



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 abağında 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.

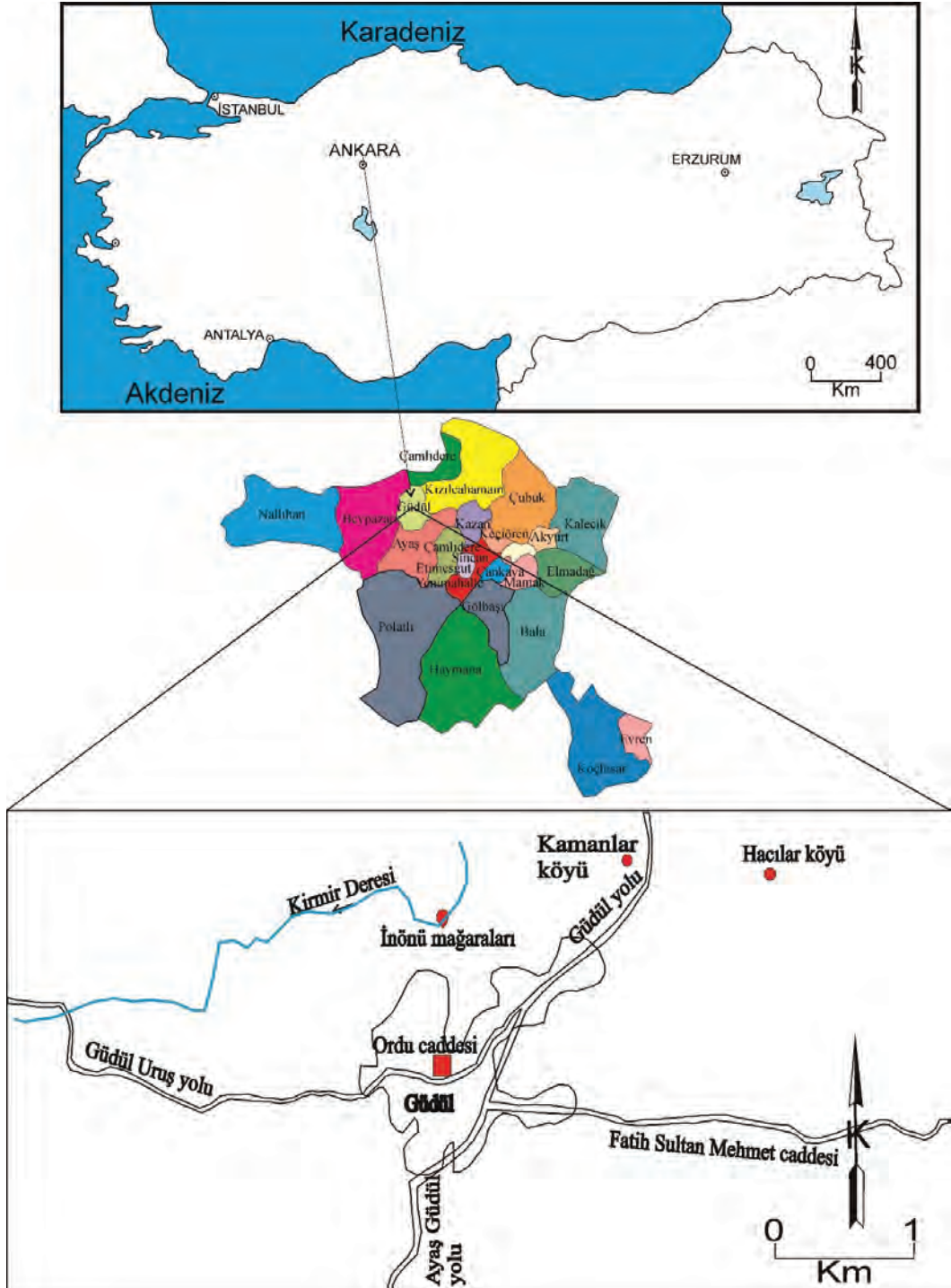
Bu çalışmada Ankara ili, Güdül ilçesi yerleşim yerlerini oluşturan zemin birimlerinin jeoteknik özellikleri araştırılmıştır (Şekil 2). Bu amaçla derinlikleri 5 m ile 15 m arasında değişen 19 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde indeks 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.

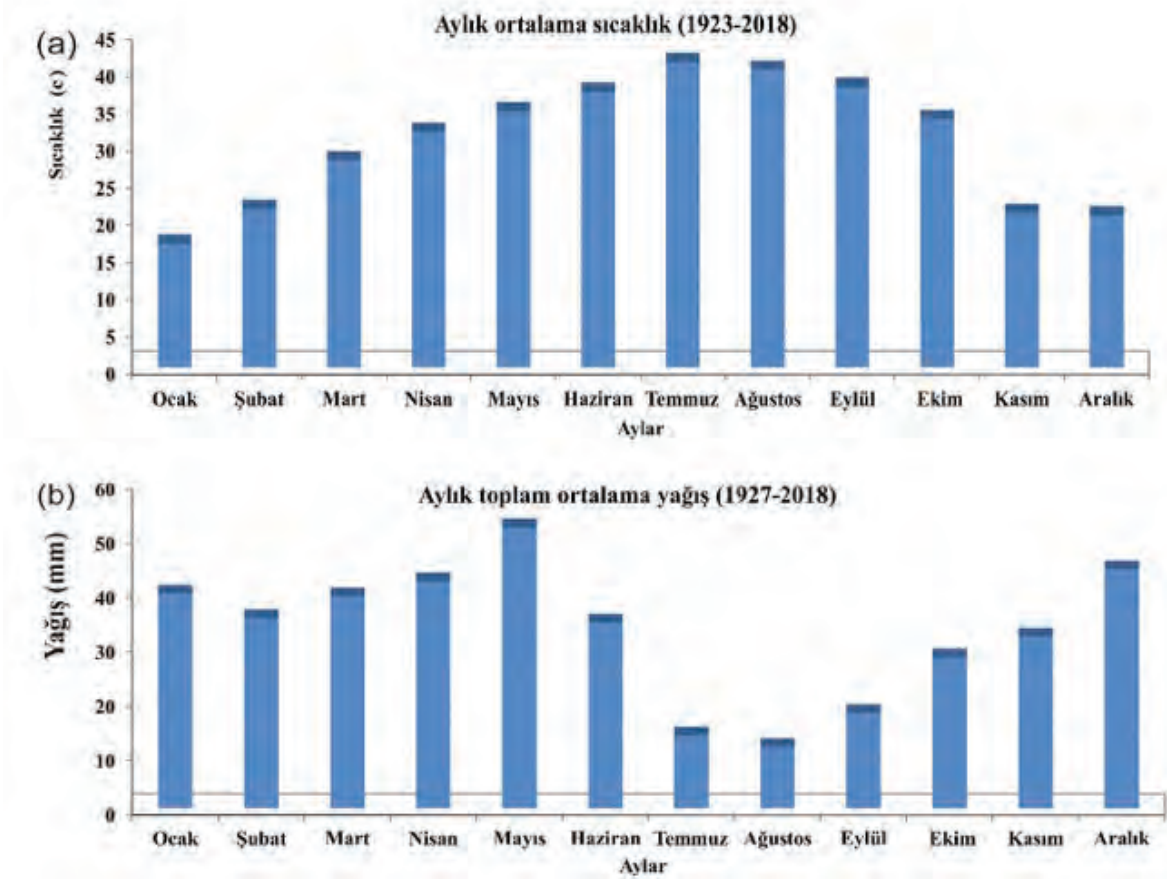
Figure 2. Location map of Güdül settlement area.

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).

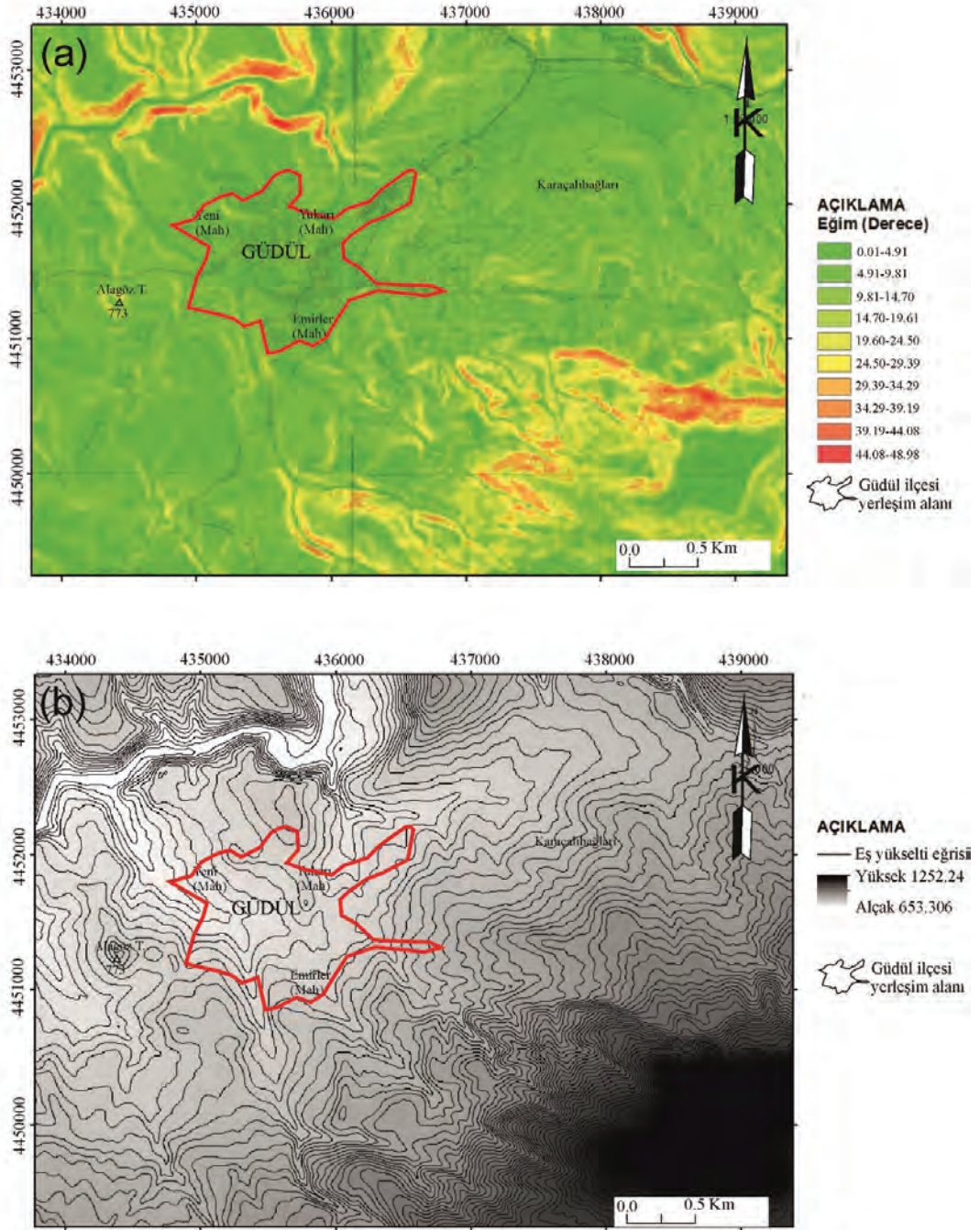
Yerleşim alanı eğimi 0.00° ile 10.00° arasında değişirken yerleşim alanının denizden yüksekliği 650 m civarındadır (Şekil 4b).



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 JEOLOJİSİ

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).

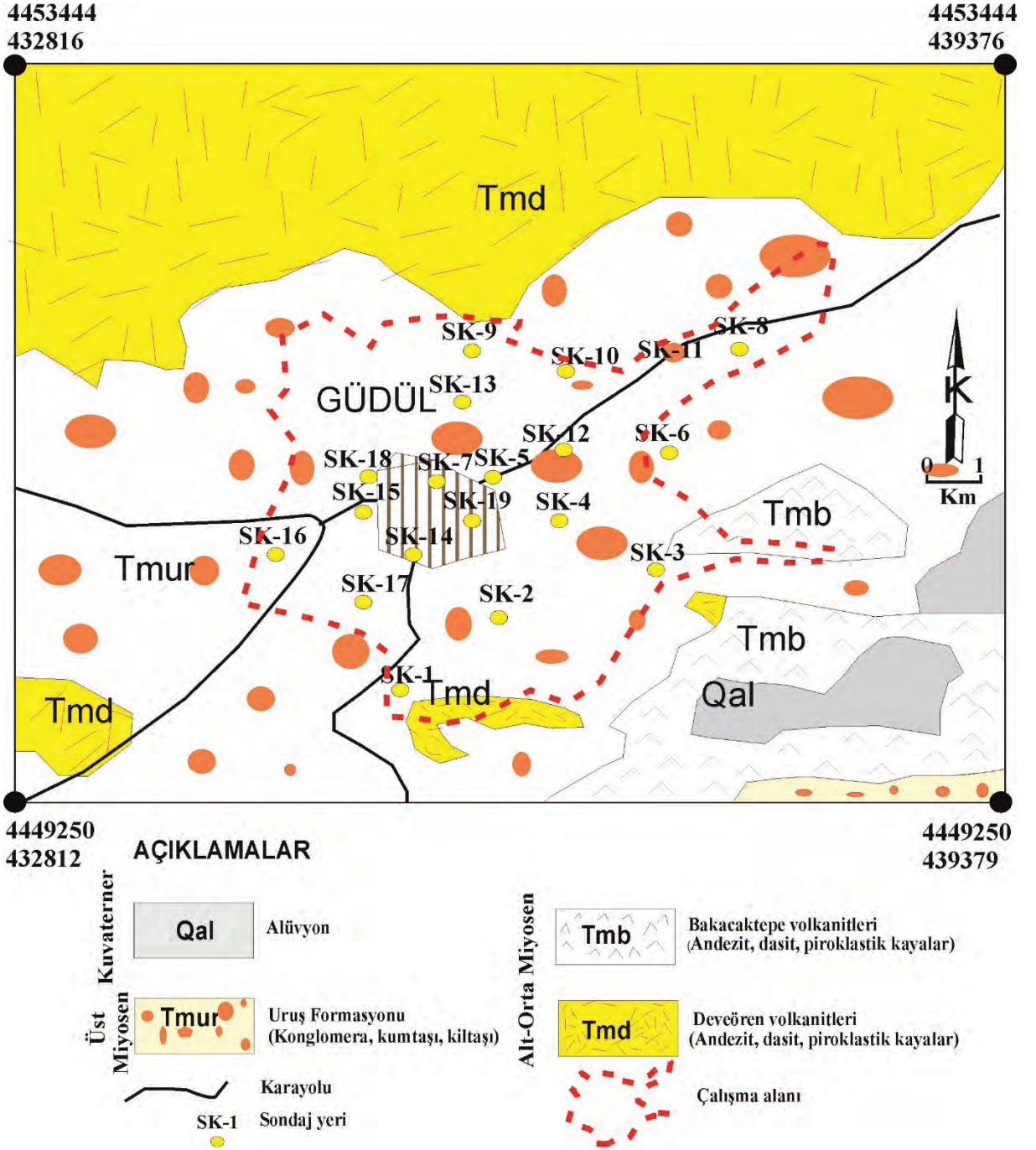
ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

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).

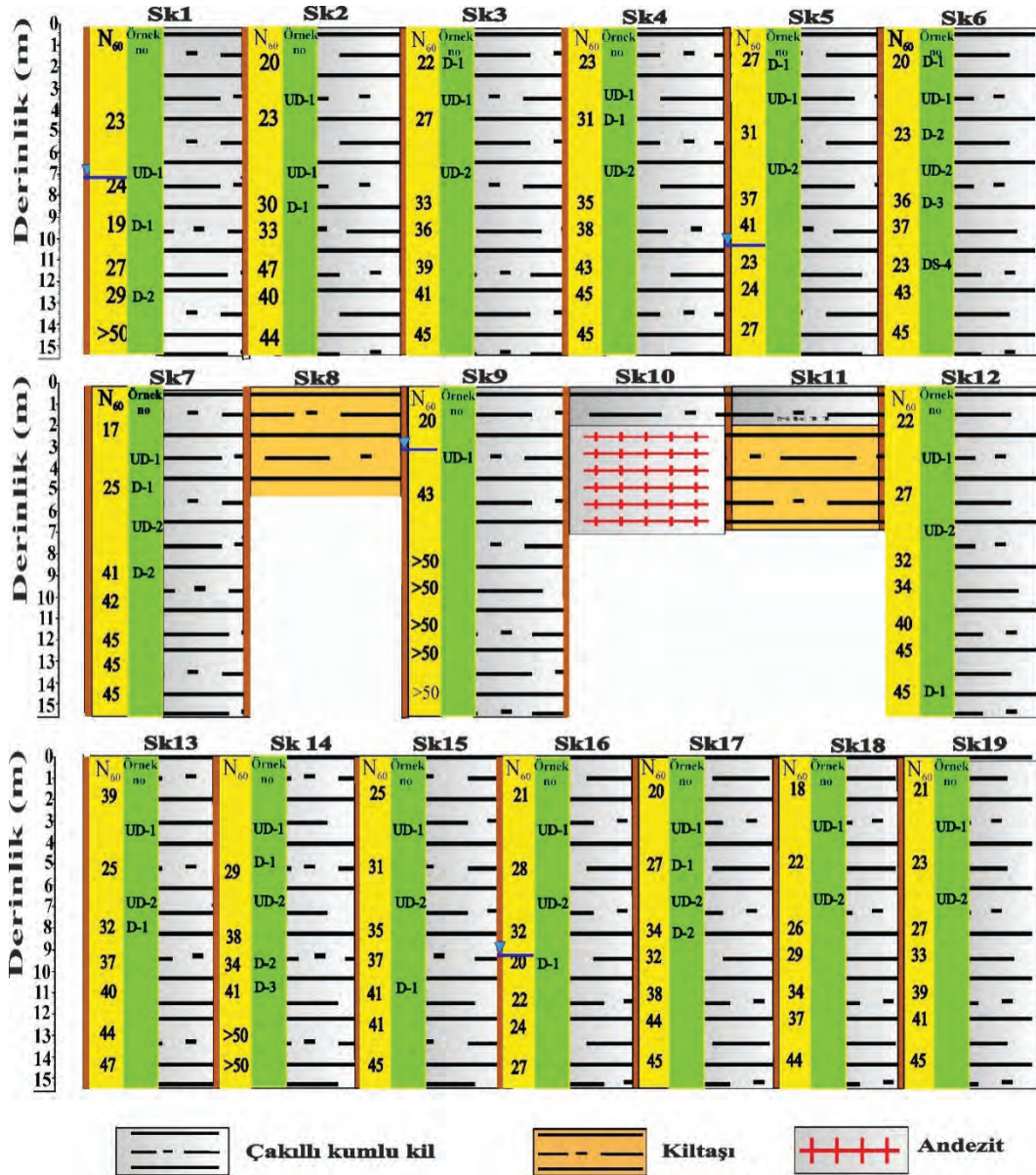
Örneklerin ıslak analiz ile tane boyu dağılım, doğal birim hacim ağırlığı (γ_n), doğal su içeriği (W_n), likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indeksi (PI), şişme basıncı (SP) ve şişme yüzdesi (S) belirlenmiştir. Tane boyu dağılım analizleri ASTM 421 (2018) ve ASTM 422 (2018), doğal birim 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 tanımlaması.

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_n (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 limit;PL.:Plastik limit; P.I: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.

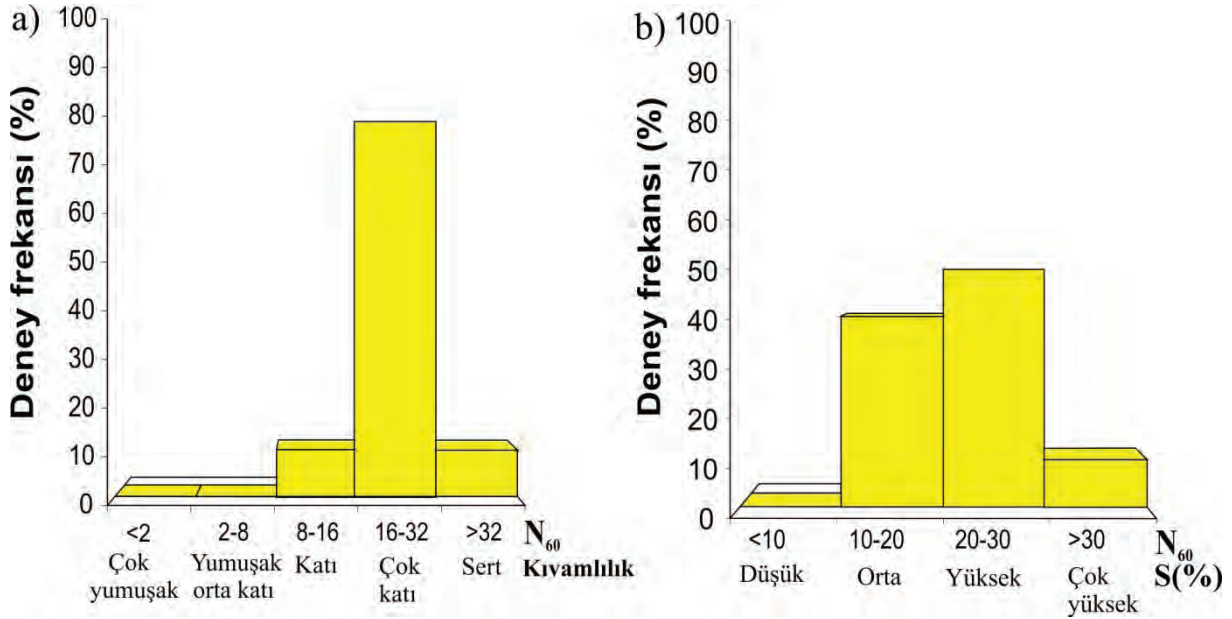
Çizelge 3'te literatürde yapılmış olan şişme sınıflandırmaları verilmiştir. Bu sınıflandırmalarda LL değer aralıkları (Holtz ve Gibbs, 1956; Daksanamurthy ve Raman, 1973; Chen, 1988), PI değer aralıkları (Seed vd., 1962; Mohan ve Goel, 1959; CMC, 2004), kil içeriği (CC) (Holtz ve Gibbs, 1956; Ac (Nelson 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) Dakanamurthy 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).

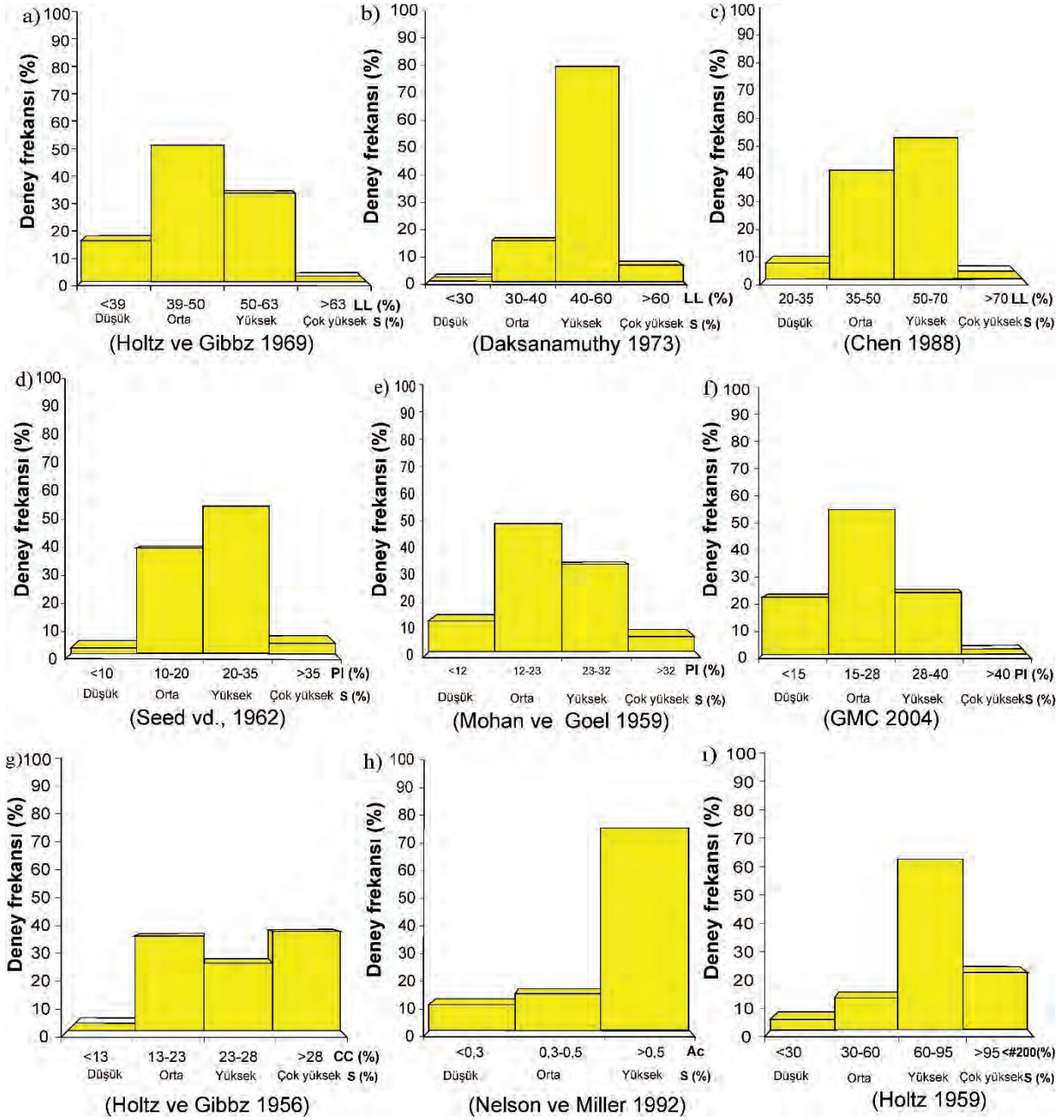
Killi zeminlerin aktivitesi (Ac), zeminin PI değerinin kil içeriğine oranı olarak tanımlanır.

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.

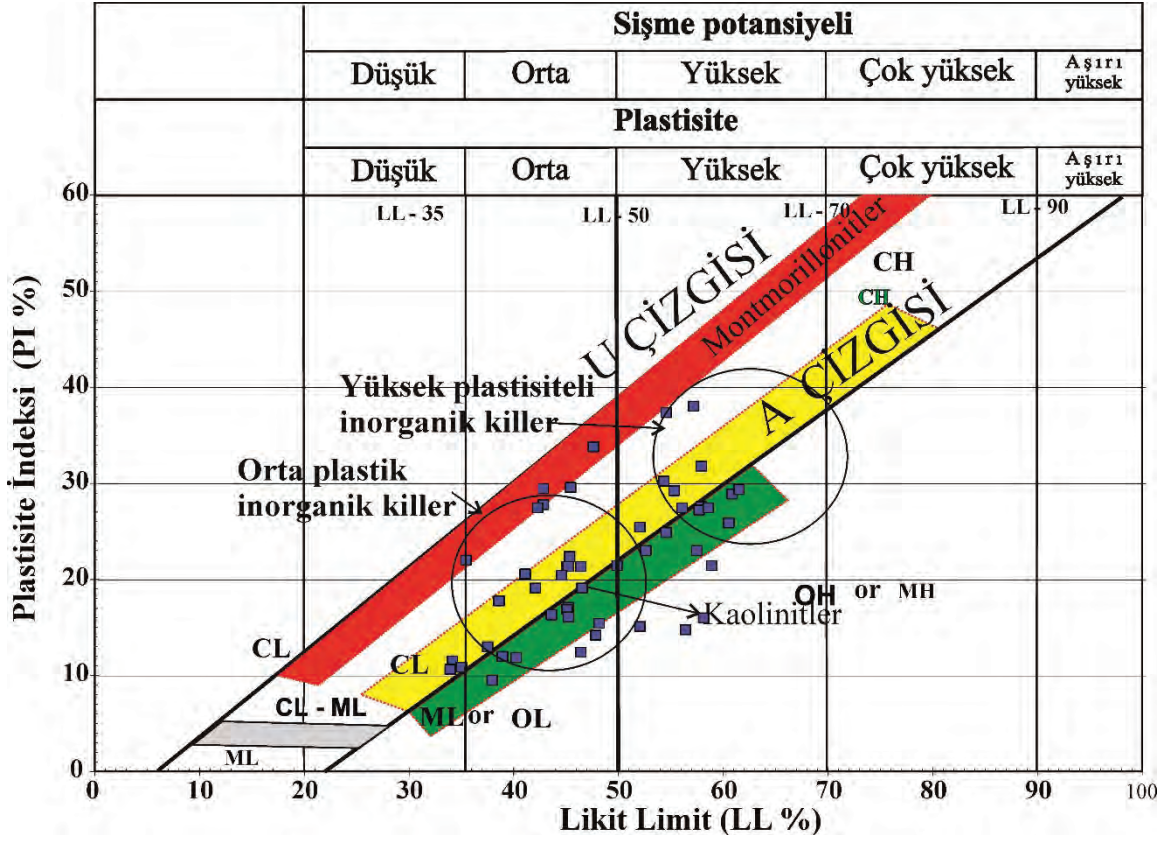
Seed vd. (1962) tarafından yapılan çalışmada kil boyutlu taneler ile aktivite arasındaki grafiği şişme potansiyeli açısından bölgelendirmişlerdir (Şekil 10). Şekil 10'da görüldüğü gibi kil boyu tane miktarının artması, şişme potansiyelinin artacağı anlamına gelmemektedir. Kil boyu tanelerin aktivitesi 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 Güdül 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 Güdül 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).

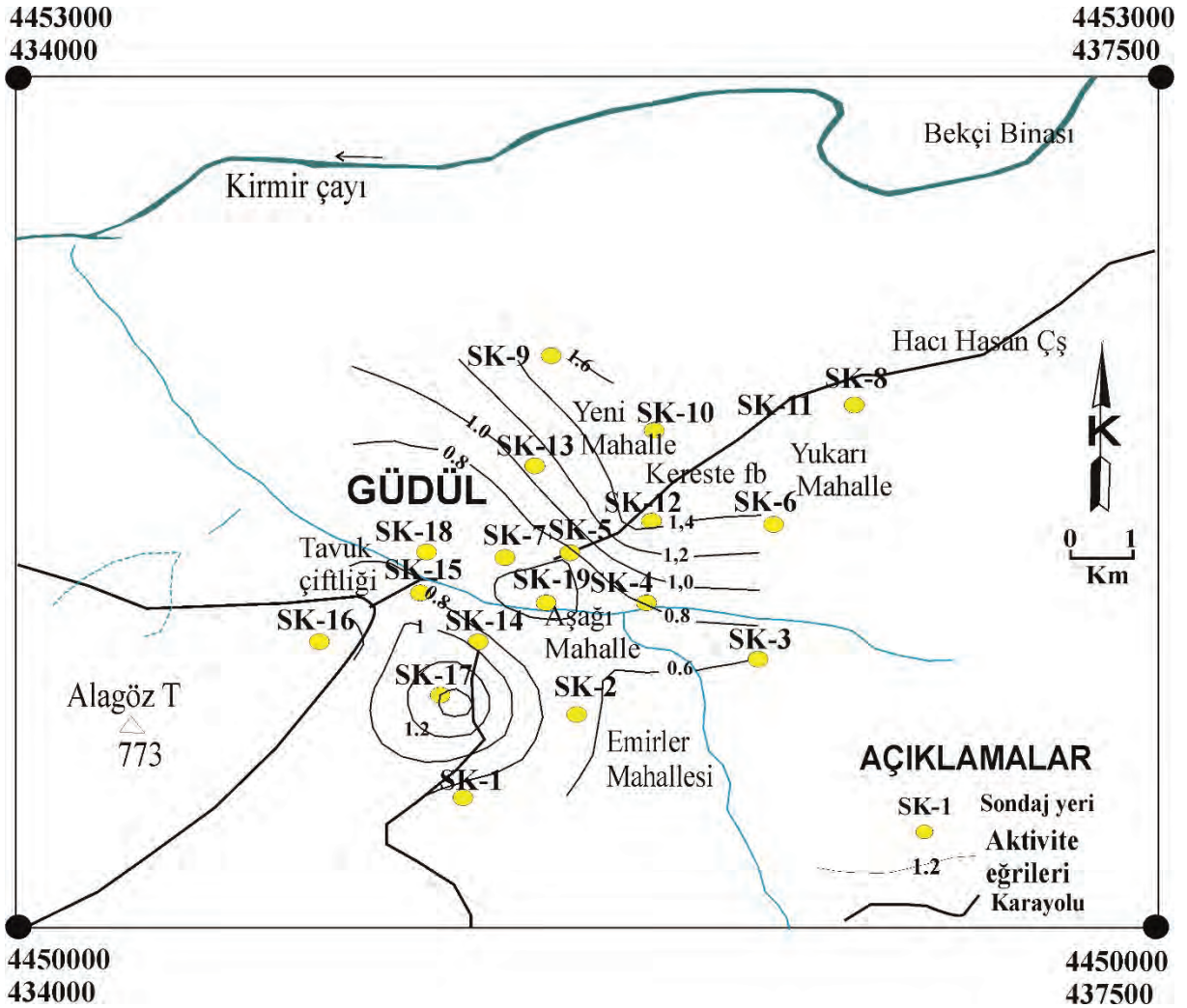
Sudan'daki şişebilir zeminlerin yapılarda meydana getirdiği hasarların değerlendirilmesi sonucunda Çizelge 4 oluşturulmuştur (Wayne vd., 1994). Bu çalışmada yapılan şişme basıncı deneylerine göre Güdül yerleşiminden alınan örneklerde ortalama 45.83 kPa ve en yüksek 111.29 kPa şişme basıncı değerleri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

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).

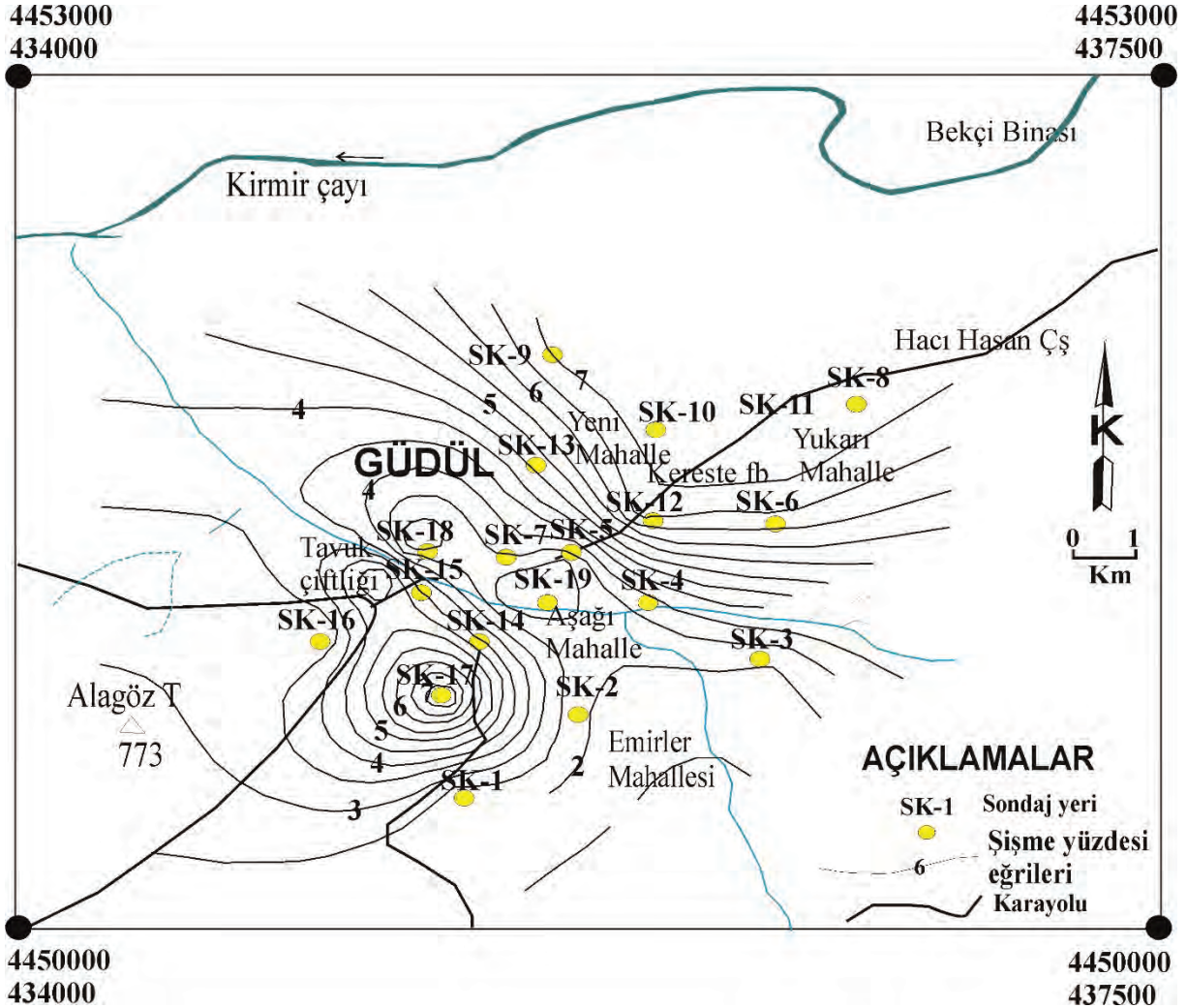


Şekil 12. Güdül ve çevresi zeminleri aktivite haritası.

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

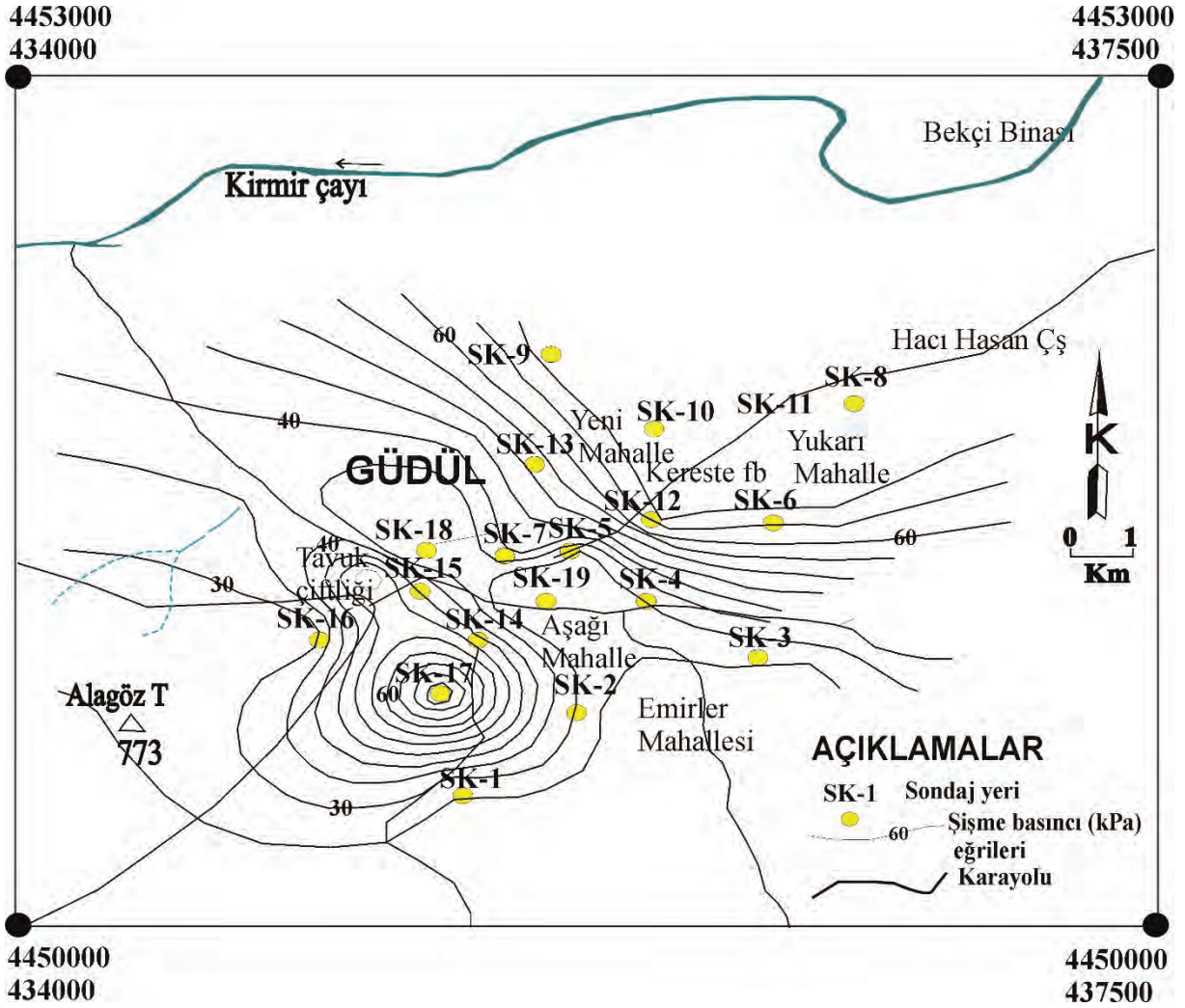
Güdül ve çevresi için hazırlanmış olan, şişme potansiyeli ve şişme basıncı haritaları Şekil 13 ve 14'te gösterilmektedir. Buna göre, Yeni Mahalle ve Yukarı Mahalle civarında şişme potansiyeli ve

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 abasında 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.

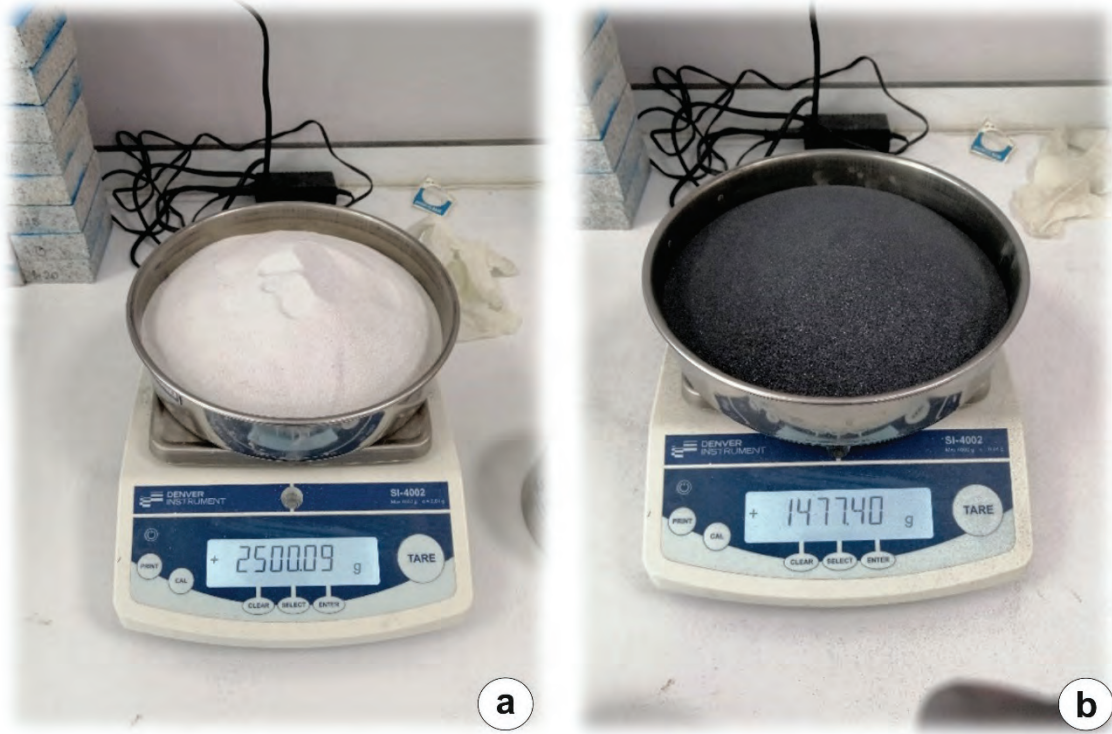
Bu çalışmanın ana amacı GDA deneyindeki sorunlara bir yaklaşımda bulunmaktadır. Bu amaç doğrultusunda GDA deneyinin sonuçlarının BA deneyi ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. GDA ve BA deneylerinde (TS EN 14157, 2017) farklı özelliğe sahip aşındırma tozları kullanılmaktadır (Şekil 2). BA deneyinde 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.

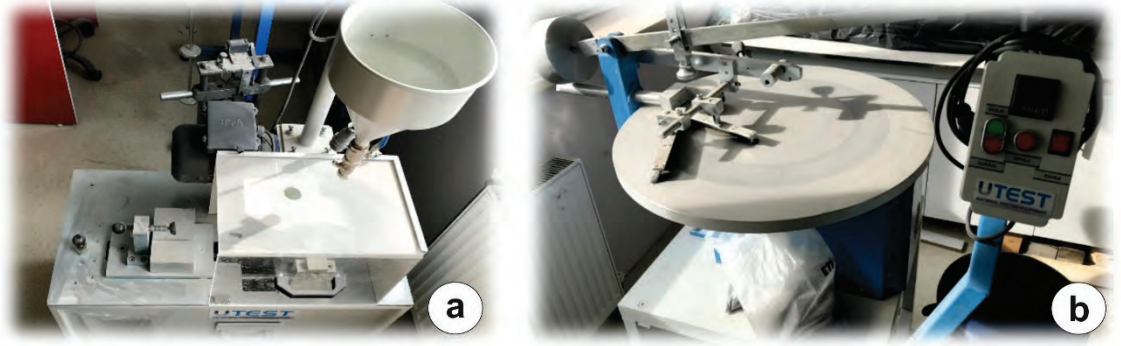


Şekil 2. Deneylerde kullanılan aşındırma tozlarına ait bir görüntü: (a) beyaz erimiş alümina korundum (GDA standardı), (b) siyah renkli yapay korundum (BA standardı).

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.

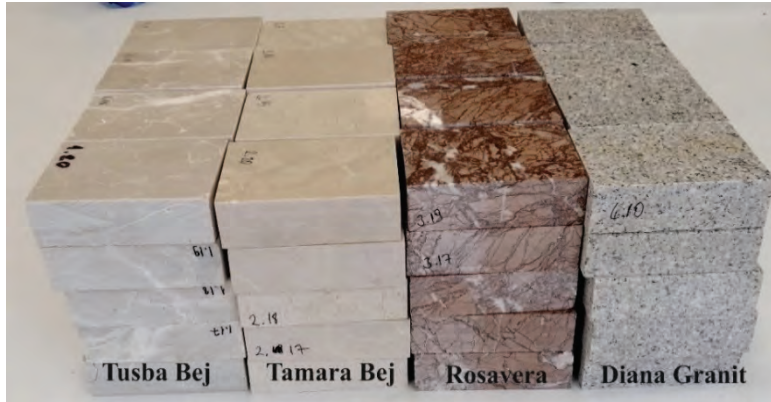
Figure 3. An image of Wide Wheel Abrasion (a) and Böhme Abrasion (b) devices.

BULGULAR ve TARTIŞMALAR

Seçilen Kaya Türlerinin Genel Özellikleri

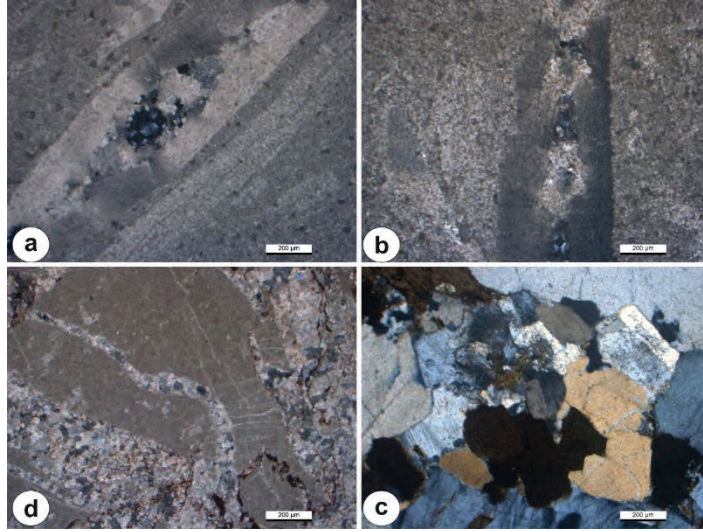
Bu çalışmada, bir mermer fabrikasından toplam 4 adet farklı kaya numunesi alınmıştır. Deneye tabi tutulan kayaların üçü kimyasal sedimanter (kireçtaşı) kaya gurubuna, biri ise magmatik kaya (granit) sınıfına aittir (Şekil 4). Sedimanter kayalar makroskobik olarak incelendiğinde bu örneklerin farklı renk, 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 Graniti).

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

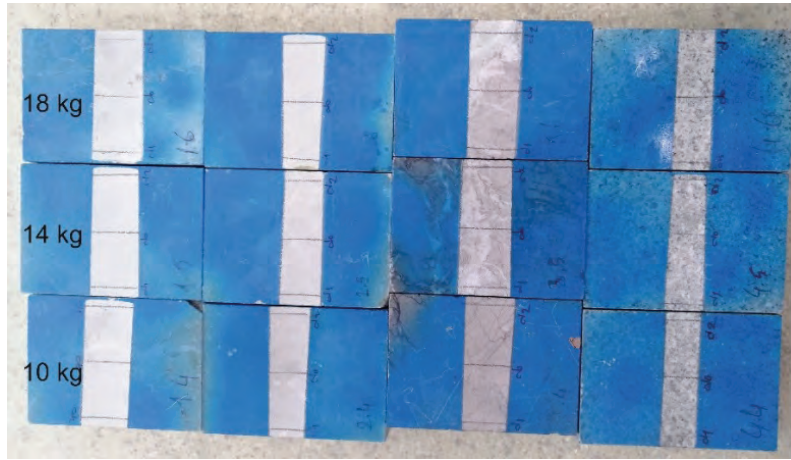
Her sıkıştırma yükünde yapılan GDA deneyi ve elde edilen sonuçlar standartta önerildiği şekilde Boulonnais Mermeri'nden elde edilen düzeltme katsayıları ile kalibre edilmiştir. Ölçülen değer + (20.0 – Kalibrasyon Değeri) eşitliği kullanılarak düzeltilmiş ve Düzeltilmiş Oluk Açıklığı (DOA) (mm) değerleri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

Örneklere 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.

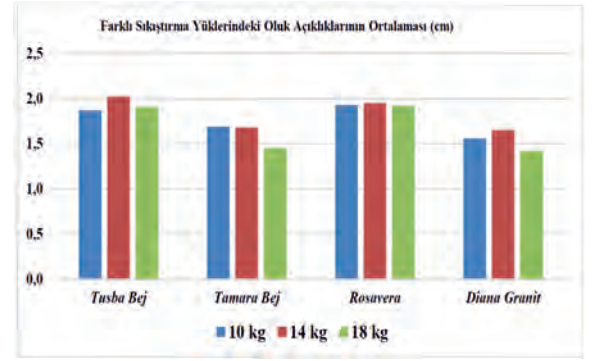
Özvan, İnan

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.

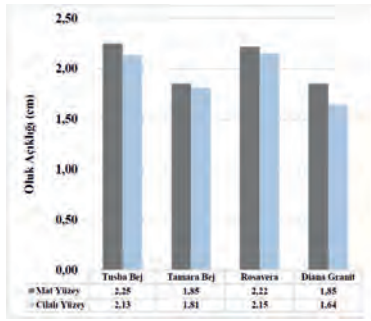


Şekil 7. Farlı sıkıştırma yüklerinde oluşan düzeltilmiş oluk açıklıklarına (DOA) ait ortalama değerleri gösteren bar diyagramı.

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 tozun, 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;

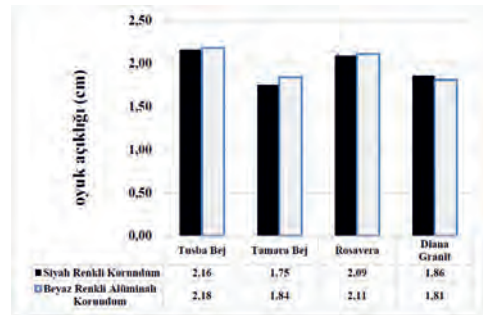
ST: Siyah renkli yapay korundum tozu kullanılarak yapılan GDA deneyi (cm)

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.

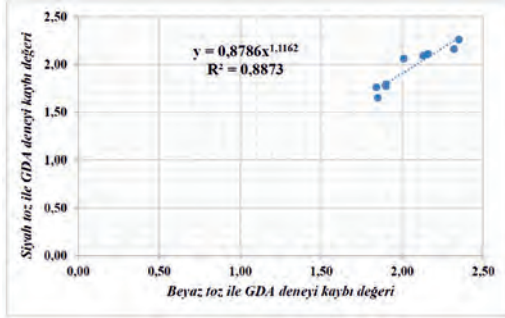
Örnek No	Siyah renkli yapay korundum (ST)	Beyaz erimiş alümina korundum (BT)
Tusba Bej	2.16	2.18
Tamara Bej	1.75	1.84
Rosavera	2.09	2.11
Diana Graniti	1.86	1.81



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

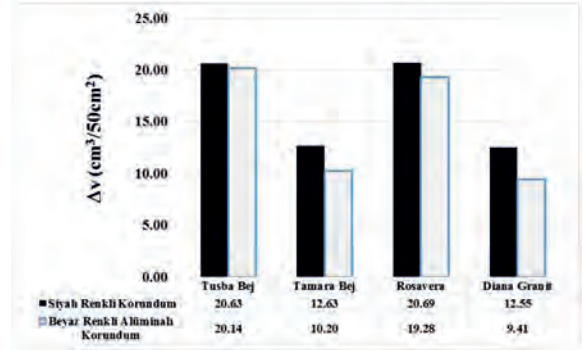


Şekil 10. GDA deneyinde farklı tozlardan elde edilen aşınmalar arasındaki korelasyon ilişkisi.

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 olduğu 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.

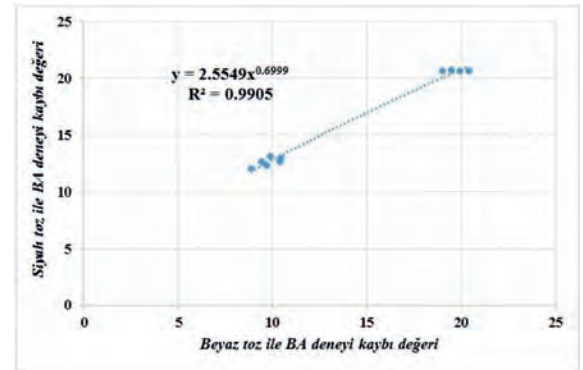
Figure 11. BA test results using two different abrasive powders.

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

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 kayalarda 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 yansımasına 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., Gökten 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).

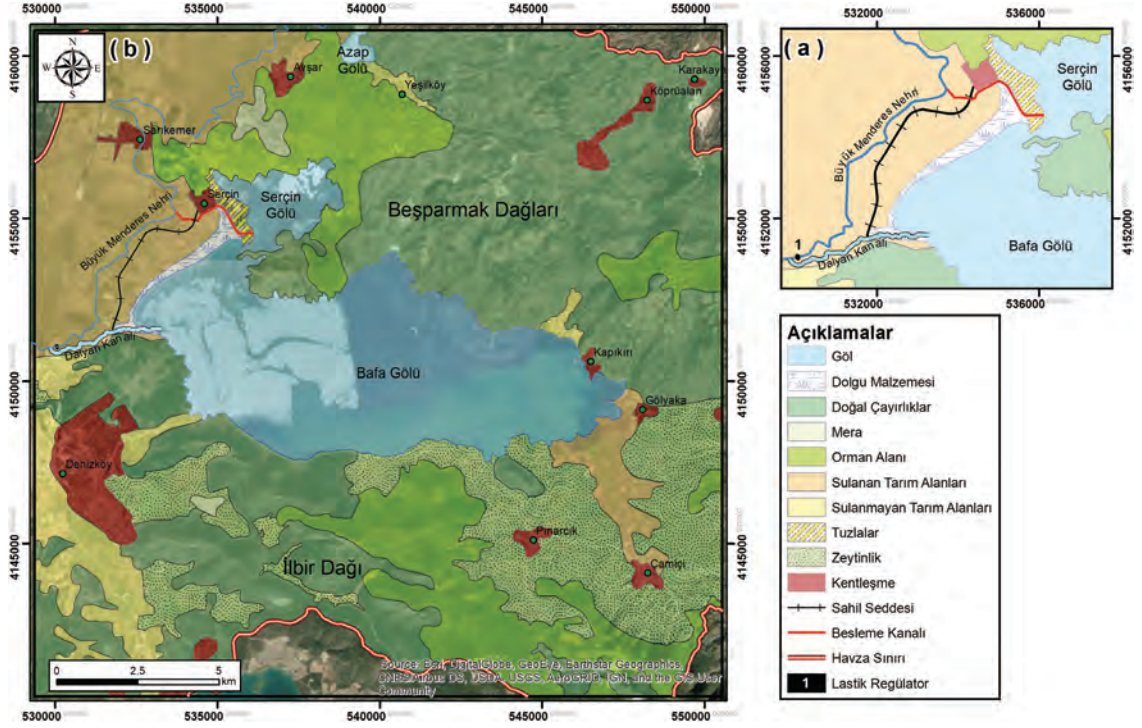
Günümüzde, Bafa Gölü dünyada nesli tükenmekte olan Cüce Karabatak (phalacrocorax pygmeus), Deniz Kartalı (Haliaeetus albilicilla) türlerinin yanı sıra binlerce su kuşu ve ördek tarafından beslenme ve barınma yeri olarak kullanılmaktadır (Koç, 2008). Göl aynı zamanda balıkçılık yapan yöre halkının geçim 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

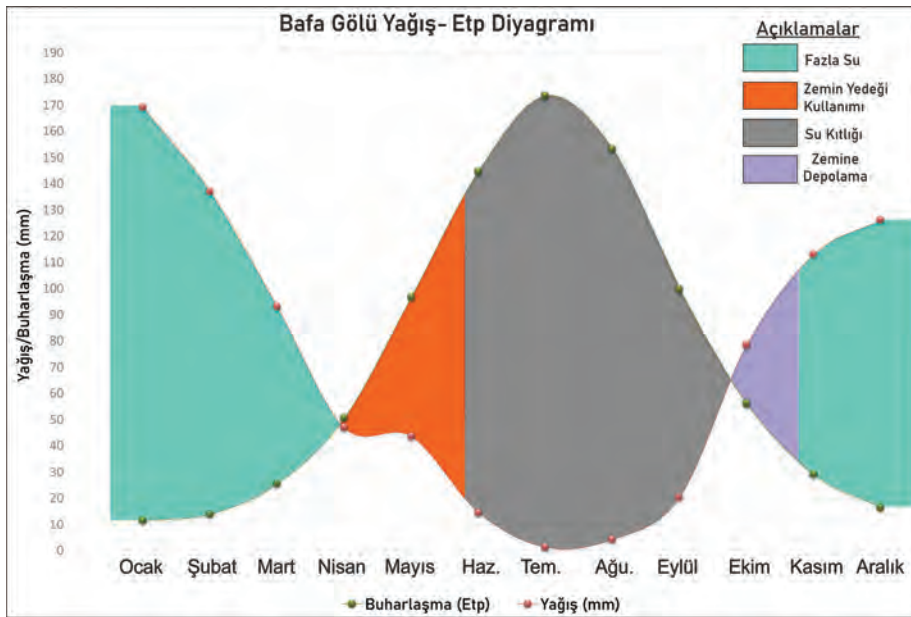
kasyon (Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+) analizleri Jeoloji Mühendisliği Bölümü Jeokimya Laboratuvarında Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi cihazında gerçekleştirilmiştir. Majör anyon tayini için volümetrik ve gravimetrik analiz yöntemleri uygulanmıştır. Eser elementler ise Hacettepe Üniversitesi Su 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

fayı 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

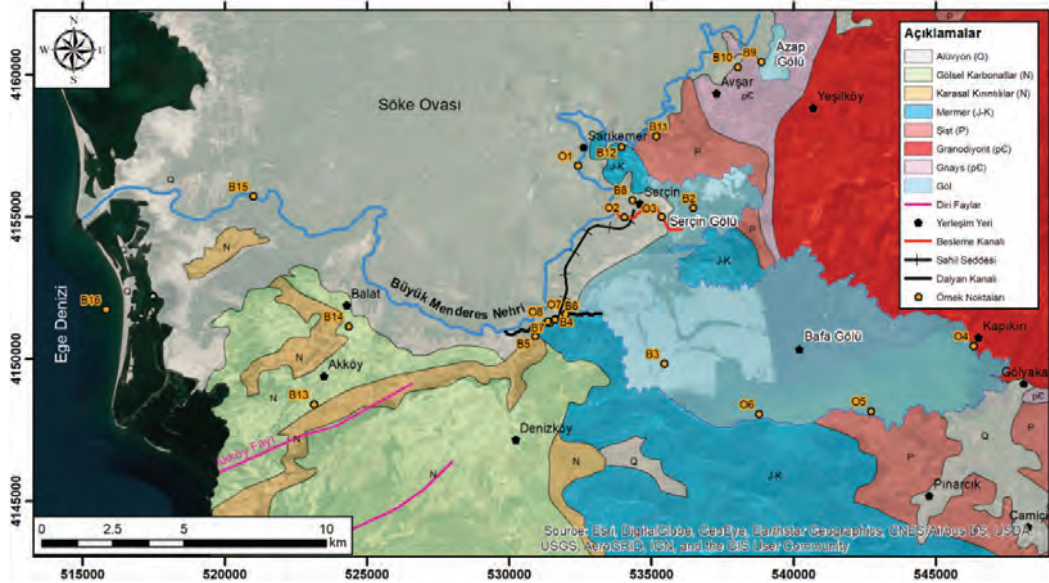
Prekambriyen yaşlı Granodiyorit biriminden oluşmaktadır. Gölün güneyinde yer alan İlbir dağı ise Jura-Kretase yaşlı mermer birimi ile kaplıdır. Gölün güneydoğusunda kalan Paleozoik şistler, İlbir Dağı ile Beşparmak Dağlarını ayırmaktadır (Şekil 3).

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 dağıının 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, çözünmüş 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 çözünmüş madde bolluğu, balık üretim verimini arttırmaktayken; jeotermal kökenli suların yüksek çözünmüş 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

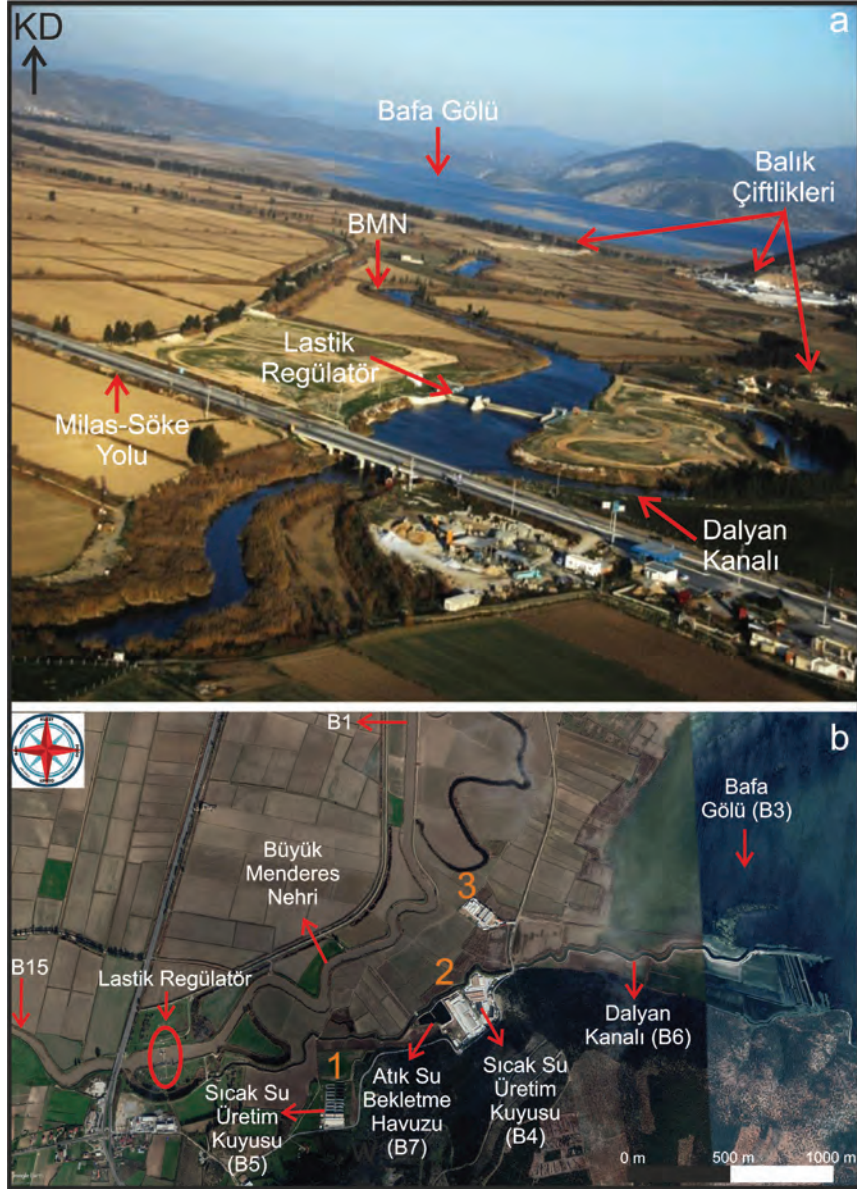
Kuyu Testleri

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

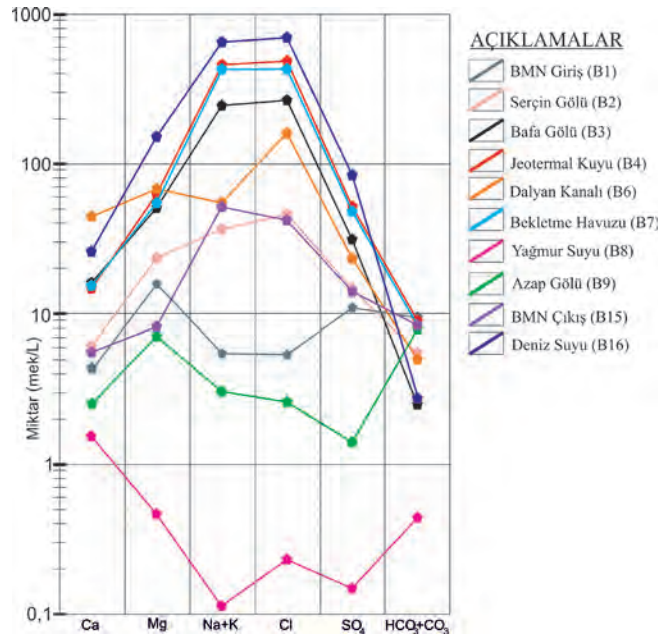
*4 Saptama limitinin altında kalmıştır. 0.001 µg/L'den küçük değerleri ifade etmektedir.

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

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

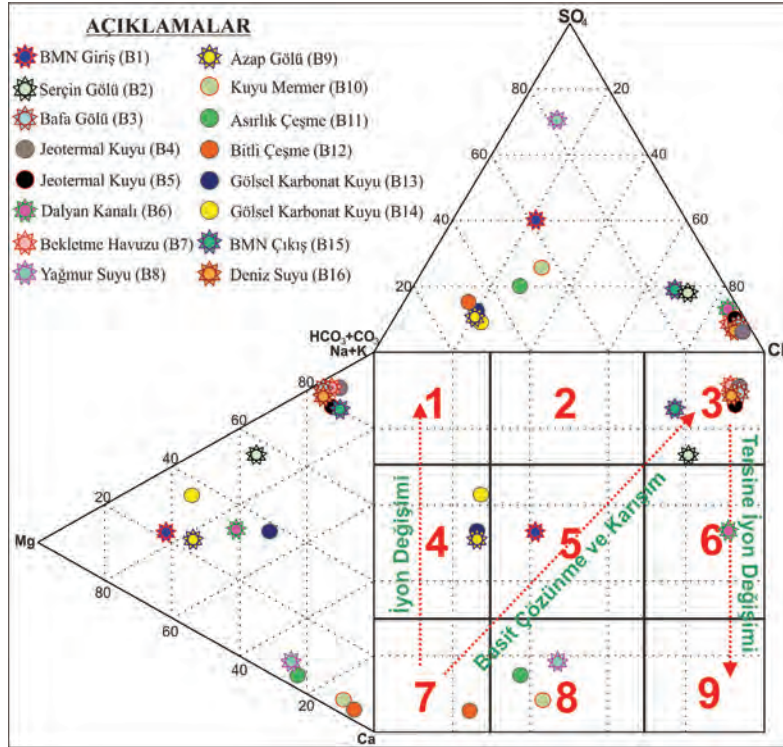
Schoeller (1935) diyagramında da görüldüğü üzere yüzey sularının kimyasal analiz sonuçlarına göre jeotermal kuyu (B4), Bafa Gölü (B3) ve bekletme havuzu (B7) deniz suyu girişimi etkisinde olan sulardır (Şekil 5). Yüzey ve yeraltı sularının Durov diyagramında gösterimi Şekil 6'da verilmiştir (Durov, 1948; 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.

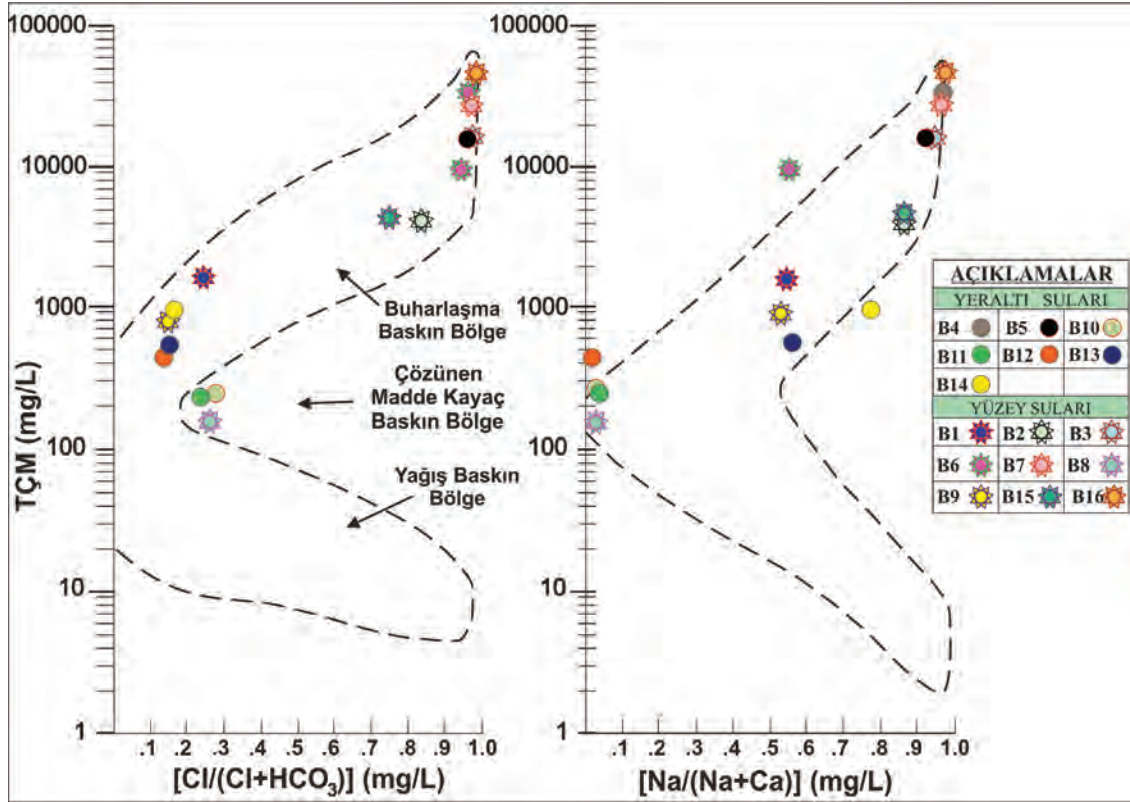


Şekil 6. Yüzey ve yeraltı sularının Durov (1948) diyagramında gösterimi.

Figure 6. Surface water and groundwater plotted in Durov (1948) diagram.

Gibbs diyagramı (Gibbs, 1970), suyun çözünmüş kimyasal bileşenlerinin kaynaklarını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Diyagramda insan kaynaklı (antropojenik) etkiler göz ardı edilmektedir (Varol ve Davraz, 2014). Büyük Menderes Nehri havza girişi örnekleme (B1), yağmur suyu (B8) ve Azap Gölü (B9) örneği hariç yüzey sularının tamamı deniz suyuna (B16) yakın alanlarda yer almaktadır (Şekil 7). Yeraltı sularında yağış katkısı olmakla birlikte, dolaşımdaki akiferlerin çoğunun çözünmüş madde kaynağı kayalardır. Jeotermal kuyu suları (B4 ve B5) ise deniz suyunun kimyasına yakınlığı ile

dikkat çekmektedir. Toplam çözünmüş madde (TÇM) miktarının artış gösterdiği sağ üst köşeye olan yakınlık, tuzlanmanın derecesini ifade etmektedir. Yıllık yağış ortalamasının çok düşük olması ya da tropikal iklim nedenleriyle yüzey sularının toplam çözünmüş madde miktarında artış beklenebilir ancak çalışma alanında bu koşullar sağlanmamaktadır. Her ne kadar yaz aylarının kurak geçtiği bölgede yüzey sularının çoğu buharlaşma baskısı nedeniyle çözünmüş madde miktarında artış gösterme eğiliminde ise de deniz suyuna yakınlık gösteren sulardaki madde bolluğunun nedeni, deniz suyu girişi ile açıklanabilir.



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). $C_{CI(Deniz)}$, deniz suyu örneğinin klorür bolluğunu ifade etmektedir ve B16 örnek noktası ile temsil edilmekte olup 24747 mg/L olarak hesaplanmıştır. $C_{CI(Örnek)}$ 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 şeridinde 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)

(NH₄) 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 (NH₄), 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 (µS/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 ulaşmamasıyla 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 taşınıyor olması 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 çözülmüş 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 değerinin 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 çözülmüş 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 süzölmüş olması da olasıdır.

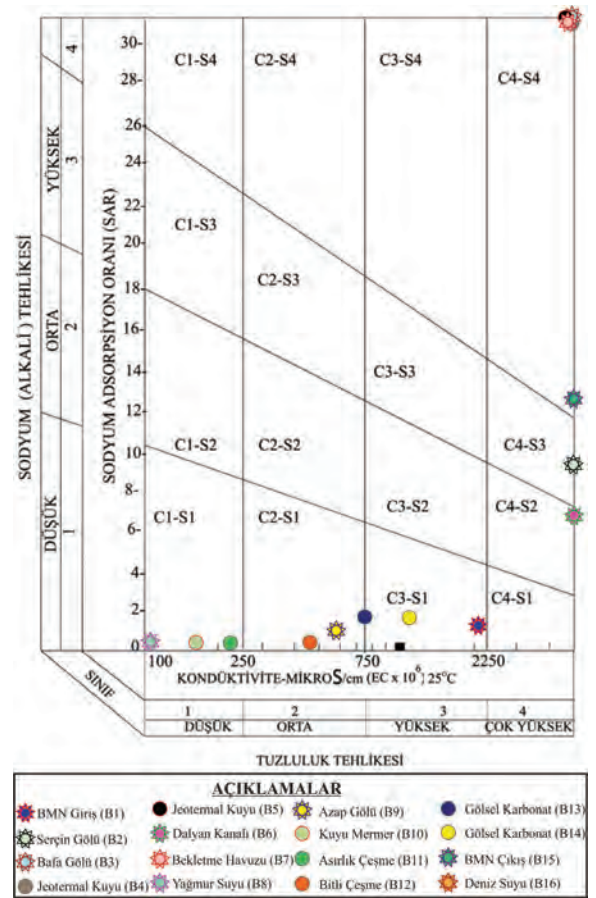
Sulama Suyu, Hayvancılık ve Alabalık Yetiştiriciliğine Uygunluk

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 gölssel 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 çalışmalarından (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 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 örneklemeinde 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 örneklemeinde 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, gölsel 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 işlemini 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 çözünmüş 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 çözünmüş 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., Alçiçek, 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 échanges 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.

