

Jeoloji Mühendisliği Dergisi / Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 43

Sayı - Number 2

Aralık / December 2019

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

- 155- Araştırma Makalesi / Research Article
Serkan USLU, Mehmet Yalçın KOCA
Determination of the Deformability, Modulus Ratios and Anisotropic Behavior of the Micascists; A Case Study From Burgaz Dam Site, İzmir-Turkey
Mikaşistlerin Deformabilite, Modül Oranı ve Anizotropik Davranışlarının Belirlenmesi; Burgaz Baraj Sahasından (İzmir-Türkiye) Örnek Bir Çalışma
- 187- Araştırma Makalesi / Research Article
Aycan KALENDER, Harun SÖNMEZ
Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Karayolu) Bölgesinin Kaya Düşmesi Duyarlılığının İnsansız Hava Aracı (İHA) Görüntüleri Kullanılarak Konik Yayılım Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi
Evaluation of Rockfall Susceptibility of Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Highway) Region by Cone Propagation Approach Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images
- 211- Araştırma Makalesi / Research Article
Mutluhan AKIN, İsmail DİNÇER, Ahmet ORHAN, Ali Özgün OK, Müge K. AKIN, Tamer TOPAL
Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği
Evaluation of the Performance of a Rockfall Ditch by 3-Dimensional Rockfall Analyses: Akköy (Ürgüp) Case
- 233- Araştırma Makalesi / Research Article
Ali KAYABAŞI
Kaya Modülleri Arasında Farklılıklar: Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman Barajlarından Örnek Çalışmalar
Differences Between Rock Modules: Case Studies From Deriner/Artvin and Ermenek/Karaman Dams
- 259- Araştırma Makalesi / Research Article
Sinem ERİŞİŞ, Atiye TUĞRUL, Selman ER, Murat YILMAZ
Bazaltik Kayaların Bileşim ve Dokusal Özelliklerinin Mekanik Davranışlarına Etkisi
Effect of Composition and Textural Properties of Basaltic Rocks on Their Mechanical Behaviour
- 279- Araştırma Makalesi / Research Article
Can BAŞARAN, Ahmet YILDIZ, Merve Şenel CİĞERCİ
İscehisar (Afyonkarahisar) Termal ve Mineralli Sularının Hidrojeokimyası ve Kullanım Özellikleri
Hydrogeochemistry and Application Characteristics of İscehisar (Afyonkarahisar) Thermal and Mineral Waters

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 43

Sayı - Number 2

ISSN 1016 - 9172

Aralık / December 2019



TMMOB JEOLojİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey

EDİTÖR / EDITOR

Tamer TOPAL
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06531, Ankara
Tel: 0 312 210 26 90
Faks: 0 312 210 57 50
E-Posta: topal@metu.edu.tr

TEKNİK EDİTÖR / TECHNICAL EDITOR

Müge AKIN
Abdullah Gül Üniversitesi
Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü
Sümer Kampüs 38080
Kocasinan /KAYSERİ
E-posta : muge.akin.jmd@gmail.com

Makale Gönderim Adresi:

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası
PK. 464 Yenişehir, 06410 Ankara
Tel : (0312) 434 36 01
Faks : (0312) 434 23 88
E-Posta : jmo@jmo.org.tr
URL : www.jmo.org.tr

Yayın Türü: Yaygın Süreli Yayın**Yayın Şekli:** Yılda 2 kez (6 ayda bir)
Türkçe ve İngilizce**Yayın Sahibi:** TMMOB JMO Adına

Hüseyin ALAN

Yayının İdare Adresi: Kocatepe Mah.

Hatay 2 Sokak No: 21 Kocatepe/Ankara

Baskı: ERS Matbaacılık,
Kazım Karabekir Cad. Altıntop İşhanı
No:87/7 İskitler/Ankara
Tel : (0312) 384 54 88
Baskı Tarihi : Aralık 2019
Baskı Adedi : 500

Yayın Kurulu / Editorial Board

Mutluhan AKIN (Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi)
Erhan ALTUNEL (Osman Gazi Üniversitesi)
Serdar BAYARI (Hacettepe Üniversitesi)
Zeki ÇAMUR (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)
Özcan DUMANLILAR (Demir Export)
Nusret EMEKLİ (İller Bankası)
Murat ERCANOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)
Nazan Yalçın ERİK (Cumhuriyet Üniversitesi)
Ünsal GEMİCİ (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Candan GÖKÇEOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)
Reyhan Kara GÜLBAY (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Nilgün GÜLEÇ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Leyla KALENDER (Fırat Üniversitesi)
Remzi KARAGÜZEL (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Nurkan KARAHANOĞLU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Ali KAYABAŞI (Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi)
Recep KILIÇ (Ankara Üniversitesi)
Mehmet Yalçın KOCA (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Ayhan KOÇBAY (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü)
Halil KUMSAR (Pamukkale Üniversitesi)
Yılmaz MAHMUTOĞLU (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Harun SÖNMEZ (Hacettepe Üniversitesi)
Mehmet Lütfi SÜZEN (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Gültekin TARCAN (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Atiye TUĞRUL (İstanbul Üniversitesi)
Dilek TÜRER (Hacettepe Üniversitesi)
Necdet TÜRK (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Asuman TÜRKMEÑOĞLU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Taner ÜNLÜ (Ankara Üniversitesi)
Hasan YAZICIGİL (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Koray YILMAZ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Ali Bahadır YAVUZ (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Jeoloji Mühendisliği Dergisi makale ve dizin özleri
SCOPUS, ULAKBİM, GeoREF, Geobase/Geo Abstracts, EBSCO ve Cabell
uluslararası indeksleri tarafından taranmaktadır.

Journal of Geological Engineering is indexed and abstracted by
SCOPUS, ULAKBİM, GeoREF, Geobase/Geo Abstracts, EBSCO and Cabell

Jeoloji Mühendisleri Odası
Chamber of Geological Engineers
Yönetim Kurulu / Executive Board

Hüseyin ALAN
Yüksel METİN
Faruk İLGÜN
D. Malik BAKIR
M. Emre KIBRIS
Gonca ŞAHİN
Buket YARARBAŞ ECEMİŞ

Başkan / *President*
İkinci Başkan / *Vice President*
Yazman / *Secretary*
Sayman / *Treasurer*
Mesleki Uygulamalar Üyesi / *Member of Professional Activities*
Sosyal İlişkiler Üyesi / *Member of Social Affairs*
Yayın Üyesi / *Member of Publication*

Jeoloji Mühendisliği Dergisi JMO yayını olup para ile satılmaz.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi / Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 43

Sayı - Number 2

Aralık / December 2019

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

155- Araştırma Makalesi / Research Article

Serkan USLU, Mehmet Yalçın KOCA

Determination of the Deformability, Modulus Ratios and Anisotropic Behavior of the Micaschists; A Case Study From Burgaz Dam Site, İzmir-Turkey

Mikaşistlerin Deformabilite, Modül Oranı ve Anizotropik Davranışlarının Belirlenmesi; Burgaz Baraj Sahasından (İzmir-Türkiye) Örnek Bir Çalışma

187- Araştırma Makalesi / Research Article

Aycan KALENDER, Harun SÖNMEZ

Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Karayolu) Bölgesinin Kaya Düşmesi Duyarlılığının İnsansız Hava Aracı (İHA) Görüntüleri Kullanılarak Konik Yayılım Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi

Evaluation of Rockfall Susceptibility of Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Highway) Region by Cone Propagation Approach Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images

211- Araştırma Makalesi / Research Article

Mutluhan AKIN, İsmail DİNÇER, Ahmet ORHAN, Ali Özgün OK, Müge K. AKIN, Tamer TOPAL

Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği

Evaluation of the Performance of a Rockfall Ditch by 3-Dimensional Rockfall Analyses: Akköy (Ürgüp) Case

233- Araştırma Makalesi / Research Article

Ali KAYABAŞI

Kaya Modülleri Arasında Farklılıklar: Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman Barajlarından Örnek Çalışmalar

Differences Between Rock Modules: Case Studies From Deriner/Artvin and Ermenek/Karaman Dams

259- Araştırma Makalesi / Research Article

Sinem ERİŞİŞ, Atiye TUĞRUL, Selman ER, Murat YILMAZ

Bazaltik Kayaların Bileşim ve Dokusal Özelliklerinin Mekanik Davranışlarına Etkisi

Effect of Composition and Textural Properties of Basaltic Rocks on Their Mechanical Behaviour

279- Araştırma Makalesi / Research Article

Can BAŞARAN, Ahmet YILDIZ, Merve Şenel CİĞERCİ

İscehisar (Afyonkarahisar) Termal ve Mineralli Sularının Hidrojeokimyası ve Kullanım Özellikleri

Hydrogeochemistry and Application Characteristics of İscehisar (Afyonkarahisar) Thermal and Mineral Waters

Determination of the Deformability, Modulus Ratios and Anisotropic Behavior of the Micaschists; A Case Study From Burgaz Dam Site, İzmir-Turkey

Mikaşistlerin Deformabilite, Modül Oranı ve Anizotropik Davranışlarının Belirlenmesi; Burgaz Baraj Sahasından (İzmir-Türkiye) Örnek Bir Çalışma

Serkan USLU¹  Mehmet Yalçın KOCA² 

¹Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 35160, Buca-Izmir, Turkey

²Dokuz Eylül University, Eng. Faculty, Geol. Eng. Depart., 35160, Buca-Izmir, Turkey

Geliş (Received): 07 Mayıs (May) 2019, Düzeltme (Revised): 05 Temmuz (July) 2019, Kabul (Accepted): 15 Ağustos (August) 2019

ABSTRACT

Base rock of the Burgaz dam in the eastern part of the city of İzmir consists of micaschists having different physical and mechanical properties due to weathering and fracturing. The first aim is to compute the amount of settlement and ultimate bearing capacity value of micaschist both in and beneath the cutoff zone by using the results of pressuremeter tests. In addition, data from in-situ and some laboratory tests, which were used in the establishment of the relations between elastic modulus of the micaschist rock mass (E_M) and uniaxial compressive strength (σ_c), E_M/E_{intact} ratios and RQD values. Comparison of in-situ and estimated rock mass deformation moduli by considering the RQD values was also performed. Pressuremeter tests indicate that for a dam with 115 m height and a base width of 58 m, the settlement will vary between 2.13 and 2.26 mm. The second aim of this work is to measure compression and shear wave velocities in order to obtain both the ratio of dynamic elastic modulus to Poisson's ratio $(E/\nu)_{dynamic}$ and to compare $(E/\nu)_{dynamic}$ to $(E/\nu)_{static}$. Test results reveal a positive linear relation of $(E/\nu)_{dynamic} = (E/\nu)_{static} \cdot 0.968$. The sonic wave velocity of the micaschist is highly related to the testing direction. This study not only discusses the relationships between E_{static} and sonic wave velocity (V_p) and $E_{dynamic}$, but also the anisotropy effect arisen due to the schistosity planes with different orientations.

Keywords: Dam Structure, Micaschist, Pressuremeter Test, Settlement, Rock Material Classification, Anisotropy.

ÖZ

İzmir'in doğusunda yeralan Burgaz barajının temel kayacını ayırma ve kırılma nedeniyle farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip mikaşistler oluşturur. Bu çalışmanın birinci amacı, presiyometre deneylerinin sonuçlarını kullanarak hem cutoff zonunda hem de altında yeralan mikaşistlerin nihai taşıma güçlerini ve oturma miktarlarını hesaplamaktır. Buna ek olarak, bazı laboratuvar ve yerinde deneylerden elde edilen veriler, mikaşist kayaç kütlelerinin elastisite modülü (E_M) ve sağlam kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c), E_M/E_i , oranları ve RQD değerleri arasındaki ilişkilerin kurulmasında kullanılmıştır. Mikaşist kayaç kütlelerinin yerinde ölçülmüş elastisite modülü değerleriyle, RQD değerlerini dikkate alan tahmin edilmiş elastisite modülü değerleri karşılaştırılmıştır. Presiyometre

deney sonuçları, 58 m taban genişliğine ve 115 m yüksekliğe sahip bir baraj için oluşacak oturmaların 2.13 mm ile 2.26 mm arasında değişeceğine işaret etmektedir. Bu çalışmanın ikinci amacı; ultrasonik dalga hızlarından (V_p ve V_s) yararlanarak dinamik elastisite modülünün (E_{dyn}) Poisson oranına (ν) olan oranını, $(E/\nu)_{dyn}$ belirlemek ve $(E/\nu)_{dyn}$ ile $(E/\nu)_{statik}$ oranlarının karşılaştırılmasını yapmaktır. Deney sonuçları pozitif lineer bir ilişki vermiştir; $(E/\nu)_{dyn} = 0.968 (E/\nu)_{statik}$. Mikaşistlerin sonik dalga hızının deney yönüyle oldukça ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma sadece E_{statik} ve sonik dalga hızı ilişkilerini tartışmaz, farklı konumlara sahip şistozite düzlemleri nedeniyle mikaşistlerde artan anizotropi etkisini de ele alır.

Anahtar Kelimeler: Baraj yapısı, Mikaşist, Presiyometre deneyi, Oturma, Kaya Materyali Sınıflaması, Anizotropi.

INTRODUCTION

Burgaz dam is a rock-fill dam constructed on Falaka River about 1 km north of Zeytinova town located in the Bayındır region of İzmir Province (Figure 1). The purpose of the dam is to supply irrigation water for a total land area of 35.68 km². The dam reservoir, which has a height of 115 m from the river bed and the dam body fill volume of 4.25 million m³, is purposed to have the water storage capacity of 33 million m³. Base rock of the Burgaz dam consists of micaschists. The behaviour of the micaschist rock mass is governed by the deformability of the base rock beneath the dam. The base rock of the dam must resist approximately 2 MPa total stress applied by the weight of dam itself and the strength of the rock must be sufficiently high because heavy pressures on the foundation of the dam will occur. This work gives the information on some physical and mechanical properties of the foundation rock beneath the dam structure, and about the settlement and bearing capacity values of the foundation rock. The design of the dam was based on these tests. Our study including a comprehensive investigation will hence be the first on the micaschists of the Menderes Massive in Turkey from the engineering geological point of view.

The values of elastic modulus (E_M) representing the micaschist rock mass were obtained from Menard pressuremeter tests (MPT) and these values were used in settlement and bearing capacity analyses. Comparison of in-situ and estimated rock mass deformation moduli by considering the RQD values is performed in this

study. Comparison of the intact rock parameter such as E_i with those derived from in-situ tests is important in terms of the determination of relevant parameters for the dam design. Rock mass deformation modulus estimation by correlations considering RQD value has been performed since Coon and Merritt (1970). The correlations have included RQD (Gardner, 1987; Kayabasi et al., 2003; Zhang and Einstein, 2004; Kincal and Koca, 2019). The estimated ratios considering the RQD values and in-situ ratios (E_{MPT}/E_i) based on the pressuremeter test results (E_{MPT}) and laboratory deformability tests are also compared. This comparison will indicate whether the elastic modulus representing the micaschist rock mass, which was used in the settlement analyses, is suitable, or not. On the other hand, the relationship between E_M and uniaxial compressive strength (σ_c) values is also investigated for the same purpose mentioned above in this study. Rowe and Armitage (1984) related the rock mass deformation modulus (E_M) for weak rocks deduced from a large number of field tests, and it was found as follows; $E_M = 0.215 \times \sqrt{\sigma_c}$, where σ_c is in MPa.

Another aim of this work is to obtain some strong correlations among sonic velocity and porosity, UCS and static modulus for the micaschists of the Menderes Massive. Empirical equations were then developed to predict the UCS, dynamic elastic modulus and dynamic Poisson's ratio based on the ultrasonic wave velocities. In order to determine the static modulus of the micaschist rock material, there are two ways proposed in this study; one of these

is to utilize from dynamic elastic modulus (E_{dyn}) and another one is from V_p . This paper is also intended to establish a relation between static and dynamic elastic moduli of the micaschist rock material as well as the relationship between static modulus (E_{static}) and V_p . The relationships between static and dynamic moduli and P-wave velocity were investigated by various authors in related literature (Eissa and Kazi, 1988; Heap et al., 2014; Najibi et al., 2015; Brotons et al., 2014; 2016).

UCS tests were performed with strain gauges and the values of static elasticity modulus (E_{static}) and Poisson's ratio were determined from the stress-strain curves. Thus, empirical equations were also obtained between the UCS values and E_{static} and $(E/\nu)_{\text{static}}$ and $(E/\nu)_{\text{static}}$ and $(E/\nu)_{\text{dynamic}}$. These relationships mentioned above have been presented in the literature since Deere and Miller, 1966; Lama and Vutukuri, 1978; Al-Shayea, 2004; Uslu, 2017; Kadakçı Koca and Koca, 2018). Such correlations may provide a good estimation in some related engineering works. Correlations between sonic velocity, UCS and other physical properties and static modulus are important in terms of providing correct information for future exploration in the same or close areas, since a number of dams are planned to be built on the same schistous units belonging to the Menderes Massive in Aegean region by the General Directorate of State Hydraulic Works.

A comprehensive understanding of the anisotropy effect is necessary for a reliable design of engineering project such as dam construction (Behrestaghi et al., 1996; Singh et al., 2001; Nasser et al., 2003). For this reason, P-wave velocity (V_p) measurements and compression tests were performed on the core specimens with different schistosity plane orientations. A review of the aforementioned work indicates that the maximum failure strength is either at $\alpha = 0^\circ$ or $\alpha = 90^\circ$ and the minimum value usually is around

$\alpha = 30^\circ$. The shape of the curve between UCS (σ_c) and α - angle reflects the anisotropy effect on the rock. In this work, loading was vertically applied on the core specimens with different schistosity plane orientations ($\alpha = 0 - 3^\circ$, $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$, and $\alpha = 90^\circ$). In addition, the relationship between UCS and sonic wave velocity was investigated previously in the literature for various rock types (Mc Cann et al., 1990 in Entwistle et al., 2005; Gupta and Seshagiri Rao, 1998; Sharma and Singh 2008; Andrade and Saraiva 2010). In this paper, a large number of ultrasonic pulse velocity tests were conducted on the micaschist intact core specimens obtained from ASK-1 borehole drilled in the Burgaz dam site.

GEOLOGY OF BURGAZ DAM SITE

Metamorphic rocks located in and nearby the Burgaz dam site have a simple tectonostratigraphy that consists of Paleozoic cover series and Pre-Cambrian core series which tectonically overlaid the cover series (Figure 1). Core series consist of homogenous garnet micaschists. Mineral composition of the garnet micaschist can be given as garnet-biotite-muscovite-plagioclase-quartz with accessory minerals of rutile, apatite and zircon. This rock contains 40% feldspar, 30% quartz, 20% mica (biotite+muscovite), 4 - 5% garnet and 1 - 2% other constituents. They display well developed lepidoblastic texture (Figure 2). The light brown color and weak schistosity are macroscopically characteristic features to recognize the schists at the Burgaz dam site.

Core samples obtained from the ASK-1 borehole have been examined petrographically. In the schist specimens, the interlocking fabric is created by the parallel to the sub-parallel arrangement of large platy minerals such as feldspar, mica, and quartz (Figure 2). In particular, strongly weathered schists tend to split into planes due to parallel orientation of

microscopic grains of mica, feldspars, quartz or other platy minerals (Figure 2). Traces of chemical decomposition such as discolouration with the alteration along linear elements were observed during the microscopic analyses of thin sections. The occurrence of defects which

developed in the micaschists mechanically are sensitive along the entire length of the crystal rims. The defects include microfractures and mineral cleavages. As is to be expected, defects influence the ultimate strength of the micaschists and act as surface of weakness.

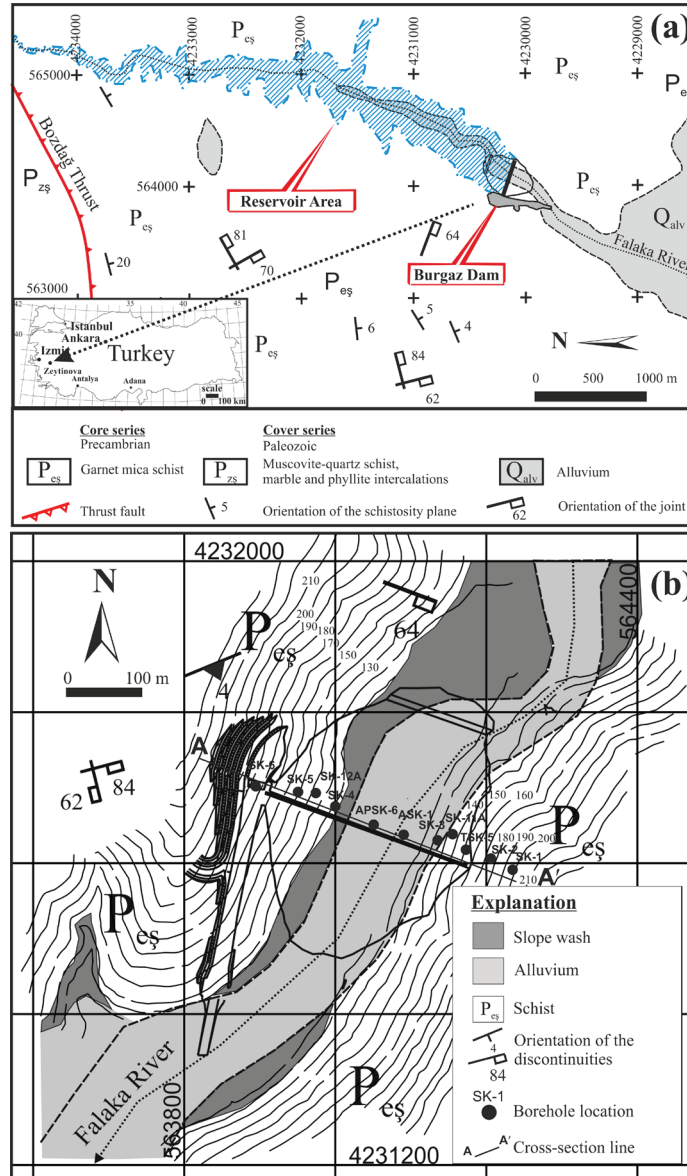


Figure 1. (a) Location and geological map of the Burgaz Dam Site and its nearby, (b) Geological map of the Burgaz dam site.

Şekil 1. (a) Burgaz Baraj Alanı ve yakın yöresinin lokasyonu ve jeoloji haritası, (b) Burgaz Baraj yeri jeoloji haritası.

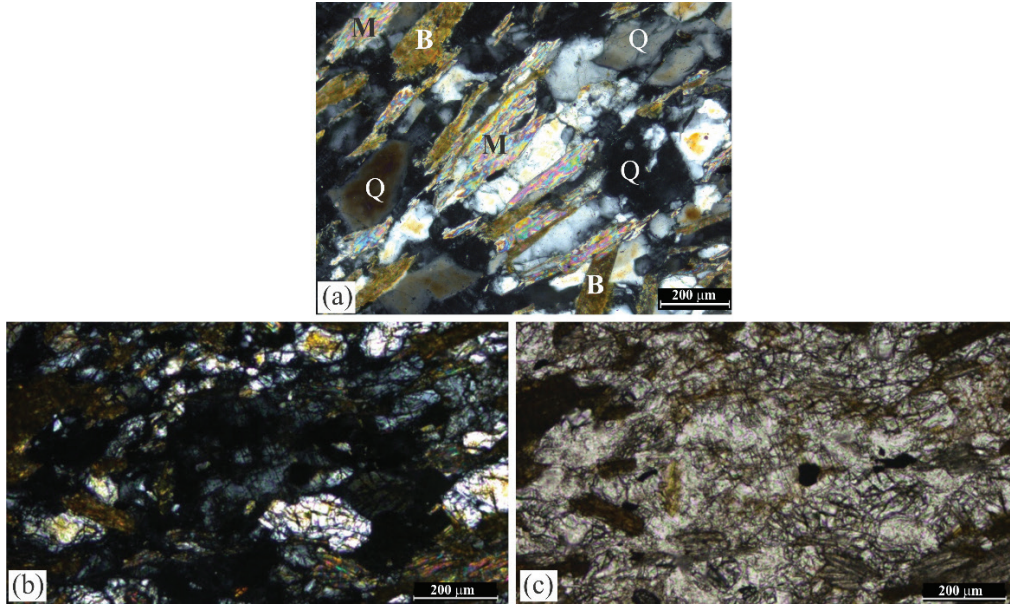


Figure 2. A view from the thin section of garnet micaschist (a) Q: quartz, M: muscovite, B: biotite, (Sample no: 1), (b) parallel nicol view, (c) cross nicol view.

Şekil 2. Granat mikaşistin ince kesitinden bir görünüm (a) Q: kuvars, M: muskovit, B: biyotit, (Örnek no:1), (b) paralel nikol görüntüsü, (c) haç nikol görüntüsü.

METHODS

The design of the dam was based on the results of pressuremeter tests. Design parameters such as limit pressure (P_L) and rock mass modulus (E_M) were evaluated using pressuremeter test results which can be used for the design of shallow and deep foundations in a fractured rock mass (Hughes, 2002; Tarnawski, 2004; Işık et al. 2008). 21 Menard pressuremeter tests were undertaken not only to assess bearing capacity and possible settlement at the base of the dam but also determine the depth of the cutoff level. Initially, the pressure applied was equivalent to 1 Atmosphere, increasing by 3 Atmospheres for each 2 m depth interval. The test results were evaluated for the rockfill dam with 115 m height and a base width of 58 m.

Both V_p and V_s measurements were performed using Proceq Pundit Lab device. V_p

and V_s are the functions of elastic properties and rock density. Measurements therefore, provide the computing elastic modulus (E_{dyn}) and Poisson's ratio (ν). These parameters are as follows;

$$E_{dyn} = \frac{\bar{n} \times (3V_p^2 - 4V_s^2)}{\left(\frac{V_p^2}{V_s^2}\right) - 1}, \quad \nu_{dyn} = \frac{\left(\frac{V_p^2}{2V_s^2}\right) - 1}{\left(\frac{V_p^2}{V_s^2}\right) - 1}, \quad \text{where } \rho$$

is density of rock material.

Thus, the ratio of E_{dyn} to ν_{dyn} was computed for nine intact core specimens. In the present investigation, the ratios of $(E/\nu)_{dynamic}$ obtained from the measurements of sonic wave velocities were compared with the ratios of $(E/\nu)_{static}$ obtained from the direct static method. Sonic wave velocities of the micaschists were obtained by application of ultrasonic compression and shear waves pulses to the core specimen in accordance with ASTM test designation D 2845-08 (ASTM, 1990). Measurements were taken

along the axis of the core specimens and sonic wave velocities were determined from 50 core specimens. By considering the sonic velocity test on the rock specimens, the values of V_p and V_s of the core specimens under both dry and water saturated conditions were calculated. The velocities were measured on the core specimens with differently oriented schistosity planes of the rock such as parallel, inclined ($28^\circ - 30^\circ$) and vertical to the schistosity planes. On the other hand, the values of E_t (tangent elastic modulus) and Poisson's ratio (ν) were calculated at 50% of the UCS from the stress versus strain curve of the rock. The values of UCS of the micaschist specimens were determined directly by testing 54 mm diameter NX size core specimens with a 1:2 dimensional ratio. The specimen was loaded until failure and stress-strain curve was recorded. Loadings were vertically applied to the schistosity planes (ASTM, 1992).

UCS tests were performed on that of 50 from 51 core specimens since the core specimen 47 was revoked due to the pre-existed joint. However, the deformability tests were solely performed on just 9 out of 50 intact core specimens. Furthermore, nine core specimens were taken from the core boxes to perform UCS tests under saturated conditions. The aim was to determine the strength reduction in saturated core specimens in proportion to the dry core specimens. In these tests, schistosity plane orientations were not considered. On the other hand, medium grained, slightly weathered blocks were extracted from the micaschist rock mass at the right bank of the dam reservoir to investigate the anisotropy effect. They were trimmed with their sides perpendicular to each other to facilitate coring at different inclinations, using a special frame fitted to the base of the laboratory drilling machine. Twenty-four specimens at different

schistosity plane orientation angles ($\alpha = 0-3^\circ$, $28^\circ - 30^\circ$ and 90°) were cored from the three rock blocks. Thus, all laboratory tests were conducted on a total of 80 core specimens.

Engineering Geological Conditions of the Dam Site

ASK-1 drill-hole log contains some geological descriptions such as core recovery (CR%), RQD%, joint frequency (λ), and Lugeon test results (Figures 3 and 4). It is seen that the permeable and highly permeable levels have developed parallel to the schistosity planes with a nearly horizontal orientation ($\alpha < 10^\circ$), (Figure 3). The values of RQD along the borehole between 40 and 41.50 m, 51 and 52 m, 59 m and 63 m were determined to be less than 25% (Figure 5). These zones are of the property of very poor quality rock and permeable. Analysis of drilling data shows that permeability increases with poor – very poor rock quality.

Micaschists with poor quality were intersected between 31.5 m and 37.5 m, 39.5 m, 40 m – 41.5 m, 51 m – 52 m and 59 m – 63 m (Figure 4). The zones below 40 m depth were named as fractured zones in this work. Although a joint set was developed, permeability values under the cutoff level (21.0 - 28.5 m) were determined as 1.69×10^{-5} and 3.23×10^{-5} cm/s and the mean value was also computed as 2.02×10^{-5} cm/s (low permeable) due to its direction. While the test results of permeability are in interval between 3.23×10^{-4} cm/s and 1.69×10^{-5} cm/s near the foundation of the dam, under the depth of 60 m the test results are found to be an interval between 1.3×10^{-5} cm/s and 6.5×10^{-5} cm/s. This case indicates that the values of permeability decrease with the depth (Figure 3).

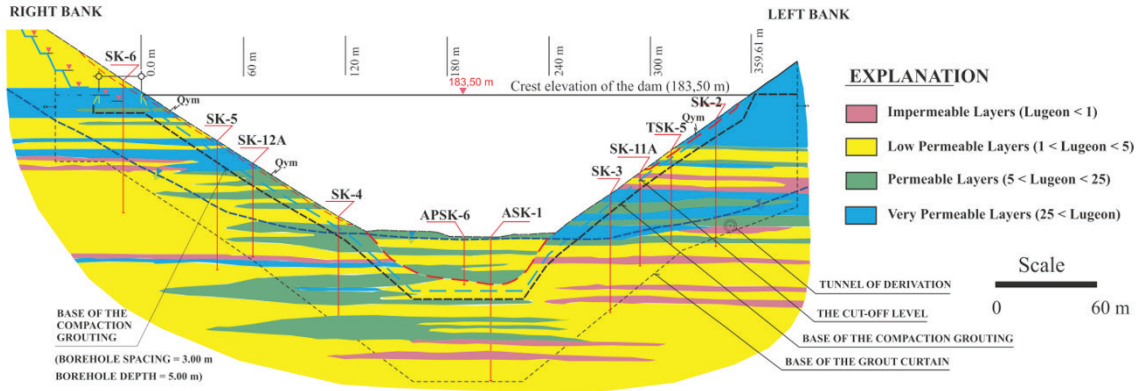


Figure 3. Zoning based on Lugeon values for the axis of Burgaz rock-fill dam (N72W).

Şekil 3. Burgaz kaya-dolgu barajının eksen boyunda elde edilen Lugeon değerlerinin zonlaması (K72B).

Depth (m)	Zone	CR (%)	Spacing	λ (m ⁻¹)		RQD (%)	(m)	LU (Lugeon)					
28.5-31.5	-	100	-	-		35		Max:3.23 Min:1.89 Mean:2.02 n=5	Low Permeable	1-5			
30-31.5				Mean -		41							
31.5-37.5	I	100	Closely jointed S: 6-21cm	12	17	36		6.39		5-25			
37.5-39.5					5	91							
39.5-40.0					14	41							
40.0-41.5													21
41.5-44	II	100	Closely jointed S: 10-25 cm	7	4	60	48	Max:4.08 Min:1.24 Mean:2.9 n=4	Low Permeable	1-5			
44-46					9	46							
46-50					5	53					11.92		5-25
50-51					11	35					3.03	Low Permeab.	1-5
51-52													
52-57	III	96	Closely jointed S: 20-25 cm		6	66	54	7.00		5-25			
57-59	IV	90	Very closely joint. S: 5-16 cm		13	42		2.87		1-5			
59-63				82			26	08		5-25			
63-85	V	100	Moderately jointed S: 22-96 cm	4	1-5	81	64	0.49	Very Low	< 1			
							70	1.56		1-5			
							75	0.70	Very Low	< 1			
							76	24.75	Permeable	5-25			
							85	1.53		1-5			

Figure 4. ASK-1 drill-hole log containing some engineering geological descriptions such as core recovery (CR%), RQD%, λ and Lugeon tests (Fractured zones: 40 – 41.5 m, 51 – 52 m and 59 – 63 m).

Şekil 4. Karot verimi (CR%), RQD% ve Lugeon deneyleri (Kırıklı zonlar : 40 – 41.5 m, 51 – 52 m ve 59 – 63 m) gibi mühendislik jeolojisi tanımlamaları içeren ASK-1 sondaj logu.

The maximum thickness of the alluvium in the river bed is 21.0 m (Figure 3). The cut off zone begins at the base of the alluvium (Figure 3). This zone is underlain by the moderately (WM) and highly weathered (WH) micaschists with quartzite lenses. Core advance into the WM

and WH micaschist level is 53.5 m long (31.5–85 m). Intact rock cores were recovered from this zone. Some physical and mechanical properties of 50 micaschist core specimens are presented in Table 1.

Table 1. Some physical and mechanical properties of the micaschist core specimens obtained from the Burgaz dam site.

Çizelge 1. Burgaz Baraj alanından elde edilen mikaşist karot örneklerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Sample no	V_s -dry (m/s)	V_s -dry (m/s)	V_p -sat (m/s)	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n %	σ_c -dry (MPa)	σ_c -sat (MPa)	E_t (GPa)
1	1180	1710	2346	24.70	25.60	9.72	20.30	-	-
2	1195	1758	2350	25.10	26.00	8.19	24.80	-	-
3	1136	1890	2536	25.10	25.90	8.07	25.40	-	-
4	1040	1890	2510	24.70	25.60	9.23	22.80	-	-
5	1176	2136	2744	25.50	26.20	6.59	32.60	-	-
6	1174	2214	2880	25.40	26.10	7.05	33.20	-	-
7	1317	2092	2714	25.20	25.90	7.75	29.80	-	5.98
8	1155	2100	2658	26.30	26.80	4.85	38.80	-	-
9	1200	1906	2508	25.40	26.10	7.10	28.20	-	-
10	1392	2047	2672	26.10	26.60	4.79	35.00	-	-
11	1305	2510	3346	27.20	27.40	1.95	41.50	-	-
12	1292	2486	3281	26.90	27.20	3.18	42.80	-	-
13	1480	2680	3495	27.00	27.20	1.98	46.20	-	-
14	1424	2094	2590	26.10	26.50	4.80	38.20	-	-
15	1469	2160	2704	26.00	26.50	4.94	39.00	-	-
16	1450	2544	3330	26.90	27.10	2.01	42.60	-	10.80
17	1452	2640	3379	26.80	27.10	2.80	40.60	32.50	-
18	1706	2820	3694	26.80	27.00	2.01	51.40	-	17.86
19	1728	3084	3886	26.90	27.10	1.82	47.40	-	-
20	1605	2360	3160	26.80	27.00	2.68	36.70	30.40	-
21	1728	2741	3544	27.00	27.20	1.97	48.00	39.00	13.00
22	1633	2402	3184	26.90	27.20	3.15	33.60	-	-
23	1637	2444	3228	26.90	27.20	3.26	41.90	-	-
24	1820	3200	3746	27.00	27.20	1.81	45.00	-	20.59

Table 1. Continued.

Çizelge 1. Devam ediyor.

25	2318	3800	4750	27.20	27.40	1.84	60.40	50.70	-
26	2386	3560	4510	27.20	27.40	1.79	61.90	-	-
27	1645	2610	3400	26.30	26.80	4.86	43.40	-	-
28	1730	2704	3400	27.10	27.30	2.60	46.50	-	-
29	2419	3840	4802	27.00	27.20	1.75	58.50	-	-
30	2421	3780	4608	27.30	27.50	1.68	66.80	-	-
31	1920	3240	3900	26.90	27.10	1.92	55.00	-	19.00
32	1728	2742	3442	27.10	27.30	2.18	44.80	-	-
33	1680	2780	3005	26.20	26.60	4.20	40.48	-	15.52
34	1504	2212	2984	26.50	26.90	4.53	31.00	-	-
35	1290	2144	2873	25.50	26.20	6.51	30.10	-	-
36	1580	2508	3217	26.10	26.60	4.63	34.90	-	-
37	1462	2150	2803	25.40	26.10	6.66	26.00	-	-
38	2130	4020	4918	27.10	27.20	1.59	78.10	-	-
39	2090	3850	4504	27.40	27.50	1.44	56.2	-	27.12
40	1350	3812	4742	27.30	27.40	1.69	67.30	-	-
41	1815	3128	3792	27.00	27.20	1.78	62.40	-	-
42	2153	3987	4889	27.00	27.10	1.64	69.80	61.00	-
43	1896	3100	3868	27.00	27.20	2.01	70.20	63.10	-
44	2085	3790	4449	26.90	27.10	2.08	65.00	-	-
45	2819	4208	5090	27.30	27.40	1.53	79.60	-	-
46	2460	3904	4802	27.30	27.50	1.74	71.60	-	36.40
48	2504	4106	5156	27.40	27.50	1.43	76.80	-	-
49	2798	4442	5240	27.50	27.60	1.11	81.80	-	-
50	2378	4100	4870	27.30	27.50	1.54	72.00	-	-
51	2860	4540	5312	27.50	27.60	1.15	80.50	-	-
$\bar{X} \pm SD$	1752.32 $\pm$ 500.93	2880.74 $\pm$ 807.4	3636 $\pm$ 899.3	26.56 $\pm$ 0.08	26.90 $\pm$ 0.056	3.55 $\pm$ 2.40	48.34 $\pm$ 17.4	46.12 $\pm$ 14.24	18.40 $\pm$ 9.153

σ_c values of the 39 core specimens (78% of all core specimens) recovered from depths between 40-47 and 63-67 m, and 73-85 m were examined under two groups; i) $\sigma_c > 50$ MPa, $2000 < V_p < 4000$ m/s (26% of all core specimens), ii) $15 < \sigma_c < 50$ MPa, $2000 < V_p < 4000$ m/s (52% of all core specimens), (Table 2 and Figure 5).

Table 2. The degree of weathering and corresponding ultrasonic velocities for the micaschists from the Burgaz Dam site.

Çizelge 2. Burgaz Baraj sahasındaki mikaşistlerin ayrışma dereceleri ve onlara karşılık gelen ultrasonik ses dalgası hızları.

Weathering state	Number of intact core specimens	UCS (MPa)	Ultrasonic velocity (m/s)		α -ratio $\left(\frac{V_{p \text{ saturated}}}{V_{p \text{ dry}}} \right)$ “For all data”
			Dry (average)	Saturated (average)	
WS	6 (12%)	$\sigma_c > 50$	4236.0	5097.6	1.210
WM	13 (12%)	$\sigma_c > 50$	3576.7	4374.8	1.223
WH	26 (52%)	$15 < \sigma_c < 50$	2498.8	3109.0	1.289
WC	5 (10%)	$15 < \sigma_c < 50$	1830.8	2450.0	1.338

Explanation: WS: Slightly weathered, WM: Moderately weathered, WH: Highly weathered,

WC: Completely weathered.

While the micaschist core specimens including the first group (WH – WM) were classified as “moderately weathered, strong rock”, those included in the second group were classified as “slightly weathered (WS), moderately strong rock” (Figure 5). On the other hand, values of the five core specimens (10% of all core specimens) recovered from depths between 28.5 and 37 m were found to be in the range between 20 MPa and 30 MPa (Figure 5). In addition, V_{pdry} values of these core specimens (WC) were determined to be less than 2000 m/s. These core specimens were classified as “completely weathered, moderately strong rock” (Table 2 and Figure 5).

Anisotropic Behaviour of the Micaschists

V_p and UCS tests were conducted on the core specimens as shown in Figure 6. V_p -values were measured on the core specimens with differently oriented schistosity planes such as parallel ($\alpha = 0 - 3^\circ$) to the schistosity planes, inclined ($28^\circ - 30^\circ$) to the schistosity planes, and vertical ($\alpha = 90^\circ$) to the schistosity planes, under dry and saturated conditions, respectively (Figure. 6). After the processes mentioned above, the (V_{psat}/V_{pdry}) ratios were computed for the core specimens and shown in Table 3.

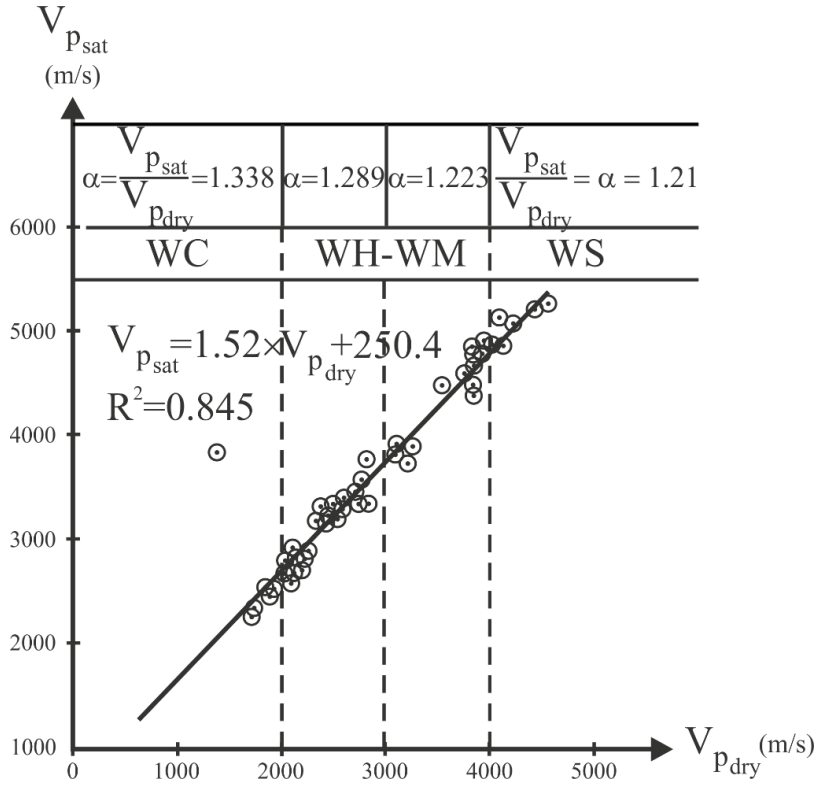


Figure 5. Relationships between ultrasonic wave velocities under dry and water saturated conditions and the values of α -ratio (V_{psat}/V_{pdry}).

Şekil 5. Kuru ve suya doymuş şartlarda ultrasonik ses dalgası hızlarıyla α -oranı (V_{psat}/V_{pdry}) değerleri arasındaki ilişkiler.

V_p -values obtained parallel or nearly parallel to the schistosity planes ($\alpha = 0 - 3^\circ$) were the highest as compared to other orientations in both dry and water saturated conditions. V_p -values acquired at $28^\circ - 30^\circ$ were higher than those vertical to the schistosity planes ($\alpha = 90^\circ$) in dry condition, while in water saturated condition, V_p values were obtained as close to each other for both $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$ and ($\alpha = 90^\circ$), (Table 3). P-wave velocities obtained for $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$ are higher than those obtained for $\alpha = 90^\circ$ in dry condition. On the other hand, in saturated condition, the mean values of P-wave velocities for anisotropy angles both $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$ and

$\alpha = 90^\circ$ are nearly obtained in the same level. As a result, it is determined that the V_p value decreases as α -angle increases. On the other hand, as the α -angle decreases, the (V_{psat}/V_{pdry}) ratio increases. A similar trend was observed for quartz mica schists by Zhang et al. (2011). The difference between the mean values of the wave-velocities measured under saturated and dry conditions (V_{psat}/V_{pdry}) and the percent of increasing the velocity were determined for the various α -angles (Table 3). It is determined that as α -angle increases, the difference between V_{psat} and V_{pdry} also increases.

Table 3. P – wave velocities of slightly weathered mica schists core specimens (Increasing the velocity for ($V_{psat} - V_{pdry}$): For $\alpha = 0 - 3^\circ$: 894 m/s, for $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$: 1141 m/s, for $\alpha = 90^\circ$: 1770 m/s).

Çizelge 3. Az ayrılmış mikaşist karot örneklerinin P-dalga hızları (Artan ($V_{psat} - V_{pdry}$) hız : $\alpha = 0 - 3^\circ$ için 894 m/s, $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$ için 1141 m/s, $\alpha = 90^\circ$ için 1770 m/s).

α -angle		P-wave velocities (m/s)		
		Dry (V_{pdry})	Saturated (V_{psat})	$V_{\text{psat}}/V_{\text{pdry}}$ ratio
		Increasing the velocity		
0 - 3°	Maximum	4590	5360	1.21
	Minimum	3946	4915	
	Average			
	N: 8	4232 ± 224	5126 ± 190.5	
	(V_{pdry}) (V_{psat})	894 (21.2%)		
28° - 30°	Maximum	2262		1.57
	Minimum	1860	3652	
	Average	2001±128.4	2780 3142±256.5	
	N: 8			
	(V_{psat}) (V_{pdry})	1141 (57%)		
90°	Maximum	1640	4264	2.34
	Minimum	890	2006	
	Average	1320±233.7	3090±663.9	
	N: 8			
	(V_{psat}) (V_{pdry})	1770 (134%)		

N: number of test, α -angle: Anisotropy angle (It is defined as an angle between the applied compressive loading and the schistosity plane orientation).

It was determined that the ratio is the largest (2.34) for $\alpha = 90^\circ$ and the smallest (1.21) for $\alpha = 0-3^\circ$ in this study. When P–wave propagates along the schistosity plane ($\alpha=0-3^\circ$), the presence of water makes a slight influence on the wave velocity ($V_{psat}/V_{pdry} = 1.21$). On the other hand, when P–wave propagating at the vertical position

to the schistosity planes ($\alpha = 90^\circ$), the presence of water significantly increased the wave velocities ($V_{psat}/V_{pdry} = 2.34$). UCS test results of the micaschist core specimens with differently oriented schistosity planes in both dry and water saturated conditions are presented in Table 4.



Figure 6. The relationship between loading direction and schistosity planes (α : anisotropy angle).

Şekil 6. Yükleme yönüyle şistozite düzlemler arasındaki ilişki (α : anizotropi açısı).

Table 4. UCS – test results of the mica schist core specimens with differently oriented schistosity planes in both dry and water saturated conditions.

Çizelge 4. Kuru ve suya doymuş şartlardaki farklı şistozite düzlem konumlu mikaşist karot örneklerinin tek eksenli basınç deneyi sonuçları.

α - angle					
90°		0 – 3°		28° – 30°	
σ_c – dry, MPa	σ_c – sat MPa	σ_c – dry, MPa	σ_c – sat MPa	σ_c – dry, MPa	σ_c – sat MPa
75.0	54.2	61.6	35.0	45.0	18.5
74.2	55.4	60.4	34.0	38.6	16.2
70.0	50.6	57.0	32.6	43.6	17.0
78.0	56.3	55.6	31.0	29.0	14.8
74.3 ± 3.30	54.1 ± 2.50	58.6 ± 2.81	33.1 ± 1.82	39.0 ± 7.24	16.6 ± 1.54
*N: 4	N: 4	N: 4	N: 4	N: 4	N: 4
$\sigma_{cdry}/\sigma_{csat} = 1.37$		$\sigma_{cdry}/\sigma_{csat} = 1.77$		$\sigma_{cdry}/\sigma_{csat} = 2.35$	

*N: Number of test

In both dry and saturated conditions, the highest UCS values were obtained from the uniaxial compression tests when loading is perpendicular to the schistosity planes ($\alpha = 90^\circ$). On the other hand, the smallest ones were obtained from the tests when loading is inclined to the schistosity planes ($\alpha = 28-30^\circ$). The relationships between the $\sigma_{cdry}/\sigma_{csat}$ ratio and α - angle were examined in detail (Figure 7). The largest and smallest $\sigma_{cdry}/\sigma_{csat}$ ratios are found as 2.35 ($\alpha = 28^\circ-30^\circ$) and 1.37 ($\alpha = 90^\circ$), respectively. For this reason, the curve acquired from the variation of $\sigma_{cdry}/\sigma_{csat}$ ratio with α -angle displays a reverse V – shape (Λ - shape). Variation of the UCS – mean values with α -angle in both dry and saturated conditions was also examined to better characterize the anisotropy effect of the mica schists (Figure 8). The curves obtained from the variation of the UCS - mean values with α - angle display V – shape (Figure 8). Besides, the V-shape may result from only three conditions for the plane direction being considered. The anisotropy behavior of micaschists is clearly shown in UCS test results, i. e. the ratio of $\sigma_{cdry}/\sigma_{csat}$ varies with the α - angle between the applied compressive loading and the schistosity plane orientation. In dry condition, while the UCS – mean value was found as 74.3 MPa when loading during the compression tests was perpendicular to the schistosity planes ($\alpha = 90^\circ$), it was found as 39.0 MPa when loading was inclined to the schistosity planes ($\alpha = 28^\circ-30^\circ$). In saturated condition, these values were found as 54.1 MPa and 16.6 MPa, respectively (Figure 8).

While in the relationship between α -angle and V_p , the values of V_p in saturated condition were obtained higher than those in the dry condition. In the relationship between α -angle and UCS-values, UCS-values were obtained as higher than those in water saturated condition (Figure 8). While the V-shape from the relationship between α -angle and UCS was

acquired, the relationship between α -angle and the curve of V_p did not display such a trend (Figure 8). As expected, they do not agree with each other.

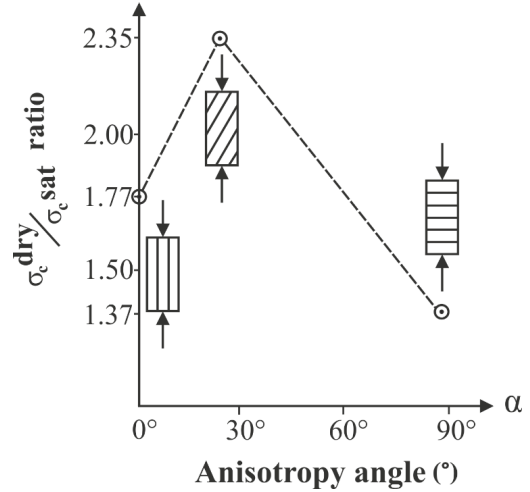


Figure 7. Variation of $\sigma_{cdry}/\sigma_{csat}$ ratio with α -angle (anisotropy angle).

Şekil 7. Anizotropi açısıyla (α)– $\sigma_{cdry}/\sigma_{csat}$ oranı değişimi.

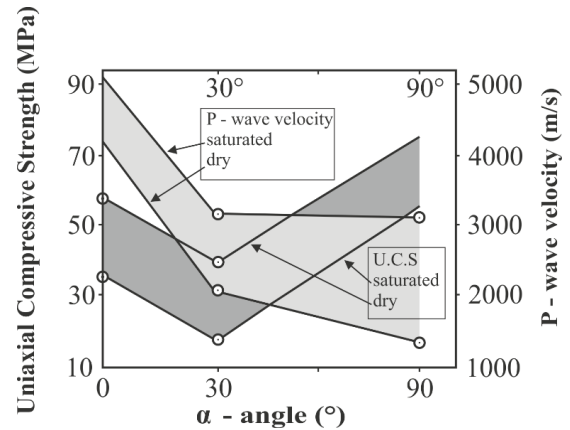


Figure 8. Relationships between α -angle and uniaxial compression strength, and P-wave velocity for the micaschist core specimens with different schistosity planes in both dry and water saturated conditions.

Şekil 8. Kuru ve suya doymuş şartlardaki farklı konumlu şistozite düzlemlili mikaşist karot örnekleri için anizotropi açısı (α), Tek Eksenli Basınç Dayanımı ve P-dalga hızı ilişkileri.

Determination of the Deformability and Modulus Ratios of the Micaschists

In order to determine the modulus ratios, nine deformability tests were performed on the intact core specimens (Figure 9). While the UCS values were determined in a range between 29.8 MPa and 71.6 MPa, the values of E_t were also determined in a range between 5.98 GPa and 36.4 GPa (Table 5). This large variability can be attributed to various weathering grades, not to rock anisotropy, because loadings in all tests were vertically applied on the schistosity planes. Deformability is classified into five categories as proposed by the IAEG (Anon, 1979). According to this classification, high deformability is less than 15×10^3 MPa, low deformability is greater than 30×10^3 MPa. Except for the core specimens number 7, 16 and 21, micaschists were classified as moderate deformable ($15.52 \times 10^3 \text{ MPa} \leq E_t \leq 27.12 \times 10^3 \text{ MPa}$). The values of of the core specimens number 7, 16 and 21 were found as 5.98, 10.82 and 13.0 GPa, respectively (Figure 9). They were classified as “high deformable rock”. The elastic modulus value of the core specimen number 46 was determined as a low deformable category ($E_t > 30 \times 10^3 \text{ MPa}$), (Table 5). The ultimate deformation (strain at failure) is considerably high in weathered micaschist which appears as an outcome of a more ductile behaviour of the material. The higher values of σ_c , the slope of the ascending branch of the stress-strain diagram, in comparison with the slope exhibited by weathered mica schists (Figure 9). Their results with the modulus ratios are given in Table 5.

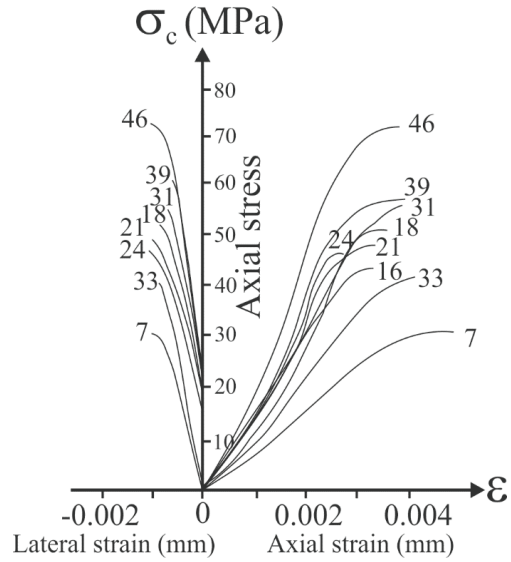


Figure 9. The axial and diametric stress-strain curves of the micaschists.

Şekil 9. Mikaşistlerin eksenel ve çapsal gerilme-deformasyon eğrileri.

According to the engineering classification of intact rocks suggested by Deere and Miller (1966), except the core specimen 7, micaschists were classified as “average modulus ratio” and “moderately strong rocks”. The specimen number 7 was classified as “average modulus ratio” and “weak rock”. According to the proposed method by Türk and Dearman (1983), micaschists were classified as “moderately deformable and moderately strong and strong rocks” (Figure 10). The specimens 7 and 46 were classified as “moderately strong and very deformable” and “strong and slightly deformable rock”, respectively (Figure 10). In this work, the values of σ_c and E_t/ν were determined in the ranges between 29.8 MPa and 71.6 MPa, and 34.76 and 145.6 GPa, respectively.

Table 5. Deformability test results and modulus ratios for the micaschist core specimens.

Çizelge 5. Mikaşist karot örnekleri için deformabilite deney sonuçları ve modül oranları.

Sample no	n%	σ_c (MPa)	ν	E_t (GPa)	E_t/σ_c	E_{tv} (GPa)
7	7.75	29.8	0.17	5.98	201	34.76
16	1.92	42.6	0.26	10.82	254	41.61
18	2.01	51.4	0.22	17.86	374	81.20
21	1.97	48.0	0.17	13.00	271	76.47
24	1.81	45.0	0.27	20.59	458	76.30
31	1.92	55.0	0.18	19.00	345	105.66
33	4.20	40.5	0.20	15.52	383	77.60
39	1.44	56.2	0.30	27.12	482	90.40
46	1.74	71.6	0.25	36.40	508	145.6
X $\pm$ S.D	2.75 $\pm$ 2.03	48.89 $\pm$ 11.74	0.22 $\pm$ 0.04	18.47 $\pm$ 9.04	363.96 $\pm$ 107.2	81.06 $\pm$ 32.8

From the graph presented in Figure 10, it is seen that the UCS values increase as the ratios of $(\frac{E_t}{\nu})$ increase. UCS test results, the values of E_t and ν , modulus ratios $(\frac{E_t}{\sigma_c})$ and the value of $(\frac{E_t}{\nu})$ for each test are given in Table 5. While the value of modulus ratio of $(\frac{E_t}{\sigma_c})$ was found to be in a range between 200.6 and 508.3, the ratio of $(\frac{E_t}{\nu})$ was found to be in a range between 34.76 GPa and 145.6 GPa with a mean value of 81.06 $\pm$ 32.8 GPa (Table 5). Logarithmic, power and linear regression analysis between σ_c and values for the micaschists were performed and $\frac{E_t}{\nu}$ the Equations 1, 2 and 3 were obtained.

$$\log \sigma_c = \log 5.3936 + m \times \log \left(\frac{E_t}{\nu} \right) \quad (1)$$

Where “m” is slope of the plot.

Power and linear regression analyses between $(\frac{E_t}{\nu})$ and values for the micaschists with medium elastic modulus ratio were performed and then Equations 2 and 3 were obtained. If the correlation coefficients obtained from both analyses are considered, it is seen that the coefficient acquired from the power regression analysis is less than that of the linear regression analysis.

$$\sigma_c = 5.3936 \times \left(\frac{E_t}{\nu} \right)^{0.5047} \quad R^2 = 0.81 \quad (2)$$

$$\sigma_c = 0.3331 \left(\frac{E_t}{\nu} \right) + 21.899, \quad R^2 = 0.86 \quad (3)$$

Comparison of the test results from the Burgaz dam site with those from Selçuk-İzmir (Elçi, 2003) was also performed in this study. For this, test results on WS-micaschists from Selçuk-İzmir and WM-WH micaschists from the Burgaz dam site-İzmir were plotted all together in Figure 10. When weathering grade increases, both strength and (E_t/ν) values decrease along a straight line which is represented by the equation in Figure 10. While the slope of the line given in Equation 4 is 0.3331, in Equation 5, it is 0.1779. The slope of line decreased nearly two times (Figure 10). However, micaschist test results follow a power law;

$$\sigma_c = 7.5393 \times \left(\frac{E_t}{\nu} \right)^{0.4244} \quad R^2 = 0.89 \quad (4)$$

$$\sigma_c = 0.1779 \left(\frac{E_t}{\nu} \right) + 33.691 \quad R^2 = 0.84 \quad (5)$$

According to the Equations 4 and 5, WM and WS micaschists with medium elastic modulus ratio gave reasonably acceptable power and linear relations, respectively.

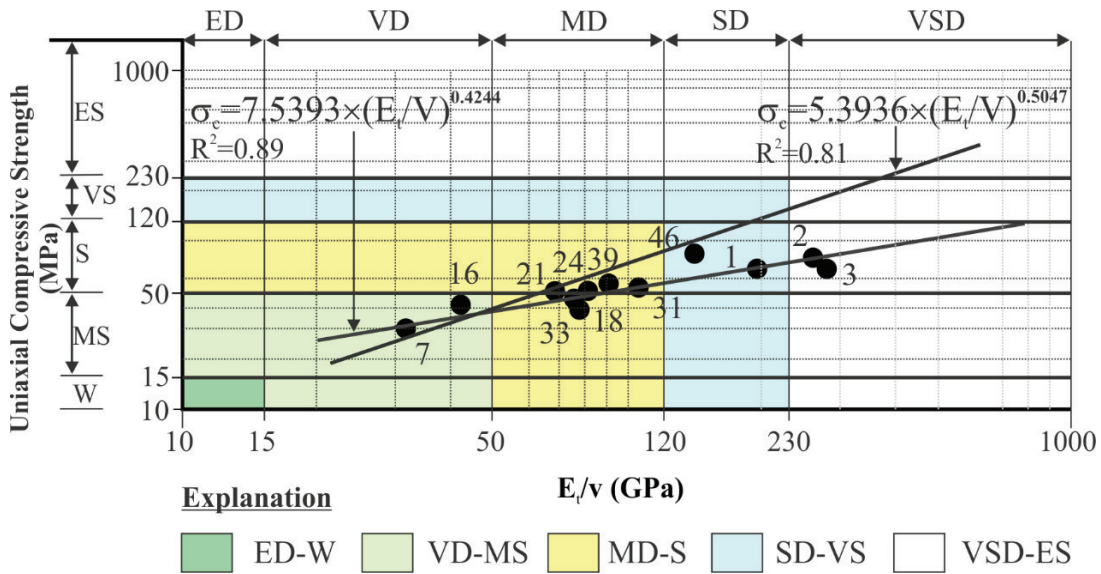


Figure 10. Graphical presentation of the relationship between $\left(\frac{E_t}{v}\right)$ ratio and uniaxial compressive strength (7, 18, 24, 31, 33 and 39: from the Burgaz dam site, 1, 2, and 3: Selçuk-İzmir, $n\% \leq 1.6$, $\sigma_c \geq 76$ MPa, = 50 - 70 GPa). Engineering classification of intact micaschist core specimens (W: Weak, MS: Moderately strong, S: Strong, VS: Very strong, ES: Extremely strong, ED: Extremely deformable, VD: Very deformable, MD: Moderately deformable, SD: Slightly deformable, VSD: Very slightly deformable).

Şekil 10. $\left(\frac{E_t}{v}\right)$ oranıyla tek eksenli basınç dayanımı ilişkisinin grafiksel sunumu (7, 18, 24, 31, 33 ve 39: Burgaz barajı sahasından, 1, 2, ve 3: Selçuk-İzmir'den, $n\% \leq 1.6$, $\sigma_c \geq 76$ MPa, = 50 - 70 GPa). Taze mikaşist karot numunelerinin mühendislik sınıflaması (W: Wayıf, MS: Orta dayanımlı, S: Dayanımlı, VS: Yüksek dayanımlı, ES: Çok yüksek dayanımlı, ED: Aşırı derecede deforme olabilen, VD: Çok deforme olabilen, MD: Orta derecede deforme olabilen, SD: Az deforme olabilen, VSD: Çok az deforme olabilen).

Relation Between $\left(\frac{E}{v}\right)_{\text{dynamic}}$ and $\left(\frac{E}{v}\right)_{\text{static}}$ for the Micaschists

V_p and V_s velocities were measured to determine the ratio of $(E/v)_{\text{dyn}}$ for nine intact core specimens. Results of the measurements $(E/v)_{\text{dyn}}$ and v are presented in Table 7. The ratios of $(E_t/v)_{\text{static}}$ for the same core specimens are also presented in this table. The results show that $(E/v)_{\text{dyn}}$ is greater than $(E_t/v)_{\text{static}}$ (Table 6). The graph of $(E/v)_{\text{dyn}}$ versus $(E_t/v)_{\text{static}}$ is drawn on a log-log paper (Figure 11) and the relation given in Equation 6 was obtained;

$$\left(\frac{E}{v}\right)_{\text{dyn}} = 1.2707 \left(\frac{E_t}{v}\right)_{\text{static}}^{0.968} \quad R^2 = 0.96, n = 9 \quad (6)$$

The plot of test results indicates that there are two points to consider; a) When $(E_t/v)_{\text{static}}$ is high, as for the moderately strong micaschists, $(E/v)_{\text{dyn}}$ is also high and values are greater than $(E_t/v)_{\text{static}}$. b) The decrease in $(E_t/v)_{\text{static}}$ value shows a corresponding decrease in $(E/v)_{\text{dyn}}$. The values of E_t and v from the laboratory tests performed under dynamic and static conditions were found to be different from one another. For this reason, both the values of E_t and v were considered in which the relations were examined. Figure 11 shows the log-log scale plot of “Average Modulus Ratio” and $(E/v)_{\text{dyn}}$ against $(E_t/v)_{\text{static}}$ for the weathered micaschists from the Burgaz dam

site. It is interesting to note that the test results of the micaschists gave a power relation of $y=ax^b$ [$(\frac{E}{V})_{\text{dyn}} = 1.2707 \times (\frac{E_t}{V})^{0.968}$, $R^2= 0.96$], as a linear relation: [$(\frac{E}{V})_{\text{dyn}} = 79.192 \ln (\frac{E_t}{V})_{\text{static}} - 252.14$ on a log-log scale, $R^2= 0.88$].

Relationships between the static and dynamic moduli and V_p were also investigated in this study. As known, the dynamic modulus (E_{dyn}) is generally higher than the static, but there are instances where the opposite is true. The higher the E_t , the greater the agreement between the static and dynamic values is (Eissa and Kazi, 1988). The relationships between the static and dynamic moduli for different types of rocks and ranges of values proposed by various authors (Brotons et al. 2016; Christaras et al. 1994; Eissa

and Kazai, 1998) are summarized in Table 7. In addition, various correlations between E_{static} and E_{dyn} moduli were proposed by various authors (Figure 12). They have been obtained from rocks whose dynamic modulus varied between 5 and 130 GPa, and including rocks of igneous, sedimentary and metamorphic origins (all rock types). k-ratio ($E_{\text{dyn}} / E_{\text{static}}$) has been used in their works by several authors (Al-Shayea, 2004; Martinez et al., 2012; Brotons et al., 2014; 2016) as well as the current study. In Figure 12 the line of slope 1:1 from the origin, represents the points where $k=1$, so that the values of $k>1$ are located to the right of that line (Figure 12). All of the curves in Figure 12 are located in the right of the diagonal line, indicating $k>1$ values.

Table 6. Results of the measurements of P and S ultrasonic wave velocities and the values of $(\frac{E_t}{V})_{\text{static}}$ and $(\frac{E}{V})_{\text{dynamic}}$.

Çizelge 6. P ve S ultrasonik dalga hız ölçüm sonuçlarıyla $(\frac{E_t}{V})_{\text{static}}$ ve $(\frac{E}{V})_{\text{dynamic}}$ değerleri arasındaki ilişkiler.

Sample No	$V_{s\text{dry}}$ (m/sec)	$V_{p\text{dry}}$ (m/sec)	$\left(\frac{V_p^2}{V_s^2}\right)$	$\bar{n}$ (kg/m ³)	ν	E_{dyn} (GPa)	$\frac{E_{\text{dyn}}}{V}$ (GPa)	$\frac{E_{\text{stat}}}{V}$ (GPa)
7	1317	2092	2.52	2.52×10^{-3}	0.172	6.19	35.99	34.8
16	1450	2544	3.07	2.69×10^{-3}	0.260	14.25	54.80	41.6
18	1706	2820	2.73	2.68×10^{-3}	0.210	18.90	90.10	81.2
21	1728	2741	2.51	2.70×10^{-3}	0.180	18.86	75.44	72.2
24	1820	3200	3.10	2.70×10^{-3}	0.263	22.60	85.90	76.3
31	1920	3240	2.84	2.69×10^{-3}	0.230	24.50	106.4	105.6
33	1680	2780	2.74	2.62×10^{-3}	0.210	17.90	85.40	77.6
39	2090	3850	3.39	2.74×10^{-3}	0.290	30.50	104.6	90.4
46	2378	4100	2.97	2.75×10^{-3}	0.250	42.00	168.00	145.6

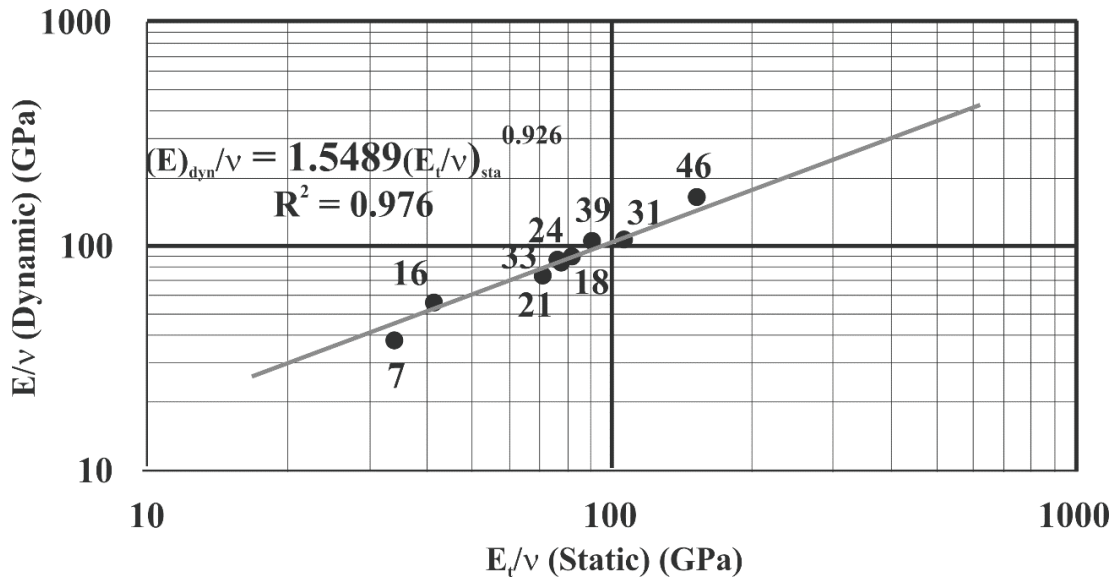
Explanation: $\bar{n}$: Density, ν : Poisson's ratio, V_s and V_p : Sonic wave velocities.

Table 7. Relationships between E_{static} and $E_{dynamic}$ moduli proposed by various authors.Çizelge 7. Farklı yazarlar tarafından önerilen E_{static} ve $E_{dynamic}$ modülleri arasındaki ilişkiler.

Reference	Relationship	R ²	E_{dyn} (GPa)	Rock type
Eissa and Kazi (1988)	$E_{static} = 0.74 \times E_{dyn} - 0.82$	0.70	5 – 130	All types
Christaras et al. (1994)	$E_{static} = 1.05 \times E_{dyn} - 3.16$	0.99	25 – 110	All types
Brotons et al. (2016)	$E_{static} = 11.531 \times \rho_{bulk}^{-0.457} \times E_{dyn}^{1.251}$	0.99	5 – 80	All types
The current study	$E_{static} = 0.8764 \times E_{dyn} - 0.58$	0.97	5 – 30	Mica schist

The evolution of the k-parameter with the modulus for each curve can be seen in Figure 12. The k-values obtained in this study vary from 1.06 to 1.45. The mean value is found as 1.198 ± 0.126 . The values obtained by the other authors are between 0.85 and 1.86 (King, 1983; Vanheerden, 1987; Eissa and Kazi, 1988). The k-values obtained in this study generally agree with the findings of the other authors.

The parameter required in the equations (V_p) is easily obtained. It simplifies the testing necessary for obtaining the static modulus-a dependent variable in all cases. Some equations obtained for the metamorphic rocks were not considered in this study such as the work of King (1983) due to being the values of dynamic elastic modulus in a range from 40 GPa to 120 GPa. They have very high elastic

Figure 11. The plot of $(\frac{E}{v})_{dynamic}$ against $(\frac{E_t}{v})_{static}$ for the micaschists core specimens from the Burgaz dam site.Şekil 11. Burgaz Baraj alanındaki mikaşist karot numuneleri için hazırlanmış olan $(\frac{E}{v})_{dynamic}$ karşı $(\frac{E_t}{v})_{static}$ ilişkisi.

modulus with respect to the micaschists. When considering V_p , E_{static} modulus is calculated with the help of the equations given in Table 8. These equations use V_p parameter, which hence allows the E_{sta} modulus of rocks to be estimated quickly and reliably. Excellent matching is observed in Figure 13 for the curves of Brotons et al. (2016) and the current study, and reasonable good matching for the curve of limestone of Najibi et al. (2015).

Two multiple non-linear regression analyses (Milton et al., 1997) were conducted by SPSS software in order to estimate E_{static} with regard to V_p and porosity ($n\%$). Two expressions from the analyses are as follows; Model 1: $E_{static} = V_p^{2.523} \times n^{0.095}$, $R^2 = 0.93$, RMSE [(Root mean square error). Root mean squared error (RMSE) is the most commonly used error metric. It expresses the square root of the average squared errors of a predictive model. The model is assumed to be as excellent while RMSE is 0]: 0.149 GPa, VAF (Variance accounted for): 92.67. Model 2: $E_{static} =$

$8.966 V_p \times n^{-0.753}$, $R^2 = 0.75$, RMSE: 1.80 GPa and VAF: 75.54. As a result, multiple non-linear regression model 1 estimated the E_{static} values more precisely than other models as having low RMSE (0.149) and high VAF (92.67) values.

Estimation of Settlement Potential and Bearing Capacity Value

Pressuremeter tests were performed along the ASK-1 borehole profile to determine the values of elastic modulus of micaschists rock masses with various weathering grades. Thus, the amount of settlement and bearing capacity value of micaschists both in and beneath the cutoff zone were calculated by using the values of elastic modulus of the rock masses. The weathering degree of micaschist is varying from moderately weathered to completely weathered and the rock mass is highly jointed (Figure 4 and Table 9). Pressuremeter tests were generally performed in every two meters in ASK 1 borehole between the depth 5.0 m and 53.5 m.

Table 8. The relationships between E_{static} modulus and P-wave velocity for various rock types as well as the current study.

Çizelge 8. Bu çalışmadaki mikaşistler ve farklı kaya türleri için E_{static} modülü ve P-dalga hızı ilişkileri.

Reference	Relationship	R^2	Rock type	α angle*
Najibi et al. (2015)	$E_{static} = 0.169 \times V_p^{3.324}$	0.90	Limestone	-
Brotons et al. (2016)	$E_{static} = 0.679 \times V_p^{2.664}$	0.99	All types	-
The current study	$E_{static} = 1.101 \times V_p^{2.4757}$	0.95	Mica schist	$\alpha = 90^\circ$
	$E_{static} = V_p^{2.523} \times n^{0.095}$	0.92	Mica schist	$\alpha = 90^\circ$

*: α is defined as an acute angle between the measurement direction of V_p and the schistosity plane orientation. n: Porosity values of the micaschist core specimens.

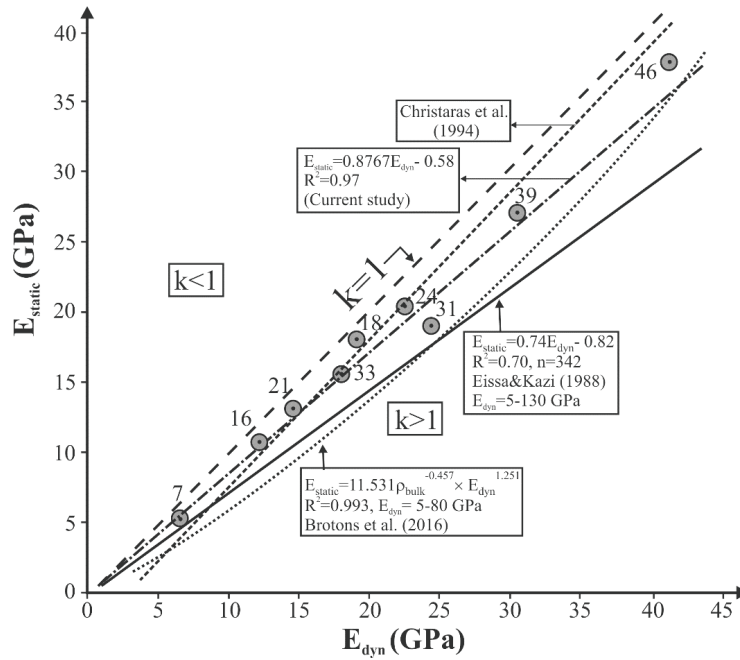


Figure 12. The plot of the relationships between static and dynamic moduli proposed by various authors and the current study (k is the dimensionless coefficient obtained from the ratio of dynamic modulus to static modulus).

Şekil 12. Bu çalışmadaki mikaşistler ve farklı yazarların önerdikleri statik ve dinamik modül arasındaki ilişkiler.

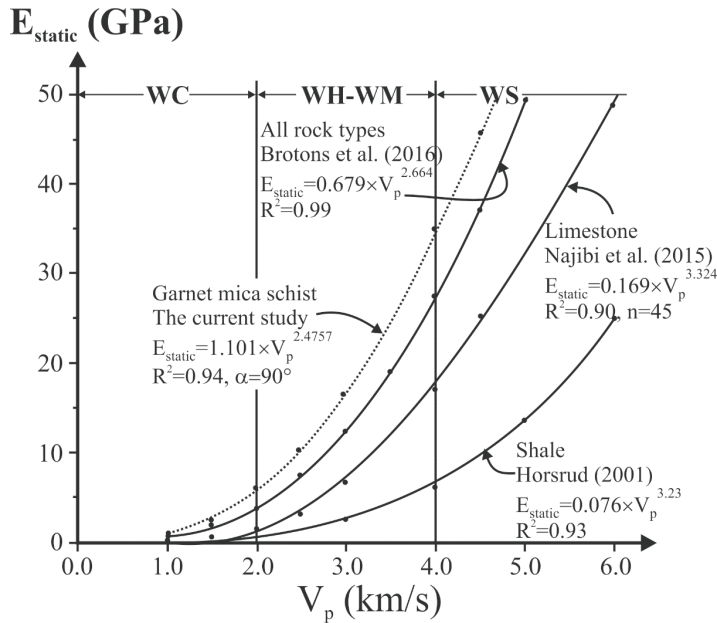


Figure 13. Variation of the static modulus (E_{static}) with the compression wave velocity (V_p) according to different authors and the current study (α : anisotropy angle).

Şekil 13. Bu çalışmadaki mikaşistler ve farklı yazarların önerdikleri statik modülün P-dalga hızına bağlı değişimi.

Table 9. Menard Pressuremeter test results for the ASK 1 borehole.

Çizelge 9. ASK-1 sondaj kuyusu için Menard Presiyometre deney sonuçları.

Zone	Depth (m)	P _L	E _M (MPa)	G _M (MPa)	E _M /P _L	Soil type and settlement (mm)	
Alluvium	5.00	0.20	1.0	0.62	5.0	Firm to very firm soils	
	10.0	0.30	1.9	1.23	6.3		
	15.0	0.85	1.4	0.91	7.7		
	17.0	0.50	6.6	4.16	2.8		
Zone of cutoff	21.0	0.94	9.4	5.87	9.96	Very decomposed micaschist, hard soil to weak rock (Transition zone) “Base of the dam”	
	24.5	4.00	39.9	24.9	9.97		
	26.5	4.89	97.9	60.2	20.02		
	28.5	5.0	103.3	64.5	20.66		
Zone 1	The zone of bearing capacity	30.5	7.9	1220	714.9	154.4	Settlement: 2.23 mm
		31.5	8.80	1440	914.4	163.6	Harmonic mean of three E _M -values, E _M : 1398.6 MPa Settlement: 2.16 mm
		33.5	9.65	1585	935.1	164.2	
		35.5	9.95	1700	1000.3	170.8	
		37.5	9.80	1752	1139.0	178.8	
		More fractured zone	39.5	3.18	454.4	272.6	142.9
41.5	3.17		520.0	312.0	164.4		
Zone 2	43.5	7.90	1340	804.0	169.6	Moderately weathered and fractured micaschists	
	45.5	9.85	1640	984.0	166.5		
	47.5	10.2	1810	1086.0	177.8		
	49.5	10.2	1830	1098.0	179.4		
	51.5	10.1	1796	1077.6	177.8		
	53.5	11.9	2150	1344.0	180.67		

G_M : Shear modulus [$E_M/2 \times (1 + \nu)$]. Settlement was calculated according to the equation suggested by Menard et al. (1962) in this work.

Moderately weathered and fractured micaschists take place under both the zone of pressure bulb and the more fractured zone along the profile of ASK-1 borehole. The first part with 3 m depth of the zone 1 is the zone of bearing

capacity and this zone is important in term of a foundation.

Clarke (1995) indicated that as the ratio of Menard deformation modulus to Menard limit pressure (E_M/P_L) is between 10 and 20, the

soil is firm and very firm. This ratio is changing from 5.0 to 20.66 in eight pressuremeter tests performed in ASK 1 borehole between the depths 5.0 m and 28.5 m. It was determined that the thickness of the cutoff zone under the alluvium changes between 5 and 7.5 m on the basis of the core description and the results of pressuremeter tests. These results fundamentally indicate that this zone is a transition zone from hard soil to weak rock. Thirteen pressuremeter tests between the depths 30.5 m and 53.5 m were carried out and yielded Menard deformation modulus were calculated to be between 454.4 MPa and 2150 MPa with an arithmetic mean value of 1479.8 MPa and a standard deviation of 500.1 MPa. It was determined that the (E_M/P_L) ratio for moderately weathered and fractured micaschists varied from 142.9 to 180.67. By ignoring extremely high and low values, the range of (E_M/P_L) ratio varies between 154.4 to 179.4 which is still high. As a result, the ratio of (E_M/P_L) is quite useful and typical values are 9.96 to 20.66 in very decomposed micaschist to the extent of very dense sand (Table 9). This is a transition zone between hard soil and weak rock. On the other hand, the (E_M/P_L) ratio under the cutoff level (Zone I) reaches up to 142.9 to 180.67 in moderately and highly weathered, and fractured micaschists (Table 9). The aperture of fractures in the rock mass for zone 1 is changing between 1 mm and 1.5 mm and schistosity planes are nearly horizontal. In this case, variations of (E_M/P_L) ratios are not due to the closing of apertures during pressuremeter tests. Işık et al. (2008) observed that testing depth and disturbance affect the calculated values of the deformation modulus of greywackes. In addition, they remarked that the volume subjected to the applied pressure is small when compared to the rock mass volume. Thus, the deformation modulus of the rock mass derived from the test

should be used cautiously. The effect of variable stress condition in highly fractured mica schist zone (39.5 m – 41.5 m) and testing depth were not considered in this study. Pressuremeter tests indicated that for a 115 m high dam, the settlement would vary between some 2.16 mm and 2.23 mm. The ultimate bearing capacity (q_{ult}) at the base of the dam structure was computed as ranging between 2.96 MPa and 3.71 MPa (For the zone 1: -min: 7.90 MPa and -max: 9.95 MPa, coefficient of bearing capacity, k : 1.1, unit weight: 26.5 kN/m³, factor of safety: 3). Bearing capacity analyses were performed according to the equation suggested by Baguelin et al. (1978). After the excavation of cutoff with 7.5 m depth from alluvium at the base of river valley was performed, the dam construction was started. Weathered micaschist unit lies down at this elevation (28 m). The harmonic mean of elastic moduli for three measurements in the micaschist rock mass beneath the dam was computed as 1398.6 MPa (Table 9). Considering the harmonic mean value (E_M : 1398.6 MPa), the amount of settlement was obtained as 2.16 mm. On the other hand, if the minimum value of elastic modulus of the rock mass for a measurement (E_M : 1220 MPa) beneath the dam is considered, amount of settlement is calculated as 2.23 mm.

Relationship Between Elastic Modulus of the Micaschist Rock Mass (E_M) and Uniaxial Compressive Strength of the Micaschist Rock Material (σ_c)

Data from in-situ and laboratory tests, which was used in the establishment of the relation between E_M and σ_c , is presented in Table 10. Variation of the elastic modulus of E_M with σ_c is investigated (Figure 14). The relations given in Equations 7 and 8 are obtained by using linear and power regression analyses;

$$E_M = 0.322 \sqrt{\sigma_c} - 0.606, R^2 = 0.95 \quad (7)$$

$$E_M = 0.1194 (\sigma_c)^{1.3472}, R^2 = 0.94 \quad (8)$$

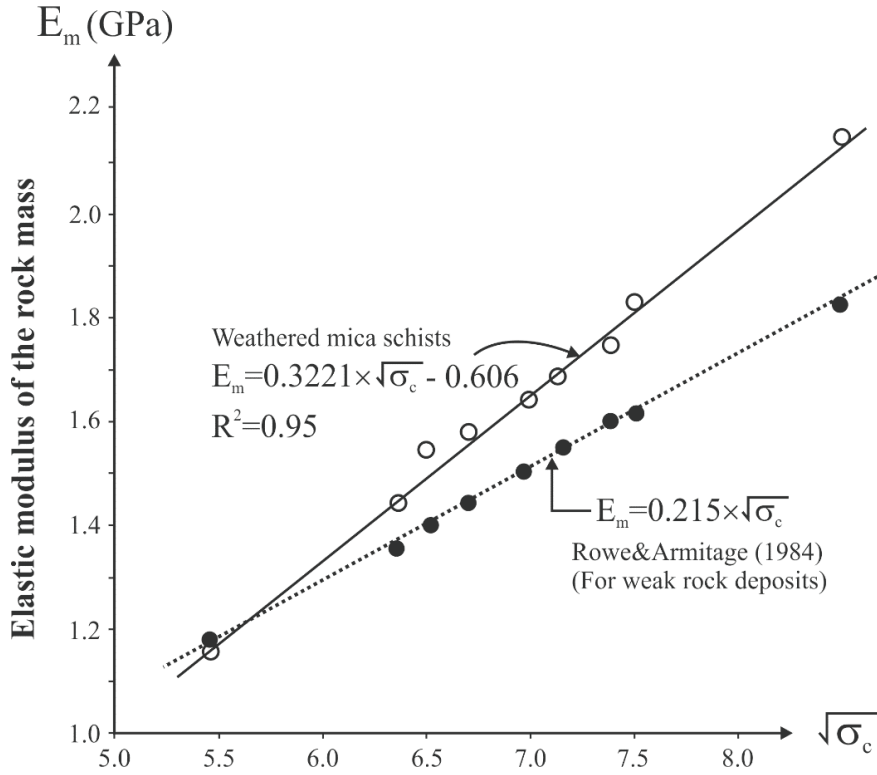


Figure 14. Variation of the elastic modulus of the micaschist rock mass with the uniaxial compressive strength of the intact rock material.

Şekil 14. Mikaşist kayaç kütlelerinin elastik modülünün taze kayacın tek eksenli basınç dayanımıyla değişimi.

Table 10. Data for elastic modulus of rock mass (E_M) and UCS-values of the intact rock.

Çizelge 10. Kayaç kütlelerinin elastisite modülü ve sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı verileri.

E_t (GPa)	σ_c (MPa)	$\sqrt{\sigma_c}$	Current study E_M (GPa)	Rowe and Armitage (1984) E_M (GPa)	Palmström and Singh (2001), E_M (GPa)
5.98	29.8	5.46	1.220	1.170	5.96
10.82	42.6	6.52	1.550	1.390	8.52
13.00	48.0	6.93	1.650	1.400	9.60
15.52	40.5	6.36	1.440	1.360	8.10
17.86	51.4	7.17	1.700	1.540	10.28
19.00	55.0	7.41	1.752	1.590	11.00
20.59	45.0	6.70	1.585	1.440	9.00
27.12	56.2	7.49	1.830	1.610	11.20
36.40	71.6	8.46	2.150	1.820	14.32

The graph showing the variation of the elastic modulus of the micaschist rock mass with σ_c is presented in Figure 14. In this graph, two lines from the current study and Rowe and Armitage (1984) are compared with each other. For the low values of σ_c ($\sigma_c \geq 32$ MPa), the values of elastic modulus from both equations are quite close to each other. For the high values of σ_c , both trend lines are, however, getting distant from each other.

Comparison of In-situ and Estimated Rock Mass Deformation Moduli by Considering the RQD-Values

Coon and Merrit (1970) proposed the following equation considering the RQD values; $\frac{E_M}{E_i} = (0.0231 \times \text{RQD}) - 1.32$, based on the more data and more recently Zhang and Einstein (2004) recommended the following relations considering the RQD values;

$$\frac{E_M}{E_i} = 0.2 \times 10^{(0.0186 \times \text{RQD} - 1.91)} \text{ (Lower bound),}$$

$$\frac{E_M}{E_i} = 1.8 \times 10^{(0.0186 \times \text{RQD} - 1.91)} \text{ (Upper bound),}$$

$$\frac{E_M}{E_i} = 10^{(0.0186 \times \text{RQD} - 1.91)}, R^2 = 0.76 \text{ (Mean), where } E_M \text{ and } E_i \text{ are the deformation modulus of the rock mass and intact rock, respectively.}$$

Pressuremeter test results (E_M) performed beneath the cutoff zone (under 30.5 m) were considered in this work. Three pressuremeter tests between the depths 30.5 and 33.5 m were performed and yielded E_M -values between 1.22 GPa and 1.7 GPa with arithmetic mean value of 1.49 GPa. On the other hand, by ignoring extremely high and low values, the RQD-values in this zone generally vary between 35% and 60% with arithmetic mean value of 48.5% (Figure 4). For the RQD values of 35% and 60%, $\frac{E_M}{E_i}$ ratios are found as 0.011 (Lower bound) and 0.289

(Upper bound), respectively. The mean value (RQD: 48.5%) is found as 0.0982. At depths between 30.5 m and 33.5 m (bearing capacity zone), the values of static modulus, E_t vary between 5.98 GPa and 17.86 GPa with arithmetic mean value of 11.55 GPa (Table 5).

$$\text{Lower bound; } \frac{E_M}{E_i(\text{min})} = 0.011, \frac{E_M}{E_i} = 0.011; E_M = 5.98 \times 0.011 = 0.0658 \text{ GPa (65.8 MPa),}$$

$$\text{Upper bound; } \frac{E_M}{E_i(\text{max})} = 0.289, \frac{E_M}{E_i} = 0.289; E_M = 17.86 \times 0.289 = 5.16 \text{ GPa (5160 MPa),}$$

$$\text{Mean; } \frac{E_M}{E_i(\text{mean})} = 0.0982, \frac{E_M}{E_i} = 0.0982; E_M = 11.55 \times 0.0982 = 1.134 \text{ GPa (1134 MPa).}$$

When the RQD-values are considered, it is understood that the lower and the upper bound values of elastic modulus of weathered micaschist rock mass vary between 65.8 MPa and 5160 MPa with arithmetic mean value of 1134 MPa. These values mentioned above are the estimated values obtained from the equations of Zhang and Einstein (2004). On the other hand, the mean ratio based on the pressuremeter test results (E_M) and laboratory deformability tests (E_i) [$E_{i(\text{mean})} = \frac{(5.98+10.82+17.86)}{3} = 11.553$ GPa (from Table 5)] for the bearing capacity zone is as follows; Mean: $\frac{E_{M(\text{mean})}}{E_{i(\text{mean})}} = \frac{1490}{11553} = 0.129$. This ratio (0.129) takes part between two ratios obtained using the equations of the mean and the upper bound of Zhang and Einstein (2004). For this reason, disturbance during the drilling operations may cause the deformation modulus (E_M) obtained from Menard pressuremeter test to become lower than the actual in-situ value. When the estimated ratios considering the RQD-values and in-situ ratios based on the pressuremeter test results (E_M) and laboratory deformability tests are compared, it is seen that they are consistent with each other.

DISCUSSION

The discussions are based on the laboratory tests employed on the intact micaschist core specimens and pressuremeter tests. V_s as a percentage of V_p was calculated for the micaschists, and the results are consistent in that average V_s values are roughly 60% of V_p values (min: 57.8%, max: 64.2%, mean 61.2% for the mean porosity value of 3.55%). It was determined that the relationships between and UCS, and porosity had a good correlation with the correlation factors $r = 0.81$ and $r = 0.88$, respectively. The porosity and UCS and, V_{p-dry} and V_{p-sat} , the UCS and V_{p-dry} had even better correlations of ≥ 0.90 . Empirical relationships proposed in the related literature for the parameters studied were also considered, between V_p and UCS (Table 11). The proposed equation in this work was in this work is similar to the equation proposed by the equation proposed by Andrade and Saraiva (2010).

It was determined that the micaschists located at the depth between 28.5 and 40 m had lower UCS values when compared with those of under 40 m depth (In this zone, the existence of the micaschist level with the properties of $V_{p-dry} < 2000$ m/s and $20.3 < \sigma_c < 28.2$ MPa were determined). This case indicated that a more weathered and fractured material exists in these depths. The depth between 28.5 m and 40 m below the dam should be considered in terms of the compaction grouting. Considering the

results of the deformability tests, the micaschists were classified as “average modulus ratio and moderately strong rock” according to the classification suggested by Deere and Miller (1966). According to the method suggested by Türk and Dearman (1983), they were also classified as “moderately deformable and strong rock”. It was understood that the rock material classification of the micaschists proposed by Türk and Dearman (1983) is similar to Deeres', the difference being in the division of the elastic modulus by Poisson's ratio.

The micaschists take place beneath the cutoff level of the dam were classified as “moderate deformable rock” ($15 \times 10^3 < E_i < 30 \times 10^3$ MPa). The values of UCS of nine intact core specimens on which deformability tests were performed, were determined to be in the range between 29.8 MPa and 71.6 MPa. The mean value of UCS of all core specimens was also determined as 48.89 ± 11.74 MPa. The values of V_{p-dry} of the nine core specimens were found to be in the range between 1906 m/s and 3850 m/s. According to the information given above, except core specimen number 7, the eight core specimens were chosen from moderately weathered and “moderately strong” and “strong” micaschist core specimens that represent 78% of all core specimens. The core specimen number 7 was chosen from highly weathered and weak rock micaschist core specimens that represent 10% of all specimens.

Table 11. Equations derived from the correlations between the V_p and the UCS values.

Çizelge 11. P -dalga hızı ve tek eksenli basınç değerleri arasındaki korelasyonlardan türeyen eşitlikler.

Proposed equations of the references	Rock type	References
$UCS = 0.020 V_{p-dry} - 10.05$	Micaschist	The current study
$UCS = 0.019 V_{p-dry} - 1.76$	Phyllites	Andrade and Saraiva (2010)
$UCS = 0.064 V_{p-dry} - 117.99$	Igneous and metamorphic	Sharma and Singh (2008)
$UCS = 0.0355 V_{p-dry} - 55$	Granites	Tuğrul and Zarif (1999)

E_M values representing the micaschist rock mass were obtained from MPT. These values were used in settlement and bearing capacity analyses. In addition, the excavation depth of cutoff was determined by considering the pressuremeter test results ($E_M \leq 103.3$ MPa). It was determined that the excavation depth under alluvium changes as a range between 5 m and 7.5 m. It was also determined that the values of E_M under the cutoff zone are greater than 454.4 MPa. In addition, minimum, maximum and arithmetic mean values of E_M were determined as 454.4 MPa, 2150 MPa and 1479.8 MPa, respectively. The rock mass modulus obtained from the Rock Mass Rating (RMR) tends to overestimate when compared with E_M based on MPT (Birid, 2015). Analyses indicated that the settlement for a 115 m high rockfill dam would be in the order of 2.16 mm and 2.23 mm. On the other hand, the ultimate bearing capacity of the micaschist beneath the dam were also computed as ranging between 2.96 MPa and 3.71 MPa.

The relationship between σ_c and $\frac{E_t}{\nu}$ for the Burgaz's micaschists was determined to be as follows; $\sigma_c = 5.3936 \times \left(\frac{E_t}{\nu}\right)^{0.5047}$. As known, weathering decreases not only strength but also the ratio of elastic modulus to Poisson's ratio. The experimental results from the micaschist weathered to different grades (*i.* Burgaz dam site, İzmir *ii.* Selçuk, Belevi, İzmir) were similarly plotted on a log-log paper. Thus, the relationship between σ_c and $\frac{E_t}{\nu}$ for both Burgaz and Selçuk's micaschists was also determined as follows; $\sigma_c = 7.5393 \times \left(\frac{E_t}{\nu}\right)^{0.4244}$. The slope of the strength versus $\left(\frac{E_t}{\nu}\right)$ plot for a particular rock is constant so that for each rock there is a unique linear equation on a log-log scale.

The plot of $\left(\frac{E}{\nu}\right)_{dynamic}$ against $\left(\frac{E}{\nu}\right)_{static}$ for the micaschists core specimens (WM) from the Burgaz dam site was obtained. Test results gave

a positive power relation of $\left(\frac{E}{\nu}\right)_{dynamic} = 1.2707 \left(\frac{E}{\nu}\right)_{static}^{0.968}$, $R^2 = 0.96$. Thus, it will be possible that the ratio of $\left(\frac{E}{\nu}\right)_{static}$ for the micaschists in the Burgaz dam site is computed by measurements of sonic wave velocities on the intact core specimens in the laboratory. In addition, it was understood that $\left(\frac{E}{\nu}\right)_{dynamic}$ is slightly higher than $\left(\frac{E}{\nu}\right)_{static}$. This difference can be explained as the presence of fractures as well as weak schistosity planes in micaschists.

Strength reductions in dry and water saturated conditions arisen due to the anisotropy effect were found as 47.5% and 69.3% respectively. These ratios were determined as 55.1% and 75.5% by Zhang et al. (2011). The results obtained from the two works are slightly different from each other. The first reason for this may be mineralogical composition and grain size of minerals. While the ratio of mica minerals changes between 27.9 % and 48.7 % in the study published by Zhang et al. (2011), this ratio is less than 20 % in this work. As compared on the basis of mineralogical compositions, it is seen that the ratios of mica minerals are fairly different from each other. This case negatively affects the strength of the rock. In addition, high mica content in rock can be increased the anisotropy effect. Because mica flakes existing along the schistosity planes easily weather to clay minerals. This is anyway the cause of the relatively weak nature of the schistosity planes. Thus, the sliding movement along these surfaces gets easy. The second reason may be the differences in weathering grade determination of the test specimens employed to the laboratory tests. As known, the investigation of the anisotropy effect must be conducted on the core specimens with the same weathering grade.

Increasing in V_p for different α - angles obtained from the measurements taken in dry and water saturated conditions were determined as follows; for $\alpha = 0 - 3^\circ$: 17.4%, for $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$: 36.3% and for $\alpha = 90^\circ$: 57.3%. When P - wave propagated vertical to the schistosity planes ($\alpha = 90^\circ$), the presence of water significantly increased the velocity (increasing the velocity: 57.3%). For the P - wave propagated along the schistosity planes ($\alpha = 0 - 3^\circ$), the presence of water only occurred a light effect on the wave velocity (increasing the velocity: 17.4%). In a similar way, V_{psat}/V_{pdry} ratios were also computed for different orientation of the schistosity planes varying from 0° to 90° with respect to the loading direction. It was determined that the V_{psat}/V_{pdry} ratio was the highest for $\alpha = 90^\circ$ (2.34) and the smallest for $\alpha = 0^\circ - 3^\circ$ (1.21), while the ratio for $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$ was intermediate (1.57). The results obtained from the computations of the V_{psat}/V_{pdry} ratio and increasing the velocity for different α - angles agree with each other.

CONCLUSIONS

It was determined that as the degree of weathering of the micaschists increases, to ratio also increases. On the other hand, V_{psat} to V_{pdry} ratio is roughly 1.67. The proposed equation to estimate the UCS values based on the V_p values is different from the empirical equations in the related literature due to the differences relating to the mineralogy and texture of the rock materials. In order to determine the static modulus of the micaschist rock material, there are two ways proposed in this study; one of these is to utilize from E_{dyn} and another one is from V_p . The equations in relation to the static modulus were determined as follows;

$$\begin{aligned} E_{static} &= 0.8767 \times E_{dyn}^{-0.58}, E_{static} = 1.1015 \times V_p^{2.4757}, \\ E_{static} &= V_p^{2.523} \times n^{0.095} \end{aligned} \quad (9)$$

It is concluded that the static modulus can be obtained from the dynamic tests, as shown in the equations for the studies range (i. e. E_{dyn} values lower than 30.5 GPa and soft rocks). Variation of the elastic modulus of the micaschist rock mass (E_M) with UCS-values was investigated and the relation given below was obtained; $E_M = 0.3221 \sqrt{\sigma_c} - 0.606$, $R^2 = 0.95$. In this work, the estimated ratios considering the RQD values (the equation of Zhang and Einstein, 2004 was used) and $(\frac{E_{MPT}}{E_i})$ ratios from this study were compared with each other. As a result, it was determined that they are quite consistent with each other. This case indicates that the elastic modulus representing the micaschist rock mass, which was used in the settlement analyses, is more suitable. It was concluded that the settlement for a 115 m high rockfill dam would be in the order of 2.23 mm. In addition, the ultimate bearing capacities of the micaschists beneath the dam were also computed as ranging between 2.96 and 3.71 MPa. It can be said that this would be a good site for the dam construction in terms of bearing capacity, amount of settlement and the deformability of the base rock beneath the dam structure.

Anisotropy effect will not occur in the bedrock beneath the cutoff level of the dam structure due to the existence of the schistosity planes with nearly horizontal position ($\alpha < 20^\circ$). It was determined that the V_p - values obtained as parallel to the schistosity planes were greater than those of other orientations in both dry and water saturated conditions. In water saturated condition, V_p -values were obtained as close to each other for $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$ and $\alpha = 90^\circ$. In dry condition, V_p -values obtained at $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$ were determined to be greater than those normal to the schistosity planes. On the other hand, It was also determined that the presence of water significantly increased the velocity (the velocity increase: 134%) when P-wave propagated as

vertical to the schistosity planes. For the P-wave propagating along the schistosity planes, it was determined that the presence of water slightly affects on the wave velocity (the velocity increase: 21.2 %). It was also determined that the highest UCS – values obtained from the UCS tests when loading is perpendicular to the schistosity planes in dry and water saturated conditions. On the other hand, the lowest ones were obtained from the tests when loading was inclined to the schistosity planes ($\alpha = 28^\circ - 30^\circ$) in similar conditions. It was determined that while the curves of stress values versus anisotropy angle (α) displayed a similar “V - shape”, the curves of V_p did not display such a trend. It was also determined that the largest and smallest σ_c^d / σ_c^e ratios were found as 2.35 (for $\alpha = 28^\circ - 30^\circ$) and 1.37 ($\alpha = 90^\circ$), respectively. On the other hand, the maximum strength reductions for dry and water saturated conditions due to the anisotropy effect were computed as 47.51 % and 69.31 %, respectively.

The equation given below was obtained for the micaschist weathered to different grades; $\sigma_c = 7.5393 \times \left(\frac{E_t}{\nu}\right)^{0.4244}$, where “m” is 0.4244. The slope of line (m) for the micaschists is constant and has the characteristic of the rock. On the other hand, the relation of $\left(\frac{E_t}{\nu}\right)_{\text{dyn}}$ versus $\left(\frac{E_t}{\nu}\right)_{\text{static}}$ for the weathered schists was found as $\left(\frac{E_t}{\nu}\right) = 1.2707 \left(\frac{E_t}{\nu}\right)_{\text{static}}^{0.968}$.

REFERENCES

- Al-Shayea, N.A., 2004. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock. *Engineering Geology*, 74, 139-156.
- Anon, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, Part 1 – Rock and soil materials. *Bull. Int. Ass. Engineering Geology*, 19, 364 – 371.
- Anon, 1981. British Standard 5930: Site Investigations, London. British Standards Institution, pp. 147.
- Andrade, P.S., Saraiva, A.A., 2010. Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 69, 207-214.
- ASTM D 2845-08, 1990. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rocks, American Society Testing Materials.
- ASTM D 2938-95, 1992. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Core Specimens. *Rock testing handbook*, 89-111.
- Baguelin, F., Jézéquel, J.F., Shields, D.H., 1978. The pressuremeter and foundation engineering. Clausthal: Trans Tech Publications.
- Behrestaghi, M.H.N., Rao, K.S., Ramamurthy, T., 1996. Engineering geological and geotechnical responses of schistosity rocks from dam project areas in India. *Engineering Geology*, 44 (1 – 4), 183 – 201.
- Birid, K.C., 2015. Interpretation of pressuremeter tests in rock, ISP7-PRESSIO 2015, Frikha, Varaksin&Gambin (Eds), Conference paper, pp. 289 – 300.
- Brotons, V., Tomas R., Ivorra S., Grediaga A., 2014. Relationship between static and dynamic modulus of a calcarenite heated at different temperatures: the San Julian's stone. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 73, 791–799.
- Brotons, V., Tomas R., Ivorra S., Grediaga A., Martinez T.M., 2016. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Material and Structures*, 49, 3021 – 3027.
- Christaras, B., Auger, F., Mosse, E., 1994. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures*, 27, 222–228.
- Chang, C.D., Zoback, M.D., Khaksar, A., 2006. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51 (3-4), 223-237.

- Clarke, B.G., 1995. Pressuremeters in geotechnical design. Blackie Academic and Professional, Chapman and Hall, London.
- Coon, R.F., Merritt, A.H., 1970. Predicting in-situ modulus of deformation using rock quality indices. *Determination of Rock*, ASTM STP, 477, 154 – 175.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock, Report AFML-TR-65-116. Air Force Weapons Laboratory (WLDC) Kirtland Air Force Base, New Mexico, 87117.
- Eissa, E.A., Kazi, A., 1988. Relation between static and dynamic Young's Moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomechanics Abstracts*, 25, (6), 479–482.
- Elçi, H., 2003. Engineering Geology of Selçuk Town, Izmir, Master of degree science, Ms Thesis, Dokuz Eylul University, İzmir-Turkey, p. 208.
- Entwisle, D.C., Hobbs, P.R.N., Jones, L.D., Guuss, D., Raines, M.G., 2005. The relation between effective porosity, uniaxial compressive strength and sonic velocity of intact Borrowdale Volcanic Group core samples from Sellafield. *Geotech. Geol. Eng.*, 23, 793-809.
- Gardner, W.S., 1987. Design of drilled piers in the Atlantic Piedmont. Smith R. E. editor. *Design*”, M. Te’eni, Ed., Wiley-Interscience, New York (1971), Part 2, p. 1379-1404.
- Gupta, A.S., Seshagiri, R.K., 1998. Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57, 161 – 172.
- Heap, M.J., Lavalice, Y., Petrakova, L., Baud, P., Reuschle, T., Varley, N.R., Dingwell, D.B., 2014. Microstructural controls on the physical and mechanical properties of edifice-forming andesites at Volcan de Colima. *Mex. J. Geophys Res. Solid Earth*, 119, 2925–2963.
- Horsrud, P., 2001. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. *SPE Drilling&Completion*, 16 (2), 68-73.
- Hughes, J., 2002. Use of pressuremeter in weak rocks of the lower Nanaimo Series. *Proceedings of 16th Annual Vancouver Geotech. Soc. Symp. on Foundation Eng.*, 29 – 30.
- Işık, N.S., Ulusay, R., Doyuran, V., 2008. Deformation modulus of heavily jointed-sheared and block greywackes by pressuremeter tests: Numerical, experimental and empirical assessments. *Eng. Geo.*, 101, 269 – 282.
- Kadakçı Koca, T., Koca, M.Y., 2018. Classification of weathered andesitic rock materials from the Izmir Subway line on the basis of strength and deformation. *Bull. of Eng. Geol. and the Environ.*, doi.org/10.1007/s10064-018-1346-y.
- Kayabasi, A., Gokceoglu, C., Ercanoglu, M., 2003. Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*40, 55 – 63.
- Kıncal, C., Koca, M.Y., 2019. Correlations of in-situ modulus of deformation with elastic modulus of intact core specimens and RMR values of andesitic rocks: a case study of the İzmir subway line, *Bull. Eng. Geol. and the Environ.*, doi.org/10.1007/s10064-018-01443-5.
- King, M.S., 1983. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 20, 237–241.
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S., 1978. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks-Testing Techniques and Results*, 11, p. 481. Trans. Tech. Publications, Clauthal, Germany.
- Mc Cann, D.M., Culshaw, M.G., Northmore, K., 1990. Rock mass assessment from seismic measurements, In *Field Testing in Engineering Geology*, F. G. Bell, M. G. Culshaw, J. C. Cripps and J. B. Coffey (eds.) Engineering Special Publication, No. 6, Geological Society, London, pp. 257 – 266.

- Menard, L., 1975. Interpretation and application of pressuremeter tests results to foundations design (D60). Sols Soils No. 26, Paris.
- Menard, L., Rousseau, J., 1962. L'évaluation des tassements. Tendances nouvelles. Sols Soils No. 1, pp. 13-20, Paris.
- Milton, J.S., McTeer, P.M., Corbet, J.J., 1997. Introduction to Statistics, McGraw and Hill Company.
- Najibi, A.R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., 2015. Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran. J. Pet. Sci. Eng., 126, 78 – 82.
- Nasseri, M.H.B., Rao, K.S., Ramamurthy, T., 2003. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 40 (1), 3–23.
- Sharma, P.K., Singh, T.N., 2008. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. Bull. Eng. Geol. Environ., 67, 17-22.
- Singh, V.K., Singh, D., Singh, T.N., 2001. Prediction of strength properties of some schistosity rocks from petrographic properties using artificial neural networks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 38 (2), 269 – 284.
- Tarnawski, M., 2004. The Perfect Menard pressuremeter Curve. Archives of Hydro-Eng. and Environmental Mechanics, 15 (4), 387–402.
- Türk, N., Dearman, W.R., 1983. A practical classification of rocks for engineering purposes. Bull. Int. Assoc. of Eng. Geo., 28, 162-167.
- Tuğrul, A., Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. Engineering Geology, 51, 303-317.
- Uslu, S., 2017. Engineering Geology of a Rock Slope Located in Right Bank of the Burgaz Dam Site, İzmir, Master of degree science, Ms Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, p. 104.
- Vanheerden, W.L., 1987. General relations between static and dynamic moduli of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 24, 381–385.
- Zhang, L., Einstein, H.H., 2004. Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 41, 337–341.
- Zhang, X.P., Wong, L.N.Y., Wang, S.J., Han, G.Y., 2011. Engineering properties of quartz mica schist. Engineering Geology 121, 135–149.

Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Karayolu) Bölgesinin Kaya Düşmesi Duyarlılığının İnsansız Hava Aracı (İHA) Görüntüleri Kullanılarak Konik Yayılım Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi

Evaluation of Rockfall Susceptibility of Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Highway) Region by Cone Propagation Approach Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images

Aycan KALENDER* , **Harun SÖNMEZ** 

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, 06800 Beytepe Ankara
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş (Received): 02 Temmuz (July) 2019 / Düzeltme (Revised): 01 Ağustos (August) 2019 / Kabul (Accepted): 15 Ağustos (August) 2019

ÖZ

Kaya düşmesi olayı Varnes (1978) tarafından, dik yamaçlardaki eklemlili kaya kütlelerinden serbestleşen kaya bloklarının eğim aşağı yüksek hızda hareket ettiği bir duraysızlık türü olarak tanımlanmaktadır. Kaynak bölgesindeki kaya bloğu serbest kaldığı noktadan itibaren bir yörünge boyunca enerjisi sönümlenip durana kadar hareketine eğim aşağı devam eder. Deterministik yaklaşımlarda gerek yamaç yüzeyine ve gerekse bloğa ait çok sayıda fiziksel ve mekanik parametre girdi olarak kullanılmakta olup, bu nedenle sonuçların gerçekçiliği de bu fazla sayıdaki girdi parametresiyle yakın ilişkilidir. Bunun bir yansıması olarak özellikle bölgesel ölçekte kaya düşmesi haritalarının hazırlanmasında pratik değeri oldukça yüksek olan ampirik yaklaşımlar tercih edilmektedir. Bu ampirik yaklaşımlardan Jabodeyoff ve Labiouse (2011) tarafından önerilen konik yayılım yaklaşımı sadece kaynak alan haritası ve sayısal yükseklik modelini (SYM) girdi parametresi olarak kullanması sebebiyle oldukça pratik olup, büyük alanların bölgesel olarak kaya düşmesi açısından değerlendirilmesinde öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, SYM üzerinde olası yayılım zonunun belirlenmesi ilkesini temel alan bu yöntemin sınanması amacıyla Kargabedir Tepe kaya düşmesi bölgesinde çeşitli saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kargabedir Tepe'deki saha çalışmaları kapsamında inceleme alanının yüksek çözünürlüklü SYM'nin elde edilmesi amacıyla bir dron (insansız hava aracı -İHA) kullanılarak bölgenin yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları alınmıştır. Bölgeye ait 40x40 cm çözünürlüğe sahip bir sayısal yükseklik modeli ve 5x5 cm çözünürlüklü ortorektifiye hava fotoğrafı oluşturulmuştur. Çalışma sahasına ait SYM kullanılarak konik yayılım yaklaşımıyla farklı enerji çizgi açısı değerleri için yayılım zonu haritaları üretilmiştir. Ayrıca bölgedeki mevcut düşmüş bloklarının konumları belirlenmiş ve en-boy-yükseklikleri ölçülmüştür. Buna ek olarak düşen kaya bloklarının boyutları ve konumları ortorektifiye fotoğrafı üzerinde de belirlenmiş ve sahada yapılan ölçümlerle uyumlulukları sınanmıştır. Saha ve ortorektifiye fotoğraftan elde edilen bloklara ilişkin en-boy-yükseklik ölçümlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kaya düşmesi, Konik Yayılım Yaklaşımı, İnsansız Hava Aracı (İha), Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), Ortorektifiye Fotoğraf

ABSTRACT

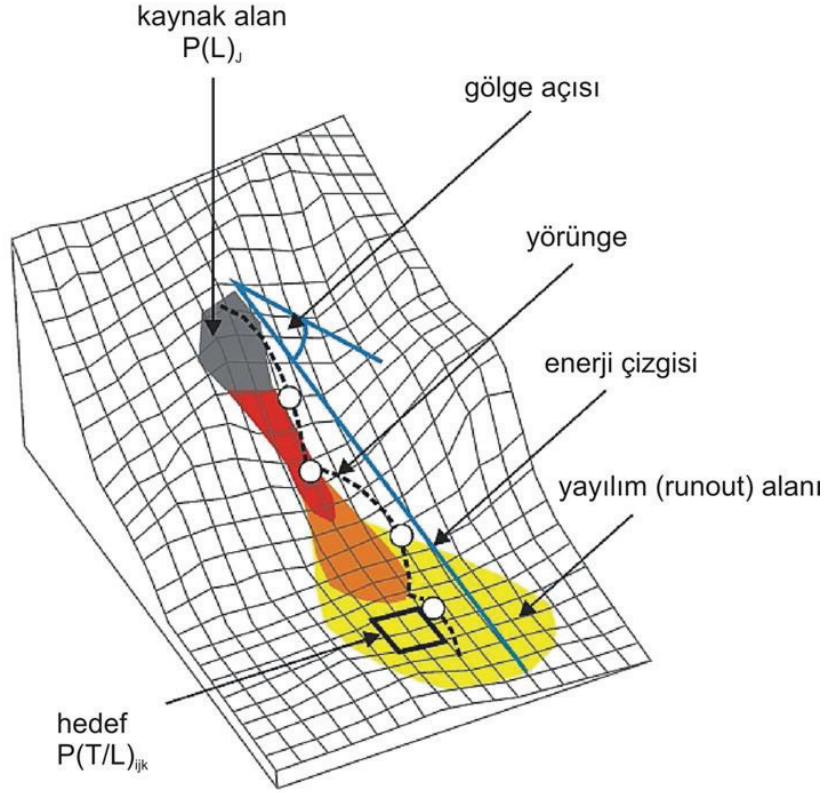
Rockfall is defined by Varnes (1978) as a type of instability in which rock blocks released from rock masses on steep slopes and move at high speed down along the slope. The rock block releases from the source point moves downward along a trajectory until its energy is extinguished. In deterministic approaches, a large number of physical and mechanical parameters of both slope surface and block, are used as inputs, and therefore the results are closely related to accuracy of this number of input parameters. As a reflection of this, empirical approaches, which have a very high practical value, are preferred especially in the preparation of rockfall maps on regional scale. The cone propagation approach proposed by Jabodeyoff and Labiouse (2011) is a practical method for regional scale and stands out among other empirical approaches due to uses only source area map and digital elevation model (DEM) as input parameters. In this study, in order to test this method various field studies were carried out in Kargabedir rockfall area based on the principle of determination of possible propagation zone on DEM. In the field studies carried out at Kargabedir Hill, high resolution aerial photos of the region were taken using a Dron (unmanned aerial vehicle-UAV) to obtain a high resolution DEM. Thus, a high-resolution (40 cm/pixel) DEM and a very high resolution (5 cm/pixel) orthorectified aerial image were generated for the area. Propagation zone maps of Kargabedir rockfall area were prepared for different energy line angle values using high-resolution DEM with cone propagation approach. In addition, the positions and dimensions (height/length/width) of the fallen blocks were measured in the region. The dimensions and positions of the fallen blocks were also determined from the orthophoto and their compatibility with the site measurements was examined. It has been observed that width-length-height measurements of the fallen blocks acquired from the field and orthophoto are compatible.

Key words: Rockfall, Cone Propagation Approach, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Digital Elevation Model (DEM), Orthorectified Aerial Image

GİRİŞ

Kaya düşmelerinin ani olarak gelişmeleri ve hızlı yayılım göstermeleri nedeniyle karayolları, demiryolları ve yamaç bölgelerindeki yerleşim alanlarında büyük tehlikelere yol açabilmektedir. Kaya düşmeleri dik yamaçlarda yüzeylenen kaya kütlelerindeki bloklara etki eden çeşitli iklimsel ve biyolojik etkiler veya deprem gibi kuvvetlerle bloğun dengesinde değişime sebep olan tetikleyiciler tarafından başlatılır (Kalender, 2017). Kaya bloğunun yerinde durağan haldeki potansiyel enerjisi öncelikle eğim aşağı hareketle birlikte kinetik enerjiye dönüşürken, diğer taraftan da yüzey ile temas ettiği bölgelerde ise çarpma, sürtünme ve yuvarlanma sonucunda enerji kayıplarıyla hareketine devam eder ve

tüm enerjisi sönmülence kaya bloğu durur. Bu yönüyle bakıldığında kaya düşmesi olayının mekanizması bilinen temel fizik prensiplerine dayanmaktadır (Şekil 1). Düşen kaya bloğunun yüzey teması sırasında olası parçalanması durumunun gerçekçi bir şekilde deterministik analizlerle yansıtılabilmesi tam olarak mümkün olamamaktadır. Bununla birlikte, 3-D (üç boyutlu) ayrık eleman analizleriyle kaya düşmesi ve kaya çığları sırasında kaya bloklarının parçalanmasının araştırılmasına yönelik Zhao vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi düşen kaya bloklarının parçalanması ve eğim aşağı yüzeyde dağılımlarının belirlenmesine yönelik yeni yöntemsel yaklaşımlar kaya düşmesi haritalama çalışmalarına katkı sağlayabilecek niteliktedir.



Şekil 1 . Kaya düşmesi tanımlamaları ve ilgili parametreler (Volkwein vd., 2011).

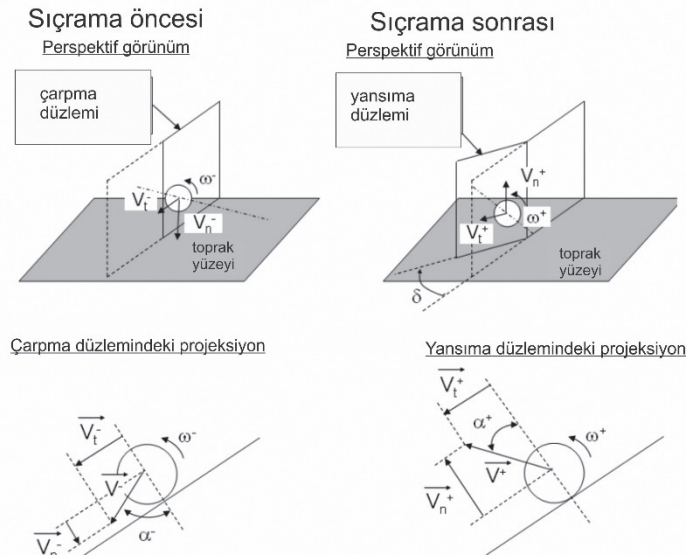
Figure 1. Definition of rockfall and related parameters (Volkwein et al., 2011).

Kaya bloğunun serbest kaldığı nokta ile durma noktasına kadar uzanan mesafe “menzil mesafesi” (ulaşabileceği en uzak mesafe) olarak tanımlanmaktadır (Kalender, 2017). Düşen kaya bloğu yörüngesi boyunca kayma (sliding/toppling), serbest düşme (fall), sıçrama (bouncing/impact) ve yuvarlanma (rolling) olmak üzere dört temel süreç geçirir (Broili, 1973). Serbest düşme ile başlayan harekette bloğun yamaç yüzeyine çarpmasıyla meydana gelen sıçrama hareketi yamaç eğiminin 70° ’den düşük olduğu durumlarda gerçekleşen harekettir. İlk çarpma sırasında blokta kırılma ve parçalanmalar meydana gelebilir. Herhangi bir kırılma gerçekleşmese de düşen blok düşme

sırasında kazandığı enerjinin %75 ila %86’sını çarpma ile kaybeder (Broili, 1973; Bozzolo ve Pamnini, 1986; Evans ve Hungr, 1993). Bu nedenle sıçrama hareketinde (çarpmanın etkisiyle) çarptığı yüzeyin özellikleri ve yüzeyin yönelimine bağlı olarak kaya bloğunun hareket yönelimi ve enerjisi değişkendir. Bu nedenle sıçrama olayının gerçekleştiği evre konuya ilişkin literatürde kaya düşmesinin en karmaşık ve belirsiz evresi olarak tanımlanmaktadır (Broili, 1973; Bozzolo ve Pamnini, 1986; Azzoni, 1995). Dolayısıyla blok hareketinin türünü belirleyen en önemli etken yamaç geometrisi ve sürecin üzerinde geliştiği yüzeyin özellikleridir. Deterministik analiz modellerinde

bloğun sıçrama hareketini kontrol eden en kritik parametre “geri sıçrama katsayısı”dır (coefficients of restitution). En basit haliyle geri sıçrama katsayısı yamaç yüzeyine çarpan bloğun hızının veya enerjisinin çarpmadan sonraki hız veya enerjiye oranı ($R=V_r/V_i$) olarak tanımlanır (Chau vd., 2002). Çarpma noktasında hareketin vektörel yönüne bağlı olarak teğetsel geri sıçrama katsayısı (R_t) ve normal geri sıçrama katsayısı (R_n) olmak üzere iki bileşeni vardır (Şekil 2). Normal ve teğetsel geri sıçrama sayılarının seçilmesi için literatürde yüzey özellikleriyle göre çok geniş aralıklara sahip sayısal öneriler bulunmakla birlikte, mümkün olması halinde kaynak bölgeden atılan veya daha önce düşmüş olan kaya bloklarının geriye dönük analizleriyle R_n ve R_t değerlerinin saha özgü belirlenmesi de dikkate alınabilmektedir (Kalender, 2017).

Kaya düşmesi olayının değerlendirilmesine yönelik yaklaşımları deterministik ve olasılıksal (iki 2D veya üç 3D boyutlu) analizler ve ampirik yaklaşımlar olarak iki alt grupta ele almak mümkündür. Kaynak bölgedeki kaya bloğunun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşümü sırasında sıçrama ve sürüklenme sırasındaki enerji kayıplarıyla durma noktasına kadar kaya bloğunun yörüngesinin temel fizik kurallarıyla şekillenmesi bu analizlerin temelini oluşturmaktadır. Her ne kadar kaya düşmesi mekanizmasının temel fizik prensipleriyle açıklanması mümkün olmasına karşın, bu analizler gerçekte önemli düzeyde bazı belirsizlikler ve sınırlamalar içermektedir. Kaya bloğunun hareketindeki en önemli karmaşık süreç sıçrama olayı sırasında yaşanmaktadır. Sıçrama hareketi sırasında kaya bloğunun



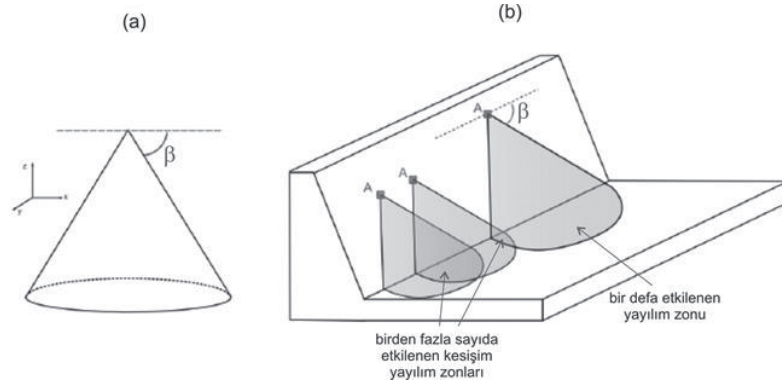
Şekil 2. Çarpma öncesi ve sonrasında bloğun hız bileşenleri (Volkwein vd., 2011).

Figure 2. Block velocity components before and after rebound (Volkwein et al., 2011).

çarptığı yüzeyde parçalanması halinde bu durumun analizde dikkate alınması tam olarak mümkün olamamaktadır. Bu sınırlamanın yanı sıra diğer bir güçlükte bu tür analizlerde bir birbirleriyle etkileşimli çok sayıda girdi parametresinin gerçekçi bir şekilde seçilmesi aşamasında yaşanmaktadır. Kaya düşmesi olayının potansiyel olarak gelişebileceği alanlarda özellikle alanın büyüklüğüne ve risk altındaki elemanın özelliklerine bağlı olarak analiz ve değerlendirme yönteminin seçilmesi ön plana çıkar. Deterministik ve olasılıksal analizlerde düşen kaya bloğunun yörüngesinin öngörülebilmesi ve ayrıca, yörünge boyunca hızının ve enerjisinin daha gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi mümkündür ve özellikle önleme yapılarının tasarımında oldukça yararlı bilgiler sunabilmektedir. Buna karşın, uygulama açısından pratik bir ampirik yöntem olan Jabodeyoff ve Labiouse (2011) tarafından

önerilen konik yayılım yaklaşımı (cone propagation) geniş sahaların kaya düşmesine karşı duyarlılıklarının tanımlanması amacıyla yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Konik yayılım yaklaşımı bir kaya düşmesi bölgesindeki potansiyel kaynak alanları ve çıkış bölgelerini tahmin etmeyi mümkün kılar. SYM'den (Sayısal Yükseklik Modeli) oluşturulan eğim haritaları kullanılarak belli bir eğime sahip alanlar potansiyel kaynak alanlar olarak belirlenebilir.

Konik yayılım yaklaşımında SYM'de kaynak alandan düşen kaya bloğunu temsil eden her hücreden başlayan, diğer bir ifade ile tepe (apex) noktası bu hücrede olan ve enerji çizgi açısı veya gölge açısı kavramlarına göre belirlenen β açısı ile düşey konumda bir koni çizilir. Bu düşey koninin eğim aşağı kesimdeki topoğrafyayla ara kesiti sonucunda elde edilen alan kaya düşmesi yayılım zonu olarak belirlenir (Şekil 3).



Şekil 3. (a) β yayılım açısına sahip yayılım konisi, (b) basitleştirilmiş bir topoğrafya üzerinde bazı yayılma konilerinin kesişimi (Derron vd., 2016).

Figure 3. (a) cone of propagation with an angle of propagation β ; (b) intersection of some propagation cones on a simplified topography. (Derron et al., 2016).

Jaboyedoff ve Labiouse (2011) tarafından yazılan ve kullanımı serbest olan CONEFALL yazılımıyla, yayılım zonları, hız ve kinetik enerji dağılımı hesaplamalarının yanı sıra yayılım zonundaki her bir hücredeki kaya düşmesinden potansiyel etkilenme sayısı da belirlenebilmektedir. CONEFALL yazılımının çıktı dosyası kullanılarak hazırlanmış kaynak haritası ve sayısal yükseklik modelinin yanı sıra enerji çizgisi açısı, blok kütlesi gibi diğer girdi parametrelerine gereksinim duymaktadır. Çıktı dosyaları ASCII formatında olup, CBS programlarıyla kolaylıkla haritaya dönüştürülebilmektedir.

Kaya düşmesi duyarlılık haritalamalarında CBS verilerinin kullanılması pratik ve sık kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca, SYM'nin çözünürlüğü arttıkça, oluşturulan eğim haritaları topoğrafyayı daha iyi temsil eder. Ancak, 1/1000 ölçekli topoğrafik haritalara kolaylıkla ulaşılamamasından dolayı bu büyük ölçekli topoğrafik haritalardan yüksek çözünürlüklü bir SYM üretmek her zaman mümkün olmamaktadır. Buna karşın, "Hareketten Yapı-Çok Bakılı Stereofotogrametri" (HY-ÇBS) yöntemi, yüksek çözünürlüklü SYM ve ortorektifiye hava fotoğrafları elde etmek için iyi bir alternatiftir. Bu çalışmada, pilot bölge olarak seçilen Kargabedir Tepe kaya düşmesi alanının yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları hafif bir İHA (insansız hava aracı) (dron) kullanılarak elde edilmiştir. HY-ÇBS yöntemi ile bölgenin yüksek çözünürlüklü SYM (0.4 m / piksel) ve çok yüksek çözünürlükte ortorektifiye hava görüntüsü (0.05 m / piksel) oluşturulmuştur. Ayrıca ulaşılması güç sahalarda uygulama avantajının sınanması amacıyla düşen kaya bloklarına ilişkin veriler öncelikle sahada doğrudan ölçülmüş ve İHA görüntülerinden elde edilen ortorektifiye hava fotoğrafından da aynı kaya bloklarının boyutları ölçülerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Çalışmanın son

aşamasında ise Kargabedir Tepe ve etki alanına yönelik olarak kaya düşmesi duyarlılık haritası da konik yayılım yaklaşımı kullanılarak hazırlanmıştır.

KONİK YAYILIM YAKLAŞIMIYLA KAYNAK ALANLARIN TANIMLANMASI VE MENZİL MESAFELERİNİN (RUN-OUT DISTANCE) BELİRLENMESİ

Kaya düşmesi haritalamalarında ampirik yaklaşım modeli olarak konik yayılım yaklaşımında kaynak alandan serbestleşen kaya bloğu için topoğrafya ve menzil mesafesi arasındaki geometrik ilişki temel alınmaktadır. Bunun için ilk adım kaya bloklarının sertbestleşebileceği kaynak alanların belirlenmesidir. Bölgesel ölçekteki çalışmalarda eğim haritaları kullanılarak belirli bir eğimin üstündeki alanlar potansiyel kaynak alanlar olarak ayırtlanabilmektedir. Diğer bir ifadeyle sayısal yükseklik modelinden (SYM) üretilen eğim haritalarında belirli bir eğimin üzerindeki alanlar kaya düşmesi açısından potansiyel aktif kaynak alanlar olarak değerlendirilmektedir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken en önemli durum SYM'in çözünürlüğünün artmasıyla eğim haritalarının da gerçek topoğrafyayı temsil edici niteliğinin artmasıdır. Bu nedenle SYM çözünürlüğünün çalışma alanının büyüklüğüne ve SYM'in hazırlanmasında kullanılacak altlık haritanın ölçeğine de bağlı olarak en fazla 25m x 25m olması önerilmektedir. Diğer bir ifadeyle sayısal yükseklik modelinin çözünürlüğü ile aynı lokasyon için hesaplanabilecek eğim değeri yakından ilişkili olup, çözünürlüğün artmasıyla sahadaki gerçek değere daha fazla yaklaşılabileceği kuşkusuzdur.

Potansiyel kaynak alanların sınır (en düşük) eğim açısı SYM'nin çözünürlüğe bağlı olarak eşitlik (1)'den belirlenebilmektedir (Troisi vd., 2008; Larcher, 2012'den).

$$\alpha = 55 \times RES^{0.075} \quad (1)$$

Burada, α (derece) potansiyel kaynak alanlar için sınır eğim değerini, RES ise sayısal yükseklik modelinin çözünürlüğünü ifade etmektedir. Örneğin yüksek çözünürlüklü (1x1 m) SYM ile sınır açısı 55^0 olarak belirlenirken, çözünürlüğün 25x25 m olması durumunda sınır açısı 43^0 'ye düşmektedir.

Kaya düşmesi potansiyel kaynak alanları bu basit ampirik yaklaşımla SYM'nin çözünürlüğüne ve varsa serbest düşme yüksekliğine göre ayırtlanabilmektedir. Ancak sadece SYM üzerinde ayırtlanan kaynak alanların potansiyel kaynak alan olduğunun altını çizerek, saha gözlemleri ve/veya hava fotoğrafları ve uydu görüntüleri üzerinde yapılacak çalışmalarla potansiyel kaynak alanların içerisinden kaynak olmayacak alanların çıkarılması kaya düşmesinden etkilenecek sahalara yönelik haritalamaların daha gerçekçi olmasını sağlayacaktır.

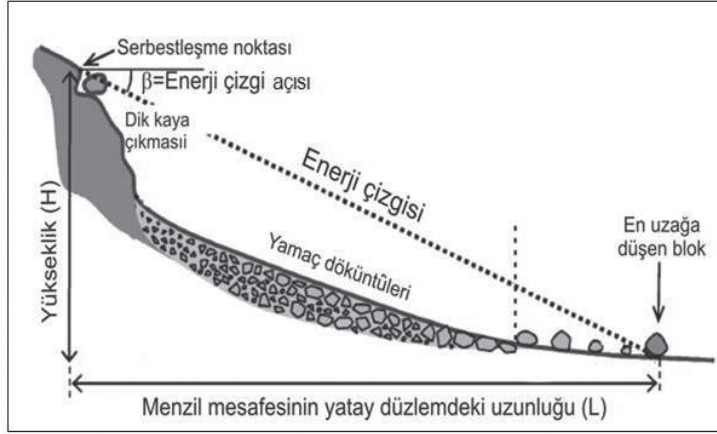
Bu çalışmada çok daha pratik olması ve SYM'nin çözünürlüğüne bağlı olarak eşik bir açı değerinden itibaren potansiyel kaynak alanların belirlendiği çözünürlük-eşik açı değeri ilişkisi kullanılmıştır.

Ritchie (1963) kaya bloğunun menzil mesafesinin kaynak alan (başlama noktası), blok şekli ve geometrisi, yüzey topoğrafyası ve kaya kütlelerinin mekanik özellikleri tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir. Düşen kaya bloklarının ulaşabileceği en uzak (menzil) mesafelerin belirlenmesinde dikkate alınan

konik yayılım açısı olarak sıklıkla aşağıdaki iki tanım kullanılmaktadır. Her iki tanımın da en önemli avantajı menzil mesafelerinin (run-out distances) sadece sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında kolaylıkla belirlenebilmesidir. Bu çalışmada konik yayılım açısı olarak enerji çizgi açısı kavramı kullanılmıştır.

i. *Gölge Açısı (Shadow Angle)*: kavramında kaya bloğunun kaynak alan içerisinde serbest kaldığı noktanın yerine dik topoğrafyadan serbest düşme ile çarptığı nokta gölge açısının başlangıç noktası olarak dikkate alınır. Kaynak alandan yamaç döküntüsünün tepe noktasına düşen blok, kazandığı kinetik enerjinin büyük bir kısmının bu çarpışma sırasında kaybedecektir. Gölge açısının ilk çarpışmadan sonraki durumu ifade ettiğini ön görerek Evans ve Hungr (2003) tarafından menzil mesafesinin (run-out distance) belirlenmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

ii. *Ulaşma Açısı (Reach Angle) veya Enerji Çizgi Açısı (Energy Line Angle)*: Heim (1932) tarafından tanımlanan enerji çizgi açısı literatürde Fahrboschung açısı veya ulaşma açısı (reach angle) (Corominas, 1996) gibi farklı isimlerle de anılmaktadır. Enerji çizgi açısı kaya bloğunun kaynak alanda serbest kaldığı nokta ile duracağı son nokta arasındaki doğrusal çizginin eğimi ile ifade edilir (Şekil 4). Diğer bir ifadeyle enerji çizgi açısı kavramında, düşen kaya bloğunun yörüngesi boyunca belirli bir açıyla ($\beta = \arctan(H/L)$) eğim aşağı uzatılan doğrunun (enerji çizgisi) topoğrafyayı kestiği nokta menzil mesafesi olarak tanımlanır (Artuç, 2014).



Şekil 4. Enerji çizgi açısı (β) kavramı (Capons vd., 2009'dan).

Figure 4. Energy line angle (β) concept (modified after Capons et al., 2009).

Heim (1932) tarafından önerilen ve uygulama pratiği yüksek olan enerji çizgi açısı kavramına yönelik pek çok araştırmacı farklı sahalarda gözlemler ve ölçümler yapmışlardır. Kaya düşmesi olayında düşen kaya bloğunun belirli bir noktada durması gerçeği nedeniyle farklı sahalarda kaynak noktasından itibaren aşağı uzanan bu açının belirli bir aralıkta değiştiğini belirlemişlerdir (Çizelge 1). Uygulamadaki pratik değeri nedeniyle bu ampirik yaklaşım özellikle bölgesel ölçekteki kaya düşmesi haritalamaları ve değerlendirmelerinde kaya düşmesinin menzil mesafelerinin belirlenmesinde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak enerji çizgi açısındaki geniş dağılım aralığı kullanımda bir sınırlama yaratmaktadır. Kaya düşmesi olayının doğası gereği, enerji çizgisi açısının değişim

aralıkları kaynak alandan eğim aşağı uzanan topoğrafyaya, kaya bloğunun ağırlığına, şekline, jeolojik özelliklere, kaya bloğu ile topoğrafya arasındaki sürtünme direncine, normal ve teğetsel enerji geri sıçrama oranları, eğim aşağı bitki örtüsü ve ağaçlık alanların varlığı gibi çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu nedenle, kaya bloklarının menzil mesafesine bağlı olarak tek bir açı değerinin kullanılması yerine kaynak bölgeden eğim aşağıya kaya düşmesi olayından farklı etkilenme derecelerinin ifade edilebildiği kaya düşmesi duyarlılık haritalarının hazırlanması daha fazla tercih edilmektedir. Bu durumda farklı duyarlılık durumlarına ait enerji açısı değerlerine gereksinim duyulmakta olup, her bir enerji çizgi açısı değeri için konik yayılım yaklaşımının uygulanması gerekmektedir.

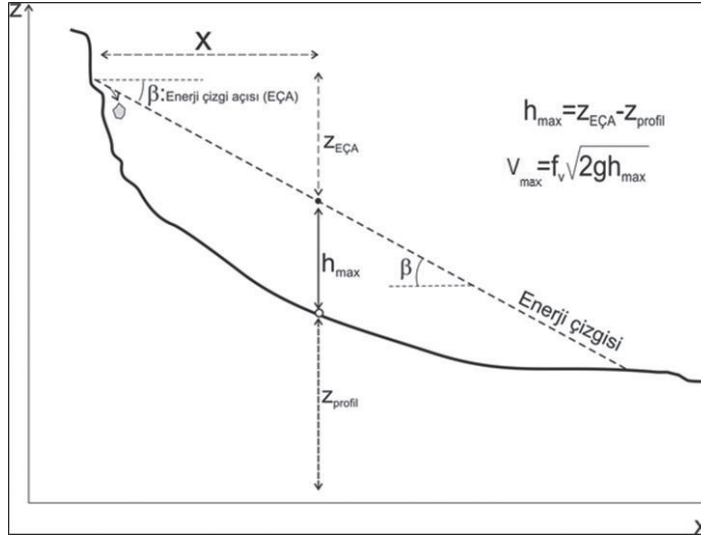
Çizelge 1. Literatürde enerji çizgi açısı için önerilen açı değeri aralıkları (Larcher vd., 2012).

Table 1. Energy line angle range in the literature (Larcher et al., 2012).

Yazar Adı ve Yılı	Enerji çizgi açısı için önerilen açı değerleri (Parantez içerisinde Geometrik Açı)	
	En Düşük Değer Aralığı	Ortalama Değer
Shreve, 1968	(26.57° - 38.66°)	—
Onofri ve Candian, 1979	(28.34° - 40.73°) (28,84°-41,73°)	—
Grunder, 1984	(32.6° - 33.4°) (33.1° - 34.4°)	—
Domaas, 1985; Toppe, 1987'den	32° (33°)	—
Gerber, 1994	(33° - 37°) (33.5° - 38°)	—
Meissl, 1998	(29° - 47,5°) (29.5°-48.5°)	38° (38°)
Heinimann vd., 1998	(33° - 37°) (33.5° - 38°)	—
Ayala-Carcedo vd., 2003	(29.1° - 38.9°)	(31.9°)
Jaboyedoff ve Labouise, 2003	32° (33°)	—
Jaboyedoff ve Labouise, 2011	(32,6° - 35,6°)	34°
Corominas vd., 2003	(26° - 54°) (27° - 55°)	—
Dorren ve Berger, 2005, 2006	31.3° - 37° (31.9° - 38 °)	—
Copons vd., 2009 (1.Aşama)	(36.87° - 56.3°)	—
Copons vd., 2009 (2.Aşama)	(28.81° - 42.0°)	—
Scheidegger, 1973	(29.68° - 39,69°)	—
Marquinez vd., 2003 (1.Aşama)	(32.5° - 40.9°)	(31.5° - 40.2°)
Marquinez vd., 2003 (2.Aşama)	(29.4° - 38.5°)	(31.5° - 40.2°)
Deparis vd., 2008	(31,61° - 47,20°)	—
Hyndman ve Hyndman, 2008	(33°)	—
Berger vd., 2009 (orman)	(27.67° - 33.88°)	—
Berger vd., 2009 (orman hariç)	(31.32° - 37.86°)	—
Berger vd., 2009	(32.57° - 48.99°)	—

Kaya düşmesi deterministik analizlerinde menzil mesafesinin yanı sıra, yörünge boyunca kaya bloğunun hızı, kinetik enerjisi ve sıçrama yüksekliği gibi özellikle önleme yapılarının seçilmesi ve tasarlanmasında kullanılan diğer çıktılarda elde edilebilmektedir. Enerji Çizgisi Açısı kavramının kullanılması durumunda da belirli kabullerle bu değerlere ilişkin çıktılar elde edilebilmektedir.

Kaynak noktasından durma noktasına kadar yatay mesafenin herhangi bir noktasında enerji çizgisiyle yamaç profili arasındaki kot farkı (Dh) kullanılarak, enerjinin korunumu gereği ve potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümü ilkesi dikkate alınarak kaya bloğunun hızı da hesaplanabilmektedir. Bu değerlendirmenin geometrik girdileri ve eşitlikleri Şekil 5'te görülmektedir.



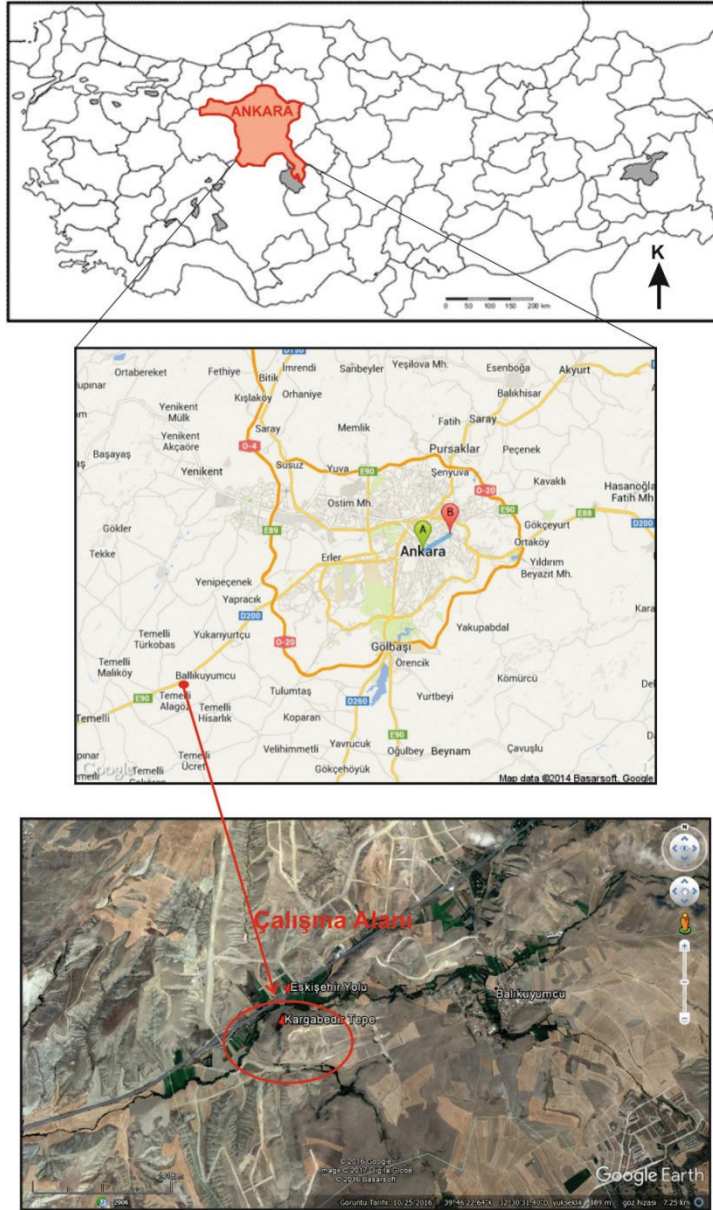
Şekil 5. Kaya bloğunun hızının enerji çizgi açısı ve yamaç profiline bağlı olarak hesaplanması (Larcher vd., 2012).

Figure 5. Calculation of rock block velocity based on energy line angle and slope profile (Larcher et al., 2012).

Kaya bloğunun hızının hesaplanmasında eşitlikteki f_v hız için bir düzeltme veya kayıp faktörü olup, kaya bloğunun havadaki dönel hareketine ve sürtünmesine bağlı olarak düşen bloğun kinetik enerjideki kaybının %20 kabul edilmesi durumunda $f_v=0.9$ ($=0.8$) alınmasının uygun olacağı (Gerber, 1994; Jaboyedoff ve Labiouse, 2003; 2011) gibi araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Kot farkının en büyük olduğu durumda (Dh_{max}) ise kaya bloğunun en yüksek hızı hesaplanmış olur. Düşen kaya bloğunun kütlelerinin bilinmesi durumunda ise hız (v) ve kütle (m) bağlı olarak kinetik enerjisi ($E_k=0.5mv^2$) de hesaplanabilmektedir. Kaya düşmesi protansiyeli bulunan sahalarda hız ve kinetik enerji haritaları seçilen blok kütlesi ve en büyük veya belirli bir menzil mesafesi için konik yayılım yaklaşımıyla da hazırlanabilir.

KARGABEDİR TEPE SAHA ÇALIŞMALARI

Çalışma kapsamında inceleme alanı olarak seçilen Kargabedir Tepe $39^{\circ}46'08.59''$ ile $39^{\circ}46'25.48''$ kuzey enlemleri, $32^{\circ}29'42.34''$ ile $32^{\circ}29'54.29''$ doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 6). Ankara ilinin Yenimahalle ilçesine bağlı Balkuyumcu Köyü sınırları içinde kalan Kargabedir Tepe güneybatısında Alagöz, kuzeybatısında ise Alcı Köyleri tarafından çevrelenmektedir. Yaklaşık 950 metre yüksekliğindeki bu tepe volkanik aktivite ile oluşmuş ve bölgedeki Jura yaşlı kireçtaşlarını keserek yükselmiştir.



Şekil 6. Kargabedir Tepe yer bulduru haritası.

Figure 6. Location map of Kargabedir Hill.

Kargabedir Tepe bölgesi volkanik bir kaya kütlesi olup, kaya blokları birbirine yaklaşık dik konumlu süreksizliklerle sınırlandırılmış dörtgen şekilli bloklardan oluşmaktadır (Şekil 7). Saha çalışmaları kapsamında, Kargabedir Tepe’de

kaynak bölgeden düşmüş kaya bloklarının koordinatları ve geometrileri de dikkate alınarak üç eksenle boyutsal bilgi sağlanması amacıyla en uzun (boy), en kısa (en) ve “yükseklik” boyutları ölçülerek veri formlarına kaydedilmiştir. Düşen

kaya bloklarının ölçümlemesinde olabildiğince sahadaki genel yayılımı da yansıtacak şekilde çok sayıda örnekleme yapılmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca, kaya düşmesi olayının üzerinde geliştiği yamaç aşağı yüzeyin özellikleri de tanımlanmıştır.



Şekil 7. Kargabedir Tepe sahasındaki bloklu yapıdaki kaya kütlesi.

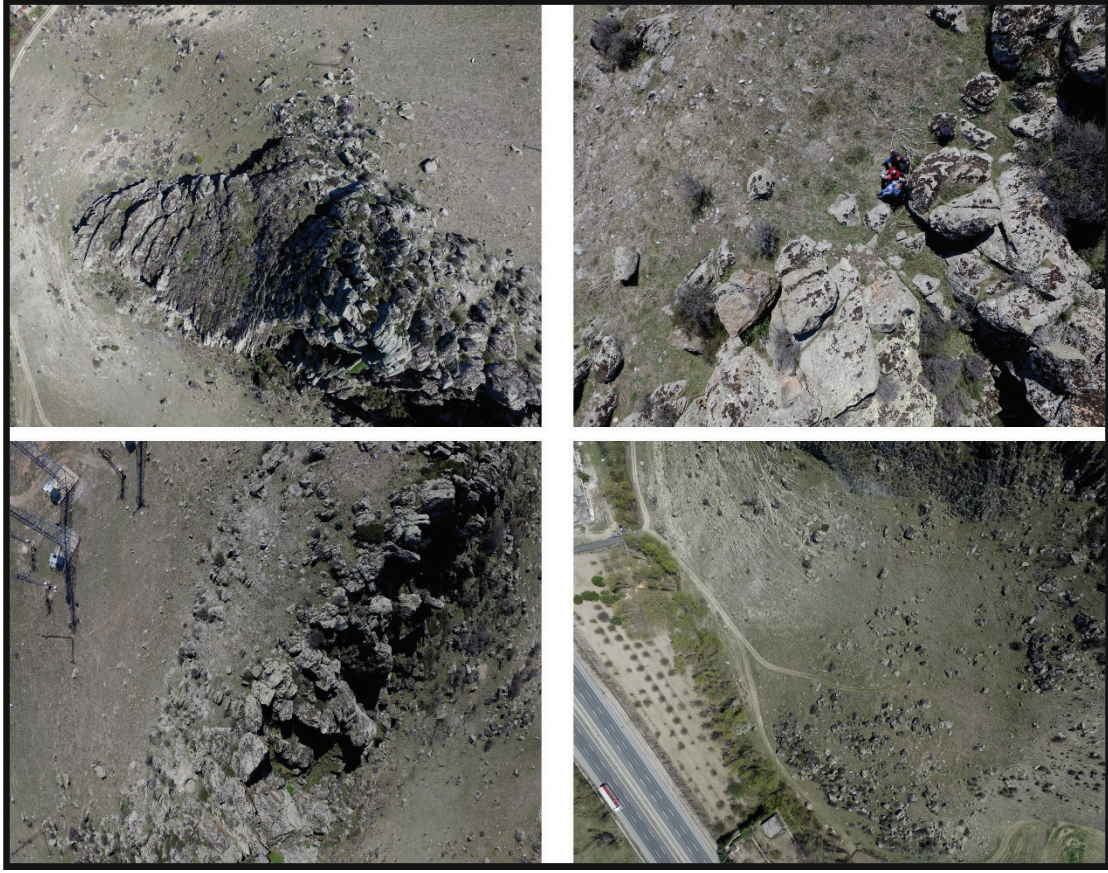
Figure 7. Rock masses in Kargabedir Hill rockfall area.

İHA Görüntüleri ile Sayısal Yükseklik Modeli ve Ortorektifiye Fotoğraf Görüntülerinin Oluşturulması

Son yıllardaki gelişmelerle birlikte, havadan çok sayıda bindirmeli yüksek çözünürlüklü fotoğraflardan uygun bir yazılımla ortorektifiye fotoğraf görüntüleri hazırlanarak sayısal yükseklik modelinin oluşturulması tekniği Kargabedir Tepe kaya düşmesi bölgesinde

uygulanmıştır. Ayrıca bu yüksek çözünürlüklü üç boyutlu görüntü modelinde düşen kaya bloklarına ilişkin konumlama ve boyutlama işlemleri de yapılmıştır. Hızlı bir şekilde yüksek ayrıntıda üç boyutlu modelinin elde edilmesinin yanı sıra, sahada erişilmesi güç veya olanaksız yerlerinde görüntüler üzerinden çalışılabilmesi İHA görüntülerinin kullanımı açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmelidir.

Kargabedir Tepe'deki saha çalışmaları kapsamında inceleme alanlarının yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modellerinin elde edilmesi amacıyla Ulusoy vd. (2017) tarafından "Hareketten Yapı-Çok Bakılı Stereofotogrametri (HY-ÇBS)" yöntemi olarak isimlendirilen sayısal modelleme tekniği kullanılmıştır. Bu amaçla 4 pervaneli bir DJI Phantom3 Drone kullanılarak bölgenin yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları alınmıştır. Çalışma alanının SAM'nin oluşturulması amacıyla Kargabedir Tepe'nin zirvesinden (950 m) 3.61 mm odak uzunluklu bir kameraya sahip 4 pervaneli hafif bir dron uçurulmuştur. Dron kamerasına bağlı 3 eksenli bir gimbal sayesinde uçuşlar sırasında meydana gelecek sarsıntıları önlenmekte ve böylece yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları kolaylıkla alınabilmektedir. Uçuşlar zirveden itibaren 70 metre yükseklikten (yerel kot yaklaşık 1020 m) gerçekleştirilmiş ve Kargabedir Tepe'yi de içine alan 0.703 km²'lik alanın hava fotoğrafları alınmıştır. Dron 3 defa havalandırılmış ve 0.703 km²'lik alandan 12 megapiksel çözünürlüklü toplam 695 adet fotoğraf elde edilmiştir (Şekil 8).

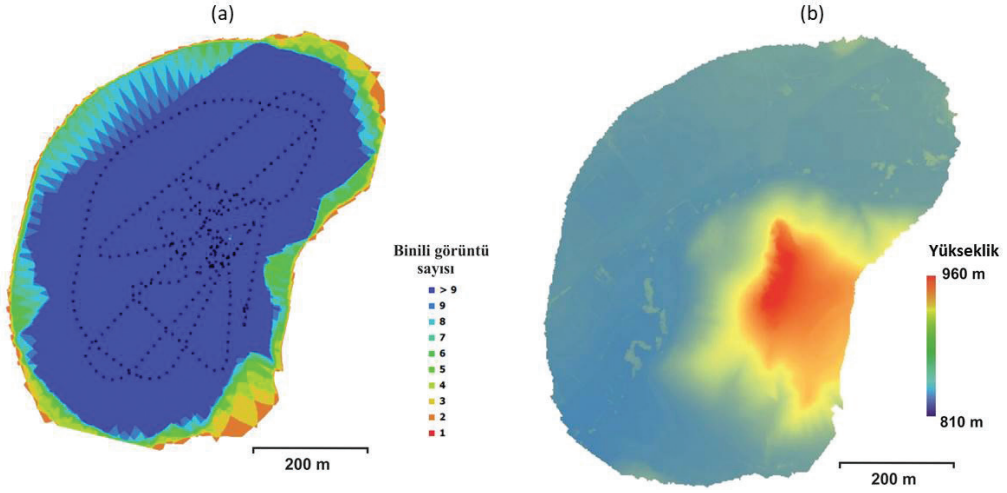


Şekil 8. Kargabedir Tepe'nin dron ile çekilen 12 megapikselli hava fotoğrafları.

Figure 8. 12 megapixel aerial photographs of Kargabedir Hill taken by drone.

Şekil 9'da örnekleri verilen fotoğraflardan üst üste bindirmeli olanlar ayıklanmış ve 695 fotoğrafın 343 adedi kullanılarak Agisoft PhotoScan isimli bilgisayar programı yardımıyla görüntüsü alınan bölgeye ait 40x40 cm çözünürlüğe sahip bir sayısal yükseklik modeli ve 5x5 cm çözünürlüklü ortorektifiye hava

fotoğrafı oluşturulmuştur. Hava fotoğraflarının alındığı noktalar ve binili fotoğraf sayıları Şekil 9a'da görülmektedir. Uçuş fotoğraflama alanının 40x40 cm çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli Şekil 10b'de, 5x5 cm çözünürlüklü ortorektifiye fotoğrafı, yakınlaştırılmış görüntüleri ve gerçek üç boyutlu görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. (a) Hava fotoğraflarının alındığı noktaları ve bindirmeli görüntü sayısına sahip alanların dağılımı ve (b) 40x40 cm çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (SYM).

Figure 9. (a) Camera locations and image overlap (b) resolution of 40 cm/pixel digital elevation model (DEM).



Şekil 10. Çalışma alanının 5x5 cm çözünürlüklü ortorektifiye fotoğrafı ve yakınlaştırılmış görüntüleri.

Figure 10. Resolution of 5 cm/pixel orthorectified aerial image and zoomed images of the field.

Düşen Kaya Bloklarının Konumlandırılması ve Boyutlandırılması

Kargabedir Tepe’de kaynak alandaki yüzeylenen kaya bloklarından sonra yamaç molozu (talus) ile örtülmüş ve üzerinde düşen ve özellikle birikme zonunda yarı gömülü büyük kaya bloklarının bulunduğu bir yüzey özelliği görülmektedir (Şekil 11). Moloz olarak tanımlanan malzemede toprak olarak tanımlanabilecek ince taneli malzemenin içerisinde farklı boyutlarda kaya parçalarının ve bloklarının bulunduğu görülmektedir. Kaynak alana yakın kısımlarda doğal olarak moloz birikiminin ince olduğu ancak yamaç eteklerine doğru kalınlığın çok fazla olduğu görülmektedir. Yamaç yüzeyi genellikle düz olup, daha önce düşmüş olan kaya blokları ve moloz içerisine yarı gömülü kaya blokları, düz yamaç yüzeyindeki çıkıntıları oluşturmaktadır (Şekil 12a).

Kaya düşmesi analizleri ve haritalamalarında düşmüş olan kaya blokların eğim aşağı yüzeydeki konumsal dağılımı sonuç haritalarının gerçekçiliğinin sınanmasının yanı sıra, boyutları da yayılım zone içerisinde kaya bloklarının enerjisinin dağılımının hesaplanması açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle, Kargabedir Tepe sahasında eğim aşağı yüzeydeki düşmüş kaya bloklarının konumları ve boyutları en, boy ve yükseklik olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, sahada doğrudan konumsal ve boyutsal ölçümler en sağlıklı yaklaşım olmakla birlikte, sahada erişilmesi güç veya olanaksız kaya bloklarının ölçülmesinin yanı sıra daha kolay ve hızlı konumsal ve boyutsal ölçüm yapılabilmesi nedeniyle sahaya ait İHA görüntülerinden elde edilen 5x5 cm çözünürlüklü ortorektifiye görüntü de bu amaçla kullanılmıştır (Şekil 12b). Özellikle kaya bloklarının sahadaki boyutlandırmasıyla İHA görüntülerinden elde edilen ortorektifiye görüntüye ait boyutlandırmaların karşılaştırmaları

yapılmıştır. Ancak, bu görüntülerde derinlik verisi olmasına karşın kaya bloklarının “boy” ve “en” ölçümleri kadar gerçekçi “yükseklik” verisinin okunması mümkün olamamıştır. Diğer taraftan kaya bloklarının üzerinde durdukları yüzeye olan batma miktarlarının (kökleri) da ortorektifiye görüntüden belirlenmesi veya buna ilişkin herhangi bir gözlem yapılabilmesi olanaklı değildir.

Bu çalışmada elde edilen Ortorektifiye görüntülerden yükseklik bilgisinin gerçekçi bir şekilde belirlenmesine yönelik sınırlamalardan dolayı, (i) yüksekliğin “h” en ve boyun ortalamasına $h=(en+boy)/2$, (ii) yüksekliğin “h” enine “h=en” ve (iii) yüksekliğin “h” boyuna “h=boy” eşit kabul edildiği üç farklı yaklaşım ile ortorektifiye görüntüye ait değerlerle sahadaki ölçülen 55 verinin karşılaştırması yapılmıştır (Şekil 13).

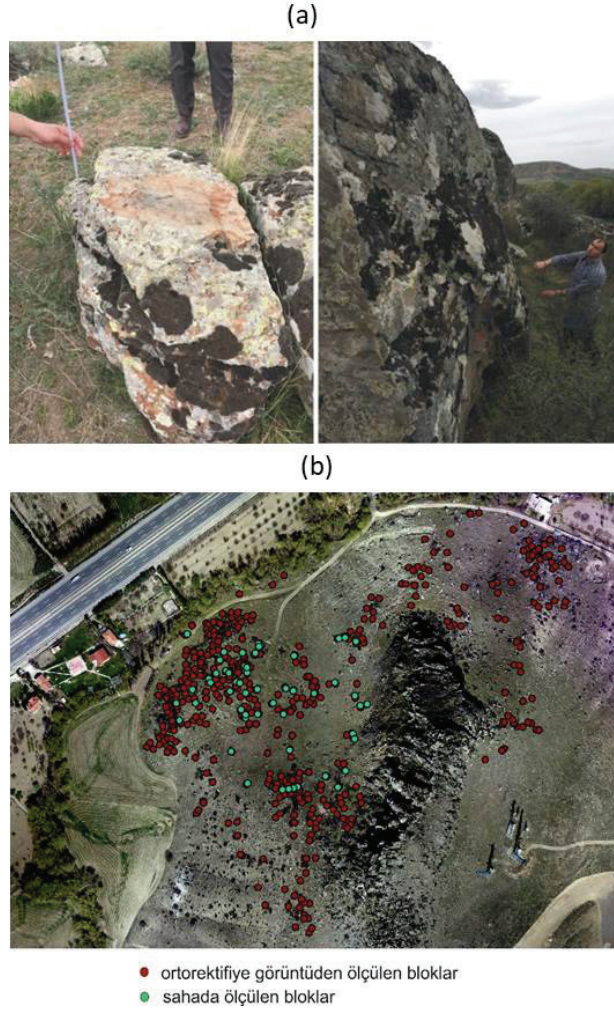
Sahada şerit metreyle ölçülen 55 adet kaya kaya bloğunun “en”, “boy” ve “yükseklik” boyutlarının oransal değerlerinin histogramları grafikleri ve genel istatistiksel değerlendirmeleri Şekil 14’de görülmektedir.

Kaya bloklarının sahada ölçülen “en”, “boy” ve “yükseklik” boyutlarına ilişkin Şekil 14’deki değerlendirmelerden de görüleceği üzere Kargabedir Tepe’de yüzeylenen kaya bloklarının önemli düzeyde eş boyutlu oldukları görülmektedir. Ancak “en” ve “yükseklik” boyutlarının birbirlerine oransal değerinin ortalama=1 değeri etrafında normal dağılım sergilemesiyle birlikte “en” ve “yüksek”liğin “boy”a oranlanmasında genellikle oranın 0.5’in üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlarla kaya bloklarının önemli ölçüde eş boyutlu olmakla birlikte az da olsa kolonsal (iki boyutu birbirine eşit diğer boyutu daha uzun) şekle eğilimli olduğuna işaret ettiği söylenebilir.



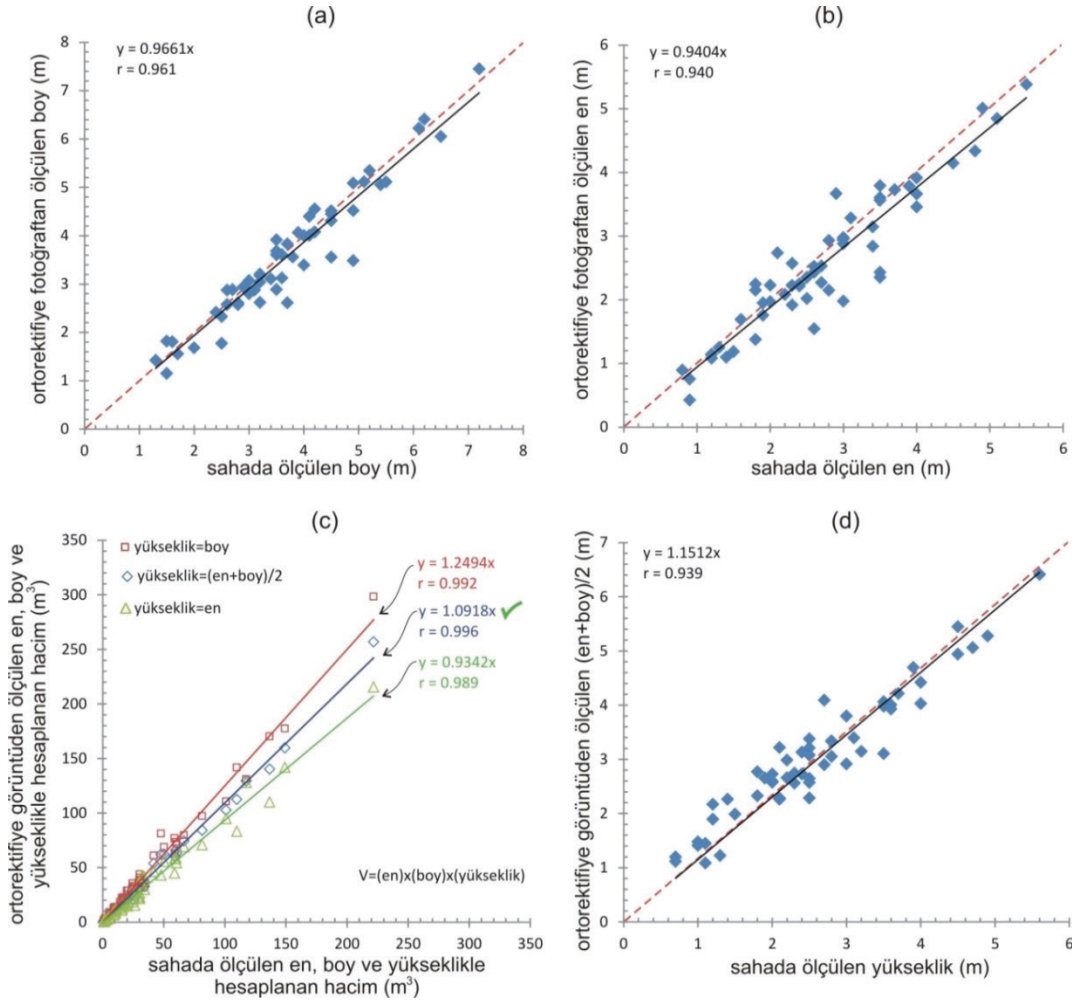
Şekil 11. Yamaç molozu örtülü yüzey, daha önce düşmüş yarı gömülü kaya blokları ve düşmüş kaya bloğuna çarparak kırılan büyük kaya bloğu.

Figure 11. Talus on the slope surface, previously fallen half-buried rock blocks and a large fragmented rock block that hit the fallen rock block.



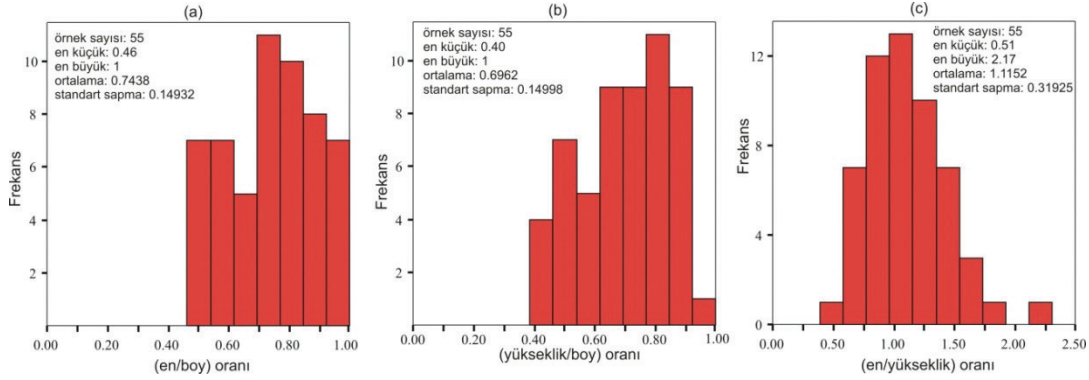
Şekil 12. (a) Sahada blok boyutu ölçümlerinden görüntüler ve (b) sahada ve ortorektifiye hava görüntüsünden ölçülen kaya bloklarının konumsal dağılımı.

Figure 12. (a) Block size measurements on site and (b) positions of the blocks measured in the field and orthorectified image.



Şekil 13. Sahadan alınan (a) boy, (b) en verilerinin ortorektifiye görüntüden elde edilen verilerle karşılaştırılması, (c) blok hacmi hesaplanmasında yükseklik verileri için öngörülen farklı yaklaşımların karşılaştırılması, (d) sahada ölçülen yükseklikler ile yüksekliğin (boy+en)/2'ye eşit kabul edildiği durumun karşılaştırılması.

Figure 13. Comparison of (a) width and (b) length data obtained from the field; (c) comparison of the approaches for estimating the height of blocks to calculate the block volume and (d) comparison of the height data obtained from the field and the condition that the height is considered equal to (width+ length)/2.

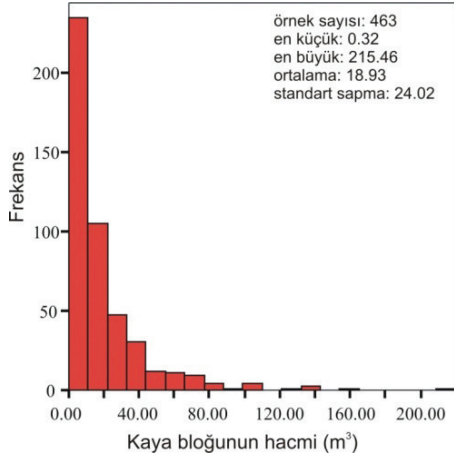


Şekil 14. Sahada ölçülen kaya bloklarının “en”, “boy” ve “yükseklik” boyutlarının oransal değerlerinin histogram grafikleri ve istatistiksel değerlendirmeleri.

Figure 14. Histograms and statistical evaluations of the “width”, “length” and “height” values of the blocks measured on the field.

Ayrıca sahadaki kaya bloklarının mükemmel dörtgen şekilli olmadığı da diğer bir hatırlanması gereken durumdur. Pek tabii ki düşen kaya bloğu özelinde bloğun hacminin ve buna bağlı olarak kütlelerinin (ağırlığının) çok daha gerekçi bulunması daha yakın görüntülemeler vb. diğer gelişen teknolojik araçlara bağlı olarak belirlenmesi mümkündür. Ancak, düşen kaya bloklarının hacimleri ve buna bağlı olarak kütleleri kaya düşmesi olayındaki yayılım zonundan ziyade tehlikenin bir bileşeni olup, dolayısıyla sahaya özel kaya düşmesi hacimel ve/veya kütsel dağılımının belirlenmesi için ortorektifiye görüntüde yüksekliği en ile boy arasında bir değere sahip olacağı kabulü ile ortalamasının alınması yaklaşımının genel bir değerlendirme için yeterli olabileceği söylenebilir.

Sahadaki 55 adet kaya bloğunun ortorektifiye görüntülerdeki ölçümleriyle karşılaştırılmasındaki yeterli düzeydeki uyum nedeniyle, ölçüm yapılan blok sayısının artırılması amacıyla ortorektifiye fotoğraftan alınan kaya bloklarının konumları kullanılarak düşen kaya bloğu veri sayısı 463’e yükseltilmiştir. Ortorektifiye görüntüler üzerinde ArcGIS (v10.3) ortamında konum ve boyutlandırması yapılan düşen 463 kaya bloğunun “(yükseklik=en+boy)/2” yaklaşımı kullanılarak hesaplanan kaya bloğu hacim değerlerinin histogram dağılımı ise Şekil 15’de görülmektedir. Kaya bloklarının hacimsel dağılımının süreksizlik aralığı için literatürde yaygın bir şekilde görülen negatif exponansiyel dağılıma benzer olduğu kaya bloğunun hacmindeki artışa bağlı olarak sahada görülme frekansının azaldığı görülmektedir.



Şekil 15. Boyutları ortorektifiye görüntülerden ölçülen 463 adet düşmüş kaya bloğunun hacim dağılım histogramı.

Figure 15. Volume distribution histogram of the 463 fallen rock blocks of which the dimensions were measured from orthorectified image.

KARGABEDİR TEPE KAYA DÜŞMESİ BÖLGESİNDE KONİK YAYILIM AÇISINA KARŞILIK KAYA BLOK DAĞILIMININ BELİRLENMESİ

Kargabedir Tepe ve yakın çevresinde 40x40cm yüksek çözünürlüklü sayısal

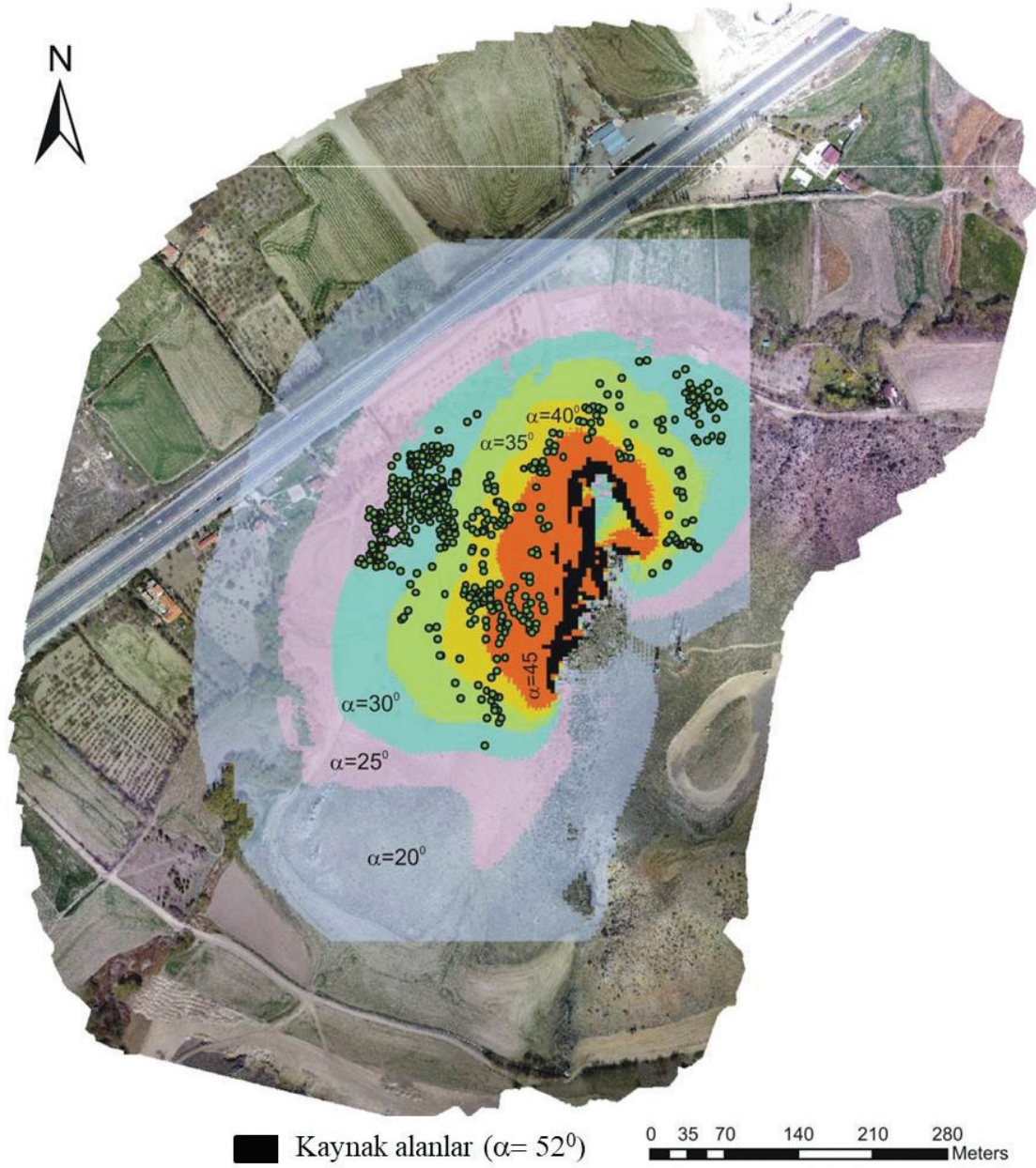
yükseklik modeli hazırlanmış olmasına karşın, konik yayılım açısı yaklaşımını dikkate alan CONEFALL programında 2x2m'lik çözünürlüğe kadar enerji hesaplamalarında çalışma hatası (runtime error) vermiştir. Bu nedenle, 2x2 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modelinin kullanılması uygun görülmüştür. Kaynak alanların belirlenmesine yönelik sınır açısının belirlenmesi amacıyla eşitliği çözünürlük değeri RES=2m için dikkate alınmış ve kaynak alanlar için sınır açısı değeri $\alpha=52^\circ$ olarak belirlenmiştir. Bu değer üzerindeki eğimler kaynak alan olarak ayırtlanmış ve sahadaki uyumluluğu ortorektifiye hava görüntüsündeki topoğrafya ile kontrol edilmiştir.

Kaynak alanlardan itibaren 20° 'den başlayarak 45° 'ye kadar 5'er derecelik artışlara karşılık gelen enerji çizgi açısı değerleriyle CONEFALL programı çalıştırılmış ve yayılım zonları ortorektifiye görüntüsüne işlenmiştir (Şekil 16). Son olarak yayılım zonları içerisinde kalan blokların tüm bloklara yüzde oranları CBS ortamında belirlenerek enerji çizgi açısına karşılık blok dağılımı yüzde değerleri belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kargabedir Tepe kaya düşmesi bölgesinde farklı konik yayılım açısı değerleri için belirlenen zonlar içerisindeki kaya bloklarının yüzde oranları ve duyarlılık sınıfları.

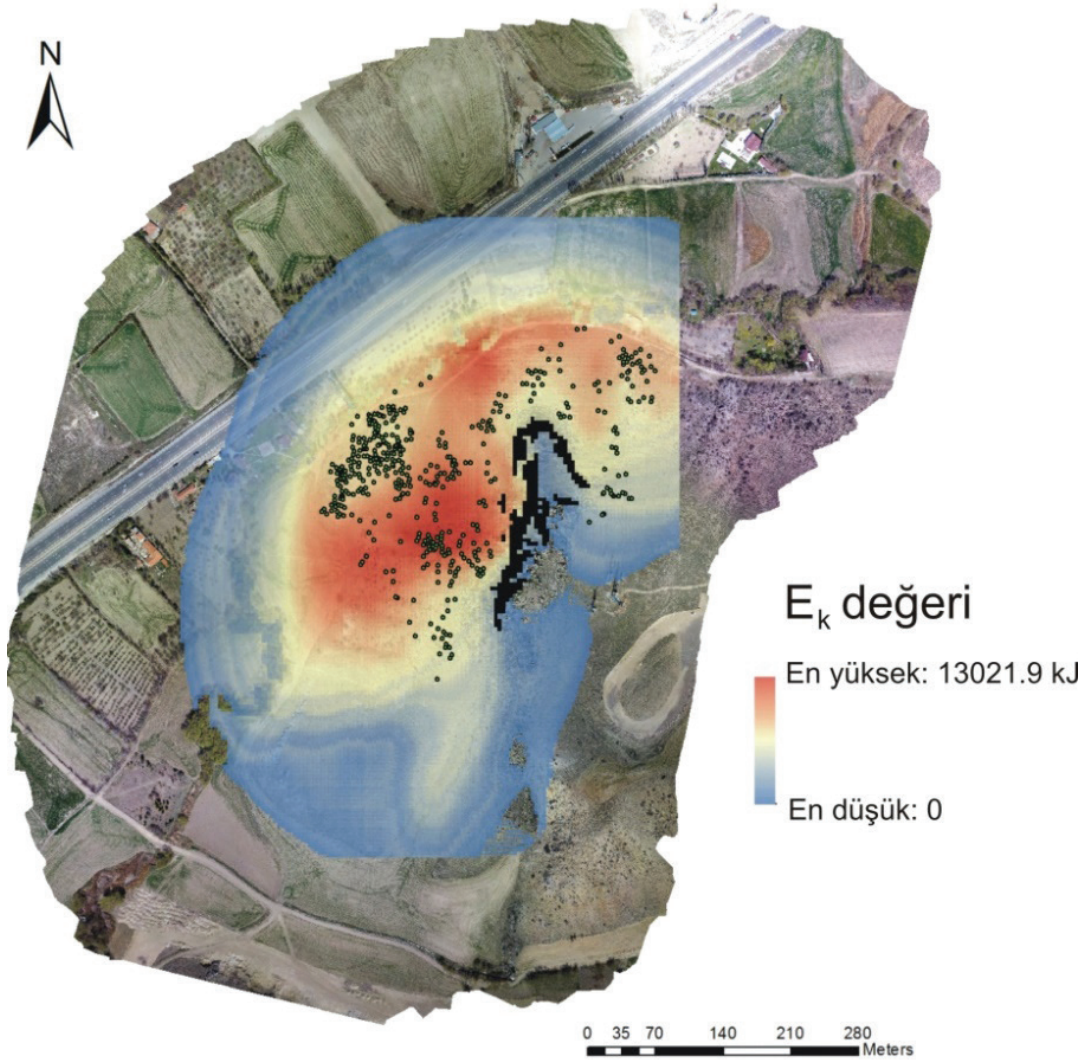
Table 2. Rock block percentage and susceptibility classes for different cone propagation angle values in Kargabedir Hill rockfall area.

Konik yayılım açısı (Enerji çizgi açısı)	Kaya bloğu yüzde oranı	Duyarlılık sınıfı
20°	% 100	Yok
25°	% 100	Çok düşük
30°	% 88.6	Düşük
35°	% 48.8	Orta
40°	% 34.3	Yüksek
45°	% 25.3	Çok Yüksek



Şekil 16. Kargabedir Tepe kaya düşme bölgesindeki farklı enerji çizgi açısı değerleri için CONEFALL programıyla belirlenen yayılım zonları.

Figure 16. Propagation zones determined by CONEFALL program for different energy line angle values in Kargabedir Hill rockfall area.



Şekil 17. Kargabedir Tepe kaya düşmesi sahasında kaya bloğunun kinetik enerji düzeyi (E_k) haritası.

Figure 17. Kinetic energy level (E_k) map of rock block at Kargabedir Hill rockfall area.

Buna ek olarak, çalışma sahası için en uzak yayılım noktalarını sınırlayan enerji çizgi açısı ($E_{CA_{max_stop}}=20^\circ$) kullanılarak ve “Energies (kJ)” opsiyonuyla yine CONEFALL programı çalıştırılmış ve kaya bloğunun yayılım zone içerisinde topografyaya da bağlı olarak kinetik enerji düzeyi (E_k) haritası üretilmiştir. Ortalama kaya blok hacmi $V=18.93 \text{ m}^3$ (bkz. Şekil 16) ve

kaya malzemesi yoğunluğu $\rho=2.6 \text{ t/m}^3$ kabul edilerek ortalama kaya bloğu kütlesi $M=49000 \text{ kg}$ (49 ton) olarak analizde dikkate alınmıştır. Her bir hücre (piksel) için kinetik enerji düzeyi tüm kaynak noktaları için hesaplanan değerlerin en büyüğü veya ortalaması şeklinde seçilebilmektedir. Bu çalışmada ortalama kinetik enerji değerleri için analizler yapılmıştır.

Çalışma sahası için en geniş yayılım zonuna yönelik kinetik enerji düzeyi (E_k) haritası Şekil 17’de verilmiştir.

Çalışma sahasında düşen kaya bloklarının hacimlerinin 0.32 m^3 ’den 215.46 m^3 ’e kadar değiştiği gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 15). Ancak, kinetik enerji büyüklüğü ($E_k=0.5mv^2$) ilişkisinden de görüleceği üzere kütleyle doğru orantılı olup, Şekil 17’deki enerji haritasının 1 ton için 49 tona bölünerek normalize edilmesi mümkündür. Konik yayılım yaklaşımı ile hesaplanan enerji değerlerinin deterministik yaklaşımlardaki gibi topoğrafya üzerinde sıçrama, sürüklenme ve yuvarlanma gibi hareketlere bağlı doğrudan hesaplanan hızla bağlı bir değer olmadığı dikkate alınarak, yayılım zonu içerisinde göreceli ve kaba bir değer olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

SONUÇLAR

Kaya düşmesi deterministik analizlerinde daha önce de belirtildiği gibi yamaç yüzeyine ve bloğa ait çok sayıda fiziksel ve mekanik parametre girdi olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle özellikle ulaşılması güç ve geniş alanlarda yapılacak çalışmalarda bu tür verilerin elde edilmesi pek de mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada bloklara ait sahadaki ölçümlerle yüksek çözünürlüklü ortorektifiye görüntüden elde edilen verilerin karşılaştırılmasındaki yeterli düzeydeki uyum nedeniyle veri sayısı artırılabilmiş, sahada erişilmesi güç veya olanaksız kaya bloklarının ölçülmesinin yanı sıra daha kolay ve hızlı konumsal ve boyutsal ölçüm yapılabilmiştir.

Kaya düşmesi haritalamasında kaya bloklarının ulaşabilecekleri en uzak durma noktalarını hedefleyen yayılım zonu teorik olarak kaynak alandan düşen veya düşebilecek blokların %100’ünü içermektedir. Geometrik

olarak en uzak menzil mesafesi en düşük enerji açısına karşılık gelmektedir. Kaya düşmesinin gözlemlendiği bir sahada kaynak alandan eğim aşağı en uzak durma noktasına kadar uzanan yayılım zonunda kaya düşmesinin farklı etkilenme yoğunluğuna (duyarlılığı) sahip zonların ayırtlanması mümkündür.

Çalışma kapsamında üretilen yayılım zonu haritasında 20° ’lik enerji çizgi açısı için oluşturulan zon düşen 463 adet kaya bloğun tümü içermektedir. En uzak menzil mesafesini tanımlayan bu zonda kaya düşmesine karşı duyarlılığı “yok” olarak tanımlanmıştır. Bu bilgiler ışığında bu çalışmada elde edilen enerji çizgi açısına karşılık yayılım zonunu gösteren haritada görüldüğü üzere kaynak alana yaklaştıkça kaya düşmesine karşı duyarlılık artmaktadır. Buna ek olarak, çalışma sahası için yine CONEFALL programı kullanılarak kaya bloğunun yayılım zonu içerisinde değişimini gösteren kinetik enerji haritası (E_k) üretilmiştir. Bölgedeki ortalama kaya bloğu kütlesi ($M=49000 \text{ kg}$) için kinetik enerji düzeyinin en yüksek 13021.9 kJ olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada uygulanan yöntem iki veya üç boyutlu kaya düşmesi deterministik analizlerin yerine kullanılması gibi yorumlanmamalı ve konik yayılım yönteminin daha ziyade bölgesel ölçekte kaya düşmesi haritalamalarında pratik bir yaklaşım olduğu dikkate alınmalıdır. Bu çalışmadaki tüm yaklaşımlar ampiriktir. Bu nedenle, her ampirik yöntemin doğasında olduğu gibi yeni sahalara ait verilerle birlikte değişime ve güncellemeye açık olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

KATKI BELİRTME

Saha çalışmaları sırasında kullanılan insansız hava aracının uçurulması ve görüntülerin

işlenmesindeki destek ve yardımlarından dolayı Dr. İnan Ulusoy'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Azzoni, A., de Freitas, M. H., 1995. Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28, 2, 111–124.
- Artuç, E. F., 2014. Susuz Köyü (Çubuk -Ankara) ve Yakın Çevresinin Kaya Düşme Potansiyelinin Araştırılması, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Yüksek Mühendislik Tezi, 92 s (yayınlanmamış).
- Broili, L., 1973. In situ tests for the study of rockfall. *Geol. Appl. idrogeol.*, 8, 105–111.
- Bozzolo, D., Pamini, R., 1986. Modello matematico per lo studio della caduta dei massi. Laboratorio di Fisica Terrestre ICTS. Dipartimento Pubblica Educazione, Lugano-Trevano.
- Copons, R., Vilaplana, J. M., Linares, R., 2009. Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Solà d'Andorra la Vella, Central Pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 6, 2107–2118.
- Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 260–271.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C., Lee, C. F., 1996. Rockfall Problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of Restitution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35, 4–5, 662–663.
- Derron, M.H., Stalsberg, K., Sletten, K., 2016. Method for the Susceptibility Mapping of Rock Falls in Norway. Technical Report, Trondheim, Norway.
- Evans, S. G., Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 30, no. 4. pp. 620–636.
- Gerber, W., 1994. Beurteilung des Prozesses Steinschlag. Birmensdorf: Herbstkurs Poschiavo, Kursunterlagen.
- Heim, A., 1932. *Der Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth Verlag, Zürich, 218 p.
- Jaboyedoff, M., Labiouse, V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. *Rock Mechanics*, 575–578.
- Jaboyedoff, M., Labiouse, V., 2011. Technical note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 11, 3, 819–828.
- Kalender, A., 2017. Konik yayılım yaklaşımıyla kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik bir yöntem önerisi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Doktora tezi, 172 s (yayınlanmamış).
- Larcher, V., Simoni, S., Pasquazzo, R., Strada, C., Zampedri, G., Berger, F., 2012. WP6 guidelines Rockfall and Forecast systems, Italy.
- Ritchie, A. M., 1963. Evaluation of Rockfall and its Control. Stability of Rock Slope Vol 17, Highway Research Board, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, DC, 13–28.
- Troisi, C., Berger, F., Dorren, L., 2008. Protection de la viabilité alpine, PROVIALP project report.
- Ulusoy, İ., Şen, E., Tuncer, A., Sönmez, H., Bayhan, H., 2017. 3D Multi-view Stereo Modelling of an Open Mine Pit Using a Lightweight UAV. *Geology Bulletin of Turkey*, 60, 223–241.
- Varnes, D. J., 1978. Slope movements: types and processes. Transportation Research Board, Washington, DC: Special Report No. 176.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection - A review, *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 11, 9, 2617–2651.
- Zhao, T., Crosta, G. B., Uti, S., De Blasio, F. V., 2017. Investigation of rock fragmentation during rockfalls and rock avalanches via 3-D discrete element analyses. *J. Geophysical Res. Earth Surf.*, 122, 678–695.

Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği

*Evaluation of the Performance of a Rockfall Ditch by 3-Dimensional Rockfall Analyses:
Akköy (Ürgüp) Case*

Mutluhan AKIN¹ , İsmail DİNÇER¹ , Ahmet ORHAN¹ ,

Ali Özgün OK² , Müge K. AKIN³ , Tamer TOPAL⁴

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir

²Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Ankara

³Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri

⁴Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş (Received): 08 Mart (March) 2019 / Düzeltme (Revised): 09 Nisan (April) 2019 / Kabul (Accepted): 20 Nisan (April) 2019

ÖZ

Nüfus yoğunluğunun fazla olmadığı kaya düşme tehlikesi altındaki yerleşim yerlerinde kaya düşmelerinden korunmak amacıyla kaya tutma hendekleri veya alanları inşa edilebilmektedir. Ancak, bu tür koruma yapılarının tasarımında çoğu zaman sahaya özgü gerekli mühendislik incelemeleri ve analizleri yeterince gerçekleştirilmemektedir. Bu nedenle, kaya tutma hendekleri zaman zaman kaya düşmelerinden korunmada yeterli olamamaktadır. Bu çalışma kapsamında, turistik işletmelerin de bulunduğu Akköy (Ürgüp) yerleşiminde düşen kaya bloklarının yaşam alanlarına ulaşmasını engellemek amacıyla üst kotlarda 2012 yılında inşa edilen 2 m derinliğindeki ve 1 km uzunluğundaki kaya tutma hendeğinin performansı 3-boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan kaya düşme risk sınıflamasına göre yerleşim orta derecede kaya düşme riski altındadır. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılan sayısal yüzey modeli insansız hava aracı ile alınan fotogrametrik görüntülerden elde edilen nokta bulutu verisi ile oluşturulmuştur. Arazi gözlemlerinde daha önceden düşen ignimbirit bloklarının boyutlarının 2 m'ye ulaşabildiği belirlenmiştir. Öte yandan, kaynak bölgesindeki yüksek süreksizlik devamlılığı, düşebilecek blokların boyutlarının da büyük olabileceğini işaret etmektedir. RocPro3D yazılımında gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda, genel olarak düşen blokların kaynak zon ile yerleşim yeri arasında kazılan hendek tarafından tutulduğu ancak bazı bölümlerde bu blokların kaya tutma hendeğini aşarak yuvarlanmaya devam edebileceği ortaya konmuştur. Buna göre, Akköy yerleşimi kısmen de olsa halen kaya düşme tehlikesi altındadır. Kaya tutma hendeğinin zaman içerisinde periyodik olarak temizliği yapılmadığı takdirde hendeğin kapasitesinin azalması ile birlikte tehlikenin boyutu daha da artacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kaya Düşmesi, Hendek, 3-Boyut, Performans, Ürgüp

ABSTRACT

Rockfall ditches or areas can be constructed in order to protect against rockfalls in settlements that are in danger of rockfalls when the population density is not high. Nevertheless, in the design of such protection structures, essential site-specific engineering studies and analyzes are often not carried out appropriately. Therefore, rockfall

ditches are occasionally not capable of preventing rockfalls. Within the scope of this study, the performance of a 2 m-deep and 1 km-long rockfall ditch excavated at the upper elevation of touristic Akköy (Ürgüp) settlement in 2012 in order to prevent the entrance of falling rocks to the residential area was evaluated on the basis of 3-dimensional rockfall analyses. According to the rockfall risk classification, the settlement is under moderate rockfall risk. The digital surface model used in 3-dimensional rockfall analyses was generated by point cloud data obtained from photogrammetric images taken by unmanned aerial vehicle. During field observations, it was determined that the dimension of the previously fallen ignimbrite blocks could reach up to 2 m. On the other hand, the high persistency of discontinuities in the source zone indicates that the dimensions of the potential rockfall blocks may be large. As a result of the 3-dimensional rockfall analyses carried out in RocPro3D software, it was defined that the falling blocks are generally caught by the ditch excavated between the source zone and the settlement, but in some sections of the ditch those blocks may continue to roll over the rockfall ditch. Eventually, Akköy settlement is still partially under the danger of rockfalls. If the rockfall ditch is not periodically cleaned in the course of time, the extent of danger will enlarge with the decrease in the capacity of the trench.

Keywords: Rockfall, ditch, 3-dimension, performance, Ürgüp

GİRİŞ

Kaya kütle duraysızlıklarından biri olan kaya düşmesi, yamaç veya şevlerde süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılan kaya bloklarının yerçekiminin etkisiyle yamaç/şev eğimi yönündeki oldukça hızlı ve ani hareketi olarak tanımlanabilir (Varnes, 1978). Süreksizlik yüzeylerindeki suların donma-çözülme etkisi ile oluşturduğu basınçlar, ağaç köklerinin büyümesi, ayrışma ve deprem dalgaları gibi çeşitli faktörlerin etkisi altında kaynak zondan kopan kaya blokları, dik yamaçlardan aşağı doğru serbest düşerek, eğimin azalmasına bağlı olarak yuvarlanarak, kayarak ve/veya sıçrayarak hareket ederler (Wyllie, 2015). Kaya düşmeleri, kaynak alan ve tetikleyici unsurlar açısından değerlendirildiğinde kestirilmesi güç bir kütle duraysızlık türüdür. Yamaç yüzeyinde uzun süre duraylılığını koruyan bloklar, aniden kütleden ayrılarak düşebilmekte, can ve mal kaybına neden olabilmektedir.

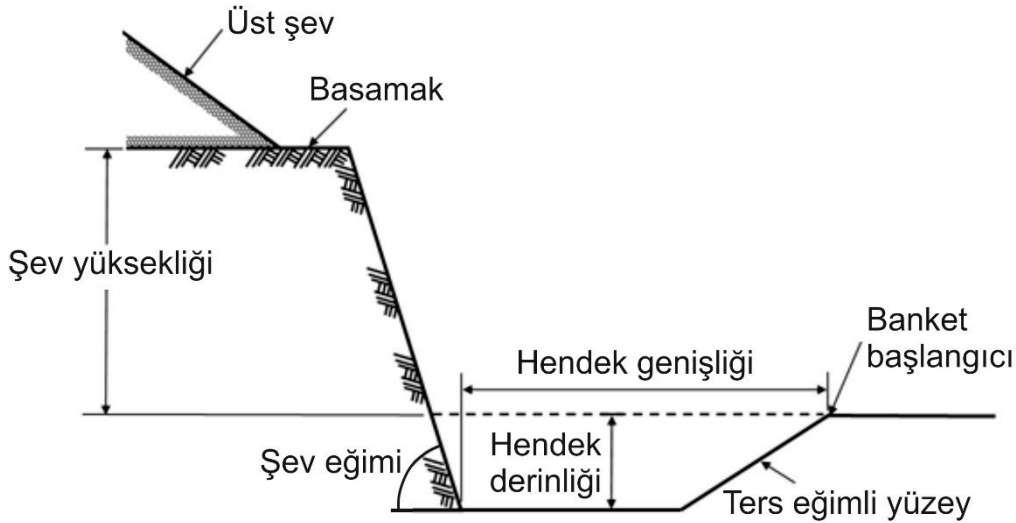
Bilindiği üzere ülkemiz jeolojik, morfolojik ve iklimsel konumu gereği farklı doğal afetlerin tehdidi altındadır. Ortaya çıkardıkları etki açısından depremle öne çıkan en önemli doğal afet türü olmasına rağmen, kaya kütle duraysızlıkları ve özellikle kaya düşmeleri de

ülkemizin maruz kaldığı önemli afet türlerinden biridir. Bu bağlamda, can ve mal kaybına neden olan kaya düşme sıklığı açısından değerlendirildiğinde ülkemiz içerisinde Kayseri, Erzurum ve Nevşehir illeri ön plana çıkmaktadır (Gökçe vd., 2008). Kaya düşmesi kaynaklı problemlerin önüne geçilebilmesi için yerleşim yerlerinde ve ulaşım güzergahlarında kaya düşme analizlerinin yapılarak tehlike sınırlarının belirlenmesi oldukça önemlidir (Topal vd., 2007; Tunusluoğlu ve Zorlu, 2009; Topal vd., 2012; Dinçer vd., 2016; Kayabaşı, 2018; Sarro vd., 2018; Fanos ve Pradhan, 2019). Büyük bir bölümü Nevşehir ili sınırları içerisinde yer alan Kapadokya yöresinde kaya düşmelerinin can ve mal kaybına neden olmasının yanı sıra, kültürel ve doğal miras üzerinde de olumsuz etkileri bulunmaktadır. Kapadokya ve çevresinde kaya düşmelerinin yoğunlaştığı alanlar jeolojik birimler açısından değerlendirildiğinde, mevcut duraysızlıklar Neojen yaşlı volkanik birimler içerisinde meydana gelirken, litolojiler üzerindeki farklı erozyon etkilerinin kaya düşmelerini tetikleyen en önemli unsur olduğu belirtilmiştir (Zorlu vd., 2011). Düşük yamaç eğimine sahip alt seviyelerde marn, kilaşı ve tuf gibi ayrışmaya ve erozyona karşı düşük duraylılığa sahip volkanosedimanter birimler yer alırken, dik

morfoloji sunan ve kaya düşmeleri için kaynak zonunu oluşturan üst seviyelerde ise bazalt ve iyi kaynaşmış ignimbirit gibi daha duraylı litolojiler gözlenmektedir. Bu tür jeolojik ve morfolojik yapıların gözlemlendiği alanlarda önemli ölçüde kaya düşmesi tehlikesi yaşanmaktadır.

Kaya düşmelerinin meydana gelmesini ve ulaşım hatlarına veya yerleşim yerlerine zarar vermesini önlemek amacıyla birçok farklı yapısal önlem ve koruma yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerin bir kısmı ağaçlandırma, kaya tutma hendekleri ve toprak seddeler gibi doğal veya yarı-doğal çözümleri içerirken, diğer önemli bir bölümü de tamamen endüstriyel malzemelerden üretilen kaya tutma bariyerleri ve duvar türü

yapıları kapsamaktadır (Volkwein vd., 2011). Kaya tutma hendekleri, düşen kaya bloklarını tehlike altındaki yerleşim yerlerine veya ulaşım hatlarına ulaşmadan önce enerjilerini düz veya ters eğimli topoğrafik yüzeyler üzerinde veya belirli derinlikteki çukurlar içerisinde sönümleyerek durdurmaya yarayan, çok fazla mühendislik uygulaması gerektirmeyen, ekonomik kaya düşmesi koruma yöntemlerinden bir tanesidir (Şekil 1). Kaya tutma hendeklerinin yapımı ve bakımı kolay, imalatları da maliyetli olmadığından, ulaşım hatları kenarlarında ve küçük yerleşim yerlerinin üst kotlarında kaya düşmelerinden korunmak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedirler.



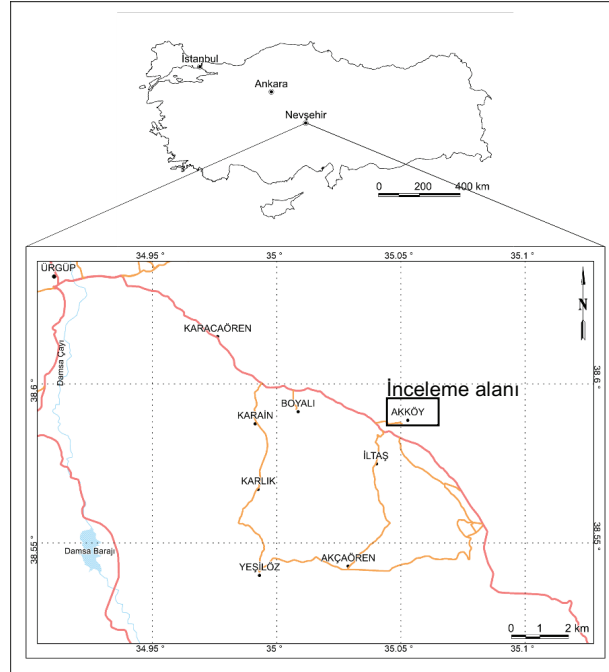
Şekil 1. Bir kaya tutma hendeğinin genel kesit görünümü (Turner ve Schuster, 2012).

Figure 1. A general cross-sectional view of rockfall ditch (Turner and Schuster, 2012).

Bir kaya tutma hendeğinin düşen kaya bloklarını durdurabilmesi için doğru geometride ve lokasyonda projelendirilmesi oldukça önemlidir. Bu tasarımda göz önüne alınması gereken başlıca nitelikler arasında hendeğin yeri, genişliği, derinliği, şekli ve taban yapısı yer almaktadır. Bu nedenle hendek bileşenlerin tasarlanmasında incelenen sahaya ait kaya düşmesi hatlarına ait özelliklerin ve düşen blokların dinamik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kaya tutma hendeklerinin projelendirilmesinde başlıca iki yöntem izlenebilir. Birinci yöntemde hendek tasarımı Ritchie Hendek Ölçütü (Ritchie, 1963; FHWA, 1989) veya Kaya Düşmesi Tutma Alanları Tasarım Rehberi (Pierson vd., 2001) gibi önceden hazırlanmış grafikler veya yol gösterici şartnameler doğrultusunda yapılabilmektedir. İkinci ve daha gerçekçi olan

yöntemde ise 2 veya 3-boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirildikten sonra kaya bloklarının davranış özellikleri ortaya konmakta ve belirlenen blok sıçrama yükseklikleri, darbe noktaları vb. gibi parametrelere bağlı olarak kaya tutma hendeklerinin boyutlandırması yapılabilmektedir. Ancak, uygulamalarda çoğu zaman herhangi bir tasarım ölçütü kullanılmadan veya kaya düşme modelleri gerçekleştirilmeden kaya tutma hendekleri inşa edilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, kaya düşmelerinin yoğun olarak gözlemlendiği bir yerleşim yeri olan Akköy'de (Ürgüp-Nevşehir) 2012 yılında inşa edilen kaya tutma hendeğinin, kaya düşmelerinin önlenmesinde gösterebileceği performans 3-boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmiştir. İnceleme alanına ait yerbulduru haritası Şekil 2'de sunulmaktadır.



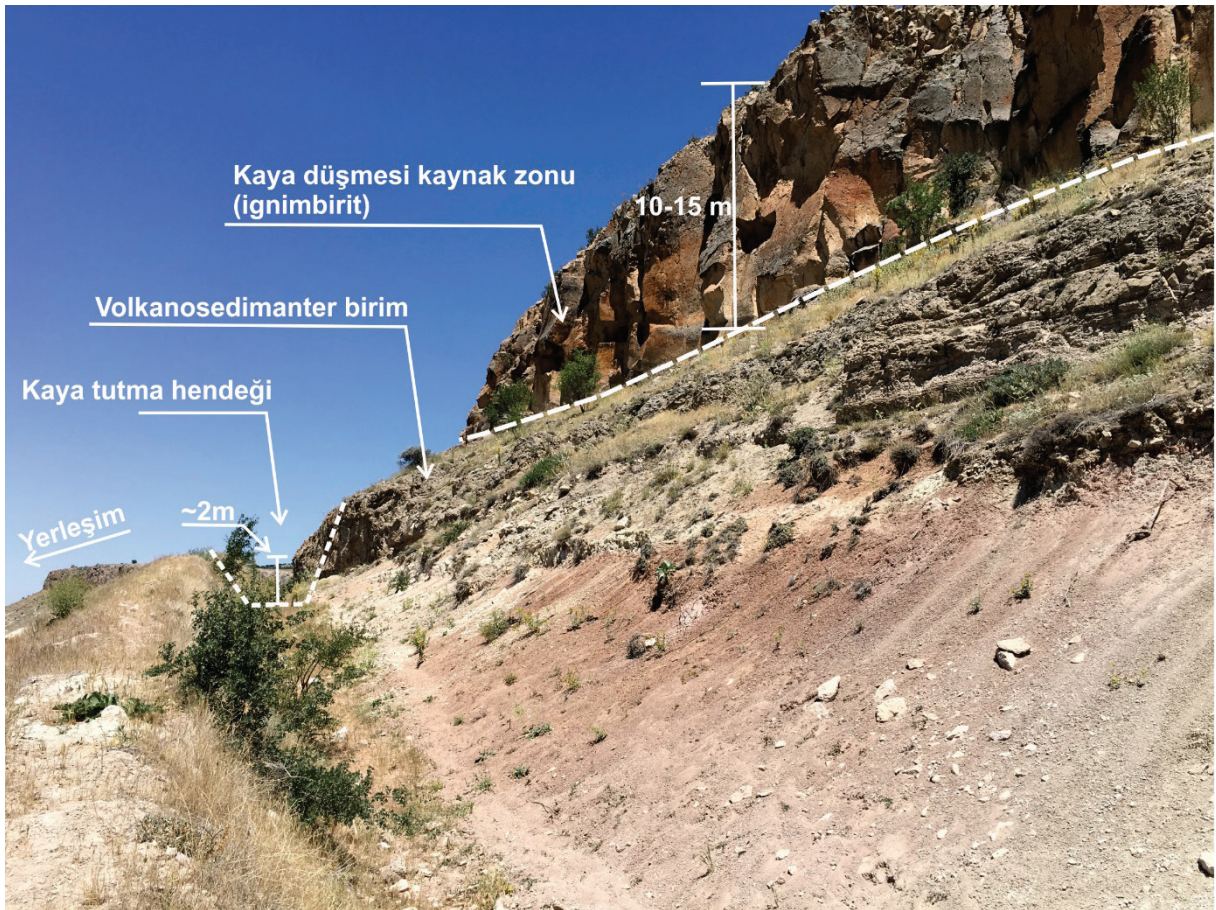
Şekil 2. İnceleme alanı yerbulduru haritası.

Figure 2. Location map of the study area.

İNCELEME ALANININ TANITIMI VE JEOLJİSİ

Akköy yerleşimi Ürgüp'ün yaklaşık 15 km güneydoğusunda yer almaktadır. Yerleşim sarp bir topoğrafyanın yamaçlarında kurulmuştur. Köy statüsünde bulunmasına rağmen Akköy'de halen faaliyet gösteren turistik tesisler mevcuttur. Yerli ve yabancı turistler doğa güzellikleri ve sakinlik açısından bu yerleşim yerinde konaklamaktadır.

Bölgede 2010'lu yıllardan önce meydana gelen kaya düşmeleri nedeniyle yerleşim halkı ve turistler can ve mal kaybı tehlikesiyle karşı karşıya kalmıştır. Bu nedenle, 2012 yılında İl Özel İdaresi ve Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) Başkanlığı tarafından yerleşimin üst kotlarındaki dik kayalıkların topuk kısmında yaklaşık 2 m derinliğinde ve 1 km uzunluğunda bir kaya tutma hendeği imal edilmiştir (Şekil 3).

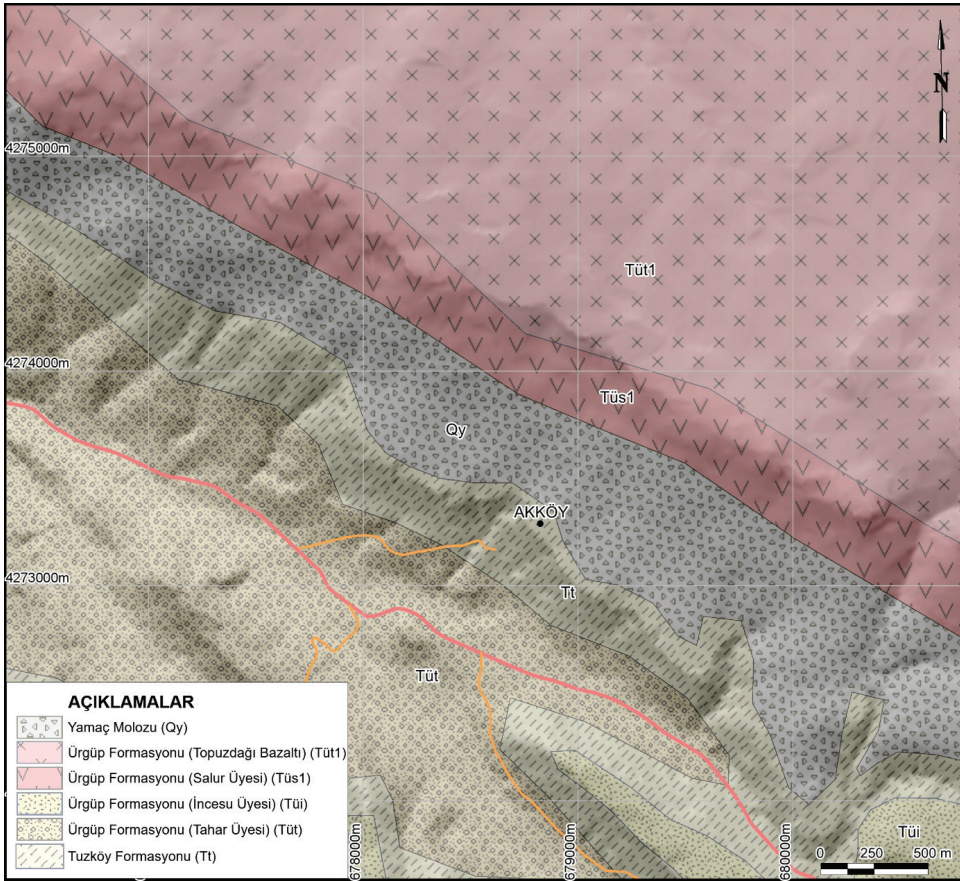


Şekil 3. İnceleme alanındaki kaya tutma hendeğinden ve kaynak zonundan bir görünüm.

Figure 3. A view of rockfall ditch and source zone at the study area.

Akköy ve yakın çevresine ait jeoloji haritası Şekil 4'te gösterilmiştir. Akköy yerleşiminin bulunduğu bölgede, jeoloji haritasından da görüleceği üzere, Ürgüp Formasyonu'na ait farklı volkanik ve volkanosedimanter kaya birimleri yayılım göstermektedir. İnceleme alanının üst kotlarında Topuzdağı Bazaltı (Tüt1) olarak adlandırılan kısmen mafik bazaltik lav akıntısı yer almaktadır. Birimin alt düzeyleri olivinsiz, ojit ve hiperstence zengin, üst seviyeleri ise olivin bazalt özelliğindedir. Akköy'ün kuzeydoğusunda, Topuzdağı Bazaltı'nın alt seviyelerinde inceleme alanındaki kaya düşmelerinin de kaynak zonunu oluşturan ignimbiritler yer almaktadır. Ürgüp Formasyonu Salur üyesi (Tüs1) genelde kum,

kumtaşı ve tüflü çakıldaşından oluşmaktadır. Çakılların hemen hepsi gri – siyah bazalt ve andezit türündedir. Aynı bileşimli piroklastik malzeme de içerir. Ürgüp Formasyonu İncesu üyesi (Tüi) genel olarak inci grisi, pembe renkli, ignimbirit ve dasitik tüften oluşmaktadır. Birimde üç düzey ayırtlanmıştır. Alt düzey ince taneli, homojen, gözeneksiz, kaynaşmamış olup, pomzaca zengindir. Makro biyotit, kuvars ve feldspat içerir. Orta düzey gözenekli ve orta tanelidir. Matriksi alt düzey ile aynıdır. Üst düzey ise masif, ince – orta taneli, boşluksuz, volkanik cam parçaları ve pomza içermektedir. Birimin yaklaşık kalınlığı 60 m'dir (Atabey, 1989).



Şekil 4. İnceleme alanı jeoloji haritası (Atabey, 1989).

Figure 4. Geology map of the study area (Atabey, 1989).

Bölgedeki Ürgüp Formasyonu Tahar üyesi (Tüt), kumlu matriks içinde yer alan pomza ve lav parçaları ile pembemsi beyaz renkli tüfit tabakalarının ardalanmasından oluşmaktadır. Üye orta – kalın tabakalı olup, toplam 80 m kalınlığındadır. Akköy’ün hemen güneydoğusunda gözlenen Tuzköy Formasyonu (Tt) sarı renkli, ince tabakalı ve laminalı, bol biyoturbasyonlu silttaşı, laminalı silisli kıltaşı, ince tabakalı ve laminalı kumtaşı ve tüfit ardalanmasından oluşmuştur (Atabey, 1989). Yamaç eğimlerinin azaldığı noktalarda yamaç molozları (Qy) gözlenmektedir.

KAYA DÜŞMESİ KAYNAK ZONUNDAKİ DURAYSIZLIK MEKANİZMASI

Akköy yerleşiminin kuzeydoğusunda yer alan ve yaklaşık 10-15 m yüksekliğindeki ve 80-85° yamaç eğimine sahip ignimbiritler bölgedeki kaya düşmelerinin ana kaynak zonunu oluşturmaktadır. Söz konusu ignimbiritlerde soğuma etkisiyle meydana gelmiş dik ve dike yakın soğuma çatlakları göze çarpmaktadır. Yüksek devamlılığa sahip bu süreksizlikler boyunca ayrılan kaya blokları kaya düşmelerini oluşturan ana unsurdur (Şekil 5).



Şekil 5. Kaynak zonundaki dik süreksizlikler ve potansiyel duraysız bloklar.

Figure 5. Vertical discontinuities in the source zone and potentially unstable blocks.

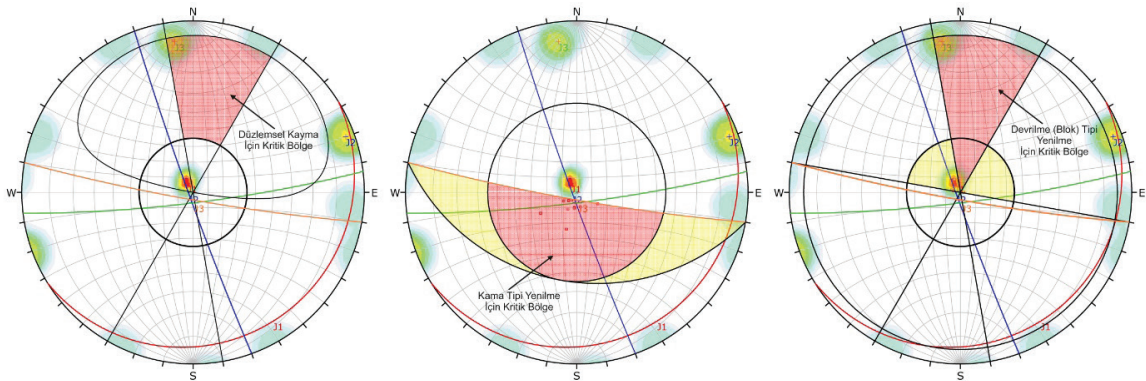
Kaynak zonunda gerçekleştirilen süreksizlik hat etütleri sonucunda ignimbiritlerde 7/148, 87/250 ve 83/173 eğim/eğim yönü değerine sahip üç egemen süreksizlik takımı belirlenmiştir. Yamaç yönelimleri genel olarak güneybatıya doğru olup, kinematik analizler için yamaç eğim/eğim yönü 85/190 olarak alınmıştır. Araziden alınan blok numunelerden laboratuvarda silindirik karotlar alınmış ve bu karotlar üzerinde gerçekleştirilen tilt deneyleri sonucunda Barton ve Bandis (1990) yenilme ölçütü kullanılarak ignimbiritlerdeki süreksizlik sürtünme açısının 35° civarında olduğu tespit edilmiştir.

İnceleme alanındaki kaynak zon için Dips v7.0 yazılımında (Rocscience Inc., 2019) gerçekleştirilen kinematik analizler sonucunda, ignimbiritlerde süreksizlik ve yamaç yönelimlerine bağlı olarak düzlemsel, kama ve devrilme türünde süreksizlik kontrollü yenilmelerin meydana gelme potansiyeli olduğu saptanmıştır (Şekil 6). Kinematik analizlerden elde edilen sonuçlar arazi gözlemleri ile uyum göstermekte olup, Şekil 5'teki fotoğraflarda da görüldüğü üzere birbirini kesen iki dik süreksizlik kaynak zonda kama oluşumlarına neden olmaktadır. Öte yandan, yamaç yönelimine ve eğimine yakın olan süreksizlik setine bağlı olarak düzlemsel kayma ve blok devrilmesi oluşma potansiyeli de bulunmaktadır.

İNCELEME ALANINDAKİ KAYA DÜŞME RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Akköy (Ürgüp) yerleşiminde daha önceki yıllarda kaya düşmeleri gözlenmiş olup, bu yerleşim için kaya düşme risk durumu Saroglou vd. (2012) tarafından yerleşim yerleri için önerilen risk sınıflaması ile değerlendirilmiştir. Bu kaya düşmesi risk sınıflamasında kaya düşmesi riski farklı kategoriler altında değerlendirilmiş olup, öncelikle her bir kategori için farklı ağırlık değerleri atanmıştır (Çizelge 1).

Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen sınıflamada A kategorisi altında şev geometrisi ve kaya düşme kaynak zonu konumu, şev pürüzlülüğü, bitki örtüsü durumu gibi parametreler dikkate alınmış olup, bu parametrelerin toplam puanlamadaki (toplam puan 100 üzerinden değerlendirilmiştir) etki oranı %25'tir. A grubundaki parametreler ve bu parametrelere ait sınıflama aralıkları ana sınıflama tablosu olan Çizelge 2'de sunulmaktadır. İlgili sınıflamada jeolojik yapı ve kaya düşmesinin gerçekleştiği kaya kütlelerine ait özellikler B kategorisi altında incelenmiştir ve bu parametrelerin de toplam puanlamadaki etki oranı %25'tir. Yağış, sismik aktivite, yamaç/şevdeki drenaj koşulları C kategorisindedir ve



Şekil 6. Kaynak zonundaki ignimbiritler için düzlemsel, kama ve devrilme (blok) türü yenilmenin kinematik analizi.

Figure 6. Kinematical analysis of planar, wedge and toppling (direct) failure for the ignimbrites at the source zone.

Çizelge 1. Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen kaya düşmesi risk sınıflamasında kullanılan dört parametre ve bu parametreler için atanan ağırlık değerleri.

Table 1. Four parameters used for the rockfall risk classification suggested by Saroglou et al. (2012) and the weight values assigned to those parameters.

Parametre kategorisi	Tanımlama	Kategori ağırlığı
A	Şev geometrisi ve kaya düşme kaynak zonu konumu, şev pürüzlülüğü, bitki örtüsü durumu	%25
B	Jeoloji ve kaya kütlesi durumu	%25
C	Potansiyel tetikleyici faktörler (yağış, sismik aktivite), drenaj durumu	%10
D	Sonuçları ve ilgili faktörler, kaya düşmesi geçmişi	%40

kaya düşme risk sınıflamasındaki etki oranları %10'dur. Son olarak, kaya düşmelerinin yerleşim yeri için oluşturacağı sonuçlar ve bölgede daha önceki yıllarda yaşanan kaya düşmeleri D kategorisinde değerlendirilmiş olup, en yüksek etki oranı (%40) bu kategoriye atanmıştır.

Çizelge 2'de Akköy yerleşimi için Saroglou vd. (2012) yöntemine göre hazırlanan kaya düşmesi risk sınıflaması verilmektedir. Örneğin inceleme alanındaki yamaç açısı 85° civarındadır. Buna göre, 85 derecelik şev açısı >60° (çok yüksek, askıda) sınıfına girmektedir ve bu sınıfa atanan puan 100'dür. Kategori/parametre ağırlık faktörü bu parametre için %A/7 (Çizelge 2'de kategori/parametre ağırlık faktörü sütunu) olarak dikkate alındığında, bu parametre için kaya düşmesi skorunun 7 olduğu $[(100 \cdot 7) / 100 = 7]$ belirlenmiştir. A, B, C ve D

kategorilerindeki farklı parametreler için yapılan değerlendirme sonucunda, tüm skor değerleri toplandığında Akköy yerleşimi için toplam kaya düşme riski puanı 49.4 olarak bulunmuştur. Bu değer, Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen ve Çizelge 3'te sunulan risk sınıflamalarına göre "orta" derecede kaya düşmesi risk sınıfını işaret etmektedir.

Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen kaya düşmesi risk sınıflama sistemi yerleşim yerleri için kaya düşme riskini ortaya koymak açısından yol gösterici olmakla birlikte, önerilen iyileştirme yöntemleri oldukça geneldir ve bu yöntemlerin detay çalışmalarla ortaya konması daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Söz konusu kaya düşmesi riski sınıflama sistemi, yerleşim yerlerinin kaya düşme riskinin belirlenmesinde uygulanabilecek bir yöntemdir.

Table 2. The rockfall risk classification of Akköy according to Saroglou et al. (2012) method.

Parameter		Value of Parameter			
------------------	--	---------------------------	--	--	--

Çizelge 3. Saroglou vd. (2012) risk sınıflamasında risk sınıfı açıklamaları ve önerilen iyileştirme yöntemleri.

Table 3. Risk class definitions of Saroglou et al. (2012) risk classification and suggested stabilization methods.

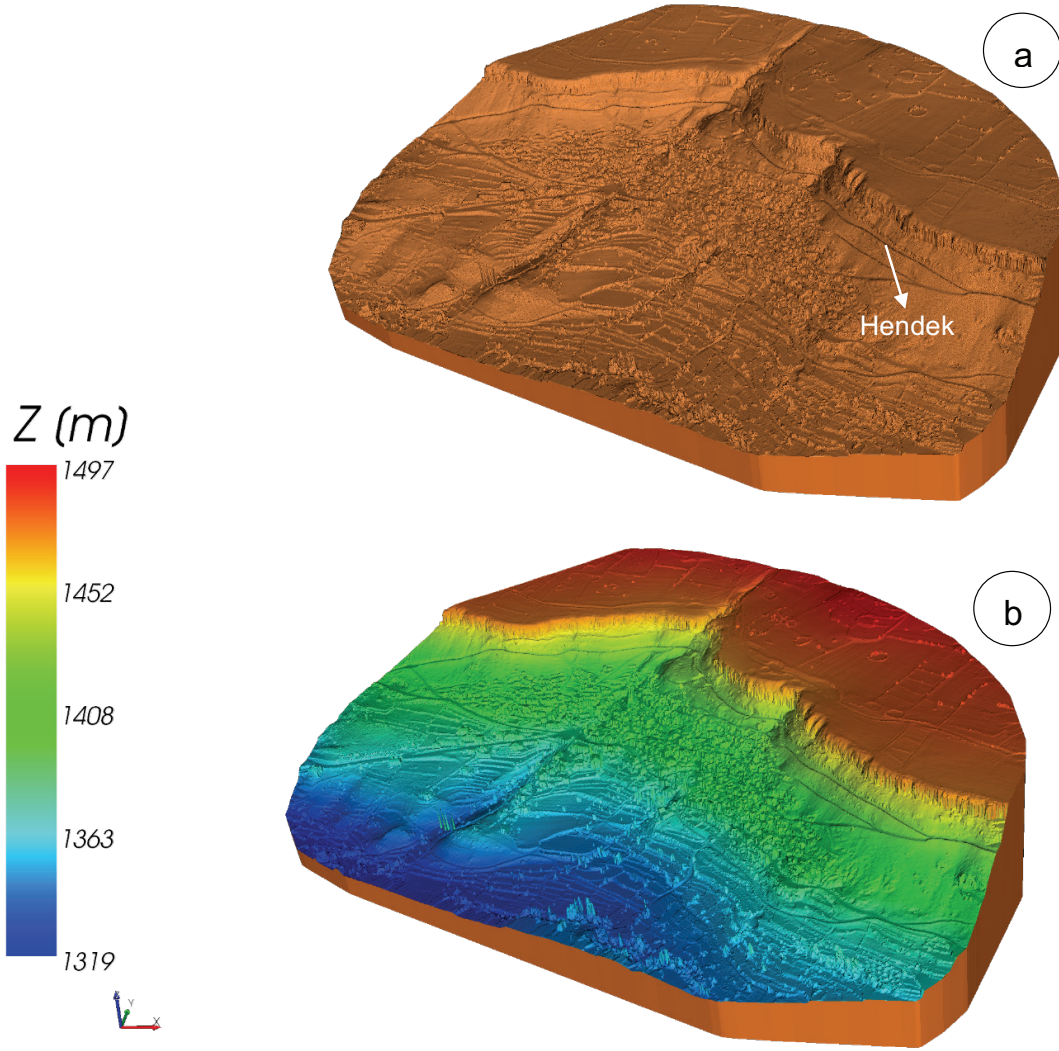
Risk sınıfı	Toplam ağırlıklı skor (1-100)	Risk	Önerilen koruma yöntemleri (seçim sahaya özgüdür)
I	<20	Çok düşük	Gerekli değil, seyrek yerel müdahaleler mümkün
II	21-40	Düşük	Sınırlı boyutta
III	41-60	Orta	Basit önlemler (örneğin bulonlar, ağılar, duraysız blokların temizlenmesi, basit hafif bariyerler)
IV	61-80	Yüksek	Aktif (örneğin bulonlar, ankrajlar) ve pasif (örneğin ağılar, tel halat kablolar, dayanma yapıları, bariyerler ve duraysız blokların temizlenmesi) önlemlerin kombinasyonu
V	81-100	Çok yüksek	Duraysızlık kritik durumda, yaygın ve/veya dayanımı yüksek aktif ve pasif yöntemlerin kombinasyonu. Önleme rağmen bir miktar risk göz önüne alınmalıdır.

3-BOYUTLU KAYA DÜŞME ANALİZLERİ

Akköy yerleşimi eğimli bir yamaç üzerine kurulmuştur. Üst kotlarda dike yakın bir topoğrafya sunan ignimbiritlerdeki düşey soğuma çatlakları boyunca kopan bloklar yamaç aşağı doğru kaya düşme problemine neden olmaktadır. Bu blokların boyutlarının arazi gözlemleri ve ölçümleri sonucunda yer yer 2m'yi bulabildiği belirlenmiştir. Önceki yıllarda bölgede kaya düşmesi nedeniyle olumsuzlukların yaşandığı yerleşim sakinleri tarafından belirtilmektedir. 2012 yılında kaya tutma hendeğinin yapımından sonra 2019 yılına kadar herhangi bir kaya düşme problemi yaşanmadığı da yine yerli halk tarafından ifade edilmektedir. Kaya düşmelerinin Akköy için risk yaratmaması amacıyla inşa edilen 2m derinliğindeki hendeğin yeterli olup olmadığı, bu çalışma kapsamında yapılan

3-boyutlu kaya düşmesi analizleri ile ortaya konmuştur.

Akköy yerleşim yerinin 3-boyutlu sayısal yüzey modelleri insansız hava aracı (İHA-multikopter) ile alınan fotogrametrik görüntülerden, görüntü işleme yöntemi ile elde edilen yaklaşık 3 cm yersel çözünürlüklü nokta bulutlarından oluşturulmuştur. 3-boyutlu kaya düşme analizleri RocPro3D (RocPro3D, 2014) 3-boyutlu kaya düşme analiz yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Akköy yerleşimi için İHA görüntüsünden elde edilen nokta bulutu yardımıyla RocPro3D yazılımında oluşturulan ve 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin altlığını oluşturan sayısal yüzey modelinden üretilen düzensiz üçgen ağı (TIN) ve buna ait yükseklik modeli Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. RocPro3D yazılımında İHA verisi kullanılarak oluşturulan sayısal yüzey modeli (a) düzensiz üçgen ağı (TIN) ve (b) yükseklik modeli.

Figure 7. Digital surface model (a) triangulated irregular network (TIN) (b) elevation model constructed in RocPro3D software using UAV data.

Şekil 7'den görüleceği üzere inceleme alanındaki deniz seviyesinden yükseklik 1319 ile 1497 m arasında değişmektedir. Kaya düşme kaynak lokasyonunu oluşturan ve dik bir topoğrafya (80-90°) sunan ignimbiritlerin en yüksek kotu ise 1465 m civarındadır. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, en olumsuz

koşulu yansıtmak açısından, bloklar kaynak zonun en üst seviyesinden (1465 m kotundan) geçen bir hat boyunca düşürülmüştür.

RocPro3D yazılımında kaya düşmesinin modelleneceği 3-boyutlu sayısal yüzey modeli üzerine farklı jeolojik birimler tanımlanabilmekte ve bu birimler için farklı geri verme

katsayıları (R_n ve R_t) ve sürtünme katsayıları atanabilmektedir. Akköy yerleşiminde, kaya düşmelerinin gerçekleştiği bölgede arazi gözlemlerine bağlı olarak 3 ana jeolojik birim ayırtlanmıştır. Buna göre, 1319 m ile yaklaşık 1355 m kotları arasında yamaç molozu, 1355 m ile 1435 m arasında volkanosedimanter birimler (tuf ve sedimanter özellikteki görsel çökellerin ardalanması) ve 1435 m kotundan sonra ise kaynaklaşmış ignimbirit birimi yer almaktadır. Arazide daha önceden düşen blokların konumlarına bağlı olarak yapılan geri analizler ve literatür verilerine bağlı olarak Akköy yerleşiminin 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılan parametreler Çizelge 4'te özetlenmiştir.

RocPro3D yazılımında Akköy yerleşimi için İHA verisinden elde edilmiş sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, düşen blokların (ignimbirit) birim hacim ağırlığı laboratuvar deney sonuçlarına göre 1760 kg/m^3 olarak belirlenmiş olup, analizlerde 2 m boyutundaki 5000 adet blok

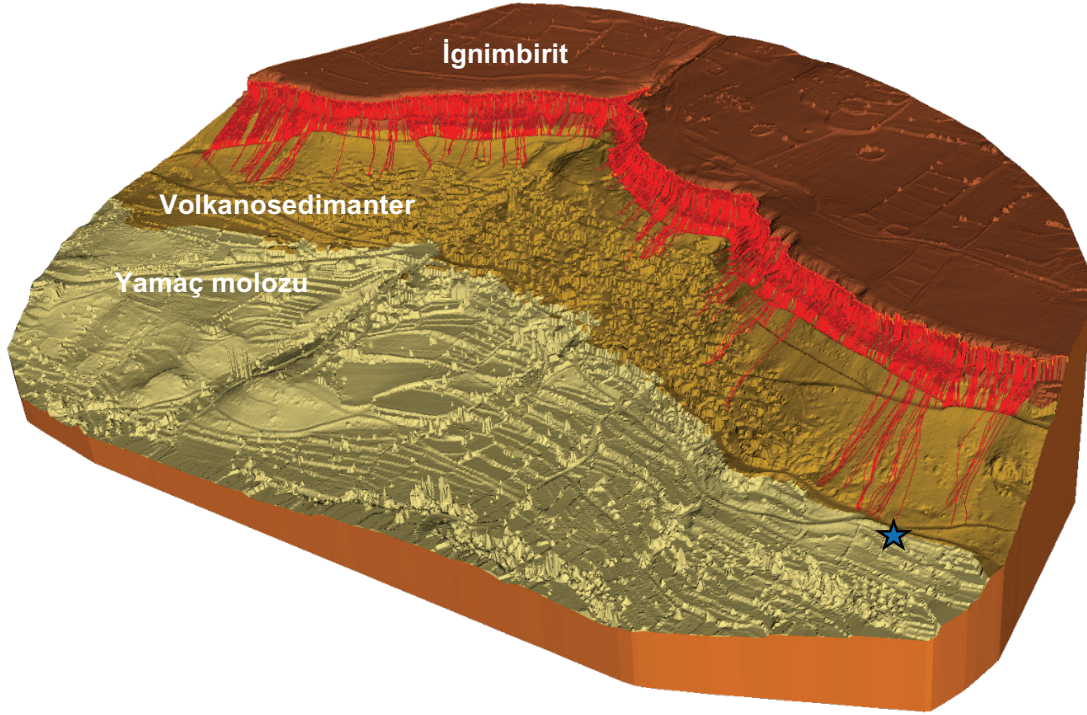
1465 m kotundan düşürülmüştür. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinden elde edilen yuvarlanma hatları Şekil 8'de sunulmuştur.

Şekil 8'de sunulan kaya düşme hatları (kırmızı hatlar) incelendiğinde, yuvarlanan blokların önemli bir bölümünün kaya tutma hendeği tarafından tutulduğu görülmektedir. Ancak, yerleşimin kuzeybatısında ve güneydoğusunda kalan bölgelerde bir kısım bloğun hendek yapısını aşarak yamaç aşağı kotlara doğru ilerleyebileceği tespit edilmiştir. Öte yandan, 1 km'lik hendeğin orta bölümündeki yerleşimin yoğun olduğu bölgenin hemen üstünde de bazı bloklar hendeği aşırarak yerleşim yerine kadar ulaşabilmektedir. 3-boyutlu kaya düşme analiz sonuçları dikkate alındığında, kaya düşmelerinin önlenmesi amacıyla açılmış olan hendek yapısının ilgili yerleşim yeri için kaya düşme riskini tamamen ortadan kaldıramadığı ve özellikle büyük boyutlu blokların (örn. ~2m) kaya tutma hendeğini aşabileceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4. RocPro3D yazılımında 3-B kaya düşme analizleri için kullanılan parametreler.

Table 4. Parameters of 3-D rockfall analyses in RocPro3D software.

Birim	Normal geri verme katsayısı (R_n)	Tanjant geri verme katsayısı (R_t)	Sürtünme katsayısı (k)
İgnimbirit	0.78	0.77	0.35
Volkanosedimanter birim	0.73	0.71	0.45
Yamaç molozu	0.50	0.70	0.60



Şekil 8. RocPro3D yazılımında gerçekleştirilen 3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatları.

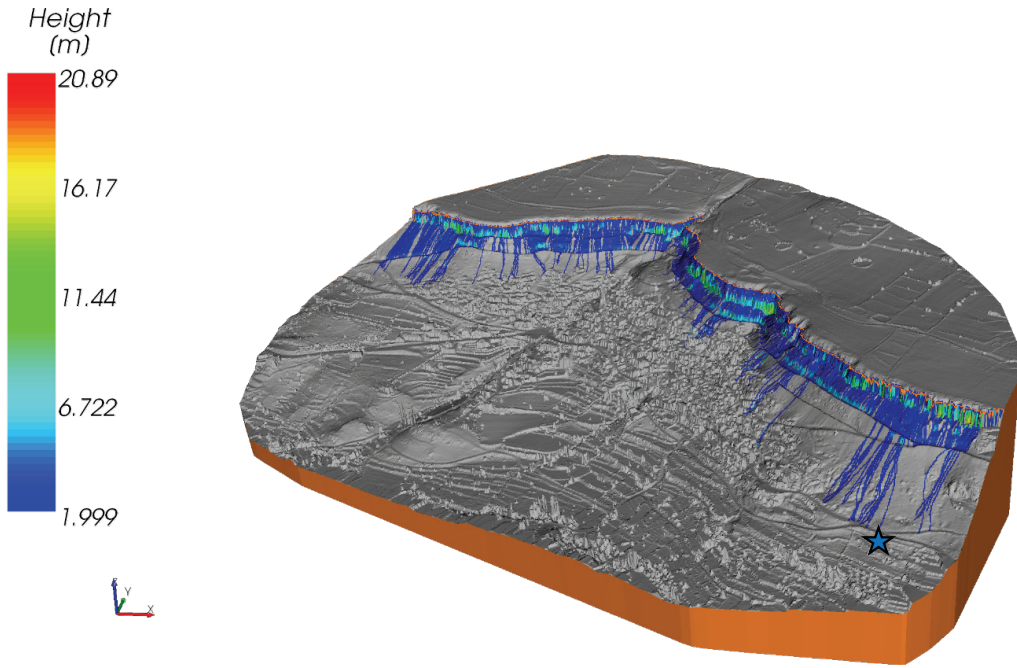
Figure 8. Rockfall trajectories determined by 3-D rockfall analysis performed in RocPro3D software.

RocPro3D yazılımı ile gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, düşen blokların sıçrama yükseklikleri, kinetik enerjileri ve hızları da belirlenmiştir. Buna göre, her bir kaya düşme hattı için hesaplanan sıçrama yüksekliği, kinetik enerji ve hareket hızı yine 3 boyutlu model üzerinde sırasıyla Şekil 9, 10 ve 11’de sunulmuştur. Şekil 9’da sunulan sıçrama yükseklik haritasına göre, yaklaşık 10 m yükseklikteki dik yamaçtan serbest düşmelerini yapan bloklardaki sıçrama yükseklikleri hendek yapısından sonra çoğunlukla 2 m’nin altındadır. Ancak bazı bölümlerde sıçrama yükseklikleri 4.5 – 5 m’ye (blok boyutu olan 2 m dahil) ulaşabilmektedir.

İnceleme alanında düşen kaya bloklarının toplam kinetik enerjilerine bakıldığında (Şekil

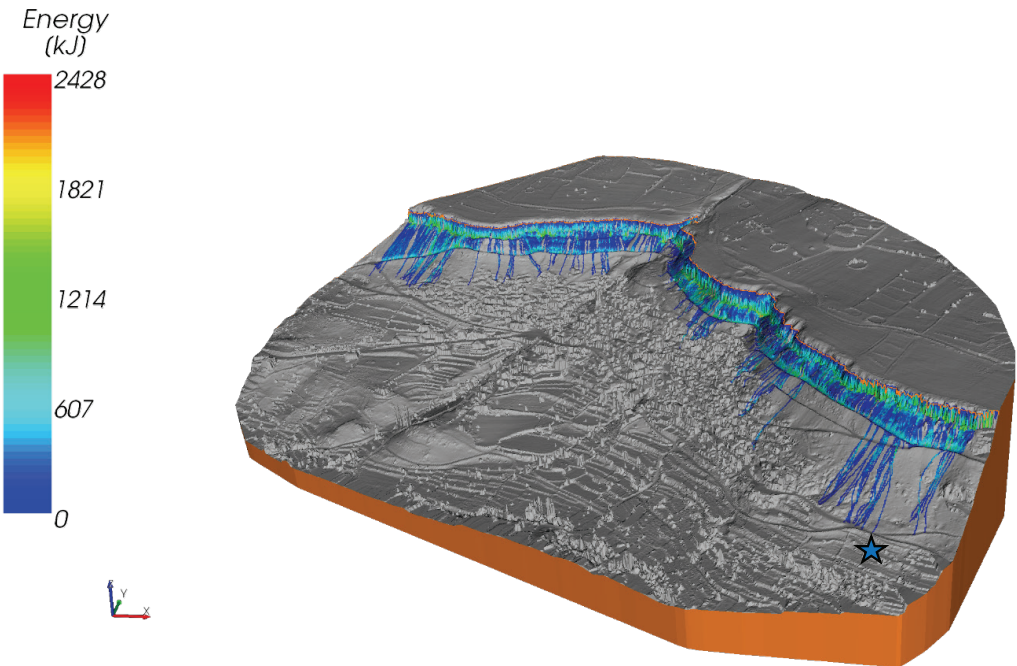
10), kaya tutma hendek yapısının gerisindeki dik yamaç boyunca 300 kJ’un üzerinde kinetik enerjiye sahip olan blokların bulunduğu görülmektedir. Hendek yapısından yamaç aşağı olan bölümde ise düşen blokların kinetik enerjileri azalmakta ve kinetik enerji değerleri 30 ile 300 kJ arasında değişmektedir.

RocPro3D 3-boyutlu kaya düşme yazılımının en önemli avantajlarından biri de 3-boyutlu analizler ile belirlenen kaya düşme hatlarının 2-boyutlu kesitler üzerinde incelenmesine olanak sağlamasıdır. Bu kesitler üzerinde, yuvarlanan blokların hareketleri sırasındaki sıçrama yüksekliği, kinetik enerji, yuvarlanma hızı vb. gibi özelliklerindeki değişim mesafeye bağlı olarak değerlendirilebilmektedir.



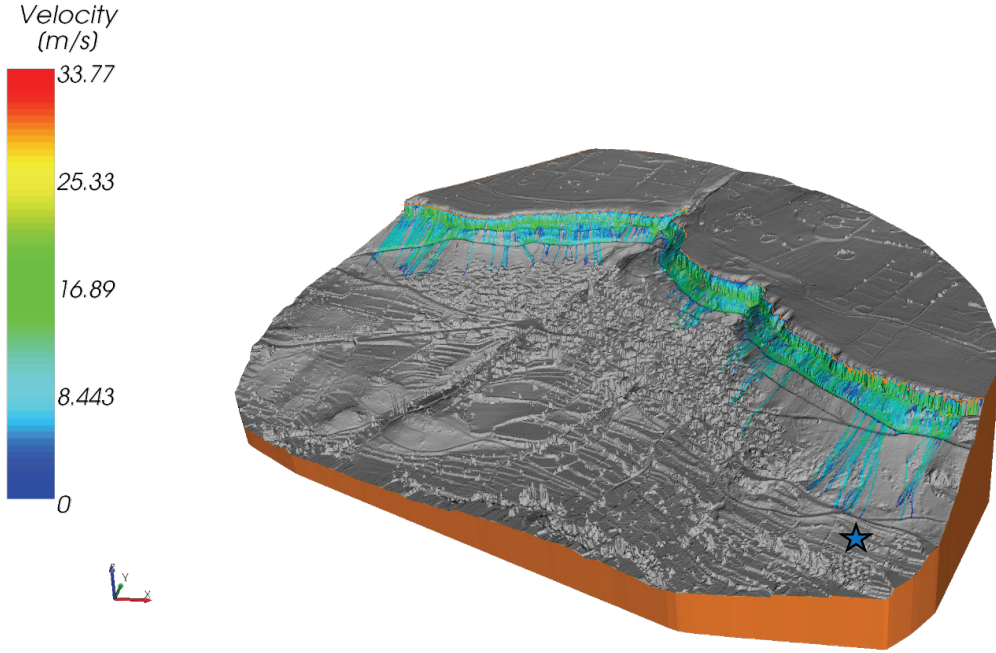
Şekil 9. Düşen kaya bloklarının sıçrama yüksekliği dağılımı.

Figure 9. Bounce height variation of falling rocks.



Şekil 10. Düşen kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi dağılımı.

Figure 10. Total kinetic energy variation of falling rocks.

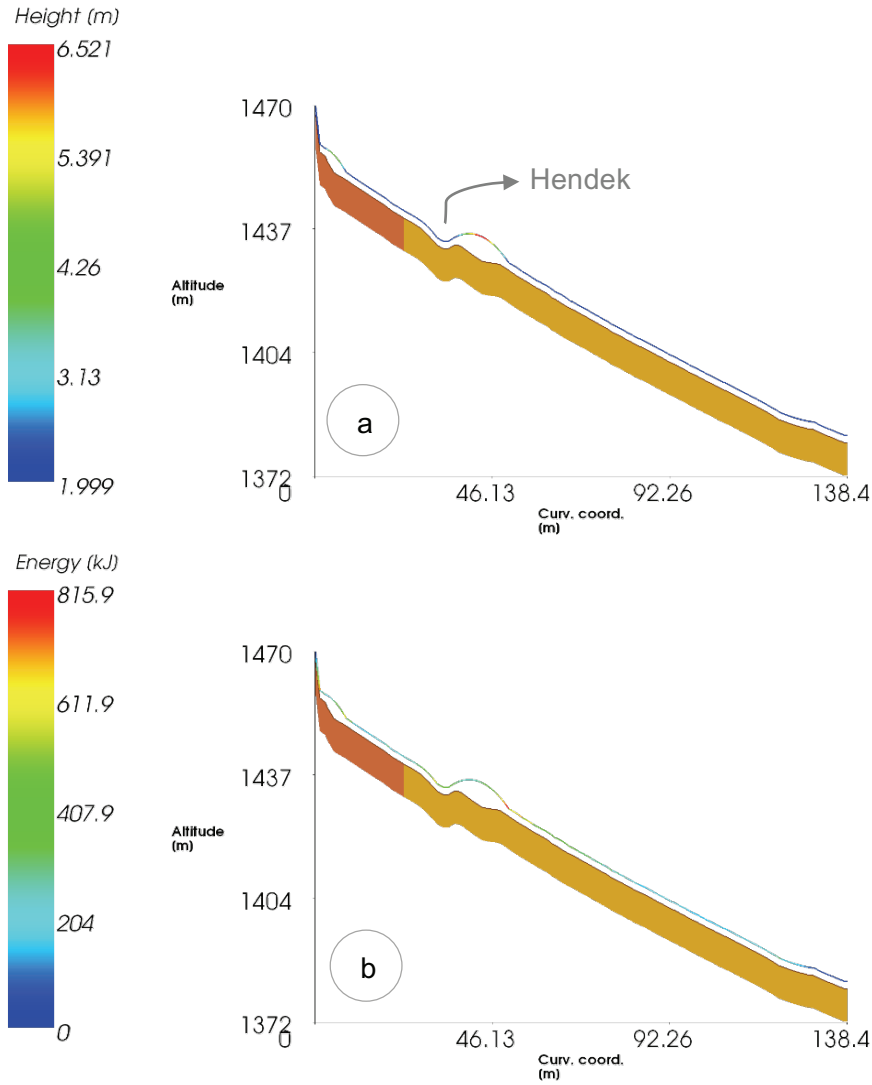


Şekil 11. Düşen kaya bloklarının hareket hızı dağılımı.

Figure 11. Motion velocity variation of falling rocks.

İnceleme alanının güneydoğusuna doğru kaya tutma hendeğini aşan bir bloğun (Şekil 8, 9, 10 ve 11'deki modeller üzerinde mavi yıldız ile gösterilen 4628 nolu yuvarlanma hattı) hareketi sırasındaki sıçrama yüksekliği ve kinetik enerji değerlerindeki değişimi gösteren 2-boyutlu kesitler Şekil 12'de verilmiştir. 138.4 m maksimum yuvarlanma mesafesine sahip olan bu blok, 1465 m kotundan itibaren ilk serbest düşüşünden sonra hendeği aşarken yaklaşık 6.5 m'lik (blok çapı olan 2 m dahil) bir sıçrama yüksekliğine ulaşmıştır. Kaya tutma hendeğini aştıktan sonra, blok hareketine çoğunlukla yuvarlanarak devam etmiştir (Şekil 12-a). Öte yandan, söz konusu bloğun kinetik enerjisi dik yamaçtan düşümü esnasında 700 kJ civarındadır. 2 m'lik hendeği aşarken bloğun toplam kinetik enerjisi 800 kJ mertebesine yükselmektedir. Blok yamaç aşağı hareketine devam ederken, toplam kinetik enerjisi sönümlenmektedir (Şekil 12-b).

İHA verisinden üretilen sayısal yüzey modeli kullanılarak gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda belirlenen kaya düşme hatları, yine İHA uçuşları sonrasında ham görüntülerden elde edilen gerçek ortogörüntü mozaïği üzerine aktarılmış ve inceleme alanındaki kaya düşmelerinin yerleşim yeri için oluşturacağı tehlikenin boyutları ortaya konmuştur. Şekil 13'te sunulan gerçek ortogörüntü mozaïği incelendiğinde, kaya tutma hendeğini aşan blokların çoğunun yerleşimin hemen üst bölümünde durduğu görülmektedir. Hendeği aşan 2 m çapındaki bloklar herhangi bir engele çarparak durabilmekte veya yön değiştirmektedir (Şekil 13-a). Diğer taraftan, Akköy'ün güneydoğusundaki bir bölümde ise yuvarlanan bloklar, yerleşimin iç kesimlerine kadar ulaşabilmektedir (Şekil 13-b). 3-boyutlu kaya düşme analiz sonuçları, Akköy yerleşiminin bir bölümünün, üst kotlardaki 2 m derinliğindeki hendeğ yapısına rağmen halen kaya düşme tehlikesi altında olduğunu göstermektedir.

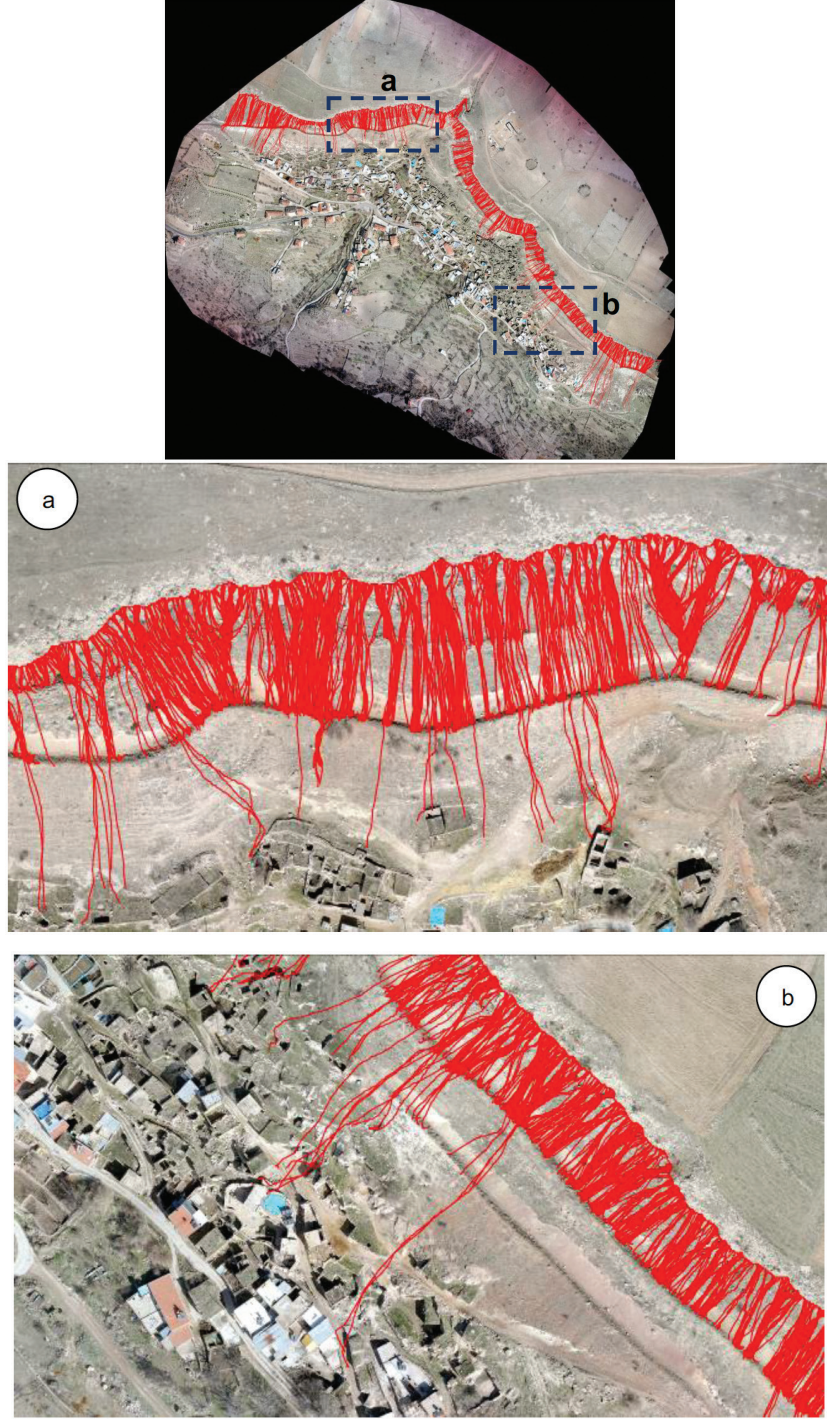


Şekil 12. 4628 nolu kaya düşme hattına ait sıçrama yüksekliği ve toplam kinetik enerji kesitleri.

Figure 12. Cross-sections of bounce height and total kinetic energy for the rockfall trajectory 4628.

3-boyutlu kaya düşme analizlerinin ve bu analizlerde kullanılan sayısal yüzey modeli çözünürlüğünün kaya düşme hatlarının yönelimi ve yuvarlanma mesafeleri üzerindeki etkisi Şekil 13'te sunulan gerçek ortogörüntülerde belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. 2-boyutlu kaya düşme analizlerinde kaya düşmeleri sırasındaki topoğrafyaya bağlı sapmaları

gözlemlemek mümkün değildir. Oysa kaya düşmeleri sonucu hareket halindeki bloklar topoğrafik düzensizlikler ve/veya insan yapımı engeller (bina, duvar, çit vb.) nedeniyle yön değiştirebilmekte veya hareketlerini sonlandırabilmektedir. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşme analizleri daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadırlar.



Şekil 13. Kaya düşme hatlarının gerçek ortogörüntü mozaiği üzerindeki yakın görünimleri.
Figure 13. Views of rockfall trajectories on true orthoimage mosaic.

SONUÇLAR

Kaya düşme tehlikesi altında olan alanlarda kayadüşmelerinin iyileştirilmesi için çeşitli önleme ve koruma yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler arasında kaya tutma hendekleri veya alanları küçük yerleşim yerlerinde ekonomik ve kolay yapılabilirlik açısından sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, doğru projelendirilmeyen kaya tutma hendeklerinde kaynak zonundan kaya düşmesinin devam etmesi durumunda, düşen bloklar hendeği aşarak tehlike yaratmaya devam edebilmektedir. Bu çalışma kapsamında Akköy (Ürgüp) yerleşiminde 2012 yılında kaya düşmelerinden yerleşimi korumak amacıyla inşa edilen 2 m derinliğindeki ve yaklaşık 1 km uzunluğundaki kaya tutma hendeğinin performansı 3-boyutlu kaya düşme analizleri ile incelenmiştir. Bu tür uzun kaya düşmesi koruma yapılarının tasarımında 3-boyutlu kaya düşmelerinden faydalanılması sonuçların daha gerçekçi elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Öte yandan, topoğrafik değişkenliklere bağlı olarak belirli kesit hatları boyunca yapılan 2-boyutlu kaya düşme analizlerinde düşen blokların yanal yön değişimlerini belirlemek mümkün olamamaktadır. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşme analizleri bu açıdan da önemli bir avantaj sunmaktadır.

Çalışma alanı için gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucuna göre Akköy yerleşiminin üst kotlarında inşa edilen 2 m derinliğindeki kaya tutma hendeğinin bazı bölümlerde kaya düşmelerini önlemede yetersiz kaldığı ve hendeği aşan blokların yerleşim yerine kadar ulaşabildiği belirlenmiştir. İnceleme alanında yüksekliği 10 ile 15 m arasında değişen kaynak zonunda yüksek devamlılığa sahip soğuma çatlakları boyutları 2 m'yi geçebilecek blokların oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle, çalışma alanında inşa edilen hendek

derinliği ile maksimum blok çapı birbirine çok yakındır. 3-boyutlu kaya düşme analizlerince de doğrulandığı üzere, düşen blokların hendek bölgesindeki ufak sıçramaları bile bloğun hendeği kolaylıkla aşmasını sağlayacaktır. Bu nedenle, inşa edilen hendeğe rağmen Akköy yerleşimi kısmen de olsa kaya düşme tehlikesi altındadır. Bununla birlikte, kaya tutma hendeğinin uzun dönem içerisinde düşen kaya bloklarınca dolması ve periyodik bakımının (blok temizliği) yapılmaması durumunda tehlikenin boyutu daha da artacaktır.

3-boyutlu kaya düşme analizlerinde oldukça yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla yersel lazer tarama (TLS) veya insansız hava araçları ile alınan fotogrametrik görüntülerin işlenmesinden elde edilen nokta bulutları son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak hendek, vadi vb. gibi derin topoğrafik düzensizliklerin bulunduğu lokasyonlarda TLS yöntemiyle oluşturulan nokta bulutlarının bu tür düşey yapıları tam ve gerçekçi olarak yansıtmakta zorlanabilmesine bağlı olarak, kaya düşmesi sonrası yuvarlanma rotalarının tam belirlenememesinin, kaya düşme analizi sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olabilmektedir. Çünkü TLS yönteminde, kaynak zondan çok daha düşük kotlarda konumlandırılan ölçüm aletinden gönderilen lazer ışınları, topoğrafya üzerindeki düşey düzensizlikleri ortaya çıkaramamaktadır. Bu tür durumlarda topoğrafyadaki düşey yapıların sayısal yüzey modelinde ortaya çıkarılabilmesi için TLS ölçümlerinin en az bir ters açıdan tekrar yapılması gerekmektedir. Ancak bu inceleme alanında olduğu gibi, hendek türü yapıların oldukça uzun olması durumunda bu işlemin oldukça zaman alması ve zahmetli olması durumu söz konusudur. Bu nedenle insansız hava araçlarıyla alınan fotogrametrik görüntüler ile daha kapsamlı ve oldukça fazla

detay içeren bir sayısal yüzey modelini hızlı bir şekilde oluşturmak ve devamında işlemek mümkün olmaktadır.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında yerleşimin orta derecede kaya düşme riski altında olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda, Saroglou (2012) tarafından önerilen kaya düşme riski sınıflamasında bu tür alanlar için basit kaya düşmesi önlemlerinin yeterli olabileceği ifade edilmesine rağmen, doğru tasarlanmayan bu önlemler neticesinde kaya düşmeleri yerleşimler için halen risk teşkil etmeye devam edecektir. Bu nedenle, kaya tutma hendeklerinin tasarımında öncelikle bölgeye özel kaya düşme modelleri gerçekleştirilerek, düşen kaya bloklarının darbe noktaları ve sıçrama yükseklikleri belirlenmeli, tutma hendeğinin lokasyonu, derinliği ve genişliği bu analizler sonucunda ortaya konmalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, UDAP-G-16-03 numaralı proje ile Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) Başkanlığı'na desteklenmiştir. Projeyi destekleyen ilgili kuruma teşekkür ederiz. Bununla birlikte AFAD, Planlama ve Risk Azaltma Dairesi Başkanlığı'ndan H. Gürhan İlgen ve Ahmet Demir'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Atabey, E., 1989. MTA Genel Müdürlüğü, 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Kayseri H19 (K33) Paftası, 18 syf.
- Barton, N., Bandis, S. C., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 603-610.

- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., Crosta, G.B., 2016. Rockfall at the heritage site of the Tatların Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards*, 82 (2), 1075-1098.
- Fanos, A.M., Pradhan, B., 2019. A novel rockfall hazard assessment using laser scanning data and 3D modelling in GIS, *Catena*, 172, 135-150.
- FHWA, 1989. Rock Slopes: Design, Excavation and Stabilization. Publication FHWA-TS-89-045. Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean.
- Gökçe, O., Özden, S., Demir, A., 2008. Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Afet Etüt ve Hasar Tespit Dairesi Başkanlığı, Ankara, 112 sf.
- Kayabaşı, A., 2018. The assessment of rockfall analysis near a railroad: a case study at the Kızılınler village of Eskişehir, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 800.
- Pierson, L.A., Gullixson, C.F., Chassie, R.G., 2001. Rockfall Catchment Area Design Guide. Final Report SPR-3(032) Oregon Department of Transportation, Salem.
- Ritchie, A.M., 1963. Evaluation of rockfall and its control. *Highw Res Board Rec* 17, 13-27.
- RocPro3D, 2014. RocPro3D software. http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php.
- Rocscience Inc., 2019. <https://www.rocscience.com/help/dips/> Erişim tarihi: 08.04.2019.
- Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P., Tsiambaos, G., 2012. Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 12, 1823-1836.
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J.C., Mateos, R.M., Tomás, R., Pastor, J.L., Cano, M., Herrera, G., 2018. Rockfall simulation based on UAV photogrammetry data obtained during an emergency declaration: application at a cultural heritage site. *Remote Sensing*, 10, 1923; doi:10.3390/rs10121923.

- Topal, T., Akin, M. K., Ozden, A.U., 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle. *Environmental Geology*, 53(1):191–200.
- Topal, T., Akin, M.K., Akin, M., 2012. Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Natural Hazards*, Vol. 62: 255–274.
- Tunusluoğlu, M.C., Zorlu, K., 2009. Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental Geology*, 56(5):963–972.
- Turner, A.K., Schuster, R.L., 2012. *Rockfall Characterization and Control*, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., 658 p.
- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes, In: R. L. Schuster and R. J. Krizek, Eds., *Landslides, Analysis and Control*, National Academy of Sciences, pp. 11-33.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterization and structural protection-a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2617-2651.
- Wyllie, D.C., 2015. *Rock Fall Engineering*. CRC Press, Taylor & Francis Group. 270 pp.
- Zorlu, K., Tunusluoglu, M.C., Gorum, T., Nefeslioglu, H.A., Yalcin, A., Turer, D., Gokceoglu, C., 2011. Landform effect on rockfall and hazard mapping in Cappadocia (Turkey). *Environmental Earth Sciences*. 62, 8, 1685-1693.

Araştırma Makalesi / Research Article

Kaya Modülleri Arasında Farklılıklar: Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman Barajlarından Örnek Çalışmalar

Differences Between Rock Modules: Case Studies From Deriner/Artvin and Ermenek/Karaman Dams

Ali KAYABAŞI^a 

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir, Türkiye

Geliş (Received): 05 Mart (March) 2019 / Düzeltme (Revised): 16 Nisan (April) 2019 / Kabul (Accepted): 22 Mayıs (May) 2019

ÖZ

Elastisite modülü ve deformasyon modülü kemer ve beton ağırlıklı baraj projelendirmelerin de girdi parametresi olarak kullanılır. Buna ilave olarak bu modüller kayaç ve kaya kütle sınıflamalarında da kullanılır. Deformasyon modülü ve elastisite modülü kavramları birbirinden farklı olmalarına rağmen uygulamada sıklıkla karıştırılmaktadır. Deformasyon ve elastisite modül değerleri arazi, laboratuvar deneyleri ve jeofizik yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman baraj yerlerinde yapılan dilatometre ve plaka yükleme deneyleri ve laboratuvar deneyleriyle belirlenen modül değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ayrıca literatürde karşılaşılan modül karşılaştırmaları da derlenmiştir. Kaya kütle dilatometre deneyi elastisite modülü (E_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi elastisite modülü (E_H), kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}), kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}), kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi deformasyon modülü (D_H) gibi modül değerleri arasında regresyon analizleri yapılmıştır. Modül değerlerinin aralarında yapılan regresyon analizleriyle anlamlı yüksek determinasyon katsayılı görgül eşitlikler belirlenmiştir. Bununla birlikte veri sayısının azlığı ve kaya kütle ortamlarının farklı özellikleri olması nedeniyle bu görgül eşitlikler diğer projelerde kullanılmamalıdır veya çapraz adımlı sınamalar yaparak kullanılmalıdır.

Anahtar kelimeler: Deformasyon Modülü, Elastisite Modülü, Deriner Barajı, Ermenek Barajı, Yerinde Deney

ABSTRACT

Elasticity modulus and deformation modulus are used as an input parameter in arch and concrete dam projects. In addition, these modules are used for the classification of intact rock and rock masses. Although the deformation and elasticity modulus are different from each other, they are often confused in practice. These modules are determined by in-situ tests, laboratory tests and geophysical methods. In this study, the deformation and elasticity modulus determined by dilatometer tests and plate loading tests at Deriner /Artvin and Ermenek /Karaman dam sites and modules obtained by laboratory test results were correlated. The module correlations in literature were compiled as well. Rock mass elasticity modulus (E_D) of dilatometer test, rock mass deformation modulus (D_D) of dilatometer test, rock mass elasticity modulus (E_H) of plate loading test, rock mass deformation modulus (D_H) of plate loading test, intact rock static elasticity modulus (E_{LS}) of laboratory tests, intact rock dynamic elasticity modulus (E_{LD}) of laboratory tests are correlated with regression analysis. Empirical equations obtained by regression analysis performed between rock modulus revealed high determination coefficient. The empirical equations proposed in this study are developed with a number of limited number of data and every rock mass has specific properties. The equations determined in this study should not be used for other projects or a cross check should be performed.

Key words: Deformation Modulus, Elasticity Modulus, Deriner Dam, Ermenek Dam, In-situ Test

GİRİŞ

Bu çalışmada Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman baraj yerlerinde yapılan dilatometre ve plaka yükleme deneyleri gibi yerinde deneyler ile laboratuvarda belirlenen kaya malzemesi modül değerleri karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeler sırasında uluslararası yayınlardan derlenen örnekler de sunulmuştur. Deney yöntemlerine göre kaya malzemesi ve kaya kütle modülleri farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte kaya malzemesi modülleri ve kaya kütle modülleri yanlış olarak birbirinin yerine kullanılabilir. Yerinde deneylerle belirlenen kaya kütle modülleri, kaya kütle deformasyon modülü ve kaya kütle elastisite modülü olarak, laboratuvar deneyleriyle belirlenen modüller ise kaya malzemesi statik elastisite modülü olarak bilinir. Bu çalışmada anlatım karmaşası olmaması için belirlendiği deneyin adı modül adı önüne yazılarak aşağıdaki gibi simgelenmiştir; kaya kütle dilatometre deneyi elastisite modülü (E_D), kaya

kütle plaka yükleme deneyi elastisite modülü (E_H), kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}), kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}), kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi deformasyon modülü (D_H). Bu çalışma ile modül değerlerinin belirlendiği deney yöntemlerine göre birbirinden farklı değerler ve anlamlar sunduğuna dikkat çekilmeye de çalışılmıştır.

Deriner Barajı temelden 249 m gövde yüksekliği ile Türkiye'nin en yüksek, dünyanın 6. en yüksek barajıdır. Baraj tipi beton kemerdir. Deriner Barajı ve HES, Doğu Karadeniz Bölgesinde Çoruh Nehri üzerinde ve Artvin İl Merkezini Erzurum İl Merkezine bağlayan Devlet Karayolu üzerindeki köprünün 5 km membasındadır. Ermenek Barajı, temelden 218 metre yüksekliğiyle Deriner Barajı'nın ardından Türkiye'nin en yüksek ikinci barajı unvanını taşır. Ermenek Barajı ve HES, Karaman ilinde Ermenek ilçesinde Göksu Nehri üzerindedir (<http://www.dsi.gov.tr/projeler>), (Şekil 1).

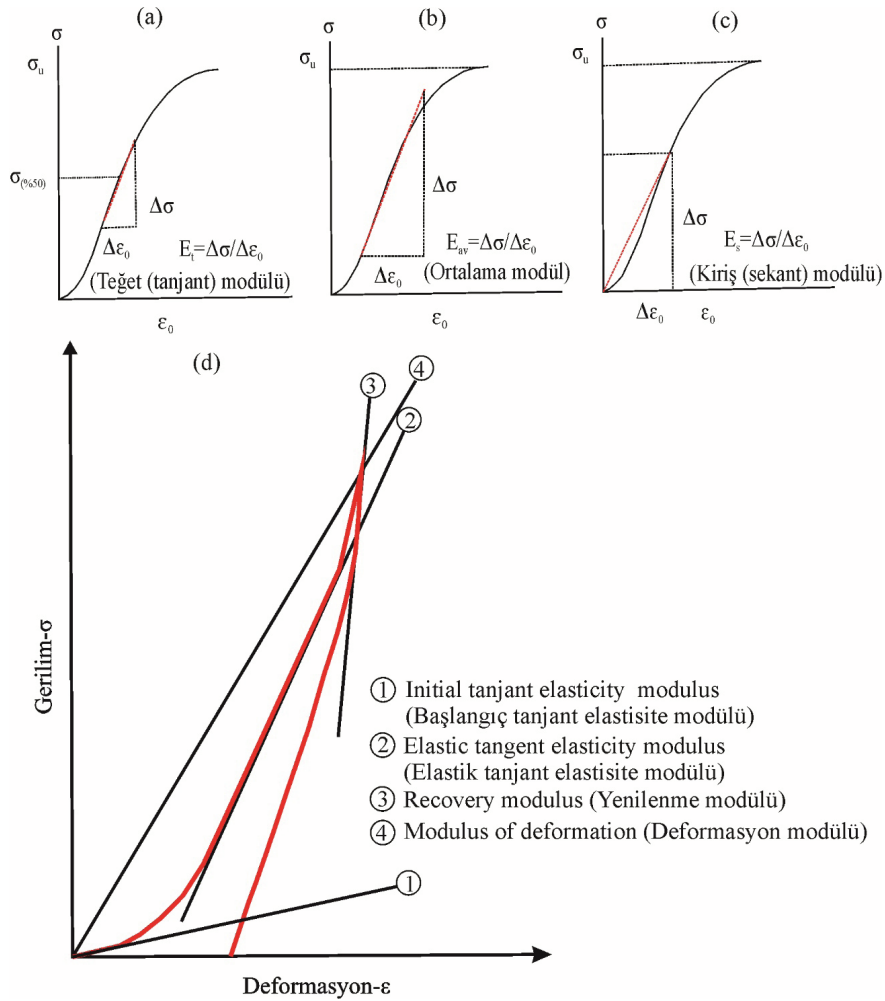


Şekil 1. Deriner ve Ermenek baraj yerleri lokasyon haritası.

Figure 1. Location map of Deriner and Ermenek dam sites.

Doğayı oluşturan her malzemenin yük altında kalması ve yükün kalkması, azalması koşullarında başlangıçtaki konumuna geri gelmesi sınırlarına bu malzeme için elastiklik sınırı adı verilir. Mühendislik uygulamalarında gerek kaya ve gerekse de zeminlerin elastiklik sınırlarının belirlenmesi önemli bir araştırma konusu olmuştur. Eksenel yükleme-deformasyon

eğrisinin doğrusal kısmının eğimine “Young modülü” diğer bir deyişle “elastisite modülü” adı verilir (ISRM, 1978). Laboratuvarında yapılabilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde Young modülünün belirlenmesi değişik ölçüm yöntemleriyle, teğet (tanjant) modülü, giriş (sekant) modülü ve ortalama modül gibi isimler almıştır (Şekil 2).



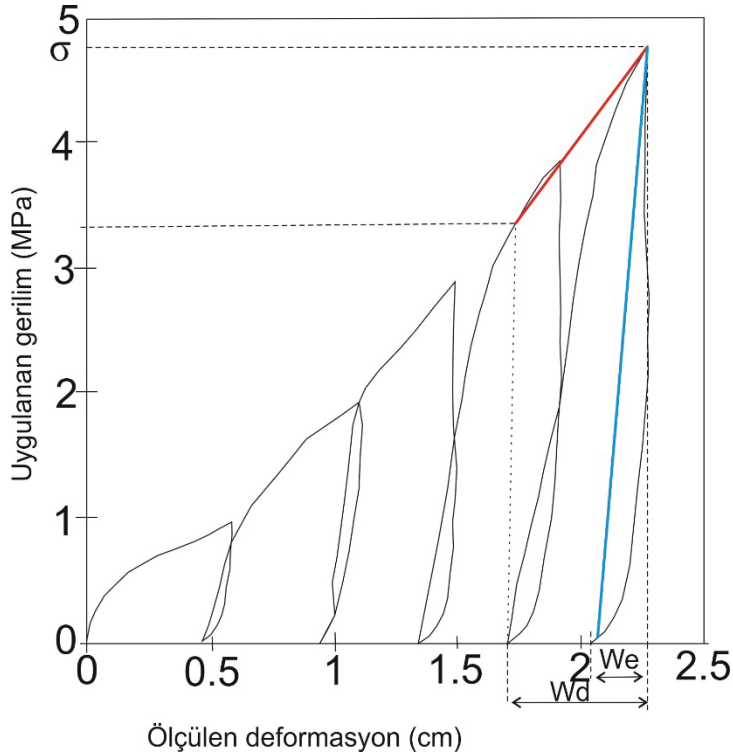
Şekil 2. Modüllerin belirlenmesi a) kaya malzemesi teğet (tanjant modülü) b) kaya malzemesi ortalama modül c) kaya malzemesi giriş (sekant modülü) (ISRM, 1978) d) Kaya kütlelerinde tek eksenli yükleme-boşaltma döngüsünden belirlenen modüller (Hoek ve Diederichs, 2006).

Figure 2. Determination of modules a) tangent modulus of intact rock specimen, b) average modulus of intact rock specimen, c) secant modulus of intact rock specimen, (ISRM, 1978) d) rock mass modules from obtained from single loading-unloading cycle (Hoek and Diederichs, 2006).

Deneyler sırasında kaya kütle üzerine kısa sürede uygulanan gerilim-deformasyon değerleri, uzun süreli değişen/değişmeyen gerilim değerleri altında kalacak bir baraj yapısı için yeterli olmayacaktır. Bu nedenle kaya kütlenin uzun süreli olarak proje yükleri altında bırakılarak deforme olmasının beklenmesi ve deformasyonların belirlenmesi olanağı, yerinde deneylerin avantajlarından birisidir.

Palmstrom ve Singh (2001) yerinde deneylerden oluşturulan gerilim-deformasyon

modülü değerlerinin nasıl hesaplanacağını göstermiştir. Yükleme-boşaltma döngülerine çizilen teğetin eğimi deformasyon modülünü verirken, yükleme-boşaltma döngülerinin her birinin doğrusal kısımlarının eğimi elastisite modülü değerini vermektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, uygulanan gerilim aralığı değerinin, W_d deformasyon aralığı değerine oranı deformasyon modülünü verir. Uygulanan gerilim aralığı değerinin, W_e deformasyon aralığı değerine oranı ise elastisite modülüdür.



Şekil 3. Yükleme-boşaltma döngülerinden kaya kütle deformasyon modülünün ve elastisite modülünün belirlenmesi (Palmstrom ve Singh, 2001).

Figure 3. Rock mass deformation modulus and elasticity modulus determined by loading-unloading cycles (Palmstrom and Singh, 2001).

Laboratuvar ortamında sonik hız deneyi (ultrasonik dalga hızları kullanılarak dinamik elastisite modülünün tayini) yardımıyla kaya malzemesi dinamik modül değerleri belirlenebilmektedir. Kaya malzemesi modülleri E_{LD} ile E_{LS} 'nin karşılaştırılması ve aralarındaki farklılıklar pekçok araştırmanın konusu olmuştur (Al-Shayea, 2004; Ciccoti ve Mulargia, 2004; Song vd., 2004; Christaras vd., 1994; Gue'gen ve Palciauskas, 1994). Bozunma derecesinin artmasıyla, E_{LS} değerinin düşmesiyle, E_{LD} ve E_{LS} değerleri arasındaki farkın arttığı belirlenmiştir (Gue'gen ve Palciauskas, 1994; Al-Shayea, 2004).

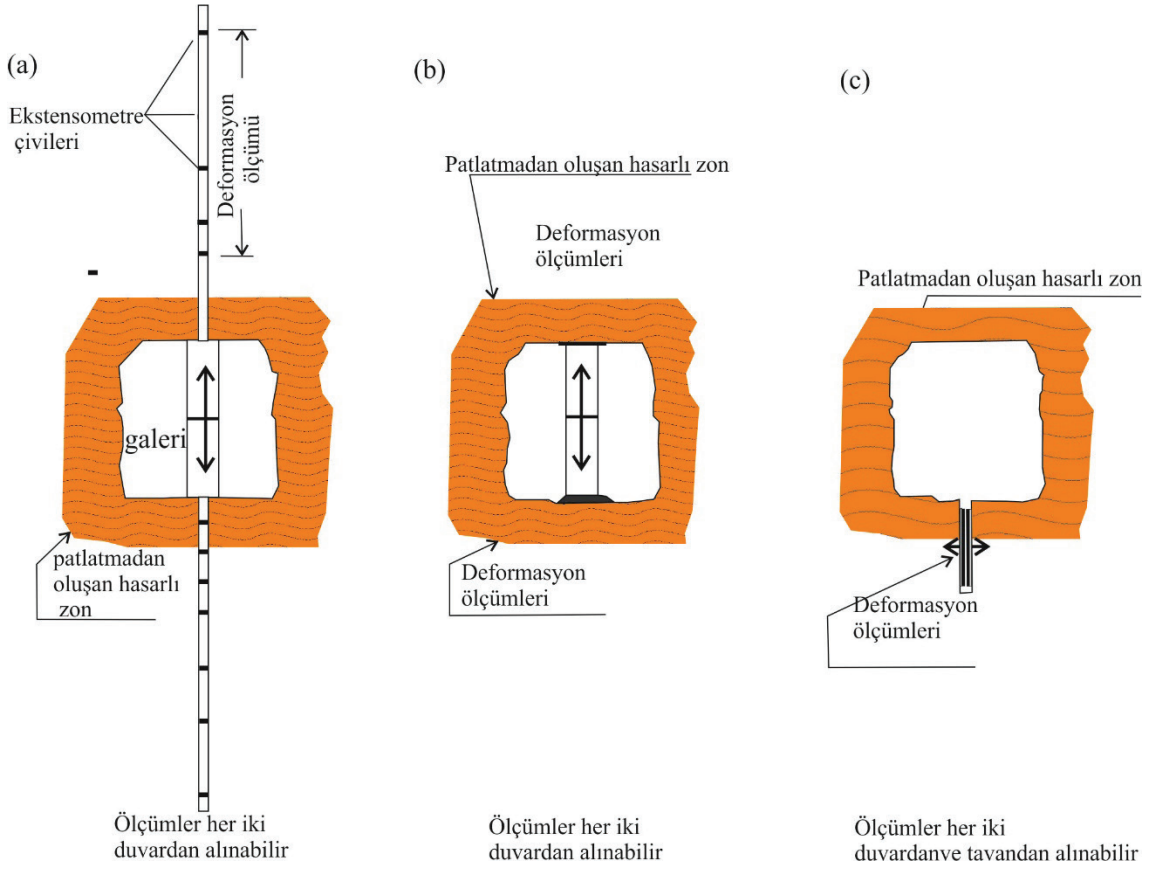
Sonik hız deneyinde AX çaplı (31 mm) ve daha büyük örnekler üzerinde V_p ve V_s yayılma hızları belirlendikten sonra aşağıdaki eşitlik kullanılarak dinamik young modülü (E_{LD}) belirlenir (ASTM D2845, 2008).

$$\text{Dinamik Young modülü (Pa): } E_{LD} = \rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

Kaya kütleleri üzerinde yapılan yapıların oluşturacağı yükün, kaya kütesinin elastik sınırları içerisinde olması önemlidir. Bu sınırlar üzerinde yapılan yüklemelerde yapılarda aşırı oturma ve taşıma gücü sorunları ortaya çıkar. Yapıların temelini oluşturan kaya kütlelerinin farklı modüllere sahip olması da yapıda farklı oturmalara ve deformasyonlara sebep olabilir. Özellikle kemer tipi barajlarda temel kaya kütesinin farklı modül değerlerine sahip olması, baraj gövdesi için risk oluşturmaktadır. Kaya kütesinin deformasyon modülü ile baraj gövdesinde kullanılan betonun elastisite modülü arasındaki oran, beton gövdede oluşacak gerilimlerin değerinde belirleyicidir. Beton deformasyon modülü ile kaya kütle deformasyon modülü oranının tüm baraj eksen boyunca sabit

olması tercih edilir. Kullanılacak betonunun modül değeri ile temeli oluşturan kaya kütesinin modül değeri oranının 16 ve üstünde olması, barajın deformabilitesinin taban kaya kütle tarafından belirlendiğini göstermektedir. Bu oranın 4 ve altına düşmesi durumunda temel kayasının deformabilite üzerindeki etkisinin gittikçe azaldığı görülmüştür. Kullanılacak beton modül değeri ile yapı yükünü taşıyacak olan kaya kütle modül değeri arasındaki etkileşim sadece beton barajlar için değil diğer jeoteknik uygulamalarda da geçerlidir (örneğin köprü ayakları, yüksek binalar) (Wyllie, 1992).

Gerek laboratuvar ve gerekse yerinde deneylerinin yapılması ayrıntılı bir hassasiyet gerektirmektedir. Laboratuvar ve yerinde deneyleri ile kayaç ve kaya kütle özelliklerinin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için yeterince tecrübeli teknisyen, cihazların standartlara göre üretilmesi, cihaz kalibrasyonlarının doğru yapılması, uygulanan deney programlarının ilgili standartlara uygun olarak yapılması gibi koşullar vardır. Bu koşulların yeterince sağlanamaması nedeniyle, mm ölçeğinde alınan deformasyonlardaki hatalar tüm sonuçları etkileyebilecektir. Yerinde deneylerin yapılacağı kaya ortamında yapılan patlatma işleminin kaya kütleinin özelliklerine etkisi olmaktadır. Palmstrom ve Singh (2001) plaka krika (PJT), plaka yükleme (PLT) ve Goodman krika deneylerinin uygulanmasında patlatma kaynaklı dezavantajları çalışmışlardır (Şekil 4). Araştırmacılar galerilerde yapılan plaka yükleme deneyi verilerinin patlatma etkisi altında olduğunu ve düşük veriler belirlendiğini tespit etmiş, en sağlıklı ölçümün PJT ile extensometreler ile patlatmadan etkilenen seviyelerden alınmasını önermişlerdir.



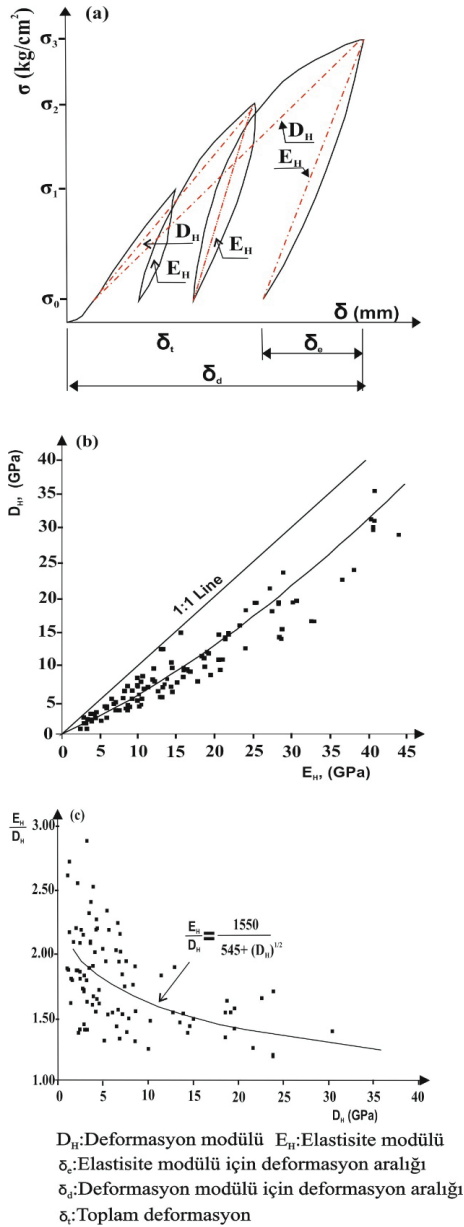
Şekil 4. a) Plaka Kriko Deneyi (PJT) b) Plaka Yükleme Deneyi (PLT) c) Goodman Kriko Deneyi .

Figure 4. a) Plate Jacking Test (PJT) b) Plate Loading Test (PLT) c) Goodman Jacking Test.

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Jeoteknik çalışmalardan belirlenen modüller arasındaki ilişkileri tespit etmek araştırmacıların üzerine düştüğü bir konu olmuştur. Kujundzic ve Grujic (1966)'da Yugoslavya'da kireçtaşlarında yapılan baraj etütlerinde belirlenen yerinde modül değerleri için genelleştirilmiş Eşitlik 2'yi önermişlerdir. Şekil 5a'da ise yerinde deformasyon modülü (D_H) ve yerinde elastisite modülü (E_H) değerlerinin belirlenişini

göstermişlerdir. Burada E_H boşaltma eğrilerinin eğiminden belirlenmiştir. Toplam deformasyon en yüksek yükleme seviyesinden belirlenmektedir. Gerilim seviyesine bağlı olarak D_H değeri değişebilirken E_H değeri sabit kabul edilebilir. Bu nedenle $E_H > D_H$ eşitsizliğinin farklılığı gerilim seviyesine bağlı olarak değişebilir. E_H ve D_H arasındaki farklılık Şekil 5b ve 5c'de net olarak görülmektedir. En geniş eşitsizlik aralığı 1.5 ile 2.5 arasında değişmektedir.



Şekil 5. a) Yugoslavya'da kireçtaşlarında yapılan örnek yükleme-boşaltma deneyi b) D_H - E_H modüllerinin karşılaştırılması c) E_H/D_H - D_H grafiği (Kujundzić ve Grujić, 1966).

Figure 5. a) A sample loading-unloading test performed on Yugoslavia limestones b) comparison of D_H - E_H modules c) E_H/D_H - D_H graph (Kujundzić and Grujić, 1966).

$$E_H \approx \frac{15.50 D_H}{6.45 \sqrt{D_H}} \quad (2)$$

Eşitlik 2'den görüleceği gibi D_H değerinin 5 ve 50 GPa arasında olması durumunda E_H değerinin 8.9 ve 57.5 GPa olduğunu görürüz. E_H ve D_H değerlerinin farklılığının küçük değerlerde daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kaya kütlelerinde var olan süreksizliklerin ve ayrışmanın yükleme ve boşaltma eğrilerine etkisinden kaynaklanmaktadır.

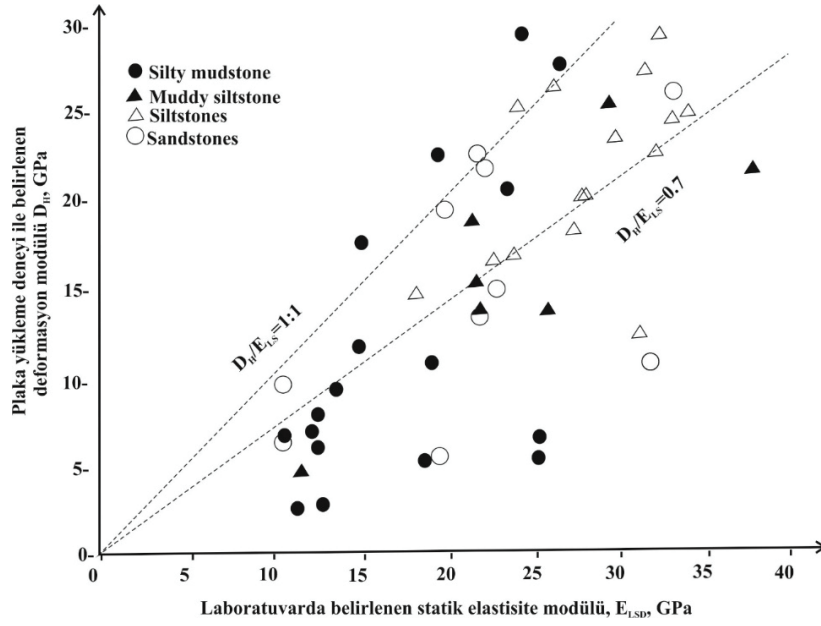
Bieniawski (1978) Güney Afrika Orange Nehri projelerinde yapılan plaka yükleme deneylerinden belirlenen D_H değerleri ile aynı seviyelerden alınan örneklerden laboratuvarda belirlenen E_{LS} değerlerini karşılaştırmıştır (Şekil 6). Dört ayrı kaya kütlelerinde yapılan yerinde deneyler ile laboratuvar deneylerinden belirlenen modül değerleri arasında anlamlı bir bağıntı belirlenememiştir, E_{LS} modülleri plaka yükleme deneylerinden belirlenen D_H modüllerinden büyük olarak belirlenmiştir.

Kulhawy ve Goodman (1980)'de kaya kütle deformasyon modülünün belirlenmesine yönelik Eşitlik 3'ü önermiştir

$$D = j E_{LS} \quad (3)$$

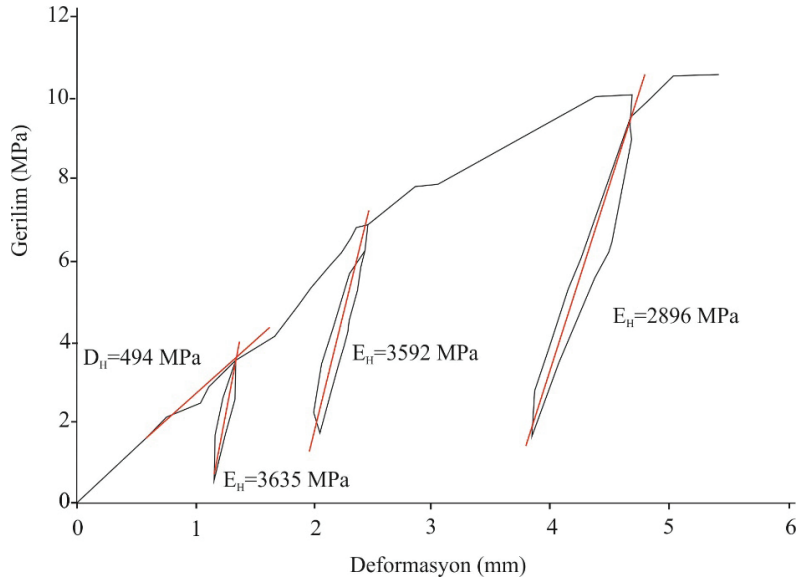
Burada D :kaya kütle deformasyon modülü, j :ortalama süreksizlik aralığı, E_{LS} : sağlam kaya elastisite modülünü ifade etmektedir.

Galera vd. (2005) Fransa'da Penthus tüneline açıldığı şişt kaya kütlelerinde plaka yükleme deneyi yapmıştır. Çalışmalarından örnek olarak verdikleri plaka yükleme deneyi grafiğinde $E_H/D_H \approx 7$ değerine ulaşmaktadır (Şekil 7).



Şekil 6. Plaka yükleme deneyi ile belirlenen deformasyon modülü (D_H) ile laboratuvarda belirlenen statik elastisite modülünün (E_{LS}) karşılaştırılması (Bieniawski, 1978).

Figure 6. Comparison of the deformation modulus (D_H) determined by plate loading test and the static elasticity modulus (E_{LS}) determined by laboratory tests (Bieniawski, 1978).



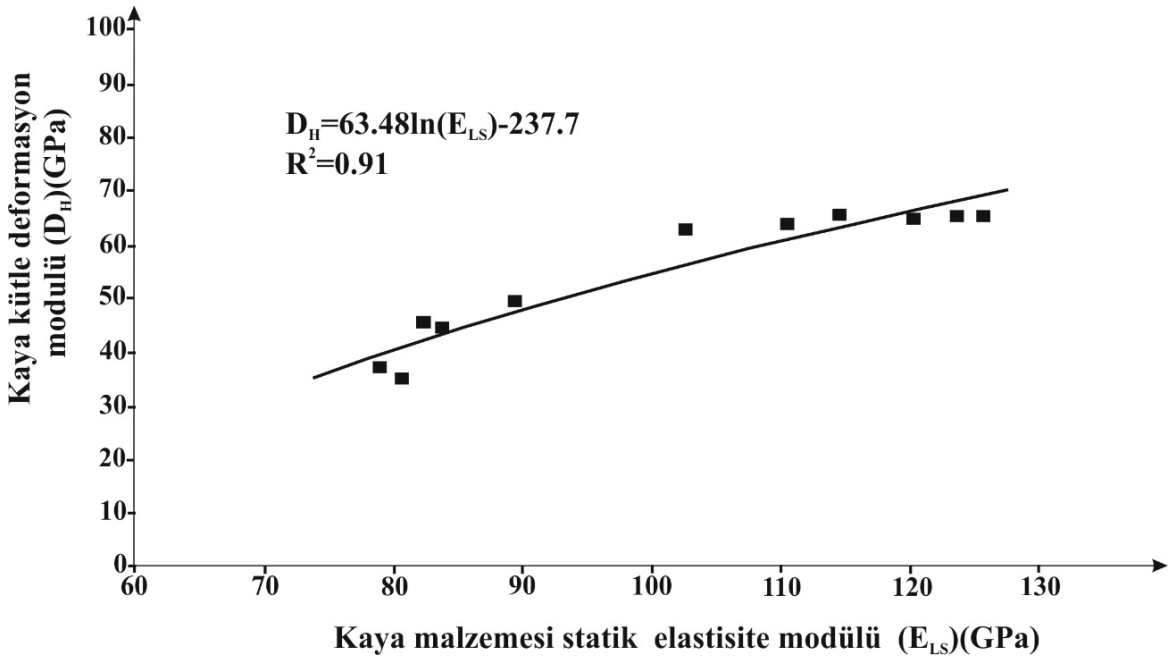
Şekil 7. Penthus tünelinin (Fransa) açıldığı şistlerde yapılan bir plaka yükleme deneyi grafiği (Galera vd., 2005).

Figure 7. A plate loading test graph carried out on schist rock mass of Penthus tunnel (France) (Galera et al., 2005).

Munır (2006), Pakistan'daki Indus nehri üzerinde Khyber Pakhtunkhwa bölgesinde projelendirilen Basha barajı etütlerinde yaptığı doktora tezi çalışmalarında kaya sınıflama sistemleri ile deformasyon modüllerini karşılaştırmıştır. Baraj yeri mafik intrüsiyonlardan dioritlerden oluşmaktadır. Diorit kaya kütlesi açık renkli, çok yüksek dayanımlı ve masiftir. Bu tez çalışmasında Basha baraj sahasında plaka yükleme deneylerinden belirlenen yerinde deformasyon modülleri (D_H) ile yerinde deneylerin yapıldığı litolojilerden alınan kayaç örneklerinden laboratuvarında belirlenen elastisite modülleri (E_{LS}) karşılaştırılmıştır. E_{LS} değerleri ile D_H arasındaki ortalama modül oranı 0.55

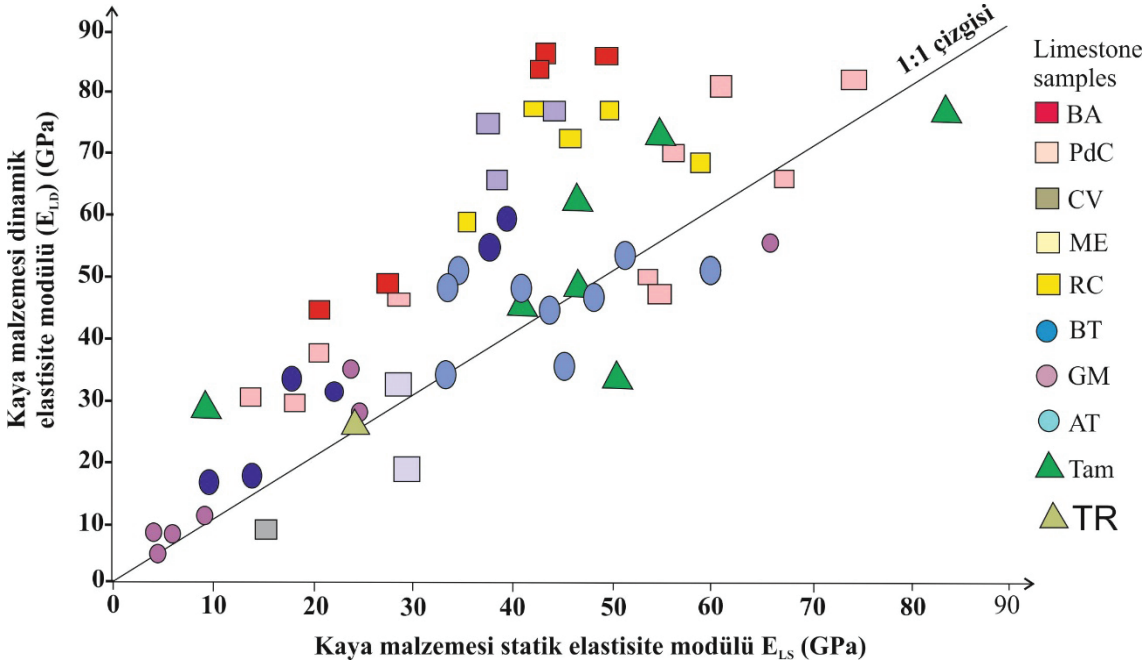
olarak belirlenmiştir. E_{LS} değeri devamlı olarak D_H değerinden yüksek çıkmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi E_{LS} - D_H arasında logaritmik bir ilişki ile determinasyon katsayısı $R^2=0.91$ olarak belirlenmiştir.

Martínez vd. (2012) bozunmuş ve bozunmamış on ayrı kireçtaşında kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}) ve kaya malzemesi elastisite modüllerini (E_{LS}) belirlemişlerdir. Şekil 9'da E_{LD} ile E_{LS} değerlerinin karşılaştırma grafiği verilmiştir. Her iki değer arasında zayıf bir ilişki vardır. 1:1 çizgisi E_{LD}/E_{LS} değerinin 1 olduğu konumu ifade eder.



Şekil 8. Kaya kütle deformasyon modülü (D_H)-kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}) arasında yapılan regresyon analizi grafiği (Munır, 2006).

Figure 8. The regression analysis graph of the rock mass deformation modulus (D_H) and the intact rock elasticity modulus (E_{LS}) (Munır, 2006).



Şekil 9. Kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}) kaya malzemesi ile statik elastisite modülü (E_{LS}) arasında yapılan regresyon analizi grafiği (Martínez vd., 2012).

Figure 9. The regression analysis graph between the intact rock dynamic modulus (E_{LD}) and the intact rock static elasticity modulus (E_{LS}) (Martínez et al., 2012).

$$E_{LD} = \rho_{bulk} V_p^2 \frac{(1 - 2\gamma)(1 + \gamma)}{(1 - \gamma)} \quad (4)$$

Araştırmacılar E_{LD} değerini Eşitlik 4'ten belirlemiştir. Burada ρ = bulk yoğunluk, V_p = P dalgası hızı, ν : poisson oranıdır.

$$E_{LS} = \frac{1}{K} \rho_{bulk} V_p^2 \frac{(1 - 2\gamma)(1 + \gamma)}{(1 - \gamma)} \quad (5)$$

$E_{LD}/E_{LS}=K$ katsayısı ile tanımlanması durumunda olarak ifade edilmiştir. $K>1$ olması durumunda E_{LD} değeri gerçek değerinden fazla tahmin edilirken, $K<1$ olması durumunda E_{LD} gerçek değerinden az tahmin edilir. Bu çalışmada K katsayısı 0.5 ile 2.1 arasında belirlenmiştir. Ciccotti ve Mulargia (2004) K katsayısının 1-1.3

arasında belirlerken, Al-Shayea (2004) ise K katsayısını 0.85-1.86 arasında olmasını ifade etmişlerdir.

Brotons vd. (2014) değişik sıcaklıkta ısıtılan sedimanter kayaların dinamik ve statik modülleri arasında iki analitik görgül ilişki geliştirmişlerdir. Araştırmacılar aynı zamanda bu konuda daha önce önerilen görgül eşitliklerin performansını da test etmişlerdir. Geliştirilen bu görgül eşitlikler ile İspanya'nın Alicante şehrindeki bulunan tarihi binaların yapımında kullanılan San Julián's taşlarının dinamik elastisite modülü değerinden statik elastisite modülü değerini tahmin etmişlerdir. Bu yöntemle tarihi yapılardan karot almayarak, yapılara zarar vermemişlerdir. Araştırmacılar, K katsayısının (E_{LD}/E_{LS}) yüksek modüllü kayalarda bire yaklaştığını ifade etmiştir. Düşük

modüllü kayaçlarda K katsayısının birden fazla olabileceğini bunun nedeninin ise statik elastisite modülünün hacim, oryantasyon ve çatlakların dağılımından etkilendiğini, dinamik elastisite modülünün bu tür fiziksel özelliklere karşı düşük hassasiyette olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

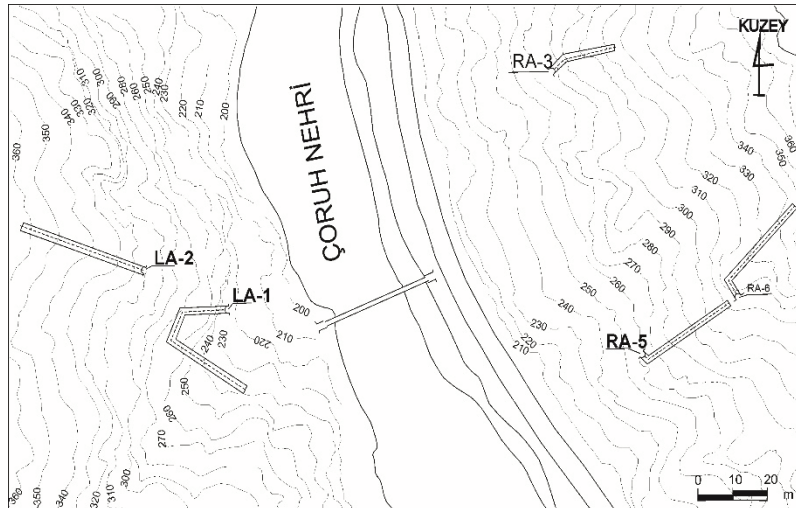
DERİNER/ARTVİN VE ERMENEK/ KARAMAN BARAJ YERLERİNDEN ÖRNEKLER

Deriner (Artvin) Barajı Plaka Yükleme Deneyi Çalışmaları

Deriner Barajı ve çevresi gri, pembemsi kuvarsdiyoritlerden oluşur. ISRM (1981)'e göre süreksizlik aralığı orta ve geniştir. Süreksizlik açıklıkları ise kapalı veya kısmen açıktır. Süreksizlik açıklıklarında kuvars dolgu vardır. Süreksizlik yüzeyleri genelde pürüzlü ve az ayrılmıştır. Deriner Barajı araştırmalarında

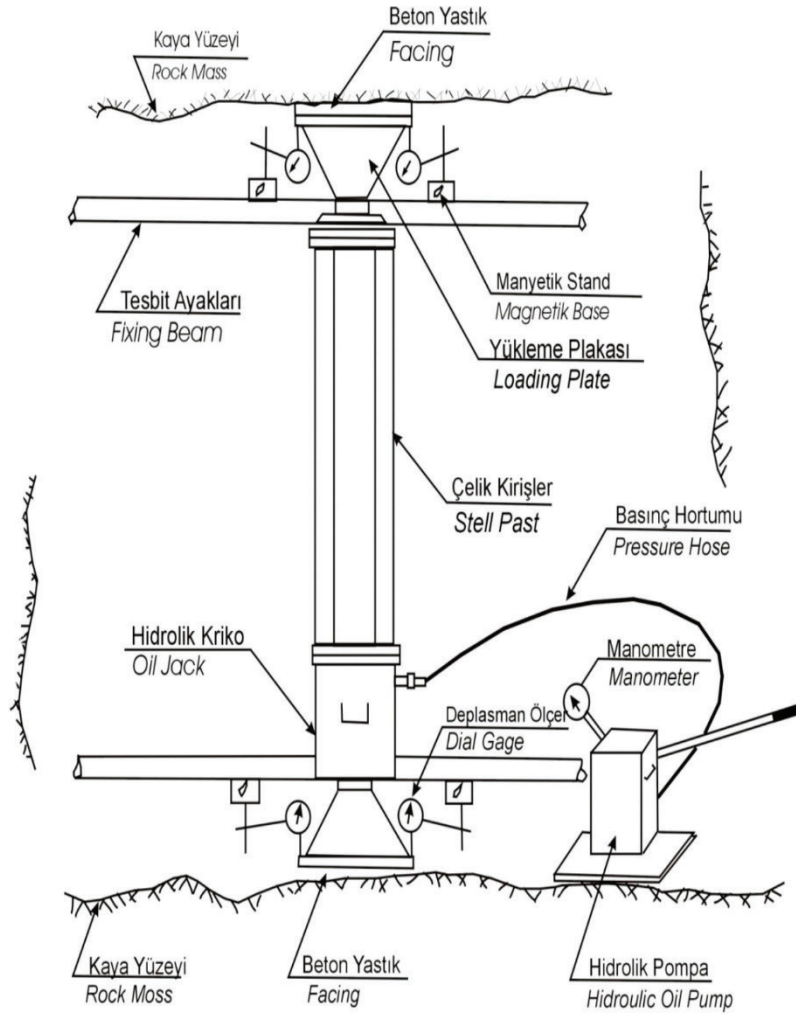
açılan galerilerde 48 adet galeri içi plaka yükleme deneyi (Narin vd., 1986) ve bu galeriler içinde açılan sondaj kuyularında 23 adet Oyo 200 dilatometresi deneyi yapılmıştır (Kaya ve Kayabaşı, 1992), (Şekil 10).

Plaka yükleme deneyi, ortalama kesitli galeriler içerisinde anizotropi etkisini azaltmak için deney galerisinin eksenine paralel ya da dik olacak şekilde yatay ve düşey yönde yükleme uygulanarak yapılmıştır (ASTM D4394, 2017). Bu çalışmada deneyde uygulanan yükler “MPa” ve oluşan deformasyonlar “mm” cinsinden belirlenmiştir. Yükleme sırasında, 0.5 MPa’lık bir yükleme 1 dakika süresince verilmiş ve bunu takip eden süre sonunda okumalar alınmıştır. Aynı şekilde 2 dakikalık zaman sürecinde yük düşürülerek okuma yapılmıştır. Maksimum gerilim 6.5 MPa olarak alınmıştır. Deneyler yatay ve düşey yönlü yapılmıştır. Deformasyon ölçümleri her plaka çevresindeki 3 adet deformasyon göstergesi tarafından alınmıştır (Şekil 11).



Şekil 10. Deriner (Artvin) baraj yeri galeri lokasyon haritası.

Figure 10. Location map of galleries at the Deriner (Artvin) dam site.

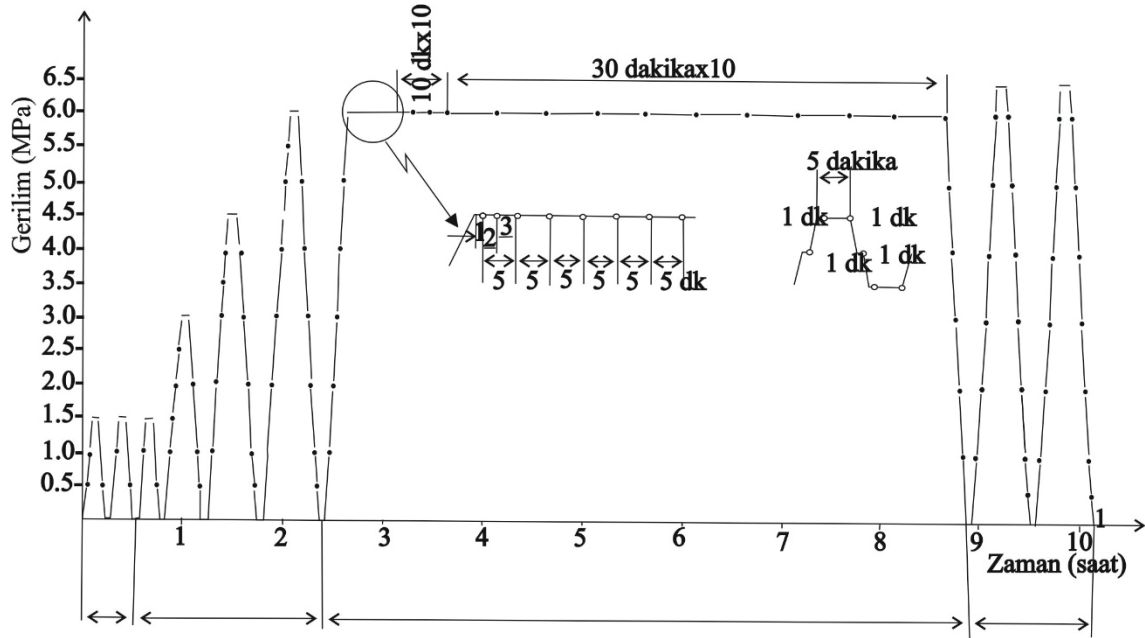


Şekil 11. Düşey yönlü plaka yükleme deneyi şematik görünümü (EİE-122, 1992).

Figure 11. Schematic view of vertical plate loading test (EİE-122, 1992).

Galeri içerisinde plaka yükleme deneyi için değişik deney programları vardır. Yükleme-

zaman uygulamaları zemine bir program dahilinde uygulanmıştır (Şekil 12).

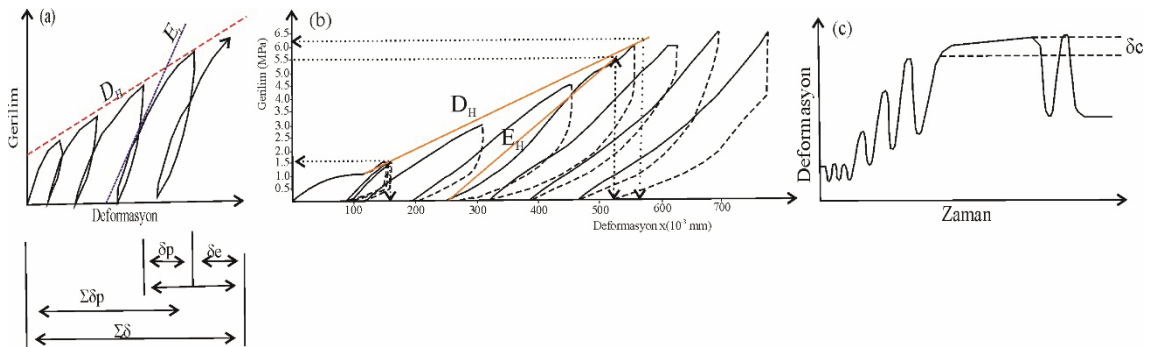


Şekil 12. Plaka yükleme deneyi için gerilim-zaman programı (Narin vd., 1986).

Figure 12. Stress-time program for plate loading test (Narin et al., 1986).

Deney sonunda oluşan deformasyon-basınç ve zaman-deformasyon grafikleri üzerinden şematik olarak da gösterilen toplam deformasyon (δ), elastik deformasyon (δ_e), plastik deformasyon (δ_p), kümülatif toplam deformasyon ($\Sigma\delta$),

kümülatif plastik deformasyon ($\Sigma\delta_p$) ve akma deformasyonu (δ_c), deformasyon modülü (D_H), tanjant elastisite modülü (E_t) ve sekant elastisite modülü (E_s) hesaplanır (Şekil 13).



Şekil 13. Plaka yükleme deneyi a) gerilim-deformasyon grafiği b) örnek deneyde deformasyon modülü ve elastisite modülünün belirlenmesi c) deney programına göre uygulanmış deformasyon-zaman grafiği (Narin vd., 1986).

Figure 13. Plate loading test a) stress-deformation graph b) determination of deformation modulus and elasticity modulus from a sample test c) deformation-time graph applied according to test programme (Narin et al., 1986).

Şekil 13 b’de örnek bir plaka yükleme deneyinden elastisite modülü ile deformasyon modülü belirlenmesine yönelik teğet eğrilerle aşağıdaki işlemlerle elastisite modülü ve deformasyon modülü belirlenir.

$$E_H = \pi a(1-\gamma^2)/2.(\Delta\sigma/\Delta\delta_{et}) = (3.14 \times 17.75 \times (1-0.25^2)/2) \times (5.5/(536-246)) = 4.85 \text{ GPa} \quad (6)$$

$$D_H = \pi a(1-\gamma^2)/2.(\Delta\sigma/\Delta\delta_d) = (3.14 \times 17.75 \times (1-0.25^2)/2) \times (4.5/(561-162)) = 2.88 \text{ GPa} \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitliklerde

a = Yükleme plakası yarı çapı (17.75 cm)

γ = Poisson oranı (Bu oran laboratuvar deneyleri ile bulunabileceği gibi kabule dayalı da olabilir : ($\gamma=0.25$)

$\Delta\sigma$ = Basınç artış farkı (MPa)

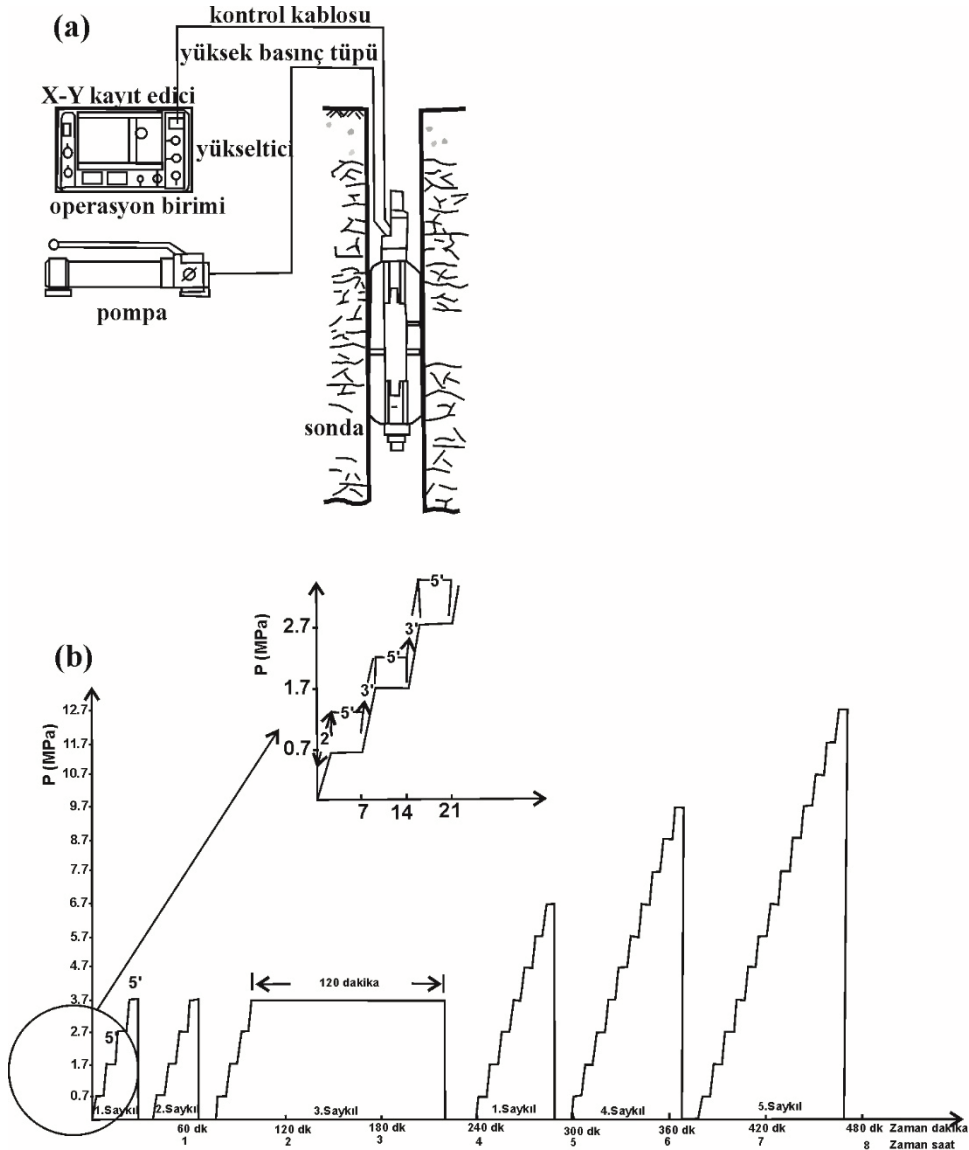
$\Delta\delta_{et}, \Delta\delta_d$ = Basınç artış farkına bağlı deformasyon artış farkları (mm)

Oyo 200 Dilatometresi (Elastmeter 200) deneyi, baraj, tünel, köprü ayağı gibi yapıların temelini oluşturan kaya kütlelerinin elastik modüllerinin (E, D), akma dayanımının (P_y), kırılma dayanımının (P_{max}), zemin sabitinin (k) ve deformasyon özelliklerini belirlemede kullanılır. Oyo 200 Dilatometre deneyi Elektrik İşleri Etüt İdaresinin hazırladığı deney normuna göre yapılmıştır (EİE-124, 1992; ASTM 477, 1970). Deney kuyu içinde sondanın basınç yüklenmesiyle yapılır (Şekil 14). Yükleme hızı uygulamada 0.1-1 MPa/cm/dakika arasında

değerler olarak alınmaktadır. Genel bir kural olarak zayıf kayalar daha yavaş, sağlam kayalar daha hızlı yüklenebilir. Şekil 14’de görüleceği gibi üç kez 3.4 MPa yükleme yapılmış, üçüncü yükleme sonunda iki saat bekleme yapıldıktan sonra yük boşaltılmış sonra 6.4 MPa, 9.4 MPa ve 12.4 MPa yükleme ve boşaltma yapılarak deneye son verilmiştir. Deneyin her yükleme için 2 dakika süre sonrasında yüklemede 5 dakika beklenerek deformasyon kayıtları alınmıştır.

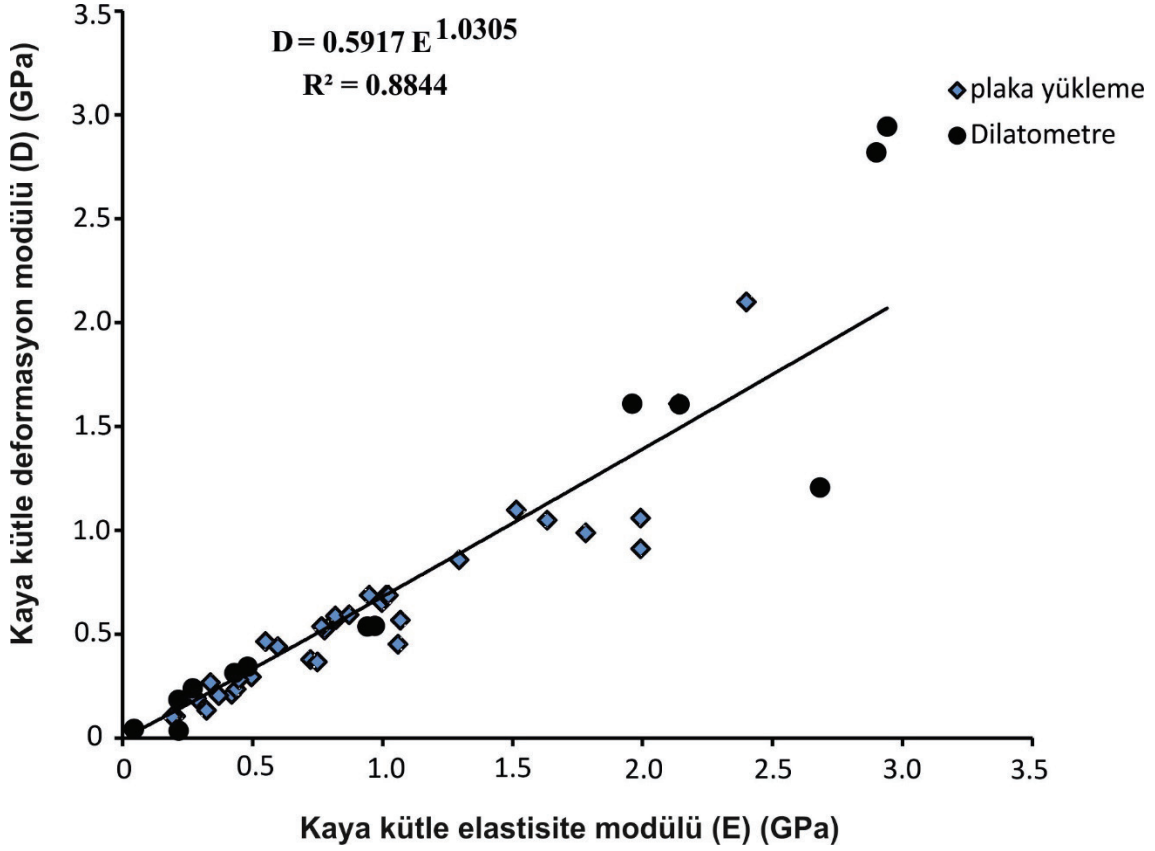
Deriner Baraj Yeri Modül Değerlendirmeleri

Galeri içi plaka yükleme deneyleri ve galeri içlerinde yapılan dilatometre deneyleri sonuçları değerlendirilmiştir. Bu yükleme deneylerinden belirlenen deformasyon modülleri ile elastisite modülleri arasında yapılan regresyon analizinde üs fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.88 belirlenmiştir (Şekil 15). Örnekeyecek olursak Elastisite modülü (E)=0.5 MPa olması durumunda, deformasyon modülü (D)=0.3 MPa olacaktır. E ve D modül değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değerın yükselmesi durumunda saçılmaların arttığı gözlenmektedir. Kaya kütledeki süreksizliklerin kapanması ve kaya kütleinin dayanımının litolojik dayanıma bağlı kaldığı durumda tek bir döngüdeki düşük deformasyon aralığı E modül değerini yüksek belirlerken, birkaç döngü eğiminden belirlenen D modül değerinin daha düşük olmasına neden olacaktır. Bu farklılık, yüksek gerilimlerde belirlenen E modül ve D modül değerlerinde daha fazla belirgindir.



Şekil 14. a) Dilatometre deneyi cihazları şematik görünümü, b) Deriner baraj yeri dilatometre deneyi yükleme programı.

Figure 14. a) Schematic view of dilatometer test equipment, b) loading programme of dilatometer test applied at Deriner dam site.



Şekil 15. Kaya kütle elastisite modülü (E) ve Kaya kütle deformasyon modülü (D) arasındaki eşitliği gösteren grafik.

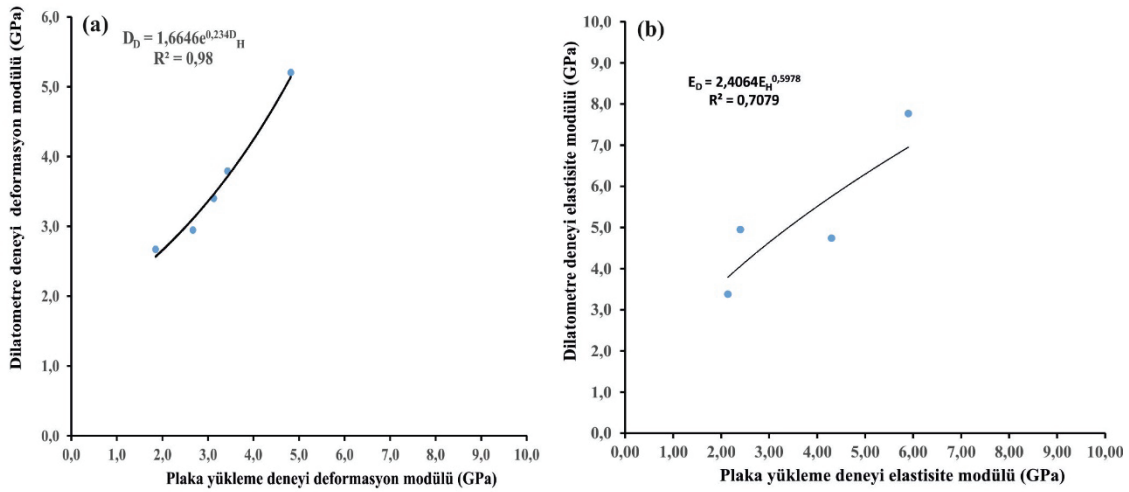
Figure 15. Graph showing the relation between rock mass elasticity modulus (E) and rock mass deformation modulus (D).

Deney lokasyonları birbirine çok yakın 6 adet plaka yükleme deneyi ve dilatometre deneyi belirlenmiş ve bu deneylerden hesaplanan modüller arasında regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 16). Bu analizde kullanılan veri sayısının az olmasının nedeni plaka yükleme ve dilatometre deneylerinin yapıldığı lokasyonların çok yakın olmasının şartının aranmasıdır. Deney lokasyonları arasının mesafe olarak fazla olması, deneyin yapıldığı yön farklılığı, kaya kütlenin anizotropisi gibi faktörler sonucu etkileyecektir. Şekil 16a'da plaka yükleme deneyi deformasyon modülleri ile dilatometre deneylerinden belirlenen deformasyon modülleri arasında

yapılan regresyon analizinde üstel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.98 belirlenmiştir. Determinasyon katsayısının yüksek olması, her iki deneyde de belirlenen modül değerlerinin birbirinden çok farklılıklar göstermediği görülmektedir. Şekil 16a'da görüleceği gibi 5 adet veri karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'de verilmiş olan SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri (D_D =12.07 GPa ve D_H =1.91 GPa) uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. Şekil 16b'de ise plaka yükleme deneyi elastisite modülleri ile dilatometre deneylerinden belirlenen elastisite modülleri arasında yapılan regresyon analizinde

üs fonksiyonu ile en yüksek determinasyon katsayısı ($R^2=0.71$) belirlenmiştir. Şekil 16b’de görüleceği gibi 4 adet veri karşılaştırılmıştır. Çizelge 1’de verilmiş olan SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri ($E_D=26.83$ GPa ve $E_H=5.83$ GPa) ile SK-12 deneyinden belirlenen modül değerleri ($E_D=4.80$ GPa ve $E_H=0.82$ GPa) değerleri uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. SK 9E ve SK-12 kuyularının olduğu galeri bölümünün açımı sırasında patlatmadan daha çok hasar aldığı ve elastisite modüllerinin daha çok saçılım yapması, verilerin daha net farklılık göstermesinden elastisite modülünün, deformasyon modülüne göre daha hassas olduğunu söyleyebiliriz. Bunun nedeni ise elastisite modülünün tek bir döngüden belirlenirken, deformasyon modülünün birkaç döngüden belirlenmesidir.

Deriner Baraj yerinden alınan örneklerden laboratuvarında belirlenen E_{LD} ve E_{LS} modüllerinin regresyon analizi sonucu Şekil 17a’da verilmiştir. Logaritmik fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı ($R^2=0.52$) belirlenmiştir. Regresyon analizi eşitliğinden de görüleceği gibi E_{LD} değerleri devamlı olarak E_{LS} değerlerinden fazla çıkmaktadır. E_{LS} değerinin 20 olması durumunda E_{LD} değeri 36 olmaktadır. K değeri (E_{LD}/E_{LS})=1.8 olur. E_{LS} değerinin 50 olması durumunda E_{LD} değeri 56.87 olmaktadır. K değeri (E_{LD}/E_{LS})=1.14 olur. E_{LD} ve E_{LS} değerlerinin artışıyla K değerinin 1’e yaklaşmasını kayaç malzemede bozunma derecesinin azalmasından kaynaklanmakta olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 16. a) Plaka yükleme deneyi deformasyon modülü ile dilatometre deneyi deformasyon modülünün karşılaştırılması b) Plaka yükleme deneyi elastisite modülü ile dilatometre deneyi elastisite modülünün karşılaştırılması.

Figure 16. a) Correlation of plate loading test deformation modulus and dilatometre test deformation modulus b) Correlation of plate loading test elasticity modulus and dilatometre test elasticity modulus.

Kayabaşı

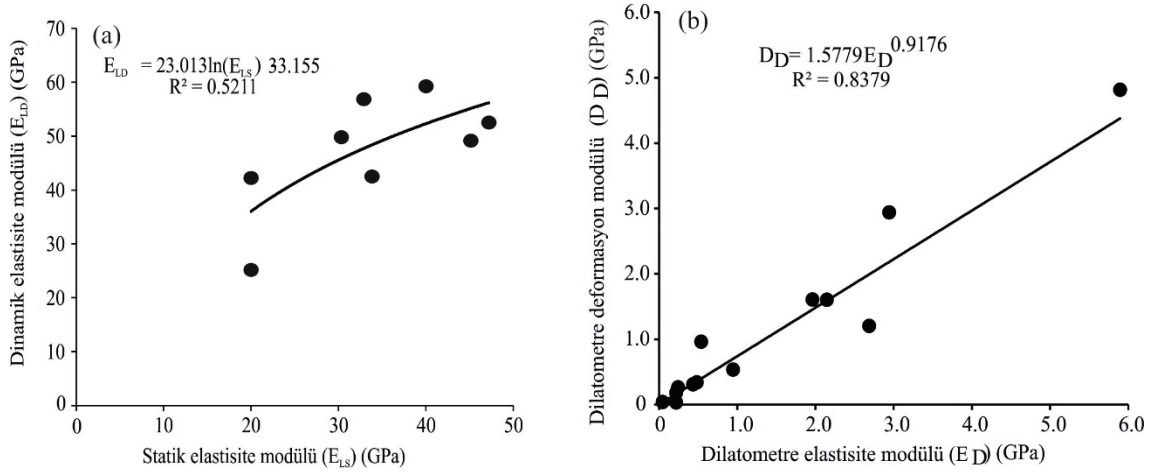
Çizelge 1. Deriner baraj yerinde farklı deneylerle belirlenen modüller.

Table 1. Modules determined by means of different tests at Deriner dam site.

Kuyu no	Galeri	Deney zone (m arası)	Litoloji	Elastisite modülü (GPa)				Deformasyon modülü (GPa)	
	LA-1			E_D	E_H	E_{LS}	E_{LD}	D_D	D_H
SK-1	7.30 m düşey	2-3	Kuvars diyorit	2.40	4.95			2.67	2.96
SK-2	24.20 düşey	2-3	Diyabaz	5.90	7.77	47.19	52.54	48.20	52.02
SK-2E	24.20 m sağ-yatay	7-8	Kuvars diyorit	19.60		40.00	59.27	16.10	
SK-3E	45.00 m Sağ yatay	7-8	Diyabaz	9.42		33.83	42.52	53.80	
SK-6	21.50 m düşey	2-3	Kuvarslı diyorit	53.60		20.00	25.16	9.65	
	LA-4								
SK-7	46.00 m düşey	7-8	Fay zone	4.30		47.78	44.00		
SK-7A	45.50 m So-yatay	7-8	Fay Zone	2.15		61.39	49.16	0.36	
SK-9	21.70 m düşey	2-3	Kuvars diyorit	2.14	3.38			1.85	2.67
	RA-3								
SK-9E	24.20 Sol-yatay	2-3	Kuvars diyorit	26.83	5.93	20.00	42.22	12.07	1.91
	RA-5								
SK-11E	45.00 sağ-yatay	7-8	Kuvars diyorit	21.43		3.00	49.82	16.07	
SK-12	51.70 düşey	2-3	Kuvars diyorit	4.80	0.82		3.60	3.43	3.79
SK-12	51.70 düşey	7-8	Kuvars diyorit	29.41		3.29	56.87	29.44	
SK-12E	54.30 sağ-yatay	2-3	Kuvars diyorit	4.30	4.74			3.13	3.40

Şekil 17b’de ise Deriner Baraj yerinde yapılan dilatometre deneylerinden belirlenen kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D) ile kaya kütle dilatometre elastisite modülü (E_D) değerleri arasında yapılan regresyon analizi sonucu verilmiştir. Üs fonksiyon ile en yüksek

determinasyon katsayısı (R^2)=0.84 belirlenmiştir. Kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D) kaya kütle dilatometre elastisite modülü (E_D) arasındaki farkın düşük değerlerde kapandığı, yüksek değerlerde ise farkın açıldığı görülmektedir.



Şekil 17. a) Kaya malzemesi statik elastisite modülü ile kaya malzemesi dinamik elastisite modülü arasında yapılan regresyon analizi grafiği b) dilatometre elastisite modülü ile deformasyon modülü arasında yapılan regresyon analizi grafiği.

Figure 17. a) regression analysis graph between static elasticity and dynamic elasticity modulus b) regression analysis graph between dilatometer elasticity modulus and dilatometer deformation modulus.

Ermenek (Karaman) Barajı Dilatometre Deneyi Çalışmaları

Ermenek Barajı için Erikli deresi civarında yapılması projelendirilen yeraltı santrali temel sahasında SK-126 (50 m), SK-127 (80 m) ve SK-131 (70 m) kuyuları açılmıştır. (Kaya ve Kayabaşı, 1998). Bu kuyulardan üçünde toplam 20 adet dilatometre deneyi yapılmıştır (Şekil 18).

Dilatometre deneyleri üç kez 3.4 MPa, üç kez 6.4 MPa ve üç kez 9.4 MPa yükleme boşaltma döngüleri halinde yapılmıştır. Her yükleme 2 dakikalık yükleme ve 3 dakikalık bekleme süreciyle yapılmıştır (Şekil 19).

Dilatometre eğrileri üzerinde eğim ölçümleri yapılarak deformasyon modülü ve elastisite modülü Eşitlik 6 ile belirlenir.

$$E_D \text{ veya } D_D = (1 + \mu) r_m \frac{\Delta P}{\Delta r} \quad (6)$$

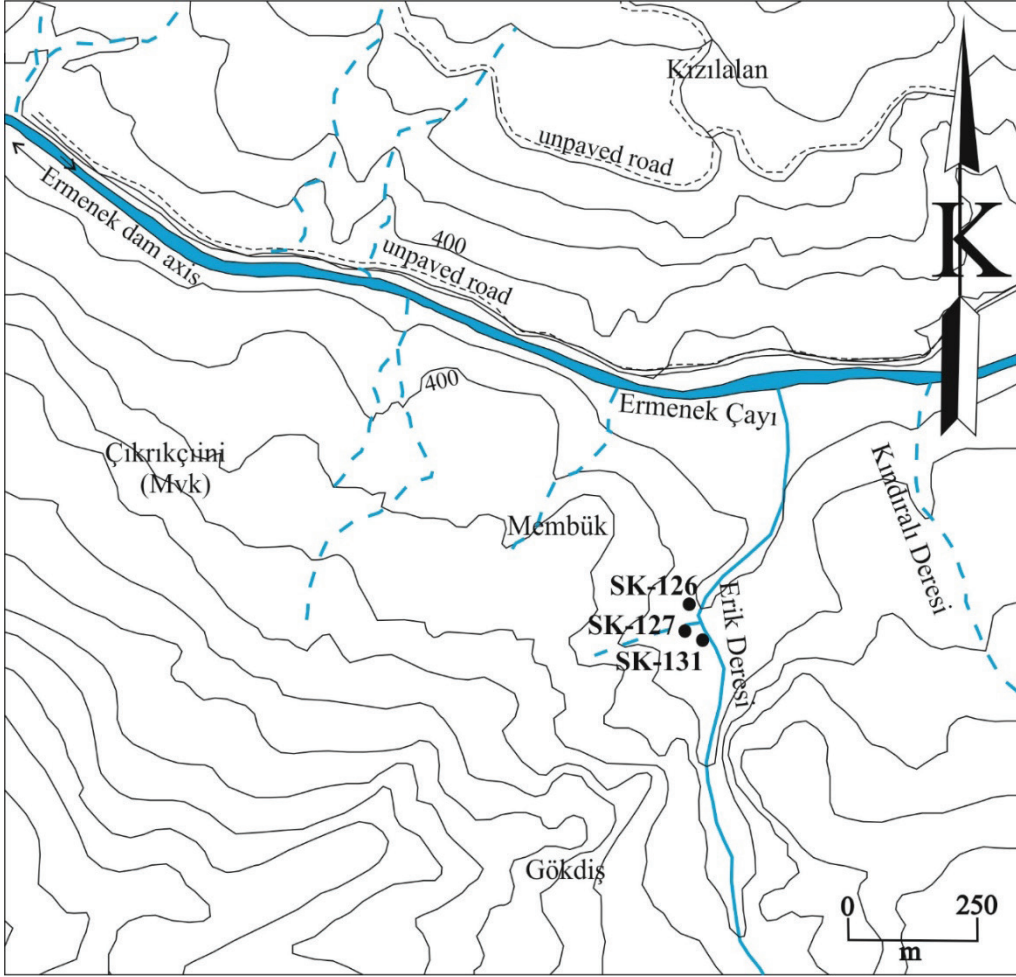
Burada

r =kuyu çapı

r_m =kuyu yarıçapı+ $\Delta r/2$

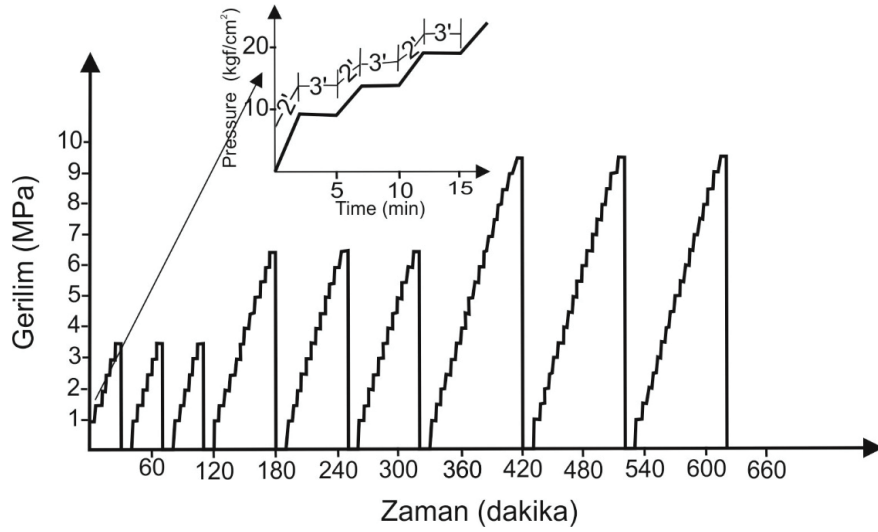
μ =Poisson oranı

Şekil 20'de SK-126 nolu kuyunun 18.30-19.30 metrelerinde yapılan dilatometre deneyi grafiği ve teğet modül çizgileri görülmektedir. Çizelge 2'de ise deney verilerinin değerlendirilmiş sonuçları verilmektedir. Deformasyon modülü değerleri, elastisite modüllerinden fazla çıkmaktadır ve hesaplandığı yükleme ve boşaltma eğrilerine göre değerleri değişmektedir.



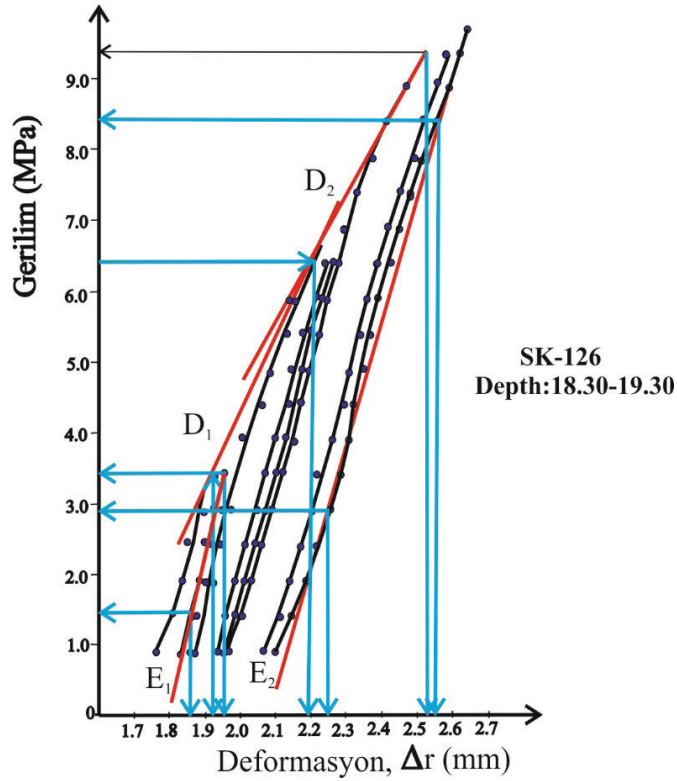
şekil 18. Ermenek (Karaman) Barajı santral yeri sondaj kuyusu lokasyon haritası.

Figure 18. Powerhouse borehole location map of Ermenek dam (Karaman).



Şekil 19. Ermenek (Karaman) Barajı santral yeri dilatometre deneyi programı.

Figure 19. Ermenek dam site dilatometer test programme.



Şekil 20. SK-126 kuyusunda yapılan dilatometre deneyi grafiği.

Figure 20. Dilatometer test graph performed in borehole SK-126.

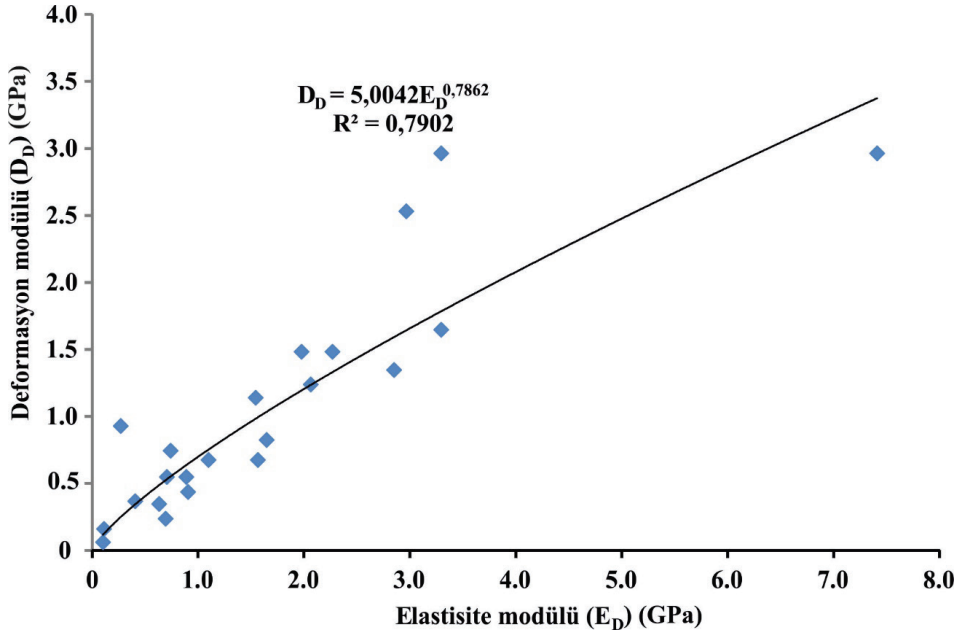
Çizelge 2. Ermenek Barajı santral yeri dilatometre deneyi örnek deney verisi.

Table 2. Dilatometer test sample data from Ermenek dam powerhouse site.

Kuyu no	Derinlik	P_1 (MPa)	P_2 (MPa)	r_1	r_2	Δp (cm)	Δr (cm)	rm (cm)	Modül (MPa)
SK-126	18.30- 19.30	1.4	3.4	0.187	0.198	20	0.011	3.80	$E_1=8.981$
		2.9	8.4	0.225	0.255	55	0.035	3.80	$E_2=9.056$
		3.4	6.4	0.192	0.219	30	0.027	3.80	$D_1=5.489$
		6.4	9.4	0.219	0.253	30	0.034	3.80	$D_2=4.358$

Ermenek Barajı santral yeri dilatometre deneylerinden belirlenen deformasyon modülleri ile elastisite modülleri arasında yapılan regresyon analizinde üs fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.79 belirlenmiştir (Şekil 21). Örnekleyecek olursak $E_D=0.5 \text{ kg/cm}^2$ olması durumunda $D_D=0.310 \text{ MPa}$ olacaktır. D_D ve E_D değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değer in yükselmesi durumunda saçılmaların daha fazlaştığı görülmüştür.

Çizelge 3'te kaya malzemesinde ve kaya kütleğinde yapılan deneylerden belirlenen modüller arasında gerçekleştirilen regresyon analizleri sonuçları ve belirlenen görgül eşitlikler verilmiştir. En yüksek determinasyon katsayısı ($R^2=0.98$) Deriner Barajı eksen yerinde galeri içlerinde yapılan dilatometre deneyinden belirlenen deformasyon modülü ile plaka yükleme deneylerinden bulunan deformasyon modüllerinin karşılaştırılması sonucunda üstel fonksiyonla belirlenmiştir.



Şekil 21. Dilatometre deneyinden belirlenen D_D ile E_D değerleri arasında yapılan regresyon analizi grafiği.

Figure 21. The regression analysis graph of D_D and E_D determined by dilatometer tests.

Çizelge 3. Bu çalışmada belirlenen görgül eşitlikler.

Table 3. Empirical equations determined in this study.

Parametre	lokasyon	Deney adı	Görgül eşitlik	Determinasyon katsayısı (R ²)
D _H , E _H	Deriner Barajı	Plaka yükleme deneyi, Dilatometre deneyi	$D_H = 0.5917(E_H)^{1.0305}$	0.88
D _D , D _H	Deriner Barajı	Dilatometre deneyi	$D_D = 1.6646e^{0.2340(D_H)}$	0.98
E _H , E _D	Deriner Barajı	Dilatometre ve plaka Yükleme deneyi	$E_H = 2.4064D_H^{0.5978}$	0.71
E _{LD} , E _{LS}	Deriner Barajı	Statik elastisite modülü ve dinamik elastisite modülü tayini	$E_{LD} = 23.013 \ln(E_{LS}) - 33.155$	0.52
D _D , E _D	Deriner Barajı	Dilatometre deneyi	$D_D = 1.5779(E_D)^{0.9176}$	0.84
D _D , E _D	Ermenek Barajı	Dilatometre deneyi	$D_D = 5.0042(E_D)^{0.7862}$	0.79

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Deriner Barajı/Artvin ve Ermenek Barajı/Karaman'da yapılan yerinde deneylerden belirlenen kaya kütle modülleri ve laboratuvar deneylerinden belirlenen dinamik ve statik modül değerleri tanımlanmıştır. Deney yöntemlerine göre modüller birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte, projeler hazırlanırken modüller yanlış olarak birbirinin yerine kullanılabilir. Kaya kütle deformasyon modülü ve kaya kütle elastisite modülü yerinde deneylerle belirlenirken, kaya malzemesi statik elastisite modülü ve kaya malzemesi dinamik elastisite modülü ise laboratuvar deneyleriyle belirlenir. Laboratuvarında belirlenen kaya malzemesi statik elastisite modülü kaya malzemesi dayanımının karşılaştırılmasıyla, kaya malzemesinin sınıflandırılması yapılmaktadır (Deere ve Miller, 1966). Kaya malzemesinin kaya kütleyici tam olarak tanımlayıcı olmaması, yerinde deneylerin yapılmasına yol açmıştır. Deformasyon modülü terimi yük deformasyon eğrisinin elastik ve kalıcı deformasyon her iki kısmı da kapsar iken

elastisite modülü terimi elastik sınırları kapsar (Goodman, 1989). Kaya kütle deformasyon modülü değerleri projelendirmelerde yapı ile temel etkileşimlerinin belirlenmesinde girdi parametresi olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada anlatım karmaşası olmaması için belirlendiği deneyin adı modül adı önüne yazılarak simgelenme yapılarak, kaya kütle dilatometre deneyi elastisite modülü (E_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi elastisite modülü (E_H), kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}), kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}), kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi deformasyon modülü (D_H) şeklinde ifade edilmiştir. Modüller arasında regresyon analizleri yapılarak korelasyon katsayıları ve aralarındaki fonksiyonel ilişkiler belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında Deriner barajında açılan galerilerde yapılan dilatometre ve plaka yükleme deneylerinden birbirine yakın olan deneylerden E_D, E_H, D_D, D_H değerleri ile bu deneylerin lokasyonlarında alınan kaya malzemelerinden laboratuvarında belirlenen E_{LS} ve

E_{LD} değerleri ile Ermenek Barajı/Karamanda yer altı santrali temel etüdü için yapılan dilatometre deneylerinden belirlenen D_D ve E_D değerleri derlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında tüm kaya modülleri arasında basit regresyon analizleri yapılmıştır. Deriner Baraj'ında yapılan plaka yükleme ve dilatometre deneylerinden belirlenen deformasyon modülü ve elastisite modülü değerleri arasında üs fonksiyon ile $R^2=0.88$ determinasyon katsayısı belirlenmiştir. Elastisite modülü ve Deformasyon modülü değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değerın yükselmesi durumunda saçılmaların arttığı belirlenmiştir. Kujundzic ve Grujic (1966)'da E_H ve D_H değerlerinin farklılığının küçük değerlerde daha fazla olduğunu ifadesi bu çalışmada gerçekleşmemiştir. Galera vd. (2005) in önerdiği $E_H/D_H \approx 7$ değerine bu çalışmada ulaşılammıştır. Bu çalışmada $E/D=1.46$ değeri bulunmuştur.

Deriner barajı araştırma galerilerinde aynı yüzeyde yapılan 6 adet deneyin D_D ve E_H deney verileriyle yapılan regresyon analizinde üstel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.98 belirlenmiştir. SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri ($D_D=12.07$ GPa ve $D_H=1.91$ GPa) uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. Aynı şekilde E_D - E_H değerleri arasında yapılan regresyon analizinde üssel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.71 belirlenmiştir. Bu analizde 4 adet veri karşılaştırılmıştır. SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri ($E_D=26.83$ GPa ve $E_H=5.83$ GPa) ile SK-12 deneyinden belirlenen modül değerleri ($E_D=4.80$ GPa ve $E_H=0.82$ GPa) değerleri uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. SK 9E ve SK-12 kuyuların açıldığı yüzeylerin galeri açımı sırasında patlatmadan etkilendiği belirlenmiştir.

Aynı yüzeylerde elastisite modüllerinin daha çok saçılım yapması, elastisite modülünün, deformasyon modülüne göre daha hassas olduğunu göstermektedir.

Deriner Baraj yerinden alınan örneklerden laboratuvarında belirlenen E_{LD} ve E_{LS} modüllerinin regresyon analizi sonucu logaritmik fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.52 olarak belirlenmiştir. $K (E_{LD}/E_{LS})$ değerinin modül değerlerinin artışıyla birlikte 1 değerine yaklaşmasının nedenini bozunma derecesinin azalmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz.

Deriner Baraj yerindeki galerilerde yapılan deneylerde belirlenen D_D modül değerleri ile E_D modülü değerleri arasında yapılan regresyon analizi sonucunda üs fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.84 belirlenmiştir. D_D değerleri ile E_D değerleri arasındaki farkın düşük değerlerde kapandığı, yüksek değerlerde ise farkın açıldığı belirlenmiştir.

Ermenek Barajı santral yeri dilatometre deneylerinden belirlenen D_D değerleri ile E_D değerleri arasında yapılan regresyon analizinde üssel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.79 belirlenmiştir. D_D ve E_D değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değerın yükselmesi durumunda saçılmaların daha fazlaştığı belirlenmiştir.

Kaya kütle dinamik elastisite modülü verisi olmadığı için bu çalışmalarda değerlendirmeye alınmamıştır.

Modül değerlerinin birbirinden farklı değerler olduğu, birbirlerinin yerine kullanılmasının proje için sakıncalar oluşturacağı bu çalışma ile ortaya konulmaya çalışılmıştır. Gerek veri azlığı ve gerekse her kaya kütle ortamının kendine ait farklı koşullar içinden bulunmasından dolayı bu çalışmada

bulunan görgül eşitliklerin başka projelerde kullanılmamalı veya çapraz adımlı sınamalar yaparak kullanılmalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmada, Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin projelendirdiği Aşağı Çoru Havzası HES Projelerinden birisi olan Deriner Barajı ile Ermenek barajı (Karaman) projelerinde yapılan yerinde deney verileri kullanılmıştır. 2012 yılında KHK ile kapatılan Güzide kurum Elektrik İşleri Etüt İdaresine, bu çalışmaların yapılmasını sağlamasından dolayı yazar minnetle teşekkür eder. Yazar, çalışmalarından faydalanılması nedeniyle mesai arkadaşları jeoloji mühendisleri Osman Narin'e, Osman Ceylan'a, Bayram Uysal'a, Ali Kaya'ya, Necmettin Gürsoy'a, Sadık Açı'n'a ve Nilgün Pehlivan'a ayrıca teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Al-Shayea, N.A., 2004. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock. *Engineering Geology*, 74:139–156.
- ASTM 477, 1970. Determination of in-situ Modulus of Deformation of rock.
- ASTM D4394, 2017. Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Rigid Plate Loading Method, ASTM International, West Conshohocken, www.astm.org.
- ASTM D2845, 2008. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock (Withdrawn 2017), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Bieniawski, Z.T., 1978. Determining Rock Mass deformability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, pp. 237-247. Pergamon Press. Printed in Great Britain.

- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., 2014. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julian's stone. *Bulletin of Engineering Geology Environment*, 73 (3), doi 10.1007/s10064-014-0583-y.
- Christaras, B., Auger, F., Mosse, E., 1994. Determination of the modulus of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Material Structure*, 27:222–228.
- Ciccotti, M., Mulargia, F., 2004. Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock. *Geophys Journal Int.*, 157:474–477.
- Gue'guen, Y., Palciauskas, V., 1994. *Introduction to the physics of rocks*. Princeton University Press, New Jersey, p 294.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. "Engineering Classification And Index Properties For Intact Rock", Tech.Rept. No AFWL-65-116, Air Force Base, New Mexico.
- EİE-081, 1992. Ultrasonik yöntemle karot numunelerinin boyuna ve enine elastik dalga hızlarının ölçülmesi ve dinamik elastik parametrelerinin hesaplanması. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Mühendislik Hizmetleri Normları, Ankara.
- EİE-122, 1992. Plaka Yükleme Deneyi Normu. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Mühendislik Hizmetleri Normları, Ankara.
- EİE-124, 1992. Oyo 200 Dilatometre Deneyi Normu. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Mühendislik Hizmetleri Normları, Ankara.
- Galera, M.J., Alvarez, M., Bieniawski, Z.T., 2005. Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison of the pressuremeter and dilatometer tests with RMR prediction. *ISP5-PRESSIO International Symposium*.
- Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43. 203-215.

- Devlet Su İşleri Genel M  d  rl  ę , <http://www.dsi.gov.tr/projeler>, (Ziyaret Tarihi 25 Mart 2019).
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics, 2nd ed., Wiley, New York, 562 p.
- ISRM, 1978. ISRM suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 16,135-140.
- ISRM, 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E.T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 pp.
- ISRM, 1998. Suggested methods for seismic testing within and between boreholes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 25: 447-472.
- Kaya, A., Kayabaşı A., 1992. Aşağı Çoruh Havzası Deriner Barajı Elastmeter 200 Deney Sonuç raporu. E    Genel Müdürlüğü. Kaya ve Zemin Mekanięi şubesi Müdürlüğü (Basılmamış).
- Kaya, A., Kayabaşı A., 1998. Ermenek HES Santral Yeri Dilatometre Deney Sonuç raporu. Jeoloji ve Sondaj Dairesi Başkanlığı, Kaya ve Zemin Mekanięi şubesi Müdürlüğü, E    Genel M  d  rl  ę , Ankara.
- Kujundzic, B., Grujic, N., 1966. Correlation between static and dynamic investigations of rock mass "in situ". Proceedings of 1st ISRM Congress, Lisbon. 1: 565-570. LNEC.
- Kulhawy, F. H., Goodman, R., 1980. Design of foundations on discontinuous rock. Proc. Int. Conf. Struct. Found. Rock. Ed. Balkema, 209-220.
- Martinez-Martinez, J., Benavente, D., García-del-Cura, M.A., 2012. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 71: 263-268.
- Munir, K., 2006. Development of correlation between rock classification system and modulus of deformation. PhD Thesis-Civil-02, Department of Civil Engineering University of Engineering And Technology, Lahore-PAKISTAN.
- Narin, O., Ceylan, O., Uysal, B., 1986. Aşağı  oruh Havzası Deriner Baraj Yeri Hidrolik Kriko Yükleme Deneyleri Elastisite Raporu. E    Genel M  d  rl  ę , Yayın No:86-65. Ankara.
- Palmstrom, A., Singh, R., 2001. The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 115 - 131.
- Wyllie, D. C., 1992. Foundations on Rock. Principal, Golder Associates, consulting Engineers Vancouver, Canada.

Bazaltik Kayaların Bileşim ve Dokusal Özelliklerinin Mekanik Davranışlarına Etkisi

The Effect of Composition and Textural Properties of Basaltic Rocks on Their Mechanical Behaviour

Sinem ERİŞİŞ , Atiye TUĞRUL , Selman ER , Murat YILMAZ*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar-İstanbul

Geliş (Received): 01 Şubat (February) 2019 / Düzeltme (Revised): 16 Nisan (April) 2019 / Kabul (Accepted): 19 Nisan (April) 2019

Bazaltlar ülkemizde yaygın bir şekilde bulunmakta ve çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Dayanıklılığı ve dayanımı yüksek olan bazaltlar mühendislik projelerinde tercih edilmektedir. Kullanım alanlarının artması için bazaltların kimyasal, mineralojik, petrografik ve fiziko-mekanik özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada farklı kimyasal, mineralojik ve petrografik özelliklere sahip bazaltik kayaların fiziko-mekanik davranışlarına olan etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Örnekler genel olarak Marmara Bölgesi ve çevresindeki bazalt taş ocaklarından derlenmiştir. Daha sonra örneklerin kimyasal, mineralojik ve petrografik özellikleri belirlenmiştir. Sonraki aşamada laboratuvar çalışmaları sonucunda fiziko-mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bazaltlar hamur özellikleri, mineralojik bileşimleri ve fenokristal boyutlarına göre iki gruba ayrılmıştır. Birinci grup bazaltlar olivin içeriği yüksek ve fenokristal minerallerin alanları düşük bazaltlardır. İkinci grup bazaltlar ise olivin içermeyen, volkan camı içeriği ve fenokristal minerallerin alanları yüksek olan bazaltlardır. Birinci grup bazaltlar ikinci grup bazaltlara göre daha yüksek dayanım vermektedir.

Anahtar Kelimeler: Bazalt, Mineraloji, Dokusal Özellik, Fiziko-Mekanik

ABSTRACT

Basalts are common in our country and basalts are employed for different purposes. Basalts which have high durability and resistance are preferred in engineering projects. Chemical, mineralogical, petrographic and physico-mechanical properties of basalts should be well-known to increase their usage areas. Studies have shown that there is a relationship between the structure and physico-mechanical properties of stones. The aim of this study is to investigate the effects of different chemical, mineralogical and petrographic properties on the physico-mechanical behavior of basaltic rocks. In general, basalt stones were collected from the Marmara Region and its surroundings. Then, chemical, mineralogical and petrographic properties of the samples were determined. In the next stage, physico-mechanical properties were determined as a result of laboratory studies. Basalts were divided into two groups according to their matrix characteristics, mineralogical composition and phenocrystalline dimensions according to test results. The first group of basalts showed high strength with high olivine content. The second group of basalts are including high rate phenocrystalline minerals, not including olivine but including high volcanic glass. These basalts give lower strength than the first group.

Key words: Basalt, Mineralogy, Textural Properties, Pyhsico-Mechanic

GİRİŞ

Ülkemizde köprü, yol, metro, demiryolu, tünel ve baraj gibi mühendislik yapılarının sayısı arttıkça doğal kaynak ihtiyacı da artmaktadır. Sadece mühendislik yapıları değil, toplu yaşam alanlarına her geçen gün bir yenisinin eklenmesi ve bunların dışında farklı sektörlerdeki (ısı depolama, ısı yalıtımı, cam-seramik gibi) doğal taş kullanımı, kaynak ihtiyacını arttırmaktadır. Bu doğrultuda ülkemizde ve dünyada yaygın şekilde bulunan bazaltik kayalar, dayanımı ve dayanıklılıklarının yüksek olmasından dolayı çok geniş bir yelpazede malzeme ihtiyacını karşılamaktadır. Farklı türdeki bazaltların yük altındaki davranışlarının ve yenilme özelliklerinin bilinmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesine yönelik literatürde birçok çalışma vardır. Tuğrul ve Gürpınar (1997) Tokat/Niksar bölgesinden seçilmiş olan bazaltların temel mühendislik özelliklerini her bir ayrışma zonu için belirlemişlerdir. Mühendislik özellikleri (kuru yoğunluk, gözeneklilik, geçirgenlik, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri) ile ayrışma zonları arasında ilişkiler olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda da ayrışmadan etkilenen bazaltik kayalar için yeni bir sınıflama sistemi önermişlerdir. Heap (2009) ise elastisite modülünün, deformasyonun kaynağını bulmaya yönelik güvenilir bir yardımcı olduğunu belirtmiştir. Korkanç ve Solak (2016) yaptığı çalışmada tuf ve ignimbiritlerin petrografik özelliklerini incelemiş ve tane/ matriks oranı ile mekanik davranışları arasında ilişkiler kurmuştur. Sonuç olarak tüflerde dayanımı etkileyen en önemli faktörün matriks oranı olduğu ve ignimbiritler için tane /matriks oranı arttıkça dayanımın azaldığı sonucuna varmıştır. Adelinet ve diğerleri (2013) bazaltik kayada kırılma ve sünek davranışlar sırasında deformasyon gelişimini, sismik aletler, akustik

emiyon verileri ve mikro yapıları gözleyerek araştırmışlardır. Hacmin ve yoğunluğun düştüğü yerde çatlakların ilerlediğini ve kayanın orijinal halinde deformasyon farklılığını, mikro yapısının ve porozitesinin kontrol ettiğini tespit etmişlerdir.

Ündül vd. (2015) de düşük poroziteli andezitik kayalarda, mikro yapının kayanın mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sayısal petrografik çalışmalarla birlikte makro ve mikro çatlakların dağılımlarını basınç testleriyle analiz etmişlerdir.

Bu çalışmalardan da görülebileceği gibi kayaların yük altındaki davranışlarını belirleyecek olan fiziksel ve mekanik özellikler, bileşimleri ve dokularıyla doğrudan ilişkilidir. Farklı tür kayalar (granit, bazalt, gabro, andezit gibi) üzerinde yapılan çalışmalar literatürde yer alsa da, farklı tür bazaltlar kullanılarak, tüm fiziksel ve mekanik özelliklerinin bileşim ve doku ile olan ilişkilerini kıyaslayan ve doğrudan ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın temel amacı, gerçekleştirilmekte olan alt ve üst yapı projelerinde kullanımı ve gelişmekte olan farklı sektörler ile birlikte ihtiyacı her geçen gün giderek artan bazaltik kayaların bileşim ve doku özelliklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin ortaya konulmasıdır.

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma için, Marmara Bölgesi ve çevresinde yer alan, farklı doku ve bileşime sahip bazalt örnekleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Çalışmalarda kullanılan bazalt örnekleri Tekirdağ - Hayrabolu, Tekirdağ-Muratlı, Tekirdağ-Osmancık Köyü, Kütahya, Düzce, Çanakkale-Biga, Bursa-İznik ve Edirne-Keşan bölgelerindeki taş ocaklarından alınmıştır (Şekil 1). Deneysel çalışmalarda kullanılan örneklere verilen kodlar ve nereden alındıkları Çizelge 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. İncelenen kayaçların alındığı ocak yerlerini gösteren yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map showing the places where the investigated rocks were taken.

Çizelge 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan bazalt örneklerinin kodları ve alındığı bölgeler.

Table 1. Codes and locations of the basalt samples used in experimental studies.

Örnek Kodu	Örneğin Alındığı Bölge
BTH	Tekirdağ- Hayrabolu
BTM	Tekirdağ- Muratlı
BTO	Tekirdağ- Osmancık Köyü
BK	Kütahya
BD	Düzce
BÇ	Çanakkale
BB	Bursa
BE	Edirne

Bazaltik kayaların mineralojik ve petrografik özelliklerinin, mekanik davranışlarına etkisinin belirlenebilmesi için öncelikle numunelerden ince kesitler hazırlanmış ve incelenmiştir. Farklı özelliklerdeki bazaltik kayaçların kimyasal bileşimlerini belirlemek için ise XRF analizi yapılmış ve ana element oksit yüzdeleri bulunmuştur. Böylece kimyasal bileşimlerine göre incelenen kayaçlar sınıflandırılmış, mineralojik ve petrografik özellikleri tespit edilmiştir. Bu çalışmaların ardından blok haline getirilmiş olan bazaltik kayaçlardan örnekler hazırlanmıştır. Elde edilen örnekler üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler yapılırken ISRM (2007) tercih edilmiştir. (Şekil 2).



Şekil 2. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan bazalt karot örnekleri.

Figure 2. Basalt core samples used in laboratory studies.

BULGULAR

Kimyasal Özellikler

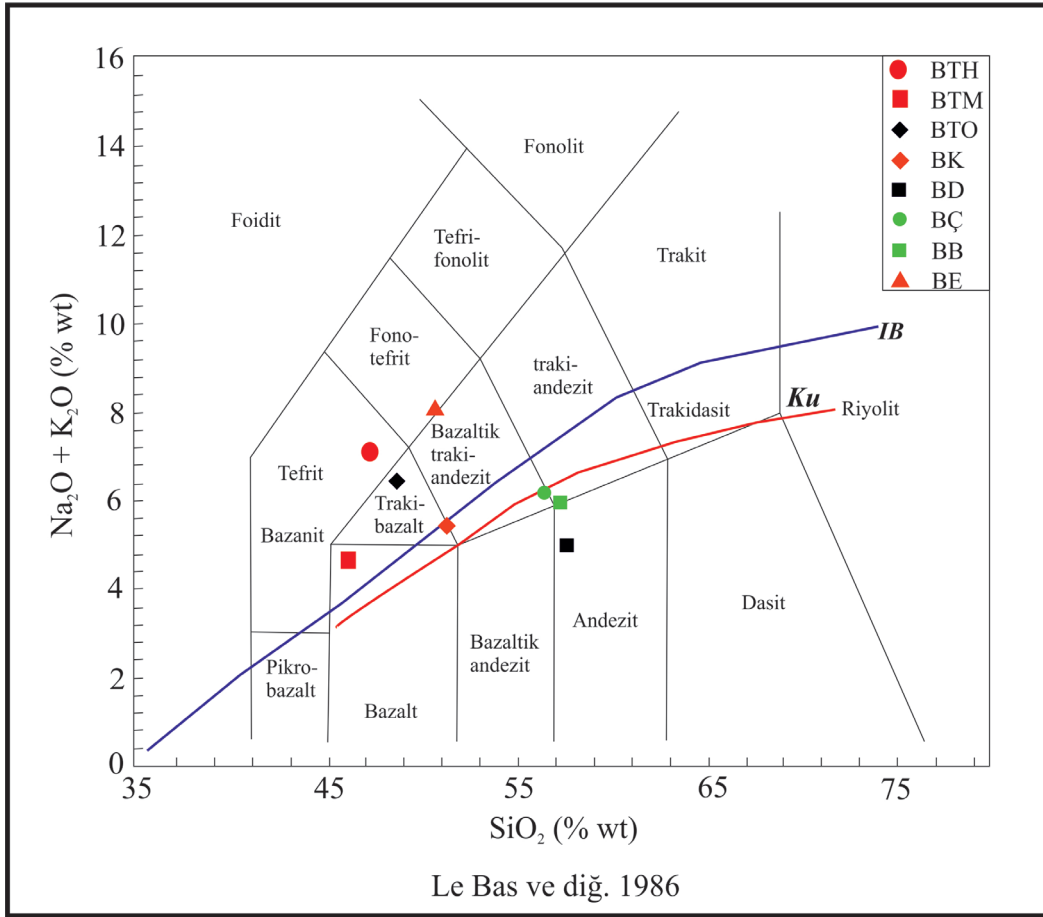
Farklı bileşimlere sahip sekiz kayacın kimyasal özelliklerini saptamak amacıyla XRF yöntemi kullanılarak ana element oksit içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de sunulmuştur.

Bazaltik kayaların kimyasal içerikleri doğrultusunda Le Bas vd. (1986)’a göre $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ değerleri kullanılarak örneklerin dağılımları yapılmıştır (Şekil 3). Bu doğrultuda BTH tefrit, BTM bazalt, BTO traki-bazalt, BK traki-bazalt, BD andezit, BÇ bazaltik trakiandezit, BB traki-andezit, BE fenotefrit-bazaltik trakiandezit bileşimlerindedir (Şekil 3).

Çizelge 2. Bazaltik kayaların ana element oksit yüzdeleri.

Table 2. Main element oxide percentages of the basaltic rocks.

Ocak Kodu	Ana Element Oksit Yüzdeleri (%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
BTH	46.33	13.67	10.96	9.79	11.63	0.15	2.31	4.52
BTM	45.14	13.25	10.19	9.08	12.11	0.16	1.90	3.04
BTO	47.10	13.12	10.02	8.91	11.83	0.14	2.10	3.78
BK	51.73	18.32	5.87	9.08	3.09	0.15	2.39	3.31
BD	57.65	17.22	6.52	6.69	2.96	0.15	1.18	3.68
BÇ	56.63	18.52	5.95	6.65	3.34	0.15	3.28	3.03
BB	57.13	17.75	6.96	6.75	3.81	0.15	1.96	3.43
BE	49.67	12.26	7.89	7.91	12.74	0.14	5.51	2.53



Şekil 3. İncelenen kayaç örneklerinin $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ değerlerine göre isimlendirme diyagramındaki konumları (Le Bas vd., 1986).

Figure 3. The locations of the rock samples in the naming diagram according to $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ (Le Bas et al., 1986).

Mineralojik ve Petrografik Özellikler

Sekiz farklı bazaltik kayaç örneğinden öncelikle ince kesitler hazırlanmış ve mikroskop altında mineral alanları ve hamur yüzdeleri tespit edilmiştir. İnce kesit incelemeleri sırasında geneli ifade edecek şekilde her bir ocağın kesitinden onar tane olmak üzere toplamda 80 ince kesit fotoğrafı polarizan mikroskopta 100 mikron (um) ölçek kullanılarak çekilmiştir. Çekilen fotoğraflar üzerinde Image J programı kullanılarak tüm ince kesitler için minerallerin alanları ve hamur

yüzdeleri hesaplanmıştır. 100um 0.1 mm.' ye karşılık geldiğinden, on ince kesit fotoğrafının toplam alanı da yaklaşık 7,4 mm²'ye denk gelmektedir. Bu nedenle etki oranının yüksek olmamasından dolayı ve hesap karmaşasına yer vermemek adına 0.001 mm² altındaki alana sahip mineral tanelerinin, toplam mineral değerlerine dahil edilmemesi uygun görülmüştür. İnce kesitler üzerinde bazaltik kayaçların mineralojik bileşimini kantitatif olarak belirlemek amacıyla modal analiz (nokta sayımı) yapılmıştır. Modal analiz için her bir bazalt kesiti üzerinde 2000

Eriş, Tuğrul, Er, Yılmaz

nokta sayılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda kayaçların mineral - hamur alanları Çizelge 3'te, nokta sayımı ile elde edilen mineral içeriklerinin yüzdeleri de Çizelge 4'te verilmiştir. Bazaltik

kayaçların hamur ve doku özellikleri, mineral içerikleri, ayrışma durumları ve petrografik bileşimlerine göre sınıflandırmaları da Çizelge 5'te ve Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. İncelenen bazaltik kayaçların içeriğinde bulunan minerallerin alanları ve yüzdeleri.

Table 3. The areas and percentages of the minerals in the basaltic rocks studied.

Ocak Kodu	Alan (mm ²)	Hamur		Piroksen		Olivin		Plajiyoklas		Biyotit		Opak min.	
		(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
BTH	7.46	6.12	82.1	0.71	9.5	0.46	6.17	0.15	1.97	–	–	0.02	0.23
BTM	7.43	5.19	69.9	0.32	4.3	0.97	13.0	0.93	12.5	–	–	0.02	0.23
BTO	7.43	4.78	64.0	0.63	8.4	1.23	16.5	0.68	9.18	–	–	0.11	1.48
BK	7.44	5.77	77.6	1.35	18.2	0.15	2.06	0.12	1.60	–	–	0.04	0.55
BD	8.19	4.97	60.6	1.22	14.8	–	–	1.88	23.0	–	–	0.12	1.46
BÇ	6.68	3.86	57.7	0.95	14.2	–	–	1.73	25.8	–	–	0.15	2.24
BB	7.52	3.84	50.9	1.38	18.3	–	–	2.11	28.1	–	–	0.19	2.57
BE	7.36	3.29	44.6	2.55	34.5	0.12	1.60	1.10	14.9	0.27	3.67	0.04	0.58

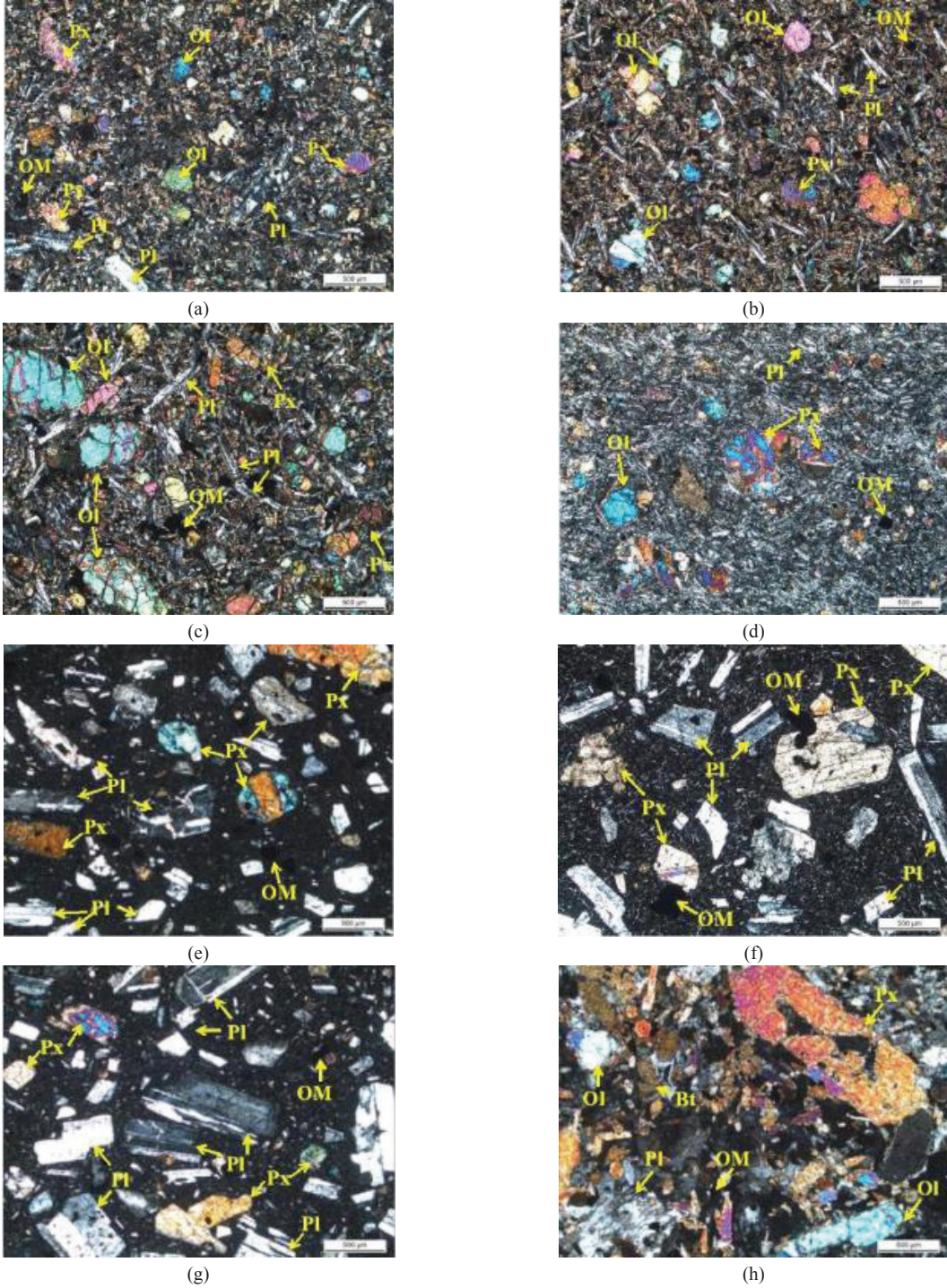
Çizelge 4. Nokta sayımı ile belirlenen bazaltik kayaçların içerdiği mineral oranları.

Table 4. Mineral ratios of the basaltic rocks determined by point counting.

Ocak Kodu	Mineral İçeriği (%)					
	Hamur	Piroksen	Olivin	Plajiyoklas	Biyotit	Opak Min.
BTH	81.4	9.9	3.3	4.4	-	1.0
BTM	68.2	5.6	10.5	14.2	-	1.5
BTO	65.3	7.2	15.0	10.8	-	1.7
BK	75.7	18.5	2.80	2.60	-	0.4
BD	59.7	12.6	-	26.9	-	0.8
BÇ	56.6	13.0	-	29.4	-	1.0
BB	50.5	18.5	-	30.2	-	0.8
BE	48.5	32.2	3.8	10.8	4.1	0.6

Cizelge 5. Bazaltik kayaların alındıkları bölgelere göre mineral içeriği, doku, hamur, ayrışma durumu ve mikroskopik tanımlamaları.
 Table 5. Mineral contents, texture, matrix, weathering and microscopic descriptions of the basaltic rocks according to the areas they are taken from.

Numune Kodu	Numunenin Alındığı Bölge	Mineral İçeriği	Doku	Hamur	Ayrışma	Mikroskopik Tanımlama
BD	Düzce	Plajiyoklas, piroksen(opjt), opak	Holohyalin porfirik	Volkan camı, çok küçük piroksen ve plajiyoklas	-	Bazalt
BE	Edirne / Keşan	Piroksen, plajiyoklas, biyotit, opak	Holokristalin porfirik	-	Kloritleşme	Mafik Damar Kayacı
BK	Kütahya	Piroksen, plajiyoklas, olivin, opak	Holokristalin porfirik, Akma dokusu	Plajiyoklas mikroliti ağırlıklı ve çok küçük piroksen	Karbonatlaşma, killeşme, talklaşma	Olivin Bazalt
BTO	Tekirdağ / Osmancık köyü	Olivin, plajiyoklas, opak	Hipokristalin porfirik	Volkan camı, piroksen, plajiyoklas	Kloritleşme, silisleşme	Olivin Bazalt
BTH	Tekirdağ / Hayrabolu	Olivin, plajiyoklas, piroksen, opak	Holokristalin porfirik	Plajiyoklas, piroksen, volkan camı	Silisleşme	Bazalt
BTM	Tekirdağ / Muratlı	Piroksen, Plajiyoklas, olivin, opak	Holokristalin porfirik	Plajiyoklas Kristalleri, piroksen ve opak	Talklaşma (olivin)	Bazalt / Diyabaz
BB	Bursa / İznik	Plajiyoklas, Piroksen, opak	Hipohyalin porfirik	Volkan camı ağırlıklı, az mikrolit	-	Bazalt
BÇ	Çanakkale / Biga	Piroksen, plajiyoklas, olivin, opak	Hipidiyomorf porfirik	Volkan camı ağırlıklı	Hidrotermal alterasyon, karbonatlaşma (piroksen), erime-çözünme (plajiyoklas)	Bazalt



Şekil 4. Örneklerin polarizan mikroskobu altındaki görünümü.

Figure 4. View of samples under polarizing microscope.

a) BTH, b) BTM, c) BTO, d) BK, e) BD, f) BÇ g) BB, h) BE, (Px: Piroksen, Pl: Plajiyoklas, Ol: Olivin, OM: Opak Mineral), (Çift Nikol. 4X).

Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Yoğunluk

Fiziksel özelliklerden biri olan yoğunluk deneyi ISRM (2007)' e uygun olarak yapılmış ve elde edilen ortalama sonuçlara göre en yüksek değerin 2.74 t/m^3 ile BTH örneğine ve en düşük değerin 2.47 t/m^3 ile BÇ örneklerine ait olduğu Çizelge 6' da görülmektedir.

Çizelge 6. Bazaltik kayaçların yoğunluk değerleri.

Table 6. Density values of the basaltic rocks.

Ocak Kodu	Yoğunluk (t/m^3)		
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama
BTH	2.74	2.74	2.74
BTM	2.74	2.73	2.74
BTO	2.66	2.64	2.65
BK	2.57	2.57	2.57
BD	2.49	2.48	2.49
BÇ	2.47	2.46	2.47
BB	2.50	2.48	2.49
BE	2.69	2.69	2.69

Birim Hacim Ağırlık

Birim hacim ağırlık deneyi ISRM (2007)' e göre yapılmıştır. Çizelge 7' de verilen sonuçlara göre; en yüksek ortalama değer 28.69 kN/m^3 ile BTH ve en düşük ortalama değer de 26.05 kN/m^3 ile BB örneğidir.

Çizelge 7. Bazaltik kayaçların birim hacim ağırlık değerleri.

Table 7. Unit weight values of the basaltic rocks.

Ocak Kodu	γ (kN/m^3)		
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama
BTH	28.78	28.60	28.69
BTM	28.54	28.48	28.51
BTO	28.08	28.06	28.07
BK	27.10	27.08	27.09
BD	26.35	26.19	26.27
BÇ	26.55	26.46	26.50
BB	26.06	26.04	26.05
BE	27.98	27.79	27.89

Efektif Gözeneklilik

Farklı sektörlerde hizmet edebilecek özelliklere sahip olan bazaltik kayaçların diğer tüm kayaçlarda olduğu gibi porozite değerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Sekiz farklı bazaltik kayaç örneğinin de boşlukları birbirleri ile bağlantılı değildir. ISRM (2007) deney standardına göre yapılan deneylerden elde edilen efektif porozite sonuçları Çizelge 8'de sunulmuştur.

Çizelge 8. Bazaltik kayaçların efektif porozite değerleri.

Table 8. Effective porosity values of the basaltic rocks.

Ocak Kodu	$n_e(\%)$		
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama
BTH	0.63	0.45	0.53
BTM	0.84	0.81	0.82
BTO	2.06	1.52	1.72
BK	1.20	1.10	1.14
BD	0.15	0.13	0.14
BÇ	0.36	0.32	0.33
BB	0.48	0.43	0.46
BE	2.25	1.94	2.05

Helyum Porozimetresi

Helyum porozimetre deneyi efektif poroziteyi tespit edebilmek için uygulanan yöntemlerden biridir. Deney helyum gazının diğer gazlara göre daha küçük molekül yapısında olmasından ötürü kayacın çok daha küçük boşluklarına girebilme prensibine dayanmaktadır. Deney EPS Helium Gas Expansion Porosimeter HPG 100 (93115 A) model cihaz kullanılarak yapılmıştır. NQ çaplı karotlar cihaza uygun hale getirilerek çapı 3.8 cm, boyu ise 7.6 cm olacak şekilde yeniden hazırlanmış ve boyu kısa kalan numuneler için ise referans hacimler kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Helyum porozimetresi cihazı ile referans ağırlıkları ve deneye uygun hale getirilmiş bazaltik kayaç örnekleri (soldan sağa doğru).

Figure 5. Reference weights and basaltic rock samples with the helium porosimetry device (from left to right).

Anovitz ve Cole (2015)'e göre, helyum gazı diğer gazlara göre daha avantajlıdır çünkü;

(1) Küçük molekül yapısında olduğundan çok küçük gözeneklere nüfuz edebilir.

(2) H₂O veya CO₂ hava koşullarında kaya yüzeyine etkimeyebilir ve emilmeyebilir.

(3) Helyum, deneylerde kullanılan basınç ve sıcaklıklar için ideal gaz olarak kabul edilir.

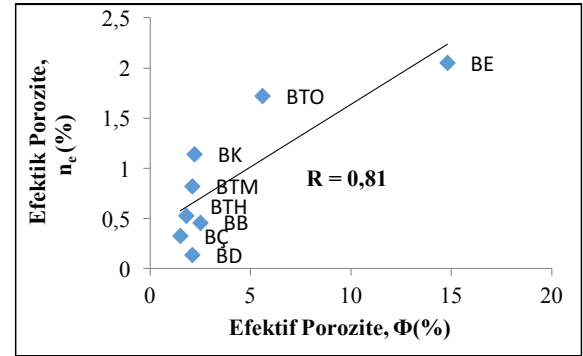
(4) Helyum yüksek yayılma özelliğinde olduğundan düşük geçirgenliğe sahip kayaların porozitelerini hesaplamak için doğru bir araçtır.

Bu nedenle helyum porozimetresi yöntemi ile elde edilmiş sonuçlar su kullanılarak elde edilen yöntemle göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek efektif porozite % 14.8 ve boşluk hacmi 8.22 mm³ değerleri ile BE örneğine aittir. BE örneğinin diğerlerine göre daha yüksek değer vermesinin sebebi, ince kesitlerinde de dikkati çeken gaz boşlukları olduğu düşünülmektedir. En düşük efektif porozite %1.5 ve boşluk hacmi 1.22 mm³ değerleri ile BD kodlu örneğe aittir. Çizelge 9'da helyum porozimetresi sonuçları verilmiştir. Helyum porozimetresinden elde edilen değerler ile ISRM önerilerine göre bulunmuş efektif porozite (n_e) değerleri karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu ($R=0.81$) olduğu görülmüştür (Şekil 6). Palchik ve Hatzor (2004), karbonatlı kayalar için bu uyumluluğu çok daha yüksek ($R^2=0.99$) olarak bulmuştur. Bazı sonuçların beklenilen dışında daha yüksek veya daha düşük çıkmasının nedeninin birbirleri ile bağlantılı olmayan gaz boşluklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 9. Bazaltik kayaların helyum gazı yöntemi ile elde edilen efektif porozite ve boşluk hacmi değerleri.

Table 9. Effective porosity and void volume values obtained by helium gas method of the basaltic rocks.

Örnek Kodu	Efektif Porozite Φ (%)	Boşluk Hacmi (mm ³)
BTH	1.8	1.24
BTM	2.1	1.85
BTO	5.6	3.17
BK	2.2	1.84
BD	2.1	1.83
BÇ	1.5	1.22
BB	2.5	2.14
BE	14.8	8.22



Şekil 6. İki farklı yöntem ile elde edilen efektif porozite değerleri arasındaki ilişki.

Figure 6. The relationship between the effective porosity values obtained by two different methods.

Atmosfer Basıncı Altında Su Emme

Deney, ISRM (2007) önerisine göre gerçekleştirilmiştir. Çizelge 10'daki sonuçlara göre BE atmosfer basıncında % 0.77 ile ağırlıkça en yüksek su emmeye sahiptir. BD örneği içerisinde ayrılmış mineral bulunmadığı için, ortalama % 0.06 su emme ile en düşük değeri sunmaktadır.

Çizelge 10. Atmosfer basıncı altında ağırlıkça su emme deney sonuçları.

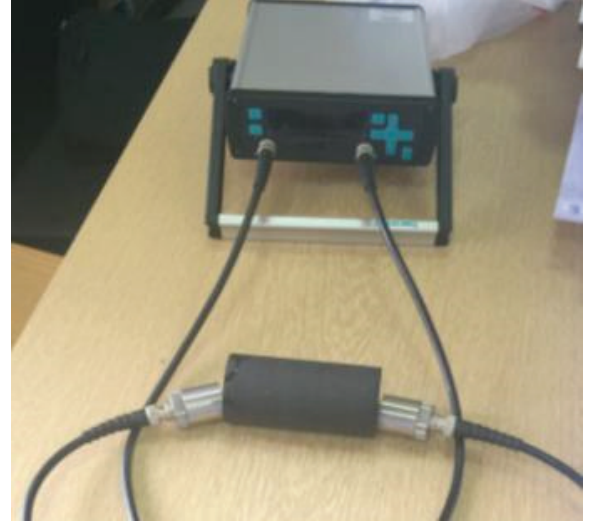
Table 10. Water absorption test results under atmospheric pressure.

Örnek Kodu	w_a (%)		
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama
BTH	0.23	0.17	0.19
BTM	0.31	0.30	0.30
BTO	0.79	0.57	0.65
BK	0.47	0.43	0.45
BD	0.06	0.05	0.06
BÇ	0.14	0.13	0.14
BB	0.19	0.17	0.18
BE	0.84	0.73	0.77

BE örneğinin efektif porozite değeri en fazla olduğundan, su emme değeri de en yüksektir. Aynı şekilde BD örneğinin efektif porozitesinin en düşük olmasına bağlı olarak su emmesi en düşük değere sahiptir.

P Dalga Hızı

Pdalga hızı deneyi ISRM(2007)'de önerildiği gibi en az beş karot örneği üzerinde Proceq marka ultrasonik ses geçirgenlik cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 7). Ultrasonik P dalga hızı, ölçümü yapılan numunenin yoğunluğuna, porozitesine ve dokusal özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Çizelge 11'de gösterildiği üzere en yüksek ortalama değer 6.331 km/sn ile BTH örneğine, en düşük P dalga hızı değeri ise 5.458 km/sn ile BB örneğine aittir.



Şekil 7. Ultrasonik ses geçirgenlik cihazı ile P dalga hızı ölçümü.

Figure 7. P wave velocity measurement with ultrasonic sound transmittance device.

Çizelge 11. Bazaltik kayaların P dalga hızı sonuçları.
Table 11. Results of P wave velocity of the basaltic rocks.

Örnek Kodu	V_p (km/sn)		
	En yüksek	En düşük	Ortalama
BTH	6.415	6.289	6.331
BTM	6.159	6.159	6.159
BTO	5.917	5.732	5.834
BK	5.632	5.632	5.632
BD	5.915	5.621	5.776
BÇ	5.805	5.587	5.674
BB	5.587	5.258	5.458
BE	5.920	5.531	5.732

Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Deney ISRM (2007)'de önerilen yöntemle göre gerçekleştirilmiştir. Çizelge 12'de verilen sonuçlara göre hamur oranı en fazla olan BTH örneği ortalama 271 MPa değeri ile en yüksek basınç dayanımına sahiptir. Mineral içeriği en

fazla olup, aynı zamanda efektif porozite değeri de diğer bazaltlara nispeten çok daha yüksek olan BE örneği ise ortalama 145 MPa değeri ile en düşük dayanımı vermektedir. BTH, BTM, BTO ve BK örnekleri sadece hamur oranları en fazla olan örnekler olmamakla birlikte aynı zamanda hamur bileşiminde bulunan piroksen ve plajiyoklasların, volkan camından çok daha fazla olduğu örnekler olarak diğer bazaltlara göre daha yüksek basınç dayanımlarına sahiptir.

BE örneğindeki gaz boşlukları, BK örneğinin hamurundaki akma dokusu, BTO örneğinin de psödomorf boşluklu yapısı, bu kayaçlarda fiziksel ve mekanik zayıflıklara neden olmaktadır. Buna bağlı olarak da basınç dayanımları beklenilenden daha düşük değerler vermektedir.

Çizelge 12. Bazaltik kayaçların tek eksenli basınç deneyi sonuçları.

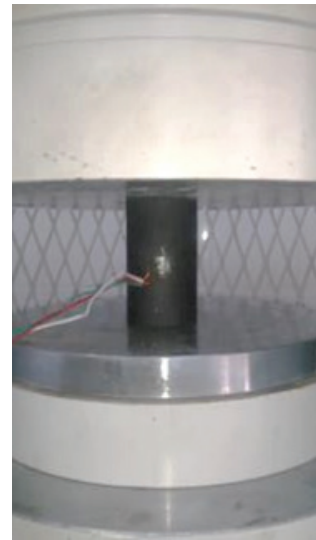
Table 12. Uniaxial compressive strength test results of the basaltic rocks.

Örnek Kodu	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, σ_c (MPa)		
	En Düşük	En Yüksek	Ortalama
BTH	208	320	271
BTM	194	287	247
BTO	160	270	206
BK	197	253	216
BD	167	280	190
BÇ	134	267	188
BB	133	257	186
BE	102	218	145

Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

Elastisite modülü ve Poisson oranı ISRM (2007) önerileri dikkate alınarak yapılan tek eksenli basınç deneyi sırasında deformasyon ölçerler yardımıyla (Şekil 8) bulunmuştur. Çizelge 13'te görüldüğü üzere ortalama en

yüksek Poisson oranı değeri 0.28 ve 117 GPa elastisite modülü değeri ile BTH örneğine aittir. En düşük Poisson oranı değeri 0.14 ile BK örneği ve en düşük elastisite modülü ise 57 GPa değeri ile BÇ örneğine aittir. Palchic (2013)'e göre; elastisite modülü, basınç dayanımı ve efektif porozite değerleri ile uyumluluk gösterse de Çizelge 13'te verilmiş olan değerlere göre bazaltik kayaçlarda elastisite modülü böyle anlamlı bir ilişki vermemiştir. Bunun durumun, kayacın bileşiminden bağımsız olarak var olan mikro çatlak sistemlerinin ve porozitelerinin erken yenilmelere sebebiyet vermesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. İkinci neden ise, kayacın elastik davranışı ile kayacın dayanımı arasındaki ilişkiyi bozan örneklerden dolayı anlamlı bir regresyon analizi sonucu elde edilememiştir. Örneğin BK örneği yüksek dayanım gösterse bile, içerisinde bulunan ayrılmış mineraller ve mikro çatlaklarından dolayı elastisite modülü düşük değer vermiştir.



Şekil 8: Tek eksenli basınç deneyi sırasında bazalt örneği üzerine yapıştırılmış deformasyon ölçer.

Figure 8: Strain gauge on the basalt sample during the uniaxial compressive strength test.

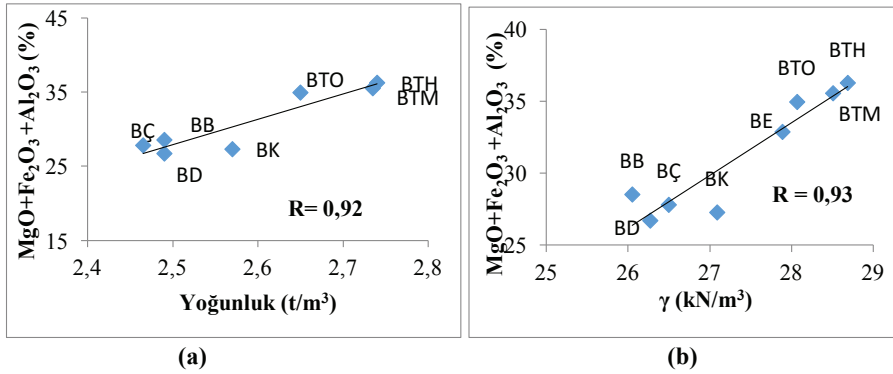
Çizelge 13. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sırasında elde edilen Poisson oranı ve elastisite modülü değerleri.

Table 13. Poisson ratio and elasticity module values obtained during uniaxial compressive strength test.

Örnek Kodu	Poisson Oranı ν	Elastisite Modülü E(GPa)
BTH	0.28	117
BTM	0.24	65
BTO	0.18	90.5
BK	0.14	67
BD	0.20	101
BÇ	0.23	57
BB	0.18	76
BE	0.27	103

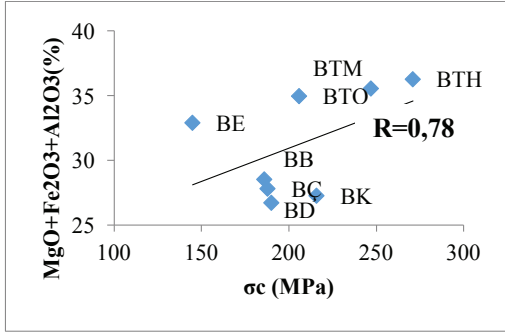
VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Bazaltik kayaçların kimyasal, mineralojik ve petrografik özellikleri, fiziko-mekanik özellikleri ile karşılaştırılırken basit regresyon analizi yöntemi tercih edilmiştir. Bazaltik kayaçların kimyasal bileşiminde magnezyum, demir ve alüminyum elementlerini fazla bulunduran örneklerin yoğunluklarının ve birim hacim ağırlıklarının da yüksek olduğu belirlenmiştir. (Şekil 9). Ayrıca tek eksenli basınç dayanımı ile kıyaslandığında, korelasyon katsayısı $R=0.78$ olan anlamlı bir ilişki elde edilmiştir. Bu hesaplamalarda BE kodlu bazalt, diğer örneklerle göre yüksek efektif poroziteye sahip olması ve içeriğindeki minerallerde kısmen ayrılmış, öz kristal biçimlerini kaybetmiş olmasından ötürü karşılaştırmaya dahil edilmemiştir (Şekil 10).



Şekil 9. Bazaltik kayaçların kimyasal bileşimleri ile a) yoğunluk ve b) birim hacim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması.

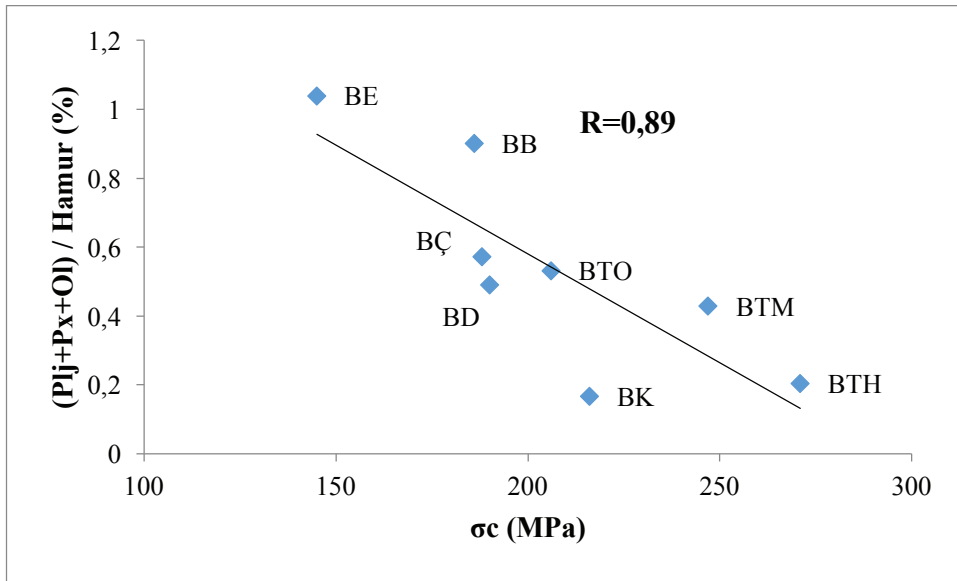
Figure 9. Chemical composition of the basaltic rocks and a) density and b) unit weight values.



Şekil 10. Bazaltik kayaçların kimyasal bileşimi ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Figure 10. The relationship between chemical composition and compressive strength of the basaltic rocks.

Eberhardt vd. (1999) ile Tuğrul ve Zarif (1999) granitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda, kayacın mineralojik bileşimleri ile mekanik özelliklerini kıyasladıklarında tane boyu küçüldükçe dayanımın arttığını belirtmişlerdir. Ündül vd. (2015) andezitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmada; plajiyoklas ve amfibol toplamının, hamura olan oranı (Plajiyoklas+Amfibol/Hamur) arttıkça dayanımlarının arttığını tespit etmişlerdir. Benzer bir çalışma bu araştırmada da yapılmıştır. Plajiyoklas, piroksen ve olivin fenokristal alanları toplanıp hamura oranlandığında, değer küçüldükçe, yani hamur oranı arttıkça tek eksenli basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir (Şekil 11).



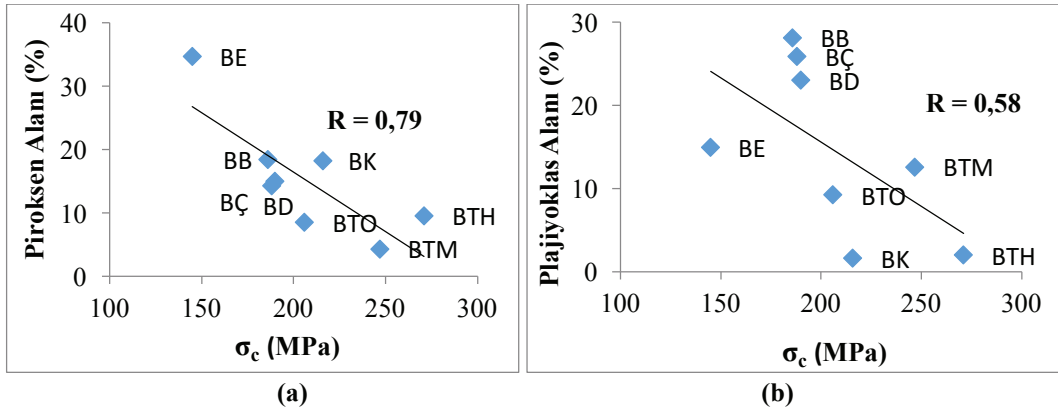
Şekil 11. Bazaltik kayaçların mineral alan yüzdelерinin hamur yüzdelерine oranının tek eksenli basınç dayanımı değерleri ile karşılaştırılması.

Figure 11. Comparison of the ratio between mineral area percentages and matrix percentage of the basaltic rocks with uniaxial compressive strength values.

Dayanımı etkileyen en önemli unsurlardan biri hamurun bileşimi ve özelliğidir. 8 farklı bazaltik kayaç içerisinde, piroksen, plajiyoklas ve olivin minerallerinin hamurun neredeyse tamamına hakim olduğu örnekler (BTH, BTM, BTO, BK) yüksek dayanım gösterirken, volkan camı ve plajiyoklas ağırlıklı olanlar (BD, BÇ, BB) daha düşük basınçlarda yenilmektedir. Bunun yanı sıra, hamur içerisinde fenokristal boyutlarda bulunan piroksen minerali boyutu arttıkça kayaçların dayanımı da düşmektedir. Benzer ilişki plajiyoklas fenokristal boyutu ile kayaçların dayanım arasında da bulunmasına rağmen piroksen ve kayaç dayanımı arasındaki ilişki kadar kuvvetli değildir. (Şekil 12).

örneğin dayanımlı hamur dokusuna rağmen, efektif porozite değerinin yüksek olmasıdır. BK örneğinde de hamurda var olan çatlak sistemleri, akma dokusu ve minerallerindeki ayrışmadan dolayı gözlenen killeşmeler nedeniyle dayanımı beklenen değerden daha düşüktür. Bunların dışında hamuru volkan camı ağırlıklı olan BD örneği ise ayrılmış mineral içermediğinden yüksek dayanımlıdır. Bu şekilde kırılma davranışının nedeni, hamurunun ağırlıklı olarak volkan camından meydana gelmiş olması ve hamurdaki çatlaklardır.

Mineralojik ve petrografik özellikleri dikkate alındığında hamur - mineral oranlarına göre bazaltik kayaçlar kendi içlerinde uyumlu olarak



Şekil 12. Piroksen ve plajiyoklas fenokristal yüzdelерinin dayanım değеrleri ile karşılaştırılması.

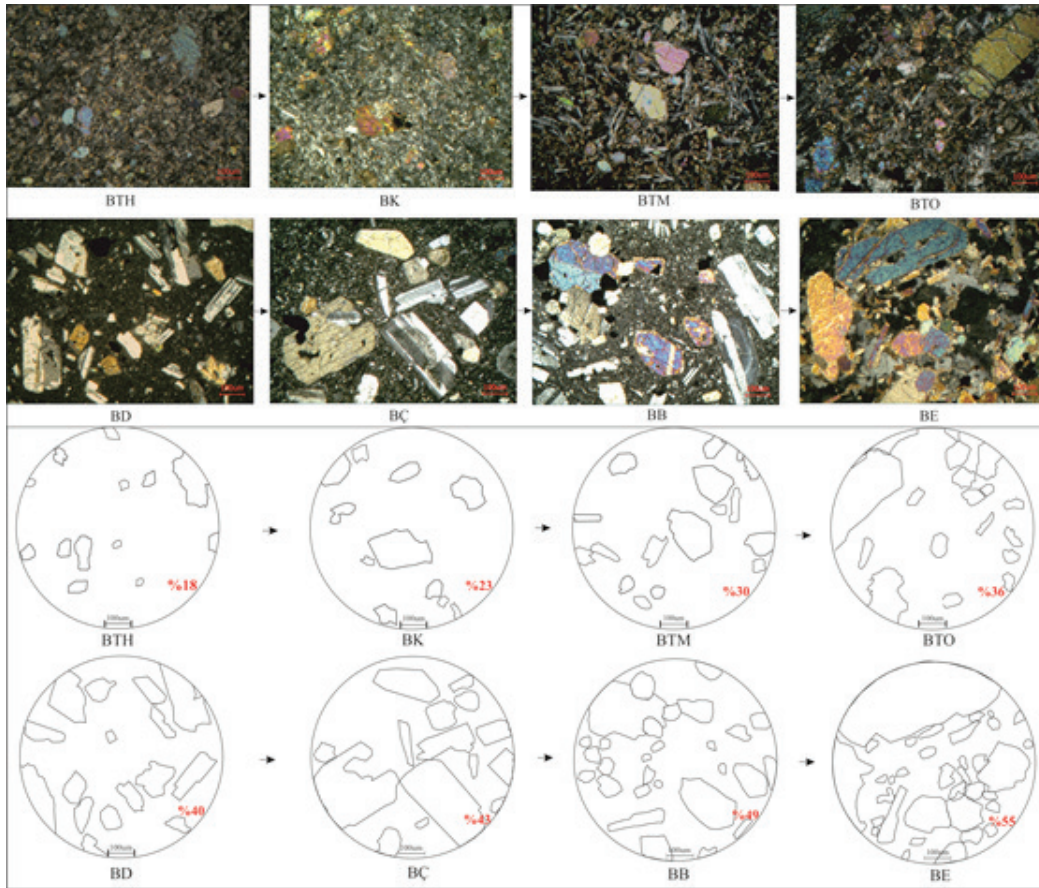
Figure 12. Comparison of pyroxene and plagioclase phenocrystalline percentages with strength values.

Çatlak ve ayrılmış mineral içermeyen kayaçlar, bunları içeren kayaçlara göre, yük altında daha uzun bir süre yenilmeden kalabilmektedir. Genel olarak dayanımı yüksek olan BTH ve BTM örneklerinde, yenilmenin meydana geldiği yük değеrleri de yüksektir. Fakat benzer petrografik özellikler gösteren BTO ve BK örneklerinin dayanımları beklenilenden nispeten daha düşüktür. Bunun nedeni BTO

belli fiziksel ve mekanik değеrler vermektedir. Bu değеrler bazaltik kayaçların bileşim ve dokusal özelliklerine göre gruplandırılabilceğini göstermektedir. Şekil 13'te görüldüğü gibi üst sırada yer alan bazaltların mineral tane boyları ve alanları küçük olup, bileşimlerinde bulunan olivin, piroksen, plajiyoklas ve opak mineral fenokristal toplamaları %18 - 36 arasında değışmektedir. Ayrıca hamurları piroksen,

plajiyoklas ve daha az olivin bileşimli olarak görülmektedir. Bu grupta yer alan bazaltlar diğerlerine göre daha dayanımlı ve fiziksel özellikleri (yoğunluk ve birim hacim ağırlıkları yüksek) benzerdir. 2. grubu oluşturan ve şeklin alt sırasında bulunan bazaltların mineral boyutları ve alanları daha büyük olup, bileşimlerinde yer alan plajiyoklas, piroksen ve opak mineral (BE

örneğinde istisnai olarak %1.59 oranında olivin de vardır) fenokristal toplamları %40-55 arasında değişmektedir. Hamurlarının bileşimi ağırlıklı olarak volkan camı ve plajiyoklas mikrolitinden meydana gelmektedir. Bu grupta yer alan bazaltlar, diğer gruptakilere göre ortalama % 25 daha düşük dayanımlı olup, yoğunlukları ve birim hacim ağırlıkları da daha düşüktür.

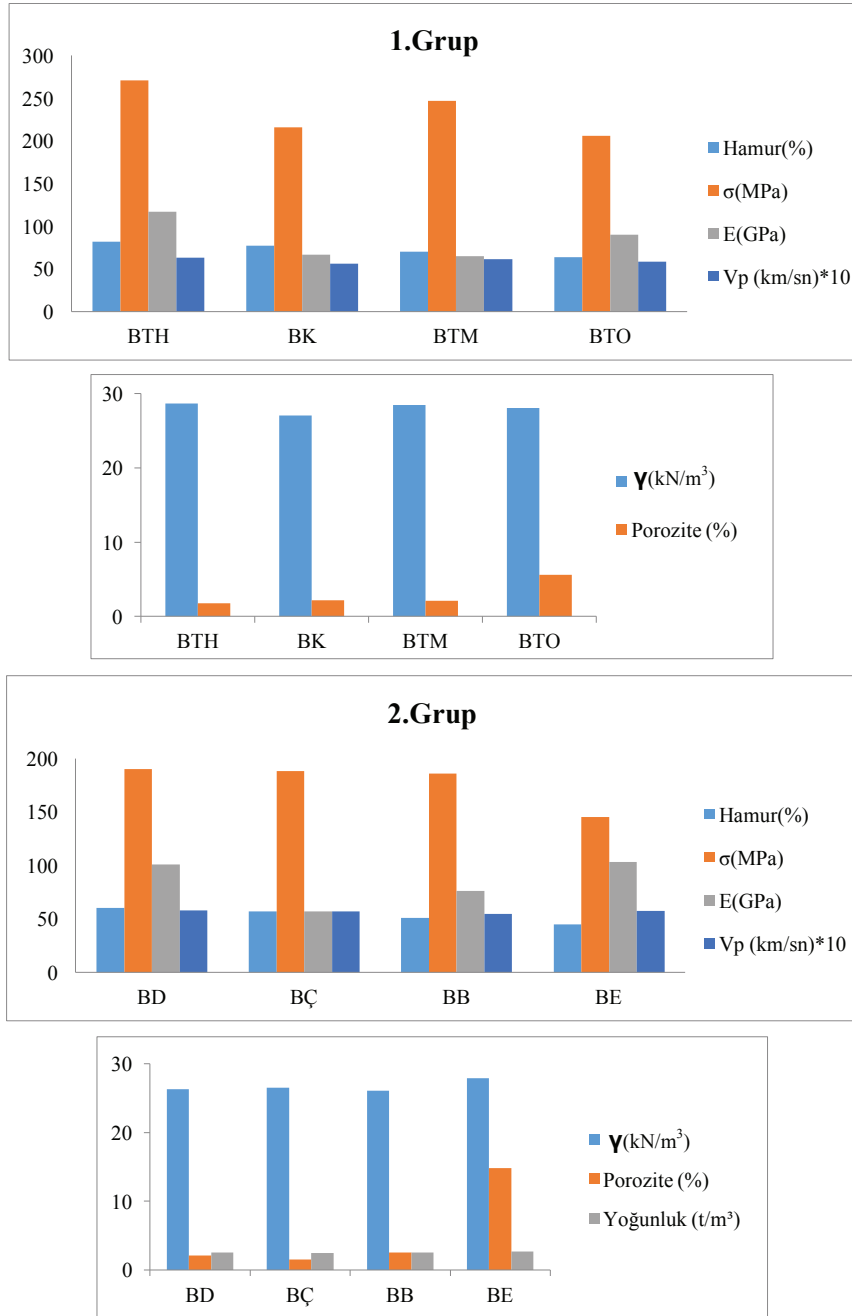


Şekil 13. Bazaltik kayaların bileşim ve dokusal özelliklerine göre sınıflandırılması.

Figure 13. Classification of the basaltic rocks according to composition and textural characteristics.

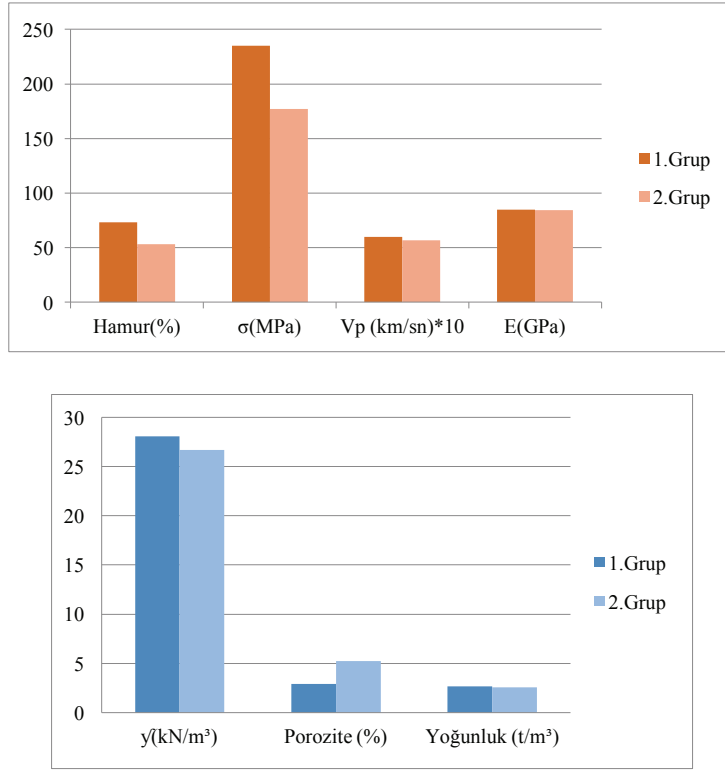
Bazaltların hamur bileşimleri, mineral içerikleri, fiziksel ve mekanik özellikleri dikkate alınarak öngörölmüş olan gruplandırması

Şekil 14'te ve bu grupların ortalama fiziksel ve mekanik değerleri Şekil 15'te sunulmuştur.



Şekil 14. Bazaltik kayaçların petrografik, mekanik ve fiziksel özelliklerine göre gruplandırılması.

Figure 14. Grouping of the basaltic rocks by petrographic, mechanical and physical properties.



Şekil 15. Dokusal özelliklerine göre gruplandırılmış bazaltik kayaç örneklerinin ortalama mekanik ve fiziksel değerleri.

Figure 15. Average mechanical and physical values of the basaltic rock samples grouped according to their textural properties.

SONUÇLAR

Bazaltların; hamur bileşimi, mineral içeriği, dokusu, fenokristal boyutları ve bunların kayaç içerisindeki yüzdeleri, bu kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bazalt örneklerinin mineralojik ve petrografik niteliklerinin, fiziksel özellikleri ve mekanik davranışları üzerine olan etkisi göz önüne alınarak; incelenen örnekler dahilinde bazaltların hamur ve mineral bileşimlerine göre iki gruba ayrılması uygun görülmüştür. Bu gruplandırma doğrultusunda;

1. grupta yer alan bazaltlar;

-Genel olarak olivinli bazaltlardır,

-Hamur ağırlıklı olarak; olivin, piroksen, plajiyoklas minerallerinden oluşmaktadır,

-Fenokristal boyuttaki minerallerin alanları %18 ile %36 arasında olup; bu özelliklerinden dolayı;

➤ Yoğunluk ve birim ağırlık değerleri yüksektir,

➤ Basınç dayanımları 2. gruba göre daha yüksek ve ortalama 206 MPa ile 271 MPa arasında değişmektedir.

2. grupta yer alan bazaltlar;

-Genel olarak olivinsiz bazaltlardır,

Eriş, Tuğrul, Er, Yılmaz

-Hamur ağırlıklı olarak; plajiyoklas mikroliti ve volkan camından oluşmaktadır,

-Fenokristal boyuttaki minerallerin alanları %40 ile %55 arasındadır ve tüm bu özellikleri nedeniyle;

➤ Yoğunluk ve birim ağırlık değerleri 1. gruba göre daha düşüktür,

➤ Basınç dayanımları daha düşük ve ortalama 145 MPa ile 190 MPa arasında değişmektedir.

Bu çalışma kapsamında öngörülmuş olan gruplandırma, bazalt örneklerinin çeşitliliği (minerolojik, petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri doğrultusunda) artırılarak geliştirilebilir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'nin 51152 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Adelinet, M., Fortin, J., Schubnel, A., Guéguen, Y., 2013. Deformation modes in an Icelandic basalt: From brittle failure to localized deformation bands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 255, 15–25.

Anovitz, L.M., Cole, D.R., 2015. Characterization and analysis of porosity and pore structures. *Rev Mineral Geochemistry*, 80, 61–164.

Eberhardt, E., Stimpson, B., Stead, D., 1999. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of gerilims-induced brittle fractures. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 32(2), 81–99.

Heap, M.J., 2009. The evolution of elastic moduli with increasing crack damage during cyclic gerilimsing of a basalt from Mt. Etna volcano. *Tectonophysics*, 471 (1–2), 153–160.

ISRM, 2007. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, Springer, 628p.

Korkanç, M., Solak, B., 2016. Estimation of engineering properties of selected tuffs by using grain/matrix ratio. *Journal of African Earth Sciences*, Volume 120, August 2016, pages 160–172.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745–750.

Palchik, V., Hatzor, Y. H., 2004. The influence of porosity on tensile and compressive strength of chalks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37(4), 331–341.

Palchik, V., 2013. Is there link between the type of the volumetric strain curve and elastic constants, porosity, stress and strain characteristics. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(2), 315–326.

Tuğrul A., Gürpınar, O., 1997. Proposed Weathering Classification for Basalts and Their Engineering Properties. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 55, 61–71.

Tuğrul, A., Zarif, I. H., 1999. Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Selected Granitic Rock from Turkey. *Engineering Geology*, 51, pp. 303–317.

Ündül, Ö., Amann, F., Aysal, N., Plötze, M., 2015. Micro - textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks. *Engineering Geology*, 1–9.

İscehisar (Afyonkarahisar) Termal ve Mineralli Sularının Hidrojeokimyası ve Kullanım Özellikleri

Hydrogeochemistry and Application Characteristics of İscehisar (Afyonkarahisar) Thermal and Mineral Waters

Can BAŞARAN* , Ahmet YILDIZ* , Merve Şenel CİĞERCİ**

*Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 03200, Afyonkarahisar

** Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 03200, Afyonkarahisar

Geliş (Received): 25 Şubat (February) 2019 / Düzeltme (Revised): 22 Mayıs (May) 2019 / Kabul (Accepted): 18 Haziran (June) 2019

ÖZ

Bu çalışmada Afyonkarahisar ili-İscehisar ilçesi ve çevresinde yer alan bir adet termal su, bir adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örneğinin hidrojeokimyası ve kullanım özellikleri incelenmiştir. Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfiklerini oluşturan şistler bölgedeki termal ve mineralli su örneklerinin temel kayacını, İscehisar mermerleri hazne kayacını ve Neojen birimlerin geçirimsiz seviyeleri örtü kayacını oluşturmaktadır. Bölgede derinlere süzülen yeraltı suları, jeotermik gradyana bağlı olarak ısınmakta ve termal su olarak ve/veya daha uzun bir mesafe kaydedip soğuyarak mineralli su olarak yüzeye çıkmaktadır. Neojen yaşlı seviyelerin geçimli birimleri ise soğuk örneklerinin akifer kayaçlarıdır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre; termal su örneğinin Na-Ca-HCO₃, mineralli su örneğinin Na-HCO₃ ve soğuk su örneklerinin Ca-Mg-HCO₃ ve Ca-Na-HCO₃ tipli sular oldukları belirlenmiştir. Soğuk suların içerdikleri Mg ve Na iyonlarının, etkileşimde bulundukları metamorfik-vulkanik kayaçlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Termal ve mineralli su örneklerinin silis jeotermometrelerine göre hesaplanan hazne kaya sıcaklıkları sırasıyla 69-119°C ve 46-82°C arasındadır. Kullanım özelliklerine göre değerlendirildiğinde, soğuk su örneklerinde As haricindeki tüm iyonların insani tüketim limitlerine (İTASHY, 2013) ve mineralli su örneğinde Cr haricindeki tüm iyonların doğal mineralli su limitlerine (DMSY, 2004) uyduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İscehisar, Afyonkarahisar, Jeotermal, Mineralli Su, Hidrojeokimya

ABSTRACT

In this study, hydrogeochemical and application characteristics of one thermal water, one mineral water and 5 cold water samples in İscehisar (Afyonkarahisar) were investigated. The schists of the Paleozoic Afyon metamorphics form the basement rock in the study area. İscehisar marbles are the reservoir rock of the geothermal system. The impermeable levels of the Neogene units form the cover rock. Meteoric waters percolate to the reservoir rocks, they are heated at depth by geothermic gradient and then ascend to the surface as thermal waters and/or ascend to the surface as cold mineral waters due to heat lost causing longer flow paths. The permeable levels of the Neogene rocks are the aquifer rocks of the cold waters. According to the results of the analysis; the thermal water is Na-Ca-HCO₃ type, the mineral water is Na-HCO₃ type and the cold water samples are Ca-Mg-HCO₃ and Ca-Na-HCO₃ types. It is thought that the Mg and Na ions in the cold waters are caused by the metamorphic-volcanic rocks in which they interact. According to the silica geothermometers, the reservoir temperatures of thermal and mineral waters vary between 69-119°C and 46-82°C, respectively. All the ion concentrations except those of As in the cold water samples

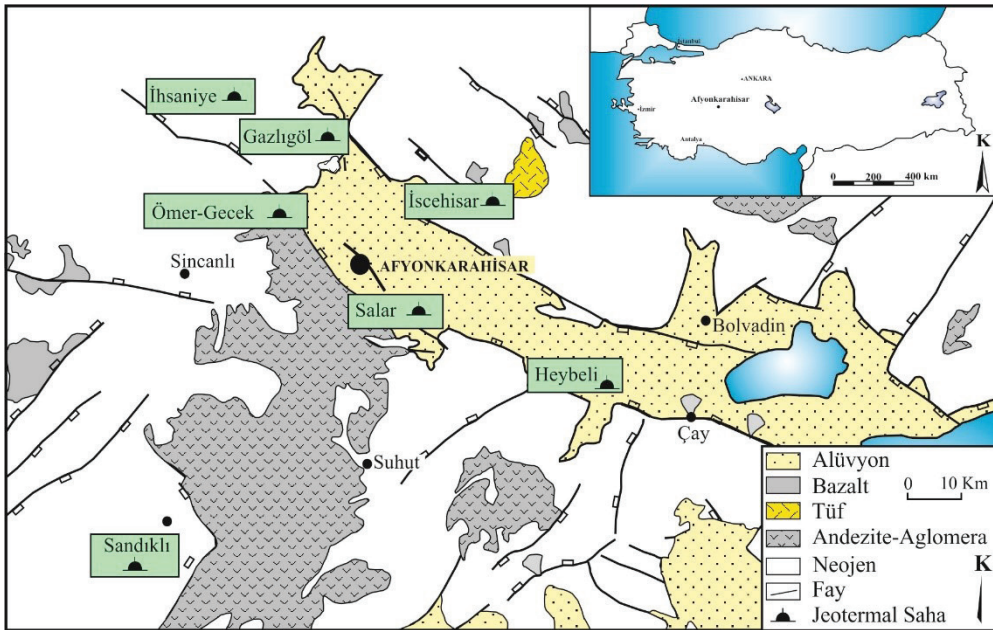
are compatible with the human consumption limits of ITASHY (2013). The ions concentrations of mineral water sample, except that of Cr, are compatible with the natural mineral water limits of DMSY (2004).

Keywords: Iscehisar, Afyonkarahisar, Geothermal, Mineral Water, Hydrogeochemistry

GİRİŞ

Ülkemiz jeotermal kaynaklar açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Jeotermal ve mineralli kaynaklar bulundukları bölgenin sosyal ve ekonomik kalkınmasına önemli derecede katkı sağlamaktadır. Yeni saha araştırmalarının yanı sıra mevcut kaynakların özelliklerinin belirlenmesi ve bu kaynaklardan en verimli şekilde yararlanma yollarının bulunması gerekmektedir. Türkiye’de yer alan jeotermal kaynakların büyük bir çoğunluğu Batı Anadolu’da yer almakta olup Afyonkarahisar ili de bu bölgedeki en önemli sahalardan biridir. İl genelinde Ömer-Gecek, Gazlıgöl, Sandıklı, Heybeli, Susuz-İscehisar, Salar ve İhsaniye olmak üzere yedi ayrı jeotermal alan bulunmaktadır

(Şekil 1). Bu alanlarda üretilen jeotermal sular bir alanda (Ömer-Gecek) elektrik üretimi olmak üzere genel olarak konut ısıtmacılığı, seracılık ve termal turizm amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bazı bölgelerde yer alan termal suların ise şu an aktif bir kullanımı bulunmamaktadır (Çizelge 1). Daha önceden detaylı ve bilimsel olarak çalışılmamış olan İscehisar bölgesi sularının jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özellikleri ile kullanım alanlarının belirlenmesi bu makalenin ana konusunu oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda inceleme alanında aktif olarak kullanılan 1 adet termal su ile 1 adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örneği alınarak, suların sınıflaması, içilebilme ve kullanılabilme özellikleri ile hazne kaya sıcaklıklarının tahminine yönelik hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 1. Afyonkarahisar ili jeotermal sahaları (Gürsoy vd. 2003’den değiştirilmiştir).

Figure 1. Geothermal fields in Afyonkarahisar province (modified from Gürsoy et al., 2003).

Çizelge 1. Afyonkarahisar ilinde yer alan jeotermal sahaların kullanım alanları.

Table 1. Usage areas of geothermal fields in Afyonkarahisar province.

Jeotermal Saha	Sıcaklığı (°C)	Kullanım Alanı
Ömer-Gecek	50-125	Elektrik üretimi, seracılık, şehir ısıtma, turizm
Sandıklı	65-85	Seracılık, şehir ısıtma, turizm
Gazlıgöl	40-85	Seracılık, şehir ısıtma, turizm
Heybeli	30-55	Seracılık, turizm
İscehisar	~ 40	Turizm
Salar	~ 30	Yok
İhsaniye	~ 36	Yok

MATERYAL VE METOT

İnceleme alanı 1/25000 ölçekli K25-a3 ve K25-b4 paftalarında yer almaktadır. İnceleme alanının jeolojik özellikleri önceki çalışmalar ve arazi çalışmalarından yararlanılarak incelenmiştir. Belirlenen jeolojik birimlerin su bulundurulabilme ve geçirimsizlik özelliklerine göre hidrojeoloji haritası oluşturularak Kasım-2018 tarihinde bölgede yer alan su noktalarından örnekleme yapılmıştır. Çalışma alanındaki suların kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla anyon+kasyon analizleri için 500 ml HDPE numune kabı kullanılmış ve analize kadar <4°C sıcaklıkta korunmuştur. Diğer element analizleri için örnekler 100 ml'lik HDPE şişelere filtre edilerek alınmış (0.45 µm), daha sonra ultra saf HNO₃ ilavesi ile örnek pH'ları <2'ye düşürülmüştür. Örnek alımı sırasında HQ40D (Hach-Lange) marka portatif su ölçüm cihazı ile suların sıcaklık (T-°C), elektriksel iletkenlik (Eİ-µs/cm), redoks potansiyeli (Eh-mV) ve hidrojen iyonu aktivitesi (pH) değerleri ölçülmüştür. Suların anyon ve kasyon analizleri (HCO₃, Cl, F, SO₄, NO₂, NO₃, NH₄, Na, K, Ca, Mg) Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası laboratuvarlarında, ağır

metal ve iz element analizleri ACME (Kanada) laboratuvarında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar; hidrojeokimya grafikleri ile değerlendirilmiş, jeotermometre hesaplamalarında kullanılmış, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2013) ve Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik (DMSY, 2004) ile karşılaştırılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

İnceleme Alanı Jeolojisi

İnceleme alanı, Türkiye'nin tektonik birliklerinden Torid-Anatolid Bloğu içinde yer almaktadır (Ketin, 1966). Çalışma sahası; Göncüoğlu vd. (1996) tarafından önerilen tektonik modele göre Afyon Zonu'na ait temel kayaçları içermektedir. Afyon Zonu düşük dereceli metamorfik bir kuşaktır ve yeşil şist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş çökelilerden oluşur. Bu birimler üzerine Üst Permien-Alt Triyas yaşlı konglomeralar çökelmiştir. Bu konglomeraları Triyas-Jura yaşlı karbonatlar üzerlemektedir. Neojen yaşlı genç volkanik ve piroklastik seriler ise tüm birimleri örtmektedir (Tolluoğlu vd.,

1997). İscehisar bölgesinde temel kayalar, Doğanlar şisti ile İscehisar mermerlerinden oluşan Afyon Metamorfikleridir. Doğanlar şisti, kahve-yeşil renkli olup, çok kıvrımlı bir yapıya sahiptir. Metin vd. (1987) tarafından yapılan çalışmada şistler içerisinde albit, klorit, epidot, amfibol, muskovit, biyotit ve kuvars gibi düşük dereceli yeşil şist fasiyesine ait mineral parajenezleri belirlenmiştir. İscehisar mermerleri, beyaz, sarımsı beyaz ve grinin değişik tonlarında renk dağılımına sahiptir olup metamorfik temelin en üst birimini oluşturmaktadır. Kökeni kireçtaşı olan mermerler jeolojik olarak farklı renk, tane boyutu, mineralojik bileşim göstermektedir (Kibici vd., 2001). Orta-Üst Miyosen yaşlı Seydiler ignimbiriti metamorfik kayaların üzerine uyumsuzlukla gelmektedir. Seydiler ignimbiriti üstünde orta Miyosen yaşlı Karakaya volkanitleri uyumsuz olarak yer almaktadır. Çalışma alanındaki birimlerin en üst kesimini Geç Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı çakıltası, kumtaşı, kilaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı ardalanmasından meydana gelen Gebeceler formasyonu oluşturur (Metin vd., 1987; Kibici vd., 2001) (Şekil 2).

Hidrojeoloji

İnceleme alanında sıcak su akiferi olan kırıklı-çatlaklı ve boşluklu İscehisar mermerleri ve alüvyon bölgedeki geçirimli birimlerdir. Termal su örneğinin alındığı (IJ1) jeotermal sondaj ~780 metre derinlikte olup sondaj

boyunca; 2-86 ve 288-384 metreler arasında Gebeceler Formasyonu; 86-288 ve 384-394 metreler arasında Volkanik kayalar ve Seydiler İgnimbiriti, 394-430'ncü metrelerde taban konglomerası ve 432. metreden itibaren ise Doğanlar şisti ile İscehisar Mermerlerinin ardalanması şeklinde Paleozoyik birimler kesilmiştir. İscehisar mermerlerinin kesildiği 455-600, 700-708, 732-762 ve 776-780. metreler filtrelenen ve su alınan birimlerdir. Doğanlar şistleri genel itibariyle geçirimsiz birim olarak tanımlanmış olup kırıklı-çatlaklı yapı kazanmış kesimleri yeraltı suyu içerebilmektedir.

İnceleme alanında şist alüvyon dokanağından ve/veya bu dokanak boyunca yer alan fay üzerinden boşalan kaynak suları (IC4) mevcuttur (Şekil 2). Karakaya volkanikleri ve Seydiler ignimbiritleri kırıklı-çatlaklı kesimleri nedeniyle, Gebeceler formasyonu da çakıltası-kumtaşı-kireçtaşı seviyeleri nedeniyle yarı geçirimli birim olarak adlandırılmıştır. Bu yarı geçirimli birimlerin dokanaklarında ya da tam üzerlerinde su noktaları yer almaktadır (ICK, IC2, IC3, MYO, Şekil 2). Bu yarı geçirimli birimler stratigrafik olarak üstte yer almaları nedeniyle soğuksu akiferi olarak düşünülmektedir. Özellikle bölgedeki mineralli su örneği (KM) Karakaya volkanikleri-Doğanlar şisti-Gebeceler formasyonu olmak üzere üç birimin dokanağında ve muhtemel bir fay üzerinde yer almaktadır (Şekil 2). Örnekleme yapılan su noktalarıyla ilgili genel bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Örneklenen su noktalarının genel özellikleri.

Table 2. General characteristics of the sampled water points.

Örnek	Koordinat (ED50)	Rakım (m)	Debi (l/sn)	Türü	Kullanım	Derinlik (m)	Filtre (m)
IJ1	306204/4304152	1095	30	Termal sondaj	Kaplıca	~780	455-600 700-708 732-762 776-780
KM	305829/4300328	1060	1	Minerali su	Yok	-	-
MYO	306768/4304238	1141	-	Soğuk su sondajı	İnsani tüketim	-	-
ICK	304398/4304404	-	-	Soğuk su sondajı	İnsani tüketim	-	-
IC2	304647/4304451	1079	2	Çeşme	Genel	-	-
IC3	302957/4302398	1074	1	Çeşme	Genel	-	-
IC4	306768/4304238	1042	1	Çeşme	Genel	-	-

Hidrojeokimya

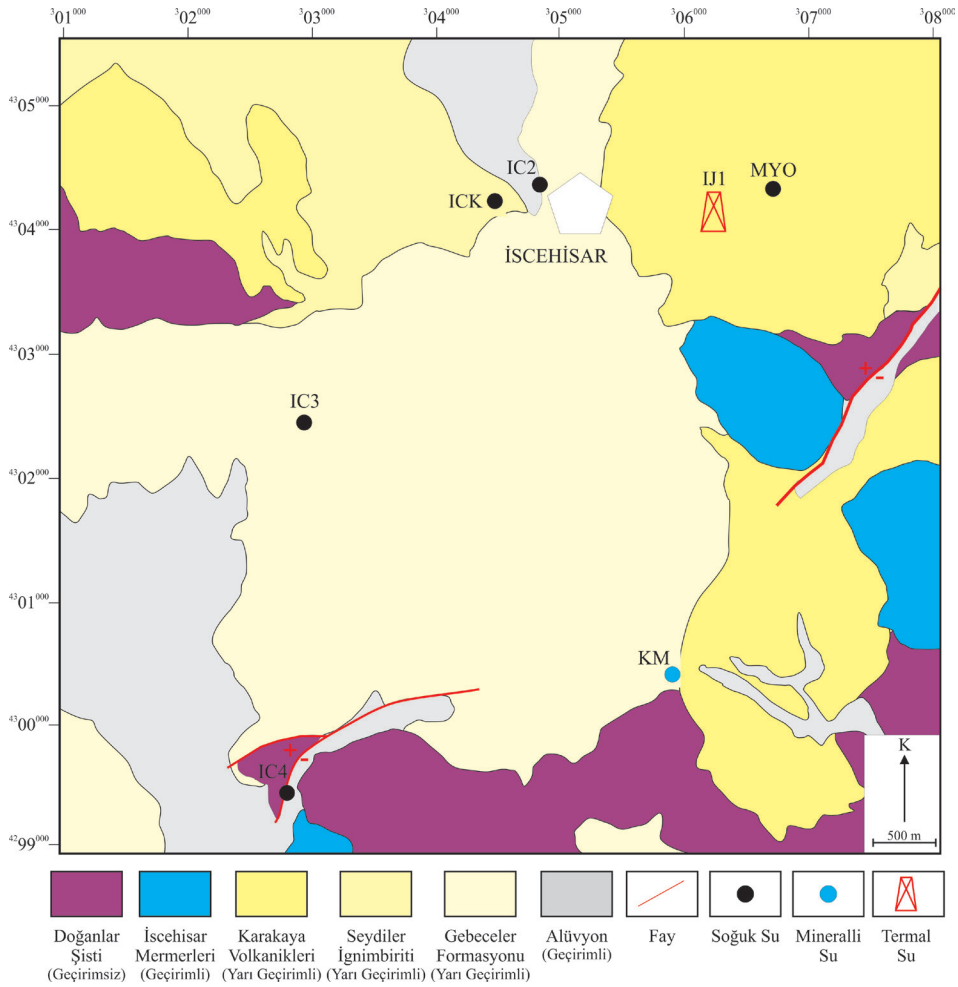
İncelenen su örneklerinin arazi parametreleri ölçüm sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir. 41°C sıcaklığa sahip olan IJ1 kodlu termal su İncehisar Belediye’si tarafından termal turizm amaçlı olarak kullanılmakta olup Eİ değeri 5006 mS/cm ve pH değeri 7.06 olarak ölçülmüştür. Bölgede ayrıca özel bir firma tarafından açılmış ancak örneklemesi yapılamayan bir adet daha jeotermal sondaj bulunmaktadır. KM kodlu minerali su örneği özel bir firma tarafından açılmış olan sondaj üzerinden alınmış olup düşük sıcaklığına rağmen (~15.1°) yüksek Eİ değeri (5650 mS/cm) ile dikkati çekmektedir. Sondaj üzerindeki bir boru içinden kendi halinde akmakta olan bu örneğin aktif bir kullanımı yoktur. MYO kodlu örnek Afyon Kocatepe Üniversitesi-İncehisar Meslek Yüksek Okulu tarafından ve ICK kodlu örnek İncehisar Belediyesi tarafından soğuk su amaçlı açılmış sondajlara ait örneklerdir. Bu örneklerin sıcaklık, Eİ ve pH değerleri sırasıyla; 15.5-18.7°C, 575-605 mS/cm ve 8.03-7.74 olarak ölçülmüştür. Bu örnekler insani tüketim

amaçlı olarak kullanılmaktadır. IC2, IC3, IC4 örnekleri ise arazi üzerinde yer alan çeşme suları olup sıcaklıkları sırasıyla 12.1, 14.4 ve 14.9°C, Eİ değerleri 655, 552 ve 619 mS/cm ve pH değerleri 7.84, 7.9 ve 7.84 olarak belirlenmiştir.

Su örneklerinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir. İncelenen su örneklerinin element içerikleri etkileşimde oldukları kayalara, sıcaklıklarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Su örneklerinin adlandırılmasında Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979) sınıflaması kullanılmış olup bu sınıflamaya göre; IJ1 örneği Na-Ca-HCO₃, KM örneği Na-HCO₃, MYO, IC2 ve IC3 örnekleri Ca-Mg-HCO₃ ve ICK ile IC4 örnekleri Ca-Na-HCO₃ tipinde sularlardır. IJ1 örneğinin görece yüksek Ca içeriği bu suyun soğuk su ile karıştığının ve/veya çok yüksek sıcaklıklı bir sistem olmadığının bir işaretidir (Davraz ve Yurt, 2017). Diğer taraftan özellikle soğuk su örneklerinde etkileşimde bulundukları farklı tip kayalara bağlı olarak Na-Mg katyonlarında zenginleşme gözlenmekte olup bölgedeki şistler

ve volkanik birimler bu iyonların başlıca kaynağı olarak düşünülmektedir. Schoeller (1955)'e göre incelenen tüm sular; klorür içeriğine göre, "Olağan Klorürlü", sülfat konsantrasyonları bakımından "Olağan Sülfatlı" ve karbonat-bikarbonat içeriği bakımından ise IJ1 ve KM

örnekleri "Hiperkarbonatlı", MYO, IC2, IC3, IC4 ve ICK örnekleri ise "Olağan Karbonatlı" sular sınıfına girmektedir. Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmeliğe (2004) göre ise KM örneği; "Zengin Mineralli (TDS>1500 mg/l) su" olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 2. İnceleme alanının hidrojeoloji haritası ve örnek lokasyonları Metin vd., 1987 ve Öcal vd., 2011'den değiştirilmiştir.

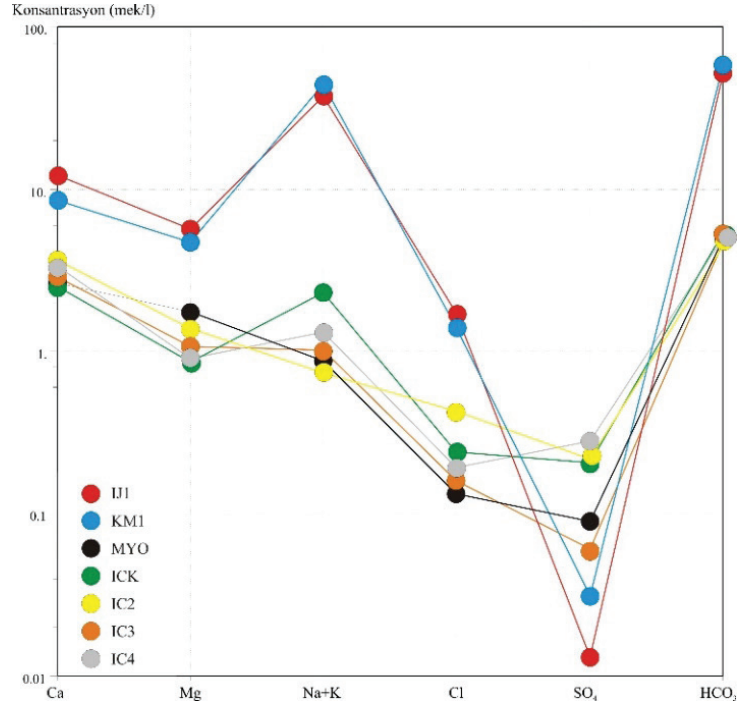
Figure 2. Hydrogeology map of the study area and sampling locations changed from Metin et al., 1987 and Öcal et al., 2011.

Schoeller (1955) diyagramında örneklerin kendi içlerinde gruplandıkları görülmektedir (Şekil 3). Termal ve mineralli su örnekleri yüksek konsantrasyonlarına bağlı olarak grafiğin en üstünde yer almakla birlikte düşük SO_4 içerikleri dikkat çekmektedir. Rezervuar kayaç olan mermerler genelde yüksek SO_4 içermezken, mermer içerisindeki karbonat minerallerinin çözünmesi suların HCO_3 bakımından zenginleşmesini sağlarlar. Ayrıca sularda bakteriyel sülfat indirgenmesi düşük SO_4 ve yüksek HCO_3 derişimlerine sebep olabilmektedir (Mutlu, 1996). Termal ve mineralli suyun bir grup ve soğuk su örneklerinin ayrı bir grup olarak bazı suların yaklaşık paralel doğrular halinde olması aynı rezervuardan beslendiklerini işaret etmektedir (Şekil 3).

Piper (1944)'e göre yapılan sınıflandırmada ise tüm su örneklerinde hakim anyonun HCO_3 olduğu görülmektedir. Katyonları gösteren üçgen incelendiğinde ise IC2, IC3 ve IC4 örnekleri Ca alanında yer almakta iken, MYO ve ICK örnekleri karışık tip katyonlar alanına doğru yönelmiştir. Termal ve mineralli su örneklerinde ise hakim katyon Na'dır. Dörtgen diyagramda ise soğuk su örnekleri Ca-HCO_3 , termal ve mineralli su örnekleri ise Na-HCO_3 alanında yer almaktadır. Yine aynı diyagramda soğuk sular 1 ($\text{Ca+Mg} < (\text{Na+K})$), 3 ($\text{CO}_3+\text{HCO}_3 > (\text{Cl+SO}_4)$) ve 5 numaralı (Karbonat sertliği % 50 'den fazla olan sular) alanlarda, termal sular ise 2 ($\text{Ca+Mg} < (\text{Na+K})$), 3 ($\text{CO}_3+\text{HCO}_3 > (\text{Cl+SO}_4)$) ve 8 numaralı (Karbonat alkaliler % 50'den fazla olan sular) alanlarında yer almaktadır (Şekil 4).

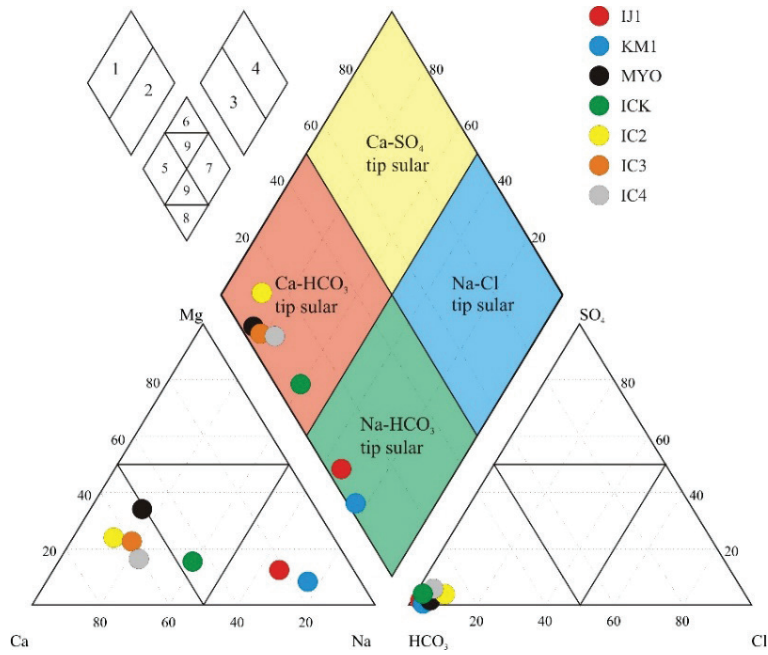
Çizelge 3. Su örneklerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (mg/l).
Table 3. Physical and chemical properties of the water samples (mg/l).

Örnek Adı	El (mS/cm)	pH	Eh (Mv)	T (°C)	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	NO_2	NO_3	SiO_2	F	Li	As	B	Al	Fe	Mn	Cu	Cr	Pb
IJ	5006	7.06	13.2	41	244.4	68.7	814.1	92.5	61.1	0.6	3172.0	0.0	0.0	71.4	1.3	2.43	0.002	9.72	0.009	1.95	0.083	0.072	0.119	0.004
KM	5650	7.6	26.2	15.1	172.7	57.3	974.9	79.2	50.2	1.5	3538.0	0.0	0.0	28.9	0.2	1.97	0.006	6.84	0.009	0.16	0.089	0.052	0.116	0.003
ICK	605	7.74	20.1	18.7	50.6	10.4	50.1	5.3	8.6	10.0	329.4	0.0	5.8	79.0	0.5	0.11	0.043	0.33	0.004	0.01	0.006	0.002	0.005	<0.01
IC2	655	7.84	-14.7	12.1	73.2	16.8	15.1	3.5	15.2	10.5	274.5	0.0	39.7	80.1	0.6	0.03	0.023	0.09	0.002	0.01	0.001	0.001	0.001	<0.01
IC3	552	7.9	-21.2	14.4	58.3	13.1	20.1	6.0	5.7	2.9	286.7	0.0	11.9	78.3	0.3	0.02	0.014	0.09	0.004	0.01	0.001	0.001	0.001	<0.01
IC4	619	7.84	-13.9	14.9	67.2	11.1	28.8	2.7	6.8	13.4	311.1	0.0	21.2	68.8	1.3	0.03	0.043	0.18	0.011	0.01	0.002	0.001	0.001	<0.01
MYO	575	8.03	-32.3	15.5	52.7	21.3	17.9	3.7	4.7	4.3	305.0	0.0	0.0	71.3	0.2	0.02	0.019	0.09	0.002	0.12	0.004	0.002	0.002	<0.01
İTASHY 2013	2500	6.5-9.5	*	*	*	*	200		250	250	*	0.5	50	*	2	*	0.01	1	0.2	0.2	0.05	2	0.05	0.01
DMSY 2004	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.1	50	*	5		0.01	*	*	*	0.5	1	0.05	0.01



Şekil 3. Schoeller yarı logaritmik diyagramı.

Figure 3. Schoeller semi logarithmic diagram.



Şekil 4: Piper diyagramı.

Figure 4. Piper diagram.

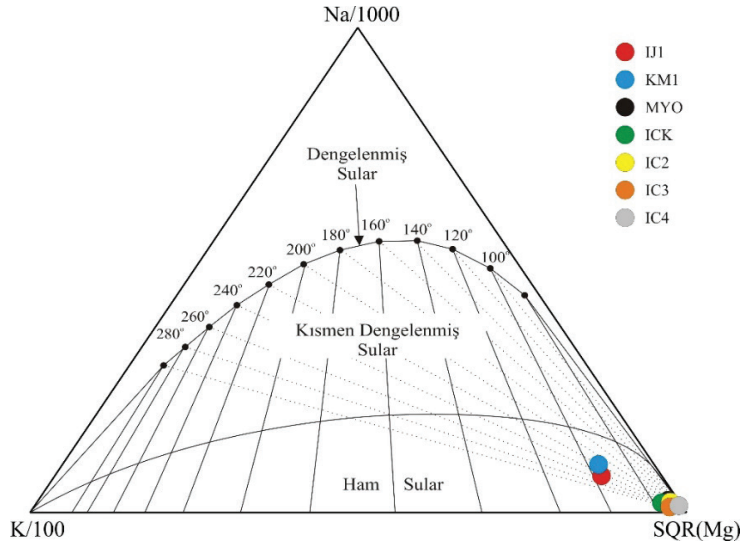
KM ve IJ1 örneklerinin grafiklerde aynı alanda yer alması bu örneklerin aynı kökenli olduğuna işaret etmektedir. Yüksek elektriksel iletkenlik değerine rağmen düşük sıcaklığa sahip olan KM örneği muhtemelen soğuk su karışımı ve/veya daha uzun yüzeye çıkış yolu ve süresi nedeniyle sıcaklığını kaybetmiştir. Mineralli su örneği termal suya nazaran daha yüksek çözünmüş madde içeriğine sahiptir. Bu durum daha uzun süreli su-kayaç etkileşimine bağlı olabilir. Jeotermal akışkanların klorür ve bor içerikleri, akışkanın kökeninin göstergesi olmakla birlikte bu elementler jeotermal sularda yüksek oranda çözünür ve çoğu jeotermal sistemde doymun duruma ulaşmazlar ancak düşük sıcaklıklı sularda ($<100^{\circ}\text{C}$) bor elementi alterasyon mineralleri tarafından absorblanma eğiliminde olup bu minerallerin bileşimine katılırlar (Ellis and Mahon, 1967; Harder, 1970; Keren and Mezuman 1981; Seyfried et al., 1984; Palmer et al., 1987). İncelenen IJ1 ve KM kodlu örneklerinin nispeten düşük Cl içerikleri (61.1-50.2) bu örneklerin sığ dolaşıma sahip olduklarını ve/veya Cl içeriklerinin soğuk su karışımına bağlı olarak seyredildiğini işaret etmektedir. İncelenen IJ1 ve KM örneklerinin bor içerikleri; Afyonkarahisar ilinin en yüksek sıcaklıklı ($\sim 120^{\circ}\text{C}$) jeotermal sahası olan Ömer-Gecek bölgesi sularının bor içeriklerine (~ 7 - 10.4 mg/l) oldukça benzer olup, örneklerin

nisbeten yüksek bor (9.72-6.84 mg/l) içerikleri daha derinlerde daha yüksek bir sıcaklığa işaret etmektedir. Örneklerin As değeri ise soğuk sulara nazaran daha düşüktür.

Jeotermometri

Jeotermal sistemlerde, elde edilen akışkandan maksimum düzeyde yararlanabilmek için hazne kaya sıcaklığı ve potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Suların rezervuar kaya sıcaklıklarının saptanması ve denge durumlarının belirlenmesi için Giggenbach (1988)'in geliştirdiği ve Fournier (1990)'ın modifiye ettiği Na-K-Mg üçgen diyagramı kullanılmıştır.

Bu diyagram ile hem sıcak suların rezervuar sıcaklığı hızlı olarak yorumlanabilmekte hem de kasyon jeotermometre uygulamalarının geçerliliği sınanmaktadır. Diyagram incelendiğinde sularının tamamının ham sular bölgesine düştüğü ve devam eden bir su-kayaç etkileşimi olduğu görülmektedir (Şekil 5). Termal ve mineralli su örnekleri nispeten daha yoğun su-kayaç etkileşimine bağlı olarak kısmen dengelenmiş sular alanına doğru yönelmiştir. IJ1 kodlu termal su örneği ile KM kodlu mineralli su örnekleri bu grafik üzerinden hareketle yaklaşık 100°C 'lik bir hazne kaya sıcaklığına sahiptir.



Şekil 5. Giggenbach diyagramı.

Figure 5. Giggenbach diagram.

Termal su örneği muhtemel karışıma bağlı olarak ve mineralli su örneği de görece uzun dolaşım süresi ve mesafesine bağlı olarak soğumuş ve güncel sıcaklıklarına ulaşmışlardır. Özellikle sıcaklıkları <140-180°C olan akışkanlarda kuvarsa nazaran kalseduan ile denge söz konusu olduğundan kalseduan jeotermometresi daha doğru sonuçlar vermektedir (Fournier, 1977; Karingithi, 2009). Silis jeotermometresi hesaplamalarında termal su örneği için elde edilen değerler Çizelge 4’de verilmiştir. Hesaplanan silis jeotermometresi sonuçları 69-119°C arasında değişmektedir. Özellikle kalseduan jeotermometresi 91°C ve K/Mg jeotermometresi 99°C ile uyumlu ve kabul edilebilir sıcaklıklar vermektedir. Na/K jeotermometreleri ise daha çok “dengelenmiş sular” için uygun olup, incelenen su örneğinde 243°C’ye ulaşan çok yüksek hatalı sonuçlar vermiştir.

Kullanım Özellikleri

Termal suların olduğu kadar, bölgedeki tüm su örneklerinin de kullanılabilirliğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. İnceleme alanında yer alan soğuk su örnekleri içme-kullanma suyu olarak kullanılmakta iken, KM örneği doğal mineralli su özelliğinde olup ticarileşme potansiyeli olan bir su örneğidir. Soğuk su örneklerinin değerlendirilmesinde İTASHY (2013), mineralli su örneği olan KM örneğinin değerlendirilmesinde ise DMSY (2004) kullanılmıştır.

Soğuk su örnekleri insani tüketim suyu standartı olan İTASHY (2013)’e göre değerlendirildiğinde; örneklerin tamamında As değerleri limite eşit ya da daha yüksektir. Ec, pH, Na, SO₄, B, Al, Fe, Mn, Cu, Cr ve Pb açısından tüm örnekler standartta verilen limitlere uymaktadır. KM1 örneğinin değerlendirilmesinde ise DMSY (2004) kullanılmış olup, örneğin Krom (Cr) içeriği (0.116 mg/l) standart değerin üzerinde olup ölçülen diğer elementlerin içerikleri ise standartlarda verilen değerlere uymaktadır. (Çizelge 4).

Çizelge 4. Jeotermometre hesaplamaları.

Table 4. Geothermometer calculations.

Jeotermometre Adı	Bağıntılar	Referans	IJ1	KM
			Hesaplanan	
			Sıcaklık °C	
1-SiO ₂ (alfa kristobalit)	$t = 1000 / (4.78 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977	69	28
2-SiO ₂ (kalseduan)	$t = 1032 / (4.69 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977	91	46
3-SiO ₂ (kalseduan)	$t = 1309 / (5.19 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977	119	78
4-SiO ₂ (buhar kaybı)	$t = 1522 / (5.75 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977	117	82
5-SiO ₂ (kalseduan, kondaktif soğuma)	$t = 1112 / (4.91 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	91	49
6-SiO ₂ (kalseduan, adiyabatik buhar kaybı)	$t = 1264 / (5.31 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	93	55
7-SiO ₂ (kalseduan, buhar kaybı)	$t = 1021 / (4.69 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	87	43
8-SiO ₂ (kuvars, buhar kaybı)	$t = 1164 / (4.9 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	109	65
9-SiO ₂ (kuvars adiyabatik buhar kaybı)	$t = 1498 / (5.7 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	116	80
10-SiO ₂ (kalseduan mmol)	$t = 1101 / (0.11 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	90	48
11-Na/K	$t = 933 / (0.933 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	224	188
12-Na/K	$t = 1319 / (1.699 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Arnorsson vd., 1983	226	200
13-Na/K	$t = 777 / (0.70 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Fournier, Truesdell, 1973	199	161
14-Na/K	$t = 856 / (0.857 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Truesdell, 1976	202	166
15-Na/K	$t = 1217 / (1.483 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Fournier, 1979	228	200
16-Na/K	$t = 1178 / (1.470 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Nieva ve Nieva, 1987	215	187
17-Na/K	$t = 1390 / (1.750 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Giggenbach, 1988	243	216
18-K/Mg	$t = 4410 / (13.95 - \log \text{K}^2/\text{Mg}) - 273.15$	Giggenbach, 1988	99	97

SONUÇLAR

Çalışmada yeraltı sularının hidrojeokimyasal özellikleri, kalitesi ve kullanım koşullarının belirlenebilmesi için 1 adet termal su, 1 adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örnekleme yapılmıştır. İsehisar mermerleri termal ve mineralli su örneklerinin rezervuar kayacı özelliğindedir. İncelenen termal su örneğinin (IJ1) Na-Ca-HCO₃, mineralli su örneğinin (KM) Na-HCO₃ ve soğuk su örnekleri olan MYO, IC2 ve IC3'ün Ca-Mg-HCO₃ ve ICK ile IC4 örneklerinin Ca-Na-HCO₃ tipinde sular olduğu belirlenmiştir. Termal su örneğinde muhtemel soğuk su karışımı nedeniyle Ca iyonunda, soğuk

su örneklerinde ise etkileşimde bulundukları şist ve volkanik kayalara bağlı olarak Na ve Mg iyonlarında artışlar gözlenmektedir. Termal su örneği ile aynı kökene sahip olduğu değerlendirilen mineralli su örneğinin, daha uzun dolaşım yolu/süresi sonucu sıcaklığını kaybettiği düşünülmektedir.

Termal ve mineralli su örnekleri için yapılan jeotermometre hesaplamalarında 69-119°C ve 46-82°C aralığında bir rezervuar sıcaklıkları hesaplanmıştır.

Soğuk suların içilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için analiz sonuçları İTASHY (2013)

limitleri ile ölçülen parametreler kapsamında karşılaştırılmıştır. Örneklerin tamamında As haricindeki diğer elementler standartlarda belirtilen sınır değerlere uymaktadır. KM1 örneğinin Cr içeriği (0.116 mg/l) ise DMSY (2004)'de verilen standart değer üzerinde olup örneğin ölçülen diğer element içerikleri bakımından ise standartlara uygun olduğu belirlenmiştir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 18. FENBİL. 10 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar ayrıca arazi çalışmaları sırasında desteklerinden dolayı İscehisar Belediye Başkanlığı'na teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral Equilibria and independent Variables Controlling Water Compositions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 547-566.
- DMSY., 2004. Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik (2004), Resmî Gazete Sayısı: 25657.
- Ellis, A.J., Mahon, W.A.J., 1967. Natural hydrothermal systems and experimental hot water/rock interactions. Part II. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, 519-538.
- Fournier, R.O., 1977. A review of chemical and isotopic geothermometers for geothermal systems, *Proceedings of the symposium on geothermal energy, Cento Scientific Programme*, 133-143.
- Fournier, R.O., 1979. A revised equation for the Na-K geothermometer. *Geothermal Resource Council Transactions*, 3, 221-224.
- Fournier, R.O., 1990. The interpretation of Na-K-Mg relations in geothermal waters. *Geothermal Resource Council Transactions*, 14, 1421-1425.
- Fournier, R.O., Truesdell, A.H., 1973. An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 1255-1275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4).
- Giggenbach, W. F., 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., Goguel, R.L., 1989. Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharges. Report No. CD 2401. Chemistry Division, DSIR, Petone, New Zealand.
- Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., Şentürk, K., Uysal, Ş., Özcan, A., Işık, A., 1996. Orta Sakarya'da Nallıhan-Sarıcakaya Arasındaki Yapısal Birliklerin Jeolojik Özellikleri, MTA Rap. No. 10094, (Yayınlanmamış).
- Gürsoy, H., Piper, J.D.A., Tatar, O., 2003. Neotectonic deformation in the western sector of tectonic escape in Anatolia: palaeomagnetic study of the Afyon region, central Turkey. *Tectonophysics*, 374, 57-79.
- Harder, H., 1970. Boron content of sediments as a tool in facies analysis. *Sedimentary Geology*, 4, 153-175.
- IAH., 1979. Map of mineral and thermal water of Europe. Scale 1:500.000, International Association of Hydrogeologists, United Kingdom.
- İTASHY., 2013. İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelikte değişiklik yapılmasına dair yönetmelik, Resmi Gazete, sayı: 28580.
- Karingithi, C.W., 2009. Chemical Geothermometers for Geothermal Exploration, Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, 1-22.
- Keren, R., Mezuman, V., 1987. Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation, *Clays and Clay Minerals*, 29, 198-204.

- Ketin, İ., 1996. Anadolu'nun Tektonik Birlikleri, MTA Dergisi, 66, 20-34, Ankara.
- Kibici, Y., Yıldız, A., Bağcı, M., 2001. Afyon kuzeyinin jeolojisi, mermer potansiyelinin araştırılması, Türkiye III. Mermer Sempozyumu, MERSEM 2001, 73-84, Afyonkarahisar.
- Metin, S., Genç, Ş., Bulut, V., 1987. Afyon ve Yakın Dolayının Jeolojisi, MTA Yayınları, Ankara.
- Mutlu, H., 1996. Afyon jeotermal alanındaki termal suların jeokimyasal değerlendirmesi ve jeotermometre uygulamaları, Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 169s.
- Nieva, D., Nieva, R., 1987. Development in Geothermal Energy Mexico, Part 12-A Cationic Composition Geothermometer For Prospection of Geothermal Resources, Heat Recovery Systems and CHP, 7, 243-258.
- Öcal, H., Turhan, N., Göktaş, F., 2011. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 1:100000 ölçekli jeoloji haritaları, Afyon K25 paftası.
- Palmer, M. R., Spivack, A.J., Edmond, M., 1987. Temperature and pH controls over isotopic fractionation during adsorption of boron on marine clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2319-2323.
- Piper, A.M., 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical interpretation of Water Analysis, Transactions, American Geophysical Union, 25, 914-23.
- Schoeller, H., 1955. *Geochemie Des Eaux Souterraines*, Revue De L'institute Francois Du Petrole, 10, 230-44.
- Seyfried, W. E., Janecky, D.R., Mottl, M.J., 1984. Alteration of the oceanic crust: Implications for geochemical cycles of lithium and boron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 557-569.
- Tolluoğlu, Ü.A., Erkan, Y., Yavaş, F., 1997. Afyon metasedimenter grubunun Mesozoyik öncesi metamorfik evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 40-2, 1-17.
- Truesdell, A. H., 1976. Summary of Section III Geochemical Techniques in Exploration. In Proceedings, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, CA, U. S. Government Printing Office, 1, 13-39, Washington.

YAYIN AMAÇLARI VE KURALLARI, YAYINA KABUL İLKELERİ

AMAÇ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

• İnsan ile Yerküre arasındaki etkileşimlere ilişkin bilgi ve deneyimleri doğal çevreyi de gözетerek daha güvenli ve rahat bir yaşam ortamı sağlamak amacı ile insanlığın hizmetine sunmayı hedefleyen Jeoloji Mühendisliği mesleğinin, günlük yaşamdaki yerini ve önemini daha etkin bir şekilde yansıtmak,

• Bu alanda ulusal ve uluslararası gelişmeleri Jeoloji Mühendisleri'nin bilgisine sunmak,

• Konu ile doğrudan veya dolaylı etkinliklerde bulunan biliminsanları, araştırmacılar, mühendisler ve diğer uygulayıcılar arasındaki bilgi ve deneyim paylaşımını güçlendirecek ve hızlandıracak, kolay erişilebilen, geniş katılımlı bir tartışma ortamı sağlamak ve bunları yayma olanağı yaratmak,

• Türkiye'nin toplumsal ve ekonomik kalkınmasını yakından ilgilendiren jeolojiye ilişkin sorunların daha etkin bir şekilde çözüme kavuşturulması açısından büyük önem taşıyan kurumlararası işbirliğinin başlatılmasına ve geliştirilmesine katkıda bulunmak,

• Türkçe'nin Jeoloji Mühendisliği alanında bilim dili olarak geliştirilmesini ve yabancı sözcüklerden arındırılmasını özendirmek amaçlarına sahiptir.

KAPSAM VE NİTELİK

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ, ulusal ve uluslararası platformlarda, yerbilimlerinin uygulamaya yönelik alanlarında çalışmalar yapan herkesin katkısına açıktır. Bu çerçevede;

- İnsanların yaşamını etkileyen jeolojik süreçler ile mühendislik yapıları ve bunlara ilişkin sorunlar ve çözümler
- Jeolojik kaynakların yönetimi ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi
- Doğal ve yapay kirleticiler ve ekosisteme etkileri
- Jeolojik anıtların korunması
- Jeolojik sorunların çözümüne katkıda bulunan arazi ve laboratuvar yöntemlerinin ve tekniklerinin geliştirilmesi

ile ilgili kuramsal ve uygulamalı çalışmaları kapsayan ürünler, Yayın Kurulu'nun değerlendirmesinden geçtikten sonra Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nde yayımlanır.

Jeolojinin uygulama alanlarına ilişkin her türlü çalışma Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nin yayın amaçlarına uygundur. Bununla birlikte, çalışmaya konu olan sorunun kullanılan teknik ne olursa olsun, bilimsel yöntemlerle ele alınması ve jeolojinin uygulama alanlarına ilişkin olması aranan temel nitelikler arasındadır. Çalışmanın daha önce Türkçe yayımlanmamış olması gerekmektedir. Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nde, yeni yapıyla beş tür yazı yayımlanacaktır:

- 1- ELEŞTİREL İNCELEME (Review Paper):** Editörün daveti üzerine veya bilgisi dahilinde hazırlanan, Jeoloji Mühendisliği'nin herhangi bir alanında halen kullanılmakta olan teknik, yöntem ve yaklaşımları günümüz teknolojik gelişmeleri ve kendi deneyimleri ışığında inceleyen, bu açıdan öneriler geliştiren yazıdır. Yazı uzunluğu konuya bağlı olarak değişebilir. Yayın Kurulu incelemesi zorunluluğu yoktur.
- 2- ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article):** Özgün bir çalışmanın sunulduğu yazıdır. Kuramsal temel, yeterli miktar ve nitelikte veriye dayalı bulgu ve sonuçların ayrıntılarıyla

değerlendirildiği bölümleri içermelidir. Yazının toplam uzunluğu 6000 sözcük eşdeğerini (10 JMD sayfası) aşmamalıdır. En az iki Yayın Kurulu üyesi tarafından incelendikten sonra yayımlanır.

- 3- TEKNİK NOT (Technical Note):** Herhangi bir süreci veya tekniği, kuramsal temel, yeterli veri ve ayrıntılı değerlendirmeye dayanmadan sunan ve amacı, bu süreci veya teknikleri kullanabilecek yerbilimcilere duyurmak olan özgün yazıdır. Yazının uzunluğu 5000 sözcük eşdeğerini (5 JMD sayfası) aşmamalıdır. En az iki Yayın Kurulu üyesi tarafından incelendikten sonra yayımlanır.
- 4- ARAŞTIRMA NOTU (Research Note):** Henüz tamamlanmamış, eksik veri ve bulgularla yüzeysel değerlendirmelere dayalı, kendi içinde tutarlı, özgün, deneysel, uygulamalı veya kuramsal araştırmaların önsonuçlarının veya bulgularının sunulduğu yazıdır. Amaç, okuyucuya güncel bir konuya ilişkin bir çalışmanın ön bulgu ve sonuçlarını duyurarak konu üzerinde tartışma ortamı yaratmak, konunun gelişmesine diğer araştırmacıların katkılarını sağlamaktır. Yazı uzunluğu 5000 sözcük eşdeğerini (5 JMD sayfası) aşmamalıdır. En az iki Yayın Kurulu üyesi tarafından incelendikten sonra yayımlanır.
- 5- GÖRÜŞ-YORUM ve YANITLAR (View, Comment and Reply):** Dergide yayımlanan yazılar hakkında her türlü görüş, yorum ve bunlara ilişkin yanıtları içerir. Editörün uygun gördüğü uzunlukta yayımlanır.

YAZILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAYINA KABUL İLKELERİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ Editörlüğü'ne 2 satır aralığında 12 punto harflerle yazılmış ve 1 nüsha halinde *.doc veya *.docx formatında hazırlanarak e-posta ile gönderilen yazılar, öncelikle içerik, sunum, yayım kuralları, vd. yönlerden Editörlük tarafından incelenir ve daha sonra değerlendirilmek üzere en az iki Yayın Kurulu üyesine ve/veya Kurul dışından seçilecek uzmanlara gönderilir. Yayın Kurulu üyelerinden gelecek görüşler doğrultusunda yazının doğrudan, az veya önemli ölçüde düzeltilmesi koşuluyla yayımlanmasına veya reddine Editörce karar verilir ve sonuç yazarlara bildirilir.

Yayın Kurulu üyelerinin birbiriyle çelişen görüş bildirmeleri durumunda, Editör'ün bir karara varabilmesi için yazı, üçüncü bir Yayın Kurulu üyesine veya yazı konusundaki uzmana gönderilir. Yayın Kurulu üyeleri gerekli görürlerse yazıları düzeltilmiş haliyle tekrar görüp değerlendirebilirler.

Yazarlar, Yayın Kurulu üyelerinin ve Editör'ün yaptığı eleştiri, öneri ve düzeltmeler arasında katılmadıkları hususlar olduğunda bunları ayrı bir sayfada gerekçeleriyle birlikte açıklamalıdır.

Gönderilen yazılar, JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nde yayımlansın veya yayımlanmasın yazarlara iade edilmez.

YAZIM DİLİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nde yayın dili olarak "Türkçe" ve "İngilizce" kullanılmaktadır. Derginin oldukça geniş bir yurt dışı aboneliği ve sürümü olduğu için, Türkçe makalelerin, kabulden sonra "Genişletilmiş bir İngilizce Özeti'nin yazılması gerekmektedir. Dergide; ayrıca yazıların başlıkları, özetleri ve tüm çizelgeler ile şekillerin açıklamaları Türkçe ve İngilizce olarak iki dilde birlikte verilmelidir.

YAZIM KURALLARI

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nde yayımlanması kabul edilen yazıların basım öncesi dizgi işlemleri Editörlükçe yazarlara gönderilecek olan "**Makale Yazım Formatı**"na göre yazarlar tarafından yapılır. Zaman tasarrufu, ekonomiklik ve yazıların son şeklinin yazarlar tarafından da kontrolünü sağlamak açısından tercih edilen bu yöntemde, yazarlar yazılarını baskıya girecek şekilde bilgisayarda formata uygun bir şekilde dize ederler ve bırakılan boşluklara da şekil ve çizelgeleri yerleştirerek (camera-ready uygulamasına benzer şekilde) basım aşamasına getirerek Editörlüğe gönderirler.

Metin Bölümü

- 1- **Metin:** A4 boyutunda (29.7 x 21 cm) kağıtların üzerine bilgisayarda, 1.5 satır aralıklı, 10 punto ve Times New Roman yazı karakteri ile yazılmalıdır. Sayfa kenarlarında 3'er cm boşluk bırakılmalı ve sayfalar numaralandırılmalıdır.
- 2- **Başlık:** konuyu en iyi şekilde belirtecek ve 12 kelimeye geçmeyecek şekilde kısa seçilmeli ve Türkçe başlığın (tamamı büyük harflerle ve koyu yazılmış) yanısıra, İngilizcesi (İtalik ve normal büyük harflerle) de yazılmalıdır. Eğer yazı İngilizce yazılmış ise, önce İngilizce sonra Türkçe başlık verilmelidir.
- 3- **Öz:** yazının başlangıcında 200 kelimeye geçmeyecek şekilde hazırlanmış Öz/Abstract (Türkçe ve İngilizce) bulunmalıdır. Bu bölüm, yayının diğer bölümlerinden ayrı olarak yayımlanabilecek düzende yazılmış, yazının tümünü en kısa, ancak öz biçimde yansıtır nitelikte (özellikle çalışmanın amacını ve sonuçlarını yansıtarak) olmalıdır. Yazı Türkçe yazılmışsa Abstract'ın, İngilizce yazılmışsa Öz'ün başlığı ve metin kısmı italik karakterle yazılmalıdır. Ayrıca, Öz ve Abstract bölümlerinin altında bir satır boşluk bırakılarak **Anahtar Kelimeler** ve **Key Words** (en az 2, en çok 6 kelime alfabetik sıraya göre) verilmelidir. Eğer yazı İngilizce hazırlanmış ise, önce Abstract sonra Öz verilmelidir.
- 4- Yazının genel olarak aşağıda belirtilen düzene göre sunulmasına özen gösterilmelidir:
 - a) Başlık (Türkçe ve İngilizce)
 - b) Yazar ad(lar)ı ve adres(ler)i (yazar adları koyu karakterle ve soyadları büyük harflerle, adresler normal italik karakterlerle)
 - c) Öz (anahtar kelimeler eklenerek)
 - d) Abstract (key words eklenerek)
 - e) Giriş (amaç, kapsam, çalışma yöntemleri, vd.)
 - f) Metin bölümü (yöntemler, çalışılan malzeme, saha tanımlamaları, vd.)
 - g) Tartışmalar
 - h) Sonuçlar ve Öneriler
 - i) Katkı belirtme (gerekliyse)
 - j) Kaynaklar

- 5- Metin içinde ana bölüm başlıkları dışında en fazla üç alt başlık oluşturulmalı ve başlıklara numara verilmemelidir. Bunların yazım şekli aşağıdaki gibi olmalıdır:

ÖZ

ABSTRACT

GİRİŞ

ANA BAŞLIK

Birinci Derece Alt Başlık

İkinci derece alt başlık

Üçüncü derece alt başlık

TARTIŞMALAR

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KATKI BELİRTME

KAYNAKLAR

- 6- Metrik sistem veya SI birimleri (kPa, kN/m³ vb.) kullanılmalıdır.
- 7- Gerek metin içinde ve çizelgelerde, gerekse şekillerde rakamların ondalık bölümlerinin ayrılması için nokta kullanılmalıdır (3.1 gibi).

Kaynaklar

- a) Metin içinde kaynaklara değinme yapılırken aşağıdaki örneklerde olduğu gibi, bibliyografya araştırıcı soyadı ve tarih sırasıyla verilir.
....Ford (1986) tarafından....
....bazı araştırmacılar (Williams, 1987; Gunn, 1990; Saraç ve Tarcan, 1995)

- b) Birden fazla sayıda yazarlı yayınlara metin içinde değinilirken ilk soyadı belirtilmeli, diğer yazarlar için vd. ibaresi kullanılmamalıdır.
....Doyuran vd. (1995)....
....Smart vd.(1971)....
- c) Ulaşılamayan bir yayına metin içinde değinme yapılırken bu kaynakla birlikte alıntının yapıldığı kaynak da aşağıdaki şekilde belirtilmelidir. Ancak Kaynaklar Dizisinde sadece alıntının yapıldığı kaynak belirtilmelidir.
....Dreybrodt(1981; Schuster and White, 1971)....
- d) Kişisel görüşmelere metin içinde soyadı ve tarih belirtilerek değinilmeli, ayrıca "Kaynaklar Dizini"nde de yer verilmelidir. (Soyadı, Adı, Tarih. Kişisel görüşme. Görüşülen kişinin/kişilerin adres(ler)i)
- e) Kaynaklar, yazar soyadları esas alınarak alfabetik sırayla verilmeli ve metin içinde değinilen tüm kaynaklar, "Kaynaklar Dizini"nde eksiksiz olarak belirtilmelidir. Kaynakların yazılmasında aşağıdaki örneklerde belirtilen düzen esas alınmalıdır:

Sürelî yayınlar ve bildiriler

Yarbaşı, N., Kalkan, E., 2009. Geotechnical mapping for alluvial fan deposits controlled by active faults: a case study in the Erzurum, NE Turkey. Environmental Geology, 58 (4), 701-714.

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Makalenin Başlığı. Sürelî Yayının Adı (kısaltılmamış), Cilt No. (Sayı No.), Sayfa No.]

Altındağ, R., Şengün, N., Güney, A., Mutlutürk, M., Karagüzel, R., Onargan, T., 2006. The integrity loss of physicommechanical properties of building stones when subjected to recurrent cycles of freeze-thaw (F-T) process. Fracture and Failure of Natural Building Stones-Applications in the Restoration of Ancient Monuments (Editors: Stavros and Kourkoulis), 363-372.

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Bildirinin Başlığı. Sempozyum veya Kongrenin Adı, Editörler, Basımevi, Cilt No. (birden fazla ciltten oluşuyorsa), Düzenlendiği Yerin Adı, Sayfa No.]

Kitaplar

Palmer, C.M., 1996. Principles of Contaminant Hydrogeology (2nd Edition). Lewis Publishers, New York, 235 p.

Ketin, İ., Canitez, N., 1972. Yapısal Jeoloji. İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu, Sayı:869,520 s.

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Kitabın Adı (ilk harfleri büyük). Yayınevi, Basıldığı Şehrin Adı, Sayfa Sayısı.]

Raporlar ve Tezler

Demirok, Y., 1978. Muğla-Yatağan linyit sahaları jeoloji ve rezerv ön raporu. MTA Derleme No:6234, 17 s (yayımlanmamış).

Akın, M., 2008. Eskipazar (Karabük) travertenlerinin bozunmasının araştırılması. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Doktora Tezi, 263 s (yayımlanmamış).

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Raporun veya Tezin Başlığı. Kuruluşun veya Üniversitenin Adı, Arşiv No. (varsın), Sayfa Sayısı (yayımlanıp, yayımlanmadığı)]

NOT: Tüm kaynaklarda ilk satırdan sonraki satırlar 0.7 cm içeriden başlanarak yazılmalıdır.

Eşitlikler ve Formüller

- a) Eşitlikler elle yazılmamalı ve bilgisayardan yararlanılmalıdır. Eşitliklerde, yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelere yer verilmesine özen gösterilmelidir.
- b) Her eşitliğe sırayla numara verilmeli, numaralar parantez içinde eşitliğin hizasında ve sayfanın sağ kenarında belirtilmelidir.
- c) Eşitliklerde kullanılabilecek alt ve üst indisler belirgin şekilde ve daha küçük karakterlerle yazılmalıdır (I_d , x^2 gibi).
- d) Eşitliklerdeki sembollerin açıklamaları eşitliğin hemen altındaki ilk paragrafta verilmelidir.
- e) Karekök işareti yerine parantezle birlikte üst indis olarak 0.5 kullanılmalıdır ($\sigma_{\text{maks}} = \sigma_c^{0.5}$ gibi).

- f) Bölme işareti olarak yatay çizgi yerine "/" simgesi kullanılmalıdır. Çarpma işareti olarak genellikle herhangi bir işaret kullanılmamalı, ancak zorunlu hallerde "*" işareti tercih edilmelidir ($y=5 \cdot 10^{-3}$ gibi).
- g) Kimyasal formüllerde iyonların gösterilmesi amacıyla Ca^{++} veya CO_3^{--} gibi ifadeler yerine Ca^{+2} ve CO_3^{-2} kullanılmalıdır.
- h) İzotop numaraları, "¹⁸O" şeklinde verilmelidir.

Çizelgeler

- a) Yazarlar, derginin boyutlarını dikkate alarak, çizelgeleri sınırlamalı ve gerekiyorsa metinde kullanılanlara oranla daha küçük karakterlerle yazmalıdır. Bu amaçla çizelgeler tek sütuna (7.5 cm) veya çift sütuna (16 cm) yerleştirilebilecek şekilde hazırlanmalıdır. Tam sayfaya yerleştirilmesi zorunlu olan büyük çizelgelerin en fazla (16 x 21) cm boyutlarında olması gerekir. Bu boyutlardan daha büyük ve katlanacak çizelgeler kabul edilmez.
- b) Çizelgelerin hemen altında gerekli durumlarda açıklayıcı dip notlara veya kısaltmalara ilişkin açıklamalara yer verilmelidir.
- c) Çizelgelerin başlıkları, kısa ve öz olarak seçilmeli, hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harfle) hem de İngilizce (ilk harfi büyük diğerleri küçük İtalic harflerle) "Çizelgeler Dizini" başlığı altında ayrı bir sayfaya yazılmalıdır. İngilizce olarak hazırlanmış yazılarda önce İngilizce sonra Türkçe çizelge başlığı verilmelidir.
- d) Çizelgelerde kolonsal ayrımı gösteren düşey çizgiler yer almamalı, sadece çizelgenin üst ve alt sınırları ve gerek görülen diğer bölümleri için yatay çizgiler kullanılmalıdır.
- e) Her çizelge, sıralı olarak ayrı bir sayfada olmalı ve çizelge başlıkları çizelgenin üzerine yazılmalıdır.

Şekiller (Çizim, fotoğraf ve levhalar)

- a) Şekiller, uygun bir bilgisayar yazılımı kullanılarak hazırlanmalı, değerlendirmeyi kolaylaştıracak biçimde yüksek kalitede, metin sonunda verilmelidir. Ancak bu durum, elektronik dosya boyutunu fazla büyütmemelidir.
- b) Tüm çizim ve fotoğraflar şekil olarak değerlendirilip numaralandırılmalıdır. Şekil altı yazıları "Şekiller Dizini" başlığı altında hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harflerle) hem de İngilizce (ilk harfi büyük diğerleri küçük İtalic harflerle) ayrı bir sayfada verilmelidir. Yazı İngilizce olarak hazırlanmışsa, şekil altı yazıları önce İngilizce sonra Türkçe verilmelidir.
- c) Her şekil, ayrı bir sayfada yer alacak biçimde sıraya dizilerek "Şekiller Dizini" sayfasıyla birlikte çizelgelerden sonra sunulmalıdır.
- d) Şekiller, ya tek sütuna (7.5 cm), ya da çift sütuna (en fazla 16 cm) yerleştirilebilecek boyutta hazırlanmalıdır. Tam sayfaya yerleştirilmesi zorunluluğu olan büyük şekillerin, şekil altı açıklamalarına da yer kalacak biçimde, en fazla (16 x 21 cm) boyutlarında olması gerekir. Belirtilen bu boyutlardan daha büyük ve katlanacak boyuttaki şekiller kabul edilmez.
- e) Harita, kesit ve planlarda sayısal ölçek yerine çubuk (bar) türü ölçek kullanılmalıdır.
- f) Şekiller yukarıda belirtilen boyutlarda hazırlanırken, şekil üzerindeki açıklamaların (karakterlerin) okunabilir boyutlarda olmasına özen gösterilmelidir.
- g) Fotoğraflar, şekiller için yukarıda belirtilen boyutlarda basılmış olmalıdır. Fotoğrafların üzerinde gösterilecek olan simgeler okunaklı olmalıdır. Özellikle koyu tonların egemen olduğu bölgelerde simgelerin beyaz renk ile gösterilmesi tavsiye edilir. Yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelerin kullanılmasına özen gösterilmelidir.

Ek Açıklamalar ve Dipnotlar

- a) Ana metnin içine alındığında okuyucunun dikkatinin dağılmasına yol açabilecek, hatırlatma niteliğindeki bilgiler, yazının sonundaki "Ek Açıklamalar" başlığı altına konulabilir (İstatistik bilgilerin verilisinde, formüllerin çıkarımının gösterilmesinde, bilgisayar programlarının verilmesinde, vb. konularda bu yol izlenebilir).
- b) Dipnotlar, yerleştirme ve yazılma açısından güçlükler neden olduğundan, çok gerekli durumlar dışında kullanılmamalıdır. Eğer dipnot kullanılırsa, yıldız (*) işareti ile gösterilmeli ve mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Dipnotta eğer değinme yapılırsa bibliyografik bilgiler dipnotta değil, "Kaynaklar Dizini"nde verilmelidir.

YAZILARIN GÖNDERİLMESİ

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nin "Yayın Amaçları ve Kuralları, Yayına Kabul İlkeleri"nde belirtilen ilkelere uygun olarak elektronik ortamda hazırlanmış yazılar, e-posta ile gönderilmelidir.

E-posta adresi: topal@metu.edu.tr

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ EDITÖRLÜĞÜ

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası

Hatay Sokak No: 21 Kocatepe/Ankara

Tel : (312) 432 30 85 / (312) 434 36 01

Faks : (312) 434 23 88

E-posta : topal@metu.edu.tr

AYRI BASKILAR

Dergide yayımlanması kabul edilen yazıların ayrı baskısından on adet yazarına veya birden fazla yazarlı yazılarda yayım için başvuruyu yapan yazara olanaklar çerçevesinde ücretsiz olarak gönderilir. Ondan fazla ayrı baskı talebinde bulunulması halinde, Jeoloji Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ücret, her ayrı baskı için yazarlar tarafından ödenir.

