisi
Mithat Özsan Hall

