

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

- 117- Research Article / *Araştırma Makalesi*
İbrahim A. AL-AKHLY, Abubaker A. AL-SAKKAF
Assessment of Engineering Properties of Al-Haweri Scoria, NW Sana'a, Yemen
- 133- Araştırma Makalesi / *Research Article*
İsmail DİNÇER, Mutluhan AKIN, Ahmet ORHAN, Can DURU
Kapadokya Bölgesi'ndeki Kaya Oyma Depoların Tasarım Ölçütlerinin Sayısal Yöntemlerle Değerlendirilmesi
Evaluation of Design Criteria of Rock-Hewn Storages in Cappadocia Region by Numerical Analyses
- 159- Araştırma Makalesi / *Research Article*
Rıza SOYPAK, Ali KAYABAŞI
Güdül (Ankara) Yöresi Zeminlerinin Şişme Özelliklerinin Değerlendirilmesi
Evaluation of Swelling Properties of Soils in Güdül (Ankara) Area
- 183- Araştırma Makalesi / *Research Article*
Ali ÖZVAN, Ercan İNAN
Mermerlerin Aşınma Direncini Belirlemek İçin Kullanılan Geniş Diskli Aşındırma Testi (GDA) İçin Bazı Yorumlar ve Öneriler
Some Comments and Suggestions for Wide Wheel Abrasion Test Used to Determine the Abrasion Resistance of Marbles
- 197- Araştırma Makalesi / *Research Article*
Anıl KÜÇÜKSÜMBÜL, Toygar AKAR, Gültekin TARCAN
Bafa Gölü'nün Hidrokimyasal ve Hidrojeolojik İncelenmesi: Sürdürülebilir Su Kaynak Yönetimi
Hydrogeological and Hydrochemical Investigations of Lake Bafa: Sustainable Water Resource Management
- 225- Araştırma Makalesi / *Research Article*
Doğuş BOZ, Ali YILMAZ
Erzincan Ovası ve Dolayının Çevre Jeolojisi ve Planlanmasına Bir Yaklaşım
An Approach to the Planning and Environmental Geology of Erzincan Plain and its Surroundings
- 255- Teknik Not / *Technical Note*
Emrah DİRMİT
Değişken Debili (Kademeli) ve Sabit Debili Pompa Testi Planlaması, Analitik ve Sayısal Analizlerinin Değerlendirilmesi
Step Test and Constant Rate Pump Test Planning, Evaluation of Analytical and Numerical Analysis



EDİTÖR / EDITOR

Dr. 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

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

Makale Gönderim Adresi:

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası
PK. 464 Yenışehir, 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 2020
Baskı Adedi : 500

Yayın Kurulu / Editorial Board

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

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

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

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

Hüseyin ALAN	Başkan / President
Yüksel METİN	İkinci Başkan / Vice President
Faruk İLGÜN	Yazman / Secretary
D. Malik BAKIR	Sayman / Treasurer
M. Emre KIBRIS	Mesleki Uygulamalar Üyesi / Member of Professional Activities
Gonca ŞAHİN	Sosyal İlişkiler Üyesi / Member of Social Affairs
Buket YARARBAŞ ECEMİŞ	Yayın Üyesi / Member of Publication

Jeoloji Mühendisliği Dergisi JMO yayını olup para ile satılmaz.



Jeoloji Mühendisliği Dergisi / Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 44

Sayı - Number 2

Aralık / December 2020

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

- 117- Research Article / *Araştırma Makalesi*
İbrahim A. AL-AKHALY, Abubaker A. AL-SAKKAF
Assessment of Engineering Properties of Al-Haweri Scoria, NW Sana'a, Yemen
- 133- *Araştırma Makalesi / Research Article*
İsmail DİNÇER, Mutluhan AKIN, Ahmet ORHAN, Can DURU
Kapadokya Bölgesi'ndeki Kaya Oyma Depoların Tasarım Ölçütlerinin Sayısal Yöntemlerle Değerlendirilmesi
Evaluation of Design Criteria of Rock-Hewn Storages in Cappadocia Region by Numerical Analyses
- 159- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Rıza SOYPAK, Ali KAYABAŞI
Güdül (Ankara) Yöresi Zeminlerinin Şişme Özelliklerinin Değerlendirilmesi
Evaluation of Swelling Properties of Soils in Güdül (Ankara) Area
- 183- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Ali ÖZVAN, Ercan İNAN
Mermerlerin Aşınma Direncini Belirlemek İçin Kullanılan Geniş Diskli Aşındırma Testi (GDA) İçin Bazı Yorumlar ve Öneriler
Some Comments and Suggestions for Wide Wheel Abrasion Test Used to Determine the Abrasion Resistance of Marbles
- 197- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Anıl KÜÇÜKSÜMBÜL, Toygar AKAR, Gültekin TARCAN
Bafa Gölü'nün Hidrokimyasal ve Hidrojeolojik İncelenmesi: Sürdürülebilir Su Kaynak Yönetimi
Hydrogeological and Hydrochemical Investigations of Lake Bafa: Sustainable Water Resource Management
- 225- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Doğuş BOZ, Ali YILMAZ
Erzincan Ovası ve Dolayının Çevre Jeolojisi ve Planlanmasına Bir Yaklaşım
An Approach to the Planning and Environmental Geology of Erzincan Plain and its Surroundings
- 255- *Teknik Not / Technical Note*
Emrah DİRMİT
Değişken Debili (Kademeli) ve Sabit Debili Pompa Testi Planlaması, Analitik ve Sayısal Analizlerinin Değerlendirilmesi
Step Test and Constant Rate Pump Test Planning, Evaluation of Analytical and Numerical Analysis



Research Article / Araştırma Makalesi

Assessment of Engineering Properties of Al-Haweri Scoria, NW Sana'a, Yemen

Ibrahim A. Al-Akhaly¹ , Abubaker A. Al-Sakkaf² 

¹ Sana'a University, Faculty of Petroleum and Natural Resources, Sana'a, Yemen

² Sana'a University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Sana'a, Yemen

Geliş (Received): 23 Aralık (December) 2019, Düzeltme (Revised): 2 Mart (March) 2020, Kabul (Accepted): 17 Mart (March) 2020

ABSTRACT

Yemen has an appreciable amount of scoria aggregate, but a very small proportion is used as cement additions by local cement factories in blended Portland cement production and very rarely as aggregates into the production of lightweight blocks. Scoria aggregates are widespread in and around the volcanic cones present in Sana'a-Amran volcanic field. This paper presents the results of evaluation of engineering properties of natural scoria, collected from Al-Haweri volcanic cone, NW Sana'a, Yemen as lightweight aggregate. Chemical composition and petrographical characteristics of scoria were determined. The physical properties of the scoria aggregate such as flakiness and elongation indices, specific gravity, water absorption, unit weight, clay lumps and materials finer than 75µm gave acceptable results, but the gradation indicated it would need to be processed before use in a mix. The porosity is high, 60.79%. The Los Angeles abrasion and the aggregate crushing values are higher than the limits of ASTM and BS specification, but the aggregate impact value is close to the upper limits of BS specification. The soundness is within the ASTM specification limits. Therefore, it can be concluded that scoria aggregates can be used to produce structural concrete and masonry blocks with a relatively low density. The scoria aggregates satisfied the requirements of lightweight aggregate for structural concrete and masonry blocks purposes.

Keywords: Al-Haweri, Light Weight Aggregate, Scoria Aggregate, Sana'a, Yemen

INTRODUCTION

Concrete is a composite material that is typically made by combining cement, aggregates, water and often, mineral admixtures in appropriate proportions (Nawy, 2008). It is an essential material used in construction, in which 65% of its volume is occupied by coarse aggregates (Winsley and Muthukannan, 2018). Therefore, the properties of aggregate including shape, texture, size, moisture content, specific gravity, any intact chemicals, are significant for the properties of concrete.

Lightweight concrete is defined as the concrete of substantially lower unit weight than that made of gravel or normal weight crushed aggregates. The dry densities are normally in the range of 800 to 2000 kg/m³ (Schlaich and Zareef, 2008). The lightweight concrete has its obvious advantages of high strength/weight ratio, good tensile strength, low coefficient of thermal expansion, and superior heat and sound insulation characteristic due to air voids in lightweight aggregates (Mouli and Khelafi, 2008). Furthermore, the reduction in dead weight of a construction could result in a

decrease in cross-section of structural members and steel reinforcement (Hossain, 2006; Bozkurt and Yazicioglu, 2015). Lightweight concrete is favourable over normal weight concrete in earthquake prone areas as reducing the dead load of a structure, thus, to reduce the risk of earthquake damages, because the earthquake forces are proportional to the mass of those structures (Yasar et al., 2003; Kilic et al., 2003). The reduction in self-weight will reduce reinforcements (Topcu, 1997) transportation and handling costs. Because of having a large number of voids in the scoria aggregate, possesses a relatively higher thermal insulating efficiency than the normal weight concrete (Al-Jabri et al., 2008), which satisfying ASTM C-332 requirements. The lightness of scoria is due to porousness of the material that is highly sensitive to water content and high water absorption compared to basalt crush rock aggregate. Hence the water-binder ratio in a typical normal concrete mix design is required some adjustments to accommodate this increase in water absorption. However, the porous nature of the aggregate enhances interlocking sites for the cement paste to infiltrate and to form dense uniform interfacial zones between aggregate (Lo and Cui, 2004).

Scoria can be utilized in several industrial applications including the manufacturing of lightweight concrete, as a source of pozzolan to manufacture Portland-pozzolan cement additives, as a heat insulating material, low cost fillers in paint, filter materials, absorbents, architectural applications (Moufti et al., 2000), producing geopolymer mortar (Kamseu et al., 2009; Lemougna et al., 2011; Tchakouté et al., 2015) as a sand in Portland cement mortar (Tchamdjou, et al., 2017; Warati et al., 2019) and cement additives (Al-Anweh, 2010; Al-Akhaly et al., 2018). Scoria, as a cement additive in Portland cement, was found to be effective in improving

the property of the cement paste, particularly in controlling the alkali-silica reaction (Hossain, 2006).

Scoria is abundant in various parts of the world such as Turkey (Hossain, 2005; Ozvan et al., 2012), Algeria (Mouli and Khelafi, 2008), Papua New Guinea (Demirdag and Gunduz, 2008; Hossain et al., 2011; Hossain et al., 2015), Syria (Al-Swaidani et al., 2016; Al-Swaidani, 2017), Saudi Arabia (Moufti et al., 1999; Moufti et al., 2000; Sabtan and Shehata, 2000; Alhozaimy et al., 2015), Cameroon (Lemougna et al., 2011; Tchakouté et al., 2015; Juimo et al., 2016; Tchamdjou, et al., 2017), Indonesia (Suseno et al., 2017), Chile (Amigo et al., 2013; González-Maurel et al., 2019), Rwanda (Dieu et al., 2016), Tanzania (Mrema and Mboya, 2013), Ethiopia (Warati et al., 2019) and Mexico (Tchamabé et al., 2020). Scoria is also abundant in Yemen (Al-Sabri, 2009; Al-Anweh, 2010; Al Naaymi, 2015; Al-Akhaly et al., 2018), where more than 9,000 km² of the country is covered with Quaternary volcanic rocks (Beydoun et al., 1998).

In Yemen, concrete production with conventional building materials is widely used. These types of materials are costly. Structural lightweight concrete is receiving more attention now since it offers the required concrete density, cost saving and reduction of negative environmental effects. Scoria aggregate has highly porous structure and low density. Hence, it can reduce concrete dead load. Currently, in Yemen scoria is used in architectural applications, cement additives, lightweight masonry blocks and road construction as a sub-base material. Therefore, there are several quarries operating on scoria aggregate in NW Sana'a where the Sana'a-Amran volcanic field covers a total area of some 1200 km². Although scoria has been used

in the world industry for a long time, it has only had importance in the Yemeni industry for the last 6 years. However, Yemen has an important potential reserve of 1.8 billion m³ (YGSMRB, 2019) with a very small proportion used as a cement addition by local cement factories in blended cement production (e.g. Amran Cement Plant) and as lightweight aggregates. The ability to use scoria in manufacture of cement or lightweight concrete can be an important economic asset.

In Yemen, many geological studies have described the volcanic deposits, but only a few of them have described scoria as a construction material and assessed it for manufacturing lightweight concrete such as Barahim (2009). Al-Sabri (2009) studied the geology and economic potentiality of scoria deposits in Dhamar-Rada volcanic field. He suggested that scoria deposits are suitable as a lightweight aggregate and cement additive. Al Naaymi (2015) assessment the scoria deposits in Dhamar-Rada volcanic field as pozzolanic materials and lightweight aggregates for producing lightweight concrete and insulation concrete. Two studies were showing the possibility of using scoria in the production of blended cements in Yemen (Al-Anweh, 2010; Al-Akhaly et al., 2018).

The estimated reserve of scoria in Sana'a-Amran volcanic field is about 411 million m³ (YGSMRB, 2019). To our knowledge, no publishes studies and scientific information are available about the engineering properties of scoria in this volcanic field. Hence, this information would help at present or in the future in other engineering projects which may be used this aggregate.

The current study aims to determine the engineering properties of Al-Haweri scoria, NW Sana'a, Yemen as coarse aggregate.

MATERIALS AND METHODS

Sample Preparation

More than 500 kg of bulk sample was collected from scoria pyroclastic deposits in the Al-Haweri volcanic cone, about 16 km NW of Sana'a, Yemen (Figure 1). Three sub-samples were selected from the bulk sample to represent its apparent lithological varieties. These sub-samples were prepared for thin section investigation. Cutting and polishing processes were performed using an oil system. The glue that hardens under UV light was used. To reduce the amount of sample, sampling was performed using the cone and quartering method and riffles, since sampling must have mineralogical, physical and chemical homogeneity. The sample was crushed and ground using a laboratory dodges jaw crusher, rod mill and ball mill to reduce its particle size to sieve 74 µm for mineralogical and chemical analyses, which were conducted in Amran Cement Plant (ACP) (Amran/Yemen).

Chemical and Mineral Analysis

Chemical analysis of three samples of scoria was carried out of by X-ray fluorescence (XRF) of Quality Laboratory of ACP. The preparation of powder pellets for analysis included crushing the samples using a Jaw Crusher, then grinding them to a fine powder using a Disk Vibration Mill. In this stage of sample preparation, about 6-7 ml of hexane (C₆H₁₄) was added to the crushed sample to decrease the temperature during the grinding.

To investigate petrographical characteristics of the sample, thin sections of three representative samples were prepared and studied using the LEICA Polarizing Microscope. These thin sections were carried out in the Geology Department, Faculty of Science, Cairo University, Cairo, Egypt.

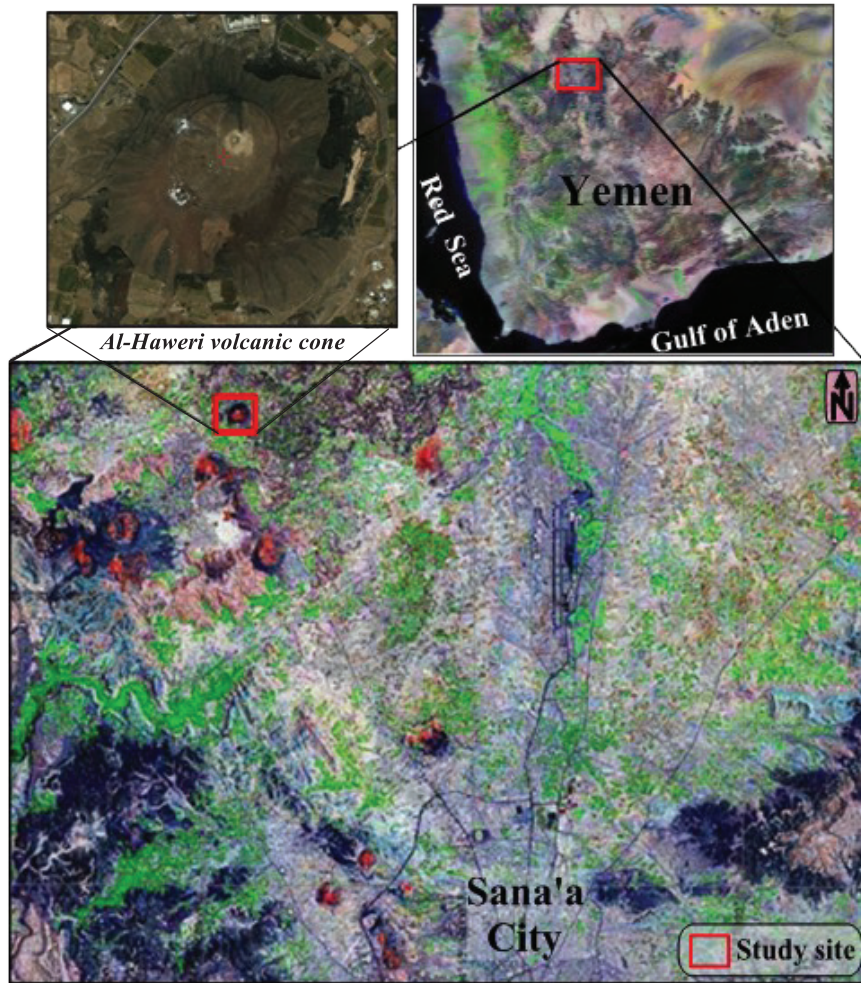


Figure 1. Satellite image showing the location of Al-Haweri volcanic cone.

RESULTS AND DISCUSSION

Scoria Composition

Al-Haweri scoria is one of the natural pozzolan volcanic cones in Sanaá-Amran volcanic field that formed during Quaternary explosive eruptions (Figure 1). It has a highly porous structure that was formed by dissolved gases precipitated during cooling as the lava hurtled through the air. Therefore, scoria consists of pyroclastic ejects, of irregular morphology, and has the basic composition of basalt. It formed

of vesicular fine to coarse fragments, reddish or black in color and light in weight.

Petrographic investigation shows that the scoria is mainly composed of volcanic glass with phenocrystals of olivine in the matrix and has a hyalopilitic-porphyrific and vitrophyric-porphyrific textures with vesicles in the matrix (Figure 2). The thin section studies show that scoria is mainly composed of volcanic glass (amorphous phase). Hence, it well suited as raw materials for the production of aggregates (Juimo et al., 2016).

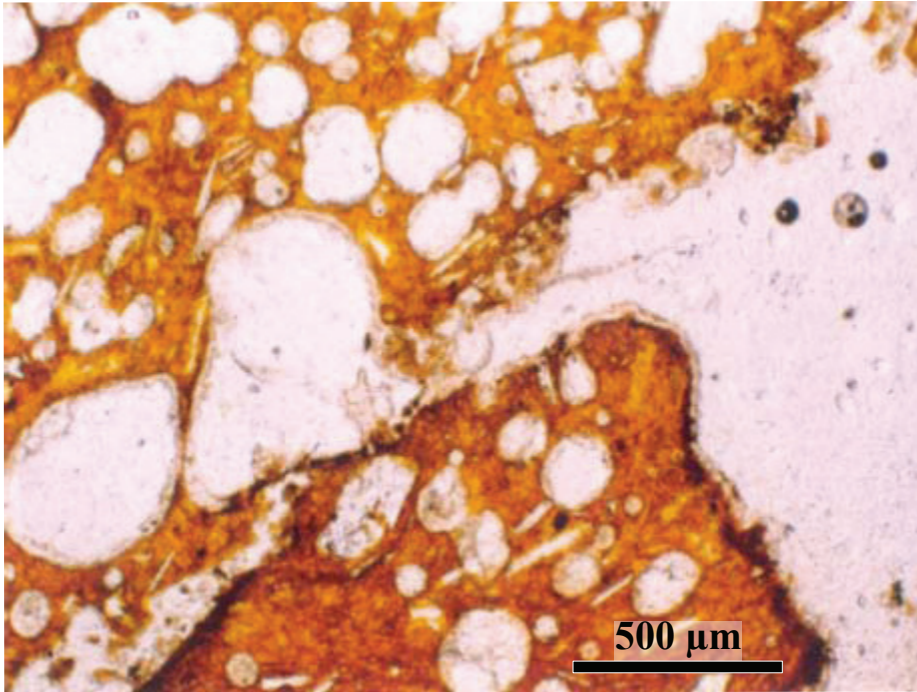


Figure 2. Microphotographs of scoria showing connected and isolated vesicles in the reddish brown glassy groundmass.

Table 1. Chemical composition of scoria aggregate and comparing it with results of several researchers in five different countries.

Oxides (%) Sources	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₃	TiO ₂	LOI	Reference
Yemen	46.60	16.68	12.41	9.23	7.84	0.88	2.65	0.05	0.37	2.11	0.82	This study
Cameroon	47.30	14.83	13.09	8.17	6.68	1.12	3.22	n.a	n.a.	2.99	0.84	Billong et al., 2013
Papua New Guinea	47.50	14.00	3.50	6.50	5.00	5.00	n.a.	0.02	n.a.	n.a.	1.40	Hossain et al., 2015
Syria	46.52	13.00	11.40	10.10	9.11	0.77	2.14	0.27	n.a.	n.a.	2.58	Al-Swaidani, 2017
Ethiopia	52.53	15.49	11.00	10.11	4.40	<0.10	2.56	n.a.	0.17	0.88	0.85	Warati et al., 2019
Chile	46.40	18.50	12.90	6.50	3.00	1.10	3.50	n.a.	0.40	1.80	6.40	Amigo et al., 2013

n.a.: Not available.

The results of chemical analysis of the scoria aggregate are given in Table 1. The chemical composition of the scoria indicates that scoria is mainly composed of SiO₂ (46.60%), Al₂O₃ (16.68%) and Fe₂O₃ (12.41%), a composition that reflects the basic rock quality. The results of

the chemical composition of Al-Haweri scoria aggregates are in agreement with the other studies in different countries such as Cameroon, Papua New Guinea, Syria and Chile (Billong et al., 2013; Hossain et al., 2015; Al-Swaidani, 2017 and Amigo et al., 2013) (Table 1).

This composition is according with American Concrete Institute (ACI) standard on natural pozzolans (ACI, 2000). ASTM designation C-618 (2012) requires that for a material to be accepted as a natural pozzolan, the sum of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 should have a minimum value of 70%. Table 1 shows that, total results of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 is 75.69%, which is more than the practical conventional value of 70% in building industry standards (e.g. ASTM C-618, 2012). The rapid cooling of magma in the atmosphere during volcanic eruption is at the origin of the glassy phase in scoria aggregate. The glassy phase content of natural pozzolans is related to the content of SiO_2 and CaO in samples (Millet et al., 1977). When the difference between SiO_2 and CaO content is below 34%, pozzolans would not include the glassy phase. Al-Haweri scoria aggregates have a difference of 37%. This is a confirmation of the presence of the glassy phase in volcanic pozzolans studied. The presence of that glassy phase would play a major role in the reactivity of the scoria in the presence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and water to form pozzolanic binders (Billong et al., 2013).

Physical Properties of Coarse Scoria

Particle shape and surface texture

Particle shape and surface texture of scoria aggregate have been described based on visual examination according to ASTM D-3398-00 and BS 812: Part 1. Particle shape is angular and irregular and surface texture is rough honeycombed. Bonding between aggregate and cement paste depends on the surface of the aggregate. Since the rough surface requires more bonding than the smooth surface, the texture of the studied scoria aggregate complies with the requirement of ASTM and BS standard specifications.

Particle shape affects the performance of aggregate during construction and service. The surface texture of aggregates considerably influences the adhesion between aggregate and cement. In general, a rough surface texture gives good adhesion, whereas a glassy surface results in poor adhesion and the shape of aggregates is an important characteristic since it affects the workability of concrete.

Gradation

Grading of scoria aggregates was determined by using the procedure of ASTM C-136 to show how the grading of scoria might comply with the grading requirements for the lightweight aggregates for concrete. The results have been used to determine conformance for the particle size distribution with applicable specification requirements. The results of tests are shown in Figure 3. The gradation of Al-Haweri scoria aggregate is well graded and partly fit within the limits stated by the ASTM standards for lightweight aggregate for structural concrete (ASTM C-330), concrete masonry units (ASTM C-331) and insulating concrete (ASTM C-332). The scoria aggregate will need to be blended with the other scoria materials before being used in concrete to fit within the specified limits. The results of gradation were similar to those reported by Moufti et al. (1999) and Sabtan and Shehata (2000) in Saudi Arabia.

Grading of aggregates affects the compaction capacity, permeability and strength of concrete aggregate. It's one of the most important characteristics affecting the stability and workability properties of a mix. Particle shape and size distribution influence the water content necessary to obtain a mix of suitable resistance, and then by affecting the compressive strength, drying shrinkage and durability of the resulting concrete (Engidasew, 2013).

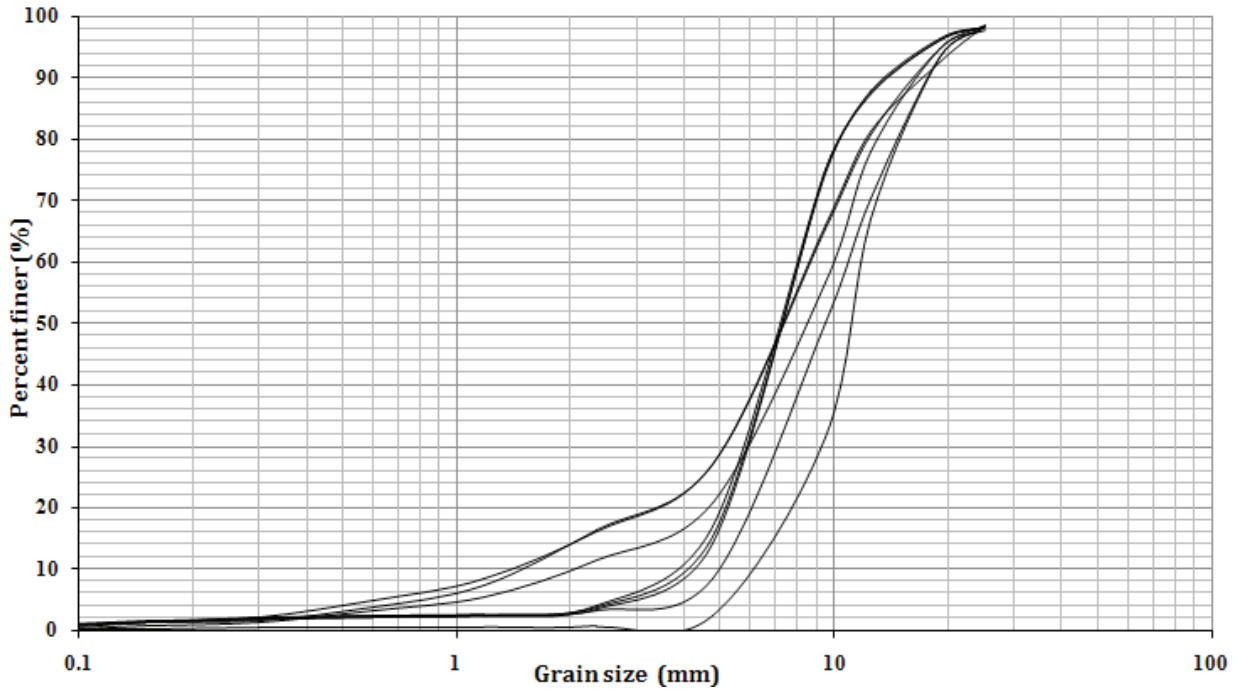


Figure 3. Sieve analysis data for scoria aggregates.

Flakiness and elongation indices

The flakiness and elongation indices were tested according to BS 812: Part 105 by separating the flaky and elongated aggregate particles by using a metal thickness gauge.

Flaky is a term used as a description for the material with small thickness; relative to the other two dimensions. A flaky particle is one in which the smallest dimension is a maximum of 0.6 times the mean sieve size. An elongated particle is one whose maximum dimension is greater than 1.8 times its mean dimension (BS 812: Part 105).

The flakiness index varies from 2.59 to 4.53 %, with an average of 3.68% and the elongation index varies from 5.86 to 6.52 %, with an average of 6.21% (Table 2). The flakiness and elongation indices comply the BS 812: Part 105

specifications as concrete aggregate. The results of flaky and elongation indices were lower than those reported by Juimo et al. (2016) in Cameroon.

The presences of flaky and elongated aggregate particles beyond specified limits increase the degradation of mixes and maybe broken during construction.

Specific gravity and water absorption

The specific gravity and water absorption were carried out according to ASTM C-127. The summary results of specific gravity are shown in Table 2. It is observed that the bulk specific gravity varies from 1.46 to 1.51, with an average of 1.48, and apparent specific gravity varies from 1.84 to 1.90, with an average of 1.86, which is

quite satisfactory. The results of bulk specific gravity were nearly similar to that reported by Sabtan and Shehata (2000) in Saudi Arabia and Juimo et al. (2016) in Cameroon and Suseno et al. (2017) in Indonesia and lower than to that reported by Demirdag and Gunduz (2008) in Turkey (Table 2).

The specific gravity of an aggregate is an important factor in the mix design calculation because it relates the weight of aggregate to its volume.

Water absorption represents the water contained in scoria aggregate in saturated surface dry condition. It varies from 12.10 to 15.90 %, with an average of 14.70 (Table 2). Water absorption should not exceed 2.5 % of normal aggregate (ASTM C-127), but can be up to 30 % for lightweight aggregate (FIB, 1983). The results of water absorption were nearly similar to that reported by other researches (Sabtan and Shehata, 2000; Suseno et al., 2017; Juimo et al., 2016) and lower than those reported by Demirdag and Gunduz (2008) (Table 2).

Porosity

The porosity (n) of the scoria aggregate was calculated using the following equation:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1)$$

where

$$e = \frac{G\gamma_w}{\gamma_{dry}} - 1 \quad (2)$$

G is the apparent specific gravity

γ_w is the density of water in g/cm^3

γ_{dry} is the dry density of scoria in g/cm^3

The calculated porosity values ranged between 59.78 and 61.26%, with an average of 60.79% (Table 2). These values are highly

compared with other lightweight aggregates except pumice aggregates. This means that Al-Haweri scoria aggregates have the largest pore volume; a lot pores unconnected with the outer surface and thus the lowest water absorption. Because of these unconnected pores, the water absorption is very low. Scoria aggregates have a larger pore volume than normal weight aggregates. Therefore, the rate of water absorption is likely to be higher than for normal aggregates.

The results of porosity were slightly similar to that reported by Demirdag and Gunduz (2008) and lower than to that reported by Sabtan and Shehata (2000), Juimo et al. (2016) and Suseno et al. (2017) (Table 2).

Unit weight

The unit weight of the scoria aggregate was performed according to ASTM C-29/C-29M. The average loose unit weight is 657 kg/m^3 , while the average compacted unit weight is 735 kg/m^3 (Table 2). These results within the requirement for lightweight aggregate for structural concrete (ASTM C-330), concrete masonry units (ASTM C-331) and insulating concrete (ASTM C-332).

The results of the loose unit weight were slightly lower than that reported by Sabtan and Shehata (2000) and Suseno et al. (2017) and slightly higher than to that reported by Juimo et al. (2016) and Demirdag and Gunduz (2008), while the results of the compacted unit weight were slightly lower than that reported by Sabtan and Shehata (2000) and Juimo et al. (2016) (Table 2).

Table 2. Some engineering properties of coarse scoria aggregates and comparing with different authors.

Engineering properties min.	This study			[1]	[2]	[3]	[4]	Standard (Acceptance limits)	
	Max.	Ave.		Saudi Arabia	Turkey	Cameroon	Indonesia		
Aggregate size range (mm)	4.75	25.4	-	4.75-19	4-8	5-18	4.75-19		
Flaky index (%)	2.59	4.53	3.68	-	-	21	-	< 25% [BS 812: Part 105]	
Elongation index (%)	5.86	6.52	6.21	-	-	12	-		
Specific gravity	Bulk	1.46	1.51	1.48	1.58	2.7	1.58	1.72	
	Apparent	1.84	1.90	1.86	1.78	-	-	-	
	Saturated	1.69	1.70	1.69	1.98	-	-	-	
Water absorption (%)	12.10	15.90	14.70	13.10	22.16	12-28	12.27	< 30 % [FIB 1983]	
Porosity (%)	59.78	61.26	60.79	43	57.21	51	-		
Unit weight (kg/m³)	Loose	649	663	657	776	572	560	850.12	≤ 880 kg/m ³ [ASTM C-330, C-331 and C-332]
	Compacted	735	740	735	866	-	820	-	
Clay lumps (%)	0.50	1.60	1.17	1.30	4.10	-	-	≤ 2 % [ASTM C-33, C-330 and C-331]	
Materials < 75 μm (%)	0.40	0.90	0.62	2		-	-	≤ 1 % [ASTM C-33]	
Loss on ignition, LOI (%)	0.65	1.00	0.81	1.41	=	0.2	-	≤ 5% [ASTM C-330, C-331 and C-332]	
Soundness (%)	1.80	3.17	2.70	4.30	=	-	-	≤ 12% [ASTM C-33]	
Los Angeles abrasion value, LAAV (%)	48.72	59.70	54.63	55.40	=	-	58.5	≤ 50% [ASTM C-33]	
Aggregate crushing value, ACV (%)	55.11	63.01	59.39	-	=	-	48.37	≤ 25% for heavy duty concrete floor finishes	
Aggregate impact value, AIV (%)	37.50	44.90	41.79	40.20	-	-	-	≤ 30% for pavement wearing surfaces ≤ 45% for others [BS 812: Part 110 and 112]	

[1] Sabtan and Shehata, 2000; [2] Demirdag and Gunduz, 2008; [3] Juimo et al., 2016; [4] Suseno et al., 2017.

Clay lumps and friable particles

The clay lumps content in scoria aggregate was determined according to ASTM C-142. Its content ranged between 0.50 and 1.60 % with an

average of 1.17 % (Table 2). These values within the acceptable standard specification limits of lightweight aggregates of 2% for structural concrete (ASTM C-330), concrete masonry units

(ASTM C-331) and insulating concrete (ASTM C-332). The results of clay lumps were similar to those reported by Sabtan and Shehata (2000) in Saudi Arabia and lower than to that reported by (Demirdag and Gunduz, 2008) in Papua New Guinea (Table 2).

The clay lumps and friable particles in scoria aggregate are unacceptable because, they can break up during mixing and thereby absorb some of the mixing water, cause popouts in hardened concrete and affect the durability and wear resistance.

Materials finer than 75 μ m

The materials finer than 75 μ m which represents the dust in the scoria aggregate was tested according to ASTM C-117. The percentage of the materials finer than 75 μ m ranged between 0.40 and 0.90 % with an average of 0.62 % (Table 2). These results indicate that; the scoria aggregates are complying with the specification limits (ASTM C-33) (< 1 %). The results were lower than to that reported by Sabtan and Shehata (2000) in Saudi Arabia, 2%.

The materials finer than 75 μ m, especially silt and clay, may form a coating on the aggregate particles. Even thin coatings of silt or clay on scoria aggregates can be harmful because it might weaken the bond between the cement paste and the aggregate.

The use of weathered and altered scoria as lightweight aggregates in constructions may cause premature failures in-service. Several researchers such as Van Atta and Ludowise (1976); Van Rooy (1991); Lagerblad and Jacobsson (1997) relate this failure to the presence of smectite minerals in the aggregates used. Smectite is a fairly common secondary product in the basalt, resulting from low-grade

alteration and weathering. The presence of smectite increases drying shrinkage of mortar samples when present in aggregates that were used in concrete (Sveinsdottir et al., 1999). The reported failure mechanisms include the release of plastic fines and the potential of these minerals to expand and contract upon moisture fluctuations.

Loss on ignition

The loss on ignition (LOI), for the scoria was carried out by XRD. The average of LOI for the scoria aggregate ranged between 0.65 and 1 % with an average of 0.81 % (Table 2). According to ASTM C-114, LOI of aggregates, consisting of end products of coal or coke combustion, should not exceed 12 %, while LOI of other aggregates should not exceed 5 %, which indicates that, the study scoria aggregate are within acceptable specification limits. LOI measures the proportion of hydrated minerals in the aggregates.

Mechanical Properties of Scoria

Los Angeles abrasion value

The Los Angeles abrasion value (LAAV) test was determined according to ASTM C-131. Its value ranges between 48.72 and 59.70 % with an average of 54.63 % (Table 2). These values are higher than the limits of ASTM specification, as the LAAV should not exceed 50 % (ASTM C-131). The results were similar to those reported by Sabtan and Shehata (2000) and relatively lower than those reported by Suseno et al. (2017) (Table 2).

Abrasion resistance is essential when the aggregate is to be used in concrete subject to abrasion as in heavy-duty floors or pavements. The LAAV would not be unacceptable for normal aggregate, but there are no required specifications for lightweight aggregate. This test

was performed only for the sake of comparison. Low abrasion resistance of scoria aggregate increases the quantity of fines in the concrete during mixing and consequently may increase the water requirement.

Aggregate crushing value

The aggregate crushing value (ACV) test was tested according to BS 812: Part 110. Its value ranges between 55.11 and 63.01 % with an average of 59.39 % (Table 2). These values are higher than the limits of BS specification, as the ACV should not exceed 45 % (BS 812: Part 110). The results were higher than those reported by Suseno et al. (2017), 48.37% (Table 2). The ACV test measures the resistance of an aggregate to disintegration under gradually applied load.

Aggregate impact value

The aggregate impact value (AIV) test was carried out according to BS 812: Part 112. Its value ranges between 37.50 and 44.90 % with an average of 41.79 % (Table 2). These values are close to the upper limits of BS specifications. Scoria aggregate lies within the specified limits, as the AIV should not exceed 45 % (BS 882: Part 112). The results similar to that reported by Sabtan and Shehata (2000) in Saudi Arabia, 40.20 (Table 2).

The AIV gives a relative measure of the resistance of an aggregate to a sudden shock or impact. Impact resistance is essential when the aggregate is to be used in concrete subject to a sudden impact as in airports or seaports.

The LAAV, ACV and AIV of an aggregate are often used as a general index of its quality. They are carried out for scoria aggregate in this study for the sake of comparison.

It should be noted that the ASTM or BS concerning the mechanical properties of the lightweight aggregate for use in lightweight concretes had laid no specification requirement limits and the used limits are those for normal concrete.

Soundness

Soundness test was performed according to ASTM C-88 using sodium sulphate (Na_2SO_4) method. Scoria aggregates have shown very good results ranging from 1.80 to 3.17 % with an average of 2.70% (Table 2). These results are quite good according to the ASTM specifications (< 12 %). The results were lower than those reported by Sabtan and Shehata (2000) in Saudi Arabia, 4.3%.

The soundness test evaluates the resistance of aggregate to disintegrate when subjected to attacks by salts and freeze and thaw action during extreme weathering conditions (Wu et al., 1998). Freezing and thawing cycles are simulated by immersing the aggregate in a sulphate solution, drying the aggregate, and then reimmersing the aggregate in the sulphate solution. Expansive forces are created when the sulphate crystals in the aggregate pores are re-hydrated. The salt expansion simulates the forces that are created when water freezes in aggregate pores.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Al-Haweri scoria consists of vesicular fine to coarse fragments, light in weight and has the basic composition of basalt. It can be classified as rough honeycombed extremely angular materials with acceptable flakiness and elongation indices. Scoria aggregate is well graded and partly fit within the limits stated by

the ASTM for lightweight aggregate but mixing and possible crushing is required to prepare an acceptable grading. The specific gravity is low and the water absorption is high. The unit weight is low and complies with the requirement for lightweight aggregates for structural concrete, concrete masonry units and insulating concrete. The clay lumps content, the materials finer than 75 μ m, LOI and soundness are within the ASTM specification limits.

The LAAV and ACV are higher than the limits of the ASTM and BS specifications and not acceptable, but the AIV is close to the upper limits of BS specifications.

This investigation proves a potential use of Al-Haweri scoria as coarse aggregate to produce lightweight concrete. Scoria will provide engineers with an alternative for conventional concrete with a reduced dead load.

Scoria deposit is a raw material treasure for Yemen. Accordingly, similar studies should be carried out in different localities within the Quaternary volcanic fields and investigate scoria's use as thermal and sound insulation, abrasive, absorbent, filler in paint, producing geopolymer mortar, fine aggregate (as sand) and manufacturing of rock wool.

REFERENCES

- ACI, 2000. Use of raw or processed natural Pozzolans in Concrete, ACI Committee 232, Manual of Concrete Practice ACI 232.1.
- Al-Akhaly, I.A., Al-Anweh, A.M., El-Anbaawy, M.I., 2018. Preliminary assessment of utilization of Al-Jaif Scoria (NW Sana'a, Yemen) for cement production. *SQU Journal for Science*, 23(2), 111-119. doi:<http://dx.doi.org/10.24200/squjs.vol23iss2>.
- Al-Naaymi, T.A., 2015. Assessment of pumice and scoria deposits in Dhamar-Rada' volcanic field SW- Yemen, as a pozzolanic materials and lightweight aggregates. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 2(9), 386-402.
- Al-Anweh, A.M., 2010. Geology and cement industrial applications on carbonate and clay deposits around Sana'a basin, Republic of Yemen. MSc. Thesis, Geology Department, Faculty of Science, Cairo University, Egypt.
- Alhozaimy, A., Fares, G., Alawad, O.A., Al-Negheimish, A., 2015. Heat of hydration of concrete containing powdered scoria rock as a natural pozzolanic material. *Construction and Building Materials*, 81, 113–119.
- Al-Jabri, K.S., Hag, A.W., Al –Nuaimi, A.S., Al –Saidy, A.H., 2008. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cement and Concrete Research*, 35, 1472-1479.
- Al-Sabri, A.M., 2009. Geology and economic potentiality of the scoria deposits in Dhamar-Rada volcanic field, Yemen. Ph.D. Thesis, Sana'a University, Faculty of Science, Earth and Environmental Science Department.
- Al-Swaidani, A.M., 2017. Production of more durable and sustainable concretes using volcanic scoria as cement replacement. *Materiales de Construcción*, 67(326):e118 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.00716>.
- Al-Swaidani, A.M., Aliyan, S.D., Adarnaly, N., 2016. Mechanical strength development of mortars containing volcanic scoria-based binders with different fineness. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19 (2), 970-979.
- Amigo, Á., Lara, L., Smith, V., 2013. Holocene record of large explosive eruptions from Chaitén and Michinmahuida volcanoes, Chile. *Andean Geology*, 40 (2), 227-248. doi: 10.5027/andgeoV40n2-a03.
- ASTM C33 / C33M-18. 2018. Standard specification for concrete aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C88-99a. 1999. Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate

- or magnesium sulfate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C127-01. 2001. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C131-06. 2006. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C136-01. 2001. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618-12. 2012. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3398-00. 2000. Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Barahim, A.M., 2009. Comparing compressive strength of concrete by using light weight aggregate (Scoria-Tuff volcanic) from Al-argoub area with concrete of normal coarse aggregate. 2nd Engineering Conference, Faculty of Engineering, Aden University, Aden, Yemen.
- Beydoun, Z.R., As-Saruri, M.A., El-Nakhal, H., Al-Ganad, I.N., Baraba, R.S., Nani, A.O., Al-Aawah, M.H., 1998. International Lexicon of Stratigraphy, Republic of Yemen. IUGS and Ministry of Oil and Mineral Resources, Sana'a, Republic of Yemen. 245p.
- Billong, N., Melo, U.C., Njopwouo, D., Louvet, F., and Bonnet, J.P., 2013. Physicochemical characteristics of some cameroonian pozzolans for use in sustainable cement like materials. *Materials Sciences and Applications*, 4, 14-21. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2013.41003>.
- Bozkurt, N., Yazicioglu, S., 2015. Sustainable structural lightweight concrete design and the investigation of the mechanical properties. *Bitlis Eren University Journal of Science & Technology*, 5(2), 62-67.
- BS 812: Part 1. 1975. Methods for determination of particle size and shape. British Standards Institution, London, UK.
- BS 812: Part 2. 1975. Determination of relative densities and water absorption of coarse aggregates. British Standards Institution, London, UK.
- BS 812: Part 105.1. 1989. Determination of aggregate particle shape (flakiness index). British Standards Institution, London, UK.
- BS 812: Part 105.2. 1989. Determination of aggregate particle shape (elongation index). British Standards Institution, London, UK.
- BS 812: Part 112. 1990. Methods for determination of aggregate impact value (AIV). British Standards Institution, London, UK.
- Demirdag, S., Gunduz, L., 2008. Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units. *Construction and Building Materials*, 22, 135-142.
- Dieu, M.J., Pranesh, M.R., Wali, U.G., 2016. Engineering characteristics of volcanic rock aggregates of Rwanda. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(3), 81-90.
- Engidasew, T.A., 2013. Engineering geological characterization of volcanic rocks of Ethiopian and Sardinian highlands to be used as construction materials. Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Cagliari. Cagliari, Italy (unpublished).
- FIB, 1983. FIB manual of light weight aggregate concrete. 2nd edition, Surrey University Press, Galasgow, 259p.
- González-Maurel, O., Godoyc, B., Rouxb, P., Rodríguez, I, Marine, C., Menzies, A., Bertin, D., Morata, D., Vargas, M., 2019. Magmatic differentiation at La Poruña scoria cone, Central Andes, northern Chile: Evidence for assimilation during turbulent ascent processes, and genetic links with mafic eruptions at adjacent San Pedro volcano. *Lithos*, 338-339:128-140.
- Hossain, K.M.A., 2005. Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. *Cement and Concrete Research*, 35, 1141-1144.

- Hossain, K.M.A., 2006. Blended cement and lightweight concrete using scoria: mix design, strength, durability and heat insulation characteristics. *Physical Sciences*, 1, 5-16.
- Hossain, K.M.A, Ahmed, S., Lachemi, M., 2011. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: mechanical and durability characteristics, *Construction and Building Material*, 25, 1186-1195.
- Hossain, K.M.A., Julkarnine, K.M., Anwar, M.S., 2015. Evolution of strength and durability of scoria concrete in sea environment. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 2(6), 1268.
- Kamseu, E., Leonelli, C., Perera, D.S., Melo, U.F., Lemougna, P.N., 2009. Investigation of volcanic ash-based geo-polymers as potential building materials. *Ceramics International*, 58(2), 136-140.
- Kilic, A., Atis, C.D., Yasar, E., Ozcan, F., 2003. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 33, 1595–1599.
- Juimo, W., Cherradi, T. Abidi, L., Oliveira L., 2016. Characterisation of natural pozzolan of “Djoungo” (Cameroon) as lightweight aggregate for lightweight concrete. *International Journal of GEOMATE*, 11(27), 2782-2789.
- Lagerblad, B., Jacobsson, B., 1997. Smectite clays and concrete durability. *Proceedings 19 th. International Conference Cement Microscopy*, 151-162.
- Lemougna, P.N., MacKenzie, K.J., Melo, U.F., 2011. Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, 37(8), 3011-3018. doi:10.1016/j.ceramint.2011.05.002.
- Lo, T.Y., Cui, H.Z., 2004. Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete. *Materials Letters*, 58, 916-919.
- Moufti, M.R., Sabtan A.A., El-Mahdy O.R., Shehata, W.M., 1999. Preliminary geological and engineering assessment of the pyroclastic deposits in the central part of Harrat Rahat. *JKAU: Earth Sciences*, 11, 59-88.
- Moufti, M.R., Sabtan A.A., El-Mahdy O.R., Shehata, W.M., 2000. Assessing of industrial utilization of scoria materials in the central Harrat Rahat, Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 57, 155-162.
- Mouli, M., Khelafi, H., 2008. Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan, *Building and Environment*, 43, 31–36.
- Mrema, A.L., Mboya, H.A., 2013. Feasibility of lightweight aggregate concrete for structural and non-structural works in Tanzania, (Zingoni, A. (Ed. in Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation. London: CRC Press), Chapter 293, 2 pages.
- Nawy, E.G., 2008. *Concrete construction engineering handbook*, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton.
- Ozvan, A., Tapan, M., Erik, O., Efe, T., Depci, T., 2012. Compressive strength of scoria added portland cement concretes. *Gazi University Journal of Science*, 25(3), 769-775.
- Sabtan, A.A., Shehata, W.M., 2000. Evaluation of engineering properties of scoria in central Harrat Rahat, Saudi Arabia. *Bulletin of the Engineering Geology and the Environment*, 59, 219-225.
- Schlaich, M., Zareef, M.E. 2008. *Infra-lightweight concrete*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8.
- Suseno, H., Soehardjono, A., Wardana, I., Rachmansyah, A., 2017. Suitability of medium-K basaltic andesite pumice and scoria as coarse aggregates on structural lightweight concrete. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(4), 3318-3329. doi: 10.21817/ijet/2017/v9i4/170904103.
- Sveinsdottir, E.L., Magnusdottir, B., Hardardottir, V., Holmgeirsdottir, T., Kristmannsdottir, H., Tryggvason, N., 1999. The effect of alteration minerals on the quality of construction aggregates (in Icelandic). *IBRI Report No. 99-01*, 53p.

- Tchakouté, H.K., Kong, S., Djobo, J.N., Tchadjie, L.N., Njopwouo, D., 2015. A comparative study of two methods to produce geopolymer composites from volcanic scoria and the role of structural water contained in the volcanic scoria on its reactivity. *Ceramics International*, 41p.
- Tchamabé, B.C., Carrasco-Núñez, G., Miggins, D.P., Németh, K., 2020. Late Pleistocene to Holocene activity of Alchichica maar volcano, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 97, 102404.
- Tchamdjou, W.H., Grigoletto, S., Michel, F., Courard, L., Abidi, M.L., Cherradi, T., 2017. An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in Portland cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 191–206.
- Topcu, İ. B., 1997. Semi lightweight concretes produced by volcanic slags. *Cement and Concrete Research*, 27, 15-21.
- Van Atta, R.O., Ludowise H., 1976. Causes of degradation in basaltic aggregates and durability testing. 14th Engineering Geological and Soils Engineering Symposium, 241-254.
- Van Rooy, J. L., 1991. The influence of the mineralogy on the durability of Drakensberg basalts. In Blight et al.: *Geotechnics, in the African Environment*, 383-392.
- Warati, G. K., Darwish, M.M., Feyessa, F.F., Ghebrab, T., 2019. Suitability of scoria as fine aggregate and its effect on the properties of concrete. *Sustainability*, 11, 4647, doi:10.3390/su11174647.
- Winsley, J. B., Muthukannan, M., 2018. A preliminary study on the physical properties of an alternative coarse aggregate made with red soil and fly ash. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 12, 1-8. doi: 10.2174/1874836801812010001.
- Yasar, E., Atis, C.D., Kilic, A., Gulsen, H., 2003. Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. *Materials Letters*, 57, 2267-2270.
- YGSMRB, 2019. Yemen Geological Survey and Mineral Resources Board, www.ygsmrb.org.ye (accessed on 7 Dec. 2019).



Araştırma Makalesi / Research Article

Kapadokya Bölgesi'ndeki Kaya Oyma Depoların Tasarım Ölçütlerinin Sayısal Yöntemlerle Değerlendirilmesi

Evaluation of Design Criteria of Rock-Hewn Storages in Cappadocia Region by Numerical Analyses

İsmail DİNÇER¹ , Mutluhan AKIN¹ , Ahmet ORHAN¹ , Can DURU² 

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

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir

Geliş (Received): 10 Nisan (April) 2020 / Düzeltme (Revised): 14 Temmuz (July) 2020 / Kabul (Accepted): 16 Temmuz (July) 2020

ÖZ

Kapadokya Bölgesi'nde geniş yayılım sunan tüf ve ignimbirit türü piroklastik kayalar, sahip olduğu kolay kazılabilirlik ve termal yalıtım özelliklerinden dolayı kaya oyma yapıların oluşturulması için uygun jeolojik koşullar sunmaktadır. Bu kaya oyma yapılarından biri olan kayadan oyma soğuk hava depoları Kapadokya'nın önemli ekonomik değerleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada Kapadokya Bölgesi'nde sayıları yaklaşık 1250 civarında olan kayadan oyma depoların tasarım ölçütleri sayısal analizler yardımıyla incelenmiştir. Bu kapsamda farklı topuk genişliği, örtü kalınlığı ve loca genişliğine sahip modeller göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan analiz sonuçlarına göre bölgede açılacak olan kayadan oyma soğuk hava depolarında sırasıyla örtü kalınlığı ve topuk genişliğinin 4 ve 2 metreden az olmayacak şekilde planlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. 4 metreden daha az örtü kalınlıkları çekme gerilmelerinin artmasına neden olurken, 2 metreden daha az ayak genişlikleri ise yapının ortasında gerilme artışlarına neden olmaktadır. Bu değerlerden farklı olarak seçilen loca ve topuk genişliklerinde deformasyonlar soğuk hava deposunun ortasında yer alan localarda artmakta ve kaya oyma deponun tamamı tek bir açıklık gibi davranmaktadır. Kaya oyma depolar localar şeklinde planlandığından söz konusu yapıların tasarımında en önemli nokta locaların ayrı birer açıklık gibi davranmasının sağlanmasıdır. Bu koşul uygun loca ve topuk genişliklerinin tasarlanmasıyla mümkün olabilir.

Anahtar Kelimeler: Kapadokya, Kaya Oyma, Depo, Sayısal Analiz, Deformasyon

ABSTRACT

Tuff and ignimbrite type pyroclastic rocks, which are widespread in the Cappadocia Region, offer suitable geological conditions for the formation of rock-hewn structures due to their easy carving and thermal insulation properties. Natural cold storages, one of these rock-hewn structures, are among important economic values of Cappadocia. In this study, the design criteria of natural rock-hewn storages, the number of which is around 1250 in the Cappadocia Region, were evaluated on the basis of numerical analyses. For this reason, models with different pillar width, overburden thickness and lodge width were taken into consideration. According to analysis results, it is concluded that the overburden thickness and pillar width of rock hewn cold storages to be excavated in the region should be planned not less than 4 and 2 meters, respectively. Overburden thicknesses less than 4 meters lead to increased tensile stresses, while pillar widths of less than 2 meters cause stress increases in the middle section of the storage. Deformations increase at the lodges located in the middle of the cold storage in case of dissimilar lodge

and pillar width selection, and the entire rock-hewn storage acts as a single opening. Since rock-hewn storages are planned as lodges, the most significant point during the design of these structures is that the lodges should behave as separate openings. This condition can be valid by designing proper lodge and pillar width.

Keywords: Cappadocia, Rock-Hewn, Natural Storage, Numerical Modeling, Deformation

GİRİŞ

Kaya oyma mekanlar bir kaya kütesinin çeşitli amaçlar için oyularak şekillendirilmesiyle meydana getirilmekte olup, çoğunlukla insan gücü ile açılmış yeraltı boşlukları kaya oyma yapı olarak sınıflandırılmaktadır (Özata, 2015). Kaya oyma yapılar, farklı jeolojik koşullara ve iklimsel özelliklere sahip, dünyanın farklı bölgelerinde doğal bir yapı türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, bölgenin sahip olduğu fiziksel, kültürel ve sosyal konumu farklı şekillerde kaya oyma yapıların ortaya çıkmasına neden olmuştur (Çorakbaş, 2012). Kaya oyma yapılar ülkemizde başlıca Kapadokya Bölgesi'nde gözlenmekte olup, bunun yanı sıra daha az yaygın olarak diğer bölgelerimizde de yeraltı açıklıkları bulunmaktadır. Öte yandan, farklı kaya türlerinin oyulmasıyla Mısır'da, Kıbrıs'ta, İtalya'da, İran'da, Ürdün'de, Hindistan'da, İspanya'da, Çin'de ve Etiyopya'da farklı amaçlar için kullanılan kaya oyma mekânlar oluşturulmuştur (Özata, 2015). Hindistan'da kaya oyma yapılar daha çok mezar ve ibadethane olarak kullanılırken, Çin'in Loess platosu gibi bazı bölgelerinde 40 milyona yakın insan "Yaodong Evi" denilen kaya oyma yapıları yaşama alanı olarak kullanılmaktadır (Zhu vd., 2014). Kaya oyma yapılar genel olarak gelişigüzel bir iç geometriye sahip olmalarına rağmen, özellikle ibadet amaçlı açılan boşluklarda geleneksel mimaride kullanılan kemer, kolon, kubbe, tonoz gibi formların oyularak oluşturulduğu da görülebilmektedir.

Kapadokya Bölgesi'nde geniş yayılım sunan tüf ve ignimbirit gibi piroklastik kayalarda, kolay kazılabilmesi ve termal yalıtım

özelliklerinden dolayı geçmişten günümüze çok sayıda kaya oyma mekân oluşturulmuştur. Kaya oyma yapılar işlevlerine göre yaşam ve savunma alanı, ibadet mekânı ve mezar yapısı olmak üzere dört ana sınıfa ayrılabilir. Kapadokya'daki Bizans kültürünü yansıtan kaya oyma boşluklar sadece mezar ve kiliselerden değil, aynı zamanda manastır ve yaşam alanlarından da oluşmaktadır (Berndt-Ersöz, 2006). Kapadokya Bölgesi'nde 1500 yıldan daha yaşlı birçok kaya oyma yapı bulunmakta olup, bunların dış görünüşleri doğal morfolojiye uygun bir yapı sergilerken, iç mekânlarında ise oldukça karmaşık ve detaylı bir geometrinin olduğu gözlenmektedir (Aydan ve Ulusay, 2003). Sülükçü (2019) tarafından Kızılıkaya ignimbiritlerin dışında diğer ignimbiritlerde açılmış depoların özellikle girişlerine yakın kesimlerinde ayrışmaya ve tavan bölümünde ise jeolojik faktörlere bağlı olarak bazı duraysızlıkların gelişebileceği belirtilmiştir. Farklı boyut ve şekillerde kazılmış olan bu yeraltı açıklıkları günümüzde de konaklama, yaşam ve depolama amaçlı kullanılmaktadır. Bölgede halen turizm ve depolama amaçlı yeraltı mekânların oluşturulmasına devam edilmektedir.

Bu çalışmada Kapadokya Bölgesi'nde sayıları yaklaşık 1250 civarında olan kayadan oyma depolar, tasarım ölçütleri açısından ele alınmıştır. Bu kapsamda depoların mevcut tasarım geometrileri sayısal analizler yardımıyla incelenerek en uygun tasarım boyutlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için bölgede yaygın olarak kullanılan kaya oyma depoların mimari projeleri üzerinden farklı boyutlar sonlu elemanlar yöntemine göre analiz yapan RS2 (Rocscience, 2019a) yazılımı ile incelenmiştir.

Son dönemde bölgede açılan kaya oyma depolar, mimari açıdan bir koridor ve bu koridora bağlı localar şeklinde planlanmakta olup, bu boyutlandırma çoğunlukla geçmiş dönemlerde elde edilen kişisel tecrübelerle dayanmaktadır. Bu çalışma kapsamında localar arasındaki ayak/topuk genişliği, loca genişliği ve örtü kalınlığı gibi boyut parametreleri düşey gerilme ve toplam deformasyon gibi parametreler üzerinden sayısal olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak ekonomi ve güvenlik koşulları açısından kabul edilebilir boyutlar ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak hassasiyet grafikleri oluşturulmuş ve mevcut yönetmelikte tanımlanan tasarım ölçütleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece bölgesel anlamda optimum tasarım ölçütleri önerilmiştir.

KAYA OYMA DEPOLAR

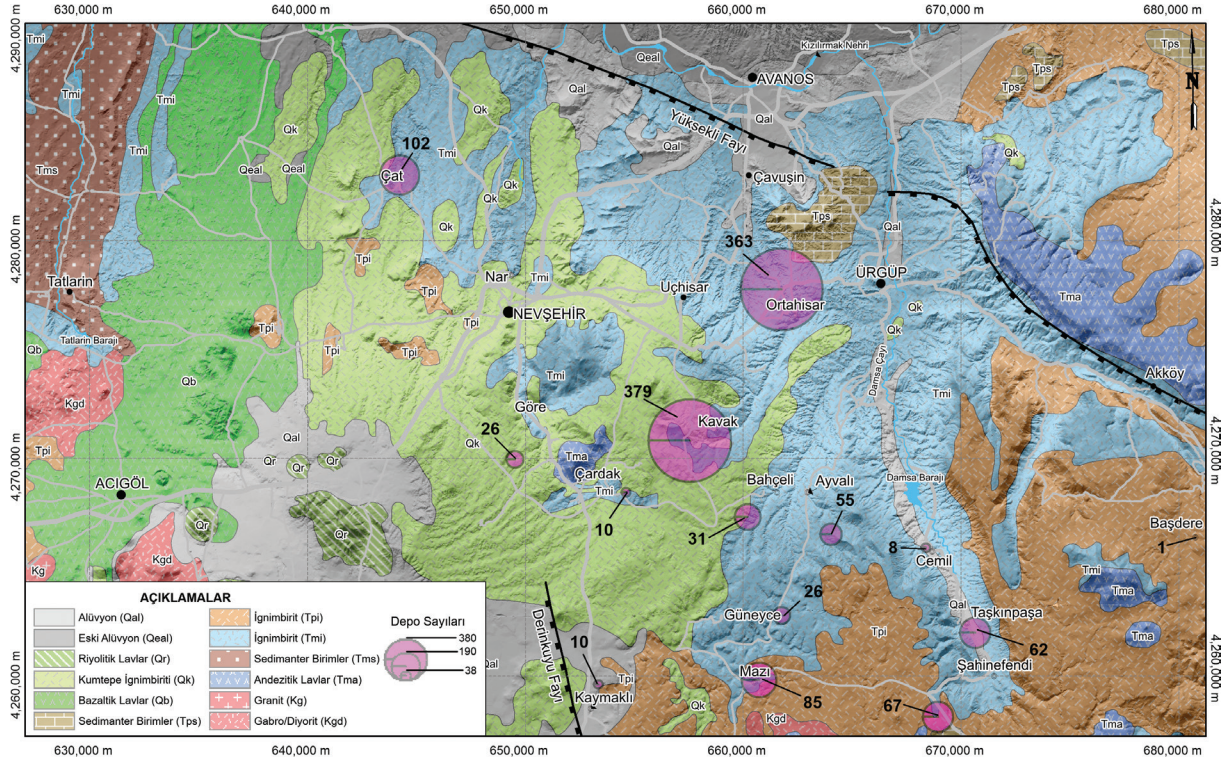
Kapadokya Bölgesi'nde piroklastik kayalar içerisinde oluşturulan kaya oyma soğuk hava depolarının geçmişi Hititlere kadar uzanmaktadır. Yöre halkı tarafından "Ayça" adı verilen kaya oyma depoları, Hititlerden sonra Romalılar, Bizanslılar, Selçuklular ve Osmanlılar tarafından da aynı amaçla kullanılmıştır. Bölgedeki önemli ekonomik faaliyet alanlarından biri olan kaya oyma depolarında, narenciye türlerinin yanı sıra, patates, soğan, elma, armut gibi meyve-sebze çeşitleri de depolanmaktadır. Bunun yanında, sınırlı miktarda kültür mantarı yetiştiriciliği de yapılmaktadır (Harunoğulları ve Kayar, 2012). Kapadokya Bölgesi'nde soğuk hava depolarının kullanımını ağırlıklı olarak limon, patates ve tohumculuk oluşturmakta olup, Ortahisar ve Kavak bölgesinde çoğunlukla limon depolanırken, Çat ve Nar bölgesindeki depolar patates ve tohumculuk üzerine faaliyet göstermektedir. Mekanik ve elektronik aksamlı soğuk hava depolarından farklı olarak kaya oyma depolarında sıcaklık tüm yıl boyunca ortalama

8°C'dir ve bu sıcaklığın ayarlanması için elektrik kullanılmamaktadır. Öte yandan, kaya oyma depolarında saklanan patates ve limon gibi bazı ürünlerin ağırlıklarında doğal nemden dolayı %10 civarında artış da görülmektedir. Bölgedeki kaya oyma depolarının kapasitesi genelde 100 ile 1000 ton arasında değişmekte olup, bir ya da birkaç galerili küçük ve orta ölçekli depolar halinde Kavak, Ortahisar, Şahinefendi, Kaymaklı, Mazı, Nar ve Çat köyleri mevkiilerinde yoğunlaşmıştır. Söz konusu lokasyonların dışında birçok köy ve belde sınırları içerisinde kaya oyma depolar yer almaktadır (Şekil 1). Tarım İl Müdürlüğü verilerine göre bölgede toplam 1226 adet kaya oyma soğuk hava deposu bulunmakta olup, bu depoların toplam kapasitesi yaklaşık 1.5 milyon tondur. Kavak kasabası 379 adet ve 810000 ton kapasite ile kaya oyma depo açısından bölgede birinci sırada yer almaktadır. Ortahisar, 363 adet kaya oyma depo ve 98000 ton kapasiteye sahiptir. Son yıllarda ise projeli tesis edilen 5000-20000 ton kapasiteli depolar patates endüstrisinin gelişimi ile birlikte artmıştır. Bu tip kaya oyma depolar Nevşehir Merkez, Nar ve Çat kasabaları sınırları içerisinde yer almaktadır. Gülşehir yolu boyunca yer alan bu kaya oyma depolar büyük kapasiteleri ve teknolojik özellikleri ile dikkati çekmektedir. Söz konusu bölgede 102 adet kaya oyma depo faaliyette olup, kapasitesi 507000 ton civarındadır.

Bölgedeki kaya oyma depolar önceleri vadi yamaçları boyunca volkanik kökenli tüflerin el aletleriyle kazılması sonucu oluşturulurken, günümüzde iş makineleri kullanılarak her türlü topografyada açılabilir (Şekil 2a ve b). Son dönemde açılan kaya oyma depolar oldukça büyük hacimli olup, içerisinde rahatlıkla kamyon, tır vb. araçlar ilerleyebilmektedir. Ancak Ortahisar ve Kavak bölgesinde yer alan bazı depolar oldukça küçük olup, araçlar bazı depo içlerine girememektedir (Şekil 2d). Bu

durumda ürünler insan gücü ile depo içerisine taşınmaktadır. Yeraltı depoları, yapısal olarak 2-3 metre kalınlığındaki kolon ve duvarların termal yalıtımı ile duraylı bir depo içi sıcaklığına sahip olup, yıl boyunca yeraltında depolanan ürünleri 4-10°C arasında tutmaktadır. Eski

dönemlerde açılmış olan depolarda düzenli bir mimari proje gözlenmezken, son dönemde inşa edilen kaya oyma depolarda koridor ve koridora açılan localardan oluşan düzenli bir mimari proje dikkati çekmektedir (Şekil 2c ve Şekil 3).



Şekil 1. Kapadokya Bölgesi'nde kaya oyma depoların sayısal dağılımı ve jeolojik birimlerin genel yayılımı (Aydar vd., 2012'den değiştirilerek).

Figure 1. Geological units and numerical distribution of rock-hewn storages in the Cappadocia Region (modified after Aydar et al., 2012).

Kaya oyma yapıların tasarımı noktasında bölgede tecrübeye dayalı bir yaklaşım kullanılmakta olup, uzun yıllardan bu yana yapılan bu kazılarda mühendislik hesaplamaları yeterli düzeyde dikkate alınmamıştır. Ancak, 18 Ekim 2017 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanan "Kayadan Oyma Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" ile bölgede yapılacak yeni kaya oyma yapıların tasarımı ile

ilgili önemli bir eksiklik giderilmeye çalışılmıştır. Yönetmelik 5 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; amaç, kapsam, dayanak ve çeşitli tanımlardan bahsedilmektedir. İkinci bölümde yönetmeliğin genel esasları sunulmuştur. Üçüncü bölümde; kaya parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yürütülmesi gereken arazi incelemesi, yeraltı araştırmaları ve kaya kütle incelemeleri düzenleme esasları anlatılmıştır.

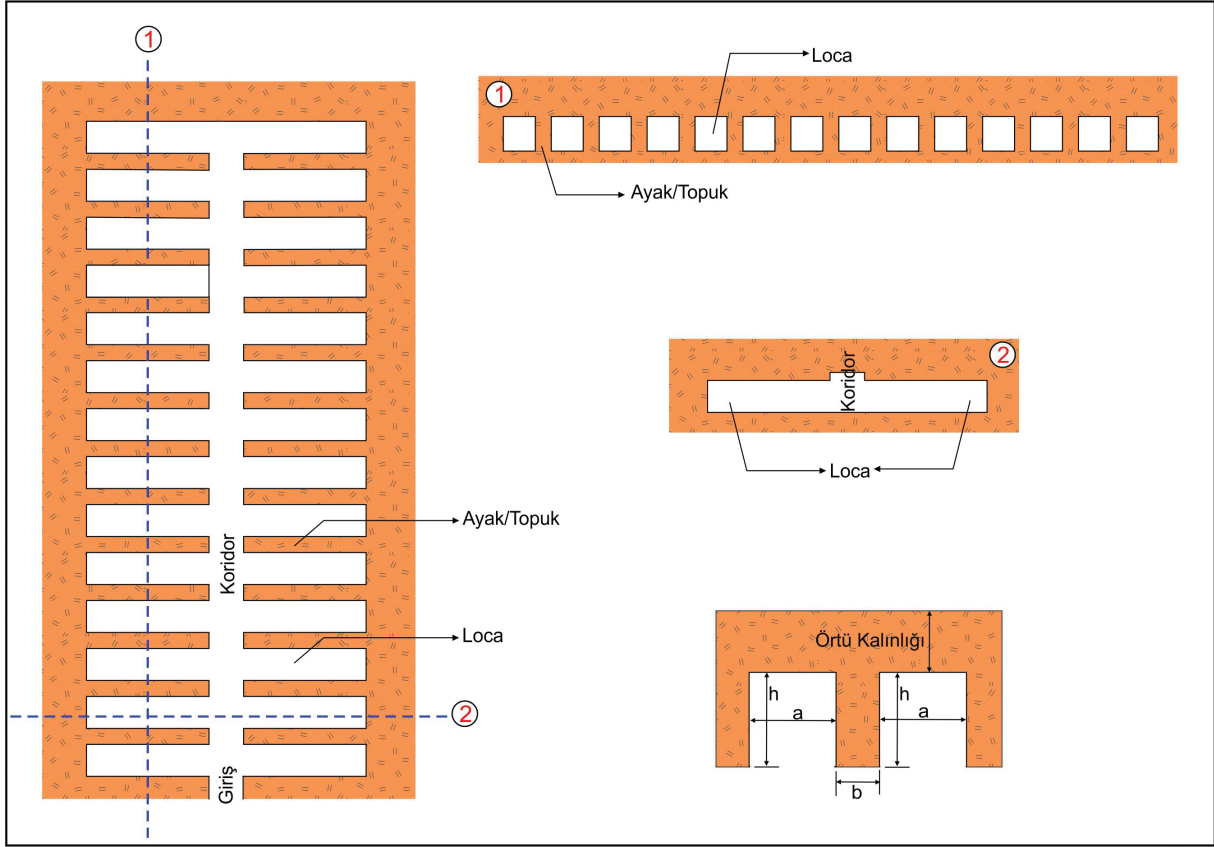


Şekil 2. Kaya oyma depolardan genel görünümeler.

Figure 2. General views of the rock-hewn storages.

Dördüncü bölümde; tasarım ve projeler kapsamında uyulması gereken tasarım ilkeleri, yapısal esaslar, taşıyıcı sistemin analizi ve hesap kuralları, güçlendirme, mimari proje, yapı aplikasyon projesi, statik proje, mekanik tesisat projesi, elektrik tesisat projesi açıklanmaktadır. Beşinci ve son bölümde ise çeşitli ve son hükümler kapsamında geçiş hükümleri, mevcut başvurular, yapılar ve yürürlükten bahsedilmektedir. Bu yönetmelik sadece yeni kaya oyma yapılar için değil, mevcut kaya oyma yapıların yenilenmesi için de geçerlilik arz etmektedir. Söz konusu yönetmeliğin 12. maddesinde kaya oyma depolar ile ilgili olarak da genel bazı tasarım ölçütleri ortaya konulmuştur. Buna göre, en düşük örtü kalınlığının yapı genişliğinin yarısından az olmayacağı ve zayıf kayalarda ise örtü kalınlığının 5 metreden az olmaması gerektiği vurgulanmaktadır. Örtü kalınlığının 100 metreden fazla olduğu koşullarda kaya oyma deponun yapılamayacağı belirtilmiştir.

Bunun yanında, kaya oyma depolarda localar arasında bırakılacak ayak/topuk genişliğinin kaya kalitesine, süreksizlik yönelimine, kaya oyma yapı genişliğine, loca genişliğine ve yüksekliğine bağlı olarak değiştiği Çizelge 1'de verilen bir yaklaşım önerilmiştir. Söz konusu tasarım koşulları ağırlıklı olarak şimdiye kadar bölgede ve madencilik uygulamalarında edinilen tecrübelerle dayanmaktadır. Bölgesel anlamda uygulanan yaklaşım göz önünde bulundurulmamış olup, günümüzde açılan kaya oyma depolarda loca genişliği 6 metre, ayak/topuk genişliği 3 metre ve loca yüksekliği 6.5 metre olan bir mimari tasarım kullanılmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmanın kapsamı ve amacı, söz konusu tasarım ölçütlerinin bölgesel anlamda uygulanabilirliğinin değerlendirilmesidir. Bu amaçla kurgulanacak farklı kaya depo modelleri üzerinde gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları değerlendirilecektir.



Şekil 3. Tipik bir kaya oyma deponun plan ve kesit görünümleri.

Figure 3. Plan and section views of a typical rock-hewn storage.

Kaya Oyma Depoların Bulunduğu Bölgenin Jeolojik Yapısı

Çalışmada özellikle Kapadokya Bölgesi'nde yer alan kaya oyma depolar göz önünde bulundurulmuş olup, söz konusu depolar Kapadokya Volkanik Kompleksi (KVK) içerisinde yer alan Neojen yaşlı piroklastik kayalar içerisinde açılmaktadır. Kapadokya Volkanik Kompleksi 40-60 km genişliğine ve 250 km'den daha fazla KD-GB yönünde uzanımına sahiptir (Toprak vd., 1994). Bu bölge güneyde Toros dağ kuşağı, kuzeyde Kırşehir masifi ve doğuda ve batıda Hasan Dağı ve Erciyes Dağı

ile sınırlanmaktadır. Kapadokya Bölgesi'nin jeolojisi genel olarak temelde Neojen öncesi granitik kayalar, Neojen sedimanter kayalar, Neojen yaşlı volkano-sedimanter ve Kuvaterner yaşlı volkanik kayalardan oluşmaktadır. Bölgedeki Neojen-Kuvaterner volkano-sedimanter istif ağırlıklı olarak ignimbiritlerden oluşmaktadır. Bölgedeki ignimbiritlerin stratigrafisi son olarak Aydar vd. (2012) tarafından güncellenmiş olup, yaşlıdan gence doğru ignimbiritler Kavak, Zelve, Sarımaden, Sofular, Cemilköy, Tahar, Gördeles, Kızılkaya, Valibaba ve Kumtepe olarak sınıflandırmıştır.

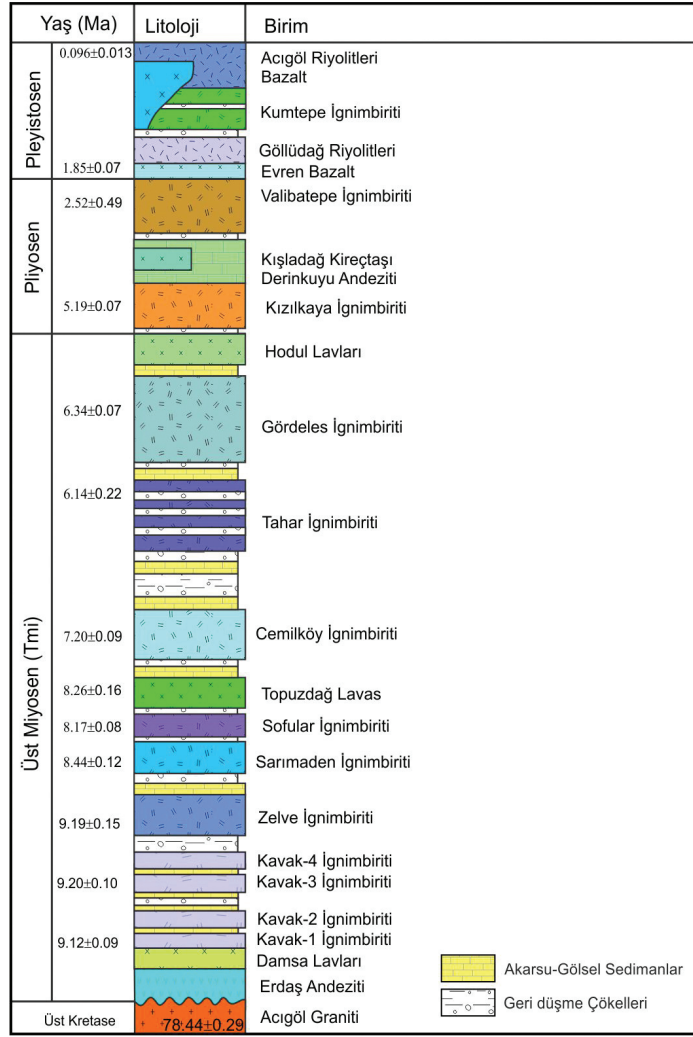
Çizelge 1. Kaya oyma deponun kazı derinliği ve kaya kalitesine göre ayak/topuk genişliği (T.C. Resmi Gazete, 2017).

Table 1. Pillar width of rock-hewn storage based on excavation depth and rock quality (Republic of Turkey, Official Newspaper, 2017).

Toplam Örtü Kalınlığı	Kayaç Sınıfı		
	Zayıf	Orta	Sağlam
0-50	$\frac{2h}{5} < b < \frac{h}{2}$	$\frac{h}{7} < b < \frac{h}{6}$	$\frac{h}{8} < b < \frac{h}{7}$
50-100	$b > h$	$\frac{2h}{5} < b < \frac{h}{2}$	$\frac{h}{7} < b < \frac{h}{6}$
100-150	-	$\frac{2h}{3} < b < h$	$\frac{2h}{5} < b < \frac{h}{2}$
	-	$\frac{2a}{3} < b < a$	$\frac{2a}{5} < b < \frac{a}{2}$
150-200	-	$b > h$	$b > \frac{h}{2}$
	-	$b > a$	$b > \frac{a}{2}$

Şekil 1’de verilen kaya oyma yapıların yayılımı göz önünde bulundurulduğunda, kaya oyma depoların ağırlıklı olarak Tmi olarak adlandırılan Miyosen ignimbiritleri içerisinde yer alan Üst Miyosen yaşlı Kavak ignimbiritleri içerisinde yer aldığı görülmektedir. Kavak ignimbiriti bazı kaynaklarda Ürgüp Formasyonu’nun, Kavak Üyesi olarak da tanımlanmaktadır (Temel, 1992; Toprak vd. 1994). Kavak Üyesi bölgede yaklaşık 2600 km²’lik bir alanda gözlenmekte olup, Ürgüp Formasyonu’nun en yaygın gözlenen üyesidir (Topal, 1995). Bundan dolayı bölgede yer alan birçok doğal, tarihi ve kültürel miras (peri bacaları, yeraltı şehirleri vb.) söz konusu birim içerisinde yer almaktadır. Kavak ignimbiritleri Kapadokya Volkanik Kompleksi’nde piroklastik

çökellerin en yaşlısı olup, Aydar vd. (2012) tarafından Kavak-1, Kavak-2, Kavak-3 ve Kavak-4 olmak üzere dört alt birime ayrılmıştır. Kavak-1 seviyesi ters derecelenmiş pomzaca zengin bir görünüm sergilerken, Kavak-2 ise litik malzemeli volkanik külce zengin seviyeler ile temsil edilmektedir (Şekil 4). Kavak-3 pomzaca zengin birkaç seviyenin depolanmasıyla karakterizedir. Kavak-4 olarak adlandırılan ignimbirit seviyesi zengin kül matriks içerisinde pomza parçalı ve soluk pembe renkli piroklastik çökeller ile temsil edilmektedir (Aydar vd., 2012). Özet olarak, kaya oyma depolar geçmişte olduğu gibi günümüzde de ağırlıklı olarak Kavak ignimbiritlerinin farklı kaynaşma derecelerine sahip seviyeleri içerisinde açılmaktadır.



Şekil 4. Kapadokya bölgesinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Aydar vd., 2012'den değiştirilerek).

Figure 4. Generalized stratigraphic columnar section of the Cappadocia Region (modified after Aydar et al., 2012).

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Kapadokya Bölgesi'nde ignimbiritler içerisinde son dönemde açılmış ve açılmakta olan kaya oyma depolarında kullanılan mimari tasarım boyutları sahip tipik bir örnek ve alternatif modeller üzerinden değerlendirilmiştir (Çizelge 2). Bu amaç için örnek olarak seçilmiş bir kaya oyma deposu sahasında blok örnek alımı için arazi, kaya malzeme özelliklerinin

belirlenmesi için laboratuvar deneyi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deneyleri Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Zemin-Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Kavak ignimbiritlerinin literatürde yer alan malzeme özellikleri ile karşılaştırılarak bir veri aralığı oluşturulmuştur. Daha sonra, inceleme sahasındaki herhangi bir

süreksizlik gözlenmeyen ignimbirit seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002) yararlanılmıştır. Buna göre, ignimbirit kaya kütlesi için Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre RocData (Rocscience, 2019b) yazılımı ile elde edilen eğrisel yenilme zarfına çizilen teğet yardımıyla Mohr-Coulomb yenilme parametreleri elde edilmiştir.

Bölgedeki kaya oyma depolarda genel mimari koridor ile koridorun sağında ve solunda yer alan yan yana localardan oluşmaktadır. Bu çalışmada 126 metre uzunluğunda, 6.5 metre genişliğinde ve 7.5 metre yüksekliğindeki koridor ile koridorun sağında ve solunda yer alan yan yana 14 locadan oluşan güncel mimariye uyan bir depo göz önünde bulundurulmuştur.

Localar 3 metre ayak/topuk genişliği ile oyulmuş 23 metre uzunluğunda, 6 metre genişliğinde ve 6.5 metre yüksekliğindedir. Örtü kalınlığı 12 metreye kadar ulaşmaktadır. Çalışma kapsamında söz konusu boyutlar göz önünde bulundurularak ayak/topuk genişliği, loca genişliği ve örtü kalınlığı değiştirilerek elde edilen mimari tasarım modellerinin gerilme ve toplam deformasyon davranışı sayısal analizler yardımıyla incelenmiştir. İncelenen modellerin özellikleri Çizelge 2’de verilmiş olup, sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemine göre hesaplamalar yapan RS2 (Rocscience, 2019a) yazılımı kullanılmıştır. Analizler yardımıyla elde edilen sonuçlar üzerinde hassasiyet grafikleri oluşturularak bölgesel anlamda optimum tasarım ölçütleri önerilmiş ve mevcut yönetmelikte tanımlanan tasarım ölçütleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan kaya oyma depo modelleri ve karakteristik özellikleri.

Table 2. Rock-hewn storage models considered in the study and their characteristic properties.

Model No	Loca Genişliği (m)	Ayak/Topuk Genişliği (m)	Örtü Kalınlığı (m)	Açıklamalar
01	6.0	3.0	12.0	Genel mimari tasarım
02	6.0	0.5	12.0	Ayak/Topuk Genişliği Değişimi
03	6.0	1.0	12.0	Ayak/Topuk Genişliği Değişimi
04	6.0	2.0	12.0	Ayak/Topuk Genişliği Değişimi
05	6.0	4.0	12.0	Ayak/Topuk Genişliği Değişimi
06	7.0	3.0	12.0	Loca Genişliği Değişimi
07	8.0	3.0	12.0	Loca Genişliği Değişimi
08	9.0	3.0	12.0	Loca Genişliği Değişimi
09	10.0	3.0	12.0	Loca Genişliği Değişimi
10	11.0	3.0	12.0	Loca Genişliği Değişimi
11	6.0	3.0	1.0	Örtü Kalınlığı Değişimi
12	6.0	3.0	2.0	Örtü Kalınlığı Değişimi
13	6.0	3.0	3.0	Örtü Kalınlığı Değişimi
14	6.0	3.0	4.0	Örtü Kalınlığı Değişimi
15	6.0	3.0	8.0	Örtü Kalınlığı Değişimi

Kaya Malzemesi ve Kaya Kütleli Özellikleri

Kaya oyma depoların temel kayası konumunda olan ignimbiritler Kapadokya Bölgesi'nde geniş alanlarda gözlenmektedir ve aynı zamanda bölgedeki doğal, tarihi ve kültürel miras söz konusu piroklastik kayalar içerisinde yer almaktadır. Bu özelliğinden dolayı bölgede yayılım gösteren ignimbiritlerin fiziko-mekanik özellikleri birçok bilimsel çalışmaya konu olmuştur (Topal ve Doyuran 1995; Topal ve Doyuran 1997; Ulusay vd., 2006; Tuncay, 2009; Ulusay vd., 2013; Kaşmer ve Ulusay, 2013; Aydan ve Ulusay, 2013, Dinçer vd., 2016; Ulusay ve Aydan, 2018; Dinçer ve Bostancı, 2019). Kaya oyma depoların genellikle içerisinde yer aldığı Kavak ignimbiritleri ağırlıklı olarak kirli beyaz renkte olup, yer yer pembemsi renkler de sunabilmektedir. Mineralojik olarak plajiyoklaz, kuvars, biyotit ve bazı opak mineraller içermektedir. Çeşitli kaya parçaları,

pomza ve volkanik cam bileşenleri yaygın olarak gözlenmektedir. Kavak ignimbiritleri genel olarak yatay tabaklanma sunmakta olup, yüksek eğime sahip soğuma çatlakları ana süreksizlik tipi olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, Kavak ignimbiritlerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik bir dizi laboratuvar deneyleri ISRM (2007)'e göre gerçekleştirilmiştir. Örnekler Çat ve Nar bölgesinde açılmakta olan depo sahasından alınmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen değerler ve Kavak ignimbiritleri için önceki çalışmalardan belirlenen değerler derlenerek Çizelge 3'de verilmiştir. Buna göre, Kavak ignimbiritleri çok düşük birim hacim ağırlıklı ve yüksek gözenekli kayaç olarak tanımlanmıştır (NBG, 1985). Deere ve Miller (1966)'ya göre çok düşük dayanımlı kaya sınıfında yer alan Kavak ignimbiritlerin tek eksenli basınç dayanımının genel olarak 10.00 MPa'dan düşük olduğu Çizelge 3'te açık bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 3. Kavak ignimbiritlerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Table 3. Some physical and mechanical properties of the Kavak ignimbrites.

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Ulusay vd. (2006)	Tuncay (2009)	Topal (1995) Topal ve Doyuran (1997)	Bu Çalışma
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	12.40-14.40	13.30-14.30	13.52-13.88	14.58-15.64 (6 ^{**})
Gözeneklilik (%)	-	21-27	37.48-38.73	23.03-27.64 (6 ^{**})
P-Dalga Hızı (m/s)	1236-2299 (1672)	-	1887-2190	-
Ağırlıkça Su Emme (%)	-	-	29.28-29.90	15.53-18.61 (6 ^{**})
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kuru) (MPa)	2.30-9.10 (4.6)*	3.60-5.00	5.69-7.43	4.23-7.99 (5 ^{**})
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (doymuş) (MPa)	-	1.10-1.56	-	-
Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa)	0.41-1.34 (0.64)*	-	0.54-0.74 (0.65)*	-
Elastisite Modülü (kuru) (GPa)	0.20-2.34 (1.1)*	-	2.80-4.20 (3.08)*	-
Poisson Oranı (kuru)	-	-	0.16-0.23 (0.2)*	-

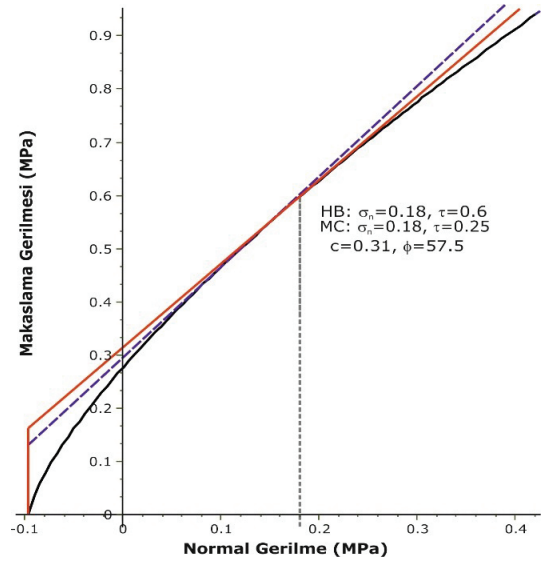
* Ayrac içindeki değerler ortalama değerleri ifade etmektedir.

** Örnek Sayısı

Bilindiği üzere kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri kaya malzemesi dayanımı ve süreksizliklerin ortak bir fonksiyonudur. İnceleme sahasındaki ignimbiritlerin kaya malzemesi dayanımı laboratuvar deneyleri ile ortaya konmuştur. Öte yandan, çalışma sahasındaki ignimbiritler oldukça homojen bir yapı sergilemektedir. Kaya oyma depoların projelendirildiği sahada ignimbirit kütlelerini kesen süreksizliklere rastlanmamıştır.

İgnimbirit seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002) yararlanılmıştır. İgnimbirit kaya kütlesi için Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre RocData yazılımı (Rocscience, 2019b) ile çizilen kaya kütlesi yenilme zarfı Şekil 5'te sunulmaktadır. Sayısal analizlerde, ignimbiritlerdeki homojen yapı göz önüne alınarak Mohr-Coulomb yenilme ölçütü dikkate alınmış olup, ignimbiritlerin makaslama dayanım parametreleri örtü yükü gerilmesi baz alınarak yenilme zarfına çizilen teğet yardımıyla belirlenmiştir. Öte yandan, yenilme zarfına bağlı olarak elde edilen kaya kütlesi dayanım parametreleri Çizelge 4'te özetlenmiştir.

İnceleme alanındaki ignimbiritlerin GSI puanı 80 olarak kabul edilmiştir. Buna göre, ignimbiritlerin, Hoek-Brown sabitleri olan "mb, s ve a" sırasıyla 7.34, 0.11 ve 0.50 olarak belirlenmiştir. Bu sabitlere göre ignimbirit kütlelerinin çekme dayanımı 0.097 MPa, tek eksenli basınç dayanımı 2.16 MPa, kütleli dayanımı 2.84 MPa ve deformasyon modülü 2021 MPa olarak bulunmuştur. Bununla birlikte arazideki örtü yükü gerilmelerine bağlı olarak eğrisel yenilme zarfına çizilen Mohr-Coulomb teğetine göre inceleme sahasındaki ignimbiritlerin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri 0.31 MPa ve 57.5°'dir (Çizelge 4).



Şekil 5. İgnimbirit için Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre hazırlanan eğrisel yenilme zarfı ve örtü yükü gerilmesine bağlı olarak çizilen Mohr-Coulomb teğeti.

Figure 5. Non-linear failure envelope of ignimbrite based on Hoek-Brown failure criterion and Mohr-Coulomb fit according to overburden stress.

Loca Tavanlarında Oluşan Gerilme ve Deformasyonların Değerlendirilmesi

Modellenen kaya oyma depoların sayısal analizi için iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemine göre hesaplama yapan RS2 (Rocscience, 2019a) yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde Mohr-Coulomb yenilme ölçütü dikkate alınmış olup, inceleme alanındaki ignimbiritlerin elasto-plastik davranış özelliği gösterdiği kabul edilmiştir. Analizlerde arazi gerilmeleri ve yerçekiminden kaynaklanan doğal kütle gerilmeleri göz önünde bulundurulmuştur. Girdi parametreleri olarak Çizelge 4'te verilen parametreler ışığında birim hacim ağırlık 15 kN/m³, elastisite modülü 2 GPa, Poisson oranı 0.30, çekme dayanımı 0.097 MPa, içsel sürtünme açısı 57° ve kohezyon 0.31 MPa olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4. İnceleme alanındaki ignimbritlerin Hoek-Brown yenilme ölçütüne bağlı olarak belirlenmiş dayanım ve deformasyon parametreleri.

Table 4. Strength and deformation parameters of the ignimbrites based on the Hoek-Brown failure criterion.

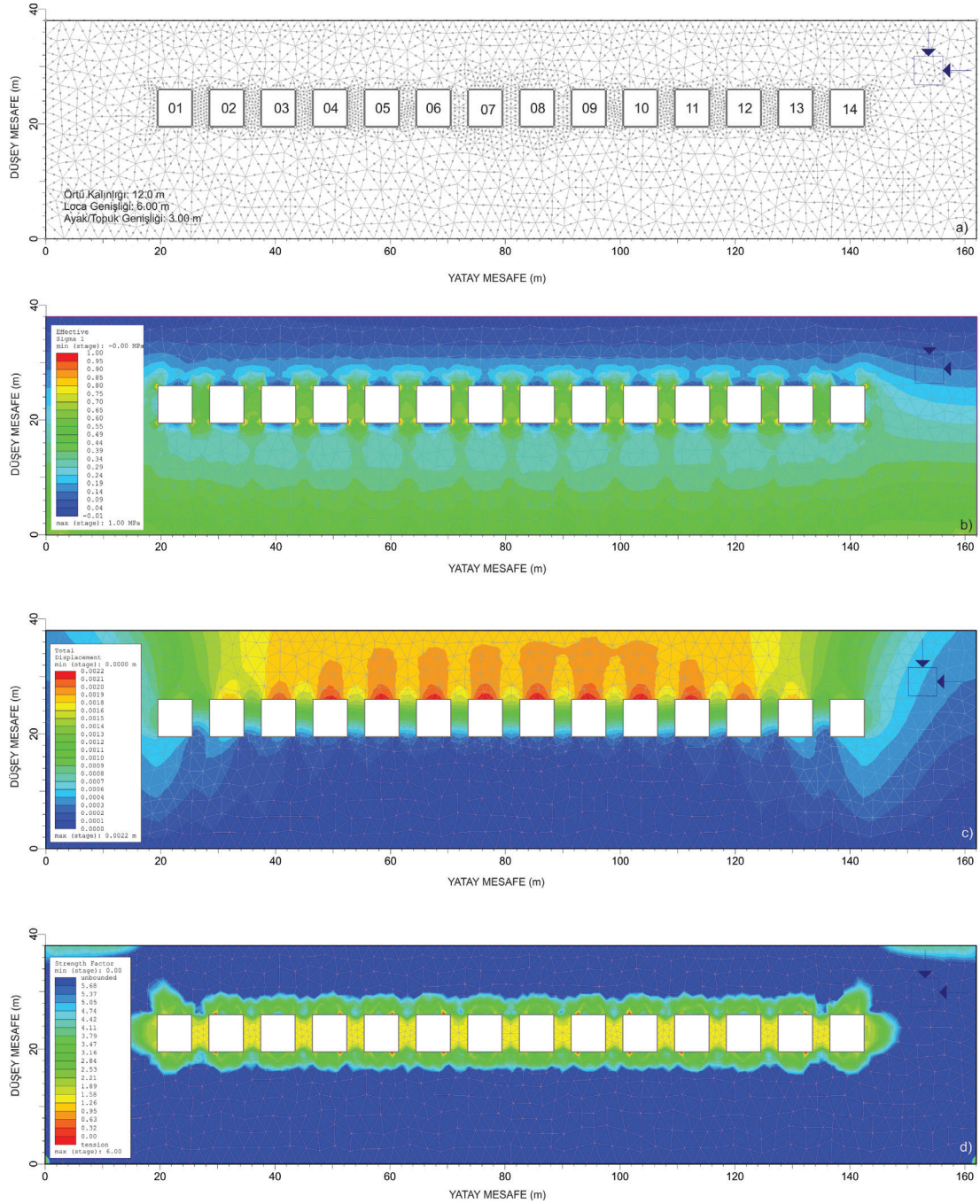
UCS (MPa)		6.56
GSI		80
m_i		15
D		0
E_m (MPa)		2296
Hoek-Brown sabitleri	m_b	7.34
	s	0.11
	a	0.50
KAYA KÜTLESİ	Çekme dayanımı (MPa)	0.097
	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	2.16
	Kaya kütleli dayanımı (MPa)	2.84
	Deformasyon modülü (MPa)	2021
	Kohezyon* (MPa)	0.31
	İçsel sürtünme açısı (ϕ)*	57.5

*Doğrusal Mohr-Coulomb yenilme zarfı teğetine göre

Çalışma kapsamında genel mimari ile birlikte toplam 15 farklı model sayısal açıdan incelenmiş olup, Şekil 6'da kaya oyma depolarda genel olarak kullanılan boyutlar için sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Genel mimariyi temsil eden kesit (Model-01), ayak/topuk performansını değerlendirmek için depo eksenine paralel olarak oluşturulmuş olup, yan yana 14 adet loca bulunmaktadır. Loca yüksekliği 6.5 m, loca genişliği 6 m, topuk genişliği 3 m ve depolar üzerinde yataya yakın bir topoğrafya izlenmekte olup, örtü kalınlığı 12 m'dir. Sayısal analiz sonuçlarına göre, bu modelde maksimum gerilme değeri 1.00 MPa iken, maksimum toplam deformasyon değeri 2.20 mm olarak hesaplanmıştır. Dayanım faktörü değerleri ise yapı boyunca duraylı koşulları işaret etmektedir.

Topuk genişliğinin kayadan oyma depoların tasarımına olan etkisini değerlendirmek üzere Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5'te verilen boyutlar göz önünde bulundurulmuştur. Bu durumda loca tavanlarının orta noktasındaki maksimum gerilme ve toplam deformasyon değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre, topuk genişliğinin 4.0 metre olması durumunda loca tavanlarının orta noktasında meydana gelen toplam deformasyon 1.2 ile 1.8 mm arasında değişmekte iken, sadece 3 ve 12 numaralı localarda 1.7 ile 1.8 mm arasındadır. 4.0 metrelik topuk genişliğinde loca tavalarındaki deformasyon miktarlarında meydana gelen değişim homojen bir dağılım (sabit) göstermektedir. Buna karşın, topuk genişliğinin 0.5 m'ye kadar düşürülmesi her loca tavanında farklı değerlerin elde edilmesine neden olmuştur. Bu koşulda, loca sistemi içerisinde meydana gelen maksimum deformasyonlar orta bölümde yer alan localar (6-9 nolu) üzerinde yoğunlaşmıştır. Buna göre, 1 ve 14 numaralı localarda 3.0 mm civarında gerçekleşen toplam deformasyon miktarları, orta bölümde 8.3 mm'ye kadar yükselmiştir. Şekil 7a incelendiğinde eğrilerin yataya yakın ve dış bükey olmak üzere iki farklı eğilim sergiledikleri açık bir şekilde görülmektedir. 0.5 ve 1.0 metrelik topuk genişliklerinde dış bükey bir eğilim egemen iken, 2.0, 3.0 ve



Şekil 6. Kaya oyma depolarda kullanılan genel mimarinin (Model-01) sonlu elemanlar analizi: a) ağ yapısı ve localar, b) efektif düşey gerilme (s_v), c) toplam deformasyon, d) dayanım faktörü dağılımları.

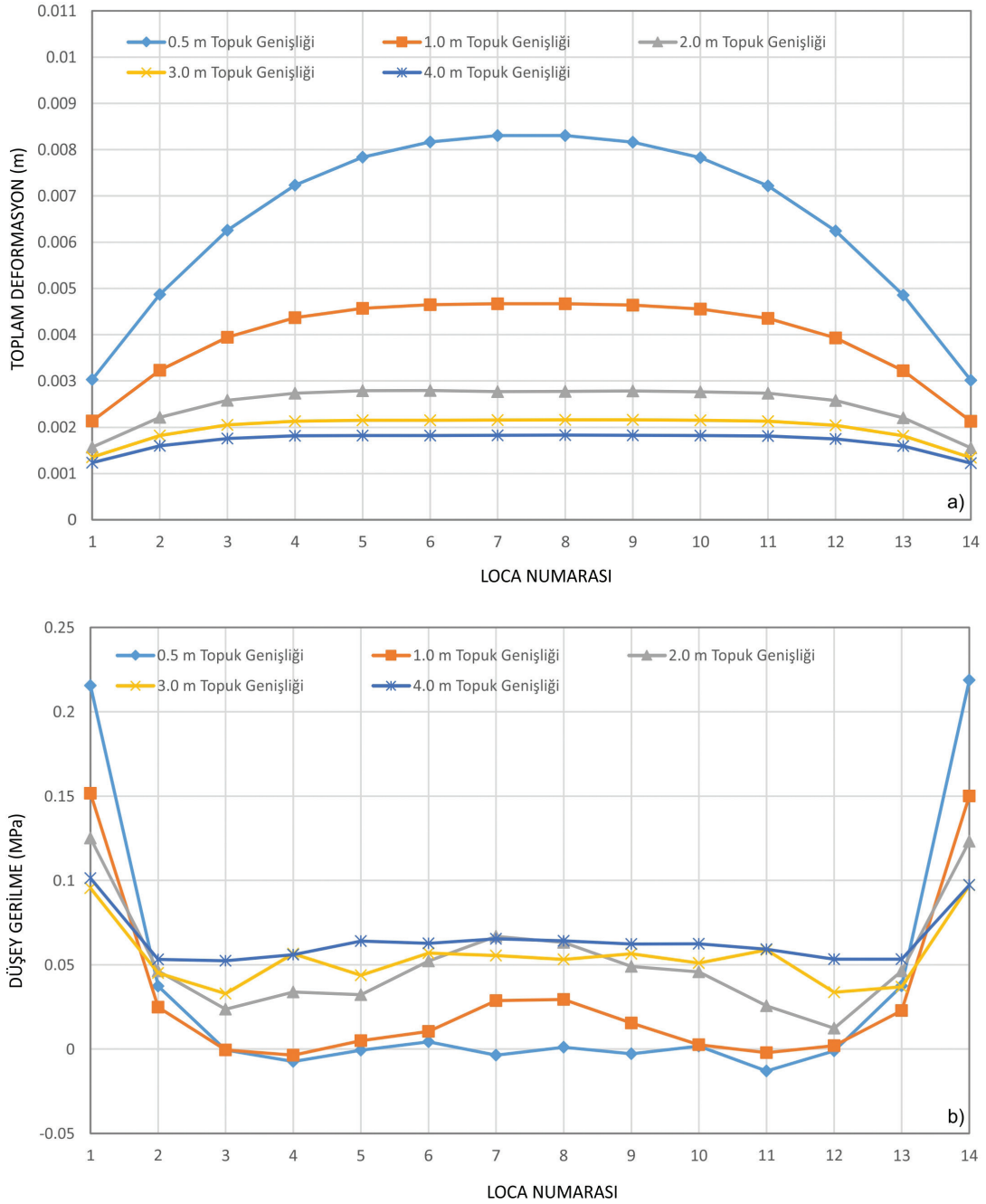
Figure 6. Finite element analysis of a typical rock-hewn storage design (Model-01): a) mesh structure and lodges, b) vertical effective stress (s_v), c) total deformation, d) strength factor distributions.

4.0 metrelik topuk genişliklerinde toplam deformasyon değerleri yataya yakın bir görünüm sergilemektedir. Şekil 7b'de verilen efektif düşey gerilme değişimleri incelendiğinde ise 0.5 ve 1.0 metrelik topuk genişliğinde özellikle kenar locaların tavan bölümünde oluşan çekme gerilmeleri dikkati çekmektedir. Bunun yanında, toplam deformasyon değişiminde olduğu gibi 2.0 metreden yüksek topuk genişliklerinde 2 ile 13. localar arasında gerilme değerlerinin localar boyunca birbirine yakın değerler sergilediği dikkati çekmektedir. Bütün bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, kaya oyma depoların tasarımı sırasında 2.0 metreden daha kalın topuk genişlikleri oluşturulması halinde loca sistemi içerisinde homojen bir gerilme ve deformasyon dağılımı gözlenmektedir. Öte yandan, 2.0 metreden daha dar ayak genişliklerinde ise gerilme ve deformasyon açısından daha değişken koşullar oluşmakta ve özellikle orta bölümde yer alan localarda görece yüksek deformasyonların gözlenmesine neden olmaktadır. Buna göre, kayadan oyma depolarda 2.0 metrelik topuk genişliği optimum değer olarak değerlendirilebilir.

Bölgede son dönemde açılan birçok kayadan oyma depoda loca genişliği genel olarak 6 m olarak planlanmaktadır. Loca genişliğinin etkisini araştırmak üzere Model 6, 7, 8, 9 ve 11'deki 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 metrelik loca genişlikleri değerlendirilmiştir. Loca tavanlarının orta bölümünde elde edilen toplam deformasyon ve maksimum gerilme grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre, loca genişliğinin artmasına bağlı olarak deformasyon değerleri düzenli bir şekilde artmakta ve başlangıç locaları hariç localar boyunca genelde yatay bir değer dağılımı gözlenmektedir. Beklenildiği gibi en düşük deformasyon değerleri 6 metrelik loca genişliği için elde edilmiş olup, maksimum deformasyon miktarları 1.3 ile 2.1 mm arasında değişmektedir.

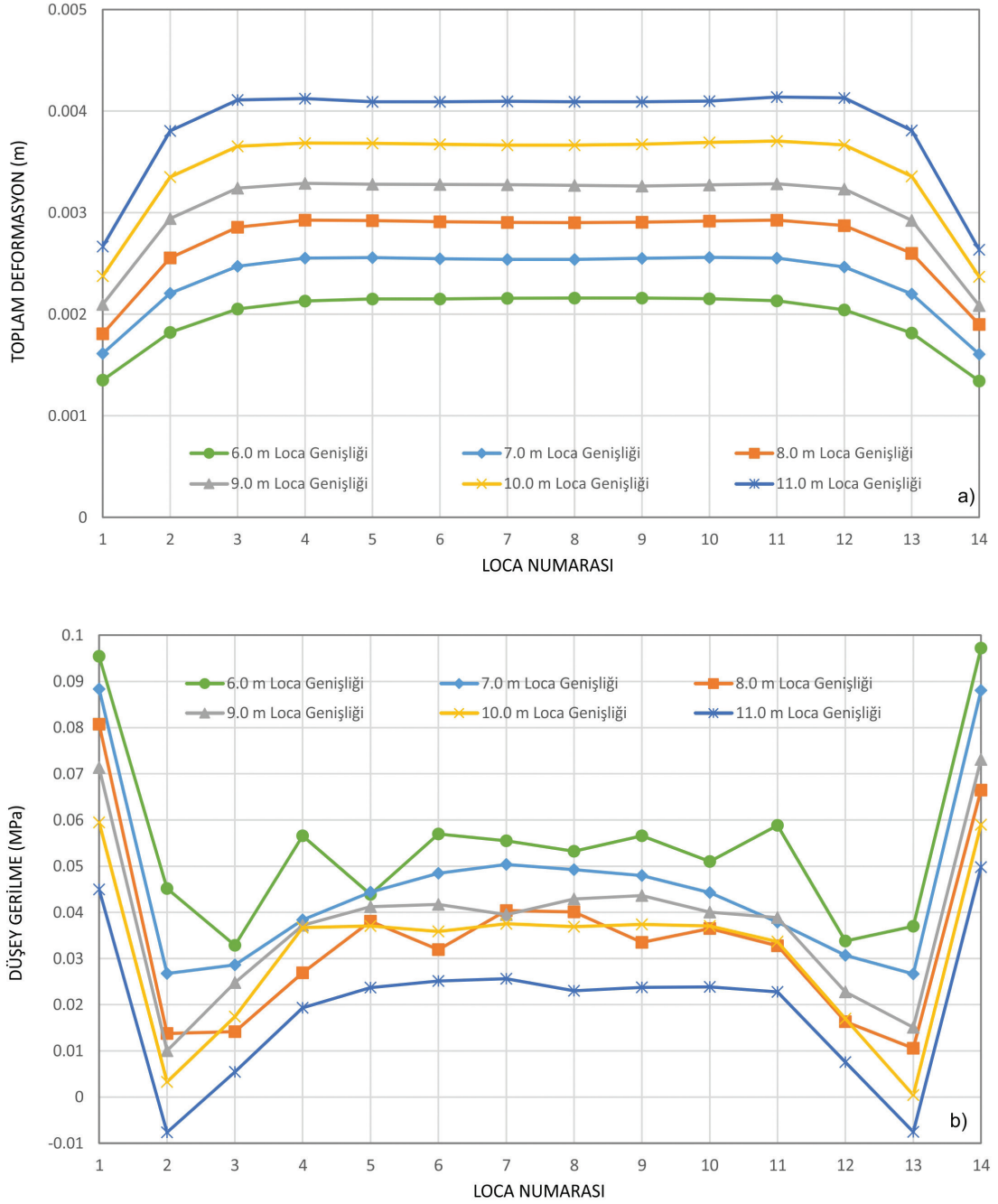
Loca genişliğinin 11 m'ye ulaşması durumunda deformasyon miktarları 4 mm'yi aşmaktadır. Loca tavanlarının orta bölümünde oluşan maksimum gerilme loca genişliğine bağlı olarak azalmakta fakat kenarlarda yer alan loca tavanlarında bir miktar çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu koşullarda maksimum gerilmeler orta bölümde yer alan locaların köşelerinde yoğunlaşmaktadır.

Kayadan oyma depoların tasarımında diğer önemli husus kazı üzerindeki optimum örtü kalınlığının belirlenmesidir. Bu amaçla çalışmada 1 m ile 12 m arasında değişen altı farklı örtü kalınlığı koşulu değerlendirilmiş ve loca tavanlarının orta bölümünde elde edilen maksimum deformasyon gerilme grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Topuk genişliğinde olduğu gibi, elde edilen grafiklerde iki farklı eğilim gözlenmektedir. Meydana gelen toplam deformasyonlar açısından bakıldığında 12 ve 8 metrelik örtü kalınlıklarında beklenildiği gibi örtü kalınlığının fazla olmasına bağlı olarak daha yüksek deformasyon değerleri elde edilmiştir. 1 ile 4 m arasında değişen örtü kalınlıklarında ise locaların tamamında yatay eğilimli ve 1 mm'den küçük deformasyon değerleri elde edilmiştir. Örtü kalınlığının meydana gelen düşey gerilmeler üzerine olan etkisi incelendiğinde ise dikkat çekici sonuçlar elde edilmiştir. Yine beklenildiği gibi yüksek örtü kalınlıklarında daha yüksek gerilmeler elde edilmiştir. Fakat örtü kalınlığının azalmasıyla birlikte loca tavanlarında çekme gerilmeleri oluşmaya başlamıştır. Özellikle 2 ve 3 metrelik örtü kalınlıklarında locaların tamamına yakın bir bölümünün tavanlarında çekme gerilmeleri oluşmaktadır. 1 metrelik örtü kalınlığı ise düşük örtü yükünden dolayı çekme gerilmeleri oluşturmazken, 4 metrelik örtü kalınlığında loca tavanlarındaki çekme gerilmeleri tamamen ortadan kalkmaktadır. Bundan dolayı örtü kalınlığı açısından 4 metrelik kalınlık optimum değer olarak kabul edilebilir.



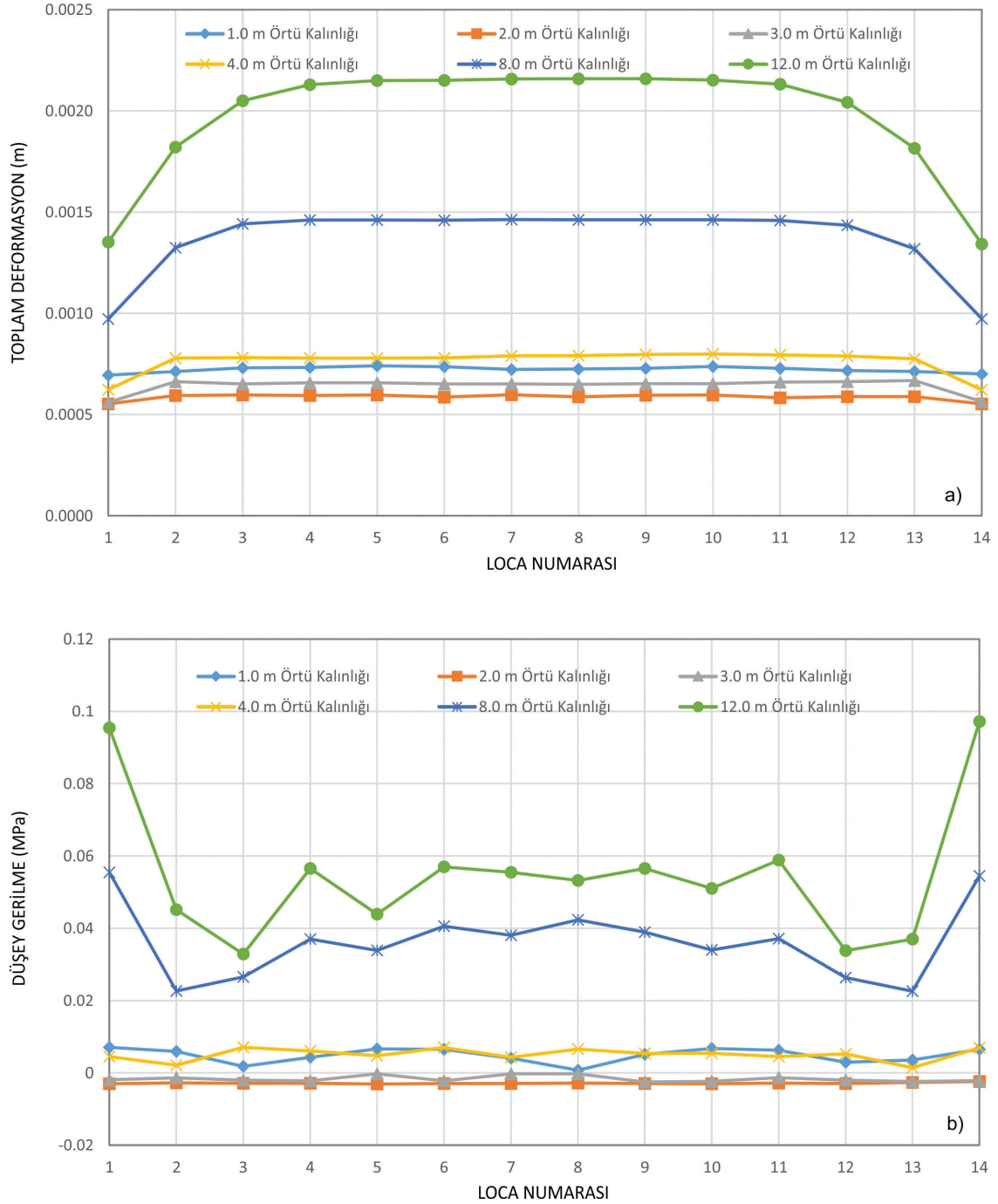
Şekil 7. Topuk genişliği değişimine göre loca tavanlarının orta noktasında meydana gelen maksimum gerilme ve toplam deformasyon değişimi.

Figure 7. Variation of maximum stress and deformation in the middle section of the lodge roof based on pillar width variation.



Şekil 8. Loca genişliği değişimine göre loca tavanlarının orta noktasında meydana gelen gerilme ve deformasyon değişimi.

Figure 8. Variation of maximum stress and deformation in the middle section of the lodge roof based on lodge width variation.



Şekil 9. Örtü kalınlığı değişimine göre loca tavanlarının orta noktasında meydana gelen gerilme ve deformasyon değişimi.

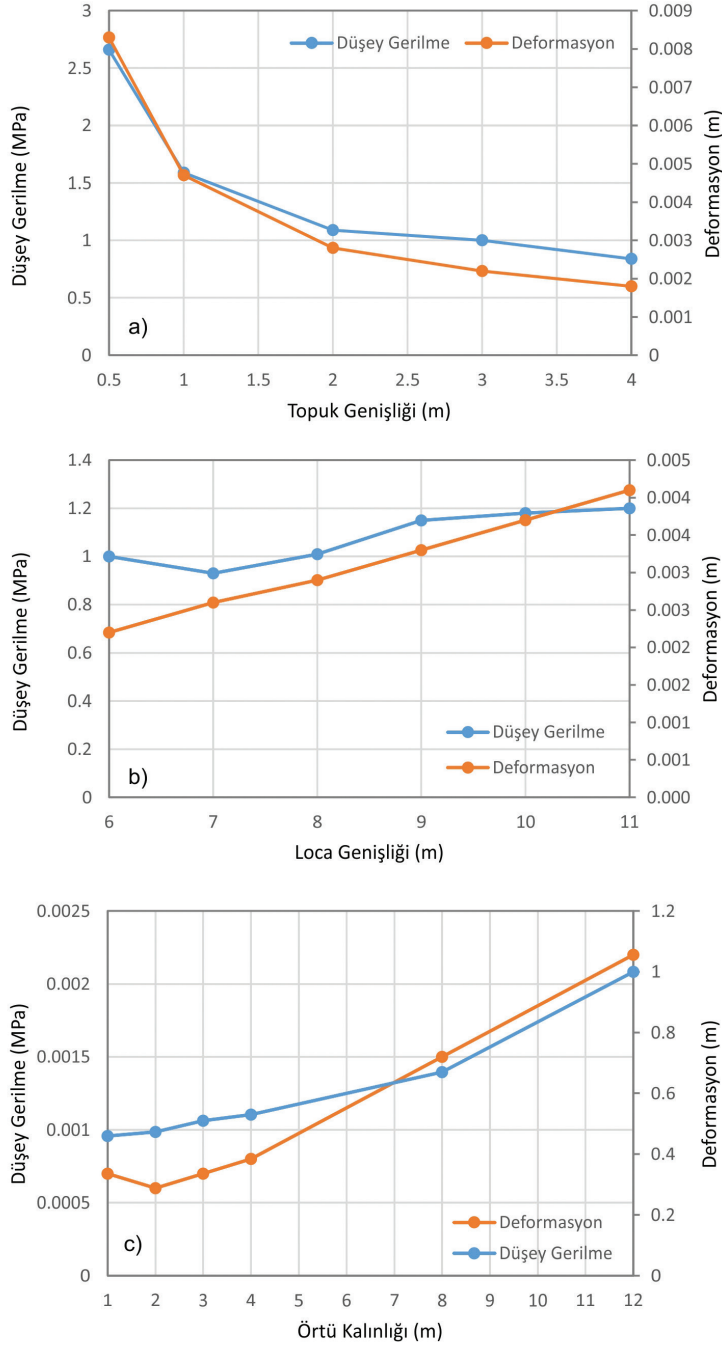
Figure 9. Variation of maximum stress and deformation in the middle section of the lodge roof based on overburden thickness variation.

Model Genelinde Oluşan Gerilme ve Deformasyonların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada farklı loca genişliği, topuk genişliği ve örtü kalınlığı gibi bazı tasarım ölçütleri için kaya oyma depoların jeo-mühendislik performansı sayısal analizler yardımıyla değerlendirilmiştir. Söz konusu farklı tasarım ölçütlerinde locaların tavan ortalarında oluşan maksimum düşey efektif gerilme ve toplam deformasyon değerleri önceki bölümde değerlendirilmiş olup, bu bölümde değerlendirilen modeller bünyesinde elde edilen maksimum düşey gerilme ve maksimum toplam deformasyon değişimleri değerlendirilmiştir (Şekil 10). Diğer bir ifadeyle, incelenen modelin herhangi bir noktasında elde edilen en yüksek değer bu bölümdeki değerlendirme kapsamında dikkate alınmıştır. Buna göre, Şekil 10a'da farklı topuk genişliklerinde modelin genelinde elde edilen maksimum düşey gerilme ve maksimum toplam deformasyon değerleri verilmiş olup, topuk genişliğinin artmasıyla birlikte gerilme ve deformasyon değerleri azalmaktadır. 2 metrelik topuk genişliğine kadar gerilme ve deformasyon değerlerindeki azalma oldukça sert bir şekilde gerçekleşirken, 2 metreden daha büyük topuk genişliklerinde bu değerlerdeki azalma daha düşük bir şekilde gerçekleşmektedir. Topuk genişliğinin 2 metreden daha az olduğu koşullarda ise maksimum gerilmeler topuklar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Buradan açık bir şekilde görülmektedir ki, mevcut koşullarda topuk genişliklerinin 2 metreden kalın olmasının sistemin duraylılığına ilave bir katkısı bulunmadığı gibi, gereğinden fazla bırakılacak topuk genişlikleri kaya oyma depolarda depolama kapasitesinin azalmasına neden olabilmektedir.

Şekil 10b'de loca genişliğinin gerilme ve deformasyon üzerindeki etkisi değerlendirilmiş olup, loca genişliğinin artışıyla, beklenildiği gibi maksimum düşey gerilme ve toplam deformasyon artmıştır. Loca genişliğinin 6 metreden 7 metreye çıkarılması, gerilme ve deformasyon değerlerinde ciddi bir değişikliğe neden olmamıştır. Ancak 7 metreden sonra gerilme ve deformasyon miktarlarındaki düzenli artış daha net bir şekilde gözlenmektedir.

2017 yılında çıkarılan "Kayadan Oyma Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğin 12 maddesi 1(a) fıkrasında örtü kalınlığı ile ilgili şu ifade yer almaktadır: "depo amaçlı kayadan oyma yapılar için minimum örtü kaya kalınlığı kayadan oyma yapı (açıklığın) genişliğinin yarısından az olamaz ve zayıf kayalarda örtü kaya kalınlığının en az 5 metre olması gerekir". Şekil 10c'den görüleceği üzere 4 metrelik örtü kalınlığına kadar gerilme ve deformasyon eğrilerindeki artış yataya yakın bir şekilde gözlenirken, 4 metreden daha fazla olan örtü kalınlıklarında gerilme ve deformasyon artışı daha yüksek olmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken esas konu, basınç gerilmesi artışından ziyade örtü kalınlığının az olması durumunda loca tavanlarında oluşan çekme gerilmeleridir. Şekil 9'dan da açık bir şekilde görüleceği üzere örtü kalınlığının 4 metrenin altında olması durumunda loca tavanlarında çekme gerilmeleri oluşmakta ve bu durum kaya oyma yapının duraylılığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında, kaya oyma depolarda localar üzerindeki optimum örtü kalınlığı 4 metre civarında olmalıdır. Bu durum, 2017 yılında yayınlanan yönetmelikle büyük ölçüde uyum göstermektedir.



Şekil 10. Modellerde meydana gelen maksimum gerilme ve deformasyon miktarlarının farklı koşullara göre değişimi
a) topuk genişliği, b) loca genişliği, c) örtü kalınlığı.

Figure 10. Variation of maximum stress and deformation values in the models based on different parameters, a) pillar width, b) lodge width, c) overburden thickness.

Kaya Oyma Depo Boyutlarının Mevcut Yönetmelik ve Farklı Tasarım Ölçütleri Doğrultusunda Değerlendirilmesi

Kapadokya bölgesinde açılan ve açılmakta olan kayadan oyma depoların genelinde, bu çalışmada göz önünde bulundurulduğu gibi 3 metrelik topuk genişliği yaygın olarak tercih edilmektedir. Topuk genişliğinin tasarımı noktasında 2017 yılında çıkan yönetmeliğin 12 maddesi 1(c) fıkrasında belirtilen ve Çizelge 1'de verilen tasarım ölçütleri tanımlanmıştır. Bu çalışmada göz önünde bulundurulan kaya oyma depo projesinde örtü kalınlığı 12.0 m olup, localar 6 m genişliğinde, 6.5 m yüksekliğinde, 23 metre uzunluğundadır. Localar arasında 3 m genişliğinde topuklar mevcuttur. Söz konusu proje için topuk genişliğinin Çizelge 1'de ve denklem (1)'de verilen koşula göre 2.60 ile 3.25 metre arasında olması gerekmektedir. Projede bu koşullar sağlanmış ve herhangi bir duraysızlık problemi yaşanmadan proje tamamlanmıştır.

$$\frac{2h}{5} < b < \frac{h}{2} \quad (1)$$

Bilindiği üzere oda-topuk yöntemi madencilikte yaygın olarak kullanılan bir üretim şekli olup, yöntemin esası güvenli topuk boyutlarının belirlenmesine dayanmaktadır. Mark (2006), ilk topuk tasarımlarının 1773 yılında Coulomb tarafından yapıldığını belirtmiş olup, daha sonra birçok bilimsel temele dayanan topuk tasarımları geliştirilmiştir (Salamon ve Munro, 1967; Obert ve Duvall, 1967; Logie ve Matheson, 1982; Bieniawski, 1992; Merve, 2003; Ren vd., 2020). Bu yaklaşımlarda topuğun taşıma kapasitesinin belirlenmesinde topuk üzerine gelecek yüke oranlanarak elde edilecek güvenlik katsayısı üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçları ve yönetmelikte geçerli olan koşulları karşılaştırmak için Bieniawski (1992) tarafından

önerilen genel/temel yaklaşım göz önünde bulundurulmuştur.

$$S_p = \sigma_c \left[0.64 + 0.36 \left(\frac{w_p}{h} \right) \right]^\alpha \quad (2)$$

Burada α sabit sayı (topuğun genişlik-yükseklik oranına göre belirlenmekte olup, genişlik-yükseklik oranı 5'den büyük ise 1.4, 5'den küçük ise 1.0 olarak alınır); S_p topuğun basınç dayanımı (MPa); W_p topuk genişliği (m); h topuk yüksekliği (m); σ_c tek eksenli basınç dayanımını (kütle, MPa) ifade etmektedir. Topuğun üzerine gelecek yük topuk madenciliğinde yaygın olarak kullanılan eş yüklü alan (tributary area) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Yavuz, 2001)

$$C_p = \gamma \cdot H \left[\frac{w_p + w_e}{w_e} \right] \quad (3)$$

Burada W_p topuk genişliği (m); W_e loca genişliği (m); H örtü kalınlığı (m) ve γ kaya birim hacim ağırlığını (MN/m^3) ifade etmektedir. Topuğun duraylılığının kontrolü için güvenlik katsayısı (G_s) aşağıdaki formül ile tanımlanmaktadır. Asgari güvenlik katsayısının 1.5 ile 2.0 arasında olması istenmekte olup, Bieniawski (1992) kısa süreli topuk tasarımında 1.5, kaya oyma depolar gibi uzun süreli topuk tasarımlarında ise 2.0 alınmasını önermiştir.

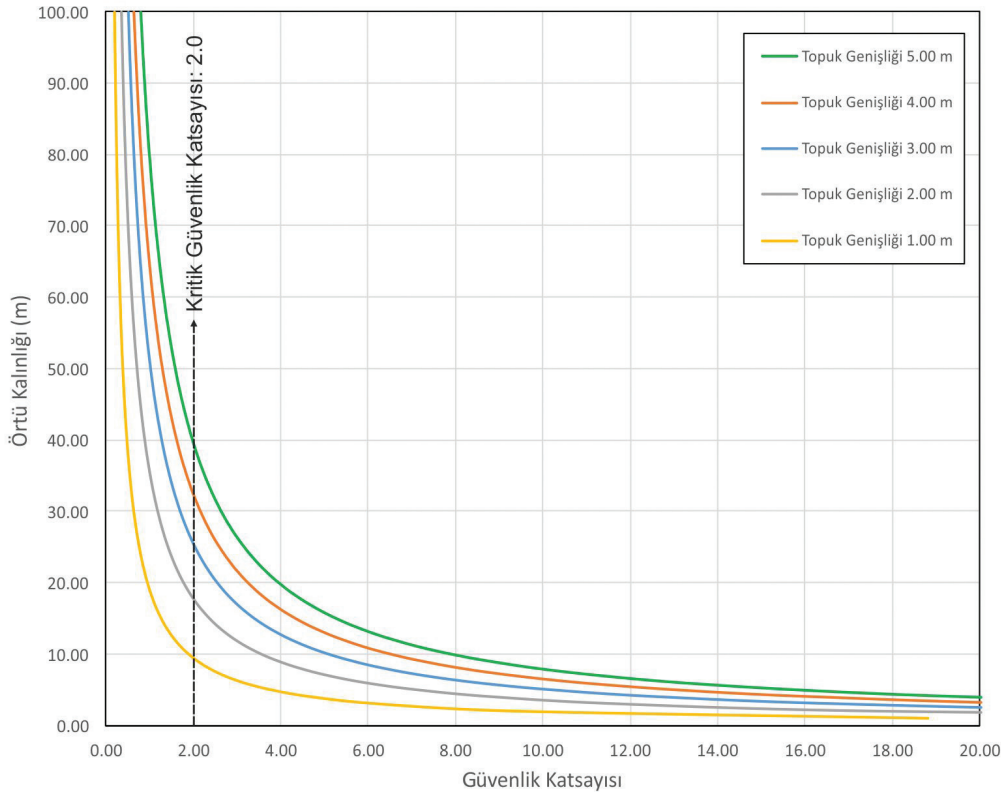
$$G_s = \frac{S_p}{C_p} \quad (4)$$

Bu çalışmada göz önünde bulundurulan kayadan oyma deponun mevcut projesi (12 m örtü kalınlığı, 6 m loca genişliği, 6.5 m loca yüksekliği, 23 m loca uzunluğu, localar arası 3 m topuk genişliği) Bieniawski (1992) yöntemine göre değerlendirilmiştir. Buna göre, topuğa gelecek gerilme ve topuğun dayanımı sırasıyla 0.54 MPa ve 2.29 MPa olarak hesaplanmış olup, güvenlik katsayısı 4.24'dür. Buna göre

3 metrelik topuk genişliği istenen güvenlik katsayısı koşullarını fazlasıyla karşılamaktadır.

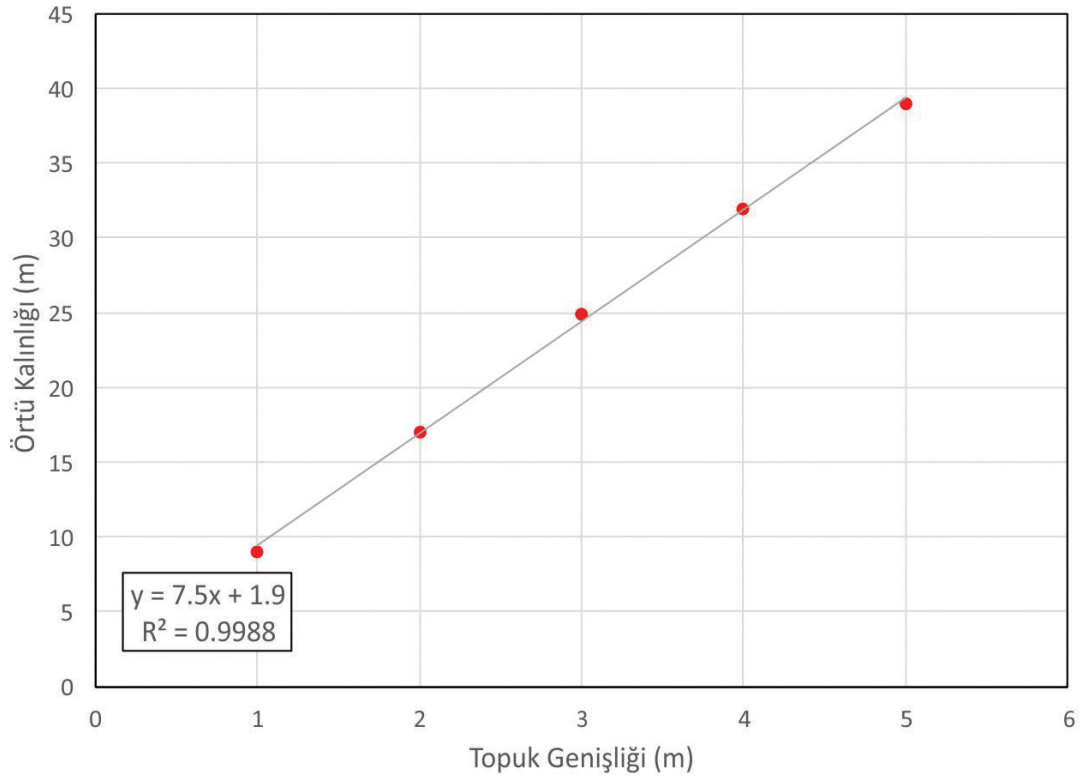
Bölgede kaya oyma depoların yapım koşulları incelendiğinde kaya dayanımı, kaya birim hacim ağırlığı ve loca genişlikleri çok fazla değişkenlik göstermezken, topoğrafik ve morfolojik koşullardan dolayı örtü kalınlığı bölgesel anlamda farklılık sunabilmektedir. Bundan dolayı topuk genişliğinin örtü kalınlığına karşı hassasiyetini ortaya koymak için farklı topuk genişlikleri için farklı örtü kalınlıklarının (0-100 m) sunacağı güvenlik katsayısı değerleri yukarıda belirtilen yaklaşım ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 11’de verilmiştir. Şekil 11’de görüleceği üzere topuk genişliği

örtü kalınlığına karşı hassasiyet göstermektedir. Asgari güvenlik katsayısı olarak 2 göz önünde bulundurulduğunda 3 metrelik topuk genişliği yaklaşık 25 metrelik örtü kalınlığına kadar asgari koşulları sağlamaktadır. Yine 2 metrelik topuk genişliği 17 metrelik örtü kalınlığına kadar asgari koşulları sağlamaktadır. Bu durum, Şekil 10a’da verilen grafik ile uyumluluk göstermektedir. Güvenlik katsayısının 2 olduğu durumda seçilen her bir loca genişliğine karşılık gelen örtü kalınlıkları karşılaştırıldığında korelasyon katsayısı (R) 0.99 olan doğrusal bir ilişki ($y=7.5x+1.9$) elde edilmiştir (Şekil 12). Bu ilişki bölgesel anlamda topuk tasarımında göz önünde bulundurulabilir.



Şekil 11. Farklı topuk genişliklerinde güvenlik katsayısının örtü kalınlığına göre değişimi.

Figure 11. Safety factor variation at different pillar width with respect to overburden thickness.



Şekil 12. Topuk genişliği ve örtü kalınlığı arasındaki ilişki.

Figure 12. Relationship between pillar width and overburden thickness.

SONUÇLAR

Kapadokya'nın önemli ekonomik değerleri arasında yer alan kayadan oyma depolar, 2017 yılına kadar bölgesel anlamda elde edilmiş olan tecrübe ışığında açılmıştır. Ancak, 18 Ekim 2017 tarihinde çıkarılan "Kayadan Oyma Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" ile bölgede yapılacak yeni kaya oyma yapıların tasarımı ile ilgili önemli bir eksiklik giderilmeye çalışılmıştır. İlgili yönetmeliğin 12-1 maddesinde kaya oyma depoların bazı tasarım ölçütleri tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında uygulamada yaygın olarak tercih edilen ve yönetmelikte tanımlanan

topuk genişliği, örtü kalınlığı ve loca genişliği gibi önemli tasarım parametreleri sayısal analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir.

Kayadan oyma depoların genellikle içerisinde açıldığı tuf ve ignimbiritler çok düşük birim hacim ağırlıklı, yüksek gözenekli ve çok düşük dayanımlı kaya sınıfında yer almaktadır. Söz konusu kayalar termal yalıtım ve kolay kazılabilirlik gibi özelliklerinden dolayı kaya oyma depolar açısından birçok avantaja sahip olmasına rağmen, kaya kütle özellikleri açısından zayıf-orta kaya niteliğindedir.

7 metreden daha geniş loca genişliklerinde maksimum düşey gerilme ve toplam deformasyon

değerlerinde keskin bir artış göze çarpmaktadır. Hatta loca genişliğinin 10 metreye çıktığı durumlarda sistem bir bütün (tek bir açıklık) gibi çalışarak kaya oyma deponun kenarlarında yer alan localarda çekme gerilmeleri oluşmaya başlamaktadır.

Kayadan oyma depoların üzerindeki yer alacak örtü kalınlığının 4.0 metreden az olması durumunda loca tavanlarında çekme gerilmeleri oluşmakta ve kaya oyma yapının duraylılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Bundan dolayı, bölgede açılacak olan kayadan oyma depolarda örtü kalınlığı 4 metreden az olmamalıdır. Bu durum, 2017 yılında çıkarılan yönetmelikle büyük ölçüde uyum göstermektedir.

2 metreden daha az topuk genişliğine sahip localar şeklinde tasarlanan kaya oyma depolar, tek bir açıklık gibi davranmakta ve bundan dolayı orta bölümde yer alan localarda deformasyon miktarları kenarlara göre daha fazla olmaktadır. Kenarlarda yer alan loca tavanlarında meydana gelen toplam deformasyon 3 mm civarında gerçekleşirken, orta bölümdeki localarda bu değer 8.3 mm'ye kadar çıkmaktadır. Buna karşın, 2 metreden daha kalın topuk genişliklerinde her bir locanın tavanında oluşan deformasyon değerleri sabit kalıp, her bir loca ayrı bir açıklık gibi davranmaktadır. Bu durumda tüm localarda 2 ile 3 mm arasında değişen toplam deformasyonlar gözlenmiştir.

Bu çalışmada göz önünde bulundurulmuş kaya oyma depo projesi için topuk genişliğinin ilgili yönetmeliğe göre 2.60 ile 3.25 metre arasında olması gerekmektedir. Projede bu koşul sağlanmış ve herhangi bir duraysızlık problemi yaşanmadan proje tamamlanmıştır. Yine bu proje için, madencilikte kullanılan topuk tasarım tekniği göz önünde bulundurulduğunda topuğa gelecek gerilme ve topuğun dayanımı sırasıyla

0.54 MPa ve 2.29 MPa olarak hesaplanmış olup, güvenlik katsayısı olarak 4.24 gibi güvenli koşulları fazlasıyla karşılayan bir değer elde edilmiştir. Topuk genişliklerinin gereğinden fazla olmasının sistemin duraylılığına ilave bir katkısı bulunmadığı gibi kaya oyma depolarda depolama kapasitenin azalmasına ve dolayısıyla ekonomik kayıplara neden olabilmektedir.

Bölgede kaya oyma depoların yapım koşulları incelendiğinde, kayanın kütle ve malzeme özellikleriyle birlikte loca genişlikleri çok fazla değişkenlik göstermezken, topoğrafik ve morfolojik koşullardan dolayı örtü kalınlığı bölgesel anlamda farklılık sunabilmektedir. Bundan dolayı topuk genişliğinin örtü kalınlığına karşı hassasiyetinin daha önemli olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda, optimum güvenlik katsayısını (2) sağlayacak topuk genişliği tasarımı için topuk genişlikleri 2 metreden az olmayacak şekilde, Topuk Genişliği=(Örtü Kalınlığı-1.9)/7.5 ilişkisi kullanılabilir. Uygun olmayan topuk ve loca genişliklerinde deformasyonlar deponun ortasında yer alan localarda artmakta ve deponun tamamı tek bir açıklık gibi davranmaktadır. Kaya oyma depolar localar şeklinde planlandığından söz konusu yapıların tasarımında en önemli nokta locaların ayrı birer açıklık gibi davranmasının sağlanmasıdır. Bu koşul ancak uygun loca ve topuk genişliklerinin planlanmasıyla sağlanabilir. Tüm bu koşullar göz önünde bulundurulduğunda, 2017 yılında çıkarılan yönetmelikte topuk genişliğinin belirlenmesinde önerilen tasarım ölçütlerinin oldukça tutucu sonuçlar verdiği görülmektedir. Bundan dolayı her bir kaya oyma depo projesi için mevcut mühendislik jeolojisi koşulları göz önünde bulundurularak topuk tasarımının yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aydan, Ö., Ulusay, R., 2003. Geotechnical and geo-environmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 6, 245-272.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., 2013. Geomechanical evaluation of Derinkuyu Antique Underground City and its implications in geoengineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 731-754.
- Aydar, E., Schmitt, A.K., Çubukçu, H.E., Akin L., Ersoy, O., Şen, E., Duncan, R.A., Atici G., 2012. Correlation of ignimbrites in the central Anatolian volcanic province using zircon and plagioclase ages and zircon compositions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213–214, 83-97.
- Berndt-Ersöz, S., 2006. Phrygian rock-cut shrines: Structure, Functional Cult Practice. *LeidenXX*, XXI, 206.
- Bieniawski, Z.T., 1992. Method revisited: coal pillar strength formula based on field investigations. In: *Proceedings of the workshop on coal pillar mechanics and design*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, IC 9315, Pittsburgh, PA, 158–165.
- Çorakbaş, F., 2012. The comparison of rock-cut architecture sites in Turkey and Italy with special emphasis on Cappadocia. *World Applied Sciences Journal*, 17(11),1445-1453.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties of intact rock. Technical Report No: AFNL-TR-65-116, Kirtland Air Force Base Weapons Laboratory, New Mexico.
- Dinçer, İ., Bostancı, M., 2019. Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration. *Environmental Earth Sciences*, 78, 7.
- 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.
- Harunoğulları, M., Kayar, S., 2015. Ortahisar'da (Ürgüp) doğal soğutmalı yeraltı depolarının coğrafi analizi. *Coğrafyacılar Derneği Uluslararası Kongresi Bildiriler Kitabı*, 21-23 Mayıs 2015, 74-84, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium*, vol 1, Toronto, 267–273.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization. In: Ulusay R, Hudson JA (eds), *Testing and Monitoring: 1974–2006*.
- Kaşmer, Ö., Ulusay, R., 2013. Effects of geo-engineering characteristics of the soft tuffs and environmental conditions on the rock-hewn historical structures at Zelve Open Air Museum (Cappadocia, Turkey). *Environmental and Engineering Geosciences*, 19(2), 149–171.
- Logie, C.V., Matheson, G.M., 1982. A critical review of the current state of the art design of mine pillars. *1st International Conference Stability in Underground Mining*. Vancouver (Ed. C.O. Brawner) 359-382.
- Mark, C., 2006. The evolution of intelligent coal pillar design: 1981- 2006. *Proceedings of 25th International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, West Virginia, 325-334.
- Merve, J. N., 2003. New pillar strength formula for South African coal. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 103(5), 281-292.
- NBG, 1985. Norwegian Rock Mechanics Group: *Handbook in Engineering Geology—rock* (in Norwegian). Tapir, Trondheim.
- Obert, L., Duvall, W.I., 1967. *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*, John Wiley & Sons Inc., New York, 542-545.
- Özata, Ş., 2015. Kapadokya bölgesi kaya oyma yapı sorunları ve çözüm önerileri. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 160 s.

- Ren, Q., Wang, F., Chen, B., Zhao, M., Peng, Z., Yang, M., 2020. Study on stability prediction of pillars based on Bieniawski Pillar Strength Formula: a case of a phosphate mine. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4033-4044. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01275-9>.
- Rocscience, 2019a. RS2, 2D finite element program for soil and rock applications. Rocscience Inc, Toronto, Canada.
- Rocscience, 2019b. RocData, Rock, soil and discontinuity strength analysis. Rocscience Inc, Toronto, Canada.
- Salamon, M.D.G., Munro, A.H., 1967. A study of the strength of coal pillars. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 68, 55-67.
- Sülükçü, S., 2019. Kapadokya Bölgesi'ndeki kayadan oyma yeraltı depolarının duraylılığının değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- T.C. Resmi Gazete, 2017. Kayadan Oyma Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, 18 Ekim 2017. Sayı: 30214. Başbakanlık Basımevi, Ankara.
- Temel, A., 1992. Petrological and geochemical properties of the Cappadocian explosive volcanism. PhD Thesis, Department of Geological Engineering, Hacettepe University, Ankara.
- Topal, T., 1995. Formation and deterioration of fairy chimneys of the Kavak tuff in Ürgüp-Göreme area (Nevşehir-Turkey). PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Topal, T., Doyuran, V., 1995. Effect of discontinuities on the development of fairy chimneys in the Cappadocia region (Central Anatolia-Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 4(1), 49-54.
- Topal, T., Doyuran, V., 1997. Analysis of deterioration of the Cappadocian tuff. *Environmental Geology*, 34(1), 5-20.
- Toprak, V., Keller, J., Schumacher, R., 1994. Volcano-tectonic features of the Cappadocian Volcanic Province. In: *International Volcanological Congress-IAVCEI, Ankara, Excursion Guide*.
- Tuncay, E., 2009. Rock rupture phenomenon and pillar failure in tuffs in the Cappadocia region (Turkey). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 1253-1266.
- Ulusay, R., Aydan, Ö., 2018. The 2016 Hans Cloos Lecture: geo-engineering aspects on the structural stability and protection of historical man-made rock structures: an overview of Cappadocia Region (Turkey) in the UNESCO's World Heritage List. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 457.
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Geniş, M., Tano, H., 2013. Stability assessment of Avanos Congress Centre (Cappadocia, Turkey) in soft tuffs through an integrated scheme of rock engineering methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 1303-1321.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Topal, T., Sönmez, H., Tuncay, E., Ergüler, Z.A., Kasmer, Ö., 2006. Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Ürgüp (Cappadocia), Turkey. *Environmental Geology*, 50(4), 473-449.
- Yavuz, H., 2001. Yielding pillar concept and its design. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey- MCET 2001, ISBN 975-395-417-4.
- Zhu, X., Liu, J., Yang, L. Hu, R., 2014. Energy performance of a new Yaodong Dwelling, in the Loess Plateau of China. *Energy and Buildings*, 70, 159-166.



Araştırma Makalesi / Research Article

Güdül (Ankara) Yöresi Zeminlerinin Şişme Özelliklerinin Değerlendirilmesi Evaluation of Swelling Properties of Soils in Güdül (Ankara) Area

Rıza SOYPAK¹ , Ali KAYABAŞI² 

¹ Ankara Büyükşehir Belediyesi, İmar ve Şehircilik Dairesi Başkanlığı, 06430 Ankara

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir

Geliş (Received): 02 Kasım (November) 2019 / Düzeltme (Revised): 22 Haziran (June) 2019 / Kabul (Accepted): 20 Temmuz (July) 2020

ÖZ

Bu çalışmada, Ankara'nın ilçesi Güdül'deki 1 ile 3 katlı binalarda oluşan çatlaklar ve sıva dökülmelerinin nedenini belirlemek için Güdül ve çevresinde yüzeyleyen ince taneli zeminlerin şişme özellikleri çalışılmıştır. Derinlikleri 5 m ile 15 m arasında değişen 19 adet sondaj kuyusu açılmıştır. SK-1, SK-5, SK-9 ve SK-16 kuyuları dışında yeraltısuyuna rastlanılmamıştır. Sondajlardan 21 adet SPT örneği ile 30 adet bozulmamış zemin örneği alınmıştır. Bu örnekler üzerinde sınıflama, indeks deneyleri, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. SPT deneylerinde N_{60} değerleri 12 ile 49 arasında değişirken, ortalama darbe sayısı 25 olarak belirlenmiştir. Plastisite abasında zemin örneklerinin %59'u düşük plastisiteli kil (CL)-düşük plastisiteli silt (ML) veya düşük plastisiteli organik malzeme (OL), %41'i ise yüksek plastisiteli kil (CH)-yüksek plastisiteli organik malzeme (OH) veya yüksek plastisiteli silt (MH) olarak belirlenmiştir. Ortalama şişme basıncı 45.83 kPa ve en yüksek şişme basıncı 111.29 kPa'dır. Elde edilen deneysel verilere göre Güdül ve çevresi içinde kil zeminlerin aktivite, şişme potansiyeli, şişme basıncı haritaları hazırlanmıştır. Emirler Mahallesi civarında aktivite 0.5 civarında iken yaklaşık 5 km kuzeydeki Yeni Mahalle civarında 1.4 değerindedir. Aynı şekilde şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerleri sırasıyla Emirler Mahallesi civarında % 1.5 ve 25 kPa, iken Yeni Mahalle civarında % 6 ve 65 kPa'dır. 17 nolu sondaj kuyusunun bulunduğu lokasyon haricinde şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde güneyden kuzey yönüne doğru belirgin bir artış izlenmektedir. Temel zeminlerinin su ile teması durumunda oluşacak şişme basıncı, 1-3 katlı yapılar için risk oluşturabilecektir.

Anahtar kelimeler: Güdül, Şişme yüzdesi, Şişme Basıncı, Çatlak, Sıva dökülmesi

ABSTRACT

In this study, swelling properties of fine grained soils that surfacing around Güdül and its environments were studied in order to determine causes of cracks and plaster spills on 1 and 3 storey buildings in Güdül district of Ankara. 19 boreholes with a depth of 5 m to 15 m were drilled. Groundwater was not observed except BH-4, BH-9 and BH-16. 21 standard penetration test samples and 30 undisturbed soil samples were taken from these boreholes. Swelling pressure tests, swelling percent tests, soil classification and index tests were carried out with these samples. The SPT N_{60} blow counts from which samples were taken are ranging between 12 and 49 and the mean average N_{60} values are determined as 25 blow counts. %59 of the soil samples are determined as low plastic clay (CL) low plastic silt (ML) or low plastic organic material (OL). %41 of the soil samples are determined as high plastic clay (CH)- High plastic organic material (OH) or high plastic silt (MH). The mean swelling pressure is 45.83 kPa and the highest swelling pressure is 111.29 kPa determined from the swelling pressure tests. Activity, swelling potential, swelling pressure maps of Güdül and its surrounding were prepared. While the activity of soil is 0.5 around the Emirler district, the activity of the soils is 1.4 around Yeni district which locates 5 km north of Emirler district. Likewise, the swelling potential and swelling pressure values are 1.5% and 25 kPa around Emirler district, while

6% and 65 kPa around Yeni district. Except for the location of BH-17, there is a significant increase in swelling percentage and swelling pressure values from south to north direction. If the foundation soils interact with water, swelling pressure may cause risk for 1-3 storey buildings.

Keywords: *Güdül, Swelling percent, Swelling pressure, Cracks, Plaster spills*

GİRİŞ

İnce taneli zeminlerin su ile teması sonrasında hacimlerinin artması yapılar için sorun oluşturmaktadır. Zemin kabarması ve zemin oturması sorunları dünyada kurak ve yarı kurak bölgelerde izlenmektedir (Chen, 1975). Yapı temellerinin yer aldığı zeminlerin oluşturabileceği şişme basıncı (SP) yapının temel zeminine aktardığı basıncı aşarsa, yapıda sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yapı temelinin yer alacağı zemin birimlerinin şişme parametrelerinin bilinmesi ve buna göre yapı tasarımının yapılması önemlidir. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de şişen zeminlerden kaynaklı sorunlar oluşmaktadır. Ankara ve çevresinde yüzeyleyen killi birimlerin şişme potansiyeli nedeniyle yapılarda sorun oluşturabilmektedir. Ankara ili, Güdül ilçesi yerleşim alanındaki binalarda izlenen çatlak oluşumları, bu çalışmanın yapılmasının en önemli nedeni olmuştur (Şekil 1).

Killerin şişme potansiyeli ve şişme basıncının araştırılması konusunda literatürde pek çok makaleye rastlanılmaktadır (Chen, 1988; Abduljauwad, 1993; Abduljauwad ve Al-Suleiman, 1997; Li ve Du, 1997; Bonner ve Shakoor, 1998; Al-Rawas, 1999; Du vd., 1999; Basma vd., 1995; Ergüler ve Ulusay, 2003; Pusch ve Yong, 2006; Yılmaz, 2006; Murray, 2007; Toksöz ve Yılmaz, 2019; Türköz, 2019). White (1949)'da yüksek likit limit ve plastisitenin, yüksek şişen zemin anlamına geldiğini ifade etmiştir. Plastisite indeksi (PI), katyon değişim kapasitesi (CEC), su içeriği (w), kil içeriği miktarı, şişme basıncı ve şişme yüzdesini belirleyen faktörlerdir (Gill ve Reaves, 1957; Parker vd., 1977; El-Sohby ve El-Sayed, 1981).

Zeminlerin şişme özellikleri değişik yöntemlerle belirlenebilir. Örneğin likit limit (LL) (Chen, 1975; O'Neil ve Poormaayed, 1980), plastisite indeksi (PI) (Chen, 1975; Holtz ve Gibbs, 1956), Büzülme limiti (SL) (Holtz ve Gibbs, 1956; Seed vd., 1962) değerlerinden yola çıkarak zeminlerin şişme potansiyeli bulunabilir. Van Der Merwe (1964) de kil miktarı ve PI kullanarak hazırladığı bir grafik ile killerin şişme potansiyelinin düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak sınıflandırmıştır.

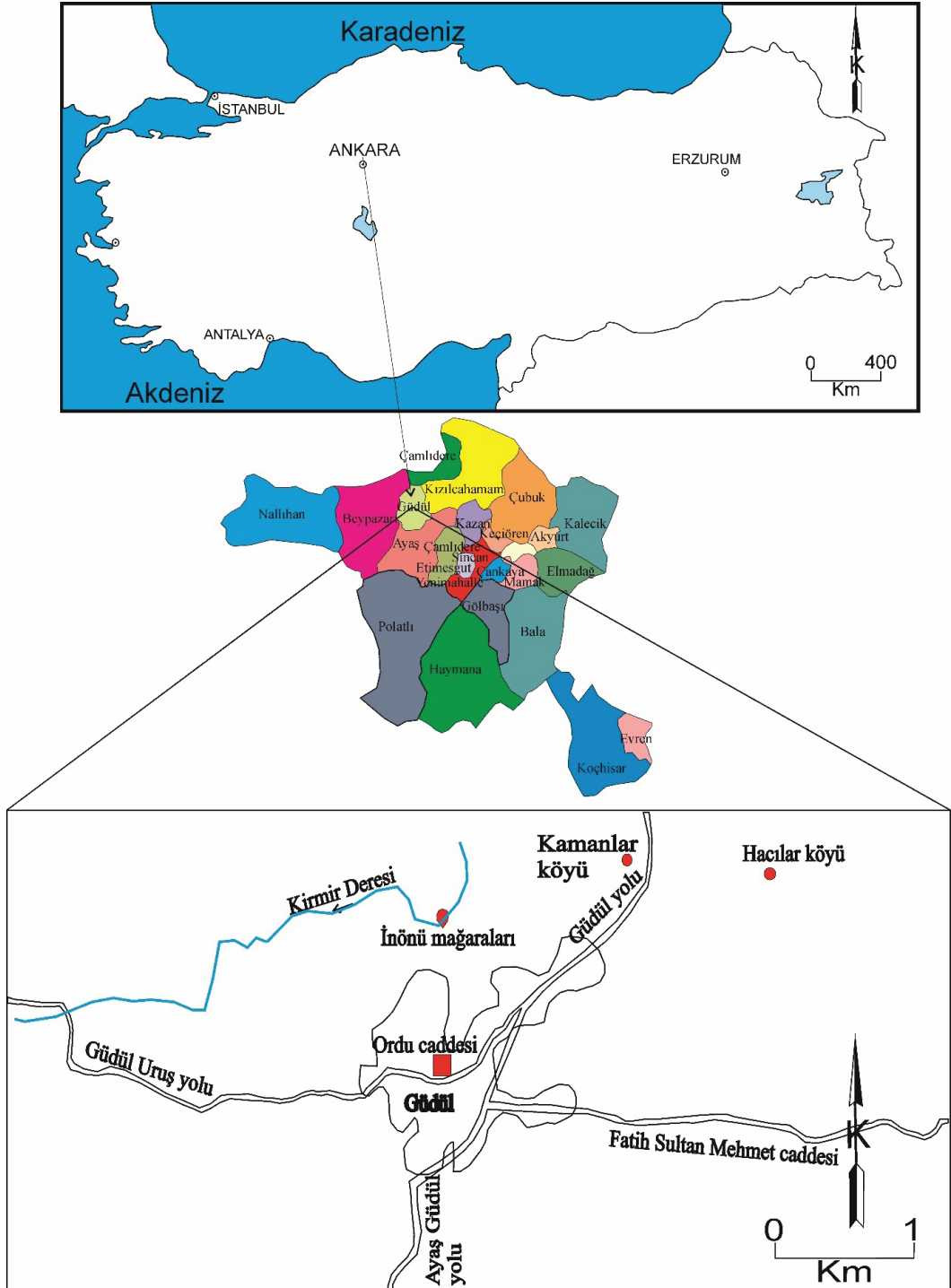
Ankara ve çevresinde yüzeyleyen killerin şişme potansiyeli (%S) pek çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Birand, 1963; Ordemir vd., 1965; Doruk, 1968; Omay, 1970; Uner, 1977; Kiper, 1983; Kılıç ve Demirtaş, 1989; Furtun, 1989; Kılıç, 1990; Çokca, 1991; Kasapoğlu, 2000; Ergüler ve Ulusay, 2003; Kılıç vd., 2006; Ulaş ve Kılıç, 2012; Kılıç vd., 2015). Bu çalışmaların sonuçlarına göre mineralojik yapısı nedeniyle Ankara ve çevresindeki bazı killerin orta-yüksek şişme potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada Ankara ili, Güdül ilçesi yerleşim yerlerini oluşturan zemin birimlerinin jeoteknik özellikleri araştırılmıştır (Şekil 2). Bu amaçla derinlikleri 5 m ile 15 m arasında değişen 19 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde indeks özelliklerini ve şişme potansiyelini belirlemek için laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Belirlenen deney sonuçları, literatürde yaygın olarak karşılaşılan şişme potansiyelinin tespitine yönelik olarak geliştirilmiş olan abak ve eşitlikler yardımıyla değerlendirilmiş ve yerleşim alanındaki zeminlerin şişme potansiyeli incelenmiştir.



Şekil 1. Güdül yerleşim alanındaki binalarda izlenen çatlak oluşumları.
Figure 1. Crack formations observed on buildings in Güdül settlement area.

Soypak, Kayabaşı



Şekil 2. Güdül yerleşim yeri haritası.

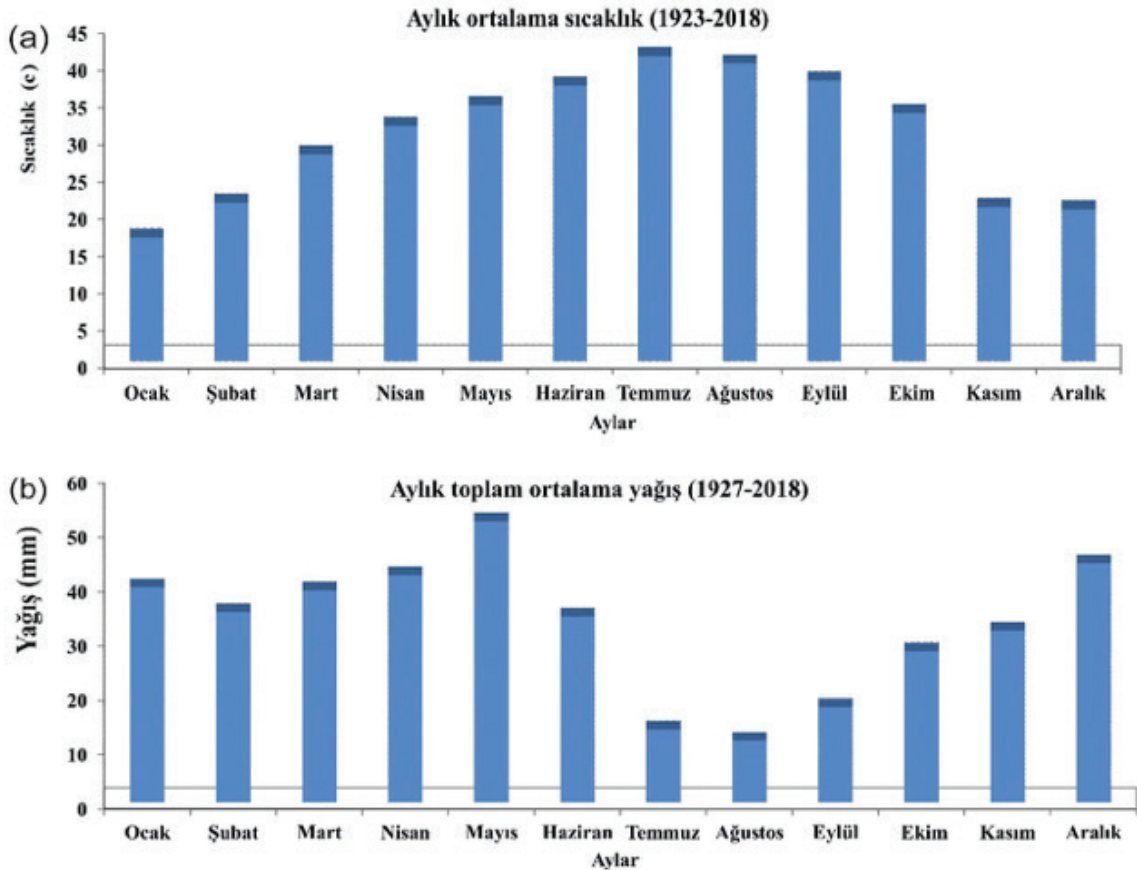
Figure 2. Location map of Güdül settlement area.

ÇALIŞMA ALANI ÖZELLİKLERİ

Güdül, Ankara'nın 93 km kuzey batısında yer alan bir ilçedir. 2018 nüfus sayımına göre Güdül'ün nüfusu 10.074 kişidir. Güdül 40° 12' ile 40° 13' Kuzey enlemleri ile 32° 14' ile 32° 15' doğu boylamları arasında yer alır. Güdül ve çevresi düşük sıcaklıkta, yağışlı ve karlı kışlar geçirirken, yazlar az yağışlı ve kurak geçer. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1923 yılı ile 2018 yılı arasında aldığı kayıtlara göre en yüksek sıcaklık ortalaması Ağustos ayında (40°), en düşük sıcaklık ortalaması Ocak ayında

(16.6°) ölçülmüştür. Ortalama en fazla yağış ise Eylül ayında gerçekleşirken (85.5 mm) en düşük ortalama yağış Ağustos ayında gerçekleşmiştir 29 mm (Şekil 3). Güdül yerleşim alanı düz bir topoğrafik alanda yer almaktadır (Şekil 4a). Yerleşim alanı eğimi 0.00° ile 10.00° arasında değişirken, yerleşim alanının denizden yüksekliği 650 m civarındadır (Şekil 4b).

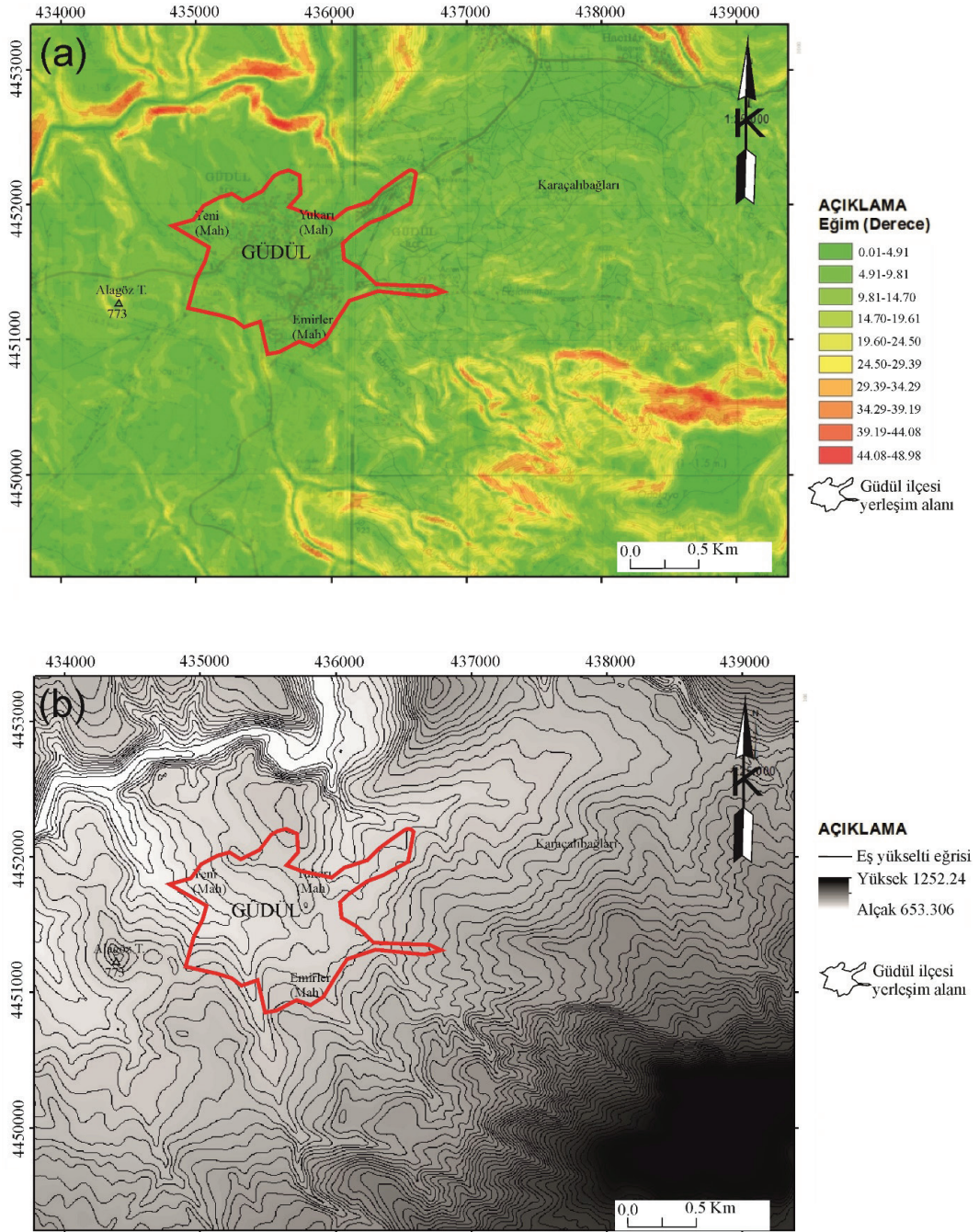
Yerleşim alanı eğimi 0.00° ile 10.00° arasında değişirken yerleşim alanının denizden yüksekliği 650 m civarındadır (Şekil 4b).



Şekil 3. a) 1923-2018 yılları arası Güdül yöresi aylık ortalama sıcaklık grafiği b) 1927-2018 yılları arası Güdül yöresi aylık ortalama yağış grafiği (MGM, 2019).

Figure 3. a) Mean annual temperature graph of Güdül area between 1923 and 2018 b) mean annual precipitation graph of Güdül area between 1927 and 2018 (MGM, 2019).

Soypak, Kayabaşı



Şekil 4. a) Güdül yerleşim alanı ve çevresi eğim haritası b) Güdül yerleşim alanı ve çevresi eş yükselti haritası.

Figure 4. a) Slope gradient map of Güdül settlement area and its vicinity b) Topographic contour map of Güdül settlement area and its vicinity.

İNCELEME ALANI VE ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Güdül ve çevresinde en yaşlı birim Deveören volkanitleridir. Deveören volkanitleri dasit ve andezit lavları ile tüf ve aglomeralardan oluşur, Alt-Orta Miyosen yaşlıdır (Türkecan vd., 1991). Deveören volkanitleri üzerinde Bakacaktepe volkanitleri yer alır. Bakacaktepe volkanitleri de Alt-Orta Miyosen yaşlıdır (Türkecan vd., 1991). Bakacaktepe volkanitleri dasit, andezit ve piroklastiklerden oluşur. Güdül ve çevresindeki yerleşim alanlarının çoğunluğu Uruş Formasyonu üzerinde yer alır. Uruş Formasyonu konglomera, kumtaşı, kiltası, kireçtaşı ve jipsten oluşur. Uruş Formasyonu Üst Miyosen yaşlıdır (Türkecan vd.,1991). Güdül ilçesi yerleşim alanı Uruş Formasyonu litolojik birimlerinin ayrışmasından oluşmuş az çakıllı kumlu killi toprak örtüsünden oluşmaktadır. Yöredeki en genç birim olan alüvyon ise akarsu yataklarındaki çakıl, kum ve kil çökelleridir (Şekil 5).

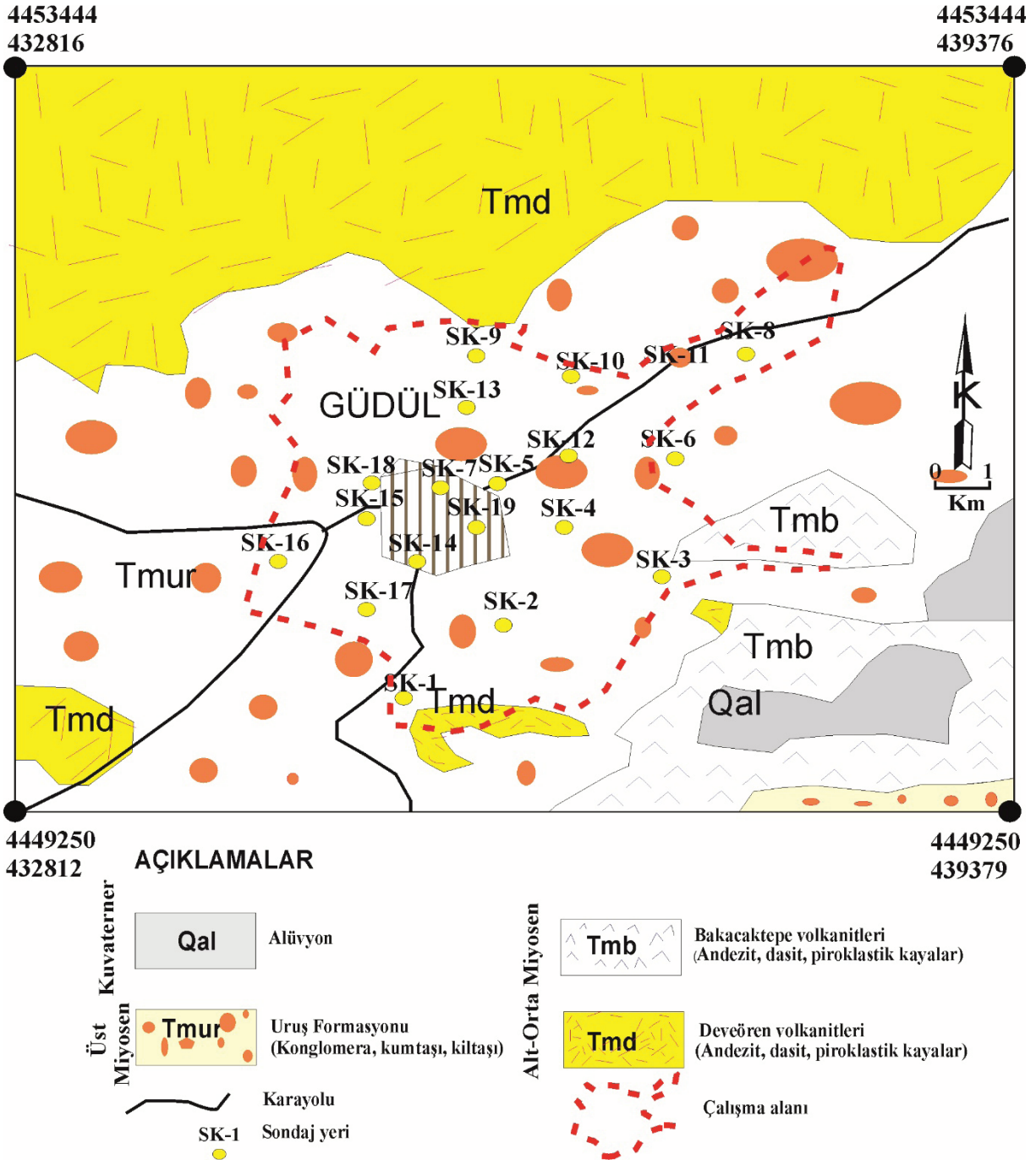
ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu çalışma kapsamında inceleme alanında toplam uzunluğu 239.0 m olan 19 adet sondaj kuyusu Ankara Büyükşehir Belediyesi tarafından açtırılmıştır (Şekil 6). Sondajlarda sarımsı beyaz, açık kahve, gri beyaz renkli, sıkı, az çakıllı-kumlu kil birimi geçilmiştir. Çakıl tane boyu ortalama 3 cm civarındadır. Çakıllar yarı yuvarlak-yarı köşelidir. Çakıl ve kum taneleri andezit kökenlidir.

Bu birimler Uruş Formasyonunun ayrışması sonucu oluşmuştur. Ayrışmanın az olduğu SK-8 ve SK-11 nolu kuyularda kiltası birimi kesilmiştir. SK-10 nolu kuyuda ise 2 m derinliğe kadar geçilen az çakıllı-kumlu kil biriminden sonra Deveören volkanitlerinin andezit birimi kesilmiştir. SK-1 nolu kuyuda 7m’de, SK-5 nolu kuyuda 10 m’de, SK-9 nolu kuyuda 3.0 m’de ve SK-16 nolu kuyuda 9.0m’de yeraltısuyu seviyesi belirlenirken diğer kuyularda yeraltısuyu yoktur. Sondaj kuyularında 110 adet SPT deneyi yapılmış, 21 adet SPT örselenmiş zemin örneği (D) ve U_{100} tüpü ile 30 adet örselenmemiş zemin örneği (UD) alınmıştır (Şekil 6).

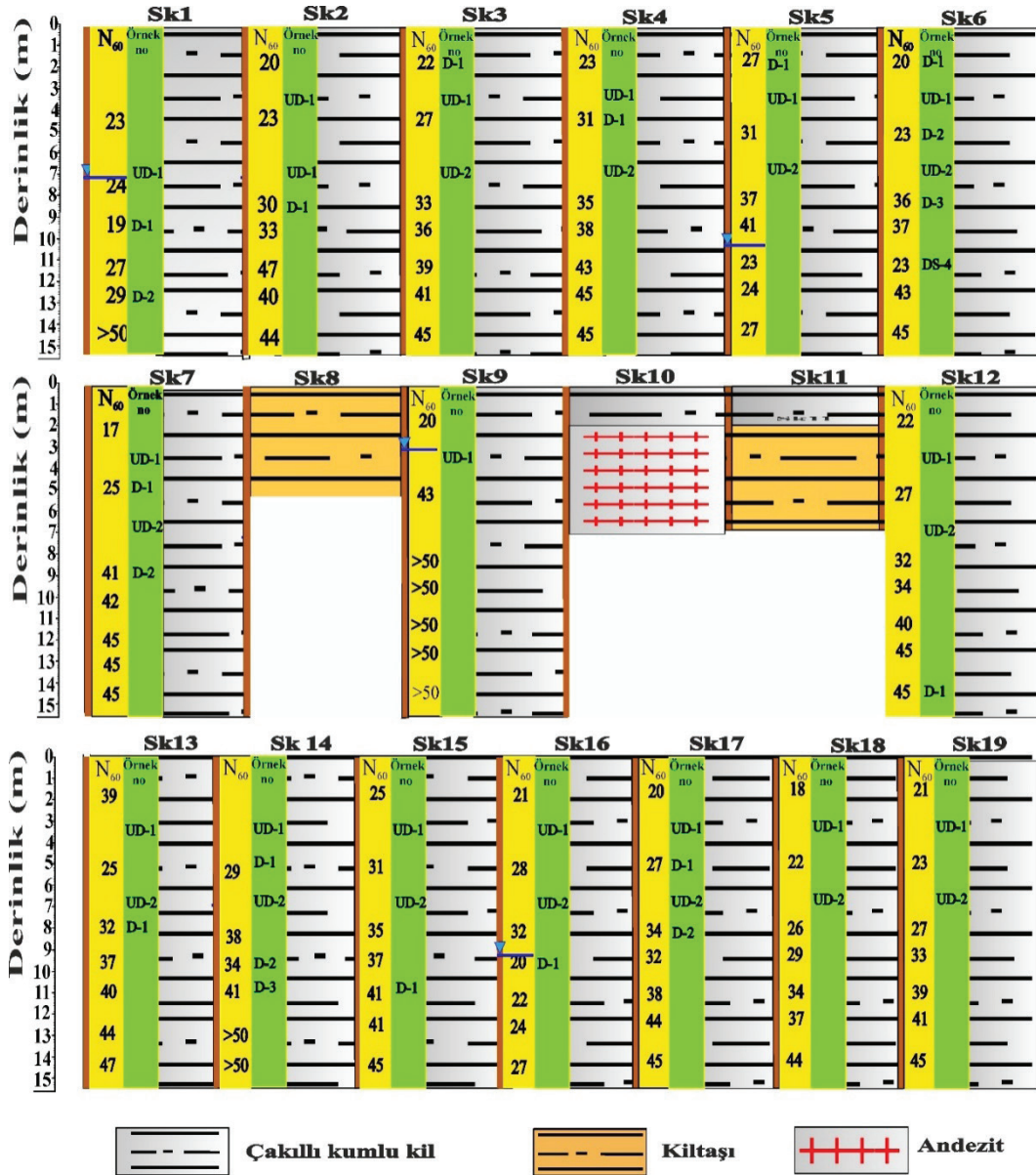
Örneklerin ıslak analiz ile tane boyu dağılım, doğal birim hacim ağırlığı (γ_n), doğal su içeriği (W_n), likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indeksi (PI), şişme basıncı (SP) ve şişme yüzdesi (S) belirlenmiştir. Tane boyu dağılım analizleri ASTM 421 (2018) ve ASTM 422 (2018), doğal birim hacim tayini ASTM D 7263 (2018), doğal su içeriği ASTM (2018), Atterberg limitleri tayini ASTM D 4318 (2018), şişme yüzdesi ve şişme basıncı tayini deneyleri ASTM D 4546 (2018) B ve ASTM D 4546 C (2018) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Alınan örneklerin zemin sınıflandırması Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre yapılmıştır (ASTM D2487, 2018). Çizelge 1’de zemin sınıflandırma, indeks özellikleri ve şişme özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan deneylerin toplu sonuçları verilmiştir.

Soypak, Kayabaşı



Şekil 5. Güdül yöresi jeoloji haritası (Türkecan vd., 1991'den değiştirilerek alınmıştır).

Figure 5. The geologic map of Güdül area (Modified from Türkecan et al., 1991).



Şekil 6. Sondaj kuyularının basitleştirilmiş tanımı.

Figure 6. Simplified description of the boreholes.

Soypak, Kayabaşı

Çizelge 1. Zemin sınıflandırması, indeks ve şişme özellikleri deneyleri sonuçları.
Table 1. Soil classification, test results of index and swelling properties.

Sondaj kuyusu no	Derinlik (m)	Örnek no	Çakal	Kum	Silt	Kil	Wn (%)	γ_s (kN/m ³)	LL (%)	PI (%)	Ac	Zemin sınıfı	S (%)	SP (kPa)
SK-1	6.00-6.50	UD-1	21.60	20.10	22.60	35.70	17.60	18.14	42.60	29.24	0.82	CL	2.33	28.04
SK-1	9.00-9.45	SPT-3	17.50	38.30	25.20	19.00	14.80	18.14	39.90	11.47	0.60	SC	2.40	28.69
SK-1	12.0-12.45	SPT-5	19.60	42.90	07.82	29.78	19.10	18.14	38.30	17.40	0.58	SC	2.30	27.72
SK-2	3.00-3.50	UD-1	00.00	00.00	60.26	39.64	18.30	18.24	42.60	27.63	0.70	CL-OL	1.42	19.22
SK-2	6.00-6.50	UD-2	00.00	02.40	72.95	24.65	22.20	18.24	44.80	21.00	0.85	CL	3.64	41.01
SK-2	7.50-7.95	SPT-3	01.30	10.30	32.44	55.96	18.60	18.24	45.10	22.20	0.40	CL	1.36	18.63
SK-3	1.50-1.95	SPT-1	09.70	12.90	52.70	24.70	19.20	18.63	38.60	11.64	0.47	ML-OL	1.73	22.11
SK-3	3.50-3.95	UD-1	07.40	12.40	49.63	30.57	17.70	18.63	42.00	27.27	0.89	CL	2.14	26.15
SK-3	6.00-6.50	UD-2	10.20	21.40	38.15	30.25	18.00	18.63	37.70	09.08	0.30	ML-OL	2.20	26.77
SK-4	3.00-3.50	UD-1	00.00	07.90	64.45	27.65	19.00	18.04	46.30	18.80	0.68	ML-OL	2.78	32.46
SK-4	4.50-4.95	SPT-2	00.00	11.40	53.80	34.80	26.30	18.04	45.20	29.34	0.84	ML-OL	2.63	31.06
SK-4	6.00-6.50	UD-2	00.00	09.80	67.00	23.20	24.40	18.04	44.90	16.80	0.72	CL-OL	3.00	34.66
SK-5	3.00-3.50	UD-1	16.40	35.00	14.62	33.98	24.20	17.36	35.10	21.75	0.64	SC	1.51	20.10
SK-5	1.50-1.95	SPT-1	15.20	40.30	04.60	39.90	19.00	18.44	33.80	11.10	0.28	SC	0.77	12.52
SK-5	6.00-6.50	UD-2	02.80	18.60	54.08	24.52	21.60	18.44	46.10	21.10	0.86	CL	3.68	41.43
SK-6	1.50-1.95	SPT-1	00.00	05.30	68.40	26.30	32.10	18.83	56.90	37.96	1.44	CH	6.59	70.37
SK-6	3.00-3.50	UD-1	00.00	10.80	66.59	22.61	26.40	18.83	52.30	22.70	1.00	MH-OH	4.40	48.56
SK-6	4.50-4.95	SPT-2	00.00	12.10	70.85	17.05	31.30	18.83	60.60	28.70	1.68	MH-OH	7.79	82.28
SK-6	6.00-6.95	UD-2	00.00	08.90	72.25	18.15	38.20	18.83	57.70	27.30	1.50	MH	6.90	73.39
SK-6	7.50-7.95	SPT-3	00.00	06.60	72.70	18.40	26.00	18.83	57.50	27.00	1.47	CH	6.71	71.57
SK-6	10.5-10.95	SPT-5	00.00	09.60	80.20	13.20	33.70	18.83	61.30	29.10	1.74	MH-OH	8.06	84.94
SK-7	3.00-3.45	UD-1	00.00	21.40	33.10	45.50	17.50	18.34	40.80	20.23	0.44	CL	1.60	20.59
SK-7	4.50-4.95	SPT-2	54.20	22.40	11.86	35.26	13.30	18.44	33.60	10.30	0.29	GC	1.38	18.56
SK-7	6.00-6.50	UD-2	00.00	09.10	72.40	18.50	26.10	18.44	54.30	24.60	1.19	MH-OH	5.35	58.02
SK-7	9.00-9.45	SPT-4	02.30	15.00	62.70	20.00	24.60	18.44	47.90	15.09	0.75	ML-OL	3.15	36.18
SK-9	3.00-3.50	UD-1	00.00	08.40	68.20	23.40	26.20	18.63	54.30	37.26	1.59	CH	7.34	77.76
SK-12	3.00-3.45	UD-1	01.30	16.10	55.00	27.60	22.20	18.44	55.10	29.00	1.71	CH	7.93	83.60
SK-12	6.00-6.50	UD-2	00.80	08.90	76.80	13.60	23.60	18.44	51.80	14.77	1.09	MH-OH	6.53	69.78
SK-12	13.5-13.95	SPT-3	04.60	12.10	54.40	28.90	24.10	18.44	47.30	33.61	1.16	CL	5.19	56.46
SK-13	3.00-3.50	UD-1	47.60	32.10	00.00	21.20	16.80	18.34	34.70	10.46	0.49	GC	1.84	23.22
SK-13	6.00-6.50	UD-2	12.80	16.80	47.10	23.30	20.40	18.34	45.10	22.10	0.95	CL	4.12	45.80
SK-13	7.50-7.95	SPT-3	04.60	12.10	67.10	16.20	22.60	18.34	44.80	16.57	1.02	ML-OL	4.49	49.51

Çizelge 1. (devamı)

Table 1. (continued)

SK-14	3.00-3.50	UD-1	00.00	00.00	36.19	63.81	24.80	18.83	58.60	21.19	0.33	MH-OH	1.68	21.57
SK-14	4.50-4.95	SPT-2	00.00	09.80	71.97	18.23	23.40	18.63	55.80	27.20	1.49	CH	6.84	72.78
SK-14	6.00-6.50	UD-2	00.00	00.00	81.77	18.23	25.20	18.63	58.30	27.20	1.49	MH-OH	6.84	72.78
SK-14	9.00-9.45	SPT-3	00.00	03.60	69.80	26.60	18.40	18.63	49.60	21.20	0.87	ML-OL	3.72	41.85
SK-14	10.5-10.95	SPT-4	00.00	00.00	75.30	24.70	21.80	18.63	54.10	30.04	1.22	CH	5.46	59.08
SK-15	3.00-3.50	UD-1	00.00	00.00	84.54	15.46	26.00	18.93	57.20	22.69	1.47	MH-OH	9.41	98.30
SK-15	6.00-6.50	UD-2	01.10	10.40	68.20	20.40	23.90	18.93	44.90	15.72	0.77	ML-OL	3.23	36.96
SK-15	10.5-10.95	SPT-5	00.30	06.60	78.90	14.20	25.10	18.93	47.60	13.86	0.98	ML-OL	4.26	47.17
SK-16	3.00-3.50	UD-1	02.40	19.00	50.95	27.65	22.90	18.34	41.80	18.80	0.68	CL	2.78	32.46
SK-16	6.00-6.50	UD-2	05.10	25.70	49.80	19.50	20.60	18.34	43.30	15.96	0.82	ML-OL	3.47	39.35
SK-16	9.00-9.45	SPT-4	26.20	29.20	25.30	19.30	15.20	18.34	37.20	12.57	0.65	SC	2.63	31.06
SK-17	3.00-3.50	UD-1	00.00	04.90	71.50	23.60	24.70	18.63	57.70	31.60	2.25	CH	10.63	110.50
SK-17	4.50-4.95	SPT-2	00.00	00.00	85.58	14.42	25.10	18.63	60.30	25.61	1.78	MH-OH	10.71	111.29
SK-17	6.00-6.50	UD-2	01.30	11.40	63.30	24.00	23.00	18.63	51.80	25.20	1.26	CH	5.67	61.24
SK-17	7.50-7.95	SPT-3	00.50	08.30	62.60	28.60	22.90	18.63	44.90	21.00	0.85	CL	3.64	41.01
SK-18	3.00-3.50	UD-1	02.10	17.80	23.06	57.04	19.10	18.24	46.10	12.04	0.21	ML-OL	1.41	18.63
SK-18	6.00-6.50	UD-2	00.60	07.00	31.16	61.24	24.60	18.24	56.20	14.39	0.24	MH-OH	1.63	21.08
SK-19	3.00-3.50	UD-1	03.20	24.20	22.19	50.41	18.20	18.83	44.30	20.20	0.40	CL	1.38	18.34
SK-19	6.00-6.50	UD-2	00.00	04.20	30.61	65.19	25.90	18.83	57.90	15.65	0.24	MH-OH	1.57	20.69
En düşük			00.00	00.00	00.00	13.20	13.30	17.36	33.60	09.08	0.21		0.77	12.52
En yüksek			54.20	42.90	85.58	65.19	38.20	18.83	61.30	37.96	2.25		10.71	111.29
Ortalama			05.74	13.59	52.60	28.55	22.60	18.49	47.97	21.46	0.92		4.12	45.83

Açıklama: Wn:Doğal su içeriği; L.L.:Likit limiti; PL.:Plastik limiti; PI:Plastisite indeksi; Ac:Aktivite; S:Şişme potansiyeli; SP: Şişme basıncı

Sondaj kuyularında yapılan SPT deneyi kumlu, siltli ve killi zeminlerin ve aşırı ayrıışmış kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesi için yapılan yerinde bir deneydir (ASTM D 1586, 2018). Deney standart yarık tip çarık numune alıcının (penetrometre) mm kuyu içindeki zeminde ilerleyebilmesi için 63.5 kg şahmerdanın 76 cm mesafeden sondaj tijleri üzerine düşürülmesi ve darbe sayılarının belirlenmesi işlemidir. Kuyuda ölçülen ham darbe sayıları, üzerinde tij düzeltilmesi, kuyu çapı düzeltilmesi, enerji oranı düzeltilmesi, yaraltısu düzeltilmesi ve kuyu çapı düzeltilmesi gibi düzeltmeler yapılarak, düzeltilmiş SPT değeri (N_{60}) hesaplanır (Skempton, 1986). Çalışma alanında açılan sondaj kuyularında yapılan SPT deneylerinin düzeltilmiş darbe sayısı (N_{60}) dağılımını veren histogram grafiği Şekil 7a'da verilmiştir. N_{60} değerlerinin %80'i 16 ile 32 arasında yoğunlaşmıştır. Terzaghi ve Peck (1967) ve Bowles (1988)'e göre bu zeminlerin kıvamı çok katı olarak tanımlanmıştır. Chen (1988) ise SPT N_{60} değerlerinin 20-30 olması durumunda birimin yüksek şişme potansiyeline sahip olduğunu, 30 dan büyük N darbeleri için ise çok yüksek şişme potansiyeli bulunduğunu ifade etmiştir (Çizelge 2).

Şekil 7b'de görüldüğü gibi Güdül zemin örnekleri N_{60} değerlerinin çoğunluğu orta-yüksek şişme potansiyeline sahiptir.

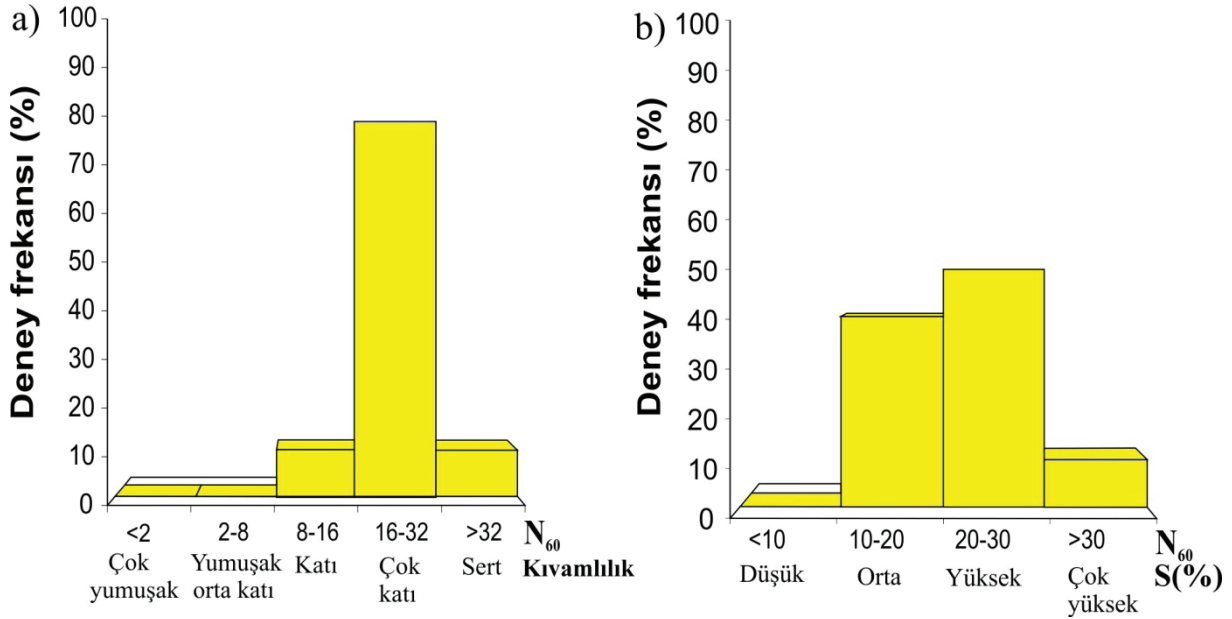
Çizelge 3'te literatürde yapılmış olan şişme sınıflandırmaları verilmiştir. Bu sınıflandırmalarda LL değer aralıkları (Holtz ve Gibbs, 1956; Daksanamurthy ve Raman, 1973; Chen, 1988), PI değer aralıkları (Seed vd., 1962; Mohan ve Goel, 1959; CMC, 2004), kil içeriği (CC) (Holtz ve Gibbs, 1956; Ac (Nelson ve Miller, 1992) ve 200 nolu elekten geçen malzeme yüzdesi (Holtz, 1959) dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında zemin örneklerinden belirlenen LL, PI, CC, Ac değerleri ve 200 nolu elekten geçen malzemenin miktarından oluşturulan frekans dağılımlarından Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8a'da Holtz ve Gibbs (1956) 8b'de Daksanamurthy ve Raman (1973) ve 8c'de Chen (1988) tarafından LL değerlerine göre önerilen sınıflandırmalara göre oluşturulmuş frekans dağılımları verilmektedir. Buna göre çalışma alanındaki zeminlerin her üç sınıflandırmaya göre "orta-yüksek" şişme potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 8d'de Seed vd. (1962), Şekil 8e'de Mohan ve Goel (1959) ve Şekil 8f'de GMC (2004) tarafından önerilen PI değerlerine göre çalışma alanındaki zeminlerin frekans dağılımlarını gösterilmektedir. PI değerlerine göre inceleme alanındaki killi zeminlerin her üç sınıflandırmaya göre "orta-yüksek" şişme potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur.

Çizelge 2. Şişen killerde olası hacim değişikliği tahmini verileri (Chen, 1988).

Table 2. Data for making estimates of probable volume changes for expansive soils (Chen, 1988).

<#200 (%)	LL (%)	N_{60}	Olası S(%)	SP (kPa)	Şişme derecesi
<30	<30	<10	<1	<150	Düşük
30-60	30-40	10-20	1-5	150-250	Orta
60-95	40-60	20-30	5-10	250-1000	Yüksek
>95	>60	>30	>10	>1000	Çok yüksek

<#200: 200 nolu elek altına geçen miktarı, LL: likit limit, N_{60} : düzeltilmiş SPT darbe sayısı, S: şişme potansiyeli, SP: şişme basıncı



Şekil 7.a) N_{60} değerlerinin kıvamlilik sınıflandırmasına (Terzaghi ve Peck 1967; Bowles, 1988) göre histogram dağılımı b) N_{60} değerlerinin şişme potansiyeli sınıflandırmasına (Chen, 1988) göre histogram dağılımı.

Figure 7. a) N_{60} histogram according to consistency classification (Terzaghi and Peck, 1967; Bowles, 1988) b) N_{60} histogram according to swelling potential classification (Chen, 1988).

Çizelge 3. Literatürde şişme potansiyeli sınıflandırmaları.

Table 3. Swelling potential classifications in the literature.

LL (a)	LL (b)	LL (c)	PI (d)	PI (e)	PI (f)	CC (g)	Ac (h)	#200 Geçen (%) (ı)	S (%)
<39	<30	20-35	<10	<12	<15	<13	<0.3	<30	Düşük
39-50	30-40	35-50	10-20	12-23	15-28	13-20	0.3-0.5	30-60	Orta
50-63	40-60	50-70	20-35	23-32	28-40	20-28	>0.5	60-95	Yüksek
>63	>60	>70	>35	>32	>40	>28		>95	Çok yüksek

a) Holtz (1969) b) Daksanamurthy ve Raman (1973) c) Chen (1988) d) Seed vd., (1962) e) Mohan ve Goel (1959) f) GMC (2004) g) Holtz ve Gibbs (1956) h) Melson Miller (1992) ı) (Holtz (1959)

Açıklama: LL:Likit limit; PL:Plastik limit; PI:Plastisite indeksi; Ac:Aktivite; S:Şişme potansiyeli

Holtz ve Gibbs (1956) tarafından kil içeriği miktarına göre yapılan sınıflandırmaya göre zemin örneklerinin şişme potansiyelinin “orta-yüksek-çok yüksek” şişme potansiyeli

sınıflandırma aralığına dağıldığı görülmüştür (Şekil 8g).

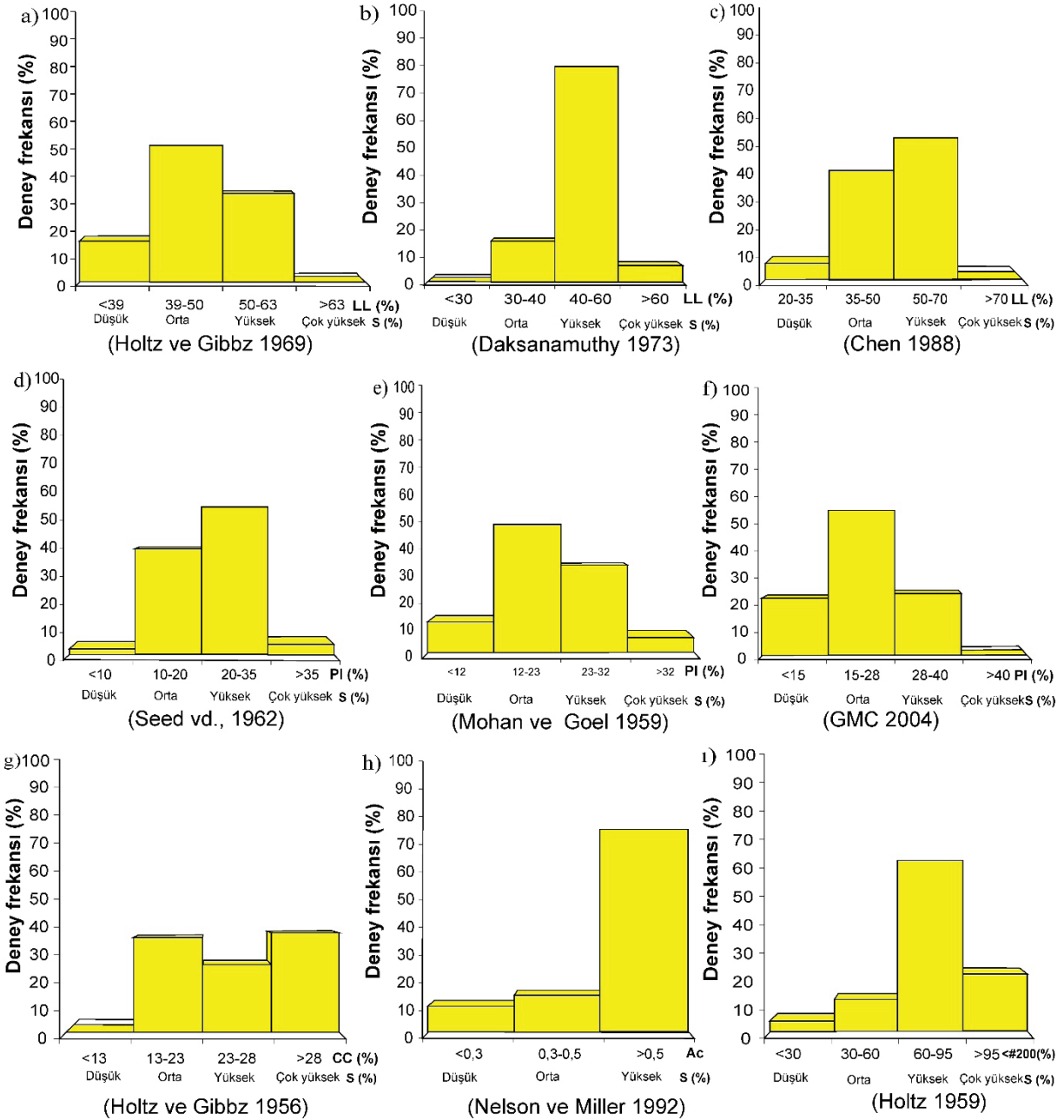
Killi zeminlerin aktivitesi (Ac), zeminin PI değerinin kil içeriğine oranı olarak tanımlanır.

Skempton (1953) killeri aktivitesine göre sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırmaya göre aktivitesi 1 ile 7 arasında olanlar sodyum montmorillonittir. Ca montmorillonitin aktivitesi 1'e kadar yükselebilirken, kaolen aktivitesi 0.5 civarında, illit aktivitesi 0.5-1 arasında değişmektedir (Mitchell, 1975). Nelson ve Miller (1992) çalışmalarında killerin şişme potansiyelini aktivite değerine göre sınıflandırmışlardır. Eğer $A_c < 0.3$ ise, şişme potansiyeli düşük, A_c değerinin 0.3-0.5 arasında olması durumunda kil orta derecede şişme potansiyeline sahip, A_c değerinin 0.5'ten büyük olması durumunda şişme potansiyeli yüksek olarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanında alınan örneklerden belirlenen aktivite değerlerinin % 76.47'si 0.5'ten büyük olup, yüksek şişme potansiyeline sahip killer olduğu görülmüştür (Şekil 8h).

İnce tane (200 nolu elekten geçen) miktarına göre yapılan sınıflandırmada (Holtz, 1959) ise çalışma alanındaki zeminlerin şişme potansiyeli "yüksek-çok yüksek" olarak belirlenmiştir (Şekil 8i). Dakshanamurthy ve Raman (1973) plastisite tablosunu şişme potansiyelini de gösterecek şekilde modifiye etmişlerdir (Şekil 9). Şekil 9'da görüldüğü gibi Güdül ilçesinin ince taneli zeminleri plastisite abağında orta-yüksek plastisiteli inorganik killer bölgesinde yoğunlaşmış olup çoğunluğunun "orta-yüksek" derecede şişme potansiyeline sahip oldukları görülmektedir.

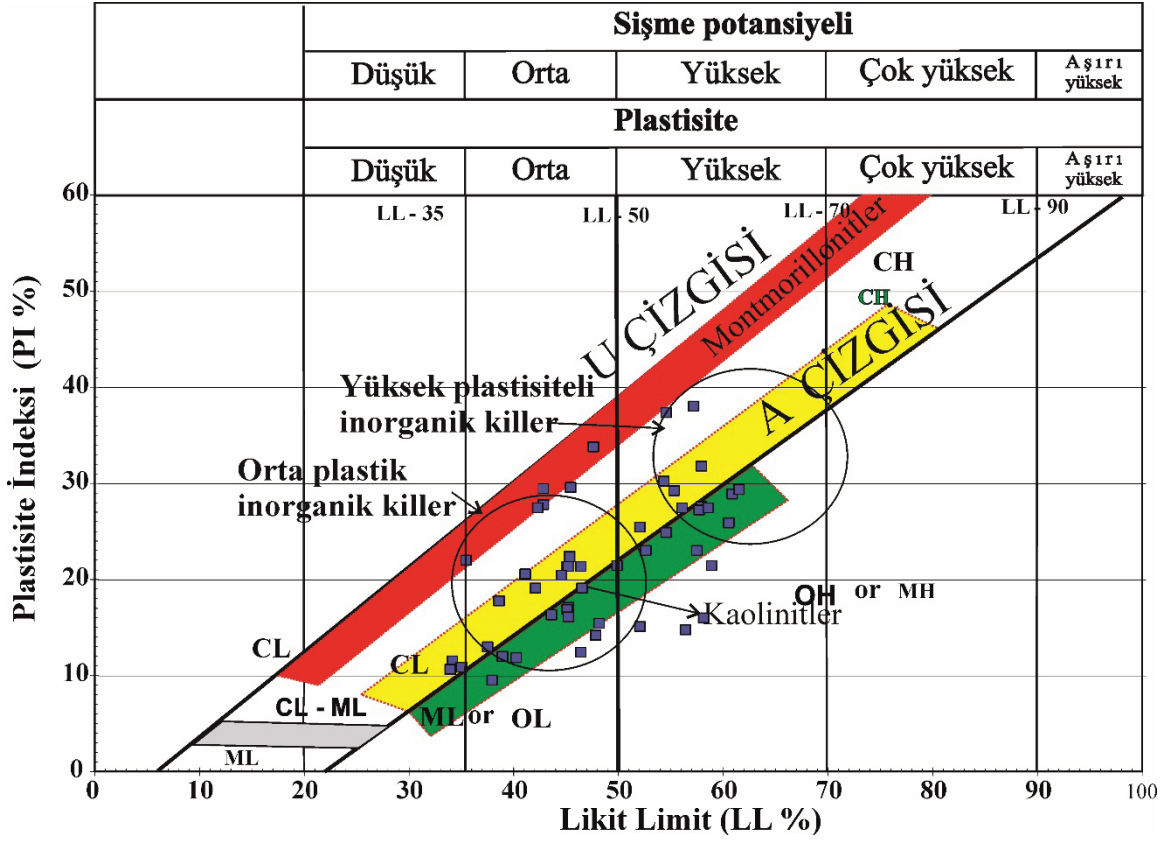
Seed vd. (1962) tarafından yapılan çalışmada kil boyutlu taneler ile aktivite arasındaki grafiği şişme potansiyeli açısından bölgelendirmişlerdir (Şekil 10). Şekil 10'da görüldüğü gibi kil boyu tane miktarının artması, şişme potansiyelinin artacağı anlamına gelmemektedir. Kil boyu tanelerin aktivitesi zeminin şişme potansiyelinde belirleyici olmaktadır. Şekil 10a'da Güdül zeminlerinden alınan örneklerin aktivite değerleri ve karşılık gelen kil miktarının grafiğe yerleştirilmesi sonucunda, örneklerin "düşük-orta" şişme potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Şişme potansiyelinin sınıflandırıldığı bir diğer yöntem ise örnek içerisindeki kil ile plastisite indeksi arasında yapılan karşılaştırmadır. Güdül zemin örneklerinin düşük şişme potansiyelinde örnekler olmasına rağmen Şekil 10b'de örneklerin büyük çoğunluğunun "düşük-orta" şişme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

Wayne vd. (1994) Sudan'daki killi zeminler üzerinde yaptıkları çalışmalarda S(%) ve SP (kPa) değerlerine göre frekans grup aralıkları belirlemiştir. Güdül zemin örneklerinin S(%) ve SP (kPa) frekans histogram grafiklerinde % 50.98'i %1.5-%5 aralığında, %33.33'ü ise %5-%25 hacim artışı göstermektedir (Şekil 11). Örneklerin %35.29'i 0-50 kPa aralığında şişme basıncı oluştururken, % 64.71'i 50.00-111.29 kPa aralığında şişme basıncına sahiptir.



Şekil 8. Şişme potansiyeli sınıflandırmalarına göre Gündül yöresi zeminlerinin likit limit (LL), plastisite indeksi (PI), kil içeriği (CC), aktivite (Ac) ve #200 nolu elekten geçen yüzde miktarına göre histogram dağılımları.

Figure 8. According to swelling potential classifications of Gündül area soils according to liquid limit (LL), plasticity index (PI), clay content (CC), activity (Ac) and percent passing #200 sieve histogram graphs.

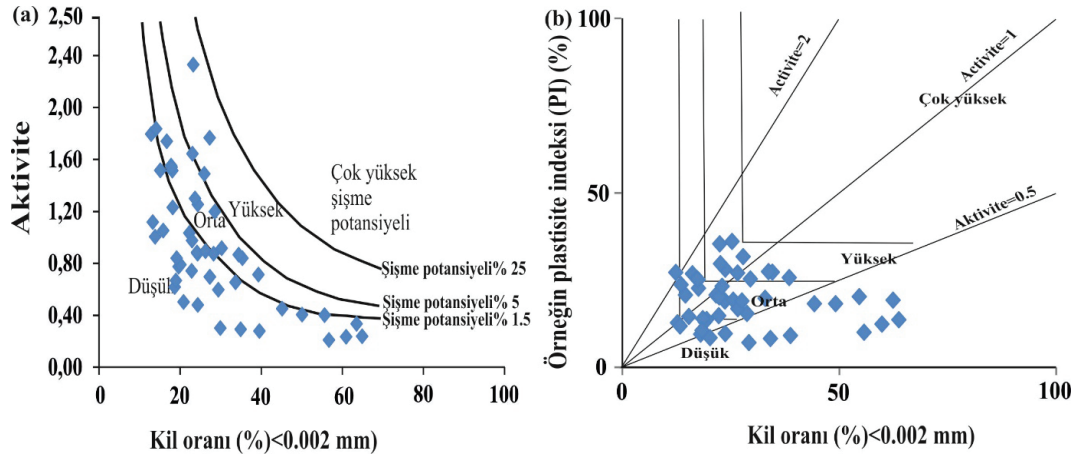


Şekil 9. Güdül zemin örneklerinin plastisite indisi-likit limit değerlerine bağlı şişme potansiyeli grafiğinde dağılımı (Daksanamurty ve Raman 1973' ten değiştirilerek alınmıştır).

Figure 9. Distribution of Güdül soil samples on plasticity index-likit limit based swelling potential graph (Modified from Daksanamurty and Raman, 1973).

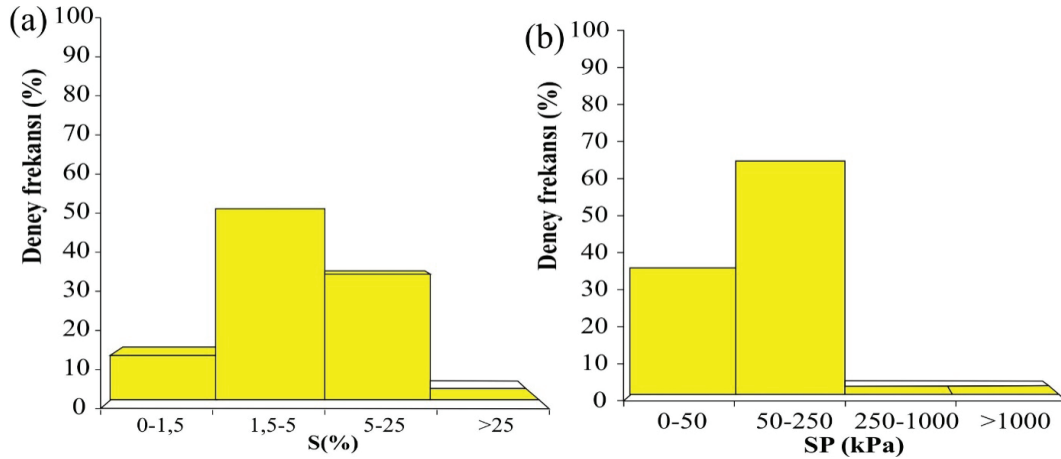
Sudan'daki şişebilir zeminlerin yapılarda meydana getirdiği hasarların değerlendirilmesi sonucunda Çizelge 4 oluşturulmuştur (Wayne vd., 1994). Bu çalışmada yapılan şişme basıncı deneylerine göre Güdül yerleşiminden alınan örneklerde ortalama 45.83 kPa ve en yüksek 111.29 kPa şişme basıncı değerleri belirlenmiştir. Yapı temelinin üzerine oturduğu zeminlerin

şişen karakterde olması durumunda, bu zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncının yapı projelendirilmesinde dikkate alınması gerektiği bu çalışma ile de doğrulanmış olup, Güdül ve çevresindeki yapılarda Wayne vd. (1994) sınıflandırmasına göre "orta" derecede hasar oluşabilecektir.



Şekil 10. Şişen killerin sınıflandırılması grafikleri: a) Aktivite-kil oranı grafiği (Seed vd., 1962'den değiştirilerek alınmıştır) b) Plastisite indeksi-kil oranı grafiği (Van Der Merwe, 1964' den değiştirilerek alınmıştır).

Figure 10. Swelling clays classification charts: a) activity-clay ratio graph (modified from Seed et al., 1962) b) Plasticity index-clay ratio graph (modified from Van Der Merwe, 1964).



Şekil 11. Güdül zemin örneklerinin a) hacimsel değişim histogramı b) şişme basıncı (kPa) histogramı (Wayne vd., 1994).

Figure 11. a) Volume change and b) swelling pressure (kPa) histograms of Güdül samples (Wayne vd., 1994).

Çizelge 4. Şişen zeminlerde hacim değişikliği, şişme basıncı ve oluşabilecek hasar ilişkisi (Wayne vd., 1994).

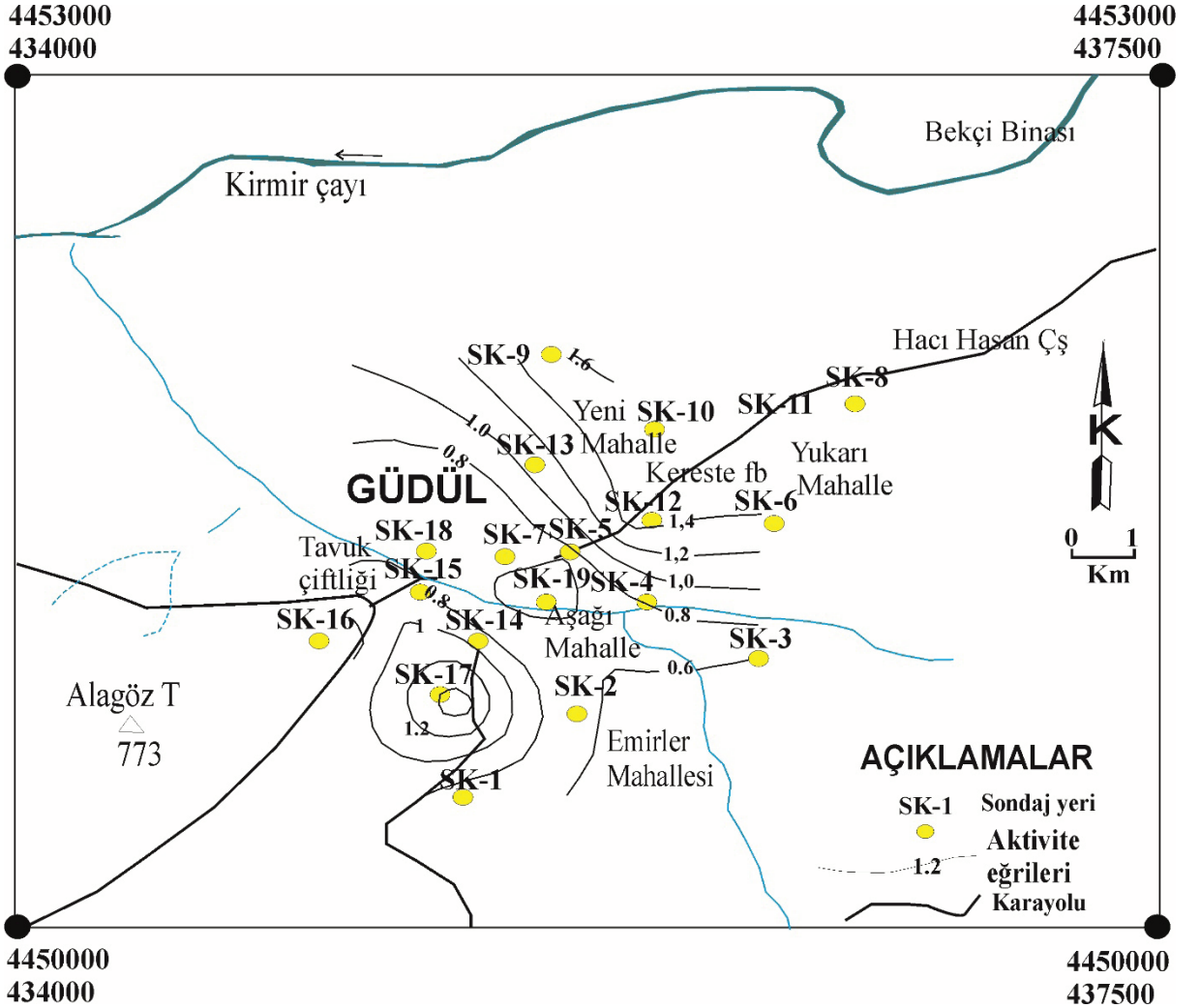
Table 4. Relationship of volume change, swelling pressure (kPa) and possible damage in swelling soils (Wayne et al., 1994).

Hacim değişikliği (%)	Şişme basıncı (kPa)	Oluşabilecek hasar
0-1.5	0-50	Düşük
1.5-5	50-250	Orta
5-25	250-1000	Yüksek
>25	>1000	Çok yüksek

Soypak, Kayabaşı

Her bir sondaj kuyusu için belirlenen ortalama Ac değeri kullanılarak, çalışma alanı için aktivite (Ac) haritası hazırlanmıştır. Şekil 12'de görüldüğü gibi Emirler Mahallesinden Yeni Mahalle ve Yukarı Mahallesi yönünde ve

SK-17 yönünde aktivite değerleri artmaktadır. Aktivitenin 1 değerinden fazla olduğu alanlardaki özellikle az katlı yapılarda, zemin şişmesi kaynaklı sorunlar daha fazla olabilecektir (Nelson ve Miller 1992).

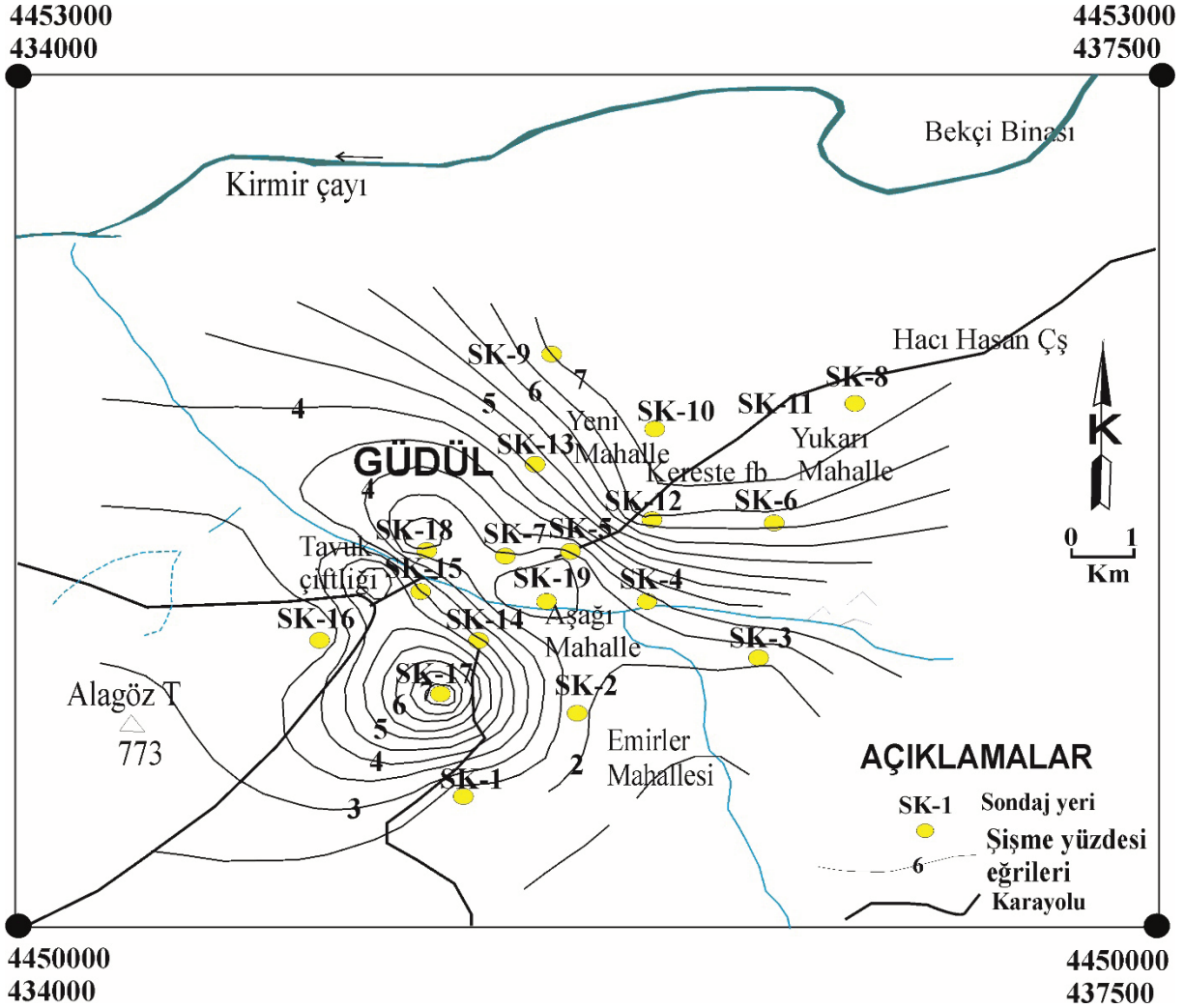


Şekil 12. Güdül ve çevresi zeminleri aktivite haritası.

Figure 12. Soil activity map of Güdül and its vicinity.

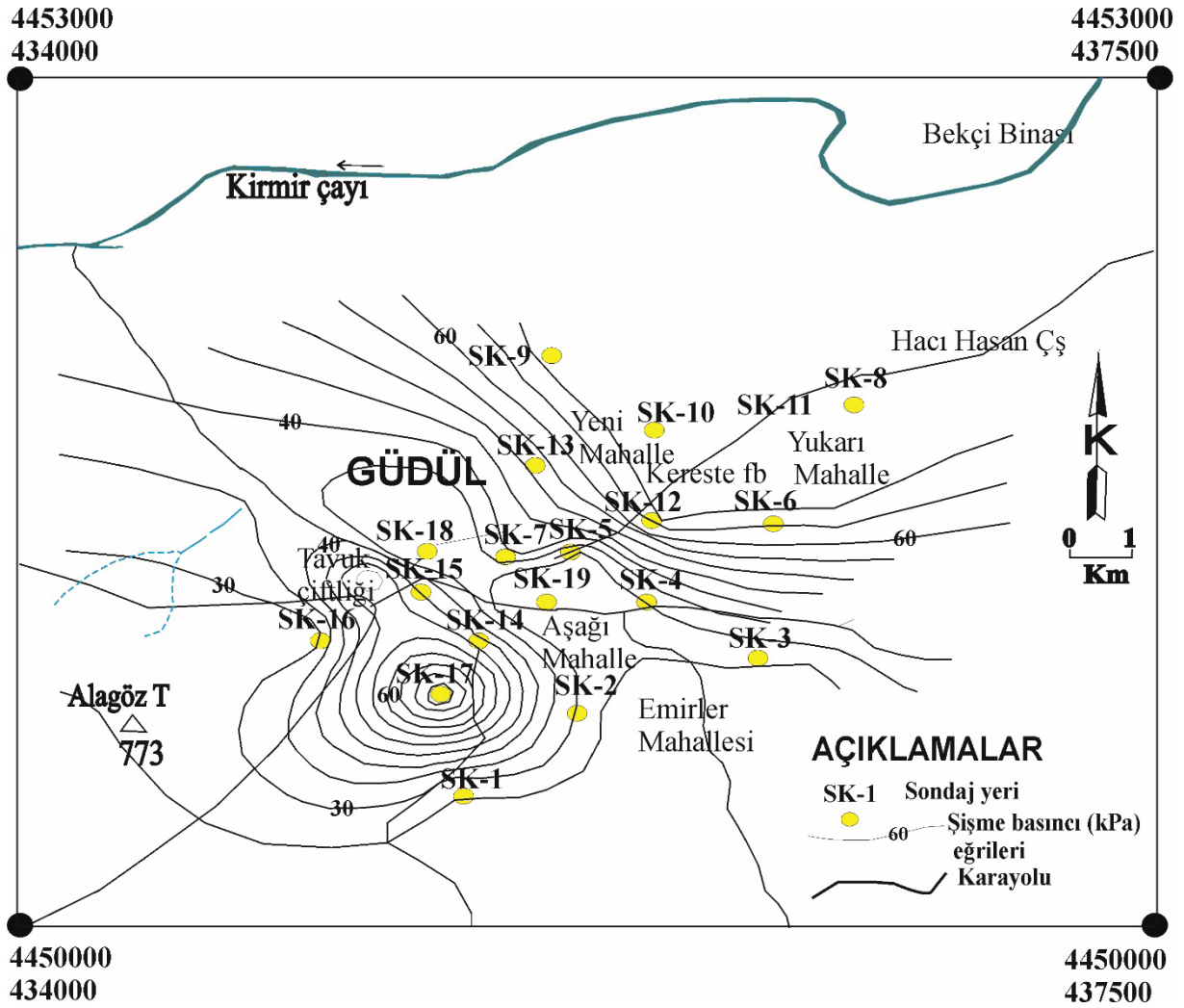
Güdül ve çevresi için hazırlanmış olan, şişme potansiyeli ve şişme basıncı haritaları Şekil 13 ve 14'te gösterilmektedir. Buna göre, Yeni Mahalle ve Yukarı Mahalle civarında şişme potansiyeli ve

şişme basıncı değerleri artış göstermektedir. Öte yandan, Emirler Mahallesi civarlarında şişme potansiyeli ve şişme basıncı düşük değerlere ulaşmaktadır (Şekil 13 ve 14).



Şekil 13. Güdül ve çevresi şişme yüzdesi haritası.

Figure 13. Swelling potential map of Güdül and its vicinity.



Şekil 14. Güdül ve çevresi şişme basıncı haritası.

Figure 14. Swelling pressure map of Güdül and its vicinity.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Ankara ili, Güdül ilçesi yerleşim alanındaki yapılarda çatlakların oluşması üzerine bu çalışma yapılmıştır. Güdül ve çevresindeki ince taneli zeminlerde 19 adet araştırma amaçlı sondaj kuyusu açılmıştır. 21 adet SPT örneği ile 30 adet bozulmamış örnek üzerinde indeks deneyleri ve şişme deneyleri yapılmıştır.

Plastisite abağında zemin örneklerinin %59'u düşük plastisiteli kil (CL)- düşük plastisiteli silt (ML) veya düşük plastisiteli organik malzeme (OL) olduğu görülmektedir. Zemin örneklerinin % 41'i ise yüksek plastisiteli kil (CH)-yüksek plastisiteli organik malzeme (OH) veya yüksek plastisiteli silt (MH) olarak belirlenmiştir.

Likit limit, plastisite indeksi, kil içeriği, aktivite ve 200 nolu elekten geçen ince taneli miktarına göre yapılan şişme potansiyeli sınıflandırmalarına göre Güdül ve çevresine ait zemin örneklerinin şişme potansiyeli “orta-yüksek-çok yüksek” olarak belirlenmiştir. Ortalama likit limit değeri (% 47.97), ortalama ince tane oranı (% 80,55) ve ortalama SPT darbe sayısı (N_{60}) (34) değerlerine göre aynı zeminlerin şişme derecesi “yüksek” olarak tanımlanmıştır.

Güdül zemin örneklerinin % 33.33’ü su ile temas durumunda, %5-%25 aralığında hacim artışı göstermekte ve örneklerin % 64.71’i, 50-111.29 kPa (≈ 1.14 kgf/cm²) aralığında şişme basıncı oluşturmaktadır.

Yapılan deney sonuçlarının aritmetik ortalamaları değerleri esas alınarak, Güdül ve çevresinin aktivite, şişme potansiyeli ve şişme basıncı haritaları oluşturulmuştur. Aktivite haritasına göre Emirler Mahallesi civarında 0.5 civarında olan aktivitenin, Emirler Mahallesinden 5 km kuzeydeki Yeni Mahalle’de 1.4 değerlerine ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde Emirler Mahallesi civarında şişme basıncı yüzdesi % 1.5 iken Yeni Mahalle civarında % 6’ya yükselmektedir. Benzer şekilde, şişme basıncı ise Emirler Mahallesi civarında 25 kPa iken Yeni Mahalle civarında 65 kPa’a kadar yükselmektedir. 17 nolu sondaj kuyusunun bulunduğu lokasyon civarında da şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde yükseliş görülmektedir. Aktivite, şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinin yüksekliği, Güdül ve çevresi killi zeminlerinin su ile teması durumunda 1-3 katlı yapılar için yapısal deformasyon riski ihtimalini işaret etmektedir.

Şişme basıncının oluşturacağı sorunları önleme amacıyla çok katlı yapı önerilmesi farklı sorunlara yol açabilecektir (deprem hasar artırma, oturma vb). Bu nedenle az katlı

yapı tercih edilmesi gerekirken diğer taraftan, şişme basıncı etkisinin önlenmesi için yapıların temeline, yakın çevrede bulunan andezit kaya kütesinden alınacak parçalardan oluşturulacak granüler malzeme yerleştirilerek yapı temelinde ağırlık oluşturulması şişme kaynaklı riskleri önleyecektir.

Yapı temellerinin oluşturacağı hasar riskini azaltmak için, temeli oluşturan zemin içerisindeki su oranını azaltmak da uygulanır yöntemlerden birisidir. Temel zeminini sönmemiş kireçle veya çimento ile harmanlanması sonucu temel zeminin şişmesinden kaynaklı riskin önüne geçilebilmektedir. Bu amaçla temeli oluşturan ince taneli birimlerin içine kireç katılması suretiyle şişme potansiyeli deneyleri yapılır. Bu deneyler şişme potansiyeli riskinin olmadığı karışımı tespit edinceye kadar tekrarlanmalıdır. Bu karışım oranı, temelin duraylılığının artırılmasında kullanılmalıdır. Genellikle ağırlığı %3-%8 oranında kireç karışımı temel altındaki 10-50 cm lik seviyenin şişme riski ortadan kaldırılabilmektedir (Demir ve Kılıç, 2010).

Bu çalışma bölgesel ölçekte yapılmıştır. Parsel bazında temel araştırmaları için şişme yüzdesi ve şişme basıncı riskini belirlemeye yönelik ayrıntılı araştırmalar yapılmalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmada, Ankara Büyükşehir Belediyesi Yerbilimleri şefliği jeoloji mühendisleri Selma Gökçelik, Osman Yücel Şahin, Esengül Demir Aydın’a arazi çalışmalarındaki katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Yazarlar ayrıca sondaj ve laboratuvar deneylerini yapan 4M Jeoloji Harita İnşaat Ltd Şti’ ve makalenin Türkçe yazım hatalarının düzeltilmesini yapan Jeoloji Mühendisi Dündar Çağlan’a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Abduljawad, S.N., 1993. Study on the performance of calcareous expansive clay. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 30 (4), 481–498.
- Abduljawad, S.N., Al-Suleimani, G.J., 1997. Determination of swell potential of Al-Qalif clay. *Geotechnical Testing Journal of ASTM*, 16 (4), 469–484.
- Al-Rawas, A.A., 1999. The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of northern Oman. *Engineering Geology*, 53, 327–350.
- ASTM D2487, 2018. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM D2488, 2018. Standard practice for description and classification of soils (visual-manual procedure). ASTM International, West Conshohocken, www.astm.org.
- ASTM D7263, 2018. Standard test methods for laboratory determination of density (unit weight) of soil specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM D2216, 2008. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM D1586, 2018. Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM D4546, 2008. Standard test method for one-dimensional swell or settlement percent of cohesive soils. *Annual Book of ASTM Standards*. www.astm.org.
- ASTM D421, 2008. Standard test method for particle size analysis of soils. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM D422, 2008. Standard test method for particle size analysis of soils. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM D4318, 2018. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- Basma, A.A., Al-Hamoud, A.S., Husein, A., 1995. Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Applied Clay Science*, 9, 355–368.
- Birand, A.A., 1963. Study of the characteristics of Ankara Clay showing swelling properties. MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Bonner, C., Shakoor, A., 1998. Predicting the swelling potential of a bentonitic clay from initial water content and dry density values. *Proceedings of the 8th International IAEG Congress, Vancouver, Canada, vol. I, pp. 925–935*.
- Bowles, J.E., 1988. *Foundation Analysis and Design*. 4th Edition. Mc. Graw-Hill International Editions.
- Chen, F.H., 1975. *Foundations on Expansive Soils*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Chen, F.H., 1988. *Foundation Expansive Soils*, 2nd ed. New York, Elsevier Scientific Pub. Co., 280p.
- CMC (China Ministry of Construction), 2004. *Specifications for the Design of Highway Subgrades*. JTG D 30, Beijing, Renmin Communication Press.
- Çokça, E., 1991. Swelling potential of expansive soils with a critical appraisal of the identification of swelling of Ankara soils by methylene blue tests. PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, p. 246.
- Dakshanamurthy, V., Raman, V., 1973. A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and foundations*. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13 (1), 97–104.

- Demir, S., Kılıç, M., 2010. Şişen zeminlerin tanımlanması ve iyileştirme yöntemleri. GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi, 27(1), 95-104.
- Doruk, M., 1968. Swelling properties of clays on the METU Campus. MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Du, Y., Li, S., Hayashi, S., 1999. Swelling–shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China. *Engineering Geology*, 53, 351–358.
- El-Sohby, M.A., El-Sayed, A.R., 1981. Some factors affecting swelling of clayey soils. *Geotechnical Engineering*, 12, 19–39.
- Ergüler, Z.A., Ulusay, R., 2003. A simple test and predictive models for assessing swelling potential of Ankara (Turkey). *Engineering Geology*, 76, 331–352.
- Furtun, U., 1989. An investigation on Ankara soils with regard to swelling. MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Gill, W.R., Reaves, C.A., 1957. Relationships of Atterberg limits and cation-exchange capacity to some physical properties of soil. *Soil Science Society American Proceedings*, 21, 491–494.
- Holtz, W.G., 1959. Expansive clays-properties and problems. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 54 (4), 89-125.
- Holtz, W.G., 1969. Volume Change in Expansive Clay Soils and Control by Lime Treatment. *Proceedings of the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Soils*, Texas A & M Press.
- Holtz, W.G., Gibbs, H.J., 1956. Engineering properties of expansive clays. *ASCE Transactions*, 121, 641-663.
- Kasapoğlu, K.E., 2000. Ankara Kenti Zeminlerinin Jeoteknik Özellikleri ve Depremselliği. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 180s.
- Kılıç, R., Küçükali, Ö., Ulaşım, K., 2015. Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum (Ankara, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology Environment*, 75, 735–744, doi 10.1007/s10064-015-0757-2.
- Kılıç, R., Ulaşım, K., Atalar, C., 2006. Engineering geology assesment of the Quaternary alluvium and Pliocene deposits at Northern Ankara (Kazan-Ankara, TURKEY), *Engineering Geology for tomorrow cities. The 10th IAEG Congress, Nottingham, United Kingdom. In Engineering Geology Special Publication. The Geological Society of London.*
- Kılıç, R., Demirtaş E., 1989. Sincan (Ankara) Kepir gölü civarı Üst Pliyosen çökellerinin jeoteknik özellikleri. *H.Ü. Yerbilimleri Bülteni*, 15, 123-128.
- Kılıç, R., 1990. Zemin bileşimi ile kayma dayanımı arasındaki ilişki: Üst Pliyosen çökelleri (Ankara). *Jeoloji Mühendisliği*, 36, 47-54.
- Kiper O.B., 1983. Geoengineering properties and consolidation characteristics of Upper Pliocene deposits around Etimesgut-Batıkent, PhD Thesis, Hacettepe University, Ankara, 160p.
- Li, S., Du, Y., 1997. On the swelling – shrinkage properties and mechanisms of compacted expansive soil. *Proceeding of the 30th International Geological Congress, China*, 23, 253–259.
- MGM., 2019. Meteoroloji Genel Müdürlüğü: <https://mgm.gov.tr/eng/forecast-Cities.aspx>.
- Mitchell, J.K., 1975. *Fundamentals of Soil Behaviour*. Wiley, Newyork, p 422.
- Mohan, D.,Goel, R.K., 1959. Swelling pressures and volume expansions on Indian black cotton soils. *Journal of the Institute of Engineers (India)*, Vol. XL, No. 2, pt 1, 58–62.
- Murray, H.H., 2007. *Applied Clay Mineralogy*. Netherlands: Elsevier.
- Nelson, J.D., Miller, D.J., 1992. *Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Parker, J.C., Amos, D.F., Kaster, D.L., 1977. An evaluation of several methods of estimating soil volume change. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 1059–1064.

- Pusch, R., Yong, R.N., 2006. Microstructure of Smectite Clays and Engineering Performance. Taylor & Francis.
- Skempton, A.W., 1953. The colloidal activity of clays. In: 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland 1: 57.
- Skempton, A.W., 1986. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and over consolidation. *Geotechnique*, 36(3), 425–447.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., Lungreen, R., 1962. Predicting of swelling potential of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 88 (3), 53-87.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley&Sons, NewYork, pp 729.
- Toksöz, D., Yılmaz, I., 2019. A fuzzy prediction approach for swell potential of soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 728.
- Türkecan, A., Dinçe, A., Akbaş, B., Saraç, G., Ünay, E., Akay, E., İskender, Pi., Özgür, B., Sevin, M., Hepşen, N., Karataş, S., Bedi, Yİ., 1991. Seben - Gerede (Bolu) - Güdül - Beypazarı (Ankara) ve Çerkeş - Orta - Kurşunlu (Çankırı) Yörelerinin (K öroğlu Dağları) Jeolojisi ve Volkanik Kayaçların Petrolojisi. MTA Rapor No: 9193, Ankara.
- Türköz, M., 2019. Computer-controlled equipment for the direct measurement of the swell potential of expansive soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 12:743 <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4987-7>.
- Omay, B., 1970. Swelling clays on METU Campus. MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- O'neill, M.W., Poormoayed, N., 1980. Methodology for foundations on expansive clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 106, No. GT12, pp. 1345 –1367.
- Ordemir. I., Alyanak, I., Birand, A.A., 1965. Report on Ankara clay: METU Publication No. 12, Ankara, Turkey, 30 p.
- Ulamış, K., Kılıç, R., 2012. Liquefaction potential of the Quaternary alluvium Western Ankara (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 67, 945-958.
- Uner, A.K., 1977. A comparison of engineering properties of two soil types in the Ankara region: M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 112 p.
- Van Der Merwe, D. H., 1964. The prediction of heave from the plasticity index and the percentage clay fraction. *The Civil Engineer (South African Institution Civil Engineers)*, 6, 103-107.
- Wayne, A.C, Osman, M.A, Elfatih, M.A.,1984. Construction on expansive soils in Sudan, *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 110 (3), 359-379.
- White, W.A., 1949. Atterberg plastic limits of clay minerals. *American Mineralogist*, 34, 508-512.
- Yılmaz, I., 2006. Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, 85, 295–301.

Araştırma Makalesi / Research Article

Mermerlerin Aşınma Direncini Belirlemek İçin Kullanılan Geniş Diskli Aşındırma Testi (GDA) İçin Bazı Yorumlar ve Öneriler

Some Comments and Suggestions for Wide Wheel Abrasion Test Used to Determine the Abrasion Resistance of Marbles

Ali ÖZVAN¹ , Ercan İNAN² 

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Van

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van

Geliş (Received): 03 Şubat (February) 2020 / Düzeltme (Revised): 25 Nisan (April) 2020 / Kabul (Accepted): 10 Temmuz (July) 2020

ÖZ

Mermerlerin aşınmasını belirlemek için en çok kullanılan standart deney yöntemleri, Geniş Disk (Dikey) Aşındırma (GDA) ve Böhme Aşındırma (BA) deneyleridir. Bu çalışmada, GDA deneyinde uygulanan karşı ağırlık yüklerin, cilalı ve mat yüzeyli örnek yüzeylerin ve farklı aşındırıcı tozların test sonuçları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, GDA deneyi için 48 adet 7x10x3 cm boyutlarında ve BA deneyi için 24 adet 7x7x3 cm boyutlarında numune kullanılmıştır. Deneylerin sonucunda, mermer numunelerin mat yüzeylerinin aşınma deneylerinde daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. GDA ve BA deneylerinde hem siyah renkli yapay korundum hem de beyaz erimiş alümina korundum tozu kullanıldığında örnekler üzerinde birbirine yakın aşındırma değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, GDA deneyinde numunenin anizotropisinin önemli olduğu ve sıkıştırma ağırlığının da oluk şeklini etkilediği deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mermer, Aşınma Direnci, Geniş Diskli Aşındırma Deneyi, Böhme Aşındırma Deneyi, Aşındırıcı Toz, Sıkıştırma Ağırlığı

ABSTRACT

The most widely used standard test methods for determining wear of the marbles are Wide Wheel (Vertical) Abrasion (WWA) and Böhme Abrasion (BA) tests. In this study, it was aimed to determine the effect of the counterweight loads applied in the WWA experiment, sample surfaces with polished and matte surfaces and different abrasive powders on the test results. In this study, a total of 48 (7x10x3cm) samples were used for the WWA tests and 24 (7x7x3cm) samples were used for the BA tests. As a result of the experiments, it was determined that the matte surfaces of the marble samples reveal more accurate results in the abrasion tests. When both artificial corundum and corundum (white fused alumina) powder are used in WWA and BA experiments, similar abrasion values are obtained on the samples. In addition, it is determined in the WWA experiment that the anisotropy of the sample is important and the counterweight affects the groove shape.

Keywords: Marble, Abrasion Resistance, Wide Wheel Abrasion Test, Böhme Abrasion Test, Abrasive Powder, Counterweight

GİRİŞ

Doğal taşların kaplamalarda ve anıtlarda kullanılabilmesi için fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanı sıra doğal veya yapay ortamlardaki aşınma değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Yapı sektöründe kullanılan bu kaya malzemelerin aşınma kaybı miktarı malzemenin ömrünü etkileyen en önemli parametredir. Aşınma kaybı, yapı malzemesi olarak kullanılan taşların dış etkiler (atmosferik, araç ve insan vb.) sonucunda yüzeylerinde oluşan kayıp miktarının bir ifadesidir. Özellikle ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve tuz kristallenmesi gibi doğal olaylar ile araç ve insan gibi hareketli yükler, doğal kaya malzemelerin yıpranmasına ve özelliklerinin kaybolmasına neden olmaktadır. Doğada farklı özelliklere sahip kayaların bulunması nedeniyle doğru malzemelerin seçimi önemlidir. Doğal kaya malzemelerin yapılarda kullanılabilmesi için aşınma etkisine karşı performansının belirlenmesi amacıyla bazı deneylere tabi tutulması gerekmektedir. Farklı deney yöntemleri ile kayaların aşınma miktarları belirlense de, uzun yıllardır kullanılan Böhme Aşındırma Deneyi (BA) ile son yıllarda kullanımı yaygınlaşan Geniş Diskli (Dikey) Aşındırma Deneyi (GDA) yaygın olarak kullanılan deneylerin başında gelmektedir.

Doğal taşlardaki aşınma kaybı miktarının farklı kayalarda ve farklı deneyler ile belirlenmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle BA ve GDA deney yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, genelde son yıllarda GDA deneyinin sıklıkla kullanılmasına bağlı olarak bu iki deneyi birlikte değerlendiren çalışmaların arttığı gözlenmektedir. Bu çalışmaların temelinde uzun yıllardır kullanılan ve sonuçlarına ilişkin birçok çalışmanın olduğu bilinen BA deneyine alternatif olacak GDA deneyinin sonuçlarının

BA deneyi ile karşılaştırılması yatmaktadır. Geçmişten günümüze kayalardaki aşınma ve bu aşınma miktarlarının belirlendiği deneylerle ilişkili çalışmalar incelendiğinde, McGregor ve Chiu (2000), kayaçların aşınmaları ve sertlikleri arasındaki ilişkileri incelemek için mermer ve granit örnekleri üzerinde çalışmış ve araştırma sonucunda aşınma ile sertlik arasında bir logaritmik ilişkinin olduğunu belirlemişlerdir. Sahlin vd. (2001), kireçtaşı örnekleri üzerinde aşınma deneyleri yapmış ve GDA deneyinin değerlendirilmesinde kısıtlı çalışma olduğunu ve geliştirilmesi gerektiğini önermişlerdir. Karaca vd. (2010), beş farklı doğal kayacın donma-çözülme döngüsünden önceki BA ve GDA deneyi değerlerini araştırmışlardır. BA ve GDA yöntemlerinin, mermerler, kireçtaşları ve travertenlerin aşınma değerlerinin tespit edilmesinde kullanılabileceğini ancak, oniks ve granitin aşınma değerlerinin tespit edilmesi için uygun olmadığını ortaya koymuşlardır. Çobanoğlu ve Çelik (2010), kireçtaşı, mermer, dolomitik kireçtaşı ve traverten numuneleri üzerinde BA ve GDA deneyi sonuçlarını değerlendirmişler ve karbonat bileşimli kayalar için GDA (mm) ve BA (cm³ cinsinden) arasında lineer bir denklem önermişlerdir. Marini vd. (2011), GDA deneyinde aşındırıcı malzemenin (korundum) etkin kullanımı ve kalibrasyonu için test edilen Boulonnais Mermeri yerine değişik taşlarla kalibrasyonun uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Ayrıca aşınma deneyinde kullanılan aşındırıcı malzemenin üç defa kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir. Karaca vd. (2012), tortul, metamorfik ve magmatik kökenli 25 farklı doğal taş örneği kullanarak BA ve GDA deneyi sonuçları arasındaki ilişkileri incelemiştir. Test edilen numunelerin aşınma direncinin yanı sıra fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş ve BA ile GDA deneyi sonuçları arasında doğrusal tekli regresyon ilişkisi elde etmişlerdir. Çobanoğlu

ve Çelik (2017), BA deney prosedürünün pratik olmamasından dolayı daha kolay ve ekonomik aşınma yöntemi olan GDA sonuçlarının tahmin edilmesini amaçlamıştır. Bahsi geçen çalışmada, 32 doğal taş örneğinin bazı fiziksel özellikleri, sertlik değerleri, GDA, BA ve tek eksenli basınç dayanım değerleri belirlenmiş ve bu değerler arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Bilindiği gibi, GDA ve BA deneyleri taş yüzeyine farklı yönlerde ve farklı yüklerde uygulanarak taşın aşınma miktarının belirlenmesi üzerine kurgulanmışlardır. BA deneyinde 7x7cm yüzey alanına sahip prizmatik veya kübik ölçülerdeki taşın tüm yüzeyi aşınmaya maruz kalırken, GDA deneyinde taşın yaklaşık 2 cm genişliğindeki bir yüzeyi aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu deneylerin uygulamasında sonuçları etkileyecek şekilde, taşın anizotropisi, mat veya cilalı oluşu, aşındırıcı toz temini ve miktarı ile aşındırıcı yüzey ve diske bağlı olarak bazı problemlerle karşılaşmaktadır. GDA deneyinde taş ile aşındırma diskinin temasının tam olarak sağlanması önemlidir. Bunun için standartta (TS EN 14157, 2017) yaklaşık 14 kg bir sıkıştırma ağırlığı ile taşın çekilerek diske teması sağlanmaktadır. Özellikle taşın geniş disk üzerine tam olarak temas etmediği durumlarda, taş yüzeyinin tamamında yaklaşık aynı genişlikte bir oluk oluşmamaktadır. Bu durum, GDA deneyinden aşınmanın belirlenmesinde bir engel oluşturabilmektedir. Aşındırma deneylerinde çalışmacıya engel olan diğer bir sorun da aşındırıcı tozların miktar ve maliyetidir. Her iki deney standardında farklı özelliklerde aşındırma tozları önerilmektedir. Bu aşındırma tozlarının temini özel firmalar tarafından yurtdışından sağlanmaktadır. Bu nedenle maliyetleri yüksek olabilmektedir.

Yukarıda bahsedilen sorunlar dikkate alındığında, son yıllarda kullanımı artan GDA

deneyinin uygulanmasındaki teknik, ekonomik ve malzeme şartlarının engelleyici durumlarının belirlenmesi amacıyla bu çalışma yapılmıştır. GDA deneyindeki sorunların tartışılabilmesi için benzer bir deney olan BA deneyi ile birlikte çalışma yürütülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın ana amaçları, farklı mineraloji, bileşim ve doku özelliklerine sahip mermerlerde;

- GDA deneyi için örnekler üzerinde uygulanan farklı sıkıştırma ağırlıklarının aşındırma oluklarındaki etkisinin belirlenmesi,
- Cilalı ve mat yüzülere sahip mermerlerde GDA deneyi sonrasındaki aşınma farklılıklarının ve cilalanmanın aşındırma deneyine etkisinin olup olmadığının belirlenmesi,
- Aşınma deneylerinde kullanılan farklı aşındırıcı tozların GDA deneyi aşındırma sonuçları üzerindeki etkisinin belirlenmesidir.

Bu amaçlar doğrultusunda mermer olarak en çok tercih edilen 4 farklı özelliğe sahip kaya örneği seçilmiştir. Örnekler çalışmanın yapıldığı bölgedeki bir mermer fabrikasından elde edilmiştir. Deneyler için kullanılan mermer örneklerinin bir yüzeyi cilalı diğer yüzeyi ise mat olacak şekilde standartlarda istenilen boyutlarda kestirilerek hazırlanmıştır.

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmanın yapılması aşamasında materyal olarak, farklı özelliğe sahip üç adet kireçtaşı (Tusba Bej, Tamara Bej, Rosavera) ve bir adet granit (Diana Granit) olmak üzere toplam dört farklı kaya örneği kullanılmıştır. Örnekler bölgedeki bir mermer fabrikasından elde edilmiştir ve GDA deneyinde farklı sonuçlar verebilecek kayalar seçilmiştir. Deneysel araştırmaya dayalı bu çalışmada, ilk aşamada kesme ve düzeltme diskleri, boyutların

belirlenebilmesi için kumpas, hassas terazi, saf su ve etüv kullanılmıştır.

Çalışma konusu kapsamında 4 farklı kaya malzemesine ait prizmatik numuneler TS EN 14157 (2017) standardına uygun olarak kesilip hazırlanmıştır. Deneyler için 48 adet yaklaşık $7 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$ (GDA Standardı) ve 24 adet yaklaşık $7 \times 7 \times 3 \text{ cm}^3$ (BA Standardı) boyutlarında mermer örneği hazırlanmıştır. Mermer örnekleri fabrikadaki satış aşamasından alındığından dolayı örneklerin bir yüzü cilalı diğer yüzü mat özelliğe sahiptir (Şekil 1). Böylece cilalı yüzeylerin aşınma üzerindeki etkisi de ayrıca incelenmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan dikdörtgen ve kare yüzey alanına sahip örnekler için bir görüntü.

Figure 1. An image of the samples with rectangular and square surface area used in the experiments.

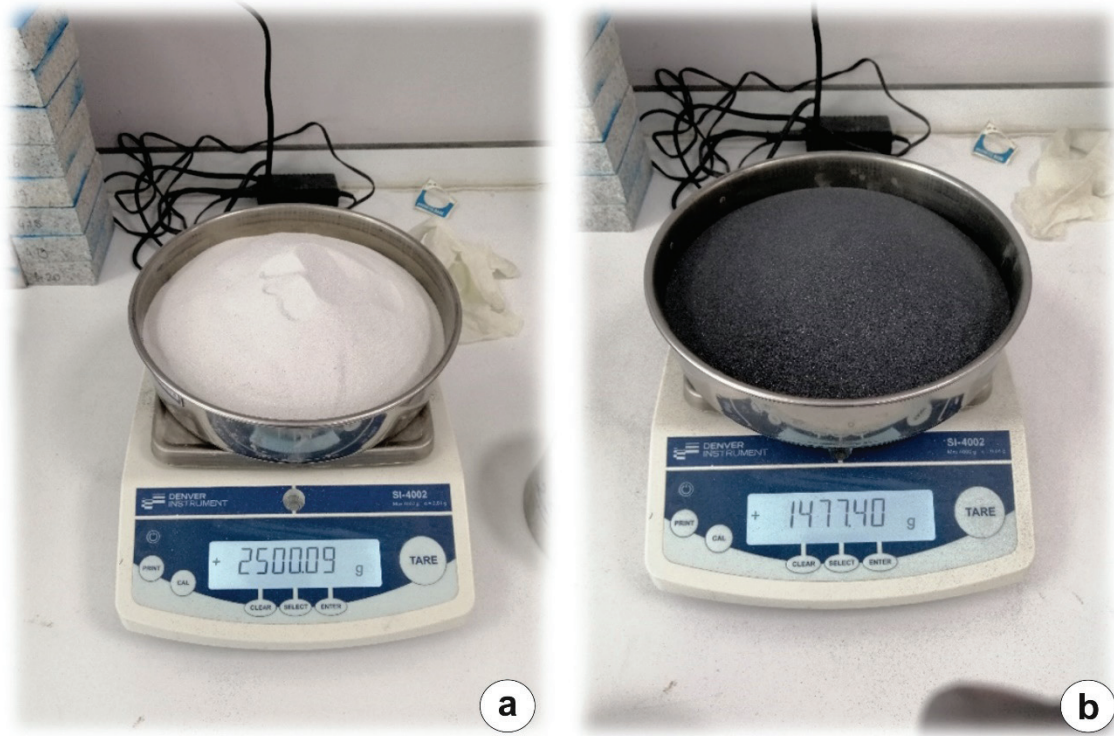
Bu çalışmanın ana amacı GDA deneyindeki sorunlara bir yaklaşımda bulunmaktadır. Bu amaç doğrultusunda GDA deneyinin sonuçlarının BA deneyi ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. GDA ve BA deneylerinde (TS EN 14157, 2017) farklı özelliğe sahip aşındırma tozları kullanılmaktadır (Şekil 2). BA deneyinde 1.10 mm ile 5.10 mm aşınma üretmek için tasarlanmış siyah renkli yapay korundum kullanılmıştır. GDA deneyinde ise, beyaz renkli FEPA 42-1: 2006 teknik belgesine uygun olarak, büyüklüğü 80 (201 μm) olan korundum (beyaz erimiş alümina)

tozu kullanılmıştır. Her iki toz maliyet açısından karşılaştırıldığında, BA deneyinde kullanımı önerilen siyah renkli yapay korundum aşındırma tozunun birim fiyatının GDA deneyinde kullanılan beyaz erimiş alümina korundum tozunun birim fiyatının yaklaşık üç katı kadar olduğu tespit edilmiştir.

Seçilen kaya örnekleri ve belirlenen deney yöntemleri sonrasında laboratuvar çalışmalarına geçilmiştir. Laboratuvar çalışmalarının ilk aşamasında seçilen kayaların fiziksel özellikleri TS 699 (2016) standardına göre belirlenmiştir ve kaya örneklerinin kuru ağırlıkları ile saf suda 48 saat bekletildikten sonraki doygun ağırlıkları



tespit edilmiştir. Daha sonra numunelerin mat ve cilalı yüzeyleri üzerinde GDA ve BA deneyleri TS EN 14157 (2017) standardında belirtilen cihazlar (Şekil 3) ve tozlar ile belirtilen yöntem sırasına göre yapılmıştır. Bu çalışmanın amaçlarından biri olan, farklı aşındırma tozlarının GDA sonuçları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla, GDA ve BA deneylerinde hem beyaz erimiş alümina korundum hem de siyah renkli yapay korundum kullanılmış ve her iki deney sonundaki aşındırma farkları karşılaştırılmıştır.

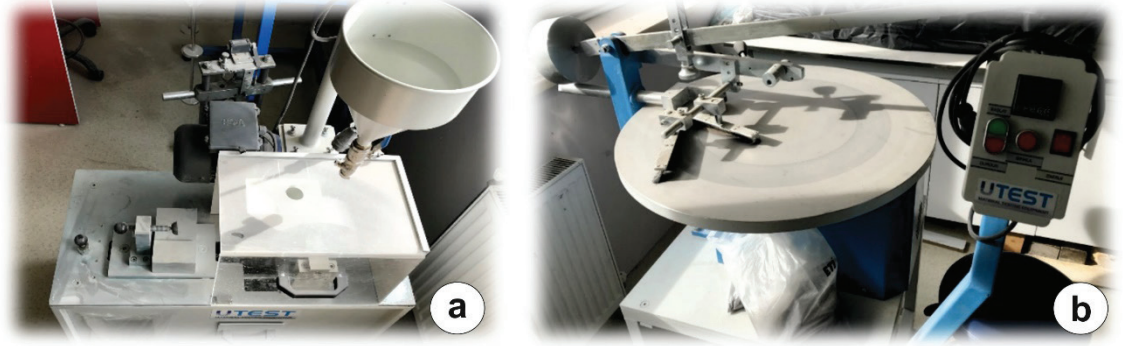


Şekil 2. Deneylerde kullanılan aşındırma tozlarına ait bir görüntü: (a) beyaz erimiş alümina korundum (GDA standardı), (b) siyah renkli yapay korundum (BA standardı).

Figure 2. An image of the abrasive powders used in the experiments: (a) white fused alumina corundum (GDA standard), (b) black artificial corundum (BA standard).

Bu çalışmanın diğer bir amacı doğrultusunda, GDA deneyinde farklı sıkıştırma yüklerinin oluk açıklığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, deney standardında önerilen beyaz renkli alüminalı korundum tozu kullanılarak, oluk açıklığının değişimi tespit edilmiştir. GDA deneyinde aşınma direncinin oluk açıklığından belirlenmesinde gözlenen ilk problem, oluğun taşın her noktasında her zaman düzgün oluşmamasından kaynaklı hatalı sonuçların elde edilmesidir. Taşın disk üzerine tam temas edememesi, disk üzerine gelen aşındırma tozunun

tam olarak dağılamaması gibi etkenler nedeniyle oluklarda yamuk şekiller oluşabilmektedir. Taşın tam olarak disk üzerine temasında taşı diske çeken ağırlığın etkisi önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada ilk olarak GDA deneyi için standartta belirtilen ağırlığın oluk şekli üzerinde ne kadar etkili olduğu üzerinde durulmuş ve GDA deneyi için uygulanan standart sıkıştırma ağırlığı olan 14 kg dışında, 10 kg ve 18 kg ağırlıklar da kullanılarak ağırlığın aşınma ve oluk şekli üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 3. Geniş Diskli Aşındırma (a) ve Böhme Aşındırma (b) cihazlarına ait bir görüntü.

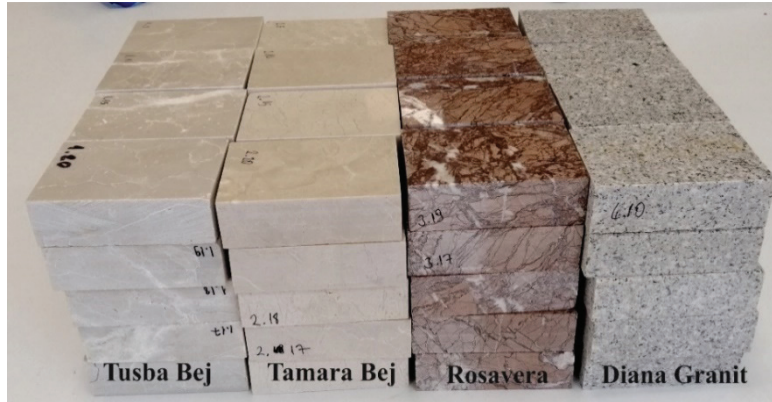
Figure 3. An image of Wide Wheel Abrasion (a) and Böhme Abrasion (b) devices.

BULGULAR ve TARTIŞMALAR

Seçilen Kaya Türlerinin Genel Özellikleri

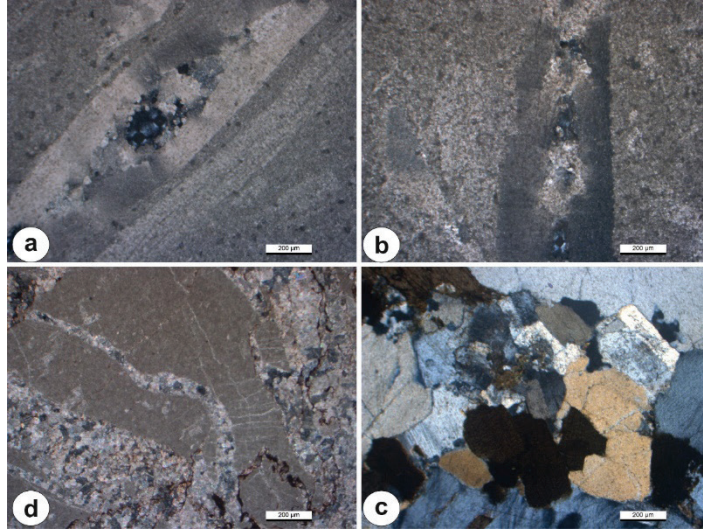
Bu çalışmada, bir mermer fabrikasından toplam 4 adet farklı kaya numunesi alınmıştır. Deneye tabi tutulan kayaların üçü kimyasal sedimanter (kireçtaşı) kaya gurubuna, biri ise magmatik kaya (granit) sınıfına aittir (Şekil 4). Sedimanter kayalar makroskobik olarak incelendiğinde bu örneklerin farklı renk, doku ve damar yapısına sahip kireçtaşlarından oluştuğu görülmektedir. Makroskobik ve mikroskobik özelliklerine bakıldığında, Tusba Bej örneği yer yer ayrılmış, yer yer aşırı tektonizma etkisinde

kalarak bol kırıklı çatlaklı kaya özelliği kazanmış neritik kireçtaşı olup, çatlaklarında genellikle kalsit dolgu gözlenmektedir. Tamara Bej örneği incelendiğinde, sert, kırılğan bir yapı sunmakta ve bentik foraminifer kavkı gözlenmektedir. Birim yer yer mikro fosil içermektedir. Rosavera örneği polarizan mikroskop altında incelendiğinde, genelde kalsit mineralinin hakim olduğu ve çatlakların kalsit dolgulu olduğu bir yapı gözlenmektedir. Diana Granit örneği polarizan mikroskop altında incelendiğinde, kuvars, ortoklas, amfibol, biyotit minerallerinden oluştuğu görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 4. Çalışmada kullanılan mermer örneklerine ait makroskobik bir görüntü.

Figure 4. A macroscopic view of the marble samples used in the study.



Şekil 5. Çalışmada kullanılan mermer örneklerine ait mikroskopik görüntüler: ((a) Tusba Bej, (b) Tamara Bej, (c) Rosavera, (d) Diana Granite).

Figure 5. Microscopic views of the marble samples used in the study: ((a) Tusba Bej, (b) Tamara Bej, (c) Rosavera, (d) Diana Granite).

Seçilen Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Bu çalışmada, numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 4 ayrı kaya grubunun her birinden 18 adet örnek seçilmiştir. Numunelerin kuru (γ_k) ve doymun (γ_d) birim hacim ağırlıkları belirlendikten sonra poroziteleri (n) hesaplanmıştır. Numuneler incelendiğinde, ortalama kuru birim hacim ağırlık (KBHA) değerlerinin 24.86 – 25.85 kN/m³, doymun birim hacim ağırlık (DBHA) değerlerinin ise 25.04 -25.91 kN/m³ arasında değiştiği, en düşük KBHA değerinin Diana Graniti, en yüksek KBHA değerinin ise Tusba Bej ile Tamara Bej numunesine ait olduğu belirlenmiştir (Çizelge 1). Numunelerin görünür porozite (n) değerleri incelendiğinde ise, ortalama gözeneklilik değerlerinin %0.42 ile %1.81 arasında değiştiği, Diana Graniti'nin gözeneklilik oranının diğer numunelere oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1).

Çalışmanın ilk aşamasında GDA deneyi için standartta belirtilen ağırlığın oluk şekli üzerinde ne kadar etkisi olduğu üzerinde durulmuş ve GDA deneyi için uygulanan standart sıkıştırma ağırlığı olan 14 kg dışında, 10 kg ve 18 kg ağırlıklar da kullanılarak ağırlığın aşınma ve oluk şekli üzerindeki etkileri incelenmiştir.

GDA deneyinin sonuçları standartta belirtilen kalibrasyona bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle standartta önerilen kalibrasyon mermerinde de üç farklı sıkıştırma yükünde (10 kg, 14 kg, 18 kg), alüminalı erimiş korundum tozu (beyaz) kullanılarak oluklar açılmış ve yüke bağlı oluk değişimleri deney kalibrasyon mermeri olan Boulonnais Mermeri üzerinde de ölçülerek sonuçların kalibrasyonu standarda göre hesaplanmıştır (Çizelge 2). Ayrıca Boulonnais Mermeri üzerinde standartta belirtilen sıkıştırma yükünde siyah renkli yapay korundum aşındırma tozu 14 kg'lık yükte denenmiş ve oluşan oluk açıklığı yapılacak hesaplamalarda kullanılmak üzere kaydedilmiştir (Çizelge 3).

Özvan, İnan

Çizelge 1. Deney tabii tutulan numunelerin ortalama fiziksel özellikleri.

Table 1. Average physical properties of the tested samples.

Örnek Adı		Kuru Kütle (gr)	Yaş Kütle (gr)	KBHA (kN/m ³)	DBHA (kN/m ³)	Görünür Porozite (%)
Tusba Bej	Ortalama	549.5	550.7	25.85	25.91	0.60
	En Büyük	558.2	560.0	26.11	26.15	0.88
	En Küçük	533.9	534.9	25.51	25.59	0.36
Tamara Bej	Ortalama	549.0	549.9	25.79	25.83	0.42
	En Büyük	571.7	572.8	26.03	26.07	0.59
	En Küçük	530.5	531.3	25.47	25.51	0.29
Rosavera	Ortalama	552.3	555.0	25.54	25.66	1.26
	En Büyük	561.5	564.3	25.91	26.02	1.98
	En Küçük	535.8	539.6	25.06	25.24	0.71
Diana Graniti	Ortalama	530.6	534.4	24.86	25.04	1.81
	En Büyük	552.2	556.6	25.18	25.34	2.09
	En Küçük	509.7	513.0	24.62	24.77	1.57

Seçilen Numunelerin Aşınma Direnci Deney Sonuçları

Boulonnais Mermerinde farklı sıkıştırma yüklerindeki oluk açıklıkları incelendiğinde yükün artmasıyla oluk genişliğinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca 14 kg sıkıştırma yükünde beyaz erimiş alümina korundum ile siyah renkli yapay korundum tozu arasında aşındırma farkının hemen hemen aynı olduğu da tespit edilmiştir (Çizelge 2 ve 3). Kalibrasyon için önerilen Boulonnais Mermerinde hem farklı tozlar hem de farklı sıkıştırma yüklerinde oluşan oluk açıklıkları değerlendirildiğinde, her iki tozun birbirleri yerine kullanılabilmesi ve sıkıştırma yükü arttıkça olukların daha düzgün oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 6).

Çizelge 2. GDA deneyinde farklı sıkıştırma yükleri altında alüminalı erimiş korundum tozu (beyaz) kullanıldığında Boulonnais Mermeri üzerinde açılan oluk genişlikleri.

Table 2. Groove widths on the Boulonnais Marble by using aluminized fused corundum powder (white) under different compression loads in GDA experiment.

Deney No	Uygulanan sıkıştırma yükü (kg)	Boulonnais Mermeri'nde oluşan oluk açıklığı (cm)
1	10	1.95
2	14	2.16
3	18	2.55

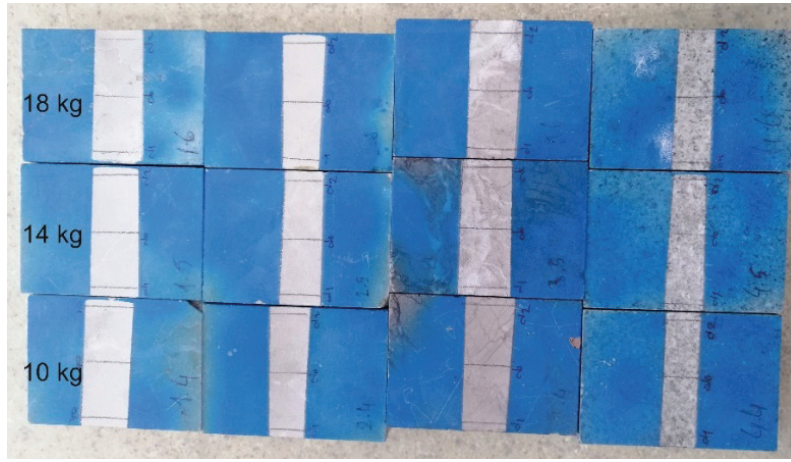
Her sıkıştırma yükünde yapılan GDA deneyi ve elde edilen sonuçlar standartta önerildiği şekilde Boulonnais Mermeri'nden elde edilen düzeltme katsayıları ile kalibre edilmiştir. Ölçülen değer + (20.0 – Kalibrasyon Değeri) eşitliği kullanılarak düzeltilmiş ve Düzeltilmiş Oluk Açıklığı (DOA) (mm) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4). GDA deneyinde oluk açıklığı standartta önerildiği şekliyle cm cinsinden elde edilmiştir.

Çizelge 3. GDA deneyinde 14 kg sıkıştırma yükü altında siyah renkli yapay korundum tozu kullanılarak Boulonnais Mermeri üzerinde açılan oluk genişlikleri.

Table 3. Groove widths on the Boulonnais Marble using artificial corundum powder (black) under 14kg compression load in GDA experiment.

Deney No	Uygulanan sıkıştırma yükü (kg)	Boulonnais Mermeri'nde oluşan oluk açıklığı (cm)
1	14	2.15

damarlı yapıda olması ve farklı sertliklere sahip minerallerden oluşmasıdır. Özellikle granit içerisinde bulunan kuvars ve feldispat gibi farklı sertliklerdeki mineraller aşınma değerlerini etkilemektedir. Granitte gözlenen bu aşınma farklılığının oluşmasının nedeni, aşındırma tozunun granitteki birincil petrografik değişken olan kuvars yüzdesi içeriğinden etkilenmesidir. Granit gibi farklı sertliğe sahip minerallerden oluşan Boulonnais Mermerindeki oluk açıklığını



Şekil 6. Farklı sıkıştırma yüklerinde oluşan düzensiz oluk açıklıklarına ait bir görüntü.

Figure 6. An image of the irregular grooves at different compression loads.

Örneklerde ölçülen oluk açıklıkları her sıkıştırma ağırlığı için kıyaslandığında, ağırlık 10 kg'dan 14 kg'a çıkınca oluk açıklığının arttığı, fakat 18 kg'da az da olsa oluk açıklığının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 7). Farklı sıkıştırma yüklerinde yapılan GDA deneyi sonuçlarına bakıldığında genelde sıkıştırma yükü arttıkça oluk açıklıklarının da arttığı gözlenmiştir. Fakat DOA değerleri ile sıkıştırma yükü arasında anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir. Bunun en büyük nedeni, bu çalışmada kullanılan örneklerin

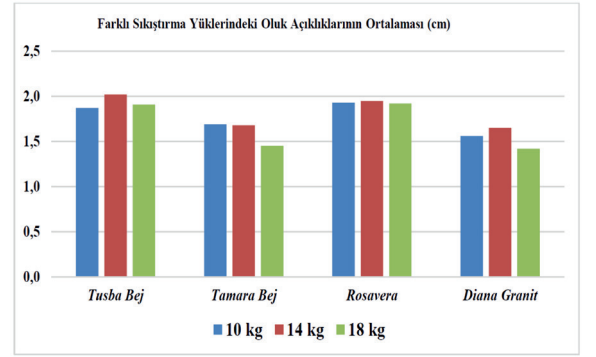
minerallerin etkilediği ve bu etkinin de DOA değerlerine yansıdığı da ayrıca gözlenmiştir. Diana Graniti gibi farklı sertliklere sahip minerallerden oluşan kayaların aşınma değerini modal mineral kompozisyonu kontrol ettiğinden (Yılmaz vd., 2017), bu numunenin düzeltilmiş oluk açıklığı (DOA) değeri farklı sıkıştırma yüklerinde yüke bağlı olarak değişmemiştir. İlerleyen dönemlerde gerçekleştirilecek bilimsel çalışmalarda bu farklılığın detaylarının araştırılması önerilmektedir.

Çizelge 4. GDA deneyinde farklı sıkıştırma yüklerinden elde edilen ortalama oluk açıklığı değerleri.

Table 4. Average groove gap values obtained from different compression loads in GDA.

Örnek No	10 kg		14 kg		18 kg	
	Oluk Açıklığı (cm)	Düzeltilmiş DOA	Oluk Açıklığı (cm)	Düzeltilmiş DOA	Oluk Açıklığı (cm)	Düzeltilmiş DOA
Tusba Bej	1.82	1.87	2.18	2.02	2.46	1.91
Tamara Bej	1.64	1.69	1.84	1.68	2.00	1.45
Rosavera	1.88	1.93	2.11	1.95	2.47	1.92
Diana Graniti	1.51	1.56	1.81	1.65	1.97	1.42

Ortalama oluk açıklıkları seçilen örnekler üzerinden değerlendirildiğinde en fazla aşınan malzemenin Tusba Bej ticari ismi ile anılan kaya numunesi olduğu, en az aşınan kaya numunesinin ise Diana Graniti ticari ismi ile anılan kaya olduğu belirlenmiştir. Görsel olarak birbirine benzeyen Tusba Bej ile Tamara Bej örnekleri arasında aşınma kaybı miktarı açısından ciddi bir fark olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, hem makroskobik hem de mikroskobik olarak kalsit damarlı olan Tusba Bej ve Rosavera örneklerinin aşınmadan daha fazla etkilendiği görülmüştür. Örneklerin porozite değerleri ile aşınma değerleri karşılaştırıldığında aşınma miktarı ile örneğin gözeneği arasında bir ilişkinin olmadığı da belirlenmiştir. Özellikle anizotrop özelliğe sahip kayalarda aynı numunenin farklı yerlerinde farklı oluk açıkları oluşmaktadır. Bu nedenle GDA deneyinin anizotropi özelliği gösteren kayalarda yapılmasının yanlış sonuçlar doğurabileceği ortaya çıkmaktadır.

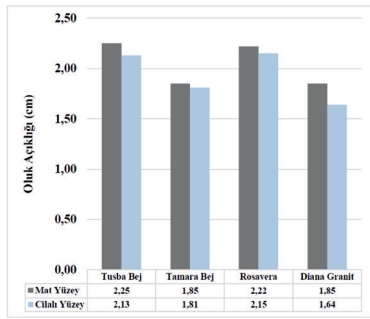


Şekil 7. Farklı sıkıştırma yüklerinde oluşan düzeltilmiş oluk açıklıklarına (DOA) ait ortalama değerleri gösteren bar diyagramı.

Figure 7. Bar diagram showing the mean values of the calibration groove aperture (DOA) formed at different compression loads.

Bu çalışmada GDA deneyinin uygulandığı mermer örneğinin yüzeyinin cilalı olup olmadığı ayrıca incelenmiştir. Bilindiği üzere, bu gibi deneyler yapılırken bazen ocaktan bazen de fabrikadan laboratuvara örnekler nakledilebilmektedir. Ticari anlamda kullanılan mermerlerin genelde bir yüzeyi cilalanmaktadır. Bu duruma sahip mermerlerde oluşan aşınma kaybı değerlerinin belirlenmesi için GDA deneyi standartta belirtildiği şekliyle 14 kg sıkıştırma yükünde yapılmıştır. GDA deneyleri seçilen örneklerin hem cilalı yüzeylerinde hem

de yapıştırma mat yüzeylerinde ayrı ayrı uygulanmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında cilalı yüzeylerdeki oluk açıklığı miktarının mat yüzeylerde oluşan oluk açıklığı miktarına göre daha az olduğu görülmüştür (Şekil 8). Bunun nedeni cilalı yüzeydeki cila tabakasının aşınma miktarını etkilemesidir. Bu nedenle sonuçların daha doğru yorumlanmasında işlem görmemiş mat yüzeylerde deneyin yapılması önerilmektedir.



Şekil 8. Mat ve cilalı yüzeylerde uygulanan GDA deney sonuçlarının ortalamalarına ait bar diyagramı.

Figure 8. Bar diagram of the average values of the GDA test results applied on the matte and polished surfaces.

GDA deneyinde beyaz erimiş alümina korundum aşındırıcı tozu, yapay korundum aşındırıcı toza göre aşındırmayı daha fazla gerçekleştirdiği tespit edilmiştir (Çizelge 5 - Şekil 9). Toplamda 48 örnek üzerinde her iki toz ile yapılan deneylerde oluk açıklığı tespit edilmiş ve ortalama olarak Şekil 9'daki değerler elde edilmiştir. Oluşan oluk açıklıklarına bakıldığında Tusba Bej ile Rosavera mermer örneklerinde her iki toz kullanıldığında aşındırma miktarı 2 cm'den fazla iken, diğer iki örnekte ise 2 cm'nin altında değerler elde edilmiştir. Her iki aşındırma tozundan elde edilen değerler arasında korelasyon ilişkisine bakıldığında yüksek belirleme katsayısına ($R^2=0.89$) sahip bir ilişki belirlenmiştir (Şekil 10). İki farklı

aşındırma tozunun GDA deneyinde birbiri yerine kullanılması durumunda çok büyük farkların olmayacağı ve Eşitlik 1'de önerilen formül ile bu farklılığın giderilebileceği ortaya konmuştur.

$$ST=0.8786*BT^{1.1162} \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

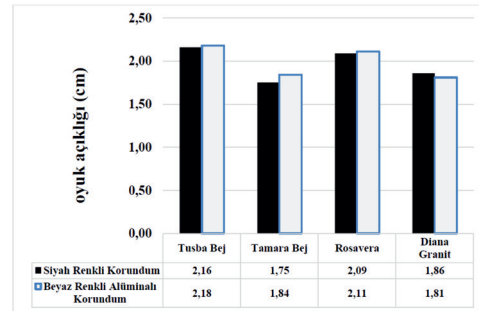
ST: Siyah renkli yapay korundum tozu kullanılarak yapılan GDA deneyi (cm)

BT: Beyaz erimiş alümina korundum tozu kullanılarak yapılan GDA deneyi (cm)

Çizelge 5. İki farklı aşındırıcı toz ile elde edilen oluk açıklığı ortalama değerleri.

Table 5. Average groove values obtained with two different abrasive powders.

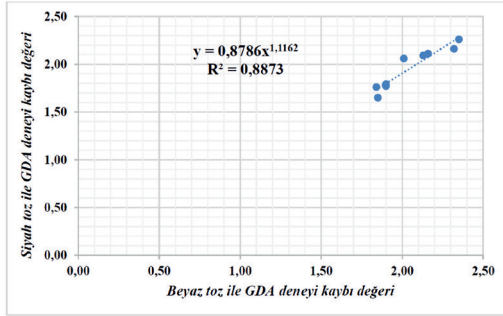
Örnek No	Siyah renkli yapay korundum (ST)	Beyaz erimiş alümina korundum (BT)
Tusba Bej	2.16	2.18
Tamara Bej	1.75	1.84
Rosavera	2.09	2.11
Diana Graniti	1.86	1.81



Şekil 9. İki farklı aşındırıcı toz ile yapılan GDA deneyi sonuçları (14 kg'lık sıkıştırma yükünde).

Figure 9. GDA test results using two different abrasive powders (14 kg compression load).

Özvan, İnan

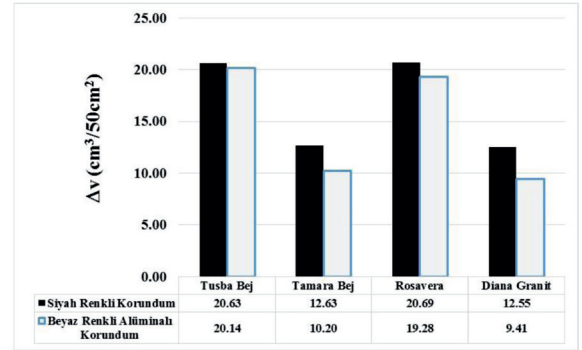


Şekil 10. GDA deneyinde farklı tozlardan elde edilen aşınmalar arasındaki korelasyon ilişkisi.

Figure 10. Correlation relationship between abrasions obtained from different powders in the GDA test.

GDA deney sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla yapılan BA deneyinde ise, aşınma miktarı standartta önerildiği şekliyle $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ cinsinden elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin BA değerlerine bakıldığında genel olarak en az aşınan numunelerin GDA sonuçlarında olduğu gibi Diana Graniti ve Tamara Bej mermeri olduğu görülmüştür. İki farklı aşındırma tozu ile yapılan deneyde GDA deneyinde olduğu gibi benzer sonuçlar elde edilmiştir. Toplamda 24 örnek üzerinde her iki toz ile oluşan aşındırma miktarı test edilmiş ve ortalama olarak Şekil 11'deki değerler elde edilmiştir. Aşındırma miktarına bakıldığında, Tusba Bej mermeri ile Rosavera mermeri örneklerinde her iki toz arasındaki aşındırma miktarlarında %1'den az bir fark bulunurken, diğer iki örnekte ise %1 ile 2 arasında bir fark oluştuğu görülmüştür (Şekil 11).

Her iki aşındırma tozundan elde edilen değerler arasındaki korelasyon ilişkisine bakıldığında yüksek belirleme katsayısına ($R^2=0.99$) sahip bir ilişkinin elde edildiği belirlenmiş olup (Şekil 12), bu iki aşındırma tozunun BA deneyinde birbiri yerine kullanılması durumunda çok büyük farkların olmayacağı ve Eşitlik 2'de önerilen formül ile bu farklılığın giderilebileceği ortaya konmuştur.



Şekil 11. İki farklı aşındırıcı toz ile yapılan BA deneyi sonuçları.

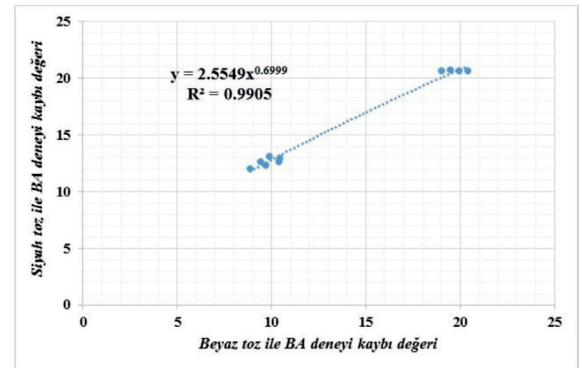
Figure 11. BA test results using two different abrasive powders.

$$ST=2.5549*BT^{0.7} \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

ST: Siyah renkli yapay korundum tozu kullanılarak yapılan BA deneyi ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)

BT: Beyaz erimiş alümina korundum tozu kullanılarak yapılan BA deneyi ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)



Şekil 12. BA testinde farklı tozlardan elde edilen aşınmalar arasındaki korelasyon ilişkisi.

Figure 12. Correlation relationship between abrasions obtained from different powders in the BA test.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada kayaların aşındırılmasında son yıllarda sıkça kullanılan Geniş Diskli Aşındırma (GDA) deneyinde karşılaşılan sorunlar farklı yöntem ve malzeme ile irdelenmiştir.

GDA deneyinde, karşı sıkıştırma ağırlığının artmasıyla aşınma miktarının arttığı ve ağırlığın azaltılmasıyla da oluk açıklığının yamuk bir şekil aldığı görülmüştür. Fakat DOA değerleri hesaplandığında, sıkıştırma yükünün artmasıyla oluk açıklığının artmadığı belirlenmiştir. Bunun en büyük nedeni, bu çalışmada kullanılan örneklerin damarlı yapıda olması ve farklı sertliklere sahip minerallerden oluşmasıdır. Özellikle granit içerisinde bulunan kuvars ve feldispat gibi farklı sertliklerdeki mineraller aşınma değerlerini etkilemektedir.

Bu çalışmada kullanılan kayaların GDA ve BA sonuçlarına bakıldığında, genel olarak en az aşınan örneğin Diana Graniti olduğu belirlenmiştir. Granit türü kayaçlarda Boulonnais Mermeri'ndeki oluk açıklığının minerallerin sertliğinden etkilenebileceği düşünüldüğünden, GDA deneyi sonrasında hesaplanan düzeltilmiş oluk açıklığı (DOA) değerlerinde hatalar olabileceği gözlenmiştir. Gerçekleştirilecek bilimsel çalışmalarla bu farklılığın nedenlerinin araştırılması önerilmektedir.

GDA deneyindeki oluk açıklığı, aynı örneğin farklı yerlerindeki gözeneklilik, bantlı yapı, fosil içeriği gibi anizotrop özelliklerden etkilendiği için değerlendirmelerde bazen doğru sonuçlar verememektedir. Bu nedenle deneye tabi tutulacak örneklerde aşındırılacak yüzeyin numunenin tümünü yansıtmaya dikkat edilmelidir. Ayrıca deney esnasında fiziksel ortamın ve kayaç ile aşındırıcı disk arasına akış sağlayan huninin eğikliği aşınma sırasında oluşan oluk şekillerinin kısmen farklılık göstermesine sebep olduğu gözlenmiştir. BA deneyi, kayacın

tüm yüzeylerinde 16 farklı döngü ve her bir döngüde 90° çevrilerek gerçekleştirildiğinden kayacın dokusu, mineralojik yapısı, bileşenlerinin dizilimi gibi anizotropi etkisi kısmen giderilmektedir. Bu nedenle anizotrop özellik gösteren kaya örneklerinde GDA deneyi yerine BA deneyi ile aşındırma kaybının belirlenmesi önerilmektedir.

GDA deneyinde 4 farklı örneğe ait cilalı ve mat yüzlerin aşındırma kayıpları irdelendiğinde, deneye tabi tutulan tüm örneklerde mat yüzlerin daha iyi aşındığı belirlenmiştir. Cilalı yüzlere ait örneklerin cila sertliğine bağlı olarak aşınmaya karşı daha dirençli oldukları tespit edilmiştir. Bu nedenle deneye tabi tutulacak örneklerin doğal yüzeylerinde deneyin yapılması önerilmektedir.

İki farklı aşındırıcı toz ile aynı örnekler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, GDA deneyi için standartlara uygun olarak kullanılan beyaz erimiş alümina korundum aşındırıcının kısmen siyah renkli yapay korundum aşındırıcı toza göre örnekleri daha fazla aşındırdığı tespit edilmiştir. BA deneyinde ise, standartlarda belirtilen siyah renkli yapay korundum tozun beyaz erimiş alümina korundum toza nazaran örneklerde %1-2 oranında daha fazla aşınma kaybına neden olduğu belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda her iki aşındırıcı tozun sonuçları GDA deneyi için karşılaştırıldığında;

- Her iki tozun aşındırma sonuçları arasında çok az farkın olduğu, bu tozların birbirleri yerine kullanılabileceği belirlenmiştir.
- GDA testi için standartlarda belirlenen beyaz erimiş alümina korundum aşındırıcı toz ile deney yapılırken toz sarfiyatının yaklaşık 2500 gr olduğu, siyah renkli yapay korundum tozu ile aynı deneyin yaklaşık 1400 gr (± 50) ile yapıldığı tespit edilmiştir.

Özvan, İnan

- Tane boyu 80 olan beyaz erimiş alümina korundum aşındırıcı tozun üç deneyde kullanılabilmesine karşın, tane boyu 200 olan siyah renkli yapay korundum aşındırıcı tozun her deney sonrası 20 gr (± 5) azaldığı ve azalan gramaj miktarı dahi göz önüne alındığında siyah renkli yapay korundum tozun daha çok test için kullanılabileceği belirlenmiştir.

Aşındırıcı tozların bu sonuçları yorumlanacak olursa, siyah renkli yapay korundum aşındırıcı tozun, beyaz erimiş alümina korundum toza göre tek dezavantajının maliyeti olduğu belirlenmiştir. Fakat kullanım sıklığı ve deneye tabii tutulan miktar göz önünde bulundurulduğunda siyah renkli yapay korundum tozunun GDA deneylerinde kullanımının teknik ve ekonomik açıdan mümkün olabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Çobanoğlu, İ., Çelik, S.B., 2010. Correlation between wide wheel abrasion (capon) and Böhme abrasion test results for some carbonate rock. *Sci.Res. Essays*, 5, (22), 3398-3404.
- Çobanoğlu, İ., Çelik, S.B., 2017. Assessments on the usability of Wide Wheel (Capon) test as reference abrasion test method for building stones. *Construction and Building Materials*, 151, 319-330.
- Karaca, Z., Deliormanlı, A.H., Elçi, H., Pamukcu, C., 2010. Effect of freeze-thaw process on the abrasion loss value of stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(7), 1207-1211.
- Karaca, Z., Yılmaz, N.G., Göktan R. M., 2012. Considerations on the European Standard EN 14157 test methods: abrasion resistance of natural stones used for flooring. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 103-111.
- McGregor, I.D., Chiu, K.Y., 2000. Porosity and wear resistance in stone flooring. *Journal of Test Evaluation*, 28, 149-154.
- Marini, P., Bellopede, R., Perino, L., Regibus, C.D. 2011. Optimisation of an abrasion resistance test method on natural stones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 133-138.
- Sahlin, T., Starzec, K., Stigh, J., Schouenborg, B., 2001. Physical properties and durability of fresh and impregnated limestone and sandstone from central Sweden used for thin stone flooring and cladding. 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 19-24 June 2000, Venice. 181-185.
- TS 699, 2016. Tabii Yapı Taşları, İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. 36.
- TS EN 14157, 2017. Doğal taşlar – Aşınma direncinin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. 21.
- Yılmaz, N.G., Goktan, R.M., Onargan, T., 2017. Correlative relations between three-body abrasion wear resistance and petrographic properties of selected granites used as floor coverings. *Wear*, 372-373, 197-207.



Araştırma Makalesi / Research Article

Bafa Gölü'nün Hidrokimyasal ve Hidrojeolojik İncelenmesi: Sürdürülebilir Su Kaynak Yönetimi

*Hydrogeological and Hydrochemical Investigations of Lake Bafa:
Sustainable Water Resource Management*

Anıl KÜÇÜKSÜMBÜL* , Ali Toygar AKAR* , Gültekin TARCAN* 

* Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390 İzmir

Geliş (Received): 06 Mart (March) 2020 / Düzeltme (Revised): 14 Temmuz (July) 2020 / Kabul (Accepted): 24 Temmuz (July) 2020

ÖZ

Bu çalışma, Bafa Gölü ve batısında kalan alanın hidrojeolojik-hidrojeokimyasal incelenmesini ve mevcut yüzey-yeraltı suyu ilişkisi ile kirliliğinin araştırılmasını kapsamaktadır. İnceleme alanı ve çevresindeki jeolojik yapının temelini Menderes Masifi kayaçları oluşturmaktadır. Menderes Masifi'ne ait Jura-Kretase yaşlı mermerler, üzerleyen Neojen gölsel karbonatlar ve Kuvaterner alüvyon akifer oluşturan birimlerdir. Birçok kaynak ile kuyudan yeraltı suyu üretimi bulunmaktadır. Sırasıyla 23400 ve 56000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerlerine sahip Bafa Gölü ile jeotermal akışkan Na-Cl egemen sulardır. Tuzlu sular da deniz suyu karışım yüzdeleri hesaplanmıştır. Bafa Gölü; deniz suyu girişi etkisindeki jeotermal sularla, yağışlarla ve Büyük Menderes Nehir sularıyla beslenmektedir. Bafa Gölü kuzeybatısında Menderes Masifi'ne ait mermerlerden sağlanan ılık, tuzlu, karstik sular yöredeki balık çiftlikleri tarafından kullanılmaktadır. Yaklaşık 2 m^3/s debiyle üretilen sular, kullanım sonrası Bafa Gölü'ne ya da Menderes Nehri'ne boşaltılmaktadır. Gölün kimyasını belirleyen süreçler bu suların karışımı ve buharlaşma etkisidir. Deniz suyu girişi, denizden Bafa Gölü'ne kadar uzanan Akköy Fayı ile denetlenmektedir. Bafa Gölü'nün tuzluluğu kirlenme işareti değil, doğal jeolojik evriminin sonucudur. Bununla birlikte Bafa Gölü'ne deşarj edilen yüksek çözünmüş madde içeren jeotermal sular, gölün ekosistemini olumsuz etkilemektedir. Düşük sıcaklıklı suların çekim yapıldığı kuyular, jeotermal kuyu olarak ruhsatlandırılmalıdır. Kullanım ardından amonyumdan arıtılarak mermer birimine geri basılması, rezervuarın ve ekosistemin devamlılığı için en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. Suların içme, hayvancılık ve alabalık üretimine uygunluk durumları incelenmiştir. Bafa Gölü ve çevresindeki yüzey – yeraltı suyu ilişkisi belirlenmiş ve organik-inorganik analiz sonuçları değerlendirilerek yorumlanmıştır. Bafa Gölü'nün sürdürülebilir su kaynak yönetimi için çözüm önerileri detaylarıyla sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bafa Gölü, Deniz Suyu Girişimi, Su Kirliliği, Su Kimyası, Sürdürülebilir Su Kaynak Yönetimi, Yeraltı Suyu

ABSTRACT

This study includes hydrogeological and hydrogeochemical assessment and investigation of the flow and contamination relationships between surface water and groundwater of the Lake Bafa and its western part. Menderes Massif rocks form the basis of the geological structure in and around the study area. Jurassic-Cretaceous marbles belonging to the Menderes Massif, overlying Neogene lacustrine carbonates and Quaternary alluvium are the aquifer forming units. Groundwater is exploited from many wells and springs. Lake Bafa and geothermal fluid with conductivity values of 23400 and 56000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ are Na-Cl dominated waters, respectively. Seawater

mixing percentages have been calculated for saline waters. Lake Bafa is recharged by geothermal water affected by seawater intrusion, rainwaters and Büyük Menderes River. Low-temperature saline karstic waters supplied from the marbles belonging to the Menderes Massif in the northwest of the Lake Bafa are used by fish farmers in the region. Groundwater with about 2 m³/sec is discharged to the Lake Bafa or Büyük Menderes River after usage. Processes, which determine the chemistry of the lake, are mixture of these water and effect of evaporation. The seawater intrusion is controlled by the Akköy Fault extending from the sea to the Lake Bafa. Salinity of the Lake Bafa is not a sign of contamination, but the result of natural geological evolution. However, geothermal waters containing high dissolved ions discharged into the Lake Bafa negatively affect the ecosystem of the lake. Geothermal waste water should be removed from ammonium and reinjected into the marble unit. This implementation has been determined as the most suitable method for the continuity of the reservoir and ecosystem. The suitability of the waters for drinking, livestock and fish farming has been examined. The surface water and groundwater relationship is determined in and around of the Lake Bafa, and the results are interpreted by evaluating organic-inorganic chemical analysis. Solution suggestions for sustainable water resource management of the Lake Bafa are presented in detail.

Keywords: Groundwater, Hydrochemistry, Lake Bafa, Seawater Intrusion, Sustainable Water Resource Management, Water Contamination

GİRİŞ

Bafa Gölü, Menderes Masifi'nin metamorfik kompleksi içinde bulunan tektonik graben bölgesinde yer almaktadır (Dora, 1975; Şengör ve Yılmaz, 1981; Bozkurt ve Oberhansli, 2001; Erdoğan ve Güngör, 2004; Sümer vd., 2013; Seyitoğlu ve Işık, 2015). Gölün oluşum süreci, Geç Pleistosen'de başlamıştır. Yaklaşık olarak MÖ 12 bin yıllarında Genç buzul çağıının bitmesiyle başlayan buzul durgun döneminde meydana gelen deniz suyu seviyesindeki değişimlerin ardından Büyük Menderes Nehir deltasının denize doğru ilerlemesi ile Bafa Gölü bugünkü halini almıştır. Bölge iklimsel ve stratejik avantajları nedeniyle tarih boyunca tercih edilmiştir. Kalkolitik dönemden bu yana insanoğlu göl ekosisteminde değişikliklere neden olmuştur. İlk antropojenik (insan kaynaklı) etki MÖ 3500 yıllarında Milet bölgesine yerleşimin ardından bitki örtüsünde gözlenmiştir (Knipping vd., 2008). MÖ 1900-1200 yıllarında, Minos ve Miken medeniyetlerinin Milet bölgesine yerleşmesi ve küçükbaş hayvancılık yapması nedeniyle bitki örtüsünde şiddetli bozunma gerçekleşmiştir (Brückner vd., 2006). MÖ 700-600 yıllarına karşılık gelen Arkaik dönem, Milet'in en kalabalık ve kültürel anlamda

zengin olduğu zaman aralığıdır. Aynı dönemde Bafa Gölü'nün güneybatısında kalan mermer ocaklarının işletilmesi, insan kaynaklı ilk hidrojeolojik etkidir. Bölge ilerleyen dönemde sırasıyla Pers, Makedonya, Roma, Bizans, Osmanlı uygarlıklarına ev sahipliği yapmıştır. Bafa Gölü'nün deniz ile bağlantısının tamamen kesilme süreci ise Helenistik dönemin sonundan başlayarak MS 1500 yılında tamamlanmıştır (Aksu vd., 1987; Müllenhoff vd., 2004; Brückner vd., 2017).

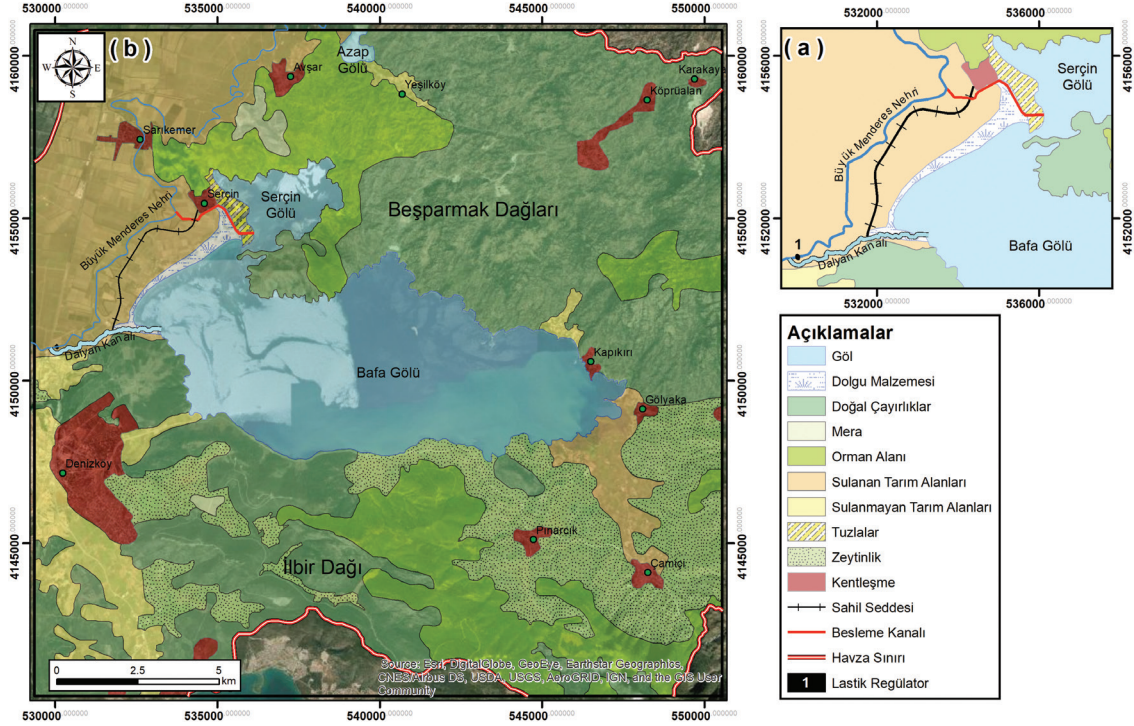
Günümüzde, Bafa Gölü dünyada nesli tükenmekte olan Cüce Karabatak (phalacrocorax pygmeus), Deniz Kartalı (Haliaeetus albilicilla) türlerinin yanı sıra binlerce su kuşu ve ördek tarafından beslenme ve barınma yeri olarak kullanılmaktadır (Koç, 2008). Göl aynı zamanda balıkçılık yapan yöre halkının geçim kaynağıdır. Bafa Gölü balık kapasitesi 781 ton ve kuzeyindeki Serçin Gölü'nün balık kapasitesi ise 19 ton olarak hesaplanmıştır (Van der Berk, 1991). Sahil Seddesi'nden önce balık üretimi 300 ton/yıl olarak kayıt edilmiştir (Kazancı vd., 2009). Yarı kurak akdeniz iklimi görülen bölgede kar ile don nadir yaşanır ve yüksek kotlarla sınırlıdır. Bitki örtüsü, yaprak dökmeyen taksonlardan oluşur. Yabani zeytin (olea) ve keçiboynuzu

(ceratonia) doğal bitki örtüsünü oluşturmaktadır (Seçmen ve Leblebici, 1982). Özellikle gölün güneyi zeytin ağaçları ile kaplıdır (Şekil 1). Gölün kuzeybatısında Serçin Köyü yakınında Menderes Masifi'ne ait mermerlerden gelen ılık, tuzlu, karstik suların yavru balık üretimi yapılmaktadır. Bölge halkından birçok kişi bu tesislerde istihdam edilmektedir. Yöre halkının diğer geçim kaynağı ise büyükbaş hayvancılıktır. Serçin Gölü çevresindeki bölge, meracılık amacıyla kullanılmaktadır. Bafa Gölü güney hattında ise zeytincilik yapılmaktadır. Doğal güzelliği ile dikkat çeken bölgede göl kıyılarında çeşitli tesisler bulunmaktadır.

Bafa Gölü 1985 yılında sahip olduğu flora, fauna zenginliği ve kültürel miras olan antik kentler nedeniyle İzmir ili 2 No.lu Tabiat ve Kültür Varlıkları Koruma Kurulu tarafından 1. Derece sit alanı ilan edilmiştir. Özellikle kurak dönemde, Bafa Gölü su seviyesinde yaşanan düşüş nedeniyle artan kaygıların yarattığı baskı sonucunda sivil toplum örgütlerinin de etkisiyle 1994 yılında Bakanlar Kurulu kararıyla Tabiat Parkı ilan edilmiştir. 2006 yılında geliştirilen projelerle, Nehir – Göl – Deniz suyu etkileşimli mühendislik yapıları ile ekosistem kontrol altına alınmıştır. Sahil Seddesi, Büyük Menderes Nehri taşkınları nedeniyle Bafa Gölü'ne kontrolsüz su girişinin yaratacağı olumsuz etkilerin önlenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Büyük Menderes Nehri'nde hidrolik seviyenin yapay yollarla artışını sağlayan kabartma tesisi (Bafa regülatörü ve şişme savak) aracılığıyla kurak dönemde Serçin Priz Yapısı ve Besleme Kanalı'na yönlendirilen nehir suları Bafa Gölü'nü beslemektedir (Şekil 1a). Şişme savak, Bafa Gölü'ndeki su seviyesi +2 metre seviyesine ulaştığı zaman söndürülmekte ve Büyük Menderes Nehir suları direkt olarak denize ulaşmaktadır. Lastik regülatör sistemi Türkiye'de ilk defa uygulanmış olup tamamlanan proje 222.768 dolara var

edilmiştir. Regülatör kapasitesi 360 m³/sn, Serçin priz yapısı 30 m³/sn kapasitelidir (Koç, 2008). Özellikle kurak dönemlerde Bafa Gölü su seviyesinin azalması nedeniyle meydana gelen olumsuz etkilerin giderilmesi amaçlanarak kurulmuştur. Geliştirilen mühendislik yapıları ile göldeki su döngüsü sağlanarak kirlilik oluşum ve birikiminin önüne geçilmesi, habitatın korunması hedeflenmiştir. Sulama döneminde Dalyan kanalı, Bafa Gölü sularının nehirde yaratacağı tuzlanma nedeniyle kapatılmaktadır. Sulama döneminde Bafa Gölü'nden su çıkışı olmamaktadır. Dalyan kanalı, Bafa Gölü sularının uzaklaştırılması amacıyla kullanımına ek olarak balık üretim tesislerinin ılık, tuzlu, karstik atık sularının deşarj edildiği kanaldır. Birçok mühendislik çalışmasına rağmen Bafa Gölü toplu balık ölümleri ve alg patlamaları ile halen gündeme gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında, tamamlanan mühendislik projelerinin öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen gerek organik gerekse inorganik su kimyası çalışmaları derlenmiştir. Proje kapsamında göl ile bağlantısı olan yüzey – yeraltı sularının majör ve minör elementleri analiz edilmiştir. Sahil Seddesi ve Söke Regülatörünün kurulması ardından Bafa Gölü hidrokimyasal çalışmalarında artış gözlenmiştir. Genel kanı, nehrin gölü kirlettiği ya da kirleteceği yönündedir (Balık ve Ustaoglu, 1989; Cirik vd., 1989; Sarı vd., 2001; Dügel ve Kazancı, 2004; Erdoğan, 2011; Algül ve Beyhan, 2018). Bafa Gölü'nün jeolojik evrimi göz önünde bulundurularak gölü besleyen yüzey suları ve etkileşimde olan akiferlerin kimyasal analizleri yorumlanmıştır. Balık çiftliklerinin üretim yaptığı ve jeotermal kökenli su barındıran mermer akiferinin hidrojeolojik parametreleri belirlenmiştir. Bafa Gölü'nün tüm paydaşlar için kaynak olarak uzun vadeli kullanılabilmesi için çözüm önerileri sunulmuştur.



Şekil 1. Bafa Gölü mühendislik yapıları (a) ve doğa haritası (b).

Figure 1. Engineering structures associated with the Lake Bafa (a) and nature map of the region (b).

YÖNTEM VE MATERYAL

Bafa Gölü çevresinde farklı noktalardan toplam 24 su örnekleme yapılmıştır. Numune kapları standartlara uygun şekilde işlem öncesi saf suyla yıkanmış olup problemler her kullanım öncesi ilgili örneklerden kalan artıklardan arındırılmak üzere saf su ile yıkanmıştır. Örnekler ilgili laboratuvar taleplerine uygun olarak 500 ml ve 1000 ml'lik yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kaplara alınmıştır. Örnekler şişelerde hava kabarcığı kalmayacak şekilde doldurulmuştur. Suların özgül elektriksel iletkenlik (ÖEİ), pH ve tuzluluk değerleri WTW 340i multimetre aracılığıyla yerinde ölçülmüştür.

Tüm sular 0.45 µm kalınlığında selüloz kağıtlar ile laboratuvarında filtre edilmiştir. Su örneklerine asit koruması uygulanmıştır. Majör

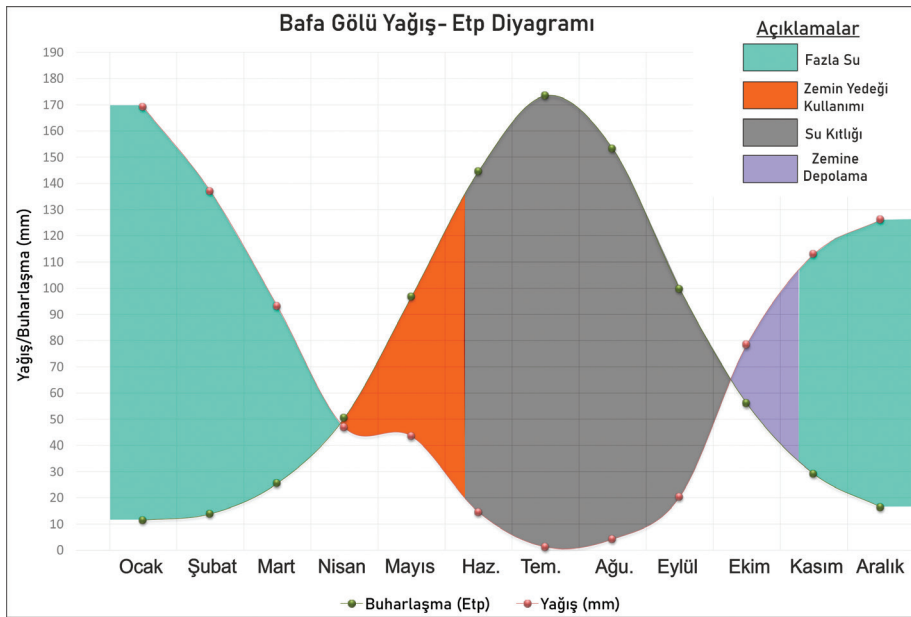
kasyon (Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+) analizleri Jeoloji Mühendisliği Bölümü Jeokimya Laboratuvarında Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi cihazında gerçekleştirilmiştir. Majör anyon tayini için volümetrik ve gravimetrik analiz yöntemleri uygulanmıştır. Eser elementler ise Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarında ICP-MS cihazında analiz edilmiştir. İçme ve sulama amacıyla kullanılan suların kimyasal analiz sonuçları, Türk Standartları (TS-266; 1997, 2005, 2013), Avrupa Birliği Su Çerçeve Yönergesi (EU, 2014), Dünya Sağlık Örgütü (WHO; 2004, 2008, 2011, 2017) tarafından belirlenen en güncel içme suyu tüketim üst sınır değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Sulama sularında izin verilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin miktarları "Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (2010)" ile resmi

gazetede duyurulmuştur. Alabalık üreticiliği için kullanılacak suların eşik değerleri ise “Alabalık ve Sazan türü balıkların yaşadığı suların korunması ve iyileştirilmesi hakkında yönetmelik (2014)” ile resmi gazetede duyurulmuştur. Hayvanların içme suyu kalite parametreleri ise Socha vd. (2003) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır.

HİDROLOJİ

Bafa ve Serçin Gölü birbiriyle etkileşim halinde olan ancak fizikokimyasal özellikleri açısından birbirinden farklı göllerdir. Serçin Gölü derinliği yaklaşık 2 metreyken Bafa Gölü maksimum derinliği 21 metredir. Serçin Gölü'nün yüz ölçümü yaklaşık 7 km², Bafa Gölü'nün yüz ölçümü ise yaklaşık 60 km²'dir. Serçin Gölü, geliştirilen bütünleşik sistemler dolayısıyla Büyük Menderes Nehri'nin kimyasal karakterini yansıtmaktadır. Bafa Gölü, Akköy

faı ile taşınan deniz suyu ve balık üretiminde kullanılan jeotermal kökenli suyun göle deşarjı nedenleriyle çok daha tuzludur. Bafa Gölü; yerel dereler, yağmur suları, Büyük Menderes Nehri ve yeraltı suyu ile beslenmektedir. Gölün kimyası yüzey – yeraltı suyu etkisi altındadır. Göl ve etkileşimde olduğu suların güncel durumu, su kimyası bölümünde detaylı olarak aktarılmıştır. Türkiye Meteoroloji Kurumundan temin edilen 2005-2017 yıllarını kapsayan aylık yağış veri seti, çeşitli yöntemlerle değerlendirilmiştir. Gerçeğe en yakın değerlendirmelerin yapılabilmesi için Bafa Gölü civarında bulunun 17881 numaralı Söke istasyonu tercih edilmiştir. Söke Ovası'nda yetiştirilen tarımsal ürünlerin kök derinliği ve toprağın tane özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalarla zemin yedeği 90 mm (m³/m²) olarak belirlenmiştir. Thornthwaite (1948) PET yöntemine göre su bütçesi belirlenerek, yağış-Etp diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2. Bafa Gölü bölgesi yağış – Etp diyagramı.

Figure 2. Precipitation – Etp diagram of the Lake Bafa region.

12 yıllık yağış veri seti ortalaması değerlendirilecek olursa Nisan ayı ortasından itibaren toprakta depolanan zemin yedeği kullanılmaktadır. Haziran ayıyla birlikte su kıtlığı yaşanan dönem başlamaktadır. Ekim ayı yağışları ile birlikte su kıtlığı dönemi sona ermekte ve fazla su zeminde depolanmaktadır. Kasım ayı başlangıcı ile birlikte yine su fazlası meydana gelmektedir. Ekim ayı yağış ortalaması 112.95 mm olarak bulunmuştur ancak bazı yıllarda (2005-2008-2014-2016) yağış 40 mm'den düşük gerçekleşmiştir. Ovada sulama ve Bafa Gölü'ne nehir sularından besleme yapılacak dönem ekim ayı yağışlarına bağlı olarak organize edilmelidir. Bafa Gölü su seviyesinin +2 metre kotunda sabit kalabilmesi için Nisan ayı ortasından itibaren 6 ay kadar nehir sularıyla beslenmelidir. Söke Ovası'nın su ihtiyacı ise Haziran ayı başından itibaren Kasım ayı ortasına kadardır.

HİDROJEOLOJİ

Bafa Gölü, Menderes Masifi'nin metamorfik kompleksi içinde bulunan teknotik graben bölgesinde yer almaktadır. Çekirdek serilerinin polimetamorfik evriminin Pan-Afrikan (750-450 My), örtü serileri ve çekirdeğin belli kısmını etkisi altına almış olan Alpin Metamorfizmasının Eosen yaşlı olduğu konusunda görüş birliğine varılmıştır (Dora, 2011). Çalışma alanında metamorfik kayalardan gnays, şist, mermer gözlenmiştir. Söke Grabeninin güneyinde Bafa Gölü'nün kuzeyinde kalan bölgelerde bol feldspat içeren yapraklanma aralığı farklılık gösteren foliyasyonlu gnayslar gözlenmiştir. Araştırmacıların tamamına yakınına göre gnayslar çekirdek serisi olarak kabul edilir. Masifin çekirdeğini oluşturan temel birim olan gnayslar Prekambriyen-Kambriyen olarak yaşlandırılmıştır (Hetzl ve Reischmann, 1996). Aynı bölgede grabene yakın noktalarda mika içeriği yüksek şistler de gözlenmiştir. Bafa Gölü kuzeyinde kalan Beşparmak Dağları ise

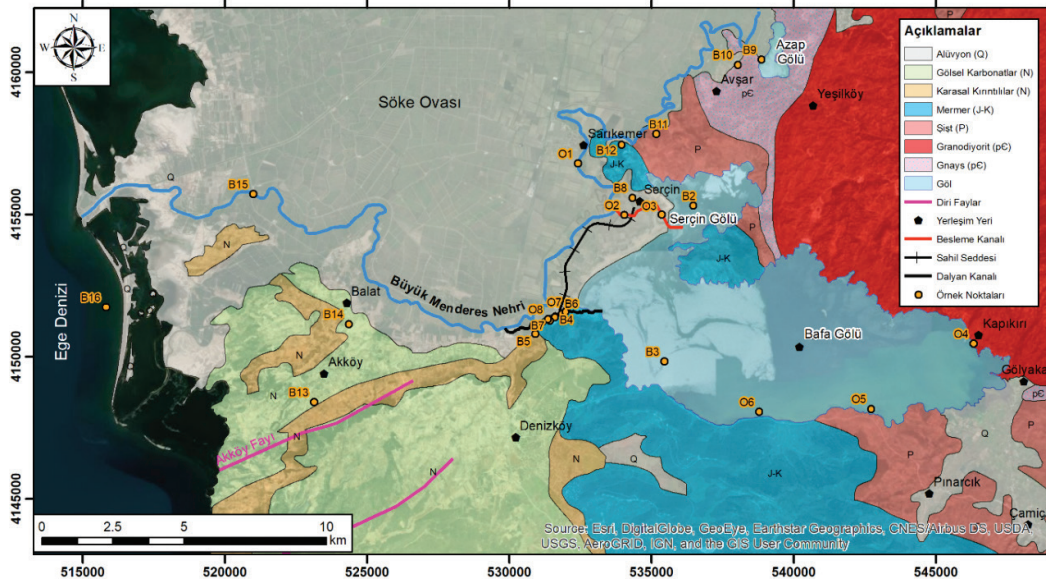
Prekambriyen yaşlı Granodiyorit biriminden oluşmaktadır. Gölün güneyinde yer alan İlbir dağı ise Jura-Kretase yaşlı mermer birimi ile kaplıdır. Gölün güneydoğusunda kalan Paleozoik şistler, İlbir Dağı ile Beşparmak Dağlarını ayırmaktadır (Şekil 3).

Menderes Masifi'ne ait Jura-Kretase yaşlı mermerler, üzerleyen Neojen gösel karbonatlar ve Kuvaterner alüvyon; akifer oluşturan birimlerdir. Birçok kaynak ile kuyudan yeraltı suyu üretimi bulunmaktadır. Büyük Menderes Nehri'nin havza giriş örnekleme B1 olarak kodlanmış olup Bafa Gölü'nün 20 kilometre kadar kuzeybatısında yer almasından dolayı haritada gösterilememiştir. Söke Ovası'nın Bafa Gölü tarafında kalan bölgede nehir suları gölle etkileşim ardından sulama amaçlı kullanılmaktadır. Gösel karbonat biriminin olduğu yükseltilerde ise tarımsal amaçlı yeraltı suyu üretimi yapılmaktadır. Bafa Gölü'nün kuzeyindeki şist, gnays birimleri ile Beşparmak dağlarını kaplayan granodiyorit birimi geçirimsizdir. Tektonizma ile oluşan ikincil gözeneklilikten dolayı şist-gnays dokanağındaki bazı noktalarda düşük elektriksel iletkenliğe sahip yeraltı su çıkışları belirlenmiştir. Debisi 0.1 L/sn'den düşük olan su sızıntıları, birimler arası geçişin olduğu alanlarda belirlemektedir. Yağmur suları, kayaç içindeki tektonik oluşumlarda hareket ederek kısa sürede yüzeylenmektedir. Azap Gölü (B9) civarında gnays biriminde kurulu alüvyona yakın köylerde, sığ sondajlarla yeraltı suyu üretimi yapılan kuyular (B10) bulunmaktadır. Derinlikleri 8-10 metre civarı olan sığ kuyulardan, pompa aracılığıyla yeraltı suyu temin edilmekte olup içme, sulama ve/veya hayvancılık amacıyla tüketilmektedir. Bafa Gölü kuzeyinde Söke Grabeni ile mermer birimi dokanağına yakın alanlarda mermer biriminden yeraltı suları yüzeylenmektedir. Yöre halkı tarafından Asırlık Çeşme (B11) ve Bitli Çeşme (B12) olarak adlandırılan yeraltı su kaynakları

içme amaçlı olarak kullanılmaktadır. Kuzey mermerleri soğuk karstik akifer olma özelliği göstermektedir. Bafa Gölü doğusunda yer alan Menderes Masifi'ne ait mermerlerde ise 50 ile 140 metre arasında değişen derinlikteki onlarca kuyudan yeraltı suyu üretimi yapılmaktadır. B4 ve B5 kuyu suları şirketlerin su toplama havuzundan alınan temsili örneklemelerdir. Balık üretim tesisleri tarafından kullanılan jeotermal kökenli bu sular; ılık, tuzlu, karstik olma özelliği gösterir. Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı yer yer kırıntılıları da içeren gölsel karbonatlar, Bafa Gölü güneybatı kesimlerinde çoğunluğu mermerlerden oluşan karbonatlıların üzerinde açılmal uyumsuz olarak yer almaktadır. Bu tortullar çakıltaşı, kumtaşı, kiltası, marn ve gölsel kireçtaşı ardalanmasından oluşurlar ve Bafa Gölü'nden Didim çevresindeki güncel deniz kıyısına kadar yayılım gösterirler. Ancak bu birimin altında mermerler devam etmektedir. Yükseltinin 100 metreye kadar ulaştığı gölsel karbonat biriminde açılan 150-200 metre civarı sondajlardan yeraltı suyu (B13, B14) üretimi yapılmaktadır. Yeraltı suları

bölge halkı tarafından içme ve tarımsal sulama amacıyla kullanılmaktadır.

Gölün doğusunda Beşparmak dağından gelen nehir çökellerinden oluşan alüvyal ova bulunmaktadır. Bafa Gölü'nün batısında ise göl ile denizin bağlantısının kesilmesine neden olan süreçte depolanan Büyük Menderes Nehri alüvyonları yer almaktadır. Bölge Söke Grabeni ya da Söke Ovası olarak bilinmektedir. Genç alüvyonlar tüm birimleri uyumsuz olarak örtmektedir. Söke Ovası, bölge halkının genel geçim kaynağı olan tarımsal etkinliğin yüksek olduğu bölgedir. Söke Ovası'nın kuzeybatısında Dilek Yarımadası tarafında kalan bölgenin sulama suyu, Büyük Menderes Nehri suları üzerine inşa edilen Söke Regülatörü kontrolünde sulama kanalları ile sağlanmaktadır. Söke Ovası'nın Bafa Gölü tarafı ise 2006 yılında geliştirilen projelerle Nehir – Göl – Deniz suyu etkileşimli mühendislik yapıları ile donatılmıştır. Alüvyonda sulama amacıyla kullanılan yeraltı suyuna rastlanmamıştır.



Şekil 3. Bafa Gölü ve çevresinin örnek noktaları işaretlenmiş jeoloji haritası (MTA, 2002'den düzenlenerek).

Figure 3. Geological map of the Lake Bafa and its surroundings with the sample points marked (modified from MTA, 2002).

Bafa Gölü çökelleri sedimantolojik ve mineralojik analizlere göre yorumlanmıştır (Müllenhoff vd., 2004; Akçer-Ön vd., 2020). Büyük Menderes Nehri sedimanları 3.500 yıllık süre boyunca gölün batısında depolanarak deniz ile bağlantının kesilmesine neden olmuştur (Aksu vd, 1987). Geç Pleistosen'den Holosen'e kadar devam eden regresyon (deniz yükselmesi) ile oluşum süreci başlamıştır. Tam olarak denizden ayrılma süreci, Helenistik dönem Roma İmparatorluğu'ndan başlayıp 1500'lü yıllar Osmanlı İmparatorluğu dönemine karşılık gelir (Brückner vd., 2017). Gölden alınan karot örnekleri göstermektedir ki, Büyük Menderes Nehir sedimanları gölün doğusuna ulaşmamış olup gölün ortasında profundal bölgeyle sınırlıdır (Knipping vd, 2008). Gölün doğusu Beşparmak dağı'nın yerel malzemesi, ortası ile batı kısmı ise Büyük Menderes Nehri çökelleriyle kaplıdır. Doğuya doğru göl daha sığ hale gelmektedir. Tarih boyunca iklimsel ve stratejik avantajları nedeniyle tercih edilen grabende meydana gelen depremlerle birlikte şev göçmesi ve yüzeysel akışla flüvyal sediman taşınımı gölün doğu bölgesindeki çökellerin oluşumunu açıklamaktadır. Orta ve batı bölgesindeyse antik çağdan 1500'lü yıllara kadar devam eden Büyük Menderes Nehri tortulları hakimdir. Bafa Gölü'nü litolojik olarak ayırmak belirtilen nedenlerden dolayı güçtür.

Bafa Gölü ekosisteminde ışık etkisinde kalan oksijence zengin üst tabaka (epilimniyon) ile oksijen miktarı ve sıcaklığın ani olarak düştüğü ışık almayan tabaka (hipolimniyon) arasında kalan geçiş zonu (metalimniyon) sığ ve kalındır. 1992 – 1998 yıllarını kapsayan dönemde yapılan çalışma sonucunda hazırlanan derinlik profillerinde olağandışı iletkenlik

tabakalanması belirlenmiştir. Farklı derinliklerde ölçülen elektriksel iletkenlik, sıcaklık, çözülmüş oksijen, pH ve majör katyon iyonları arasındaki ilişkiyi yola çıkarak Bafa Gölü'ne soğuk karstik yeraltı suyu ve deniz suyu katkısı olduğu belirlenmiştir (Kazancı vd., 2008). Bafa Gölü yakınında yer alan mermer biriminden, balık çiftlikleri tarafından işletilen 18 kuyudan tam zamanlı çalışmaları halinde 1.79 m³/sn debiyle üretim sağlanmaktadır (Çizelge 1). Jeotermal akışkan, deniz suyu ile karışmaktadır. Karışım sonrası artış gösteren çözülmüş madde bolluğu, balık üretim verimini arttırmaktayken; jeotermal kökenli suların yüksek çözülmüş CO₂ gazı içeriğinden dolayı asidik olması, balıkların üreme verimini azaltmaktadır. Kuyuların üretim sularının tamamı atmosfer ile temas halinde olan su toplama havuzuna aktarılarak CO₂'nin atmosfer basıncı altında uzaklaştırılması yöntemiyle jeotermal kökenli sular bazik hale getirilmektedir. Tesislerden sadece bir tanesinde arıtma havuzu bulunmaktadır. Mevcut arıtma havuzunda çökertme yöntemi uygulanmaktadır. Arıtma durumu fark etmeksizin, tüm jeotermal kökenli yeraltı suları Dalyan kanalı ile uzaklaştırılmaktadır. Kanal suları, gölün hidrolik seviyesi ve sulama dönemine bağlı olarak Bafa Gölü'ne deşarj edilmekte ya da Büyük Menderes Nehri aracılığıyla denize boşalımı sağlanmaktadır. Şekil 4'te 1 numara ile gösterilen tesis Egemar (Orka) Su Ürünleri, 2 numara ile gösterilen Kılıç Holding Bafa Yavru Balık Üretim Tesisi, 3 numara ise Serçin Yavru Balık Üretim Çiftliği'dir. Şirketlerin kullandığı kuyu sularının deşarj izni bulunmamaktadır. Kuyuların jeotermal kuyu ruhsatı olmadığı için yeraltına tekrar basım (reenjeksiyon) yapılamamaktadır.

Çizelge 1. Bafa Gölü balık üretim tesislerinin kuyu sayısı, kuyu derinliği, yeraltı suyu çekim debisi ve atık su değerleri (OSİB, 2012).

Table 1. Number of wells, depth of wells, groundwater flow rate and wastewater values of the Bafa Lake fish production facilities (OSİB, 2012).

Firma	Egemar (1)	Kılıç Holding (2)	Serçin (3)
Yıllık Üretim	78 Milyon/yıl	90 Milyon/yıl	30 Milyon/yıl
Kuyu Sayısı	4	10	4
Kuyu Derinliği	50 m - 70 m	80 m -140 m	100 m - 120 m
Arıtma	Yok	İlkel Çökeltme	Yok
Yeraltı Suyu Çekimi	0.27 m ³ /sn	1.47 m ³ /sn	0.038 m ³ /sn
* ÖEİ (µS/cm)	32300	47200	54000
* Çözünmüş O ₂ (mg/L)	6.77	4.81	5.78
* Çözünmüş O ₂ (%)	79.3	64.7	72.2
Deşarj İzni	Yok	Yok	Yok

* Atık Su Anlık Değerleri

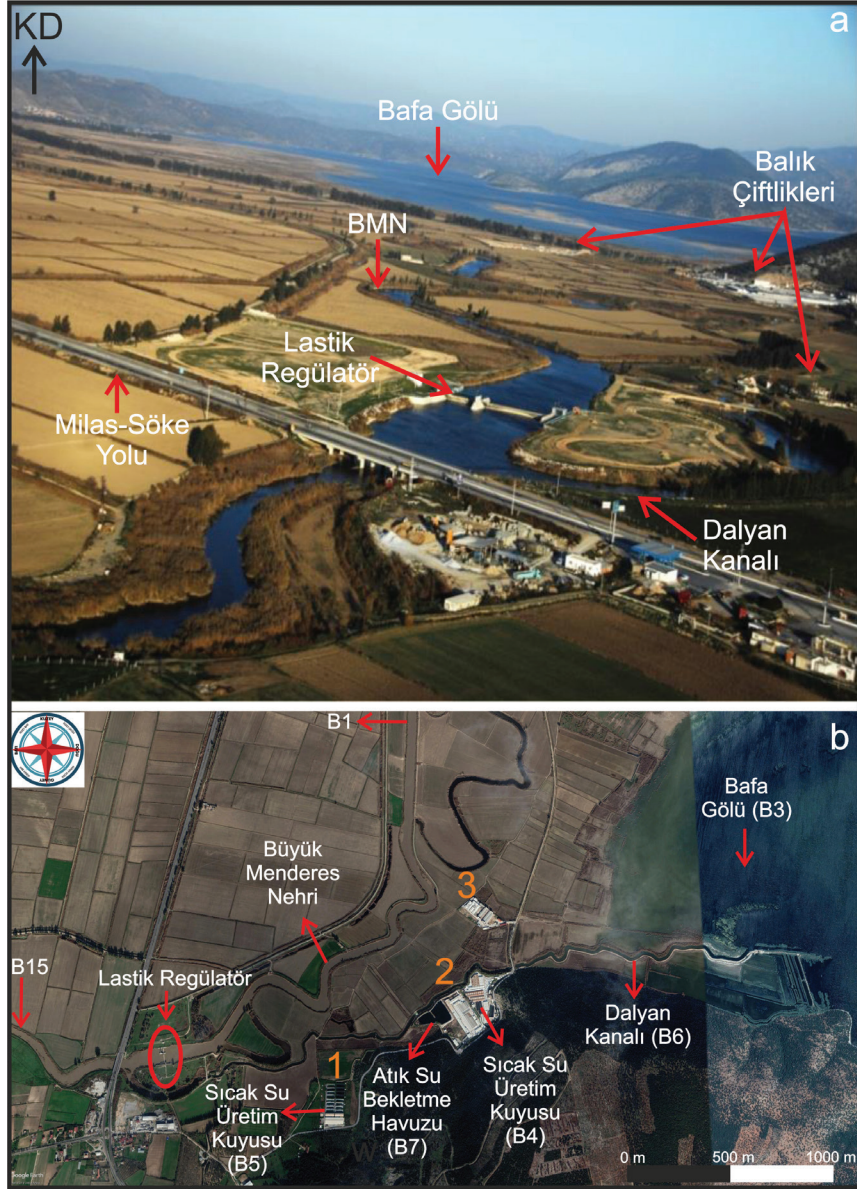
Kuyu Testleri

Tarcan ve Gemici (2014) tarafından Egemar tesisinde uygulanan kuyu testi, bu çalışma kapsamında tekrar ele alınmıştır. Sondajlarda 10 metreye kadar alüvyon kesildikten sonra mermer akiferine girilmiş ve sondaj sonlanana kadar mermer akiferinde ilerlenmiştir. Yüzeyle herhangi geçirimsiz katman ya da örtü kaya olarak nitelendirilebilecek jeolojik unsur olmadığı için üretim sağlanan birim serbest akifer olarak sınıflandırılmıştır. Kuyu testi yapılan bölgedeki alüvyonun kalınlığı göz önüne alındığında akifer olma özelliği gösteremeyecek kadar düşük kalınlığa sahiptir. En derin kuyuyu referans olarak akifer kalınlığı 130 metre olarak kabul edilmiştir. Mermer akiferinin Cooper-Jacob (1946) ve Theis (1935) yöntemleri uygulanarak hidrolik iletkenlik katsayısı (K), iletkenlik (T) ve depolama katsayısı (S) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 2; Şekil 6). Hidrojeolojik parametre sonuçları, 10⁻³ m/sn dolaylarında hidrolik iletkenlik değerini işaret etmektedir. Akifer geçirimli kaya sınıfındadır. Akiferin üretkenlik indeksi (PI) 1667 m³/sa/m ve geri basım indeksi (EI) 9200 m³/sa/m olarak bulunmuştur (Çizelge 3).

Balık üretim tesislerinden Dalyan kanalı aracılığıyla Bafa Gölü'ne tahliye edilen ılık ve tuzlu sular, Bafa Gölü'nün hem organik hem de inorganik madde yükünü arttırmaktadır. Akışkanın üretildiği mermer akiferi geri basıma uygundur.

HİDROKİMYA

24 farklı su örneklemesinin organik ve inorganik kimyasal analiz sonuçları değerlendirilmiştir. İnorganik analiz sonuçları değerlendirilen su noktaları Şekil 3'de B koduyla verilmiştir. 3 adet suyun inorganik analizi literatürden alınmıştır (Tarcan vd., 2007; Somay ve Gemici, 2012; Tarcan ve Gemici, 2014; Çizelge 4 ve 5). Bafa Gölü ve çevresinde 8 farklı noktada organik kirlilik parametreleri ölçülen su noktaları Şekil 3'de O koduyla verilmiştir. Yüzeyle suları örnekleri, Büyük Menderes Nehri havza girişi (B1) ve çıkışı (B15), Serçin Gölü (B2), Bafa Gölü (B3), Dalyan kanalı (B6), bekletme havuzu (B7), yağmur suyu (B8), Azap Gölü (B9) ve deniz suyu (B16) olmak üzere 9 farklı noktadan alınmıştır.



Şekil 4. a) Bafa Gölü - Dalyan kanal bağlantısı ve balık üretim tesislerini gösteren drone görüntüsü (OSİB, 2012)
b) Aynı bölgenin uydu görüntüsü.

Figure 4. a) Drone image of the Lake Bafa – Dalyan Canal connection and fish production facilities (OSİB, 2012)
b) Satellite image of the same region.

Çizelge 2. Jeotermal kökenli su barındıran mermer akiferinin fiziksel parametre sonuçları.

Table 2. Physical parameter results of the marble aquifer containing geothermal water.

Yöntem/Parametre	K (m/sn)	T (m ² /sn)	S
Cooper-Jacob (1938)	1.04 x 10 ⁻³	1.35 x 10 ⁻¹	% 0.28
Theis (1935)	2.05 x 10 ⁻³	2.67 x 10 ⁻¹	% 0.03

Çizelge 3. Kuyu testlerinin çekim ve geri basım indeks sonuçları.

Table 3. Productivity and injectivity index result of the well tests.

Çekim (m ³ /sa)	Düşüm (cm)	Düşüm (m)	PI=ΔQ/Δh
100	5.5	0.055	
200	5.5+7.5	0.130	1667
300	5.5+7.5+4.5	0.175	
Geri Basım (m ³ /sa)	Yükselim (cm)	Yükselim (m)	EI=ΔQ/Δh
300	12	0.12	9200
530	14.5	0.145	

Yeraltı suları ise kuyu ve kaynak olarak ikiye ayrılabilir. Yeraltı suyu kaynakları; mermer akiferinden yüzeylemektedir. En bilinen kaynaklar yöre halkı tarafından içme suyu amacıyla tüketilen Asırlık çeşme (B11) ve Bitli çeşme (B12)'dir. Yeraltı suyu kuyu örneklemeleri ise balık üretim çiftliklerinden üretim sağlanan jeotermal kuyulardan (B4 ve B5), Azap Gölü batısında alüvyon-gnays dokanağından (B10) ve Bafa Gölü doğusunda gölsel karbonat biriminden (B13 ve B14) yapılmıştır (Şekil 3).

Suların sıcaklıkları 13.10 °C ile 25.6 °C arasında farklılık göstermektedir. Özgül elektriksel iletkenlik (ÖEİ) değerleri 30 ile 57700 μS/cm arasında değişmektedir. pH değer aralığı 6.32 ile 8.92 arasında değişiklik gösteren suların pH ortalaması 7.66'dır. Genel olarak bazik sular olarak sınıflandırılabilir. Örneklerin analiz hata yüzdeleri gölsel karbonat biriminden yapılan örneklemeler hariç %5'in altındadır. B13 ve B14 yeraltı suyu örnekleri hata yüzdeleri sırasıyla %5.54 ve %5.62 olarak bulunmuştur. HCO₃ bolluğu belirlenen suların laboratuvara yetiştirilme sürecinde meydana gelen gecikmeden kaynaklı kation fazlası meydana gelmiş olabilir.

Suların tamamının analiz sonuçlarının hata yüzdesi kabul edilebilir değer aralığındadır. Fasiyes tipleri incelenecek olursa, deniz suyu girişiminden kaynaklı B2, B3, B4, B5, B7 ve B15 örnekleri; baskın kationun Na⁺, baskın anyonun Cl⁻ olduğu sulardır. Büyük Menderes Nehri havza giriş örneği B1, Mg²⁺ kationu baskındır. Mermer akiferinden örnekleme yapılan B10, B11 ve B12 sularında baskın kation Ca²⁺ ve baskın anyon HCO₃⁻ olarak belirlenmiştir. Denize oldukça yakın konumda olan, gölsel karbonat akiferi örneklerinden B13 yakın bollukta Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ kationlarını içermektedir. Baskın anyon HCO₃⁻ olarak belirlenmiştir (Çizelge 4). İçme amaçlı tüketilecek sulara sınır değerler Türk Standartları (TS-266; 1997, 2005, 2013) ile belirlenmiştir. Süreç içinde Avrupa Birliği yönergeleri ile uyumlu hale getirilen sınır değerlerin aşılması halinde yaptırım söz konusudur. Avrupa Birliği Su Çerçeve Yönergesi (EU, 2014) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO; 2004, 2008, 2011, 2017) tarafından önerilen içme suyu üst limit değerleri Çizelge 5'de en alt satırlarda verilmiştir.

Küçüksümbül, Akar, Tarcan

Çizelge 4. Suların bazı fiziksel parametreleri, konumu, hata yüzdesi ve fasiyes tipi.

Table 4. Some physical parameters, location, error percentage and facies type of the waters.

Kod	T (°C)	ÖEİ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Akifer / Konumu	Hata Yüzdesi (%)	Fasiyes Tipi	
						IAH (1979)	Back (1961)
B1	14.4	2110	8.25	BMN Havza Girişi	0.80	Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Cl	Mg
B2	15.0	7000	8.31	Serçin Gölü	1.56	Na-Mg-Cl	Na-Cl
B3* ¹	14.9	23400	8.58	Bafa Gölü	1.49	Na-Cl	Na-Cl
B4	25.6	56000	6.97	Mermer	-1.95	Na-Cl	Na-Cl
B5* ²	25.0	25500	7.46	Mermer	-2.29	Na-Cl	Na-Cl
B6	16.7	20000	8.50	Dalyan kanalı	-3.45	Mg-Na-Ca-Cl	Karışık-Cl
B7	23.0	51700	7.53	Bekletme Havuzu	1.96	Na-Cl	Na-Cl
B8	14.0	30	7.70	Yağmur Suyu	0.30	Ca-Mg-SO ₄	Ca-SO ₄
B9	13.1	590	8.92	Azap Gölü	3.46	Mg-HCO ₃ -Cl	Mg-HCO ₃
B10	17.8	178	6.32	Mermer	-1.67	Ca-HCO ₃ -Cl-SO ₄	Ca-Karışık
B11	16.9	227	6.37	Mermer	-0.85	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl-SO ₄	Ca-HCO ₃
B12	18.2	459	7.69	Mermer	1.68	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
B13	18.6	750	7.00	Gölsel Karbonat	5.54	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Karışık-HCO ₃
B14	18.3	1047	6.99	Gölsel Karbonat	5.62	Mg-Na-HCO ₃ -Cl	Mg-HCO ₃
B15	15.0	7000	7.96	BMN Havza Çıkışı	2.52	Na-K-Cl	Karışık-Cl
B16* ³	17.5	57700	8.03	Deniz Suyu	2.17	Na-Cl	Na-Cl

*¹ Tarcan vd., 2007; *² Tarcan ve Gemici, 2014; *³ Somay ve Gemici, 2012

Çizelge 5. Bafa Gölü ve çevresindeki su örneklerinin kimyasal analiz sonuçları.

Table 5. Chemical analysis results of the water samples in and around Lake Bafa.

Kod	T (°C)	ÖEİ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	mg/L								
				Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	B
B1	14.4	2110	8.25	101	38	87	187	185	486	573	7.2	3.21
B2	15	7000	8.31	825	96	123	288	1700	592	354	40.8	3.4
B3* ¹	14.9	23400	8.58	5104	151	298	616	8783	1578	156	57	1.91
B4	25.6	56000	6.97	10256	398	284	757	17500	2478	561	0	20.9
B5* ²	25	25500	7.46	4906	198	492	387	9250	1052	317	0	* ⁵
B6	16.7	20000	8.5	1111	252	882	841	5375	1129	305	0	20.3
B7	23	51700	7.53	9502	357	299	666	14750	2363	512	0	20.6
B8	14	30	7.7	1.5	1.9	28.6	5.8	8	68.2	22	0	0.11
B9	13.1	590	8.92	54.6	23	50.1	85.6	85	61.7	488	16.5	0.2
B10	17.8	178	6.32	0.9	0.9	39.1	2.3	25	27.6	61	0	0.03
B11	16.9	227	6.37	1.4	1.6	41.6	8.2	28	28.5	92.7	0	0.12
B12	18.2	459	7.69	0.6	2	92.3	2.8	28	36.5	195	0	0.1
B13	18.6	750	7	64.9	5.7	51.2	28.7	50	40.8	293	0	0.09
B14	18.3	1047	6.99	89.2	35	25.7	92.8	95	55.9	512	0	0.13
B15	15	7000	7.96	757	752	109	101	1500	579	512	0	3.5
B16* ³	17.5	57700	8.03	14752	430	529	1733	24747	4161	171	0	5.4
TS				200	12	200	50	250	250	* ⁶	* ⁶	1
EU				200	* ⁶	* ⁶	* ⁶	250	250	* ⁶	* ⁶	1
WHO				* ⁶	* ⁶	* ⁶	* ⁶	* ⁶	250	* ⁶	* ⁶	2.4

Çizelge 5. (devamı)

Table 5. (continued)

Kod	µg/L												
	As	Ba	Sr	Li	Fe	Mn	Al	Se	Cr	Ni	Cu	Zn	Pd
B1	93.1	2063	16140	109	199	4.6	1910	*4	8.4	38	57	200	1.7
B2	80.7	1981	2875	88.3	195	*4	1858	19	13.4	30.3	54.2	133	0.6
B4	498	14767	9861	184	1274	997	13510	80	67	207	384	696	1.3
B6	464	14440	4683	115	1384	28	29040	49	107	189	363	805	1.2
B7	502	14600	10050	170	1287	802	13530	119	63	222	366	737	2.3
B8	0.6	10.2	8	0.9	40.3	0.1	10.6	*4	0.5	1.5	1.7	61	*4
B9	27.7	40.9	452.6	12.7	39.6	6.3	7.3	0.7	0.6	3.3	3.5	124	0.2
B10	12.1	25.4	59.6	8.2	31.3	*4	11.3	*4	*4	2	2.3	7	*4
B11	0.5	36.5	60.5	5.6	36.7	*4	7.4	*4	0.5	2.2	8.7	11	*4
B12	3.3	16.7	70	0.7	42.3	*4	6.3	1.2	1.9	1.2	1.6	6	*4
B13	1	68.8	225.1	3.8	33.9	*4	9.6	2.3	5.3	2	1.7	9	0.1
B14	5.8	163.7	12040	44.6	57.9	*4	7	0.2	0.4	1.7	11.1	20	1.5
B15	86	2065	7048	81.3	210.5	0.8	1884	17.5	12	31.4	57.4	128	1.4
B16*3	98.5	3	9229	242	2107	22	739	373	*5	*5	9.6	70	*5
TS	10	*6	*6	*6	200	50	200	10	50	20	2000	*6	*6
EU	10	*6	*6	*6	200	50	200	10	50	20	2000	*6	*6
WHO	10	1300	*6	*6	*6	*6	900	40	50	70	2000	*6	*6

Çizelge 5. (devamı)

Table 5. (continued)

Kod	µg/L											
	Ta	Pb	Ag	Cd	U	Rb	Sb	Tl	V	Cs	Ge	Sn
B1	16.9	38.9	0.6	0.3	6.38	31	32.6	0.11	4	2.4	0.4	*4
B2	14.5	47.8	0.7	0.7	5.13	29.1	31.3	0.06	5.8	*4	0.5	2
B4	40.9	278	4.2	0.01	3.93	138	214	0.93	36.8	*4	1.2	39.7
B6	81.4	343	4.5	1.7	4.62	56	215	0.37	11.5	*4	*4	15.2
B7	122	279	8.2	4.8	4.46	145	217	0.77	37.8	*4	*4	47.5
B8	1.7	2.1	*4	0.06	0.01	0.5	0.2	0.01	0.4	*4	*4	*4
B9	7.3	2.2	*4	0.09	3.22	5.1	1.3	0.01	1.9	*4	0.03	*4
B10	3	1.8	*4	0.05	0.04	0.4	0.2	0.01	*4	*4	*4	*4
B11	2.3	2	*4	0.04	0.03	1.1	0.2	0.01	0.2	*4	*4	*4
B12	3.1	2.5	*4	*4	0.3	0.6	1.3	0.01	0.7	*4	*4	*4
B13	5.9	1.6	*4	*4	0.76	2.0	0.2	0.03	1.4	*4	*4	*4
B14	5	2.2	*4	0.04	1.63	16.3	0.2	0.01	0.6	0.9	0.03	*4
B15	25.8	45.4	0.8	0.28	6.26	31.4	33	0.03	6	*4	1.2	2.7
TS	*6	10	*6	5	*6	*6	5	*6	*6	*6	*6	*6
AB	*6	10	*6	5	*6	*6	5	*6	*6	*6	*6	*6
WHO	*6	10	*6	3	30	*6	20	*6	*6	*6	*6	*6

*1 Tarcan vd., 2007; *2 Tarcan ve Gemici, 2014; *3 Somay ve Gemici, 2012

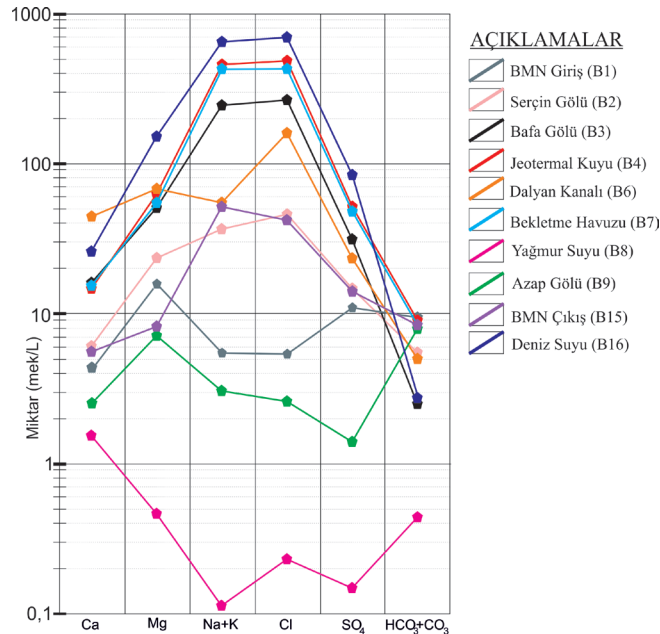
*4 Saptama limitinin altında kalmıştır. 0.001 µg/L'den küçük değerleri ifade etmektedir.

*5 Literatürden alınan su örneklerinde, eser elementin analiz edilmediğini ifade etmektedir.

*6 İçme amaçlı kullanımda herhangi limit değer önerilmemiş elementleri ifade etmektedir.

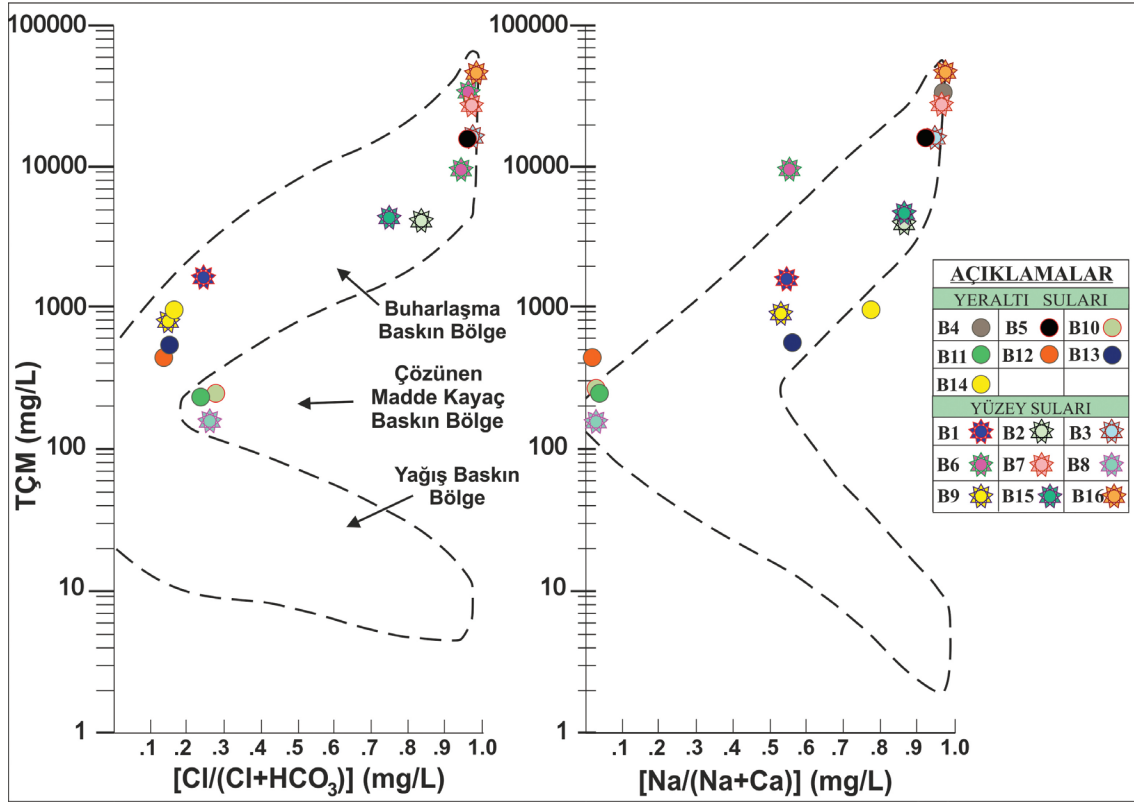
Schoeller (1935) diyagramında da görüldüğü üzere yüzey sularının kimyasal analiz sonuçlarına göre jeotermal kuyu (B4), Bafa Gölü (B3) ve bekletme havuzu (B7) deniz suyu girişimi etkisinde olan sulardır (Şekil 5). Yüzey ve yeraltı sularının Durov diyagramında gösterimi Şekil 6'da verilmiştir (Durov, 1948; Lloyd and Heathcote, 1985). 3 numara, sodyum (Na) ve klorürce (Cl) zengin suları işaret etmektedir. Deniz suyu (B16), Bafa Gölü (B3), Serçin Gölü (B2), balık üretim tesislerinin atık su bekletme havuzu (B7) ve Büyük Menderes Nehri'nin denize döküldüğü noktada yer alan (B15) yüzey suyu örnekleri bu alana düşmektedir. Ayrıca tuzlu su girişimi meydana gelmiş olan jeotermal kökenli sular (B4 ve B5) bu alanda yer almaktadır. Kaynağı mermer akiferi olarak tanımlanan bu sular, iyon değişimi gerçekleşmiş karışım sularıdır. Gölsel karbonat akiferinden örneklenen 2 adet kuyu suyu (B13 ve B14) ve yüzey sularından Azap

Gölü (B9) örneği basit çözünme gösteren karışım sularını temsil eden 4 numaralı alana karşılık gelmektedir. 5 numaralı alan, baskın anyon ya da kation olmayan basit çözünme gösteren karışım suları olarak tanımlanabilir. Büyük Menderes Nehrinin havzaya girişinden yapılan yüzey suyu örneği (B1), bu alanda yer almaktadır. 6 numaralı alanda beliren sular, nadiren karşılaşılan sulardır. Yüksek olasılıkla karışım suyudur ve nadiren çözünme eğilimindedir. Dalyan kanal suları (B6) bu noktaya karşılık gelmektedir. 7 numaralı alan; karbonat, alçıtaşı vb. herhangi kimyasal olarak çökelmiş malzemeyle temas etmiş sulardır. Bitli Çeşme (B12) yeraltı su kaynağı bu alanda yer almaktadır. 8 numaralı alan, kalsiyum (Ca) baskın kation olarak belirlemektedir. Bafa Gölü kuzeyindeki mermer akiferinde üretim sağlanan kuyu suyu (B10, Ca-Karışık), Asırlık Çeşme kaynağı (B11, Ca-HCO₃) ile yağmur suyu (B8, Ca-SO₄) örnekleri bu alanda yer almaktadır.



Şekil 5. Yüzey ve jeotermal suların Schoeller (1935) diyagramında gösterimi.

Figure 5. Surface water and geothermal water plotted in Schoeller (1935) diagram.



Şekil 7. Yüze ve yeraltı sularının Gibbs diyagramında gösterimi.

Figure 7. Surface water and groundwater plotted in Gibbs Diagram.

Deniz Suyu Girişimi

Özellikle alüvyon ile dolmuş olan kıyı bölgelerinde, deniz suyu; yeraltı suyu ve yüze sularıyla etkileşime geçebilmektedir. Bölge sularında tuzlu su girişimi nedeniyle artış gösteren çözülmüş madde miktarında, sodyum ile 1 ve klorür ile 0.99 katsayısına sahip çok kuvvetli bağıntı (korelasyon) bulunmaktadır. Deniz suyu girişiminin teorik yüzdesi, klorür (Cl⁻) üzerinden yapılan hesaplarla ön görülebilmektedir. Klorür, fiziksel ve kimyasal açıdan yeniden etkin olmayan parametrelerden birisi olması nedeniyle tercih nedenidir. Söke Ovası gibi sahil ile sınırlı olan havzalarda tatlı sularda beliren yüksek klorürün nedeni, deniz suyu girişimi dışında deniz suyu buharlaşması sonucunda klorürce zengin tozların

rüzgar aracılığıyla ovaya taşınarak yağması ve toprak yüzeyinde biriken tuzun yağış suyu ile yeraltı suyuna karışması ya da magma kaynaklı Cl₂ gazının yüzeye yaklaştığı bölgelerde akiferle bütünleşmesi de olabilir. Bu çalışma kapsamındaki yaklaşımlarda ve hesaplamalarda tüm çözülmüş fazla klorür (Cl⁻) içeriğinin denizden kaynaklandığı varsayılmaktadır. Deniz suyu karışım yüzdesi aşağıda ifade edilen denklemlerle hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

$$f_{\text{Deniz}} = \frac{C_{\text{Cl}}(\text{örnek}) - C_{\text{Cl}}(\text{içme suyu})}{C_{\text{Cl}}(\text{Deniz}) - C_{\text{Cl}}(\text{içme suyu})} * 100 \quad (1)$$

Hesaplamalarda içme suyu klorür derişimini temsil eden $C_{\text{Cl}}(\text{içme suyu})$ için Söke Ovası'nın iç kısmında yer alan ve 16 mg/L klorür derişimi ile en düşük değere sahip yeraltı suyu seçilmiştir

(Küçüksümbül, 2018). $C_{Cl(Deniz)}$ deniz suyu örneğinin klorür bolluğunu ifade etmektedir ve B16 örnek noktası ile temsil edilmekte olup 24747 mg/L olarak hesaplanmıştır. $C_{Cl(Örnek)}$ ise her örneğin klorür miktarını belirtmektedir. Deniz suyu hariç özgül elektriksel iletkenlik (ÖEİ) değerleri 2500'ün üzerinde olan örneklerin deniz suyu girişimi (tuzlu su karışımı) yüzdesi hesaplanmıştır (Çizelge 6). % 70.7'lik oranla en yüksek değer B4 jeotermal kökenli sıcak su kaynağında belirlenmiştir. Sulama suyu kalite parametresi sodyum absorpsiyon oranı (SAR) ile deniz suyu karışım yüzdesi arasındaki bağıntı (r) 0.93'tür. K1y1 şeridine yakın olmasına rağmen deniz suyu girişimi etkisinin görsel karbonat biriminden üretim sağlanan sularda düşük olmasının nedeni, karasal kırıntılar olarak adlandırılan birimin killi düzeyleridir.

gibi bilgiler derlenmiştir. Şekil 3'de örnekleme noktaları 1'den 8'e kadar işaretlenmiştir. O1 Sarıkemer Köprüsü, O2 Serçin Priz Yapısı, O3 Serçin kayıkçı iskelesi, O4 Kapıkırı yerleşim yeri yakını, O5 Bafa Gölü'nde bulunan Çeri Restoran, O6 Göl Restoran, O7 Dalyan kanalı, O8 ise Kılıç Holding Bafa Yavru Balık Üretim Tesisi çökertme havuzu örneklemesidir (Çizelge 7). O8 koduyla belirtilen örnek noktası, B7 numaralı balık çiftliği atık su bekletme havuz suyuna karşılık gelmektedir. İlk karstik tuzlu jeotermal akışkanın kullanım sonrası beklendiği noktadan alınan örnekte elektriksel iletkenlik değeri yüksektir. O7 koduyla belirtilen örnek noktası ise B6 numaralı Dalyan kanalı yüzey suyuna karşılık gelmektedir.

O8 kodlu Balık çiftliği bekletme havuzu örnekleme hariç Bafa Gölü'nün amonyum

Çizelge 6. Bafa Gölü ve çevre suların fizikokimyasal parametreleri ve deniz suyu girişim yüzdeleri.

Table 6. Physicochemical parameters and sea water intrusion percentages of the Lake Bafa and its surrounding waters.

Kod	T (°C)	ÖEİ (µS/cm)	pH	Akifer / Konumu	Deniz Suyu Girişimi (%)
B2	15.0	7000	8.31	Serçin Gölü	6.81
B3*1	14.9	23400	8.58	Bafa Gölü	35.45
B4	25.6	56000	6.97	Mermer	70.70
B5*2	25.0	25500	7.46	Mermer	37.34
B6	16.7	20000	8.50	Dalyan Kanalı	21.67
B7	23.0	51700	7.53	Bekletme Havuzu	59.58
B15	15.0	7000	7.96	BMN Havza Çıkışı	6.00

*1 Tarcan vd., 2007; *2 Tarcan ve Gemici, 2014

Organik Kalite

Organik kirliliğin yeraltı suları ile olan ilişkisinin yorumlanabilmesi için OSİB (2012) analizleri tekrar gözden geçirilmiştir. Çizelge 7'de besleyici (nutrient) elementlerden azot (N) ve fosfor (P) ile çözünmüş oksijen bolluğu (ÇÖ) ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ)

(NH_4) ortalaması 0.38 mg/L'dir. 8 numaralı örneklemede ise amonyum bolluğu 2.30 mg/L olarak belirlenmiştir. Balık üretimi için kullanılan kimyasal yemler ve balık dışkıları nedeniyle yüksek miktar amonyum (NH_4), Dalyan kanalına deşarj edilmektedir. Gölün en büyük azot kaynağı, balık üretim tesisi atık sularıdır.

Küçüksümbül, Akar, Tarcan

Çizelge 7. Bafa Gölü çevresinde ölçülen anlık değerler (OSİB, 2012).

Table 7. Instant values measured around the Lake Bafa (OSİB, 2012).

Kod	T (°C)	pH	EC (μ S/cm)	ÇO (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	O-PO ₄ (mg/L)	BOİ (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
O1	27.70	8.05	871	5.45	0.08	0.02	0.14	20	03.21	0.10
O2	28.10	8.03	813	5.24	0.13	0.03	0.02	30	03.16	0.13
O3	30.10	8.11	879	4.89	0.51	0.18	0.01	30	03.42	0.10
O4	30.20	7.30	18740	0.04	0.80	0.57	3.00	450	74.91	1.23
O5	32.00	8.80	18870	1.65	0.41	0.85	0.01	60	67.95	0.01
O6	31.30	8.52	18670	7.60	0.64	0.55	0.01	60	62.01	0.01
O7	26.80	7.40	44100	5.04	0.09	0.14	0.26	30	55.20	0.19
O8	28.20	7.51	45800	4.99	2.30	0.13	0.24	30	55.45	0.18

Fazla besin nedeniyle sayıca artış gösteren mikroorganizmalar, yeterli oksijen olmaması nedeniyle ayrışmamaktadır. Alg patlaması ve sonrasında güneş ışınlarının göl dibine ulaşamamasıyla sonuçlanan süreçte, oksijensiz kalan alt tabakada havacıl yaşam durmaktadır. Bu durum doğal dengenin bozulma sürecini hızlandırmaktadır. Tarım etkisinde olmayan bölgelerde, insan faaliyetlerinden etkilenmeyen sığ yeraltı suyu genellikle 2 mg/L'den daha az nitrat içerir (Gray, 2008). Bafa Gölü Güneydoğusunda zeytin işleme tesisleri bulunmaktadır. Bu tesisler zeytin karasularını lagünlerde buharlaşmaya almaktadır. O4 - O5 ve O6 numaralı örnek noktaları hariç nitrit ortalaması 0.10 mg/L'dir. O4 - O5 ve O6 su örneklerinin nitrit içerikleri sırasıyla 0.57 mg/L, 0.85 mg/L ve 0.55 mg/L'dir. Sırasıyla verilen 3 örnek nitrit bolluğu en yüksek olan örneklemelerdir. O5 ve O6 örnekleri için zeytin işleme tesislerinin Bafa Gölü'ne olumsuz etkisinden söz edilebilir. O4 numaralı Kapıkırı bölgesi örneğinin diğer örneklerle kıyasla zeytinliğe uzak olmasına rağmen O6 numaraya yakın değerler elde edilmiş olmasının nedeni foseptik sızdırması ile açıklanabilir. O3 numaralı Serçin Prizi – Kayık İskelesi örneğinin nitrit değerinin görece

yüksek olmasının nedeni, mera hayvancılığı kaynaklı gübre birikiminin yağış sularıyla yeraltına süzülmesi olarak ifade edilebilir. Bafa Gölü havzasında 155 adet zeytinyağı fabrikası bulunmaktadır. Zeytin işleme tesislerinin kurutma işlemini lagünde gerçekleştirmesi nitrit birikimine neden olmaktadır.

O4 kodlu Kapıkırı örneği hariç gölün fosfat ortalaması 0.1 mg/L'dir. O4 numaralı Kapıkırı örneği 3 mg/L ile yüksek bollukta fosfat içermektedir. Beraberinde çözülmüş oksijen miktarı 0.04 mg/L ile yok denecek kadar azdır. Bölgede toplu balık ölümleri beklenmektedir. Yüksek fosfatın evsel atık suların göle karışmasıyla gelişmiş olması olasıdır. Bölgede kanalizasyon altyapısı olmadığı rapor edilmiştir (OSİB, 2012). Ek olarak bölgede tarımsal etkinlikte kullanılan kimyasalların, yeraltı ve yağış sularıyla Bafa Gölü'ne taşınması mümkündür. Gölün doğu kısmında kalan bölgenin su döngüsünün sağlanamıyor olması kirlenme sürecinin daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır. Yüksek besin nedeniyle artış gösteren alglerin, yeterli oksijene erişememesinden dolayı bölgede ötrifikasyon (alg patlaması) gerçekleşmesi beklenir. Gölün ortalama çözülmüş oksijen

miktarı 4.36 mg/L'dir. Kapıkırı ve Çeri Restoran örneklemelerinde çözünmüş oksijen miktarı sırasıyla 0.04 ve 1.64 mg/L olarak bulunmuştur. Yağışsız dönemde buharlaşma etkisi gözlenen ve/veya Büyük Menderes Nehir sularının Bafa Gölü'ne verilemediği dönemlerde toplu balık ölümleri gerçekleşebilir.

İçme Suyuna Uygunluk

Bafa Gölü kuzeyinde yer alan Asırlık Çeşme (B11) ve Bitli Çeşme (B12) kaynak suları şişeleme yapılarak içme suyu amaçlı olarak yöre halkı tarafından tüketilmektedir. Bafa Gölü kuzeyinde yer alan B10 kuyu suyu, Azap Gölü civarında yer alan Avşar mahallesinin tükettiği yeraltı suyunu temsil etmektedir. Hanelerin bahçelerinde açılan sığ sondajlardan üretilen yeraltı suları içme, sulama ve hayvancılık amacıyla kullanılmaktadır. Bafa Gölü batısında gölsel karbonat akiferinden kuyular aracılığıyla üretilen yeraltı suları (B13 ve B14) sulama ve içme amacıyla kullanılmaktadır.

Asırlık Çeşme (B11) ve Bitli Çeşme (B12) olarak bilinen ve uzun yıllardır yöre halkı tarafından tercih edilen kaynakların içme amaçlı tüketiminde sakınca bulunmamaktadır. Gölsel karbonat akiferinden üretilen B13 ve B14 yeraltı sularında tuzluluk sırasıyla % 0.1 ve % 0.3 olarak belirlenmiştir. Havzanın iç kısmında kalan sulara göre yüksek tuzluluk belirlenmiştir. B13 suyunda herhangi sınır değeri aşılmamıştır. B14 yeraltı suyunda magnezyum (Mg), potasyum (K) bollukları Türk Standartları (1997)'de belirtilen sınır değerini üzerindedir. Dünya Sağlık Örgütü ve Avrupa Birliği magnezyum (Mg) ve potasyum (K) için içme amaçlı tüketiminde eşik değeri önermemiştir. Kaynakların hafif tuzlu olması içimini zorlaştırırsa bile çözünmüş inorganik madde bakımından tüketime uygundur. B10 kuyu suyunun, arsenik (As) bolluğu nedeniyle içme amaçlı tüketilmesi sakıncalıdır. Dünya

Sağlık Örgütü (WHO, 2017), Avrupa Birliği (EU, 2014) ve Türk Standartları (TS-266, 2017) tarafından arsenik için belirlenen limit değeri 10 µg/L'dir. B10 yeraltı suyunda 12.07 µg/L arsenik belirlenmiştir. Yeraltı suyu yakınında bulunan Azap Gölü'nün (B9) arsenik bolluğu 27.66 µg/L'dir. Bölgedeki bir diğer önemli sulama kaynağı Büyük Menderes Nehri'nde (B1) ise 93.08 µg/L'dir. Büyük Menderes Nehri'yle ilişkisi olmayan ve gnays biriminde yer alan Azap Gölü'ndeki yüksek arsenik miktarı jeolojik formasyon kaynaklı arsenik kirlenmesini işaret etmektedir. Arsenik kirliliğinin birçok nedeni olmakla birlikte; insektisit, pestisit gibi arsenik içeren kimyasal maddeler topraklı tarım yapılan alüvyon formasyonunda ürün verimini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu sebeple arseniğin yağış ve sulama suları aracılığıyla yeraltı suyuna sızması, sık rastlanan antropojenik kirliliktir. Büyük Menderes Nehri (B1) Söke Ovası'na ulaşmadan önce jeotermal suların deşarjı nedeniyle arsenik bolluğu 93.08 µg/L olarak havzaya giriş yapmaktadır. Nehirdeki taşkınlar ve/veya sulama dönemi ardından gelişen kış yağışlarıyla, arseniğin alüvyon ve/veya mermer akiferine süzülmesi de olasıdır.

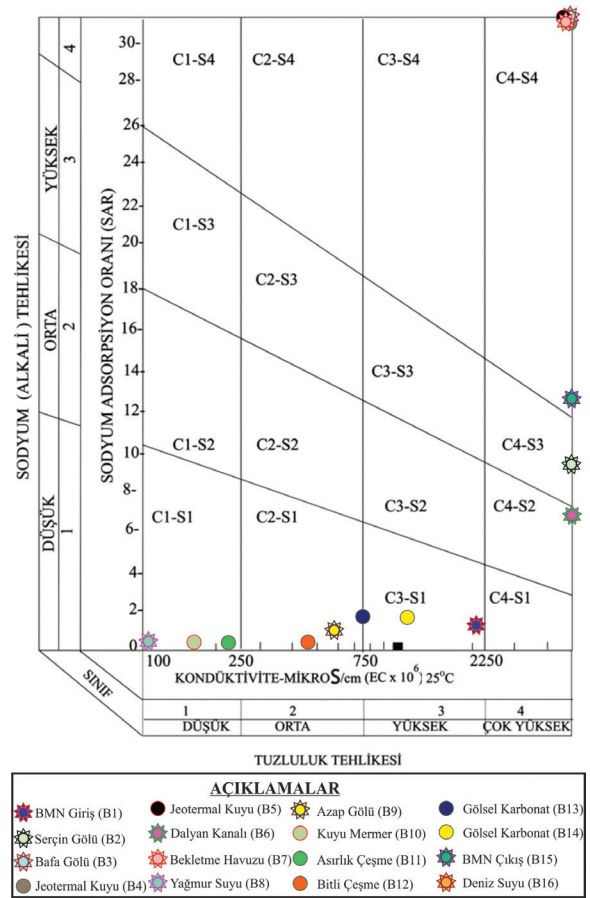
Sulama Suyu, Hayvancılık ve Alabalık Yetiştiriciliğine Uygunluk

ABD Tuzluluk laboratuvarı diyagramına göre (Şekil 8) C1-S1 alanına düşen düşük iletkenlik ve düşük sodyum tehlikesi olarak sınıflandırılan sulama amaçlı kullanıma en uygun sular; yağmur suyu (B8), Menderes Masifi Mermer akiferinden üretim sağlanan kuyu (B10) ve kaynak (B11) sularıdır. C2-S1 alanına düşen orta tuzluluk - düşük sodyum tehlikesi olarak sınıflandırılan sulama amaçlı kullanıma uygun sular; Bafa Gölü kuzeyinde Mermer akiferinden üretim sağlanan kuyu (B12) ve Azap Gölü (B9) sularıdır. C3-S1 alanına düşen sular,

düşük sodyum ve yüksek tuzluluk tehlikesi olarak sınıflandırılan ve yüksek elektriksel iletkenlik nedeniyle sulama amaçlı kullanıma uygunluğundan şüphe edilebilecek sulardır. Büyük Menderes Nehri havza girişi örnekleme (B1) ve gölsel karbonat biriminden üretim sağlanan kuyu suları (B13 ve B14) yüksek elektriksel iletkenlik nedeniyle uzun vadeli kullanımda tarım toprağına zarar verebilecek niteliktedir. Geriye kalan tüm su noktaları çok yüksek tuzluluk tehlikesi (C4) nedeniyle tarımsal sulamaya uygun olmayan sulardır. Dalyan kanalı (B6) örneği orta sodyum tehlikesi, Serçin Gölü (B2) örneği yüksek sodyum tehlikesi beklenen sulardır. Bafa Gölü (B3) örneği, mermerlerden üretim sağlanan sıcak su kuyu örnekleri (B4 ve B5), balık çiftliği atık su bekletme havuzu örneği (B7) ve Büyük Menderes Nehri havza çıkış örnekleme (B15) ise çok yüksek tuzluluk tehlikesi yanı sıra çok yüksek sodyum tehlikesi belirlenen sulardır (Şekil 8). Sulama sularında izin verilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin miktarları yönetmeliklerden (Atıksu arıtma tesisleri teknik usuller tebliğı, 2010; Alabalık ve sazan türü balıkların yaşadığı suların korunması ve iyileştirilmesi hakkında yönetmelik, 2014) ve çalışmalardan (Socha vd., 2003) derlenen sınır değerler ile Bafa Gölü'nü besleyen Büyük Menderes Nehri havza girişi örnekleme (B1), nehir sularının Bafa Gölü etkileşimi ardından havza çıkış örnekleme (B15), Dalyan kanalına deşarj edilen jeotermal kuyu suyu (B4) ve Serçin Gölü örneği (B2) karşılaştırılmıştır (Çizelge 8).

Suların eser element açısından sulamaya uygunluğu incelenecek olursa birçok parametre yönetmeliklerle belirlenen üst sınır değerinin üzerindedir. Tarımsal etkinlik için jeotermal kuyu suyu sınır değerinin çok üzerinde arsenik (As), alüminyum (Al), bakır (Cu), mangan

(Mn), nikel (Ni), kurşun (Pb) ve selenyum (Se) içermektedir. Büyük Menderes Nehri havza girişi ve çıkış örnekleri ise sınır değere çok yakın bollukta arsenik (As) içermektedir. Po nehri (İtalya) arsenik derişimi 15 µg/L (Pettine vd., 1992), Dordogne nehri (Fransa) arsenik derişimi 8.8 µg/L (Seyler and Martin, 1990), Bangladeş nehirleri arsenik bolluk aralığı 0.11 – 2.25 µg/L (Chowdhury vd., 2003), Kuzey Hindistan nehirleri arsenik bolluk aralığı 1.4 – 9.6 µg/L (Singh vd., 2010) olarak rapor edilmiştir.



Şekil 8. Yüzey ve yeraltı sularının ABD Tuzluluk diyagramında gösterimi.

Figure 8. Surface water and groundwater plotted in USA Salinity diagram.

Çizelge 8. Bafa Gölü ile etkileşim içindeki suların eser element bollukları (B1, B2, B4, B15) ve sulama, hayvancılık, alabalık yetiştiriciliği üst sınır değerleri (Sulama suyu sınır değerini aşanlar koyu yazılmıştır).

Table 8. Trace element abundance of waters in interaction with the Lake Bafa (B1, B2, B4, B15), and irrigation, livestock, trout farming upper limit values (Exceeding the irrigation water limit values are written in bold).

Parametreler	Büyük Menderes Nehri Havza Girişi (B1) (µg/L)	Serçin Gölü (B2) (µg/L)	Jeotermal Kuyu Suyu (B4) (µg/L)	Büyük Menderes Nehri Havza Çıkışı (B15) (µg/L)	Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumunda sınır değerler (µg/L)	Hayvancılık amacıyla kullanılması durumunda üst sınır değerleri (µg/L)	Alabalık yetiştiriciliği amacıyla kullanılması durumunda üst sınır değerleri (µg/L)
Al	1910	1858	13510	1884	5000	10000	100
As	93.1	80.7	498	86	100	200	*4
B	3210	3400	20940	3530	4000*1	5000*2	*4
Ba	2063	1981	14767	2065	*4	1000	5000
Cd	0.3	0.65	0.01	0.3	10	50	3
Co	*3	*3	*3	*3	50	1000	*4
Cr	8.4	13.4	66.8	12	100	1000	50
Cu	57	54.2	383.5	57.4	200	500	10
Fe	199	194.7	1274	210.5	5000	400	500
Mn	4.6	*3	996.9	0.8	200	500	10
Ni	38	30.3	207.2	31.4	200	1000	50
Pb	38.9	47.8	277.8	45.4	5000	100	1
Se	*3	19	79.9	17.5	20	100	*4
V	4	5.8	36.8	6	100	100	*4
Zn	200.1	133.2	695.9	127.8	2000	25000	100

*1 Bora hassas olmayan bitki (Pamuk), *2 Kısıtlayıcı eşik değer, *3 Saptama limitinin altında kalmıştır. 0.001 µg/L'den küçük değerleri ifade etmektedir., *4 Herhangi sınır değer önerilmemiş elementleri ifade etmektedir.

93.1 µg/L arsenik değerine sahip Büyük Menderes Nehri'nin, doğal koşullar altında bu derece yüksek bollukta arsenik içermesi olası değildir. Büyük Menderes Nehir sularındaki arsenik kaynağı; graben boyunca enerji, konut ısıtmacılığı vb. amaçlarla kullanılan jeotermal kökenli suların nehir ile uzaklaştırılması olabilir. Nehrin havza giriş ve çıkışından alınan su örneklerine göre arsenik bolluğu ova boyunca neredeyse değişmemektedir.

Suların bor içerikleri; B1 nehir havza giriş örneklemeğinde 3.21 mg/L, B2 Serçin

Gölü'nde 3.40 mg/L, B4 jeotermal kökenli kuyu suyunda 20.94 mg/L, B15 nehir havza çıkış örneklemeğinde 3.53 mg/L olarak analiz edilmiştir. Büyük Menderes Nehir suyunda çözünmüş bor miktarı yüksek olmasına rağmen sulama yapılan topraklarda yetiştirilen pamuğun toleransı bora karşı yüksektir. Pamuk, 4 mg/L'ye kadar bor içeren sular ile yetiştirilebilmektedir ancak jeotermal kökenli kuyu sularında 20.94 mg/L olarak bulunan bor, bitkiler için zehirleyici etki yaratacaktır. Büyük Menderes Nehri ve Serçin Gölü örnekleri ise sınır değere yakın

miktarda bor içermektedir. Jeotermal kuyulardan üretilen suyun debisi tam performans çalışması halinde 1.79 m³/sn debiye ulaşmaktadır. Jeotermal kökenli suların, tarımsal etkinlikte kullanılan toprak ile etkileşime asla girmeyecek şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Uzun vadede gölün kimyasını değiştirebilecek bollukta kimyasalın göle deşarjı, paydaşlar için sorun haline gelecektir. Büyük Menderes Nehri'nin kimyasını yansıtan Serçin Gölü'nde de benzer değerler elde edilmiştir. Serçin Gölü ve Büyük Menderes Nehri örneklemeleri, hayvancılık amacıyla kullanılması durumunda sınır değerinin üzerinde eser element içermemesine rağmen bor ve arsenik bolluğu limit değere çok yakındır.

Suların eser element açısından hayvancılığa uygunluğu incelenecek olursa, baryum (Ba) bolluğunun 4 su örneği için de limit değerinin üzerinde olması göze çarpmaktadır. B4 numaralı jeotermal kuyu sularında, baryuma ek olarak alüminyum (Al), arsenik (As), bor (B), demir (Fe), mangan (Mn) ve kurşun (Pb) bolluğu dikkat çekmektedir. Bu durum, hayvancılıkta kullanıma uygun olmadığını işaret etmektedir. Özellikle Serçin mahallesinde büyükbaş hayvancılık yapılmaktadır. Hayvanlar Büyük Menderes Nehri (B1) ve Serçin Gölü (B2) sularını tüketmektedir. Hayvanların içme amaçlı tükettiği iki yüzey suyu da sınır değerinin üzerinde baryum içermektedir. Nehir ve Serçin Gölü sularının hayvancılık amaçlı tüketilmesinde baryum (Ba) hariç tehdit ögesi bulunmamaktadır.

Suların eser element açısından alabalık üretimine uygunluğu incelenecek olursa sınır aşan alüminyum (Al), bakır (Cu), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) nedeniyle yüzey suları üretime uygun değildir. Kurşun için belirlenen limit değer 1 µg/L'dir, yüzey ve yeraltı sularının kurşun bollukları 277.8 µg/L değerlerine ulaşmaktadır. B4 kodlu jeotermal kökenli kuyu

suyunda ek olarak baryum (Ba), krom (Cr), demir (Fe), mangan (Mn) ve nikel (Ni) sınır değerinin üzerindedir. Bafa Gölü'nden alınan 22 levrek örneğinin solungaçlarındaki ağır metal birikim sırası Al > Cu > Pb > As > Ni > Cd > Hg > Cr olarak bulunmuştur (Yabancı vd., 2012). Göl canlılarında ağır metal birikim sıralaması; B1, B2, B4 ve B15 sularında sınır değeri aşan elementlerin bolluğuyla uyumaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Farklı derinliklerde ölçülen elektriksel iletkenlik, sıcaklık, çözülmüş oksijen, pH ve majör katyon iyonları arasındaki ilişkiden yola çıkarak Bafa Gölü'ne soğuk karstik yeraltı suyu ve deniz suyu katkısı olduğu belirlenmiştir. Akifer olma özelliği gösteren birimler mermer, gösel karbonat ve alüvyondur. Ovada planlanacak sulama veya Bafa Gölü'ne iletilecek nehir suları Ekim ayı yağışlarına bağlı olarak organize edilmelidir. Bafa Gölü su seviyesinin +2 metre kotunda sabit kalabilmesi için Nisan ayı ortasından itibaren 6 ay kadar nehir sularıyla beslenmelidir. Söke Ovası'nın su ihtiyacı ise haziran ayı başından itibaren kasım ayı ortasına kadardır.

Bafa Gölü organik kirlilik kaynakları; yüksek amonyum içeren balık üretim tesisi atık sularının göle deşarjı, Kapıkırı bölgesinde kanalizasyon sistemi olmamasından kaynaklı yüksek miktar fosfatın Bafa Gölü'ne taşınması ve zeytin işleme tesislerinin kurutma işlemi lagünde gerçekleştirerek gölde nitrit birikimine sebep olması olarak özetlenebilir. Gölün doğu kısmında kalan bölgenin su döngüsünün sağlanamıyor olması kirlenme sürecinin daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır. Alg patlaması ve sonrasında güneş ışınlarının göl dibine ulaşamamasıyla sonuçlanan süreçte, oksijensiz kalan alt tabakada havacıl yaşam

durmaktadır. Bu durum doğal dengenin bozulma sürecini hızlandırmaktadır. Gölün batısında balık üretim tesisi atık suyundaki yüksek besin nedeniyle artış gösteren alglerin, yeterli oksijene erişememesinden dolayı ötrifikasyon gerçekleşmesi beklenir. Gölün doğusunda Kapıkırı civarında yetersiz çözülmüş oksijenden dolayı toplu balık ölümleri gerçekleşmesi beklenir.

Asırlık Çeşme (B11) ve Bitli Çeşme (B12) olarak bilinen ve uzun yıllardır yöre halkı tarafından tercih edilen kaynakların içme amaçlı tüketiminde sakınca bulunmamaktadır. Büyük Menderes Nehri havza girişi örnekleme (B1) ve gölsel karbonat biriminden üretim sağlanan kuyular (B13 ve B14) yüksek elektriksel iletkenlik nedeniyle uzun vadeli kullanımda tarım toprağına zarar verebilecek niteliktedir. Sulama kanalına dağıtımı yapılan Büyük Menderes Nehir suları hariç tüm yüzey suları çok yüksek tuzluluk tehlikesi (C4) nedeniyle tarımsal sulama amaçlı kullanıma uygun değildir. Dalyan kanalı (B6) orta sodyum tehlikesi ve Serçin Gölü (B2) yüksek sodyum tehlikesi beklenen sulardır. Bafa Gölü (B3), mermerlerden üretim sağlanan sıcak su kuyuları (B4 ve B5), balık çiftliği atık su bekletme havuzu (B7) ve Büyük Menderes Nehri havza çıkış örnekleme (B15) ise çok yüksek tuzluluk tehlikesi yanı sıra çok yüksek sodyum tehlikesi belirlenen sulardır. 93.1 µg/L arsenik değerine sahip Büyük Menderes Nehri'nin, doğal koşullar altında bu derece yüksek bollukta arsenik içermesi olası değildir. Büyük Menderes Nehir sularındaki olası arsenik kaynağı; graben boyunca enerji, konut ısıtmacılığı vb. amaçlarla kullanılan jeotermal kökenli suların nehir ile uzaklaştırılması olabilir. Bafa Gölü mermerlerinden üretim sağlanan jeotermal kökenli suların, tarımsal etkinlikte kullanılan toprak ile etkileşime asla girmeyecek şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Uzun vadede göl

ve lagünün kimyasını değiştirebilecek bollukta kimyasalın Dalyan kanalı ile deşarjı, paydaşlar için sorun haline gelecektir. Büyük Menderes Nehri ve Serçin Gölü sularının hayvancılık amaçlı tüketilmesinde baryum (Ba) hariç tehdit ögesi bulunmamaktadır.

Düşük enerjili jeotermal sistem, Akköy Fayı ile denetlenen deniz suyu girişimi etkisindedir. Bafa Gölü'nün deniz ile bağlantısının tamamen kesilme süreci MS 1500 yılında tamamlanmıştır. Bafa Gölü, köken olarak tuzlu su gölüdür. Bafa Gölü'nün tuzlanması ekosistem için sorun teşkil etmemektedir. Geçmişte yapılan bazı çalışmalarda tuzluluğun nedeni, Büyük Menderes Nehir sularının Bafa Gölü'ne deşarjı olarak yorumlanmıştır. Büyük Menderes Nehir sularının yüksek arsenik içeriği dışında çözülmüş madde miktarı olağandır. Elektriksel iletkenliği 2110 µS/cm olarak ölçülen nehrin, 23400 µS/cm elektriksel iletkenliğe sahip Bafa Gölü'nün tuzlanmasına neden olması mümkün değildir. Büyük oranda Büyük Menderes Nehri'nin kimyasal karakterini yansıtan kuzey bölümü, Serçin Gölü olarak ayrıca değerlendirilmelidir. Bafa Gölü'nde idare tarafından geliştirilen yapılar ile su döngüsünün yapay yollarla sağlanması, göl suyunun niteliğini olumlu yönde etkilemektedir. Akköy Fayı ile denetlenen deniz suyu girişimi, Bafa Gölü'nün tuzlu kalmasına neden olmaktadır. Yükseltinin 100 metreye kadar ulaştığı Gölsel karbonat biriminde açılan 150-200 metre civarı sondajlardan yeraltı suyu üretimi yapılmaktadır. Yeraltı suları bölge halkı tarafından içme ve tarımsal sulama amacıyla kullanılmaktadır. Kıyı şeridinde çok yakın olmasına rağmen deniz suyu girişimi etkisinin gölsel karbonat biriminde çok düşük olmasının nedeni, karasal kırıntılar olarak adlandırılan birimin killi düzeyleridir. Birimde, üretim sağlanan kuyuların kayıt altına alınması gerekmektedir. Yeraltı su çekiminde çok artış

olması halinde, tuzlu su kamasında meydana gelecek bozulmaların ardından tatlı su akiferinde deniz suyu girişimi meydana gelecektir. Bafa Gölü'nde antropojenik etkilerle gelişen tuzlanma ise Dalyan kanalıyla uzaklaştırılan jeotermal kökenli yeraltı sularıdır. İdare tarafından geliştirilen bütünleşik sistemler ile Bafa Gölü'nün +2 metre kotunda sabitlenmesi hedeflenmektedir. Dalyan kanalı suları Bafa Gölü su seviyesinin yüksek olduğu ve/veya sulama yapılan dönemde denize deşarj edilmektedir. Deniz suyuna kıyasla yüksek miktarda bor, baryum, bakır, çinko gibi eser element içeren Dalyan kanal suları, lagünde ağır metal birikimine neden olmaktadır. Gölün tuzlanması jeolojik süreçlerle açıklanabiliyorken, inorganik kirliliğe neden olan jeotermal suların göle ya da denize deşarjı antropojenik kirlilik olarak yorumlanabilir. Balık yemi ve antibiyotik gibi atıklar göl ekosistemine zarar vermektedir. Yöre halkı tarafından mera hayvancılığı ve tekneler ile balıkçılık yapılmaktadır. Bafa Gölü aynı zamanda kuşların göç yolu üzerinde yer almaktadır. Tüm paydaşların Bafa Gölü kaynağından yararlanmasının sürdürülebilirliği için veriler ışığında bir takım öneriler geliştirilmiştir.

Jeotermal kuyular ruhsatlandırılmalıdır. Bürokratik çözümler ile yetki devri ya da kuyuların yasal çerçevede tekrar araştırılması gerekmektedir. Balık üretim çiftliklerinin Bafa Gölü'ne olan hasarı yenilikçi yaklaşımlarla kısa vadede giderilebilir. Balık üretim havuzlarında anlıksukimyası değerleri takibiyle askıdamaddeyi azaltmak ve yem optimizasyonu hedeflenmelidir. Kimyasal yemler yerine bitkisel özlü besin maddesi yöntemi denenebilir. Çiftliklerde ya da Dalyan kanalı üzerinde kurulacak arıtma tesisiyle sular amonyumdan (NH_4) arıtılmalıdır. İnorganik madde bolluğu belirlenen sulardaki

her elementin artırılması ekonomik olmayacaktır. İnorganik çözülmüş madde miktarı yüksek jeotermal sular, ruhsatlandırma ardından amonyumca arıtıldıktan sonra mermer birimine geri basılarak uzaklaştırılabilir. Sıcak su barındıran akiferde yapılan kuyu testlerine göre mermer birimi geri basıma uygundur. Her ne kadar üretim çiftliklerinde laboratuvar ortamında iç pazara satılacak ya da ihraç edilecek balıkların organik kalite uygunluk testleri yapılmakta ise de yüzey suları sınır aşan alüminyum (Al), bakır (Cu), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) bollukları nedeniyle balık üretimine uygun değildir. Kurşun için belirlenen limit değer $1 \mu\text{g/L}$ 'dir, jeotermal kökenli suyun kurşun bolluğu $277.8 \mu\text{g/L}$ 'e kadar ulaşmaktadır. B4 kodlu jeotermal kökenli kuyu suyunda ek olarak baryum (Ba), krom (Cr), demir (Fe), mangan (Mn) ve nikel (Ni) sınır değerinin üzerindedir. Organik kalite kontrollerine ek olarak balıkların solungaç ve dokusunda inorganik madde bolluğu düzenli olarak izlenmelidir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi, 2017.KB.FEN.014 numaralı projeden sağlanan ödenek yardımıyla gerçekleştirilebilmiştir. Yazarlar, Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Serdar BAYARI, Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Ünsal GEMİCİ ve dergi hakemlerine önemli katkılarından dolayı; Kılıç Holding ve Ege-Mar Su Ürünleri A.Ş.'ne ise bilimsel çalışmalara olumlu yaklaşımları ve örnek alım sürecindeki yardımlarından dolayı teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akçer-Ön, S., Greaves, A. M., Manning, S. W., Ön, Z. B., Çağatay, M. N., Sakınç, M., Oflaz, A., Tunoğlu, C., Salihoğlu, R., 2020. Redating the formation of Lake Bafa, western Turkey: Integrative geoarchaeological methods and new environmental and dating evidence. *Geoarchaeology*, 35(5), 659-677.
- Aksu, A. E., Piper, D. J. W., Konuk, T., 1987. Quaternary growth patterns of Büyük Menderes and Küçük Menderes deltas, western Turkey. *Sedimentary Geology*, 52(3-4), 227-250.
- Alabalık ve Sazan türü balıkların yaşadığı suların korunması ve iyileştirilmesi hakkında yönetmelik. (2014.01.12). Resmi Gazete (Sayı: 28880). Erişim Adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/01/20140112-2.htm> (29.01.2020).
- Algül, F., Beyhan, M., 2018. Bafa Gölü sediment ve su kalitesinin ağır metaller bakımından değerlendirilmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2(2), 128-138.
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği. Resmi Gazete (Sayı: 27527). Erişim Adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100320-7.htm> (12.12.2019).
- Back, W., 1961. Techniques for mapping of hydrochemical facies. *US Geological Survey Professional Paper*, 424, 380-382.
- Balık, S., Ustaoglu, M. R., 1989. Bioecological and economical investigation of *Acanthobrama mirabilis* in Bafa Lake. *Doğa Türk Zooloji Dergisi*, 13(3), 141-174.
- Bozkurt, E., Oberhansli, R., 2001. Menderes Massif (western Turkey): structural, metamorphic and magmatic evolution – a synthesis. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 679–708.
- Brückner, H., Herda, A., Kerschner, M., Müllenhoff, M., Stock, F., 2017. Life cycle of estuarine islands—From the formation to the landlocking of former islands in the environs of Miletos and Ephesos in western Asia Minor (Turkey). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 876-894.
- Brückner, H., Müllenhoff, M., Gehrels, R., Herda, A., Knipping, M., Vött, A., 2006. From archipelago to floodplain—geographical and ecological changes in Miletus and its environs during the past six millennia (Western Anatolia, Turkey). *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 142, 63-83.
- Chowdhury, M. A. I., Ahmed, M. F., Ali, M. A., 2003. Influence of upstream sediment on arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. Fate of arsenic in the environment. Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka and the United Nations University, Tokyo, 21-35.
- Cirik, S., Metin, C., Cirik, Ş., 1989. Bafa Gölü planktonik algleri ve mevsimsel değişimleri. Çukurova Üniversitesi V. Bilimsel ve Teknik Çevre Kongresi Tebliğleri, 06.05.1989, Adana, 604-613.
- Cooper, H. H., Jacob, C. E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(4), 526-534.
- Dora, O. Ö., 1975. Menderes masifinde alkali feldspatların yapısal durumları ve bunların petrojenetik yorumlarda kullanılması. *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, 18, 111-126.
- Dora, O. Ö., 2011. Menderes Masifi'ndeki jeolojik araştırmaların tarihsel gelişimi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 142 (142).
- Durov, S. A., 1948. Natural waters and graphic representation of their composition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 59(3), 87-90.
- Dügel, M., Kazancı, N., 2004. Assessment of water quality of the Büyük Menderes River (Turkey) by using ordination and classification of macroinvertebrates and environmental variables. *Journal of Freshwater Ecology*, 19(4), 605-612.
- Erdoğan, B., Güngör, T., 2004. The problem of the core-cover boundary of the Menderes Massif and an emplacement mechanism for regionally extensive gneissic granites, western Anatolia (Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13(1), 15-36.

- Erdoğan, S., 2011. A chemical reaction to a physical impact: Lake Bafa wetland ecosystem (Turkey) case. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 3, 1-8.
- EU (European Union), 2014. Drinking Water Regulations, S.I. No. 122 of 2014.
- Gibbs, R. J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170 (3962), 1088-1090.
- Gray, N.F., 2008. *Drinking Water Quality: Problems and Solutions*. New York: Cambridge University Press.
- Hetzel, R., Reischmann, T., 1996. Intrusion age of Pan-African augen gneisses in the southern Menderes Massif and the age of cooling after Alpine ductile extensional deformation. *Geological Magazine*, 133(5), 565-572.
- IAH (International Association of Hydrogeologists), 1979. *Map of Mineral and Thermal Water of Europe Scale: 1:500.000*, IAH, United Kingdom.
- Kazancı, N., DüNDAR, S., Alçıçek, M. C., Gürbüz, A., 2009. Quaternary deposits of the Büyük Menderes Graben in western Anatolia, Turkey: Implications for river capture and the longest Holocene estuary in the Aegean Sea. *Marine Geology*, 264(3-4), 165-176.
- Kazancı, N., Girgin, S., Dügel M., 2008. Research on the limnology of Bafa Lake in South-Western Turkey and climate change impacts. *Review of Hydrobiology*, 207-223.
- Knipping, M., Müllenhoff, M., Brückner, H., 2008. Human induced landscape changes around Bafa Gölü (western Turkey). *Vegetation History and Archaeobotany*, 17(4), 365-380.
- Koç, C., 2008. The effects of the environment and ecology projects on lake management and water quality. *Environmental monitoring and assessment*, 146(1-3), 397-409.
- Küçüksümbül, A., 2018. Söke Ovası ve Bafa Gölü çevresinin hidrojeolojik incelenmesi: Jeotermal Potansiyeli, Toprak ve Su Kirliliği. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi.
- Lloyd, J.W., Heathcote J.A., 1985. *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater, an introduction*. Clarence Press, Oxford.
- MTA (Maden Tektik ve Arama Genel Müdürlüğü), 2002. 1:500000 Ölçekli Aydın, Denizli, Muğla Bölgesi Jeoloji Haritası. Ankara. Türkiye.
- Müllenhoff, M., Handl, M., Knipping, M., Brückner, H., 2004. The evolution of Lake Bafa (Western Turkey)–Sedimentological, microfaunal and palynological results. *Coastline Reports*, 1(2004), 55-66.
- OSİB (Orman ve Su İşleri Bakanlığı), 2012. Bafa Gölü Su Kalite Değerlendirme Raporu. Ankara. Türkiye.
- Pettine, M., Camusso, M., Martinotti, W., 1992. Dissolved and particulate transport of arsenic and chromium in the Po River (Italy). *Science of the Total Environment*, 119, 253-280.
- Sarı, H.M. Balık, S. Özbek, M. Aygen, C., 2001. The Macro and Meiobenthic Invertebrate Fauna of Lake Bafa. *Anadolu University Journal of Science and Technology*, 2(2), 285-291.
- Schoeller, H., 1935. Utilite de la notion des exchanges de bases pour le comparaison des eaux souterraines. *Société Géologie Comptes Rendus Sommaire et Bulletin, série*, 5, 651-657.
- Seçmen, Ö., Leblebici, E., 1982. Ege Bölgesi, İç Anadolu Batısı ve Akdeniz Bölgesinin Batısında Bulunan Göl ve Bataklıkların Flora ve Vegetasyonu. TUBİTAK Proje No: TBAG-407.
- Seyitoğlu, G., Işık, V., 2015. Batı Anadolu'da Geç Senozoyik genişleme tektoniği: Menderes Çekirdek Kompleksinin yüzeylemesi ve ilişkili havza oluşumu. *MTA Dergisi*, 151, 49-109.
- Seyler, P., J. M. Martin., 1990. Distribution of arsenite and total dissolved arsenic in major French estuaries: dependence on biogeochemical processes and anthropogenic inputs. *Marine Chemistry*, 29, 277-294.
- Singh, M., Singh, A. K., Srivastava, N., Singh, S., Chowdhary, A. K., 2010. Arsenic mobility in fluvial environment of the Ganga Plain, northern India. *Environmental Earth Sciences*, 59(8), 1703-1715.

- Socha, M. T., Ensley, S. M., Tomlinson, D. J., Johnson, A. B., 2003. Variability of water composition and potential impact on animal performance. In Proc. from the Intermountain Nutrition Conference, Salt Lake City, UT, 85-96.
- Somay, M. A., Gemici, Ü., 2012. Groundwater quality degradation in the Büyük Menderes River coastal wetland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(1), 15-27.
- Sümer, Ö., İnci, U., Sözbilir, H., 2013. Tectonic evolution of the Söke Basin: Extension-dominated transtensional basin formation in western part of the Büyük Menderes Graben, Western Anatolia, Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65, 148-175.
- Şengör, A.M.C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Tarcan, G., Gemici, Ü., 2014. Egemar balık üretim tesisi hidrojeolojik değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Tarcan, G., Gemici, Ü., Savaşçın, M.Y., 2007. Bafa Gölü tuzluluğunun jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi-DEVAK Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Bilimsel Raporlar Serisi.
- Theis, C. V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 16(2), 519-524.
- Thorntwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- TS-266 (Türk Standartları İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik), (1997.03.18). Resmi Gazete.
- TS-266 (Türk Standartları İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik), (2005.02.17). Resmi Gazete. Erişim Adresi: <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/02/20050217-3.htm> (29.01.2020)
- TS-266 (Türk Standartları İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik), (2013.03.07). Resmi Gazete (28580). <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/03/20130307-7.htm> (29.01.2020).
- Van den Berk, V., 1991. The likely environmental impact of world bank support project in Büyük Menderes River Basin. Santa Barbara: ICB.
- Varol, S., Davraz, A., 2014. Assessment of geochemistry and hydrogeochemical processes in groundwater of the Tefenni plain. *Environmental Earth Science*, 71 (11), 4657-4673.
- WHO (World Health Organization), 2004. Guidelines for drinking-water quality. Geneva, Schweiz. 1-540
- WHO (World Health Organization), 2008. Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, Schweiz. 1-515.
- WHO (World Health Organization), 2011. Guidelines for drinking-water quality. Geneva, Schweiz. 1-541.
- WHO (World Health Organization), 2017. Guidelines for drinking-water quality. Geneva, Schweiz. 1-542.
- Yabanlı, M., Coşkun, Y., Öz, B., Yozukmaz, A., Sel, F., Öndeş S., 2013. Bafa Gölü'nden elde edilen levreklerde ve göl suyunda ağır metal içeriğinin belirlenmesi ve balık/halk sağlığı açısından durum değerlendirmesi. *Bornova Veteriner Bilimleri Dergisi*, 35 (49), 15-23.



Araştırma Makalesi / Research Article

Erzincan Ovası ve Dolayının Çevre Jeolojisi ve Planlanmasına Bir Yaklaşım *An Approach to the Planning and Environmental Geology of Erzincan Plain and its Surroundings*

Doğuş BOZ¹ , **Ali YILMAZ²** 

¹ Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 58140, Sivas

² Ümit Mah. Çamlıca Vadi Sitesi, A/17, Çankaya-Ankara

Geliş (Received): 19 Kasım (November) 2019 / Düzeltme (Revised): 06 Şubat (February) 2020 / Kabul (Accepted): 03 Nisan (April) 2020

ÖZ

Erzincan ovası, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat havzasında, deprem, heyelan, çığ, sel ve taşkın gibi doğa kaynaklı risklerin tehdidi altında olan bir yörede yer almaktadır. Erzincan, tarihi boyunca çeşitli büyüklüklerde depremlere sahne olmuştur. 1939 ve 1992 yıllarında oluşan depremler, insanlar ve yapılar üzerinde önemli derecede can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Sunulan çalışmada Erzincan Ovası ve yakın dolayının bölgesel ve yerel jeolojisi ışığında jeomorfolojisi, hidrojeolojisi, doğal kaynakları, arazi yetenek değerlendirmesi, günümüzdeki arazi kullanımı gözetilerek çevre jeolojisi ortaya koyulmuş ve buna bağlı olarak geleceğe yönelik arazi kullanım planlaması değerlendirilmiştir. Çalışmanın ana konusunu oluşturan çevre jeolojisi çerçevesinde yörenin çevresel sistemleri tanımlanmıştır. Bu sistemler başlıca Erzincan Ova Sistemi, Ergan Dağı Sistemi, insan faaliyetleri sonucu değişime uğramış sistem olup, ayrıca her sistemi karakterize eden çevresel birimler ayırt edilmiştir. Böylece 26 çevresel birim, genel ve indeks özellikler ile doğa kaynaklı riskler açısından tanımlanarak, bu birimlerin arazi yetenek değerlendirmesi yapılmıştır. Arazi yetenek değerlendirmesi, arazi kullanım biçimleri gözetilerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Erzincan Ovası'nın ve yakın dolayının Çevre Jeolojisi ışığında, doğa kaynaklı risklerin egemen olduğu bu bölgenin, geleceğe yönelik planlamasında gözetilmesi gereken hususlar ortaya koyulmuştur. Günümüzdeki arazi kullanım biçimleri gözden geçirildiğinde yörede yeni bir planlamaya gereksinim olduğu anlaşılmaktadır. Öngörülen planlama esas alınır, çevresel sorunların büyük bir bölümünün denetlenip, Erzincan Ovası ve dolayının korunması da mümkündür.

Anahtar kelimeler: Çevre Birimleri, Çevre Jeolojisi, Çevresel Sistemler, Erzincan Ovası, Arazi Kullanım Planı

ABSTRACT

Erzincan plain is located in an area, where earthquakes, landslides, avalanches, floods and other natural disasters are mainly dominant in the upper part of Fırat River basin in the East Anatolian Region. Earthquakes of various magnitudes occurred throughout the history of Erzincan. Earthquakes occurred in the 1939 and 1992 years led to many casualties and lost of the properties. In the present study, in the light of regional and local geology of the Erzincan Plain and vicinity considering – its geomorphology, hydrogeology, natural resources, land-use capability, current land-use and its environmental geology have been presented and related future land use planning have been evaluated. Environmental systems have been defined in the frame of environmental geology. These systems are mainly Erzincan Plain System, Ergandağ System and Man-made or Antropogenic System. Environmental units those characterize each system have been identified. Thus, land-use capabilities of 26 environmental units have been

evaluated depending on their general properties, index characteristics and natural disaster risks. The evaluations of land-use capabilities have been carried out on the basis of land-use forms. The matters, which are necessary to be considered to wards to the planning of the region in the future, have been presented. Based on the recommended plan, it is possible to control a great deal of environmental problems and protect the Erzincan Plain and surroundings, as well.

Keywords: *Environmental Geology, Erzincan Plain, Environmental Systems, Environmental Units, Land Use Planing.*

GİRİŞ

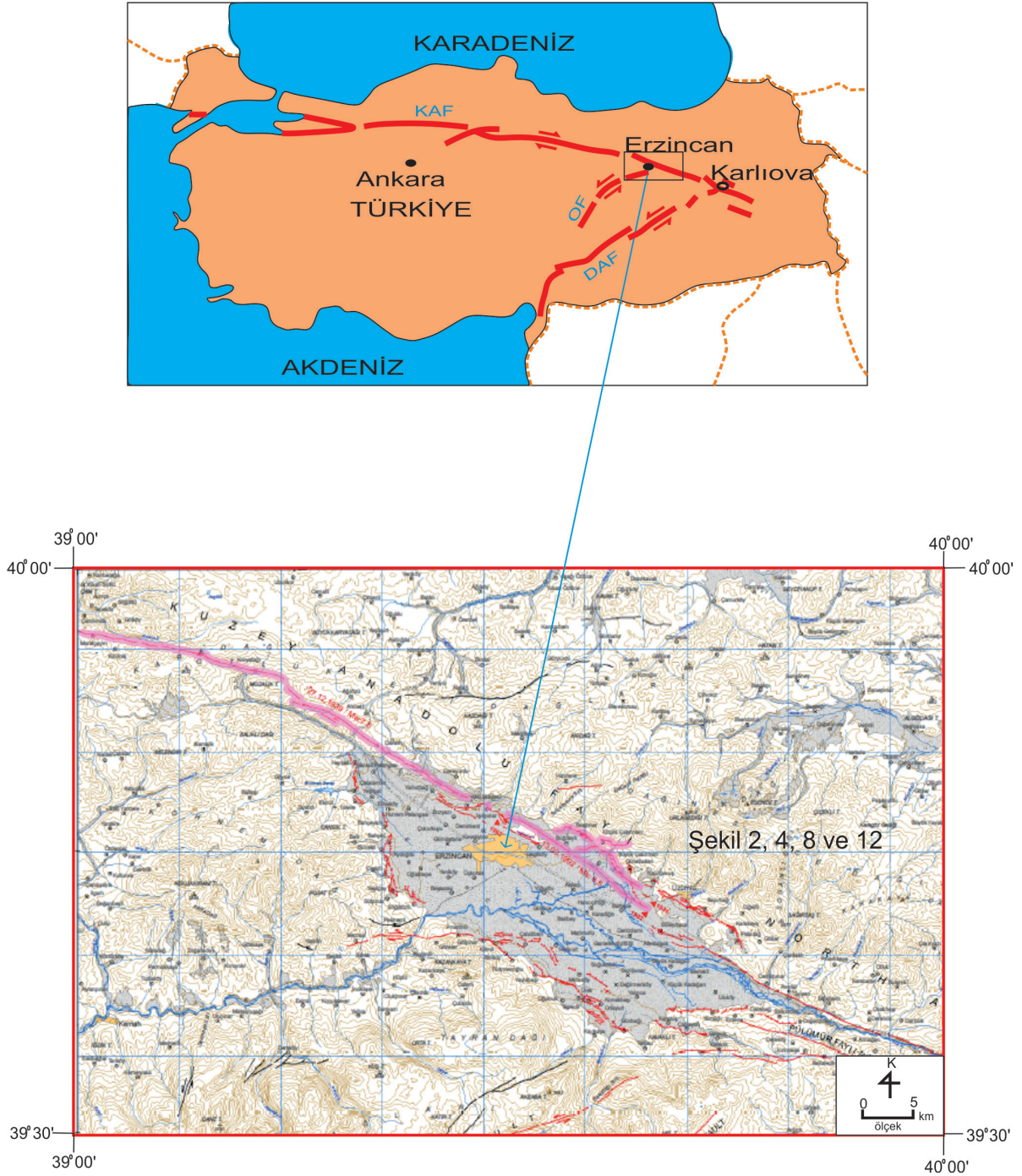
Erzincan Ovası, Doğu Anadolu'nun batısında, Sivas'tan Kars'a doğru uzanan demiryolu ile Sivas-Erzurum ve Trabzon-Malatya karayollarının birbirine kavuştuğu bir kavşakta; Türkiye'nin doğu kesiminde yer almaktadır (Şekil 1).

Erzincan Ovası ve yakın dolay, jeolojik açıdan çeşitli çalışmalara sahne olmuştur (Özgül, 1981; Yılmaz, 1985; MTA, 2003). Bölgenin tektonik (Arpat ve Şaroğlu, 1975; Barka, 1984; Koçyiğit, 1991; Emre vd. 2012), petrolojik (Aktimur vd., 1995), hidrojeolojik (DSİ, 1981), jeomorfolojik (Keçer, 1985), arazi kullanım (Aktimur vd., 1988) ve mevcut çevresel durumu (Erzincan Valiliği, 2011) incelenmiştir. Yukarıda sunulan çalışmalar irdelenerek bölgenin çevre jeolojisi de değerlendirilmiştir (Boz, 2015). Dolayısıyla, söz konusu bölge çeşitli açılardan iyi bilinmektedir.

Çevre jeolojisi haritalamasında ise, önce yere özgü coğrafya, morfoloji, doğal görünüm ve mevcut arazi kullanımları ışığında çevresel sistemler tanımlanır. Herhangi bir alan için pek çok sayıda çevresel sistem tanımlanabilir. Daha sonra da her sistem, benzer jeolojik özellikler, bitki örtüsü, toprak kalınlığı ve arazi kullanım biçimleri gibi özellikler de gözetilerek çevresel birimlere ayrılmaktadır (Brown vd., 1971;

Turner ve Coffman, 1973; Cendero, 1974; Yılmaz, 2008). Mühendislik jeolojisi haritaları (Shrestha vd., 1999; Tudes vd., 2012), tekil proje özelinde ve projenin çevresel etkileri konusunda sağlıklı bilgi verir ve çevrenin korunmasına katkı sağlar. Çevre jeolojisi haritaları ise giderek gelişmektedir (Doornkamp vd., 1987; Mulder ve Hillen, 1990; Faccini vd., 2008). Bu haritalar, temel jeolojik haritalardan elde edilen verilerin diğer çevresel (doğal ve insan yapısı) verilerle kombinasyonu sağlayan ve çevrenin mevcut durumu ile geleceğe yönelik planlanmasını birlikte değerlendirmeye ve geliştirmeye açık haritalardır.

Söz konusu çaba, özellikle Stratejik Çevresel Etki Değerlendirmesi uygulamalarında, öngörülen plan ve programların bölgesel düzeyde kümülatif etkilerini de değerlendirmeyi kolaylaştırmaktadır. Ayrıca bu haritalarda, her çevresel birim deprem, heyelan, sel ve taşkın, aşınma (erozyon), yağış, toprak oluşumu ve doğal yaşamın verimliliği gibi doğa kaynaklı yer süreçleri yönüyle ve konuya özel hazırlanabilen matrislerle birlikte değerlendirilebilir. Dolayısıyla çevre jeolojisi haritalarının bölgesel düzeyde çevrenin korunmasına katkısı vardır. Bu katkı da çevrenin geleceği ve sürdürülebilirliği açısından önemlidir.



Şekil 1. Erzincan Ovası ve dolayının bulduru haritası (MTA, 2012a). KAF, Kuzey Anadolu Fay Zonu; DAF, Doğu Anadolu Fay Zonu; OF, Ovacık Fay Zonu.

Figure 1. Location map of the Erzincan Plain and surroundings (MTA, 2012a). KAF, North Anatolian Fault; DAF, East Anatolian Fault; OF, Ovacık Fault.

Sunulan çalışmanın en önemli amacı, yöreye dair jeolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik, doğal kaynaklar ve arazi kullanım potansiyeli ışığında; yörenin çevre jeolojisini ortaya koymak ve bölgenin geleceğe yönelik arazi kullanım planlamasına katkı sağlamaktır. Bu çerçevede, Erzincan Ovası ve yakın dolayının morfolojisi ve arazi kullanımı gözetilerek çevresel sistemler tanımlanmıştır. Daha sonra tanımlanan her bir sistem için kaya türleri gözetilerek çevresel birimler tanımlanmıştır. Ayrıca çevresel sistemlerle birlikte çevresel birimlerin arazi yetenek sınıflaması gözetilerek ortaya koyulan bilgilerle mevcut bölgesel planlama değerlendirilmiş ve geleceğe yönelik arazi planlamasının daha doğru bir yönde yapılmasına katkıda bulunulmuştur.

Önemli doğa kaynaklı risklerin tehdidi altındaki bir bölgede geleceğe yönelik bir planlama yapmak güçtür. Bunun için öncelikle mevcut durumu ortaya koymak üzere bölgenin çevre jeolojisi haritasını oluşturmak gerekmektedir. Sunulan bu makaledeki çevre jeolojisi çalışması daha önce yapılan çevre jeolojisi çalışmalarından (Cendero, 1974; Faccini vd., 2008) esinlenerek yapılmıştır. Böylece yörenin geniş çerçevede bölgesel açıdan durumunu belirlemek mümkündür. Sonuç olarak, sunulan çalışmada, ilk kez hazırlanan Erzincan Ovası'nın çevre jeolojisi haritası gözetilerek, bölgenin planlanmasına dair bir yaklaşımda bulunulmuştur.

Çevre jeolojisi haritalamasının başka bir amacı, planlamacılara en geniş çerçevede yol göstermektir. Bunun için, jeolojik bilgi ile kayaların ya da zeminlerin hidrojeolojik ve mühendislik özellikleri kolaylıkla anlaşılabilir bir biçimde sunulmalıdır. Çevre jeolojisi haritaları planlamanın türü için gerekli önemli bilgileri içermeli ve konu dışı verileri de özenle

ayıklamalıdır. Uygulama yönüyle en iyi çevre jeolojisi haritaları, jeolojik, hidrojeolojik ve jeoteknik-mühendislik özelliklerini çevrenin diğer nitelikleri ile birlikte sunan haritalardır. Bir bölgenin çevre jeolojisi haritalaması, mevcut arazi kullanım biçimleri gözetilerek hazırlanabileceği gibi, olası yeni arazi kullanım biçimlerini de gözeten bileşik bir yapıda da hazırlanabilir.

ERZİNCAN OVASI VE DOLAYININ MEVCUT ÇEVRESEL ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde bölgenin mevcut durumunu tanımlamak üzere sıra ile jeolojik, hidrojeolojik, jeomorfolojik özelliklere, doğal kaynaklara ve arazi kullanımına dair temel bilgiler sunulmuştur. Daha sonra, yörenin çevre jeolojisinin yanı sıra arazi yetenek değerlendirmesi yapılmış ve geleceğe yönelik planlaması yeniden gözden geçirilmiştir.

Erzincan Ovası ve Yakın Dolayının Jeolojisi

Öncelikle bölgesel jeolojiyi ve buna bağlı yerel jeolojiyi ayrı ayrı irdelemekte yarar vardır. Genel ayrıntılardan özel ayrıntılara yönelmek kimi zaman bazı kolaylıklar sağlamaktadır.

Bölgesel jeoloji

Erzincan yöresinde bölgesel düzeyde, farklı ortam koşullarını yansıtan ve birbiri ile tektonik ilişkili, Eosen öncesi yaşta olan dört temel tektono-stratigrafik birim ayrıntılandırılmıştır. Bunlar kuzeyden güneye doğru Kelkit Görelisi otoktonu, Çimen Dağı Napı, Erzincan Napı ve Munzur Kireçtaşı'dır. Bu napılardan Çimen Dağı Napı, kuzeydeki Kelkit Otoktonu'nun ve güneydeki Erzincan Napı'nın üzerinde, Erzincan Napı ise

Çimendağı Napı'nın'nın altında ve Munzur Kireçtaşı'nın üzerinde yer almaktadır (Yılmaz, 1985).

İnceleme alanında ise Doğu Pontidler'in güney kenarını temsil eden Çimendağı Napı ile Erzincan Napı ve Munzur Kireçtaşı tanımlanmıştır. Tersiyer-Kuvaterner yaşta olan örtü ise tektonik birliklerin üzerinde açılı uyumsuzlukla yer almaktadır.

Yerel jeoloji

Bölgenin yerel jeolojisi yöreye özgü stratigrafik özellikler, tektonik-sismisite ve diğer doğa kaynaklı riskler alt başlıkları altında sunulacaktır. Böyle bir sunumun, yörenin jeolojisi ile yöreyi tehdit eden doğa kaynaklı süreçler arasındaki ilişkinin anlaşılmasını kolaylaştırabileceği öngörülmektedir.

Stratigrafik özellikler

Çalışma alanı, Erzincan ovası ve yakın dolayını kapsamaktadır. İnceleme alanını temsil eden başlıca tektonik birimlere dair jeolojik harita Şekil 2'de, tektono-stratigrafik dikme kesitler ise Şekil 3'te görülmektedir.

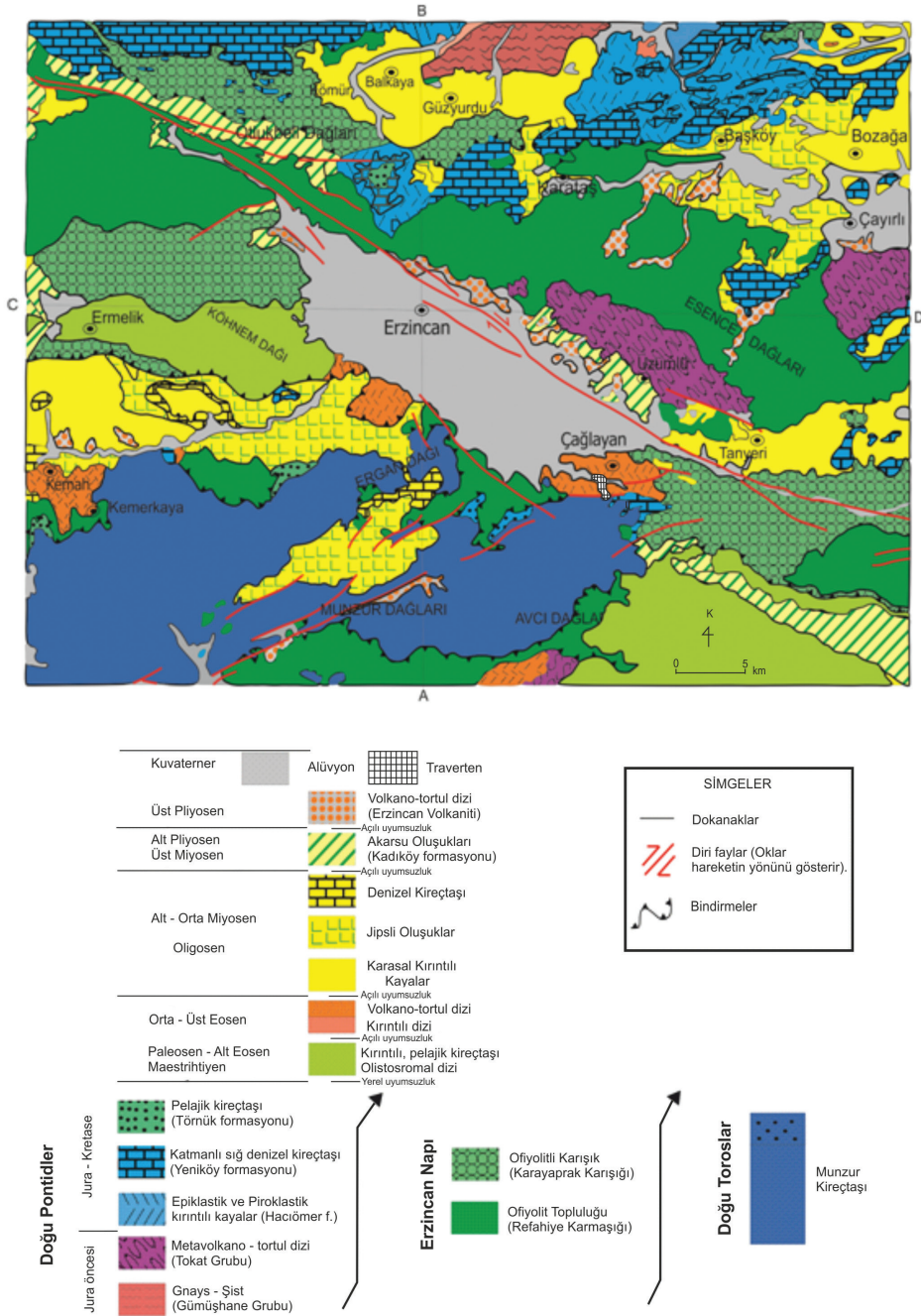
Çimendağı Napı, Liyas öncesi yaşta olan metamorfik kayalar ve bu kayaları kesen granitlerin üzerine açılı uyumsuzlukla gelen Jura-Kretase yaşta olan ağırlıklı olarak çakıltaşı ve kumtaşında yapıları kayalar ve alt düzeyleri sığ denizel, üst kesimi yer yer pelajik kireçtaşlarından oluşmaktadır.

Erzincan Napı, ağırlıklı olarak peridotitlerle temsil edilen ofiyolit napları ve yer yer

olistostromal nitelikte olan ofiyolitli karışıktan oluşmaktadır. Ofiyolitler Refahiye Karmaşığı, yer yer olistostromal olan ofiyolitli karışık ise Karayaprak Karmaşığı olarak adlandırılmıştır (Yılmaz, 1985). Ofiyolitler genel olarak karışığın üzerinde tektonik bir dokanakla yer almaktadır (Şekil 2).

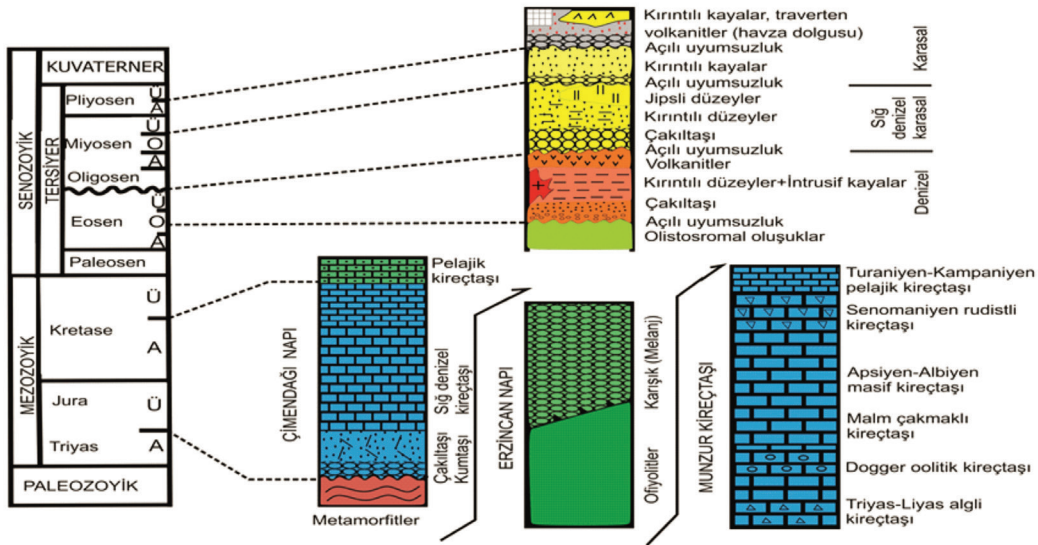
Munzur Kireçtaşı ise ağırlıklı olarak platform türü karbonatlarla temsil edilmekte ve Erzincan Napı'nın altında yer almaktadır (Özgül, 1981). Üst Triyas - Alt Jura yaşta algli kireçtaşı ile başlar, oolitle kireçtaşı, algli-foraminiferli kireçtaşı ve yer yer çakmaklı kireçtaşı ile devam eder. Bu birimin üst düzeylerindeki kireçtaşları üzerinde uyumlu ve keskin bir dokanakla Turoniyen-Kampaniyen yaşta çakmaklı pelajik kireçtaşı yer alır.

Örtüyü temsil eden Orta Eosen-Kuvaterner yaşta olan birimler, tektonik birimlerin üzerine açılı uyumsuzlukla gelir (Şekil 3). Orta Eosen yaşta olan kırıntılı istif üst düzeylere doğru önce volkano-tortul daha sonra masif volkanitlere uyumlu olarak geçer. Oligosen- Alt Miyosen yaşta olan karasal ve sığ denizel istif ise ağırlıklı olarak evaporitlerden oluşmakta ve daha eski tüm birimlerin kayaların üzerine açılı uyumsuzlukla gelmektedir. Bu birimler, yanal ve dikey yönde geçişli bir yapı sunmaktadırlar. Erzincan Ovası'nın oldukça büyük bir bölümü Kuvaterner yaşta olan birimlerden oluşmuştur. Havzada yaygın olan alüvyon yelpazeleri, yer altı suları için iyi bir akiferi temsil etmektedir. Kalınlıkları 50-150 m. arasında olan bu alüviyal malzemenin tabanında ofiyolitler yer almaktadırlar (Erzincan Valiliği, 2011). Sondaj verilerine göre, Erzincan havza dolgusunun kalınlığı yaklaşık 2 km kadardır (DSİ, 1981).



Şekil 2. Erzincan Ovası ve yakın dolayının jeoloji haritası (Özgül, 1981; Yılmaz, 1985; Aktimur vd., 1988; Koçyiğit, 1991'den).

Figure 2. Geologic map of the Erzincan Plain and its surroundings (After Özgül, 1981; Yılmaz, 1985; Aktimur et al., 1988; Koçyiğit, 1991).



Şekil 3. Erzinçan Ovası ve dolayının tektonik birlikleri ve havza dolgusu dikme kesitleri (Yılmaz, 1985'den).

Figure 3. Tectonic units and columnar sections of the basin fill of the Erzinçan Plain and surroundings (After Yılmaz, 1985).

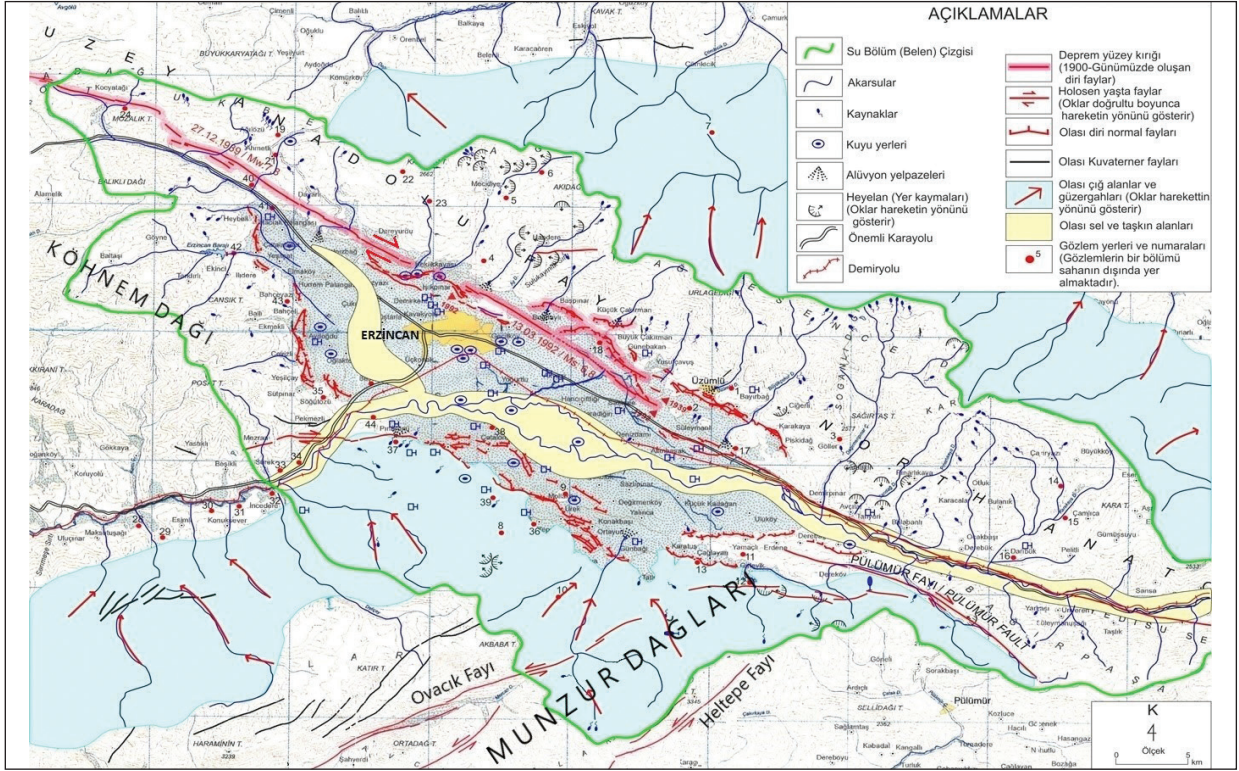
Tektonik –sismisite/deprem

Erzinçan Ovası'nı karakterize eden ana faylar ve havzayı kuzeyden sınırlayan Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun segmentleri ayrıntılı olarak incelenmiştir (Arpat ve Şaroğlu, 1975; Barka, 1984; Barka ve Gülen, 1989; Koçyiğit, 1991; MTA, 2003, 2012a). Erzinçan Havzası ve yakın çevresindeki Kuzey Anadolu Fay Zonu üç segmente ayrılmış ve bu segmentlerden ikisi havza ve çevresinde gözlenmektedir. Doğu segment yaklaşık 75 km ve K110°D doğrultusunda Yedisu-Tanyeri (Avcılar) arasında yer almaktadır. İki nolü segment ise havzanın kuzey sınırını oluşturmakta ve yaklaşık 60 km uzunluğunda olup K125°D doğrultuludur (Barka ve Gülen, 1989).

Bölgenin tektonik ve sismisitesini ortaya koymak üzere öncelikle bölgesel neotektonik döneme ait yapıların konumunu da irdelemekte yarar vardır. Şekil 1 ve 4'de Erzinçan yöresinin

önemli neotektonik yapıları görülmektedir. Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Erzinçan Ovası'nı kuzeyden sınırlar ve sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay karakterindedir. Erzinçan'ın güneyinde ise sol yönlü, kuzeydoğu-güneybatı doğrultulu ve birbirine koşut faylardan oluşan Ovacık Fay zonu (OF) yer almaktadır. Bu fayların tümü yaklaşık kuzey-güney doğrultulu bir sıkışmanın güdümünde oluşmuştur. Bu sistem makro olarak gözetildiğinde, Erzinçan Ovası'nın da tıpkı Karlıova gibi Anadolu levhasının batıya doğru devinimi ile açıldığı izlenimini vermektedir.

İnceleme alanı içerisindeki normal faylar havza kenarlarında yaygın olarak gözlenmekle birlikte, yer yer havza dolgusunu oluşturan genç birim içerisinde de gözlenmektedir. Bu faylar genellikle GD-KB ve D-B gidişli faylar olup bunun yanında bazı kesimlerde yaklaşık K-G gidişli olan küçük ölçekli faylar da yer almaktadır (Akpınar, 2010).



Şekil 4. Erzincan Ovası'nın su bölüm çizgisi, hidrojeolojik veriler ve doğa kaynaklı riskler haritası (DSİ,1981; Aktimur vd., 1988; MTA, 2012a' dan yararlanılmış ve yeni saha gözlemleri).

Figure 4. Hydrogeological data and natural disasters map of the Erzincan Plain (After DSİ, 1981; Aktimur et al., 1988; MTA, 2012a and new field observations).

Erzincan havzasının kuzey kenarı halen aktif, güney kenarı kuzeye göre pasif rol oynamaktadır. KAF, Plio-Kuvaterner dönemde son şeklini almıştır. Buna göre havzanın KB kenarında, Plio-Kuvaterner yaşta konglomeraları üzerine serpantinlerin ters fayla gelmesi havzanın KB'sının kapanmakta olduğunu göstermektedir. Havzanın doğusunda ise, volkanik kayaların dağılımı ve fayların geometrisi, yersel bir açılma tektoniğinin (local pull-apart) varlığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Erzincan Ovası'nın KAF'ın (yani sağ yanal doğrultu atımlı bir rejimin) ve dolayındaki diğer tektonik unsurların denetiminde gelişmiş kıta içi bir havza olduğu

ve günümüzde de K-G doğrultulu bir sıkışmanın denetiminde oluşumunu sürdürdüğü kabul edilebilir.

Erzincan yöresinde son 1000 yıl içinde şiddeti 7' den daha büyük 10'dan fazla deprem yaşanmıştır (Erzincan Valiliği, 2011; Boz, 2015). 27 Aralık 1939 depremi, 20. yy'da yeryüzünde görülen 15 büyük depremden biridir. Bu depremde 32.968 kişi ölmüş, 4.125 kişi de ağır yaralanmıştır. 14.401 bina yıkılmış, 4.043 bina da ağır hasara uğramıştır. İl merkezinde 7.206 binanın 6.601'i yıkılmış, geriye kalanı ise tren istasyonu binası hariç kullanılamaz hale gelmiştir. Erzincan il sınırları içinde 5 adet deprem ölçüm istasyonu bulunmaktadır. Günlük

yer hareketleri Ankara'da bulunan Afet ve Acil Durum (AFAD) Başkanlığı tarafından 24 saat izlenmektedir (Erzincan Valiliği, 2011).

Doğa kaynaklı ve diğer riskler

Erzincan ovası ve dolayını tehdit eden doğa kaynaklı diğer riskler başlıca heyelanlar, çığlar, sel ve taşkınlar, erozyon, fırtınalar ile orman ve otlak yangınlarıdır. Aşağıda, Erzincan Valiliği (2011) tarafında derlenmiş olan veriler, arazide yapılan gözlemler çerçevesinde değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeye dair Erzincan Ovası ve dolayının su bölüm çizgisi, bazı önemli hidrojeolojik veriler ve yöreyi tehdit eden doğa kaynaklı riskler Şekil 4'de sunulmuştur.

Heyelanlar, daha geniş anlamda, yamaç hareketleri terimini kullanarak bir sınıflama yapan Varnes (1978) dönel/yanal kaymalarına karşılık gelmektedir. Doğal Risk Haritasında (Şekil 4) heyelanların tümünde yere özgü kopma yerleri ve kayma yönü görülmektedir. Elbette gereçlerin biriktiği bir alan da vardır. Bir heyelan olayına jeoloji, jeomorfoloji, iklim ve bitki örtüsü ile insan kaynaklı etkenlerden biri veya bir kaçını neden olabilir. Heyelanlar genelde, deprem ve/veya aşırı yağışların tetiklemesiyle dünyada en fazla can ve mal kaybına yol açan olayların arasında yer almaktadır. Erzincan ovası ve dolayında heyelan oluşturan birimler yaygındır (Şekil 4). Özellikle Tersiyer yaşta olan birimlerde heyelanlar sıkça görülmektedir. Bu kapsamda, Erzincan Ovası'nın kuzey bölgesinde yer alan Esence Dağları bitki örtüsünden yoksun olması nedeniyle heyelan tehlikesiyle karşı karşıyadır. Aynı şekilde, ovanın güneyinde yer alan Munzur Dağları'nın kuzey yamaçlarında masif ya da kalın katmanlı kireçtaşları eklemli ve kırıklı yapıya sahip olmaları nedeniyle, bu yamaçlarda kimi zaman kaya düşmeleri ya da devrilmeleri yaşanmaktadır (Şekil 4).

Çığlar, bir yamaçta mevcut dengenin bozulması ile kar katmanlarının, yamaç eğimi yönünde akması ile oluşur. Yamaç eğimi, bitki örtüsü, meteorolojik koşullar, kar tabakasının yapısı, yapay etkiler çığın oluşmasına neden olan faktörlerdir. Erzincan'da 2000 yılı içerisinde Refahiye ilçesi, Mendeme başı Köyü, Bektaşlı Mezrası ve İliç İlçesi, Çöpler Köyü olası çığ tehlikesinden dolayı etüt programlarına dahil edilmiştir. Şekil 4'de izlenen çığ güzergâhları, yamaç eğiminin 25-35 derece olduğu ve çığa dair diğer unsurların da gözetildiği vadilere karşılık gelmektedir.

Erozyon açısından da, bölge açısından da tehdit altındadır. Ova'nın kuzeyindeki ve güneyindeki dağların yüksek olan yerleri, erozyonun en yoğun olduğu yerlerdir. Ayrıca bölgede çoğu yerde, toprağın A horizonu taşındığından daha açık renkli B horizonu yüzeye çıkmış bulunmaktadır. Donma-çözülme olayları erozyonu arttırmaktadır. İl merkezi ve yakın dolayındaki yapılaşmanın da erozyonun artmasında etkili olduğu söylenebilir. Ekolojik dengenin bozulması ve aşırı otlatma, erozyonun bölgede etkili olmasının diğer faktörlerdir. Erozyon ile çevredeki yamaçlardan ovaya çok fazla malzeme taşınmaktadır. Taşınan kırıntılı kayalar eteklerdeki verimli tarım alanlarını örtme eğilimindedir. Özellikle Pliyosen-Pleyistosen arazisinde kaynaklanan çakıllı kırıntılar tarım alanlarını etkilemektedir. Erozyonunun olduğu kesimlerde teraslama yapılmalıdır. Teraslara bölgenin ekolojik şartlarına uygun ağaçlar dikilmelidir. Ayrıca yamaçlarda yapay (kuru duvar, çit vs.) bentler yapılmalıdır.

Sel ve taşkınlar da Erzincan Ovası'nın orta kesimini önemli boyutlarda tehdit etmektedir (Şekil 4). Bölgede yaşanan taşkınlar meteorolojik verilere göre en çok Mart – Nisan – Mayıs – Haziran ve Temmuz aylarında

meydana gelmektedir. Mevcut durumda Yukarı Fırat Nehri'nin Erzincan Ovası'nın ortasından geçmesi sebebiyle nehre yakın yerleşim yerleri, 100 yılda ve 500 yılda gelen ve 2 saat süren taşkınlara karşı savunmasız durumdadır.

Orman ve otlak yangınları her yerde ağırlıklı olarak birer insan kaynaklı tehdittir. Erzincan ilinde, 1989 yılında 3, 1993 – 2010 yılları arasında toplam 29 adet yangın çıkmış bu yangınlar sonucunda 147.81 hektar ormanlık alan tahrip olmuştur (Boz, 2015).

Erzincan Ovası ve Dolayının Hidrojeolojik Özellikleri

Erzincan Ovası ve yakın dolay Yukarı Fırat Havzasında yer almaktadır. Şekil 4' de Erzincan Ovası'nın su bölüm çizgisi ve ovayı besleyen önemli kaynakların dağılımı görülmektedir. Bölgenin yüzey ve yeraltı su kaynakları DSİ (1981) tarafından kapsamlı olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Yüzey suları

Erzincan ilinin yüzey su kaynakları başlıca kaynaklar (pınarlar), akarsular, maden suları, barajlar, göller ve yapay göletlerle temsil edilmektedir. Ovanın en önemli yüzey suyu kaynakları Fırat nehri, Kirnavik dere, Şıhlı sulamasındaki azmaklar ile Çardaklı deresidir. Erzincan ovasındaki suların sınıfı genellikle C_2S_1 olup hafif tuzlu olup ve düşük düzeyde alkali niteliğe sahiptir. Şu anda su gereksinimini karşılamak için kullanılan su kaynakları aynı zamanda il genelinde üretilen atıkların depolandığı Katı Atık Depolama Tesisinin sızıntı sularından etkilenme tehlikesiyle karşı karşıyadır. Özellikle akarsular bu kirlilikten en çok etkilenen ve önlem alınmazsa daha da büyük zararların oluşmasına yol açabilecek bir konumdadır (Erzincan Valiliği, 2011).

Yeraltı suları

Bölgenin akiferi, Ova'nın güneyinde yer alan Mesozoik yaşta olan Munzur kireçtaşları ile ovadaki alüvyon ve alüvyon konileridir (Şekil 4). Alüvyon ve alüvyon konilerinin yayılımı 494 km^2 'lik bir alan kaplamaktadır. Genellikle iri malzeme olan kum ve çakıllardan oluşan alüvyon ve alüvyon konilerin kalınlıkları 50-150 metre arasında değişmektedir. Ova ortasında 200 km^2 'lik bir alanda yer yer killi düzeyler nedeniyle akifer, basınçlı akifer özelliğini göstermektedir.

Yeraltı su tablası ovanın büyük bir kısmında yüzeye çok yakın ya da yüzeydedir. Bu yüzden özellikle vadi tabanında yer yer bataklık ve sazlıklar gelişmiştir. Büyük Çakırman köyü sahasının güneyi, Erzincan Ovası'nın güneyinde yer alan araziler bataklık olup, yeraltı su tablasının yüzeyde bulunduğu sahalardır (Şekil, 4). Yeraltı su tablası derinlik haritası, arazi kullanım potansiyel haritalarının yapımında önemli bir faktör olup, yerleşim yerlerinin ve yol güzergâhlarının yanı sıra atık maddelerin atılacağı sahalarda belirlenmesinde kullanılabilir. Yeraltı sularının derinliğine dair ölçümlerin tüm yıl boyunca sürekli yapılıp izlenmesi gerekir.

Erzincan Ovası'nın Jeomorfolojisi

Erzincan Ovası, kuzeyinde ve güneyinde yüksek dağlarla çevrili bir platonun üzerinde yer alır. Ovanın Su Bölüm Çizgisi dâhilindeki arazinin % 60'ı dağlardan oluşur. Dağlar, çeşitli doğrultularda, kendine özgü kuzeyde yaklaşık KB-GD uzanımlı; güneyde ise GB- KD uzanımlı bir düzen içinde yer alır. Örneğin güneybatıdan Munzur dağları, batıdan Köhnem Dağı il alanına girer (Şekil 4). Doğudan Erzurum'dan gelecek batıya doğru uzanan Karasu, ilin ova alanını derinlemesine, aralarında geniş düzlükler bırakacak şekilde geçer. Ayrıca bölgenin eğim haritaları oluşturulmuştur (Boz, 2015).

Erzincan Ovası'nın kuzeyindeki dağlar 3349 m, güneyindeki dağlar ise 3462 m yüksekliklere ulaşmaktadır. Ovanın deniz düzeyinden ortalama yüksekliği yaklaşık 1180 m'dir. Çevresindeki yüksek dağlarla ova yüksekliği arasında düzey farkı 1800 m'yi geçer. Ovanın kuzeybatı-güneydoğu yönündeki uzunluğu 50 km, eni ortalama 18 km kadardır. Bu konumu ile Erzincan Ovası örnek bir dağlar arası havzadır. Ovanın yüzölçümü 600 km², kodu 1150-1300 m arasında değişmektedir.

Erzincan il merkezinin etrafının dağlarla çevrili olması nedeniyle özellikle kış aylarında rüzgâr hızının yetersiz olduğu, dolayısıyla hava kirliliğinin sürekliliğine yol açan tersinmenin (inversiyonun) olduğu ya da yağışın olmadığı dönemlerde kimi zaman hava kirliliğinin yaşandığı bilinmektedir (Erzincan Valiliği, 2011).

Doğal Kaynaklar

Bölgenin başlıca doğal kaynakları, toprak, maden yatakları, yukarıda sunulan su kaynakları ve ormanlık alanlar olarak sayılabilir.

Toprak, bölgenin en önemli doğal kaynağı olup, inorganik (%45), organik (%05), su (%25) ve hava (%25) içermekte (Erzincan Valiliği, 2011) ve yaşamın temelini oluşturmaktadır. İklim, topografya ve ana gereç farklılıkları nedeniyle Erzincan ilinde çeşitli toprak grupları oluşmuştur. Büyük toprak gruplarının yanı sıra toprak örtüsünden yoksun bazı arazi tipleri de görülmektedir (Boz, 2015).

Erzincan ili ve il sınırları içinde yer alan bölge, jeolojik açıdan zengin bir kayatürü çeşitliliğine sahiptir. Bu zenginlik bölgenin maden yatakları açısından zengin olmasının temelini oluşturur. Maden yatakları metalik madenler, sanayi hammaddeleri ve enerji

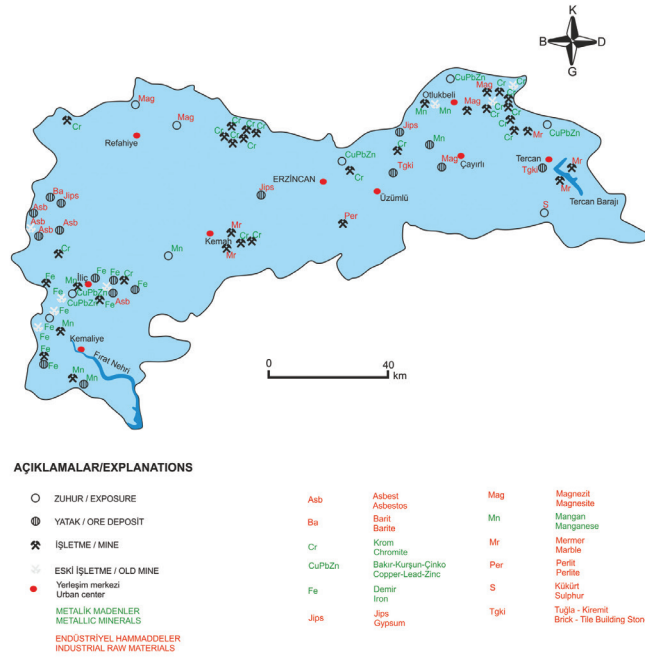
kaynakları açısından irdelenmiştir (MTA, 2012b). Maden yataklarının türleri ve bölgedeki dağılımı Şekil 5'de görülmektedir.

Erzincan İli metalik madenler, özellikle krom yatakları bakımından oldukça zengindir. İlin batısındaki Tercan, kuzeybatısındaki Refahiye, güneybatısındaki İliç ve güneyindeki Kemah İlçelerinde krom kaynakları bulunmaktadır. İliç ve Kemaliye İlçelerinde demir, İliç, Kemaliye ve Çayırılı İlçelerinde ise manganez kaynakları bulunmaktadır. Ormanlık alanlar ise aşağıda mevcut arazi kullanımı bölümünde irdelenmiştir.

Mevcut Arazi Kullanımı

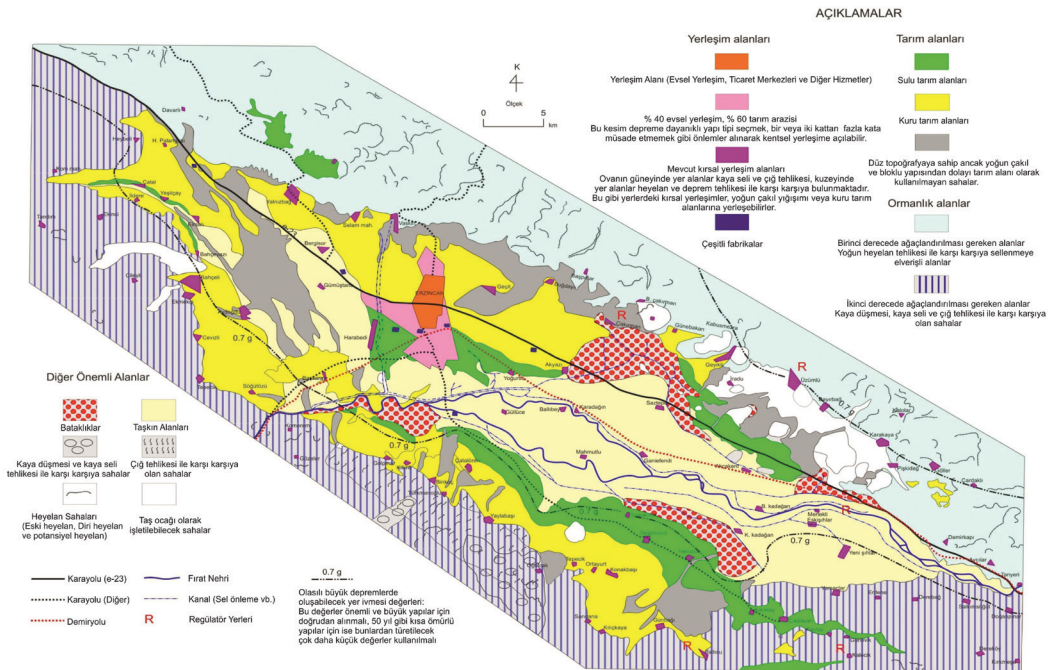
Erzincan Ovası ve dolaylı birlikte gözetilerek, mevcut arazi kullanım biçimlerinin alansal dağılımı Şekil 6'da sunulmuştur. Buna göre Erzincan ilinin yakın dolaylı ormanlık alanlardan ve ikinci dereceden ağaçlandırılması gereken alanlardan oluşmaktadır. İl merkezine yakın yerlerde kuru tarım alanları, sulu tarım alanları yaygın olarak görülmektedir. Ova'nın ortasından Fırat Nehri geçtiğinden bu nehre yakın yerleşim yerleri taşkın tehlikesi altındadır. Ayrıca ovanın çeşitli yerlerinde sazlıklar görülmektedir. Ancak bu sazlıkların korunmasına karşın hiçbir önlem alınmadığından sazlıklar, kuruma tehdidi ile karşı karşıyadır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2012) tarafından güncelleştirilen iller bazındaki çevre durum raporuna bakıldığında, Erzincan için hava ve su kaynakları kalitesi, atık sorunu, tabiat varlıkları ile doğa ve biyo-çeşitliliğin korunması, arazi kullanımı ve yapılan denetimler görülebilir. Mevcut verilere göre Erzincan ili sınırları içinde yer alan arazinin %17'si tarım, %9 orman ve fundalık, %38 çayır ve mera, %36 tarım dışı alan olarak kullanılmaktadır (Erzincan Valiliği, 2011). Yerleşim, tarım, orman ve diğer alanlarının dağılımı Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 5. Erzincan İli maden yatakları haritası (MTA, 2012b).

Figure 5. Mineral deposits map of the Erzincan Province (MTA, 2012b).



Şekil 6. Erzincan Ovası ve dolayının arazi kullanım potansiyel haritası (Aktimur vd., 1988'den).

Figure 6. Land-use potential map of the Erzincan Plain and surroundings (After Aktimur et al., 1988).

İstatistiksel verilere göre, arazi kullanım değişikliği en çok tarımsal alanların azalmasına yol açmıştır. Bunun başlıca nedeni, tarım arazilerinde yeni yerleşim birimlerine açılmasıdır. Özellikle son 20 yıl içinde İmar Yasası'nda değişiklikler yapılmış ve 1. Sınıf tarım alanları çeşitli amaçlarla kamulaştırılmış olup, iskâna açılmıştır.

İl bazında hava kirliliğinin daha çok ısınmadan ve trafikten kaynaklanan emisyonlardan oluştuğu ve yapılan ölçümlere göre SO₂ ve partikül maddeden kaynaklanan kirlenmelerin yönetmeliklerde tanımlanan sınır değerlerini aşmadığı söylenebilir (Erzincan Valiliği, 2011). Son yıllarda yenilenebilir enerjiye yönelik çabaların yanı sıra ağaçlandırma çalışmalarının yapılması olumlu gelişmelerdir. Hidrojeoloji kısmında değinilmişti ve bu başlıkla ilişkisi bulunmamaktadır. Erzincan il merkezinde kanalizasyon şebekesi atık su arıtma tesislerine bağlanmıştır. Tarımsal faaliyetler için sulamada yüzeysel sulama sistemleri kullanılmaktadır. Atık miktarı günlük ortalama 1.40 kg/kişi/gün olarak hesap edilmiştir. Evsel nitelikli atıklar Terzi baba mevki dolayında vahşi depolama alanında uzaklaştırılmaktadır (Erzincan Valiliği, 2011). Erzincan'da tehlikeli atıklar ise lisanslı araçlarla Atık Geri Kazanım ve depolama tesislerine gönderilmektedir.

ERZİNCAN OVASI'NIN ÇEVRE JEOLOJİSİ

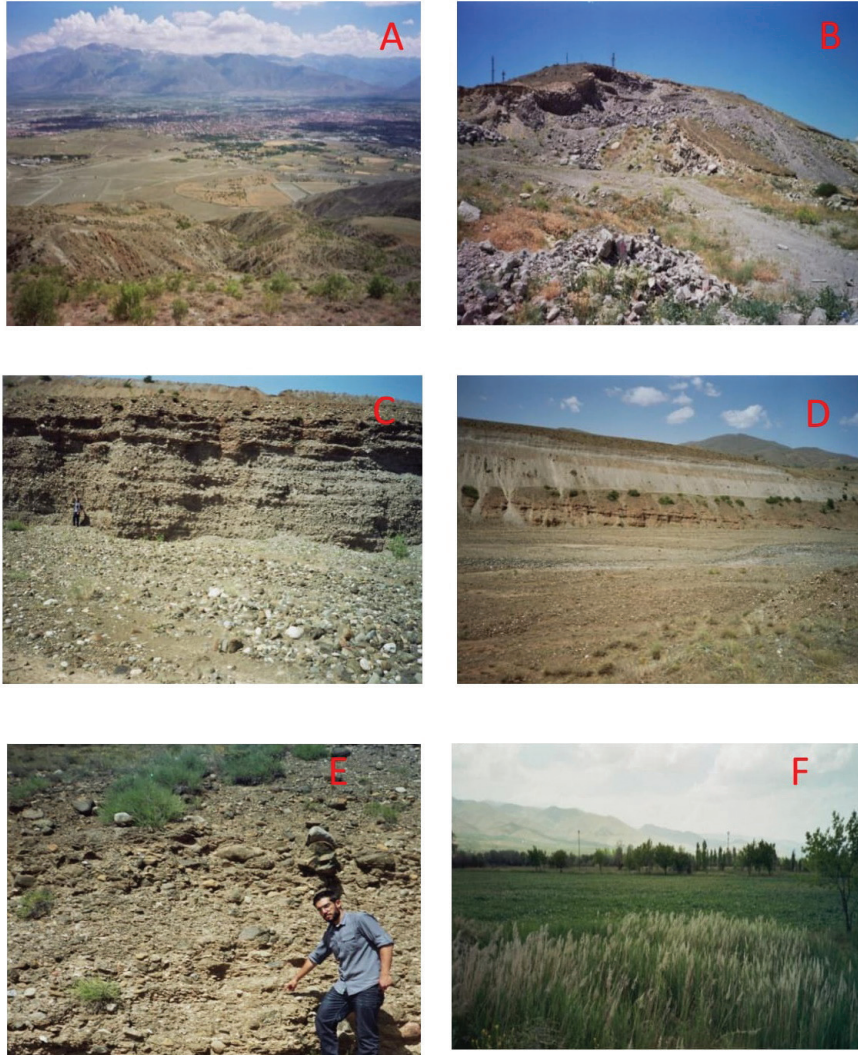
Yukarıda sunulan mevcut duruma dair çerçeve gözetilerek Erzincan ovası ve yakın dolayının çevresel sistemleri ve çevresel birimleri tanımlanmıştır. Çevresel sistemlerin yalınlaştırılmış haritası Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 7'de görüldüğü gibi, Erzincan Ova Sistemi ile Ergan Dağı Sistemi birlikte, yer yer İnsan

Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem tarafından değişime uğramıştır. Dolayısıyla bu örtüşmeyi aşmak üzere, İnsan Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem, kendi özelinde değişimi karakterize eden simgelerle ayrıştırılmıştır. Çizelge 1'de ise çevresel sistemler ve her çevresel sisteme ait çevresel birimler yer almaktadır. Sistemlerin adlandırılması, sistemin egemen olarak bulunduğu yerin coğrafik adı ve yapısı gözetilerek yapılmıştır. Çevresel birimler ise kaya türü özelliklerinin benzerliği, çevresel açıdan işlevi ve mevcut arazi kullanım biçimi gözetilerek tanımlanmaktadır. Ayrıntılı çevre jeolojisi haritası da Şekil 8'de sunulmuştur. Çevresel sistemler aşağıdaki sıra gözetilerek ele alınmıştır:

- 1) Erzincan Ova Sistemi,
- 2) Ergan Dağı Sistemi,
- 3) İnsan Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem.

Erzincan Ova Sistemi

Bu sistem, ağırlıklı olarak Erzincan havzasının çökel dolgusu ve dolguyu besleyen yapılarla temsil edilmektedir. Başlıca birimler genç volkanitler, traverten, havza dolgusu (Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşta kırıntılı kayalardan yapılı olup, kendi içinde tane boyutlarına göre alt bölümlere ayrılabilir), alüvyon yelpazeleri (Akarsu ve derelerin ovaya kavuştuğu yerler), sazlıklar, kaynaklar ve akarsularla temsil edilmektedir. Sistemi karakterize eden birimlere dair bazı görüntüler Şekil 9'da görülmektedir. Söz konusu birimler, başlıca yamaç eğimi, bitki örtüsü, toprak kalınlığı, gercin (yani kayanın) türü ve günümüzdeki arazi kullanım biçimleri yönü ile incelenmiştir (Çizelge 2).



Şekil 9. Erzincan Ova Sistemi'nde yer alan çevresel birimlerden bazı görüntüler (A, Erzincan'ın kuzeyinden güneye doğru bir bakış, Ova'nın genel görünümü; B, Erzincan'ın kuzey kesimi, Üzümlü ilçesi dolaylı andezit-dasit bileşimli Pliyosen yaşta genç volkanitler; C, Heybeli-Davarlı arası, Erzincan Ovası havza dolgusundan bir görüntü, iri taneli kırıntılı kayalar (Çakıltaşı); D, Heybeli-Davarlı arası, Erzincan Ovası havza dolgusundan bir görüntü, orta ve ince taneli kırıntılı kayalar (Kumtaşı ve kiltaşı aralanması); E, Heybeli-Davarlı arası, Erzincan Ovası havza dolgusundan bir görüntü, iri taneli kırıntılı kayaların (Çakıltaşının) yakından görünümü; F, Beşsaray dolaylı, Yukarı Fırat'a yakın sazlık bir alan).

Figure 9. Views from environmental units in the Erzincan Plain System (A, A view from the north of Erzincan to the south, the general view of the plain; B, Young volcanics of andesite-dacite composition of Pliocene age, to the northern part of Erzincan around Üzümlü district; C, A view from Erzincan Plain basin fill, the coarse-grained clastic rocks (Conglomerate) between Heybeli-Davarlı villages; D, A view from Erzincan Plain basin fill, medium to fine-grained clastic rocks (Sandstone and claystone alternation) between Heybeli-Davarlı villages; E, A close view from coarse clastic rocks (Conglomerate), from Erzincan Plain basin fill, between Heybeli-Davarlı villages; F, A morass area, near the Upper Euphrates around Beşsaray village).

Çizelge 1. Erzincan ovası ve dolayının çevresel sistemleri ve çevresel birimleri.

Table 1. Environmental systems and environmental units of the Erzincan Plain and surroundings.

1- Erzincan Ova Sistemi (Erzincan Plain System):	
	Genç volkanitler
	Traverten
	Havza dolgusu (Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşta kırıntılı kayalar).
	İri taneli moloz ve çakıldaşı
	Orta taneli kırıntılı kayalar (Ağırlıklı olarak kumtaşı).
	İnce taneli kayalar (Kiltaşı, silttaşı, çamurtaşı).
	Alüvyon yelpazeleri (Akarsu ve derelerin ovaya kavuştuğu yerler)
	Sazlıklar
	Kaynaklar
	Akarsular
	Taşkın alanı
2- Ergandağı Sistemi (Ergan Mountain System):	
	Metamorfik kayalar (Şist, gnays, metavolkanit, serizitşist, kalkşist, mermer).
	Masif kireçtaşı (Munzur kireçtaşı).
	Resifalkireçtaşı (Sığ denizel ortamın ürünü kırıntılı yer yer marnlı orta ve kalın katmalı kireçtaşı).
	Pelajik kireçtaşı (İnce kırıntılı pelajik fosiller içeren ve ince katmanlı kireçtaşı).
	Ofiyolitler (Ağırlıklı olarak serpantinleşmiş peridotit).
	Ofiyolitli karışık yer yer olistostromal kırıntılı kayalar
	Kırıntılı kayalar (Çakıldaşı, kumtaşı, kiltaşı ve şeyl ardalaması).
	Volkanitler ve volkano-tortul dizi (Andezit, bazalt ve yer yer dasit bileşimli volkanitler ve epi-piroklastik kayalar egemen).
	Evaporitler (Jips, anhidrit ve diğerleri)
3- İnsan Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem (Man-made or Antropogenic system):	
	Tarım yapılan yerler (Ova ve yamaç üstü düzlükler, teraslar)
	Taş ve maden ocakları (Mermer, kireçtaşı, kum ve maden ocakları)
	Deponi alanları
	Baraj ve göletler
	Karayolları
	Demiryolları
	Dinlenme yerleri (Girlevik Şelalesi ve Ekşisu Sazlığı)
	Ormanlaştırma çalışması yürütülen yerler
	Yerleşim yerleri

Ergan Dağı Sistemi

Bu sistem genel olarak Erzincan Ovası ve ovanın yakın dolayında yüzeyleyen kayatürü toplulukları ile temsil edilmektedir. Çevresel birimler, jeolojik yaşları dikkate alınmadan, yöreye özgü kayatürlerinin benzer özellikleri gözetilerek tanımlanmıştır. Söz konusu birimler, metamorfik kayalar, masif kireçtaşı, resifal katmanlı kireçtaşı, pelajik kireçtaşı, ofiyolitler, ofiyolitli karışık, kırıntılı kayalar, volkanitler ve volkanotortul dizive evaporitler olarak tanımlanmıştır (Çizelge 2). Sisteme dair bazı görüntüler Şekil 10'da sunulmuştur. Ayrıca bu birimler de yamaç eğimi, bitki örtüsü, toprak kalınlığı, gercin (yani kayanın) türü ve günümüzdeki arazi kullanım biçimleri yönü ile incelenmiştir.

İnsan Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem

Bu sistem, tümüyle insan faaliyetleri ile değişime uğramış, mevcut arazi kullanım biçimleri gözetilerek tanımlanmıştır. Sistem başlıca tarım yapılan yerler (ova ve yamaç üstü düzlükler ve teraslar dâhil), taş ve maden ocakları (mermer, kireçtaşı, kum ve maden ocakları), deponi alanları, baraj ve göletler, karayolları, demiryolları, dinlenme amaçlı yerler ve ormanlaştırma çalışmalarının yürütüldüğü yerlerle temsil edilmektedir. Sisteme dair bazı görüntüler Şekil 11'de görülmektedir. Bu sistemi temsil eden birimlerin genel özellikleri Çizelge 1'de, birimlerin genel özellikleri, başlıca yamaç eğimi, bitki örtüsü, toprak kalınlığı, gercin (yani kayanın) türü ve günümüzdeki arazi kullanım biçimleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

ERZİNCAN OVASI'NIN ARAZİ YETENEK DEĞERLENDİRMESİ

Arazi yetenek değerlendirmesi için temel jeolojik özelliklerin ve jeolojik birimlerin hidrojeolojik davranışlarının yanı sıra bu birimlerin jeoteknik- mühendislik özelliklerinin ve yöreye özgü doğa kaynaklı risklerin göz önüne alınması zorunludur. Yukarıda mevcut duruma dair bilgiler sunulmuştur. Bu bölümde ise bölgeye ait çevresel birimlerin jeoteknik- mühendislik özellikleriyle doğa kaynaklı risklere dair bilgiler (Çizelge 3) irdelendikten sonra, tüm veriler kullanarak arazi yetenek değerlendirmesi (Çizelge 4) hazırlanmıştır.

İndeks Özellikler ve Doğa Kaynaklı Riskler

Mühendislik jeolojisi haritaları hazırlanırken, jeoteknik-mühendislik verilerinin üretilmesi, proje özelinde ve projenin doğasına uygun testlerin yapılmasını gerektirmektedir. Erzincan yöresinde ve aynı kuşakta yer alan tüm jeolojik birimlerin jeoteknik-mühendislik özellikleri, yüksek, orta ve düşük değerleri tanımlanmıştır (Aktimur vd., 1988).

Çevre jeolojisi haritaları için ise öncelikle çevresel sistemlerin ve çevresel birimlerin tanımlanması ve jeolojik birimlerin çevresel bir sistem içinde yer alan çevresel birimlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Sunulan çevresel sistemlerle, çevresel birimlerde yer alan kaya türlerinin bazı indeks özellikleri de Kayseri yöresinde Kılıçdağı vd. (1999), Sivas yöresinde Avcı vd. (1997a ve b) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalarda, tüm birimlerin Sonik hız değerleri, tek nokta yükleme değerleri, elastik deformasyon modülü, tek eksenli sıkıştırma dayanımı, tanjant young modülü gibi özellikleri tanımlanmıştır. Öte yandan ISRM (1981), Ulusay'ın (2010) ve Yılmaz'ın (2009) arazi gözlemleri için önerdikleri hususlar da değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Çevresel sistemlerde yer alan çevresel birimlerin genel özellikleri.

Table 2. General characteristic features of the environmental units in the environmental systems.

	Birimler	Yamaç eğimi (Derece olarak)	Bitki örtüsü	Toprak kalınlığı	Gerecin türü	Günümüz arazi kullanımı
Erzincan Ova Sistemi	Genç volkanitler	0-20	Seyrek çeşitli ağaçlar	İnce	Andezit, bazalt, dasit	Ocak işletmesi
	Traverten	0-10	Otsu bitkiler	-	Karbonatik kayatürü	Ocak işletmesi
	Havza dolgusu - İri taneli	-	-	-	-	-
	-Orta -ince taneli	0-5	Otsu bitkiler Ekin "	Orta Kalın	Çakıltaşı Kumtaşı kıltaşı	Mera, tarım Tarım
	Alüvyon yelpazeleri	0-5	Çimen	Kalın	İri+ ince taneli	Mera
	Sazlıklar	0-3	Sazlık	Kalın	Kum, kil, silt	Dinlenme
	Kaynaklar	-	Kavak	-	-	Sulama
	Akarsular	0-05	"	-	-	Sulama
	Taşkın alanı	0-10	Seyrek çeşitli ağaçlar	Orta	Yelpaze çökelleri	Mera
Ergan Dağı Sistemi	Metamorfik kayalar	10-45	"	İnce	Şist, gnays, metavolkanit	Dinlenme, avcılık
	Masif kireçtaşı	10-45	"	İnce	Kireçtaşı	"
	Resifal kireçtaşı	0-30	"	İnce	"	"
	Pelajik kireçtaşı	0-20	"	Orta	"	"
	Ofiyolitler	0-35	"	İnce	Peridotit	"
	Ofiyolitli karışık	0-30	"	İnce	Çeşitli	"
	Kırıntılı kayalar	0-45	"	Orta	Kayatürleri	"
	Volkanitler	0-35	"	"	Andezit	"
Evaporitler	0-25	"	"	Jips	"	
İnsan Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem	Tarım yapılan yerler	0-05	Ekili alan	Kalın	Toprak	Çiftçilik, tarım
	Taş ve maden ocakları	-	-	İnce	-	Ocak işletmesi
	Deponi alanları	0-02	Otsu bitkiler	-	Alüvyon	Çöp depolama yeri
	Baraj ve göletler	-	Yeşilalan	Orta	-	HES, Sulama
	Karayolları	-	-	-	-	Ulaşım
	Demiryolları	-	-	-	-	Ulaşım
	Dinlenme yerleri	-	Çeşitli ağaçlar	-	-	Dinlenme
	Ormanlar	-	"	Kalın-Orta	-	Turizm Konaklama
Yerleşim yerleri	-	"	"	Çeşitli	Turizm	



Şekil 10. Ergan Dağı Sistemi'nin birimlerinden bazı görüntüler (A, Üzümlü ilçesi kuzeyi metamorfik kayalar (metavolcano-tortul dizi); B, Yalınca köyünden Mercan dağına bakış, Munzur kireçtaşı ve üzerinde tektonik bir dokanakla yer alan ofiyolitler (Serpantinleşmiş peridotit); C, Çilhoruz batısı, Jura-Alt Kretase yaşta katmanlı kireçtaşı; D, Sürekköy dolay, Oligo-Miyosen yaşta morumsu çakıltaşı altta, gri orta-ince taneli kıvrımlı kayatürleri üstte; E, Sürekköy dolay, Oligo-Miyosen yaşta orta-ince taneli kırıntılı kayaların yakından görünümü; F, Gözedağı yöresi, Mecidiye köyü Oligo-Miyosen yaşta kırıntılı karasal istif .

Figure 10. Views from environmental units in the Ergandağ System. (A, Metamorphic rocks (metavolcano-sedimentary sequence) to the north of Üzümlü district); B, A view from Munzur limestone and obducted ophiolites (serpentinized peridotite) along the Mercan Mountain near Yalınca village; C, Jurassic-Lower Cretaceous layered limestone, to the west of Çilhoruz village; D, Purplish conglomerate in Oligo-Miocene age in the lower level, gray medium-fine-grained folded rock types in the upper level, to the west of Çilhoruz; E, A close view from medium-fine-grained clastic rocks of Oligo-Miocene age, around Sürekköy; F, Oligo-Miocene clastic continental sequence, around Mecidiye village, in the Gözedağı region.



Şekil 11. İnsan Eliyle Değişime Uğramış (Antropojenik) Sistem'in bazı birimlerine ait görüntüler (A, Yalınca köyünden güneye bakış, Ova'da tarım yapılan alan); B, Girlevik köyü dolay, dinlenme amaçlı duyarlı alanlar kapsamında yer alan Girlevik Şelalesi'nin yakından görünümü; C, Girlevik köyü girişi yapılan ve yapılmakta olan TOKİ inşaatında bir görüntü; D, Çatalören köyü kuzeyi, Erzincan deponi alanından genel bir görüntü; E, Erzincan Çatalarmut baraj gövdesi ve dolu-savakın görünümü ile yakın dolayındaki atıklar; F, Erzincan Çatalarmut barajının göl alanı.

Figure 11. Views from Environmental Units in the Antropogenical System. (A, A view from Yalınca village to the the south, an agricultural area in the Plain); B, A close view from the Girlevik waterfall, which is located within the scope of sensitive recreation areas, around Girlevik village; C, A view from TOKI construction area, in the entry of the Girlevik village, where still being construction; D, A general view from the Erzincan landfill, to the north of Çatalören village; E, Views from the Erzincan Çatalarmut dam body and spillway and also wastes in its immediate vicinity; F, Reservoir area of the Erzincan Çatalarmut dam.

Çizelge 3. Çevresel sistemler ve bu sistemlerde yer alan çevresel birimlerin jeoteknik- mühendislik özellikleri ve etkin olan doğa kaynaklı yer süreçleri.

Table 3. Geotechnical-engineering properties of the environmental units in the Environmental systems and active natural earth processes.

Sistemler	Birimler	Dayanımılık	Gözeneklilik	Kazılabilirlik	Büzülme- şişme potansiyeli	Depremsellik	Heyelan	Erozyon potansiyeli	Sel ve taşkın	Taşıma kapasitesi
Erzincan Ova Sistemi	Genç volkanitler	Orta	Düşük	Orta	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
	Traverten	Orta	Orta	Düşük	"	Düşük	"	"	"	"
	Havza dolgusu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	- İri taneli	Orta	Yüksek	Orta	Düşük	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta
	- Orta	Orta	Orta	"	Orta	"	"	"	"	"
	- İnce taneli	Düşük	Düşük	"	Yüksek	"	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük
	Alüvyon yelpazeleri	"	Yüksek	"	Düşük	"	Orta	Orta	Yüksek	"
	Sazlıklar	-	-	-	-	-	Düşük	Düşük	"	"
	Kaynaklar	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Akarsular	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Taşkın alanı	-	Orta	Yüksek	-	-	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	
Ergani Dağı Sistemi	Metamorfik kayalar	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
	Massif kireçtaşı	"	"	"	"	"	Orta	Orta	"	"
	Katmanlı kireçtaşı	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	Pelajik kireçtaşı	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	Ofiyolitler	Orta	Düşük	"	"	"	"	"	"	"
	Ofiyolitli karışık	Orta	Orta	Orta	"	Orta	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
	Kırıntılı kayalar	Düşük	"	"	Yüksek	"	Orta	Orta	Orta	"
	Volkanitler	Yüksek	"	Düşük	Düşük	"	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
	Gipsli dizi	Düşük	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
İnsan Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem	Tarım yapılan yerler	"	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Düşük	Orta	"	Orta
	Taş ve maden ocakları	-	Orta	-	Orta	"	-	-	"	-
	Deponi alanları	-	-	-	Yüksek	-	-	-	-	Düşük
	Baraj ve göletler	Düşük	Orta	Orta	-	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	"
	Demiryolları	-	-	-	-	-	-	-	Orta	-
	Karayolları	-	-	-	-	-	-	-	Orta	-
	Dinlenme yerleri	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ormanlar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Yerleşim yerleri	-	-	-	-	-	-	-	Orta	-	

Çizelge 4’de çevresel açıdan sorunlu birimler için □, doğa kaynaklı riskler açısından sorunlu birimler için O, faaliyetlerin türü için uygun olmayan birimler için Δ, faaliyetlerin türü için uygun yerler için X ve değerlendirme yapılamayan birimler için de (-) sembolleri kullanılmıştır. Sunulan bu değerlendirme, İnsan Faaliyetleri Sonucu Değişime Uğramış Sistem’de yer alan faaliyetlerle, değerlendirmeye alınan faaliyetler örtüşmekte olduğu durumlar için de geçerlidir.

Ayrıntılı testlerin değerlendirildiği mühendislik jeolojisi haritalarında, mühendislik ya da indeks özelliklerin sınıflandırılmasında genel olarak en düşük, düşük, orta, yüksek, en yüksek karşılığı bir sınıflama kullanılmaktadır. Ancak, bölgesel çevre jeolojisi haritalarında, daha geniş alanlara dair yorumlama gereksinimi için, söz konusu değerlerinin kullanımında, olabildiğince risk oranını azaltmak için düşük, orta ve yüksek gibi değerlerin kullanılması tercih edilmektedir. Buna göre, örneğin dayanımlılık için MPa (10 kgf/cm²) yaklaşık olarak 30’dan küçük ise düşük, 30-110 arası orta, 110’dan büyük ise yüksek olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde gözeneklilik için indeks değeri %30’dan fazla ise yüksek, %5-30 arası orta, %5’den az ise düşük değerler; büzülme-şişme için ise %35’den büyük ise yüksek, %20-35 ise orta, %20’den az ise düşük karşılığı değerler kullanılmıştır. Diğer değerlendirmeler için de benzer bir yöntem izlenmiştir. Ancak, herhangi bir tesisin ayrıntılı yer seçimi özelinde yapılacak değerlendirmede, mutlaka yere özgü testlerin yapılması ve mühendislik jeolojisi haritalarında öngörülen sınıflamaların kullanılması tercih edilmelidir.

Boz (2015), yukarıda sunulan kaynaklarda yer alan verileri, yapılan saha çalışmasındaki gözlemleriyle birleştirerek Erzincan ovası ve yakın dolay için tanımlanan çevresel sistemlerin birimlerine uyarlamıştır. Çizelge 3’de Erzincan

ovası ve yakın dolayında ayırt edilen çevresel birimlerin bazı jeoteknik özellikleri ve bölgede etkin olan doğa kaynaklı riskler açısından yapılan değerlendirme görülmektedir.

Çevresel Sistemlerin Arazi Yetenek Değerlendirmesi

Erzincan ovası ve dolayını temsil eden çevresel birimlerin indeks özellikleri ve yerel doğa kaynaklı riskler de gözetilerek çevresel birimlerin çeşitli arazi kullanım biçimleri açısından değerlendirilmesinde yarar vardır. Aktimur vd. (1988) tarafından incelenen jeoteknik - mühendislik özelliklerinin yerli-yerinde (in-situ) geçerli olduğunu göz ardı etmeden, bu testlerde varılan sonuçları arazi gözlemleriyle birleştirilerek çevresel birimlerin durumunu değerlendirmiştir. Değerlendirmede yukarıda yapılan açıklama ışığında Düşük, Orta ve Yüksek değerleri kullanılmıştır. Değerlendirme yapılamayan birimler için – işareti kullanılmıştır. Bu değerlendirme çevresel sistemleri içeren birimlerin ön arazi kullanımı açısından uygunluğu test edilmiştir. Sunulan arazi yetenek değerlendirme matrisi Çizelge 4’de görülmektedir. Bu matris çevresel açıdan sorunlu yerleri, doğa kaynaklı afetler açısından riskli yerleri ayırdığı gibi, her faaliyet için uygun olan ya da uygun olmayan yerleri ve değerlendirmenin yapılamadığı alanları da göstermektedir.

Sunulan çalışmada, jeolojik birimler, önce çevresel birimlere dönüştürülmüştür. Bunun için jeolojik birimlerin birbirine yakın jeoteknik-mühendislik değerleri gözetilerek, bu birimler, aynı çevresel birim adı altında birleştirilmiştir. Buna göre, örneğin, Miyosen yaşta olan kırıntılı kayalar ile Jura yaşta olan kırıntılı kayalar, aynı değerlere sahip olmasa bile birbirine yakın değerlere sahip olmaları nedeniyle, aynı çevresel birimi temsil etmektedir.

Çevre jeolojisi haritalarından azami ölçüde yararlanabilmek için, üretilen haritaların ve oluşturulan matrislerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Şekil 8’de tanımlanan çevresel birimler; bu birimlerin doğa kaynaklı riskler açısından değerlendirmeleri de Çizelge 3’de sunulan matriste görülmektedir. Örneğin, Çizelge 3’de Ergan Dağı Sistemi’nde yer alan metamorfik kayalar biriminde heyelan riski düşük, kırıntılı kayalarda ise orta düzeydedir. Şekil 8’de ise bu çevresel birimlerin yayılımı yer almaktadır. Belirlenen heyelanların ve doğa kaynaklı diğer risklerin yerel konumları ise Şekil 4’de sunulmuştur.

Çizelge 4’de ise çevresel birimlerin çeşitli faaliyetler açısından değerlendirilmesini yansıtan bir matris sunulmuştur. Bu matris ise, çevresel sistemlerin tanımlanan birimleriyle arazi kullanım biçimleri arasındaki ilişkiler irdelenmiştir. Örneğin, Erzincan Ova Sisteminde volkanitler birimi madencilik; havza dolgusunu temsil eden iri, orta ve ince taneli kırıntılı birim ise tarım açısından bir potansiyel taşımakta olup X ile temsil edilmektedir. Bu birimlerin yayılımı ise Şekil 8’de görülmektedir. Arazi kullanım potansiyel haritası ise özel olarak Şekil 6’da sunulmuştur.

ERZİNCAN OVASI VE DOLAYININ GELECEĞE YÖNELİK BÖLGESEL PLANLAMASI

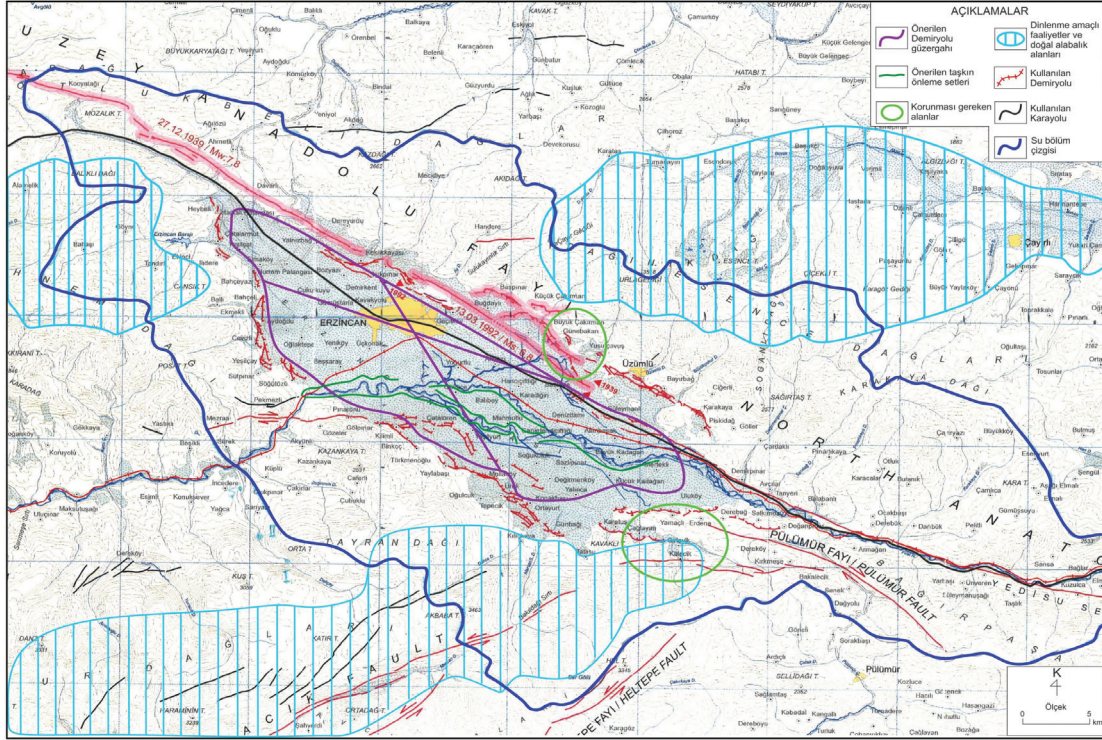
Erzincan Ovası ve yakın dolayını içine alan bölgenin mevcut durumuna bakıldığında, bölgenin kayda değer doğal kaynaklara sahip olduğu, ancak doğa kaynaklı risklerin de tehdidi altında olduğu açıkça görülür. Böyle bir bölgede geleceğe yönelik bir planlama yapmanın güçlükleri göz ardı edilemez. Aşağıda, yörenin

tüm çevresel özellikleri gözetilerek sadece bazı hususların dikkate alınmasında yarar görülmektedir. Söz konusu hususlar, Şekil 12’de sunulmuştur.

Erzincan Ovası’nı bir bütün olarak kuşatan ve ulaşım açısından büyük kolaylıklar sağlayan raylı bir sistem öncelikli bir öneridir. Genel olarak güzergâhı izlenen raylı sistem (yani yeni bir demiryolu) ile Ova’nın çevresindeki köylerin kendi arasında ve bu köylerin kent merkeziyle ulaşımını sağlarken, günümüzde çeşitli vasıtalarla yapılan ulaşım şekline de son verecektir. Böyle bir uygulama, tarım arazilerinin korunmasına ve fosil yakıtlar nedeniyle oluşan hava kirliliğinin önlenmesine katkı sağlayacaktır. Halk istediği yere ulaşma hususunda bir sıkıntı yaşamayacağı gibi, tarlalarında tarım yaparken, çalışacağı yerlere yakın yeni evlere de ihtiyaç duymayacaktır.

Erzincan Ovası, yapılan tüm değerlendirmelere göre sel ve taşkın tehdidi altındadır. 50 ya da 100 yılda bir gelmesi olası sel ve taşkınların ovanın büyük bir bölümünü etkilemesi muhtemeldir. Dolayısıyla, Yukarı Fırat nehrinin Ova’ya kavuşan kollarının kenar kısımlarına kapsamlı bir şekilde setler yapılarak bölgedeki yerleşim yerlerinin ve tarım alanlarının sel ve taşkın tehlikesinin denetimi önemli ölçüde kontrol altına alınabilir.

Erzincan ilinde korunması gereken iki önemli alan vardır. Bu alanlardan ilki Girlevik Şelalesi, diğeri de Ekşisu Sazlığı’dır (Şekil 8). Bu alanların hem sel ve taşkın açısından yüksek risk (Çizelge 3; Erzincan Ova Sistemi, Sazlıklar Birimi), hem de insan faaliyetlerinin tehdidi altında olduğu ve mutlaka korunma altına alınmaları gerekmektedir. Aksi takdirde her iki alan yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalacaktır.



Şekil 12. Erzincan Ovası ve dolayının yeniden planlanmasında gözetilmesi gereken yeni öneriler.

Figure 12. Some suggestions for new planning of the Erzincan Plain and surroundings.

Girlevik Şelalesi, Ova'nın güneydoğusunda, Munzur dağları'nın Ova'ya kavuştuğu yerde bulunmaktadır. Munzur Kireçtaşları, şelaleyi oluşturan akarsuların akiferi durumundadır. Ancak bölge halen TOKİ'nin gözetiminde yerleşime açılmış durumdadır. Şelaleye oldukça yakın yerlerde konutların yapımı devam etmektedir. Bu konutların su gereksinimi elbette ya bölgenin yer altı sularından ya da şelaleyi oluşturan sulardan karşılanacaktır. Her iki durumda konutların gereksinimi karşılanırken Şelalenin gelişimi ve seyri etkilenecektir. Dolayısıyla bu bölgede geleceğe yönelik bazı sınırlamaların getirilmesi zorunludur. Bu bölgede su miktarı azalmış olup buna bağlı olarak traverten oluşumu daha önceki dönemlere göre daha yavaştır. Bunun bir nedeni de meteorolojik koşullar da olabilir.

Ekşisu Sazlığı ise Ova'nın kuzeyinde ve Üzümlü ilçesinin batısında yer almaktadır. Bu bölge aynı zamanda termal amaçla değerlendirilmektedir. Kuzey Anadolu Fayı boyunca oldukça genç volkanitler yer almaktadır. Bu volkanitler olasılıkla bu termal kaynağın ısıtıcısı durumundadır. Yani, bu termal kaynak doğal olarak uzun süre etkinliğini koruyacaktır. Böyle bir durumda Ekşisu Sazlığı'nın uzun ve verimli bir planlamaya gereksinimi vardır. Bölgenin yeniden elden geçirilmesi ve daha etkin bir çekim merkezi haline getirilmesi mümkündür. Bunun için öncelikle Ekşisu Sazlığı'nın yasal bir güvenceye kavuşturulması gerekmektedir.

Ayrıca, Erzincan Ovası'nın kuzeydoğusunda Esence Dağı, güneyinde ve güneybatısında Munzur Dağları ve Ergan Dağı ile batısında

Köhnem Dağı oldukça yüksek ve dağ turizminin yapılabileceği önemli yerlerdir. Bu bölgeler, kar yağışının yoğun olduğu kış dönemlerinde kayak merkezlerini inşa ederek değerlendirilebilir. Esence dağlarının kuzey yamaçlarında ve yüksek yerlerde Temmuz ayında da kar eksik olmaz. Ayrıca bu yüksek alanlardan Fırat nehrine akan tertemiz akarsularda doğal alabalığın yanı sıra bölgeye özgü çeşitli saz balık türleri de yaşamaktadır. Dolayısıyla bu alanlar, dinlenme amaçlı ve olta ile alabalık avcılığı için uygun alanlardır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölgede pek çok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar bölgenin anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Çalışma alanının 1/50.000 ölçekli jeolojik ve mühendislik jeolojisi, mühendislik özellikleri bakımından toprak sınıflaması ve hafriyat koşulları tanımlanmıştır. Ayrıca uygulamalı jeomorfoloji, uygulamalı eğim haritaları, hidrojeoloji, su kaynakları, sismik risk, toprak ve arazi kullanım potansiyeli haritalarına dair çeşitli çalışmalar yapılmıştır (DSİ, 1981, 2010; Aktimur vd., 1988, MTA, 2003, 2012a; Boz, 2015).

Bu çalışmalar sonucunda yöreye dair mevcut durum tanımlanmıştır. Bu çerçevede Erzincan Ovasındaki çevresel sorunları iki gruba ayırarak irdelemekte yarar vardır.

Birinci grupta yer alan sorunlar doğa kaynaklı risklerdir. Bu riskler, özellikle deprem, heyelan, çığ, sel ve taşkın gibi doğal risklerin tehdidi altında olan bir yörede yer almaktadır. Örneğin Erzincan, tarihi boyunca çeşitli büyüklüklerde depremlere sahne olmuştur. Özellikle, 1939 ve 1992 yıllarında meydana gelen depremler, insanlar ve yapılar üzerinde önemli derecede can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Yapılacak

planlamaların böylesine riskli bir alanda olduğu göz ardı edilmemelidir.

İkinci grupta ise insan faaliyetleri sonucu meydana gelen çevresel sorunlardır. Bunlar, toprak, su, hava kirliliği, katı atıklardan ileri gelen kirlilikler, hassas yörede meydana gelen çevre sorunlarıdır. Erzincan'daki hava kirliliğinin en önemli kaynağı evsel ısınma ve trafiktir. Bunu madencilik, küçük sanayi gibi faaliyetler izlemektedir. Yüzeysel suları (Karasu Nehri, Köroğlu Deresi) 2. Sınıf kaliteye sahiptir. Bu suların kirlenme nedenleri evsel atık sular, evsel katı atıklar, sanayi atıkları ve tarımsal faaliyetlerdir. Erzincan'da toprak kirliliğine neden olan başlıca etmen aşırı yapay gübre kullanımıdır. Bunu, aşırı tarım ilacı kullanımı, bilinçsiz sulama, plansız kentleşme, vahşi depolanan evsel katı atıklar ve sanayi atıklarının yarattığı kirlilikler izler. Öte yandan Ekşisu Sazlığı ve Girlevik Şelalesi insan faaliyetlerinin tehdidi altında olan Erzincan'nın en duyarlı iki alanıdır.

Günümüzdeki arazi kullanım biçimleri gözden geçirildiğinde yörede yeni bir planlamaya gereksinim olduğu anlaşılmaktadır. Önerilen planlama esas alınır, çevresel sorunların büyük bir bölümü denetlenip, Erzincan Ovası ve dolayının korunması da mümkündür. Örneğin, katı atıklar için öngörülen yer, uygun değildir. Yöredeki kirlilikler nedeniyle, estetik görüntünün bozulması, yüzeysel ve yeraltı sularının kirlenmesi, kuş sürülerine olan olumsuz etkiler, koku sorunu, haşerelerin artması kaçınılmaz gibi görünmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012). Oysa Erzincan yöresinde deponi alanları için uygun olan geçirimsiz yerler vardır (Çizelge 4; Şekil 8). Ya da seçilen yerin, deponi alanı için gerekli tüm ölçütleri karşılayan bir alana dönüştürülmesi gerekir.

Ekşisu Sazlığı için alınması gereken önlemler şunlardır: Duyarlı alana deşarj edilen

/boşaltılan her türlü atığın bertaraf edilmesi ve çevre mevzuatına uygun olarak yeniden düzenlenmesinin sağlanması, ayrıca bölgede erozyonla mücadele çalışmalarının sürdürülmesi gerekir.

Girlevik Şelalesi için alınması gereken önlemler şunlardır: Bu bölgedeki su rejimlerinin denetlenerek kullanım altına alınması ve bölgenin mevcut durumunu gözeterek, kalıcı yasal çerçevenin oluşturulması ve bölgeye dair bilinçli bir ÇED çalışmasının yapılması gerekmektedir.

Doğa kaynaklı risklerin etkilerini azaltmak için birleşik doğal risk haritalarının ayrıntılı olarak oluşturulması gerekir. Deprem, heyelan, sel ve taşkın ile çığ haritalarını ayrı ayrı oluşturup bunların örtmeler yöntemi ile birleştirilmesi ve buna bağlı olarak en güvenli yerlerin tercih edilmesi esastır.

Erzincan Ovası'nın yeniden planlamasında gözetilmesi gereken yeni hususlar ise Şekil 12'de sunulmuştur. Bu öneriler gözetilirse, Ova'nın çevresini izleyen bir demiryolu ring sistemi öncelikli bir konudur. Bu sistem hava kirliliğinin önüne geçilmesinde büyük katkı sağlayacak ve halkın istediği şekilde istediği yere ulaşmasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca, Fırat nehrinin kenar kısımlarına setler yaparak, tarım ve yerleşim birimlerinin taşkın tehlikesi ortadan kaldırılabilir. Böylece koruma altına alınan alanlar, başka amaçlarla da kullanılabilir bir duruma gelmiş olacaktır. Ovanın kuzeydoğusu, güneybatısı ve batı bölümleri ise dinlenme amaçlı ve alabalık üreticiliği için uygun alanlardır.

KATKI BELİRTME

Yapılan çalışma, Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından M-551 kodu ile desteklenmiştir. Bu çerçevede, projemizi inceleyen, önerilerde bulunan ve onaylayan

yetkililere de teşekkür ederiz. Ayrıca, makalemizi emek vererek ve ayrıntılı bir şekilde inceleyerek katkıda bulunan editörlere teşekkür borçluyuz.

KAYNAKLAR

- Akpınar, Z., 2010. Erzincan havzasının tektonik gelişiminin Paleomanyetik yöntemlerle analizi. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Sivas, 170s.
- Aktimur, T., Tekirli, M. E., Yurdakul, M. E., 1988. Erzincan ve çevresinin arazi kullanım potansiyeli. MTA Derleme Rapor no. 8381, Ankara, 326s.
- Aktimur, T., Yurdakul, M. E., Sarıaslan, M., Mutlu, G., Keçer, M., Yıldırım, T., Akkuş, İ., 1995. Geology of Erzincan regional petrology of Quaternary volcanic rocks. Symposium on the Black Sea Region Eds. Erler et al., General Directorate of MTA, Ankara, 82-90.
- ANON, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and soil materials. IAEG Bulletin, 19, 364-371.
- Arpat, E., Şaroğlu, F., 1975. Türkiye'de bazı önemli genç tektonik olaylar. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 18/1, 91-101.
- Avcı, N., Kılıçdağı, R., Ayaz, M., 1997. Sivas kentinin çevre jeolojisi ve doğal kaynakları. MTA Orta Anadolu 1. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 169s.
- Barka, A., 1984. Erzincan Havzası'nın bazı neo-tektonik özellikleri. I. Ulusal Deprem Sempozyumu, Bildiriler kitabı, Erzurum, s. 223-247.
- Barka, A. A., Gülen, L., 1989. New constraints on the age and total offset of the North Anatolian Fault Zone: implications for tectonics of the Eastern Mediterranean Region. METU Journal of Pure Applied Science, 21, 39-63.
- Boz, D., 2015. Erzincan İli ve Dolayının Çevre Jeolojisi ve Geleceğe Yönelik Planlaması. TC Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi (Yayımlanmamış), Sivas, 109 s.

- Brown, L. F., Jr., Fisher, W. L., Erxleben, A. W., McGowen, J. H., 1971. Resource capability units, their utility in land-and water-use management with examples from the Texas Coastal Zone: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology Geological Circular, 71-1, 22p.
- Cendero, A., 1974. Environmental geology of the Santander Bay area, Northern Spain. *Environmental Geology*, 1, 97-114.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012. Türkiye çevre sorunları ve öncelikleri envanteri değerlendirme raporu, Ankara, 196s.
- Doornkamp, J. C., Brunnsden, D., Cooke, R. U., Jones, David K. C., Griffiths, J. S., 1987. Environmental geology mapping: an international review. Geological Society Engineering Geology Special Publication, 4. s. 215-219. ISSN 0267-9914.
- DSİ, 1981. Erzincan Ovası hidrojeolojik etüt raporu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ), Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Dairesi Başkanlığı, Ankara, 124s.
- DSİ, 2010. Fırat nehri yan kolları su kalitesi. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 82. Şube Müdürlüğü, Erzincan.
- Emre, Ö., Duman T. Y., Kondo, H., Olgun, Ş., Özalp, S., Elmacı, H., 2012. 1/250 000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Erzincan (NJ 37-3) Paftası, Seri no: 44, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Erzincan Valiliği, 2011. Erzincan İli Çevre Durum Raporu, Erzincan Çevre İl Müdürlüğü, Erzincan, 268s.
- Faccini, F., Piccazzo, M. And Robbiano, A., 2008. Environmental geological maps of San Fruttuoso Bay (Portofino Park, Italy). *Journal of Maps*, 4/1, 431-443.
- ISRM, 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring. (Ed.), E. T. Brown, ISRM (International Society for Rock Mecanics) Suggested Methods. Pergaman Press, Oxford, England, 211s.
- Keçer, M., 1985. Erzincan Ovası'nın ve yakın çevresinin jeomorfolojisi. İ.Ü Deniz Bilimleri ve Coğrafya Enstitüsü, Jeomorfoloji Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi, İstanbul.
- Kılıçdağı, R., Sarıaslan, M., Ak, S., Şanver, S., Akbulut, I., Nisan, E., 1999. Kayseri kenti'nin çevre jeolojisi ve doğal kaynakları. MTA Derleme Rapor No: 10.322, Ankara, 125s.
- Koçyiğit, A., 1991. Neotectonic structures and related landforms expressing the contractional and extensional strains along the North Anatolian Fault at the northwestern margin of the Erzincan basin, NE Turkey. *Bulletin of İstanbul Technical University*, 44, 455-473.
- MTA, 2003. KAF boyu jeoloji haritası-(Erzincan-Tanyeri), 1/100.000 ölçekli ek, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- MTA, 2012a. 1/250. 000 Ölçekli Türkiye diri fay haritası, Erzincan (NJ 37-3) paftası, Seri no:44, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- MTA, 2012b. Erzincan ili maden ve enerji kaynakları, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 5s.
- Mulder, E.F.J.ve Hillen, R., 1990. Preparation and application of engineering and environmental geological maps in the Netherlands. *Engineering Geology*, 29, 279-290.
- Özgül, N. 1981, Munzur dağlarının jeolojisi. MTA Derleme Rapor No, 6995, Ankara, 136s.
- Shrestha, O. M., Koirala, A., Hanisch, J., Busch, K., Kerntke, M. ve Jager, S., 1999. A geo-environmental map for sustainable development of the Kathmandu Valley, Nepal. *GeoJournal*, 49, 165-172.
- Tudes, S. Ceryan, S. ve Bulut, F., 2012. Geoenvironmental evaluation for planning: an example from Gumushane City, close to the North Anatolia Fault Zone, NE Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71 (4), 679-690.
- Turner, A.K., Coffman, D.M., 1973. Geological for planning: a review of environmental geology, *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 68 s.

- Ulusay, R., 2010. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları, no. 38, Ankara, 458s.
- Vernes, D. J., 1978, Slope Movement Types and Processes. In Land slides: Analysis and Control. Edited by R. L. Schuster and R. J. Krizek. Transportation Research Board, National Academy of Science, Washington. Special Report 176, Chapter 2, 11-33.
- Yılmaz, A. 1985. Yukarı Kelkit Çayı ile Munzur Dağları arasının temel jeoloji özellikleri ve yapısal evrimi: Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 28/2, 79-92.
- Yılmaz, A., Atmaca, E., 2006. Environmental geological assessment of a solid waste disposal site: A case study in Sivas, Turkey. Environmental Geology, 50, 67- 689.
- Yılmaz, A. 2008. Çevre Jeolojisi. CÜ Mühendislik Fakültesi Yayını no: 107, Sivas, 379s.
- Yılmaz, A. 2009. Çevre Jeotekniği. CÜ Mühendislik Fakültesi Yayını no: 116, Sivas, 276s.



Teknik Not / Technical Note

Değişken Debili (Kademeli) ve Sabit Debili Pompa Testi Planlaması, Analitik ve Sayısal Analizlerinin Değerlendirilmesi

*Step Test and Constant Rate Pump Test Planning, Evaluation of Analytical and
Numerical Analysis*

Emrah DİRMİT

Yaşamkent Mah. 3250 cad. No:7/45, 06810, Ankara

Geliş (Received): 31 Mart (March) 2020 / Düzeltme (Revised): 26 Haziran (June) 2020 / Kabul (Accepted): 14 Temmuz (July) 2020

ÖZ

Hidrojeolojik araştırma çalışmalarında akifer parametrelerinin belirlenmesinde yaygın yöntem olarak uzun süreli sabit debili pompa testleri uygulanmaktadır. Yeni açılan kuyularda (kuyu geliştirme çalışmaları tamamlandıktan sonra) kademeli pompa testi yapılarak, kuyunun akifer ile olan etkileşiminin ön analiz süreci gerçekleştirilmelidir. Kademeli (değişken debili) pompa testi çalışmalarından, akiferin iletimliliği (T) ve kuyu kayıpları gibi önemli parametrelerin analizinde yardımcı araç olarak kullanılmalıdır. Böylece uzun süreli pompa testi için doğru pompa seçimi ve akifer parametreleri hakkında daha güvenilir bilgiler elde edilmesi sağlanabilecektir. Yapılan bu çalışma Kayseri ili, Himmetdede beldesi sınırları içerisinde, madencilik faaliyeti yürüten işletmenin susuzlaştırma çalışmalarına katkı sağlamak ve hidrojeolojik yapının ortaya konulması amacıyla proje alanı içerisinde birçok gözlem kuyusu ve susuzlaştırma kuyusu açılmıştır. Açık ocak maden susuzlaştırma çalışmalarına katkısının önemli olduğu düşünülen SK- 1 kuyusunda gerçekleştirilen kademeli pompa testi ve sabit debili pompa testi sonuçları bu çalışmada tartışılmıştır. Çıkan düşüm değerlerine, farklı analitik çözüm yöntemleri kullanılarak akifer iletimliliği (T) ve kuyu kayıp katsayısı (C) değerlerinin hesaplamaları yapılmıştır. Uzun süreli pompa testinin farklı sayısal yöntemler kullanılarak analizleri sunulmuştur. Çıkan sonuçların karşılaştırmaları yapılarak, hem analitik hem de sayısal yöntemlerin, akifer parametrelerinin çözümüne sağladığı katkılar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Akifer iletimlilik (T), Kademeli (Step) pompa testi, Kuyu kayıpları, Sabit debili pompa testi, Maden Susuzlaştırma

ABSTRACT

In hydrogeological research studies, long-term constant flow pump tests are used as a common method for determining aquifer parameters. After the well development studies is completed in newly drilled wells, a preliminary analysis process of the well's interaction with the aquifer should be carried out by conducting a step drawdown test. Aquifer transmissivity (T) and the well loss parameters (C) should be determined by analyzing step drawdown test at variable discharge rate. Thus, for long-term pump testing, accurate pump selection and more reliable information about the transmissivity (T) of aquifer can be obtained. In this study was conducted within the borders of Himmetdede in Kayseri province, and many observation wells and dewatering wells were opened within the project area in order to contribute to the dewatering works of the enterprise carrying out mining activities and to reveal the hydrogeological structure. Constant rate pump test and step test results in SK-1 dewatering well, which is thought to be important for open pit mine dewatering studies, are discussed in this study. Aquifer transmissivity (T) and well

loss coefficient (C) values were calculated using different analytical solution methods. Analysis of long-term pump testing using different numerical methods is presented. Comparisons of the results were made and the contributions of both analytical and numerical methods to the solution of aquifer parameters were presented.

Keywords: *Aquifer Transmissivity (T), Constant Rate Pump Test, Step Test, Well Loss , Mine Dewatering.*

GİRİŞ

Açık ocak madencilik faaliyetinin yürütüldüğü alan içerisinde akiferin hidrojeolojik özellikleri; akifer iletkenliği (T), hidrolik iletkenlik (k) ve akifer depolama katsayı (S) değerlerinin bulunması için birçok kuyuda sabit debili pompa testi ve değişken debili pompa testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, hidrojeolojik yapı içerisinde önemli görülen SK-1 derin kuyusunda, değişken debili pompa testi planlaması ve elde edilen değişken debili pompa testi sonuçlarını farklı analiz yöntemleri uygulanarak, analitik çözümlerinin değerlendirilmesi sunulmuştur. SK-1 kuyusunda gerçekleştirilmiş olan sabit debili pompa testi sonuçlarının; farklı analitik yöntemlerle analiz edilmiş değişken debili test sonuçları ile sayısal yöntemlerle analiz edilmiş sabit debili test sonuçlarının karşılaştırılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

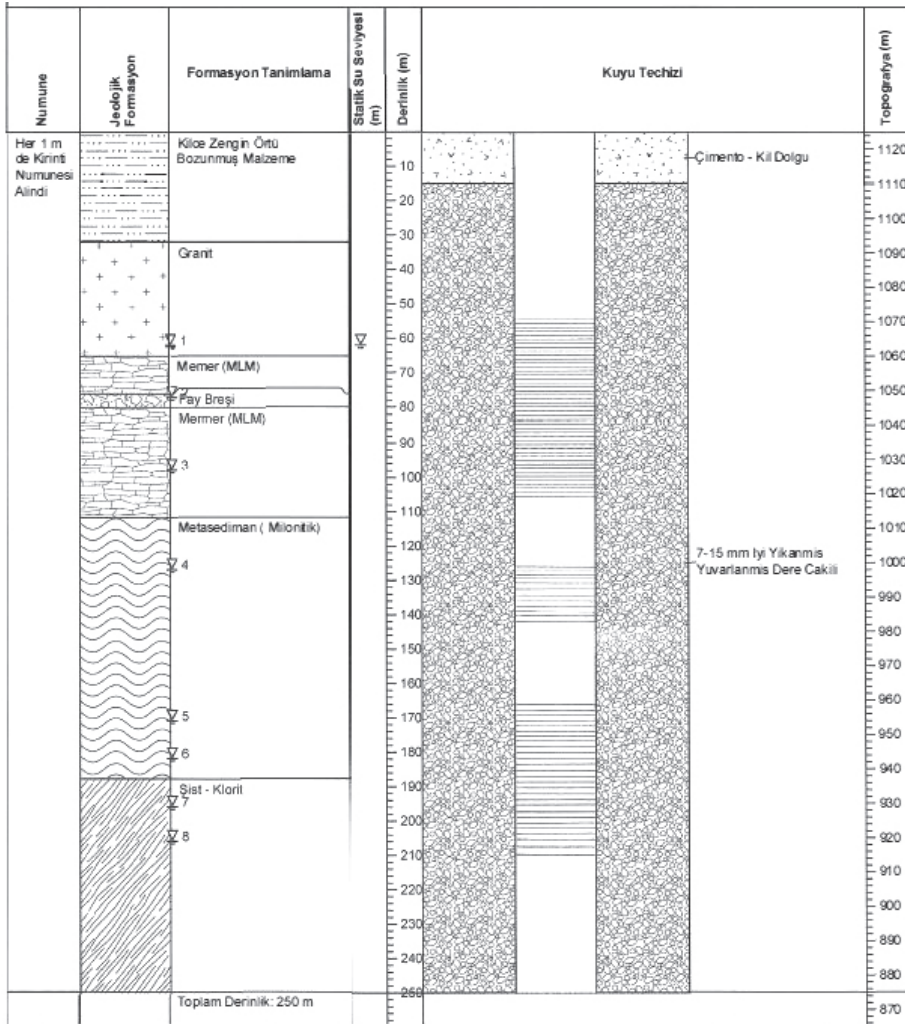
PROJE ALANI GENEL JEOLJİSİ VE KUYU BİLGİLERİ

Proje alanı Kızıl Irmak havzası, Himmetdede alt havzası içerisinde bulunmaktadır. Genel jeoloji verileri MTA tarafından hazırlanan 1/100 000 ölçekli jeoloji haritaları ve alanda daha önceden yapılan literatür çalışmalarından derlenmiştir. Bölgenin temeli, Kırşehir masifi olarak tanımlanan, Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalar ile Üst Kretase yaşlı ofiyolitik kayalardan ve bunları kesen Senoniyen yaşlı plütonik kayalardan oluşmaktadır.

Proje alanı içerisindeki formasyon genel itibari ile genç yaşlı örtü karasal sedimanter birim Ürgüp formasyonu altında metasediman kaya karmaşığında oluşmaktadır. Bu metasediman kaya karmaşığının içerisinde; rekristalize mermerler, granit, gnays ve şist gibi farklı jeolojik birimleri bulundurmaktadır. Yapılan madencilik arama sondaj çalışmaları faaliyetlerinden elde edilen karot bilgileri ve sahada gerçekleştirilen akifer test sonuçlarına göre; hidrotermal alterasyona bağlı bozunmalar, hidrolik iletkenlik değerlerini düşürmektedir. Faylanmalar ile kırık çatlak sistemlerine bağlı ikincil gözeneklilik gelişmektedir. Bu gibi yapıların varlığı da hidrolik iletkenlik değerini yükseltici özelliklerde görülmektedir. Jeolojik formasyon içerisinde hidrojeolojik birimler serbest ve yarı basınçlı – basınçlı akifer özellikleri göstermektedir.

SK- 1 susuzlaştırma kuyusu; UTM ED50 koordinat sisteminde 678203, 4313817, 1224 kotunda 250 m derinlikte rotary sistem ile açılmıştır. Kuyu çapı ilk 150 m 17.5 inç, son 100 m 15.5 inç olarak delgi çalışması gerçekleştirilmiştir. Kuyu içerisine çapı 225 mm uPVC teçhiz yerleştirilmiş, bunun 112 m filtreli, 138 m kapalı boru ile geçilmiştir.

Kuyu içi jeofizik log çalışmalarından elde edilen bilgilere göre; formasyondan su geliş 8 farklı noktadan çeşitli debilerde gerçekleşmiştir. Özellikle yaklaşık 70 m ile 100 m arasında bulunan geçirimli birimin yarı basınçlı akifer özelliği taşıdığı düşünülmektedir. Kuyu statik seviyesi; 62.8 m' dir. SK-1 Kuyu Logu Şekil 1' de sunulmuştur.



Şekil 1. SK-1 Kuyu Logu.

Figure 1. SK-1 Well Log.

DEĞİŞKEN DEBİLİ (KADEMELİ) VE SABİT DEBİLİ POMPA TESTİ PLANLAMASI

Değişken debili ve sabit debili pompa testinin analizi; kuyu düşüm verilerinden yapılacağı için verilerin doğruluğu önem taşımaktadır. Veriler toplanırken belirli zaman aralığında, deşarj miktarı kayıt altına alınarak yapılmalıdır. Kuyu düşüm verilerinin toplama işlemi; sıç

kuyularda düdüklü metre, derin kuyularda ise su seviye ölçüm sensörleri veya her iki yöntem birlikte kullanılarak yapılmalıdır. Akiferdeki düşüm sırasında debi değeri de düşecektir, debinin sabitlenmesi için vana ile ayarlama yapılmamalıdır. Debi takibi ise çıkış ve / veya deşarj borusu üzerinde su basınç ölçer saati ve eğer kuyudan gaz çıkışı yoksa orifis montajı yapılarak takip edilebilir. Bu yöntemde hata payı yaklaşık olarak %2' dir. (Johnson, 1966).

Değişken Debili Test Kademe Sayısı

Değişken debili testlerde kademe sayısı en az 4 adet olmalıdır. Grafik analizlerinin doğruluğu veri noktalarının sayısına bağlıdır. Spesifik düşüm ve debi grafiğinde en az dört noktanın kullanılması önerilir (Clark, 1977).

Her bir kademede seçilen debi miktarı artışları, belirli bir oran içerisinde eşit miktarda gerçekleştirilmelidir. SK-1 kuyusunda eşit miktarlarda artış Q1, Q2, Q3, Q4 ve 1 adet eksik debi artışı gerçekleştirilerek Q5 olmak üzere 5 kademede test gerçekleştirilmiştir. Test sırasında önemli olan ardışık en az 4 kademedenin olmasıdır.

Değişken Debili Test Kademe Uzunluğu

Bir testteki kademe uzunluğu çekim yapılan akiferin özelliklerine göre değişebilir. Eden – Hazel yönteminde adımlar 60 dk. az olarak seçilebilir. Yarı log diyagramlarda analiz açısından kolaylık sağlamak için 100 dk. olarak alınır. Yeterli zaman var ise ve eğer düşüm sabitleniyorsa 3 saatlik kademelerde ayarlanabilir. Özellikle Theis analizi için yeterli veri sağlayacaktır (Clark, 1977). Birinci kademede çekilen debi miktarına göre akiferde gerçekleşen düşümün yavaşlaması ya da sabitlemesi ölçüm aralığını vermektedir. Yaygın çalışma yöntemi olarak serbest ve yarı basınçlı akiferlerde 1 sa. ve 4 sa. arasında kademe uzunluğu seçilmektedir. SK-1 kuyusunda gerçekleştirilen akifer testlerinde kademe uzunluğu, ilk kademede akiferde gerçekleşen düşümün sabitlendiği zaman aralığı olan 2 sa. (120 dk.) alınmıştır.

Sabit Debili Pompa Testi Planlaması

Sabit debili pompa testi ile değişken debili pompa testinin birlikte uygulanması önerilmektedir. Öncelikle 4 ya da 5 kademe değişken debili pompa testi yapıp kuyu geri yükselimi tamamlandıktan sonra, elde edilen verilerden, analizler yapılarak kuyu kayıpları hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar ile nihai sabit debi seçmemize ve elde edilen sonuçlara göre kuyu içi ve dışında düşüm tahmini yapmamıza kolaylık sağlamaktadır.

Sabit debili pompa testleri genellikle 24 sa. veya 72 sa. süre ile gerçekleştirilmektedir. Testin tamamlanabilmesi için kuyuda geri yükselimin en az %95 oranında gerçekleşmesi gerekmektedir. Çalışma alanı ve çevresinde farklı sınır koşullarını ve düşümlerini gözlemlemek için test süresi uzatılabilir. SK-1 kuyusunda sabit debili pompa testi 192 sa. (8 gün) süre ile yapılmış ve geri yükselimi testi ile tamamlanmıştır.

KADEMELİ (DEĞİŞKEN DEBİLİ) POMPA TESTİ TEORİSİ VE ANALİZİ

Yeraltı suyu çekimi gerçekleştirilen kuyularda düşüm iki farklı bileşenden meydana gelmektedir. Toplam düşümün içerisinde akifer kayıpları ve kuyu kayıpları vardır. Kademeli pompa testi bu iki bileşeni açıklamakta kullanılmaktadır.

Akifer kayıpları; akışın laminar olduğu akiferlerde, kuyudaki düşüm karşısında meydana gelen hidrolik yük kayıplarıdır (Clark, 1977). Diğer bir bileşen olan kuyu kayıpları ise kuyu cidarı, çakıl zarfı ve filtrelili kısımlarda türbülanslı akıma ve laminar akım etkisi altında gerçekleşen hidrolik yük kayıplarıdır (Kruseman ve Ridder, 2000).

Tüm analiz yöntemlerinin teorisi, Jacob'un çalışmasının üzerine geliştirilerek farklı çözüm yöntemleri sunulmuştur. Kademeli pompa testi kuyu etki yarıçapını tanımlamak yerine genellikle kuyu kayıplarını ve akifer iletkenliğini (T) öğrenmek için tercih edilmektedir. Jacob analizi (denklem 1) ve Bierschenk – Wilson analizi (denklem 3) tüm akifer tiplerinde çözüm sunmaktadır. Bu yöntemlerde bilinmeyen b ve c katsayılarının bulunması ve Eden – Hazel

(basıncı akifer) çözüm yönteminde (denklem 9) a, b, C katsayıları bulunarak, akiferin iletkenliği ve depolama katsayısı bulmada hidrojeologlara yardımcı olmaktadır.

Belirtilen analitik yöntemlerin çözümünde, Çizelge 1' de sunulan SK-1 kuyusuna ait düşüm verileri kullanılarak analizler yapılmıştır. Analitik çözümleri yapılan analiz yöntemleri aşağıda sıralanarak gösterilmiştir.

Çizelge 1. SK-1 Kademeli Pompa Testi Verileri.

Table 1. SK-1 Step Test Data.

Kademe (Step)	1	2	3	4	5	Yükselim
Pompaj Miktarı (m ³ /gün)	511.2	720	964.8	1200	1248	0
Step Ölçüm aralıkları (dk)	Düşüm (m)					Yükselim (m)
1	5.420	10.041	17.949	28.91	42.739	36.357
2	6.072	11.738	20.055	30.372	43.569	25.918
3	6.330	12.625	21.487	32.323	44.196	17.899
4	6.673	13.266	22.468	33.743	44.495	13.498
5	7.103	13.583	23.367	35.010	44.696	10.636
6	7.463	14.036	23.898	36.056	44.792	8.13
8	7.956	14.627	24.832	37.206	44.960	6.455
10	8.042	14.794	25.253	38.027	45.096	4.675
12	8.045	15.057	25.749	38.505	45.243	3.357
15	8.205	14.951	25.992	38.845	45.478	2.643
18	8.243	15.153	26.256	39.128	45.554	0.992
22	8.378	15.22	26.614	39.299	45.674	0.4
26	8.419	15.474	26.746	39.532	45.871	
30	8.480	15.431	26.926	39.712	45.961	
35	8.570	15.589	26.972	40.095	45.928	
40	8.614	15.619	27.162	40.196	46.220	
45	8.768	15.823	27.302	40.371	46.293	
50	8.863	15.803	27.390	40.569	46.521	
60	8.881	15.995	27.683	41.019	46.755	
70	9.084	16.149	27.864	41.164	46.856	
85	9.085	16.324	27.978	41.434	47.134	
100	9.228	16.307	28.114	41.766	47.357	
120	9.309	16.599	28.331	42.139	47.665	
150					47.880	

Jacob Analizi

1946 yılında Jacob çekim gerçekleştirilen kuyudaki düşümü hesaplamak için iki bileşen arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi tanımlamıştır:

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad (1)$$

s_w = Toplam Düşüm

BQ = Akifer Kayıpları

CQ^2 = Kuyu Kayıpları

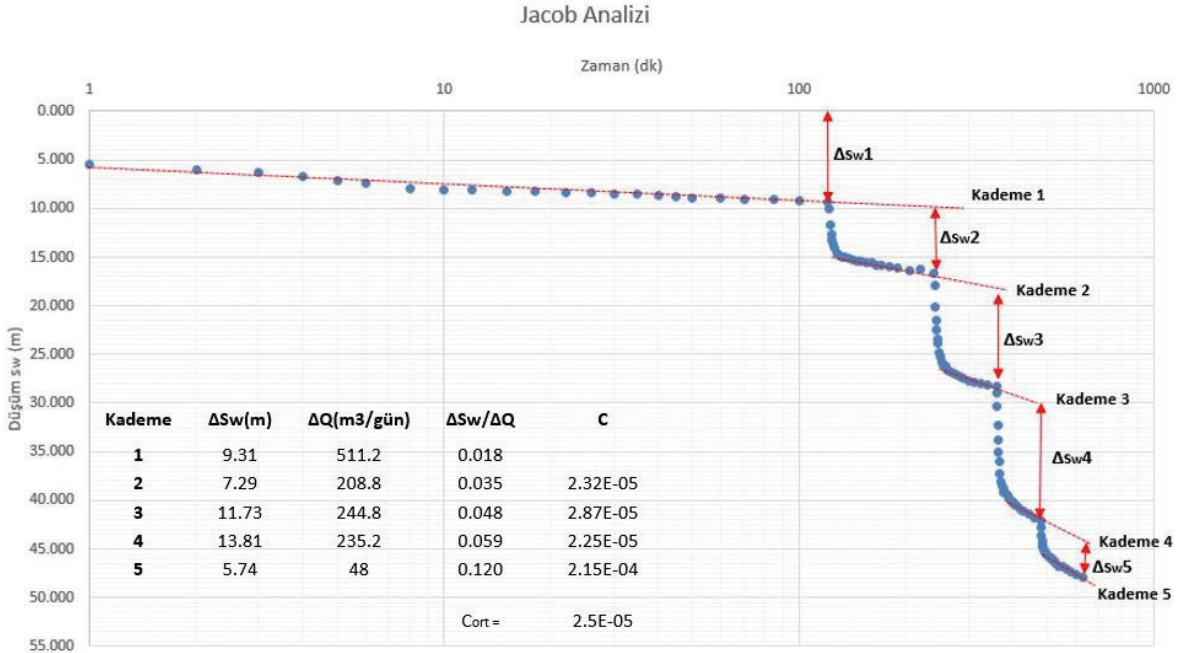
Jacob kuyu kayıp katsayısını (C) hesaplamak için aşağıdaki formülü geliştirmiştir:

$$C = \frac{(\Delta s_w^i / \Delta Q^i) - (\Delta s_w^{i-1} / \Delta Q^{i-1})}{\Delta Q^{i-1} + \Delta Q^i} \quad (2)$$

Analizin uygulanabilmesi için düşüm – zaman grafiği yarı log olarak çizilmeli ve her bir kademe için düşüm farkları ile kademeler arası debi farkları kullanılarak kuyu kayıp katsayısı (C) değerleri; denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır. C değerinin bulunmasında, kademe başına elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır (Walton, 1962). Şekil 2 'de düşüm zaman grafiğinde Jacob analizi çözümü sunulmaktadır.

Bierschenk ve Wilson Analizi

Bu analiz yönteminde Jacob'un bulunduğu 1 nolu denklemde, her iki tarafı Q'ya bölerek bir doğru denklemi oluşturulmuştur. Denklem 3' de sunulmuştur:



Şekil 2. Jacob analizi.

Figure 2. Jacob analysis.

$$s_w / Q = B + C Q \quad (3)$$

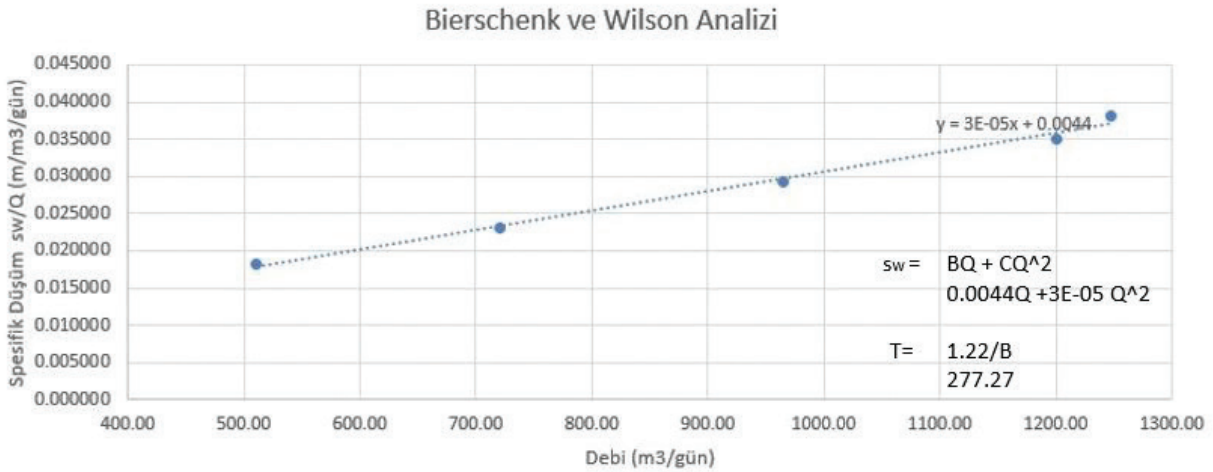
Her bir kademede toplam düşüm ile toplam çekim miktarı birbiri ile orantılanarak spesifik düşüm (s_w / Q) değeri elde edilmiştir. Şekil 2 'de kademelerde spesifik düşüm'e karşılık toplam çekim (Q) miktarları işaretlenerek bir doğru elde edilmiş ve Şekil 3'de sunulmuştur. Bu doğrunun eğimi bize kuyu kayıp katsayısını (C) vermektedir.

Bu denklem şu şekilde yazılabilir;

$$s_w = (a + b \log t) Q \quad (5)$$

burada;

$$a = \frac{2.30 Q}{4\pi K D} \log \frac{2.25 T}{r_{ew}^2 S} \quad (6)$$



Şekil 3. Biershenk ve Wilson analizi.

Figure 3. Biershenk and Wilson analysis.

Eden – Hazel Analizi (Basınçlı Akifer)

Eden - Hazel (1973) ilk defa kademeli pompa testini akifer parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmasını önermiştir (Clark, 1977). Jacob denklemini temel alınarak Theis denklemine uyarlanması ile elde edilen denklem:

$$s_w = \frac{2.30 Q}{4\pi K D} \log \frac{2.25 K D t}{r_{ew}^2 S} \quad (4)$$

$$b = \frac{2.30 Q}{4\pi T} \quad (7)$$

n. Kademeli t zamanına göre türetirsek;

$$s_{w(n)} = a Q_n + b \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \log(t - t_i) \quad (8)$$

burada;

Dirmit

Q_n = n. kademedeki sabit debi

Q_i = n. adımdan önceki sabit debi

$\Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1}$ = t_i zamanında deşarj artışı

t_i = i. adımın başladığı zaman

t = test başlangıcından bu yana geçen süre

$$s_{w(n)} = aQ_n + bH_n + CQ_n^2 \quad (9)$$

Burada;

$$H_n = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \log(t - t_i) \quad (10)$$

Bu yöntemin uygulanabilmesi için şu varsayımlarda bulunmaktadır.

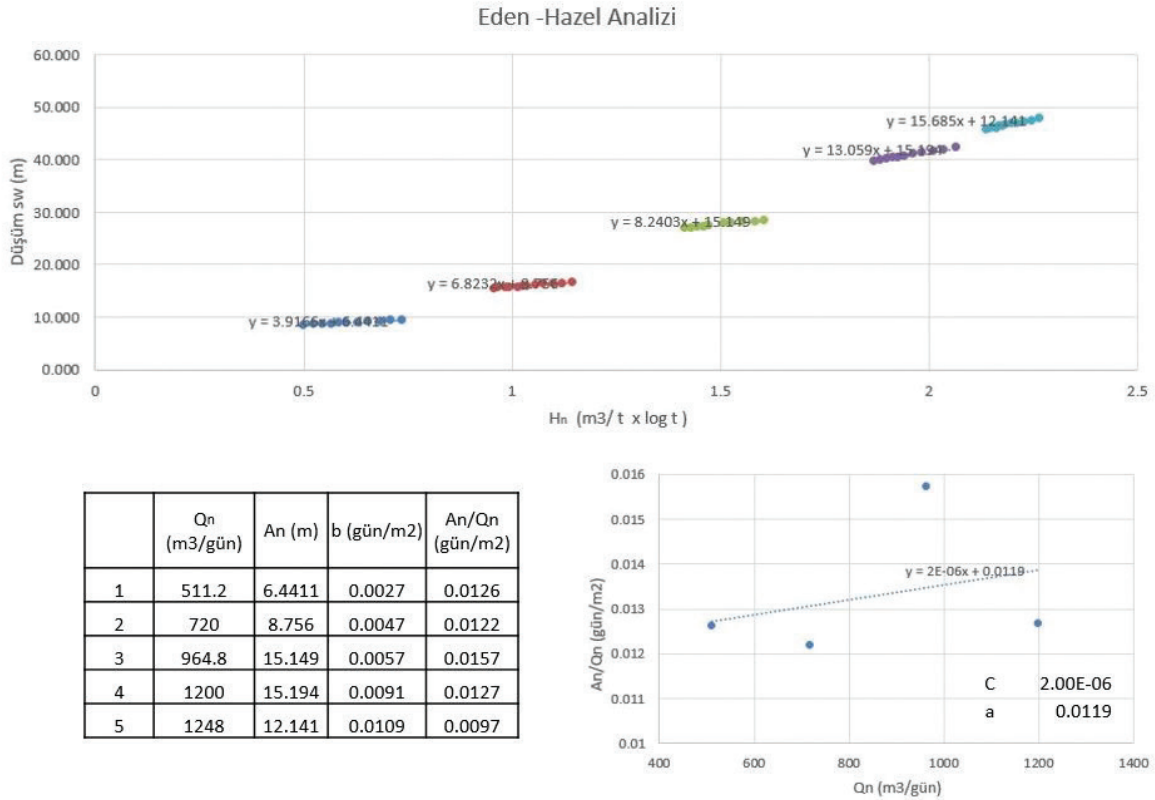
- Kuyuya gerçekleşen akım kararsızdır.

- Kuyu faktörü $u < 0.01$

- Türbülans kaynaklı kuyu kayıpları (CQ^p) katılır.

p katsayısı debi (Q) değerine bağlı olarak 1,5 ile 3,5 arasında değerleri alabilir (Lenox 1966) Jacob denkleminde önerildiği gibi $n = 2$ olarak alınması büyük ölçüde kabul görmektedir (Ramey, 1982; Skinner, 1988).

Yöntemin çözümüne H_n değerinin hesaplanması ile başlanır. Daha sonra gözlenen s_{wn} değeri ile hesaplanan H_n değeri arasında grafik çizilir. Şekil 4'de grafik üzerinde belirtilen noktalara oturan en uygun doğru çizilir. Bu doğrunun eğimi bize b değerini vermektedir. $H_n = 0$ olduğunda ise A_n değerleri okunur.



Şekil 4. Eden – Hazel analizi.

Figure 4. Eden - Hazel analysis.

$$\frac{A_n}{Q_n} = a + CQ_n \quad (11)$$

Her kademe için okunan A_n değerleri ile Q_n değerleri birbirine bölünür ve her kademeye düşen debi ile grafik Şekil 4' deki gibi çizilir. Bu grafik üzerine oturan doğrunun eğimi bize C değerini vermektedir. $Q_n = 0$ olduğunda ise bize a değerini vermektedir. b değeri de bilindiği için 6 numaralı denklemde yerine konularak her bir kademe için iletimlilik T değeri hesaplanır.

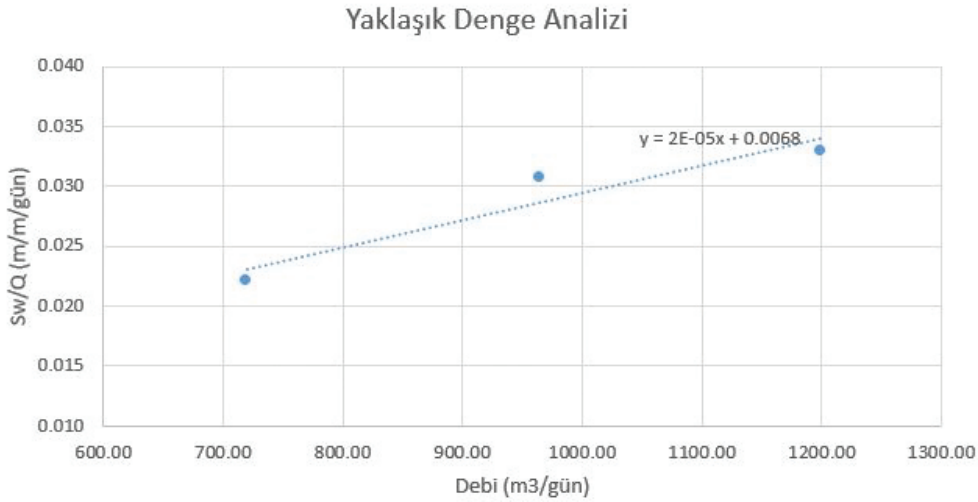
Yaklaşık Denge Analizi

Bundan önce gerçekleştirilen 3 yöntemden elde edilen, spesifik düşüm - debi değerlerinin

ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Hesaplama Jacob analizi üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kararlı olarak anılan adımlar 2., 3., 4. adımların spesifik düşüm - debi grafiği oluşturulur. Grafik üzerindeki en uygun noktaları birleştiren doğrunun eğiminin kuyu kayıp katsayısı (C) vermektedir. $Q_n = 0$ olduğunda ise B katsayısını vermektedir Şekil 5' de sunulmuştur.

KUYU VERİMİ HESAPLANMASI

Kademeli pompa testi analizini yaparken, spesifik düşümün toplam çekim ile orantılanması ile hesaplama yapılmıştı, Şekil 3' de Biershenk ve Wilson Analizi de sunulmuştur.



	Q_n	Sw/Q		
1	511.20	0.016		
2	720.00	0.022	C	2.00E-05
3	964.80	0.031	B	0.0068
4	1200.00	0.033		
5	1248.00	0.044		

Şekil 5. Yaklaşık denge analizi.

Figure 5. Approximate balance analysis.

Kademeli pompa testinin yapılmasındaki asıl amaçlardan biri kuyu kayıplarının ortaya konulmasıdır. Özellikle, test kuyusu çevresinde gözlem kuyusu bulunmayan testlerin analizinde önemlidir. Kuyu kaybının bilinmesi; uzun süreli pompa testlerinden elde edilen düşümden, kuyu kaybının çıkartılması ile doğru akifer parametresi hesaplanabilmesini sağlamaktadır.

Sadece tek kuyuda hesaplama yaparken kuyu kayıplarının göz ardı edilmesi iletimliliğin azalmasına neden olmaktadır (Clark, 1977).

Kuyu kayıpları genellikle kuyu verimi olarak adlandırılmaktadır. Kuyu veriminin hesaplanmasında akifer kaybının, toplam düşüme oranlarak hesaplanması aşağıda sunulmuştur:

$$\text{Kuyu Verimi} = \frac{BQ}{(BQ+CQ^2)} \times 100 \quad (12)$$

Kuyu verimi, kademe testi sırasında her bir kademe için ayrı ayrı hesaplanır. Hesaplanan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak kuyu kayıp oranı ortaya çıkmaktadır.

Kuyu kayıp oranının yüksek çıkması kuyunun kötü bir şekilde tasarlanmış olabileceğini gösterebilir. Bunun yanında kuyu içerisinde türbülanslı akım ve sürtünme kayıpları da kuyu kayıp oranını etkilemektedir. Kuyu kayıp oranları ancak benzer akifer alanlarında, benzer derinlikli kuyularda karşılaştırma sağlamak için önem taşımaktadır.

AKİFERPARAMETRESİ HESAPLANMASI

Akifer parametrelerinin hesaplanmasında hem analitik yöntemler hem de sayısal yöntemler kullanılmıştır. Analitik yöntemlerden; Bierschenk – Wilson analizi tüm akifer tiplerinde çözümü, Eden – Hazel analizi basınçlı akifer tiplerinde çözümü ve yaklaşık denge

analiz çözümü tüm akifer tiplerinde, akifer parametrelerinin hesaplamaları yapılmıştır. Son yıllarda sıklıkla kullanılan sayısal analiz programlarının yardımıyla, düzeltilmiş düşüm verileri üzerinden, farklı tip akiferlerde sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözüm programı olarak 1989 yılından beri kullanılan Aqtesolv programı kullanılmıştır. Analitik ve sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de sunulmuştur.

Hem analitik hem de sayısal yöntemlerin uygulanması aynı teorik kaynağa sahiptir. Akifer parametrelerinin hesaplanmasında teorik bilgileri ve uygulamaları aşağıda yer almaktadır.

Akifer İletimliliğinin Hesaplanması

Dengeye ulaşan her adımdan elde edilen spesifik düşüm – debi değeri kullanılarak Şekil 2 iletimlilik değeri hesaplanabilir. Yaklaşık denge analizinde de kullanıldığı gibi kademeli pompa testinin ilk adımındaki veriler kuyu kayıpları düzeltildikten sonra Theis, Thiem ve sızıntılı akifer yöntemlerinden biri uygulanarak iletimlilik değeri hesaplanabilir.

Basitleştirilmiş Thiem kararlı akım formülü:

$$T = \frac{2.3 Q}{2 \pi s_w} \log \frac{r_i}{r_w} \quad (13)$$

Burada;

r_w = Efektif kuyu çapı

r_i = Kuyunun etki yarı çapı

Muskat, 1937 yılında $\log r_i / r_w$ değerinin çok küçük bir değer olduğunu söylemiştir. Logan, 1964 yılında bu değerın 3.3 alınabileceğini belirtmiştir. Böylece Thiem denklemi şu şekli almıştır:

$$T = \frac{1.22 Q}{s_w} \quad (14)$$

Eden – Hazel grafik analitik çözüm yönteminde her bir kademe için hesaplanan b değerleri denklem 7’de yerine konularak her kademe için iletilimlilik değerleri hesaplanır. Analitik doğrusal denklemlerden ve sayısal çözümlerden elde edilen sonuç değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

Akifer Depolama Katsayısı Hesaplaması

Eden – Hazel yönteminde denklem 6’da bulunan formülde düzenleme yapılarak şu denklik elde edilir:

$$S = \frac{4Tt}{r_w^2} \quad (15)$$

Eden – Hazel çözüm yönteminden analiz edilen düzeltilmiş kademe 1 verileri denklem 15’e yerleştirilir. Ancak sonucun bulunabilmesi için efektif kuyu çapının (r_w) bilinmesi gerekmektedir. Bunun için tahminde bulunarak bir yaklaşım sergilenir. Sonuç olarak, akifer depolama katsayısı (S) hesaplanabilir.

Çizelge 2. Analitik ve sayısal analiz tablosu.

Table 2. Analytical and numerical analysis table.

Yöntemler		Kuyuda Düşüm denklemi	Teorik Kuyu Kaybı (m) Q=1200 m ³ /gün	Teorik Düşüm (m) 120 dk Q=1200 m ³ /gün	İletimlilik (T) m ³ /m/gün	Depolama Katsayısı (S)
Analitik Yöntem	<i>Jacob</i>		35.69			
	<i>Bierschenk & Wilson</i>	$s_w = (0.0044Q + 0.00003 Q^2)$	43.20	48.5	227.28	
	<i>Eden - Hazel</i>	$s_w = ((0.0119 + (0.0055) \log t) Q + 0.000002 Q^2)$	2.88	30.88	35.00	
	<i>Yaklaşık Denge Analizi</i>	$s_w = (0.0068Q + 0.00002 Q^2)$	28.80	36.96	39.61	
Sabit Debili Pompa Testi Analizi						
Sayısal Yöntem	<i>Thies(1935)</i>	<i>Basıncılı Akifer</i>		39.22*	34.84	4.84E-06
	<i>Coper - Jacob</i>				27.04	9.13E-05

* 1250 m³ /gün çekim miktarına karşı kuyu kayıplarından arındırılmış 120. dk gerçek düşüm değeri.

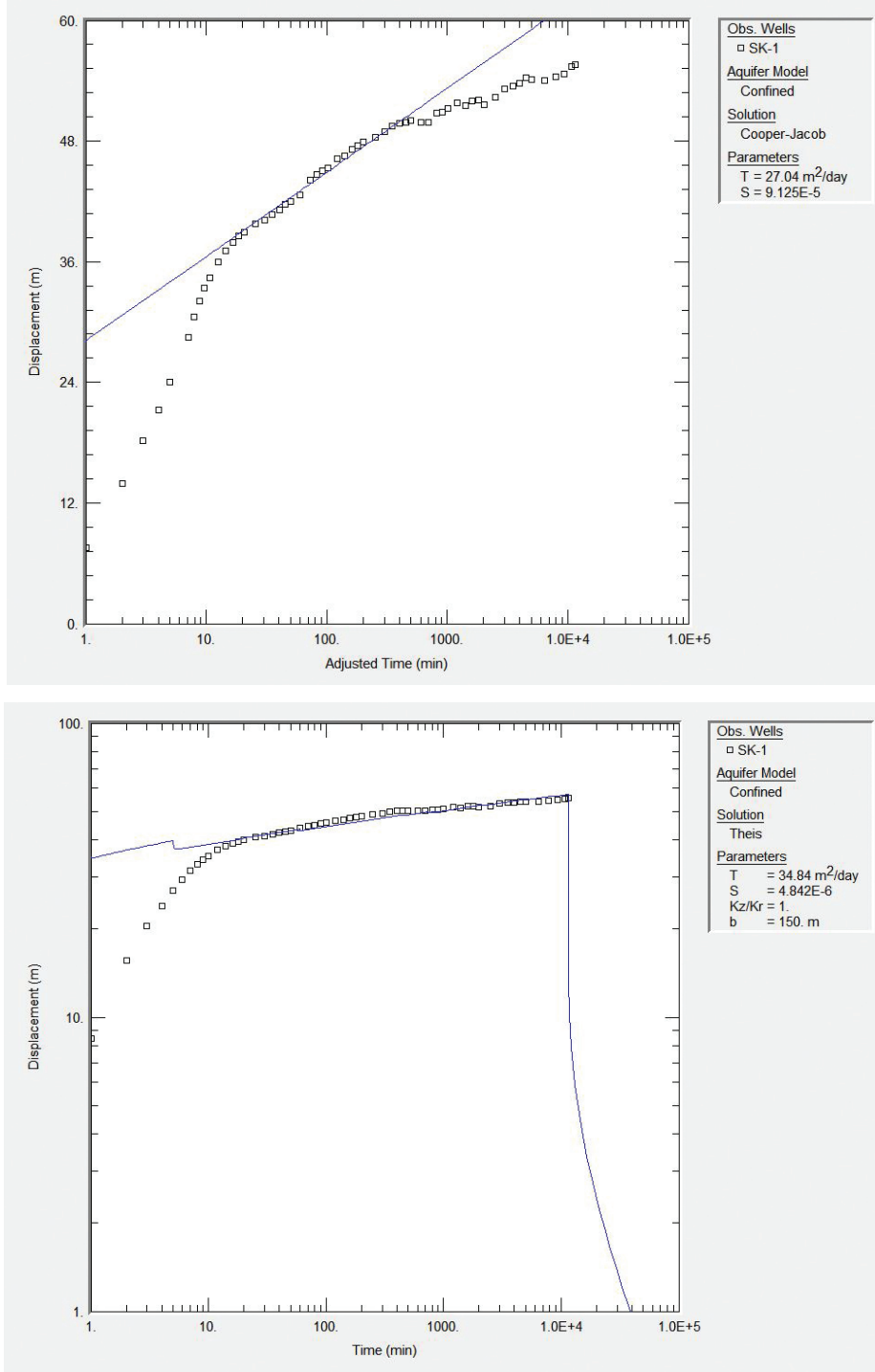
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

SK-1 kuyusunda kademeli pompa testi ve sabit debili pompa testi gerçekleştirilmiştir. SK-1 kuyusunda üç analitik analiz yöntemi uygulanarak düşüm – debi ilişkisini gösteren denklemler türetilmiştir. Sabit debili pompa testinde ilk 120. dk düşüm karşılaştırılması sağlanmıştır. Çizelge-2’de kademeli pompa testi ve sabit debili pompa testi analitik ve sayısal analiz verilerin değerlendirme sonuçları sunulmuştur.

Himmetdede alt havzası karasal sedimanter örtü birimi serbest akiferi, derinlere inildikçe farklı jeolojik formasyonlar yarı basınçlı – basınçlı akifer tiplerine raslanmaktadır. Proje alanı içerisinde bulunan SK-1 kuyusunda akifer sistemi; akifer test sonuçlarına göre yarı basınçlı – basınçlı akifer özelliği taşıdığı görülmüştür.

Analitik yöntemlerle hesaplanan teorik kuyu kaybının 28.8 m ile 35.7 m arasında değiştiği görülmüştür. SK-1 kuyusu için kuyu kayıp oranı % 16.5 olarak hesaplanmıştır. Bu kuyu kayıp oranı kullanılarak, sabit debili pompa testi düşüm verileri düzeltilmiş ve akifer parametre analizi gerçekleştirilmiştir.

Dimit



Şekil 6. Sayısal çözüm sonuçları (Cooper and Jacob, 1946 ve Theis).

Figure 6. Numerical solution results (Cooper and Jacob, 1946 and Theis).

1250 m³/gün çekim yapılarak gerçekleştirilen sabit debili pompa testinde 120. dk düşüm değeri 39.22 m olarak ölçülmüştür. Yaklaşık denge analizi ile belirtilen formül ile hesaplandığında ($s_w = (0.0068Q + 0.00002)$) teorik düşüm 39.80 m olarak görülmüştür. Elde edilen iki değer karşılaştırıldığında değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Akifer iletimliliğinin hesaplanmasında basınçlı akiferlerde kullanılan analitik yöntemlerin (Eden – Hazel ve Yaklaşık Denge Analizi) geometrik ortalaması 37.23 m³/m/gün olduğu görülmüştür. Basınçlı akiferlerde sayısal çözüm yöntemi çözümlerinin geometrik ortalaması 30.69 m³/m/gün olduğu hesaplanmıştır.

Akifer depolama katsayısının (S) değerlendirilmesinde ise analize katkı sağlayan iki sayısal yöntem sonuçları; Coper – Jacob çözüm yönteminde 9.13E-05 değeri ile Theis çözüm yönteminde 4.84E-06 değerlerini aldığı görülmüştür. Bu sonuçların geometrik ortalaması alındığında ise 2.10E-05 olduğu hesaplanmıştır. Kademeli pompa testleri sonucunda elde edilen kuyu kayıp oranı kullanarak hesaplanan düşüm değerlerinden, doğru akifer parametrelerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu sebeple kademeli pompa testleri, akifer parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir kontrol ve değerlendirme mekanizması sağlamaktadır.

Akifer tipine göre uygun sayısal yöntemlerin seçilerek çözümlerin gerçekleştirilmesi, hesaplama hatalarını ortadan kaldırırken çözümlerin daha hızlı sonuçlanmasını sağlamaktadır. Bu da akifer parametrelerinin belirlenmesinde, veri sayısını artırarak karşılaştırma sağlamasına yardımcı olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Clark, L., 1977. The analysis and planning of step drawdown tests. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 10, 125-143.
- Cooper, H. H., Jacob, C. E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. American Geophysical Union Transactions, 27, 526-534.
- Eden, R. N., Hazel, C. P., 1973. Computer and graphical analysis of variable discharge pumping tests of wells. Civil Engineering Trans. International Engineering, Austria, 5-10.
- Hazel, C. P., 1973. Lecture notes: Groundwater Hydraulics. Australian Water Resources Council. (yayınlanmamış).
- Jacob, C.E., 1946. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. Proc. Am.Soc. Civil Engineers, 79 (5).
- Johnson, E. E., 1966. Groundwater and wells, a reference book for the water-well in industry, Edward E. Johnson, Inc. Saint Paul, Minnesota, 440p.
- Kruseman, G.P., N.A. de Ridder, 2000. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, Second Edition, Publication 47. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 377 p.
- Lennox, D.H., 1966. Analysis and application of step-drawdown tests. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 92 (6), 25-47.
- Logan, 1., 1964. Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. Ground Water, 2, 35-37.
- Muskat, M., 1937. The flow of homogeneous fluids through porous media. McGraw Hill Book Co., New York.
- Ramey, H. J., 1982. Well-loss function and the skin effect: A review. In: Narasimhdn, T.N. (ed.) Recent trends in hydrogeology. Geol. Soc. Am., Special Paper, 189, pp. 265-271.

Skinner, A. C., 1988. Practical experience of borehole performance evaluation. *Journal of Institution of Water Environmental Management*, 2, 332-340.

Walton, W. C., 1962. Selected analytical methods of well and aquifer evaluation. Bull. 49. State of Illinois. Department of Registration and Education, Urbana, Illinois.