

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

-
- 1- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Cem KINCAL, Tümay KADAKÇI KOCA, Mehmet Yalçın KOCA
Jeolojik Bariyer Olarak Faylar, Örnek Çalışma: Çiğli Evka-5 Heyelanı (İzmir)
Faults as Geological Barrier, A Case Study: Çiğli Evka-5 Landslide (Izmir)
- 31- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Nihat DİPOVA, Bülent CANGİR
Lara - Kundu (Antalya) Düzlüğünün Sıvılaşma Şiddeti İndeksi'ne (LSI) Dayalı Sıvılaşma Haritası
Liquefaction Severity Index (LSI) – Based Liquefaction Map of the Lara - Kundu Plain (Antalya)
- 47- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Ebru ERİŞ
Karstik Bölge Akarsularında Taban Akışının Ayrılması
Baseflow Separation in Karstic Region Streams
- 59- *Araştırma Makalesi / Research Article*
Elham TAHMASEBZADEH BASTAM, Fatma GÜLTEKİN
Değirmendere (Trabzon) Havzası Kaynak Sularında Su-Kayaç Etkileşimi
Water-Rock Interaction of Springwater in the Değirmendere Basin (Trabzon-NE Turkey)
- 79- *Eleştirel İnceleme / Review Paper*
Muhterem DEMİROĞLU
Yeraltı Suları Bütçesi Tartışmaları
Groundwater Budget Discussions



Araştırma Makalesi / Research Article

Jeolojik Bariyer Olarak Faylar, Örnek Çalışma: Çiğli Evka-5 Heyelanı (İzmir)

Faults as Geological Barrier, A Case Study: Çiğli Evka-5 Landslide (Izmir)

Cem KINCAL, Tümay KADAKÇI KOCA, Mehmet Yalçın KOCA

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İZMİR

Geliş (Received): 17 Ocak (January) 2017, Düzeltme (Revised): 03 Nisan (April) 2017, Kabul (Accepted): 14 Nisan (April) 2017

ÖZ

İzmir bölgesindeki heyelanlar, yüksek yağışın, faylanmanın ve oldukça ayrıışmış volkaniklerin varlığının yanı sıra yol genişletilmesi, temel kazıları ve arsa temin etmek için eski dere yataklarının doldurulması gibi büyük ölçekli insan etkinlikleri nedeniyle de oluşmaktadır. Tüm bu aktiviteler kaya kütlelerinin yenilmeye karşı hassasiyetini arttırmakta veya önceden değişik nedenlerle hareket etmiş kaya ve zemin kütlelerini yeniden harekete geçirmektedir. Çiğli Evka-5 heyelanı, kütle hareketinin yönüyle fayın eğim yönünün örtüştüğü fay denetimli bir heyelandır. Kütle hareketinin tipi moloz akmasıdır. Aglomera ve filiş taban kayasında ters ve normal fayların geometrileri nedeniyle bir hendek/cep oluşumu belirlenmiş ve bu cebin heyelan mekanizmasıyla ilişkisi incelenmiştir. Jeolojik bariyer olarak ters fayın sahada olası bir derin kaymayı engellediği görülmüştür. Sığ derinlikte (8-15 m) gelişen heyelanın önlenmesine yönelik önerilen kazıkların yer seçiminde de ters fayın sağlam kaya özelliğindeki yükselen bloğu yarar sağlamıştır. Heyelan sahasında 12 noktada 30-70 m'ye kadar karotlu zemin sondajları açılmış ve 3 kuyuda presiyometre deneyleri ve 2 kuyuda ise inklinometre okumaları yapılmıştır. Kayma dairesi inklinometre okumaları; presiyometre ölçümleri, sondaj logları ve jeomorfolojik yapı değerlendirilerek bulunmuştur. Ölçümler ve arazi araştırmalarıyla bulunan kayma dairesinin yeri, şev stabilite analizlerinden elde edilenle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Çiğli (İzmir), Fay, Heyelan, Jeolojik Bariyer, Mühendislik Jeolojisi.

ABSTRACT

The landslides in İzmir region occur due to high rainfall, faulting, the presence of highly weathered volcanics as well as large-scale human activities such as road widening, foundation excavations and filling in old creek beds to form building site. All of these activities increase the vulnerability of rock masses to failure or reactivate rock and soil masses which fail due to various reasons mentioned beforehand. The Çiğli Evka-5 landslide is controlled by the faults where the sliding direction of the mass movement coincides with the dip direction of fault. Mass movement which developed on the disturbed hanging wall of the fault occurred in the type of earthflow. A trench/pocket was formed due to the geometries of the normal and reverse faults developed in agglomerate and the flysch base rocks. The relationship between the hanging wall fault pocket and the mechanism of the landslide is investigated in this work. It is also determined that the reverse fault as a geological barrier blocked a possible deep sliding in the area. It was benefitted from the rising block of the reverse fault revealing good rock mass characteristics during the decision phase of the location of proposed piles to prevent the landslide at shallow depth (8-15 m). Subsurface

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

geotechnical investigations in the landslide area included; 12 borings (core drillings) down to 30-70 m from the ground surface, inclinometric readings in 2 borings, and pressuremeter measurements in 3 borings. Slip circle was defined on the basis of inclinometric readings, pressuremeter measurements, core descriptions (geotechnical logging), and geomorphologic structure. The location of the slip surface defined by the measurements and in-situ survey is compared with that of derived from the slope stability analyses.

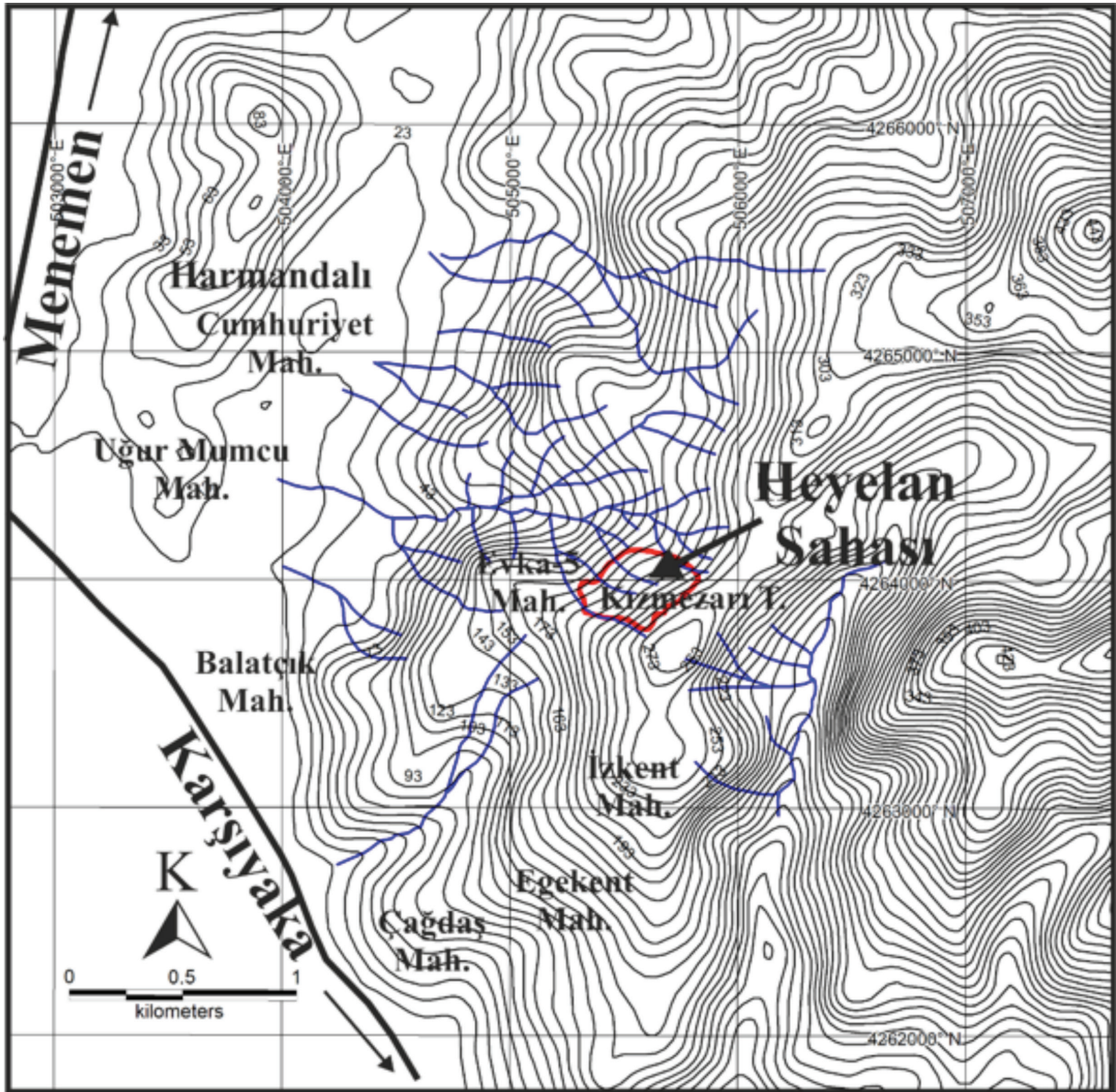
Keywords : Çiğli (İzmir), Fault, Landslide, Geological Barrier, Engineering Geology.

GİRİŞ

İzmir ve yöresinde meydana gelen heyelanların % 39.6'sı andezitik karakterdeki piroklastik kayalarda gelişmiştir ve bunlar çoğunlukla mal kayıplarına neden olmuştur (Tarcan ve Koca, 2001; Kıncal vd., 2009; Akgün vd., 2012). Bu heyelanların en büyükleri İzmir Körfezi'nin güneyinde Kadifekale yöresinde, kuzeyinde ise Çiğli ve Cumhuriyet semtlerinde yer almaktadır (Şekil 1). Kadifekale-Vezirağa ve Çiğli Evka-5 heyelanları, kütle hareketinin yönüyle fayın eğim yönünün örtüştüğü fay denetimli heyelanlardır. Çiğli heyelan sahası 1/5000 ölçekli K18-22d ve 1/1000 ölçekli K18-22d-1b paftalarının KB'da, İzmir Körfezi'nin kuzeyinde Çiğli ilçe merkezinin sınırları içerisinde yer alır (Şekil 1). Heyelan Kızmezarı Tepe'nin KB'ya eğimli, basamaklı morfolojiye sahip yamaçları boyunca meydana gelmiştir. Heyelanın etki sahası 114.600 m²'dir. Heyelanın kayma yönündeki (K55B) uzunluğu 335 m, bu yöne dik KD-GB yönündeki genişliği ise 345 m'dir. Heyelanın taç noktası (285 m) ve topuğu arasındaki kot farkı 95 m'dir. Bu değerler dikkate alındığında genel yamaç açısı yaklaşık 15° - 16°'dir. Yapılaşma öncesi topoğrafya incelendiğinde, KB-GD yönünde, birbirine paralel uzanmış dere yataklarının varlığı dikkati çeker (Şekil 1). Günümüzde heyelan sahasının KD'sunu sınırlayan dere yatağı hariç, diğerleri

arsa olarak değerlendirilmek üzere doldurulmuş, gömülü dere yatağı durumundadır ve yüzeyden izlenememektedir. Dere yataklarının akış yönleri KB'ya doğrudur.

Çiğli Toki Evleri bölgesinde heyelan hareketleri 2014 Aralık ve 2015 Ocak ayları arasındaki yoğun yağışlarla birlikte başlamıştır (Şekil 2). Heyelan nedeniyle binaların bahçelerinde, çitlerde deformasyonlar ve yollarda da gerilme çatlakları oluşmuştur. Ocak ayında 8930/1 sokak üzerinde yer alan C-10, C-11, ve C-12 nolu apartman bloklarının bazı dairelerinde verevine gelişmiş çatlaklar oluşmuştur. Binalar AFAD yetkilileri tarafından da incelenmiş ve tahliyeleri istenmiştir. Heyelanın etki alanı içerisinde 9 adet ve taç noktasının gerisinde 4 adet olmak üzere toplam 13 adet apartman bloğu, 1 dükkân, 1 oyun parkı, 1 otobüs durağı ve 1 ilkokul binası yer almaktadır. Heyelan nedeniyle oluşan çatlaklardaki açılmalar GPS yardımıyla takip edilmiştir. 50 noktada, haftada iki kez ölçüm yapılarak kayıtlar alınmıştır. Ölçümler 2015 Ağustos - Ekim ayları arasında yapılmıştır. Esas kayma bölgesiyle çökme bölgesi arasındaki maksimum toplam yer değiştirme miktarı 42 cm olarak ölçülmüştür. Ayrıca taç bölgesinde, V-şeklindeki kayma düzlemi boyunca yer değiştirmeler meydana gelmiş, asfalt yolda 50 cm'ye erişen düşümler gerçekleşmiştir (Şekil 3).



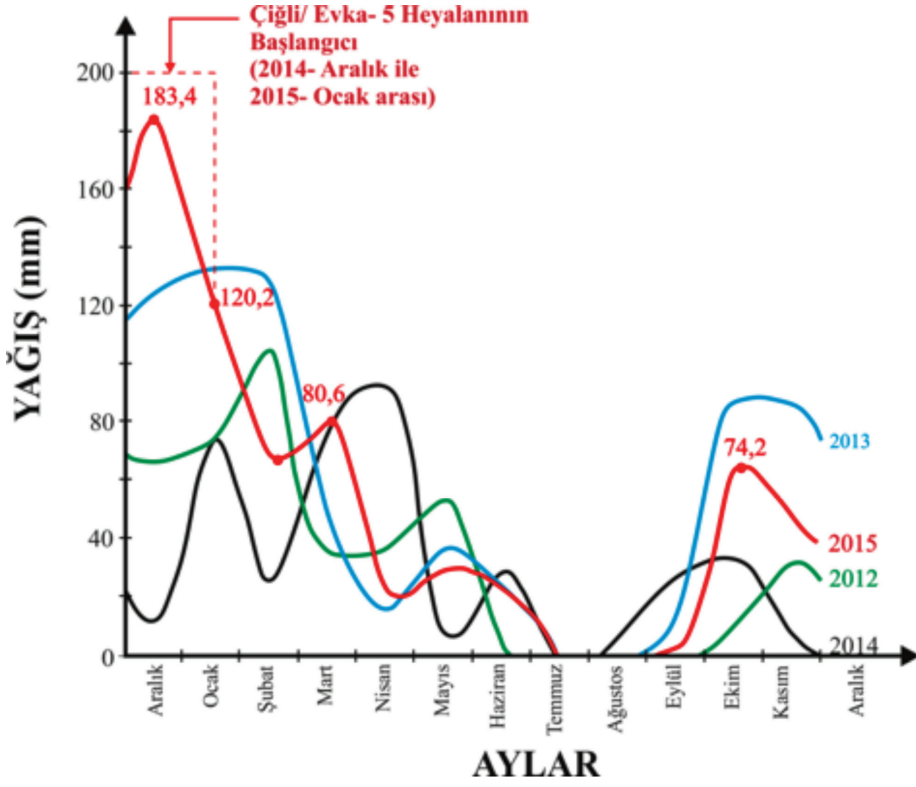
Şekil 1. Heyelan sahasının 1/25000 ölçekli topoğrafik haritadaki konumu.

Figure 1. Location of the landslide area on the topographic map with a scale of 1/25000.

C-10, C-11 ve C-12 nolu apartman bloklarının bazı dairelerinde verev şekilli çatlaklar, binaların etrafında yer alan kenar dolgularında ötelenmeler ve heyelanın kabarma bölgesinde, döşeme taşlarında da kabarma

nedeniyle yükselmeler şeklinde deformasyonlar gözlenmiştir. Tüm bu deformasyonlara karşın, binalarda düşeyden sapma veya geriye doğru yaslanma şeklinde dönel kayma hareket belirtileri gözlenmemiştir.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca



Şekil 2. İzmir için, 2012-2015 yılları arası aylık toplam yağış miktarı ortalaması.

Figure 2. Average amount of monthly total precipitation, for İzmir between 2012 and 2015).



Şekil 3. Çınar apartmanının kuzey cephesinde heyelan nedeniyle oluşan deplasmanlar.

Figure 3. Displacements occurred in the northern face of Çınar apartment due to the landslide.

YÖNTEMLER

Heyelan sahasında 12 noktada, derinlikleri 30 ile 70 m arasında değişen karotlu zemin sondajları açılarak jeolojik birimlerin düşey yöndeki, sondajlardan elde edilen kuyu logları denestirilerek de yanal yöndeki değişimleri incelenmiştir. Ayrıca karotlar loglanırken fay zonlarının yerleri (fay kili oluşumu ve yoğun çatlaklı zonlar), heyelan kayma dairesinin yer aldığı derinlik ve bu zonların etki mesafeleri araştırılmıştır. Sondajlar, heyelanın çökme, kabarma ve topuk bölgelerinde açılmıştır. Açılan sondajların numaraları, derinlikleri ve heyelanın hangi bölgesinde yer aldığı Çizelge 1'de verilmiştir. Zemin örnekleri üzerinde ASTM D. 422-63 (2007)'ye göre tane boyu dağılımı, ASTM (1971)'e göre ise kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Aglomera ayrışma ürünü killi zeminlerin makaslama dayanım

parametrelerinin değişiminin saptanmasına yönelik olarak konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) makaslama deneyleri ASTM (1979a)'ya göre yapılmıştır. Deney cihazıyla ilgili bilgiler Çizelge 1'de gösterilmiştir. Kalıcı makaslama kapasiteli ve deformasyon denetimli zemin makaslama cihazı kullanılarak gerçekleştirilen konsolidasyonlu-drenajlı makaslama deneyleriyle belirlenmiş 12 adet normal ve makaslama gerilmesi değerleri üç adet yenilme zarfının tayini için ayrıca değerlendirilmiş ve bu değerlendirmede doğrusal (Mohr-Coulomb) ve Eşitlik 1'de verilen eğrisel yenilme ölçütleri kullanılmıştır:

$$\tau = A (\sigma_n)^B \quad (1)$$

Konsolidasyonlu-drenajlı deneylerden elde edilen makaslama dayanım parametrelerinin şevlerin uzun dönemli duraylık analizlerinde kullanılması hedeflenmiştir.

Çizelge 1. Sondaj derinlikleri ve yer aldıkları heyelan bölgesi.

Table 1. Depths of the boreholes and their locations in the landslide area.

Sondaj No	Sondaj derinliği (m)	Heyelan bölgesi	Topoğrafik kot (m)
SK-1	44	Kayma bölgesi-çökme bölgesi sınırı	240
SK-2	50	Kayma bölgesi-çökme bölgesi sınırı	242
SK-3	50	Kayma bölgesi-çökme bölgesi sınırı	243
SK-4	55	Çökme bölgesi	233
SK-5	30	Çökme bölgesi	226
SK-6	70	Çökme bölgesi	216
SK-7	50	Kabarma bölgesi	222
SK-8	44	Çökme bölgesi	218
SK-9	45	Kabarma bölgesi	220
SK-10	48	Kabarma bölgesi	217
SK-11	50	Akma bölgesi	201.5
SK-12	52	Akma bölgesi	202

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

Çizelge 2. Deney aletlerinin özellikleri.

Table 2. Features of the experimental devices.

Adı	Deformasyon hızı değişimi		Yük halkası değişimi			Deney türü
	Aralığı (mm/dak)	Adedi	Aralığı (kg)	Adedi	Numune boyutları (cm)	
Direkt makaslama (Wykeham Farrance marka)	0.0020	25	200	5	6 * 6 * 2	Drenajlı
Serbest sıkışma dayanımı (Soiltest Chicago AP-170 Marka)	0.0006	25	200	5	-	Drenajsız

Kuyularda yeraltı suyu derinlikleri iyona duyarlı, kablolu derinlik ölçerler kullanılarak ölçülmüştür. Bu çalışmalara ek olarak, kuyularda yerinde deneyler (İnklinometre ölçümleri ve presiyometre deneyleri) gerçekleştirilmiştir. Böylece, yerinde deneylerle kuyu boyunca geçilen zemin seviyelerinin jeoteknik özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi toplanmıştır. İnklinometre ölçümleri, yüzey altındaki yanal deformasyonları ölçmek için kuyu içinde gerçekleştirilen bir deneydir (ASTM D4622-86 (1993)). Kayma dairesinin geçtiği yeri/zonu tespit etmek için iki kuyuda (SK-5 ve SK-8 sondaj kuyularında) inklinometre okumaları, buna ek olarak, 3 kuyuda da presiyometre deneyleri yapılmıştır. Presiyometre deneyi, uygulanan basınca karşı zeminde oluşan hacimsel deformasyon değerlerinin belirlenmesi ilkesine dayanır (ASTM D 4719). Kuyu çeperlerinde yer alan zeminin gerilme-deformasyon ($\sigma - \epsilon$) özelliği araştırılır. Araştırmada kullanılan presiyometre tipi, Menard Presiyometresi'dir. Presiyometre deneyi, şev stabilitesi çalışmalarında kayma zonlarının belirlenmesinde kullanılmakta olup, limit basınç (PL), presiyometre deformasyon modülü (E_m), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), ve presiyometre kayma modülü (G) gibi parametreler aşağıdaki eşitlikler ile belirlenmektedir.

$$G = \frac{E_p}{2} (1 + \nu) \quad (2)$$

$$E = \frac{E_m}{\alpha}, \quad (3)$$

Burada E_m presiyometre deformasyon modülüdür ($E_m = k \times \frac{\Delta P}{\Delta V}$). α ; zemin cinsine ve E_m/P_L^* oranına bağlı reolojik faktördür. P_L^* ; ise net limit basınçtır.

Heyelanın araştırılması çalışmaları için toplamda 9 hat üzerinde elektrik rezistivite tomografi (ERT) ve 8 hat üzerinde de aktif kaynak yüzey dalgası (MASW) çalışmaları yapılmıştır. Hem ERT hem de MASW ölçümlerinin alındığı hatlar seçilirken, maksimum derinlik ve veri kalitesi parametreleri dikkate alınmıştır. Elektrik rezistivite tomografi yöntemi, farklı zemin ve kayaların elektrik dirençlerindeki değişimler üzerine temellendirilmiştir. Bir zeminin rezistivitesi, su içeriği ve tuz konsantrasyonu arttığı için azalır. Suya doymuş killer, suyundeki serbest iyonların ve boşluk suyu basıncının göreceli yüksek olması nedeniyle düşük rezistivite değerleri verir. Rezistivite değerleri çamurtaşlarında 20-60 Ωm , killi, siltli zeminlerde ise (suya doymuş koşullarda) 1.5 – 15 Ωm mertebesindedir (Hunt, 2005). Heyelan sahasında hat uzunlukları 97 m ile 235 m. arasında değişen jeofizik profilleri boyunca ölçümler alınmıştır. ERT hatlarının toplam uzunluğu 1820 m'dir. Bu ölçümlerden yeraltı suyunun konumu da

belirlenmiş ve sondajlardan elde edilen yeraltı suyu derinlik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Uygulamada alan durumuna göre 6 nolu serim hariç (elektrot sayısı 36 alınmıştır), diğer tüm serimlerde 48 elektrot sistemiyle ölçü alınmıştır ve 2.5 m elektrot açıklığında maksimum 40 – 45 m derinliğe kadar veri toplanmıştır.

MASW çalışmaları 8 hat üzerinde, 24 kanallı uygulamayla gerçekleştirilmiştir (ERT-8 hattında MASW serimi yapılmamıştır). Uygulamada alan durumuna göre birbirini izleyen serimler halinde veri toplanmıştır. Yapılan çalışmada yalnızca 4 nolu serimde jeofon aralığı 3 m, diğer serimlerde ise 2 m olarak seçilmiştir. MASW hatlarının toplam uzunluğu 1853.5 m'dir. Bu ölçümlerle Vs-dalga hızının derinlikle değişimi incelenmiştir. Ayrıca yeraltındaki kütle yer değiştirmeleri de yorumlanmıştır.

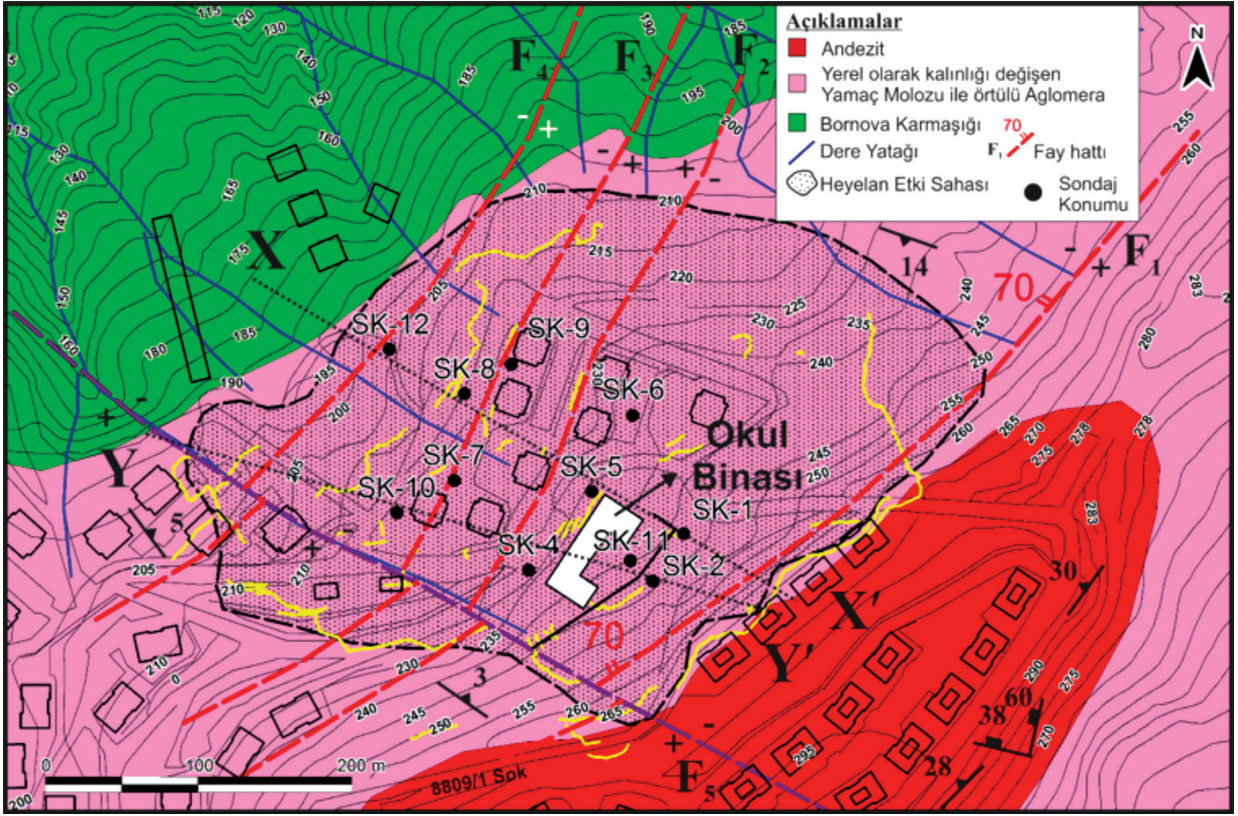
Şevlerin duraylılığını değerlendirmek için kullanılan birçok geleneksel ve sayısal teknikler vardır. Geleneksel teknikler limit denge tekniklerini ve kinematik analizleri içerir. Heyelan sahasının duraylık incelemeleri iki boyutlu geleneksel limit denge tekniği (the two dimensional conventional limit equilibrium) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Limit denge yöntemi (LEM) güvenlik sayısını (FoS) tahmin etmek için olası kayma yüzeyi üzerinde yer alan kayması muhtemel kütleyle düşey farklı büyüklükte dilimlere ayırarak inceler. Dairesel ve daireysel olmayan limit denge yöntemleri sadece yenilmesi muhtemel veya kayma yenilmesine uğramış tüm kütlelerin dengesini dikkate alır. Yöntem yüzeyin makaslama dayanımıyla bu yüzey üzerinde hareket eden (aktif olan) makaslama gerilmesi arasındaki oran olan güvenlik sayısını kritik kayma yüzeyi boyunca belirler. Dilim yöntemi üzerine temellendirilmiş olan basitleştirilmiş Bishop Yöntemi, tüm lokasyonlarda güvenlik

katsayısını hesaplamak için limit denge analizini kullanır. Bu yöntemde, yenilmenin herhangi bir nokta üzerinde merkezlenmiş dairesel bir kayma yüzeyi üzerinde yer alan kaya/zemin kütlelerinin rotasyonu (daireysel hareketiyle) meydana geldiği var sayılır. Dilimin kenarına etkiyen kuvvetlerin yatay olduğu düşünülür ve dilimler arası makaslama gerilmelerinin olmadığı kabul edilir (Bishop, 1955). Toplam normal kuvvet her bir dilimin tabanının orta noktasında tesir eder ve düşey yöndeki kuvvetler toplanarak türetilir. Bu çalışmada heyelan şevinin limit denge analizi basitleştirilmiş Bishop Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler Slide V.6 bilgisayar programı (Rocscience, 2010) kullanılarak yürütülmüştür.

Jeoloji

İnceleme alanı ve yöresinde temeli, Üst Kretase–Paleosen yaşlı, kumtaşı-şeyl aralanmasından oluşmuş ve içerisinde değişik büyüklükte kireçtaşı blokları bulunduran “Bornova Karmaşığı” (filiş) oluşturur. Heyelanın topoğrafyasında, 190-200 m kotlarının altında, sahanın kuzeybatısında yer alan binaların temel kotunda birimin yüzleklerine rastlanır (Şekil 4). Gerek yüzleklerden, gerekse de sondajlardan elde edilen karot tanımlamalarından, karmaşığın kumtaşı baskın bir litolojiden oluştuğu anlaşılmıştır. Kıvrımlı ve kırıklı bir yapıya sahip Bornova Karmaşığı'nın üzerine ayrımlı kaya uyumsuzluğu ile doğrudan Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı, andezitik karakterde Yamanlar Volkanitleri gelir (Akartuna 1962; Kıncal 2005, Şekil 4). Heyelan sahası ve yöresinde andezitik karakterdeki volkanik kayalar; bloklu yapıya sahip aglomeralar ve andezit lavlarıyla temsil edilirler.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca



Şekil 4. Heyelan sahasının jeolojisi haritası.

Figure 4. Geological map of the landslide area.

Andezitler 270 m kotlarının üzerinde yer alır. Akma bant yapıları ve soğuma çatlaklarıyla tipiktirler. Aglomeralar 270 m kotunun altında, 190 m kotuna kadar geniş bir alanda, oldukça veya tamamen ayrılmış olarak yer alırlar. Yer yer yığılma şeklinde ve üzerine geldiği topoğrafyaya bağlı olarak kalın bantlı yerleşim şekilleri gösterirler. Bazen bu bantlarla uyumlu dokanıklara sahip ince, devamlı olmayan düzeyler şeklinde, beyaz renkli tüflerle birlikte gözlenirler. Heyelan sahası ve yöresinde yamaç molozları topoğrafyanın sekiler yaptığı basamak düzlüklerinde ve eski dere yataklarının vadilerinde yer alır. Yamaç molozları; andezit çakıl ve bloklarının kum, silt ve kil boyutu zemin içinde yer aldığı, orta-katı, genellikle nemli bir

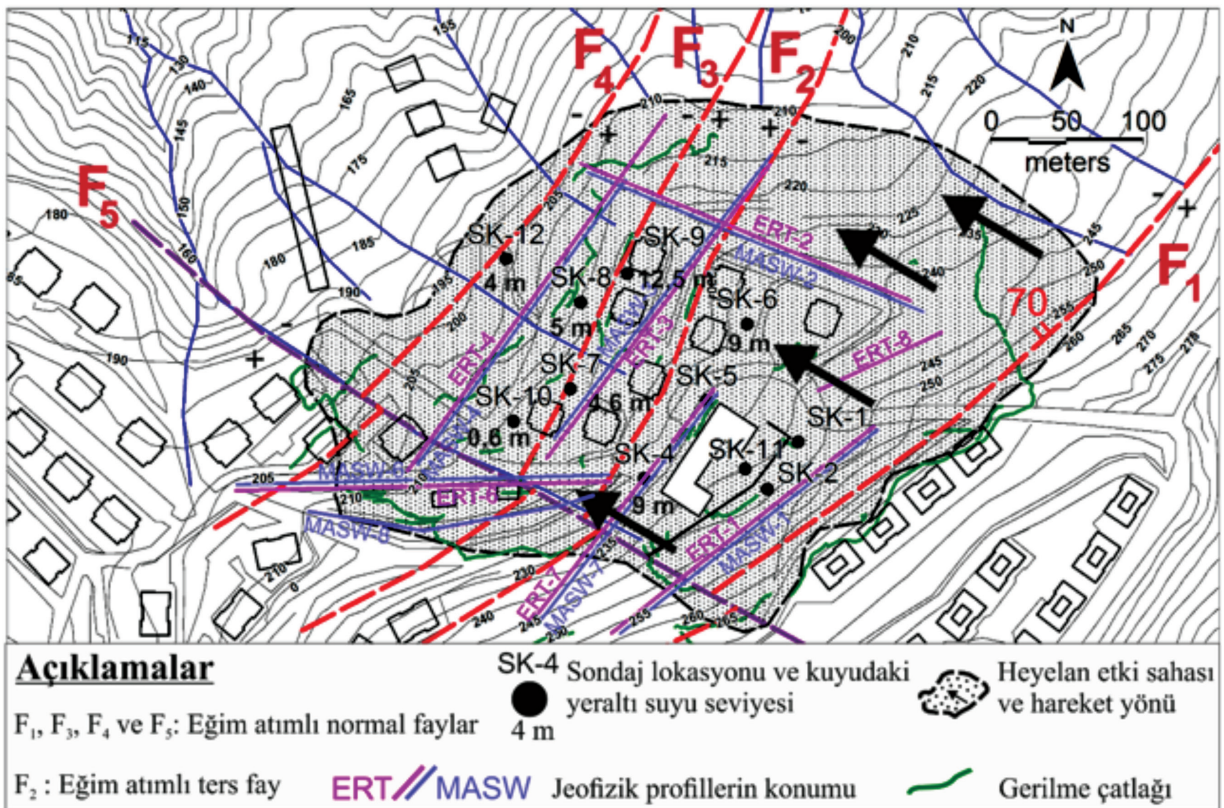
malzeme özelliğindedir. Heyelan sahasında en tipik ve en kalın olarak, 260 m kotlarında yer alan F_1 fayının aynasıyla ilköğretim binasının yer aldığı arazi kesimi arasında gözlenirler (Şekil 4).

Faylar

Heyelan sahasında beş adet fay tespit edilmiştir (F_1 , F_2 , F_3 , F_4 ve F_5 fayları). F_1 fayı inceleme alanında gözlenen en büyük faydır (Şekil 4). F_5 fayı hariç diğer faylar, F_1 fayına bağlı olarak gelişmiş basamak faylarıdır. F_1 , F_2 , F_3 ve F_4 faylarından F_2 fayı hariç diğerleri eğim atımlı normal fay özelliği taşımaktadır. F_2 ise ters fay özelliği sunar. En genç fay olarak F_5 fayı diğer tüm fayları keser konumdadır (Şekil 4).

Aglomeralar ve Bornova Karmaşığı'na ait kayalar önce F_1 , F_2 , F_3 , F_4 faylarıyla kırılmış ve atılmıştır (Şekil 5). Daha sonra F_5 fayıyla kesilmişlerdir. F_1 fayı (K 65 D / 71 KB) yaklaşık 4 km uzunluğunda ve incelenen alanda morfolojiyi denetleyen ana yapısal eleman olarak dikkati çekmektedir (Şekil 1). F_1 normal fayının düşen bloğu üzerinde diğer faylar (F_2 , F_3 ve F_4 fayları) yer almaktadır. F_1 fayının düşey atımı 48 m, diğer fayların ise 3 - 15 m arasında değişmektedir. Heyelan sahası içerisinde F_1 , F_2 , F_3 ve F_4 faylarının kayma düzlemlerinin eğim yönleri kuzeybatıdır (Şekil 5). F_1 normal fayı ile F_2 ters fayı (K 25 D / 70 KB) temel kayada farklı fay geometrileri nedeniyle bir hendek/cep

oluşumuna neden olmuştur (Şekil 6). Bu yapı F_5 fayıyla kesilmiş ve tüm sistem fayın aynasına doğru eğimlenmiştir. F_2 fayının eğim yönünde Bornova Karmaşığı birimi yükselmiş ve fay zonunda kendinden daha genç aglomeralarla yan yana gelmiştir. Bir diğer anlatımla, fayın düşen bloğu önünde bir cep meydana gelmiştir. Bu cep heyelan sahasının güneydoğusunda F_1 normal fayıyla, kuzeybatısında ise F_2 ters fayıyla, KB-GD yönünde de F_5 fayıyla denetlenmiştir. Cebin yüzeyden 60 m derinliğe kadar indiği açılan sondajlardan anlaşılmıştır. F_5 fayı eğim atımlı normal fay özelliğindedir ve heyelan sahasını güneybatıdan sınırlamaktadır (Şekil 5 ve 6).



Şekil 5. Evka-5 heyelan sahasında gözlenen faylar, sondaj lokasyonları ve jeofizik ölçüm hatları.

Figure 5. Faults observed in Evka-5 landslide area, borehole locations, and geophysical measurement lines.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

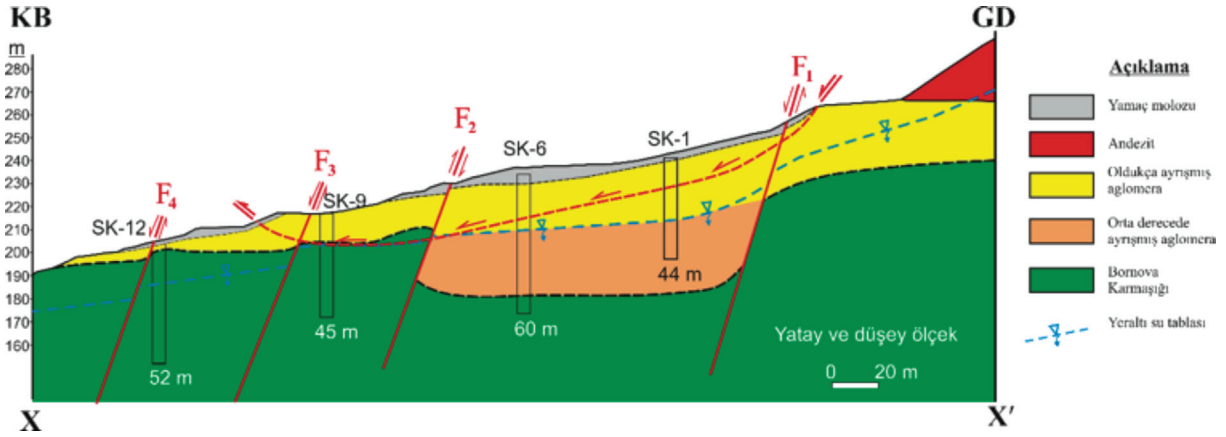
F_5 fayının diğer faylarla ve heyelanın hareket yönüyle olan konumsal ilişkisi Şekil 7'de verilen stereografik projeksiyon üzerinde gösterilmiştir. F_5 fayının F_1 normal fayıyla arasındaki dar açı stereografik net üzerinde 50° ($\widehat{P_{F_1}} - \widehat{P_{F_5}} = 50^\circ$), F_2 , F_3 ve F_4 faylarının oluşturduğu kutup yoğunlaşma noktasıyla da 87° 'lik açı yaptığı ($\widehat{P_F} - \widehat{P_{F_5}} = 87^\circ$) belirlenmiştir (Şekil 7). F_5 fayı, F_1 fayının düşen bloğu üzerinde yer alan F_2 , F_3 ve F_4 faylarıyla yaklaşık dik açı oluşturmaktadır.

Yeraltı suyu durumu ve jeofizik ölçümler

Yeraltı suyunun konumu/derinliği bazı sondaj kuyularında (SK-4, SK-6, SK-7, SK-9 ve SK-10 kuyuları) su seviyesi ölçümleri,

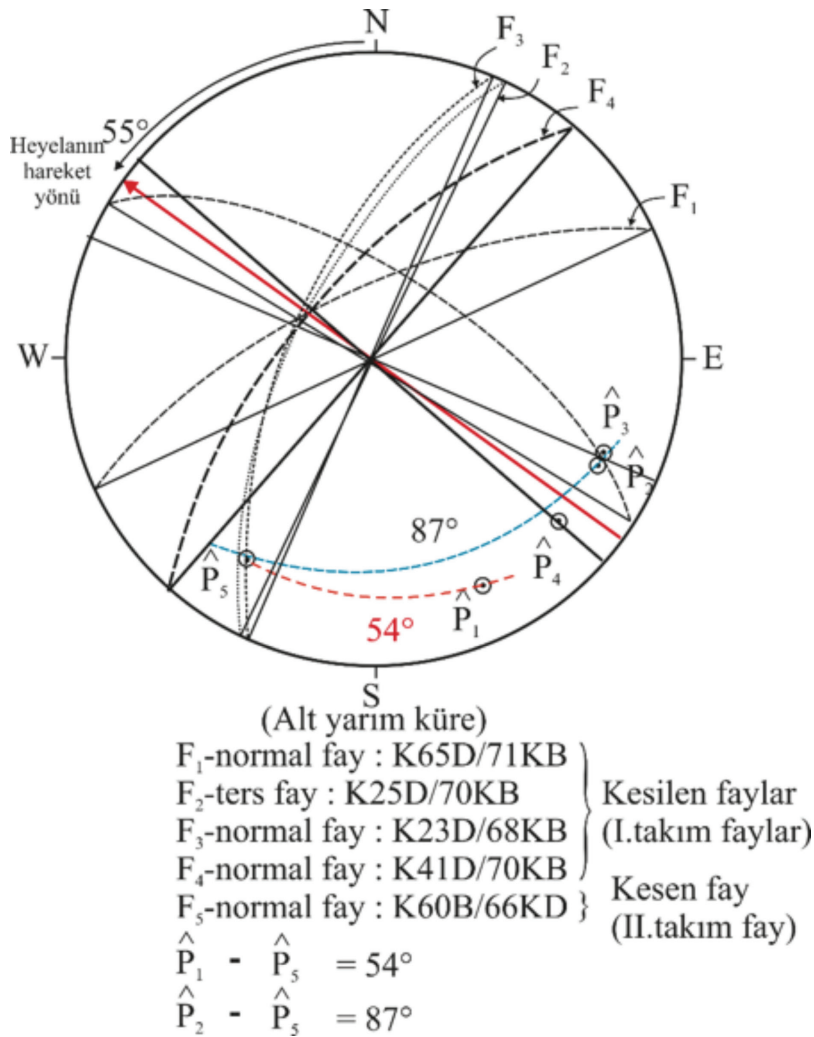
kuyu açımı sırasında yapılan gözlemler ve toplamda 9 hat üzerinde gerçekleştirilen Elektrik Tomografi Ölçümler (ERT) dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 5'te hem sondaj yerleri, hem de elektrik rezistivite ölçümlerinin yapıldığı hatlar gösterilmiştir. Jeofizik ölçüm hatlarının uzunlukları, yönleri ve hangi fayları kestikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

F_5 fayının doğrultusu boyunca açılan tüm sondajlarda (SK-7, SK-10 ve SK-11) su seviyeleri ya yüzeyde ya da yüzeye çok yakın konumlarda yer almaktadır. Bu durum, F_5 fayı boyunca yerleşmiş eski dere yatağının günümüz koşullarında da çalıştığına işaret etmektedir. SK-6 ve SK-4 sondaj kuyularında su seviyesi yüzeydedir (Şekil 8).



Şekil 6. F_1 ve F_2 fayları nedeniyle oluşmuş hendeği gösteren jeolojik kesit.

Figure 6. Geological cross-section showing the hanging wall fault pocket occurred due to F_1 and F_2 faults.



Şekil 7. Heyelan sahasında yer alan fayların büyük daireleri ve heyelanın kayma yönüyle (N 55 W) ilişkileri.

Figure 7. Relationships between the great circles of the faults located in the landslide area and movement direction of the landslide (N 55 W).

Aşağıdaki değerlendirme ERT-1 ve ERT-7 yönündeki (GB-KD yönünde) su seviyesi değişimini F₅ fayına göre açıklar. F₅ fayı heyelan sahasını güneybatıdan sınırlayan jeolojik bir bariyer görevi üstlenir. Fay zonu düşen blok yönünde bir cep/hendek oluşturmuş ve GD-KB yönünde de bir geçirimsiz perde/bariyer

meydana getirmiştir. Biriken sular fayın batı tarafına kayma aynası boyunca gelişmiş fay kili nedeniyle sızamamaktadır. Bu nedenle fayın tavan bloğunda su seviyesi yükselmektedir. Beslenmesizma dengesi mevsimsel olarak değişmekte ve yeraltı suyu koşullarını belirlemektedir.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

Çizelge 3. Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) ölçüm hatlarının özellikleri ve sondajlarda ölçülen yeraltı suyu seviyeleri.

Table 3. Features of the electrical resistivity tomography (ERT) measurement lines and groundwater table levels obtained from the boreholes.

ERT-No	Hat Uzunluğu (m)	Jeofizik Hatların Yönü	Hatların Kestiği Faylar	Su Seviyesi (Jeofizik verilere göre)	Sondajlarda Ölçülen Su Seviyeleri
ERT-1	235	K 50 D	F ₅ , F ₁	0-12 m kalınlığında tünek akifer	SK-1 ve 2'de 1.5 m (SK-1'de su artezyen yaptı)
ERT-2	221	K 70 B	F ₂ , F ₃	Su yüzeyde (dere yatağı)	-
ERT-3	218	K 35 D	F ₂	Su seviyesi yüzeyde	SK-7 Su seviyesi: 4.6 m
ERT-4	235	K 35 D	F ₅	Tünek akifer 0 - 9 m	SK-10 Su seviyesi: 0.6 m
ERT-5	134	K 60 B	F ₄	Su yüzeyde (dere yatağı)	-
ERT-6	169	K 80 B	F ₃	Su yüzeyde	-
ERT-7	235	K 35 D	F ₅	Tünek akiferle yarı basınçlı akifer birleşmiş	SK-4 ve SK-5: Su seviyesi: 9m.
ERT-8	97	K 65 D	-	Su yüzeyde, iki noktada kaynak oluşumu var.	-
ERT-9	229	D - B	F ₃	YASS derinliği yaklaşık 5 m	-

İlkokulun güneydoğusunda yer alan ERT-1 hattı ölçüm sonuçlarına göre, genelde ortamı oluşturan jeolojik birimlerin öz direnç değerleri oldukça düşüktür (1 – 5 Ohm m) (Şekil 8). Özellikle hattın 55 – 125 m arasında yer alan kesiminde bu çok belirgindir. Hattın kuzeydoğusundaki devamında, 155 – 190 m'ler arasında da çok düşük öz direnç değerleri ölçülmüştür. Jeofizik kesitte F₅ fayının yeri de açık olarak (ERT-1 kesitinin güneybatısından itibaren kuzeydoğuya doğru 80. m'de) gözlenmektedir. Kayma dalgası hızları derine doğru artmaktadır. MASW hattının sonuna doğru Vs > 600 m/s'lik sismik hızlara erişilmektedir. İlkokul binasının kuzeybatısında yer alan ERT-7 hattında, ortamı oluşturan jeolojik birimlerin öz direnç değerlerinin oldukça düşük değerler aldığı (1–6 Ohm m) belirlenmiştir. Hattın 0–150 m'lik kesiminde bu durum açık olarak gözlenir (Şekil 8). MASW ölçümlerinde kayma dalgası hızları F₅ fayının kuzeydoğusunda, bir diğer

anlatımla cep içinde $150 \leq V_s \leq 500$ m/s arasında değerler almıştır. Buna ek olarak, ortamın tamamen suya doymun olduğu da ERT-7 jeofizik kesitinden anlaşılmaktadır. Hendek oluşumunun kesit hattı boyunca, F₅ fayından itibaren 75–80 m devam ettiği de görülmektedir (Şekil 8). Kayma dalgası hızları dikkate alındığında, 0–15 m derinlikte yer alan jeolojik birimler hariç, diğer kaya birimlerinin genelde dayanımlı oldukları görülür. Jeofizik ölçümlerden oldukça düşük öz direnç değerlerinin elde edilmesi, bu birimlerin yeraltı suyundan oldukça etkilendiklerini göstermektedir. Düşük öz direnç değerleri veren jeolojik birimlerin heyelan açısından risk taşıdığı öngörülebilir.

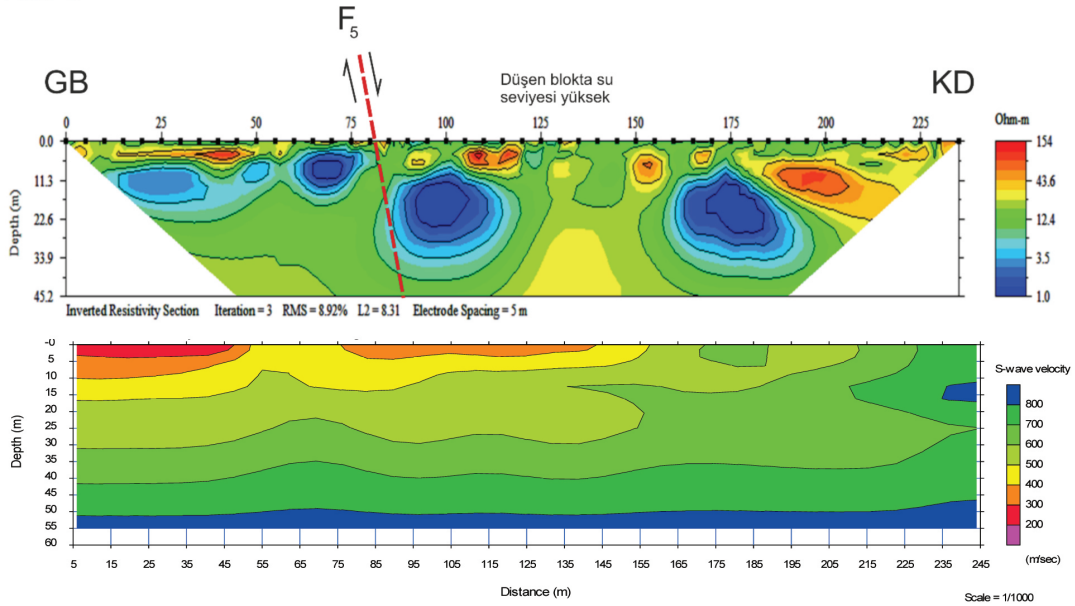
Laboratuvar deneyleri

Yüksek plastik kil ve killi siltler üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı (q_u) deneyleri

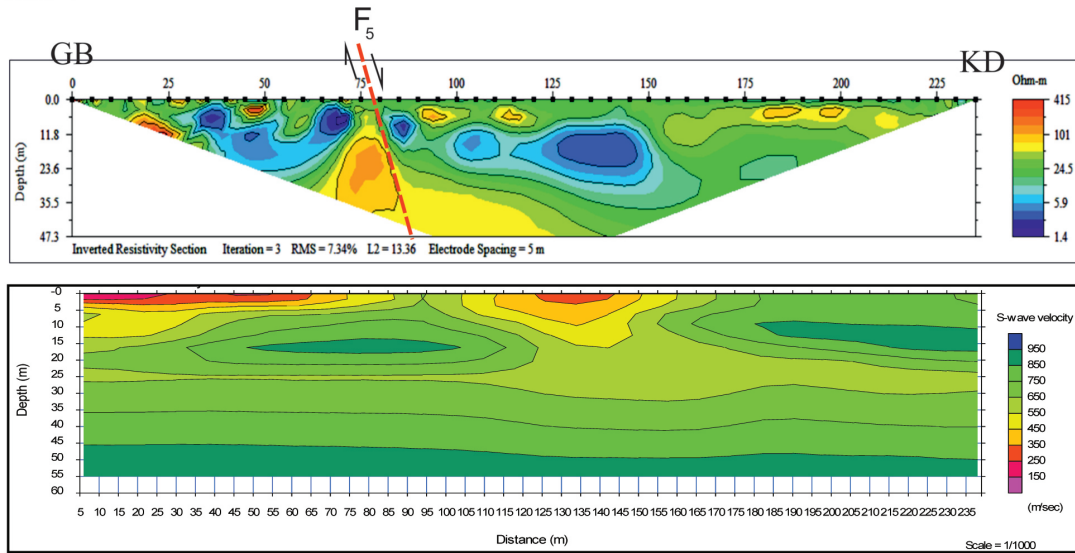
yapılmıştır. Sıkışma dayanımı ve Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları Çizelge 4'te sunulmuştur. Deney sırasında zemin örneklerinin deformasyon eğrileri de elde edilmiştir (Şekil

9). CH-tipi killerde q_u değeri 42 – 46 kPa (orta katı kıvamda), MH tipi siltler ise 28 – 32 kPa (yumuşak kıvamlı) olarak ölçülmüştür.

ERT-1



ERT-7



Şekil 8. F_5 fayını kesen ve hendek oluşumunu gösteren ERT-1 ve ERT-7 elektrik öz direnç tomografi kesitleri.

Figure 8. The measurements lines of the electrical resistivity tomography (ERT-1 and ERT-7) showing the F_5 fault and trench formation.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

Konsolidasyonsuz-drenajsız makaslama deneyleri

Hızlı deneylerden (quick test) elde edilen makaslama deney sonuçları Çizelge 4'te sunulmuştur. Yüksek plastik CH türü killere ait direnç parametrelerinden içsel sürtünme açısı ϕ değeri 14° - 16° , kohezyon (c) değeri ise 10-12 kPa olarak elde edilmiştir (Şekil 10). Siltli killi kumda (SM) makaslama direnci parametreleri daha yüksek olarak elde edilmiştir ($\phi = 37^{\circ}$, $c = 20$ kPa). Yüksek plastik siltler ve killi siltlerde içsel sürtünme açısı $\phi = 13^{\circ}$ - 20° , kohezyon değeri (c) ise 8-20 kPa mertebesinde saptanmıştır (Çizelge 4). Çizelge 4'teki örneklere ait Coulomb yenilme zarflarının eşitlikleri aşağıda verilmiştir:

$$1\text{-nolu örnek; } t = 10 + 0.29, r = 0.98 \quad (4)$$

$$2\text{-nolu örnek; } t = 12 + 0.25, r = 0.98 \quad (5)$$

$$3\text{-nolu örnek; } t = 20 + 0.36, r = 0.97 \quad (6)$$

$$4\text{-nolu örnek; } t = 8 + 0.23, r = 0.99 \quad (7)$$

$$5\text{-nolu örnek; } t = 20 + 0.75, r = 0.99 \text{ (Şekil 9)} \quad (8)$$

Çizelge 4. Hızlı deneylerden (UU) elde edilen makaslama direnci parametreleri ve Atterberg limitleri deney sonuçları.

Table 4: Results of shear strength parameters obtained from the quick tests (UU) and the results of the Atterberg limits.

Örnek no	γ_n (kN/m ³)	G	ω_{LL} (%)	ω_{PL} (%)	ω_{PI} (%)	UU-drenajsız hızlı deney		q_u (kPa)	Zemin cinsi
						ϕ (°)	C (kN/m ²)		
1	17.3	2.68	74	32	42	16	10	46	CH
2	16.3	2.68	78	31	47	14	12	42	CH
3	18.0	2.67	64	37	27	20	20	32	MH
4	16.7	2.67	63	37	26	13	8	28	MH
5	18.3	2.69	-	-	-	37	20	-	SM

Konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deneyler

Konsolidasyonlu-drenajlı deneylerden elde edilen pik ve rezidüel makaslama dayanımı parametreleri, aglomeraların yerinde ayrışmasıyla oluşmuş, montmorillonit türü yüksek plastik (CH) killere aittir. Konsolidasyonlu-drenajlı makaslama deneylerinin sonuçları Çizelge 5'te sunulmuştur. Doğrusal ve eğrisel ölçülere göre elde edilen yenilme zarfları düşük bir normal gerilme değerinden sonra hemen hemen çakışmaktadır (Şekil 11). Doğrusal regresyon analizleriyle hesaplanan ilgileşim katsayıları Eşitlik 1, 2 ve 5'te verilmiştir ve geometrik regresyon analizleriyle elde edilen değerlere göre (Çizelge 5) daha yüksektir.

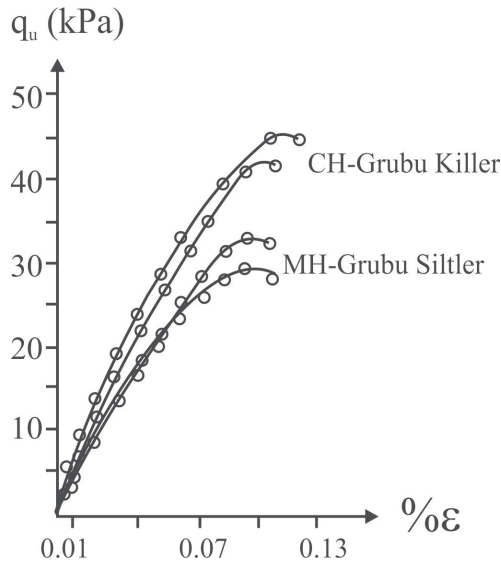
Çizelge 5. Konsolidasyonlu-drenajlı makaslama deneylerinin istatistiksel sonuçları.

Table 5. Statistical results of the consolidated-drained soil shear tests.

	Doğrusal regresyon $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$			Geometrik regresyon $\tau = A (\sigma_n)^B$	
	ϕ (°)	c (kPa)	r	Makaslama dayanımı	r
Pik	31	38	0.95	$\tau_p = 8.909 (\sigma_n)^{0.5733}$	0.94
Rezidüel	24	10	0.92	$\tau_r = 0.4118 (\sigma_n)^{1.0865}$	0.88

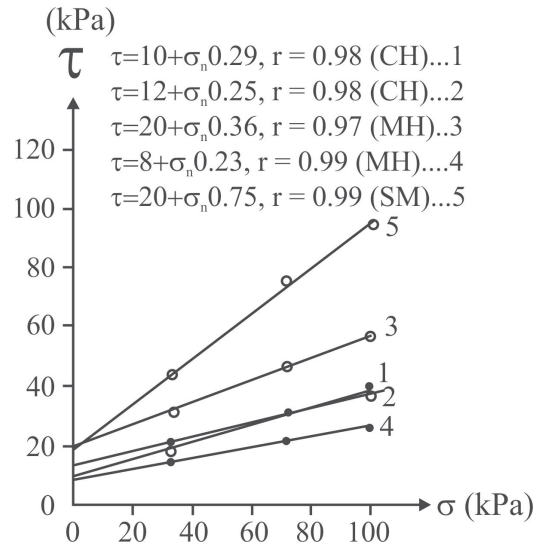
Bu nedenle makaslama dayanımının Mohr-Coulomb eşitliğiyle verilmesi daha uygun olacaktır. Şev duraylılığı açısından önem taşıyan rezidüel makaslama dayanımı parametreleri her

örnek seti için doğrusal regresyon analizleriyle ayrı ayrı hesaplanmıştır. Buna göre değeri 0-10 kPa, içsel sürtünme açısı da 24° - 31° arasında değerler almıştır (Çizelge 5).



Şekil 9. Yüksek plastik zemin örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve deformasyon eğrileri.

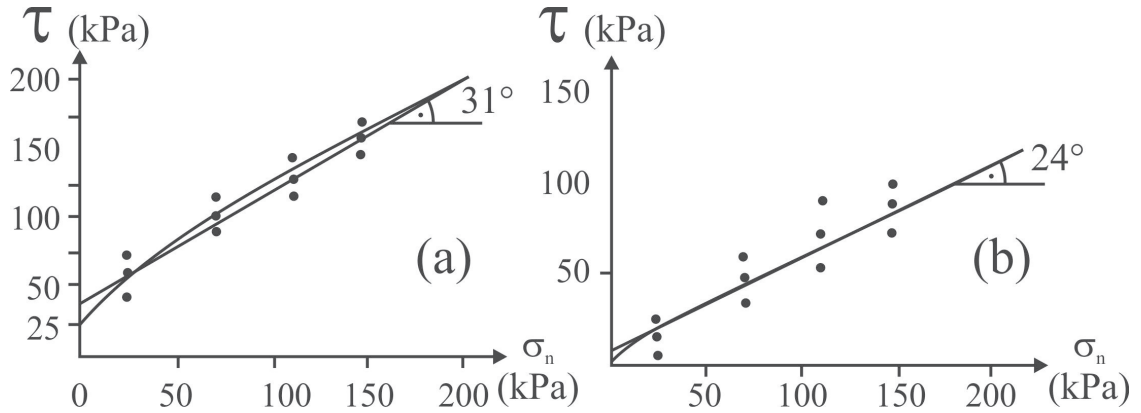
Figure 9. The uniaxial compressive strength and strain curves of the soil samples with high plasticity.



Şekil 10. Aglomera ayrışma ürünü rezidüel zeminlerin drenajsız şartlarda yenilme zarfları.

Figure 10. Failure envelopes in undrained conditions for the residual soil materials produced as a result of weathering process of the agglomerates.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca



Şekil 11. Aglomera ayrışma ürünü killi zeminlerin doğrusal ve doğrusal olmayan yenilme zarfları: a) Pik değerler b) Rezidüel değerler.

Figure 11. Linear and non-linear failure envelopes of the clayey soils of weathering product of the agglomerate: a) Peak values, b) Residual values.

Heyelanın kayma dairesinin yeri

Heyelanın kayma dairesinin yeri arazi gözlemleri, sondaj karotlarının jeoteknik değerlendirmesi, jeofizik ölçümler, SK-5 ve SK-8 sondaj kuyularında gerçekleştirilen inklinometre okumaları ve SK-1, SK-4 ve SK-5 sondaj kuyularında presiyometre deney sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu belirlenmiştir. Limit denge yöntemiyle gerçekleştirilen şev duraylılığı analizlerinde olası kayma dairesinin yeri belirlenmiş ve deneysel olarak (kuyu içi ölçüm ve deneyler) bulgulanmış kayma dairesinin yeriyle karşılaştırılmıştır.

Kayma dairesinin yerinde deney ve gözlemlerle belirlenmesi

Sondaj profillerinde, yüzeyde 8-15 m kalınlığında plastik özellikte siltli killer ve kumlu-siltli killerden oluşan su içeriği yüksek/suya doymun koşullarda bir zemin tabakası yer almaktadır. Bu malzemeler hareket etmiş heyelan malzemesinin % 50'den daha fazlasını oluşturmaktadır (predominantly fine material). Bu seviyenin altında yer alan aglomeralar profil boyunca iki farklı ayrışma derecesinde gözlenirler (Şekil 12). Zemin tabakasının hemen altında, oldukça (HW) - tamamen ayrılmış (CW), daha sonra bloklu yapıdaki, sert kaya özelliğini korumuş, orta derecede ayrılmış olarak (MW) yer alırlar (Şekil 12). Sondajlarda kalınlığı 0.5 – 1.0 m aralığında olan ince tuf seviyesi geçildikten sonra kumtaşı-şeyl ardalanmasından oluşan Bornova Karmaşığı'na girilmiştir.



Şekil 12. Okul binasıyla F_1 -fayı arasında yer alan kazı şevinde açığa çıkan, zayıf kaya-sert zemin arasında yer alan ayrılmış aglomeralardaki geçiş zonu (yeraltı suyu yüzeye yakın konumda).

Figure 12. Transition zone between weak rock and hard soil outcropping at the excavation slope in the weathered agglomerates located in between school building and F_1 fault (groundwater level is near the ground surface).

Yukarıda sözü edilen istif F_1 ve F_5 fayları arasında yer alan hendekte/cepte açılan sondajlarda (SK-1, SK-2, SK-3, SK-4 ve SK-6) gözlenmiştir. Orta derecede ayrılmış, sert ve bloklu yapıdaki aglomeralara SK-1, SK-2 ve SK-3 nolu sondajlarda 27 - 31 m'de, SK-4 sondajında 28-32 m'de (SK-4 sondajı F_2 ters fayını kesmiştir) ve SK-6'da ise yüzeye daha yakın konumda, 21-24 m arasında girilmiştir. Hendek dışında açılan sondajlardan SK-7'de 20.5 m'de (SK-7 sondajı F_3 fayını kesmiştir, Şekil 13), SK-8'de 24.5 m'de, SK-9'da 12. m'de, SK-10'da 15.5 m'de Bornova Karmaşığı'na girilmiştir.

SK-1, SK-4 ve SK-5 kuyularında presiyometre deneyleri yapılmıştır. SK-1'de 10. metredeki deneyde en düşük net limit basınç $P_L = 1.25 \text{ kg/cm}^2$ (122.5 kPa), SK-4'te 12.5 m.

derinlikte net limit basınç $P_L = 1.74 \text{ kg/cm}^2$ (170.6 kPa), 13.5 m'de ise 2.05 kg/cm^2 (201.0 kPa), SK-5'te 12.0 m'de yamaç molozu - aglomera kontağında $P_L = 2.23 \text{ kg/cm}^2$ (218.7 kPa) olarak ölçülmüştür. Presiyometre deneylerinin yapıldığı sondajlarda ölçülen en düşük net limit basınç değerleri $122.6 \text{ kPa} < P_L < 218.7 \text{ kPa}$ arasındadır. Bu değerlere göre sondajlarda kesilen killer "yumuşak-orta katı" kıvamdadır. Briund (1992)'e göre yumuşak killerin drenajsız kayma dayanımı Eşitlik 9 gereğince hesaplanmıştır. Killerin drenajsız kayma dayanımı:

$$(c_u) = 0.67 * (P_L)^{0.75} \quad (9)$$

$25 < c_u < 38.7 \text{ kPa}$ aralığında bulunmuştur. Elastisite modülü değerleri ise 10.18 kg/cm^2 (998.5 kPa) – 22.86 kg/cm^2 (2242.1 kPa) arasında değişmektedir.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca



Şekil 13. SK-7 sondaj kuyusunda, 21 m derinliğinde aglomera-filiş dokanağında gelişmiş oksitlenme-pişme nedeniyle meydana gelen pembe renkli breşik zon (F₃ fay zonu, 20.8 - 21.0 m arası fay kili ve 21.1 - 21.55 m arası da fay breşi olarak değerlendirilmiştir).
 Figure 13. In BH-7 borehole, down to 21 m from the ground surface, breccia zone with pink colour occurred due to oxidation and baking in the contact between agglomerate and flysch units.

Yukarıda verilen bu değerler kuyularda en düşük net limit basınçların elde edildiği seviyelerin üzerinde $2.80 \text{ kg/cm}^2 \leq P_L \leq 3.13 \text{ kg/cm}^2$, altındaki basınç değerleri ise $2.68 \leq P_L \leq 15.43 \text{ kg/cm}^2$ 'ye kadar değişen aralıklarda değerler almaktadır.

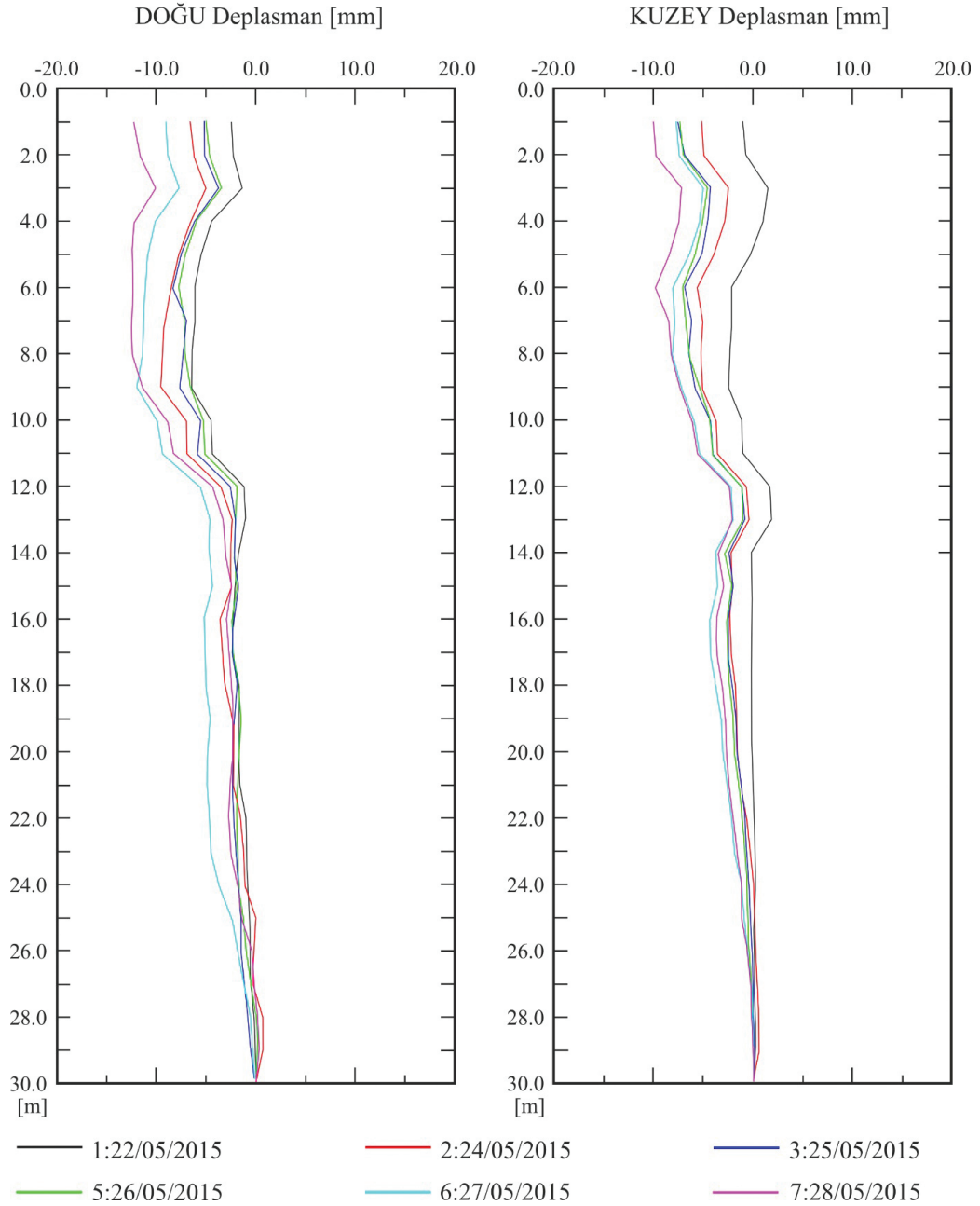
SK-5 ve SK-8 kuyularında inklinometre okumaları yapılmıştır. SK-5'te ilk okumada (21.05.2015) 9.5 mm, ikinci okumada (26.05.2015) 12 mm kayma yönünde yer değiştirme tespit edilmiştir. Kayma dairesinin

derinliği 12 m olarak belirlenmiştir (Şekil 14). SK-8'de ilk okumada 18.5 mm, ikincide ise 20.5 mm mertebesinde yanal yönde yer değiştirme okunmuştur (Şekil 15). SK-8'de hareketin yönü, heyelanın hareket yönünde değil (K55B), F₅-fayına doğrudur. Kayma dairesi SK-5 ve SK-8'de yaklaşık aynı derinlikten (12 m) geçmektedir. Bu durum, hareketin yüzeyde yer alan ve kalınlığı 8-15 m. arasında değişen yamaç molozu + aglomera ayrışma ürünü plastik killer/killi siltler içinde olduğuna işaret etmektedir.

Saha : EVKA 5 Kuyu : SK-5

Kümülatif deplasman aşağıdan

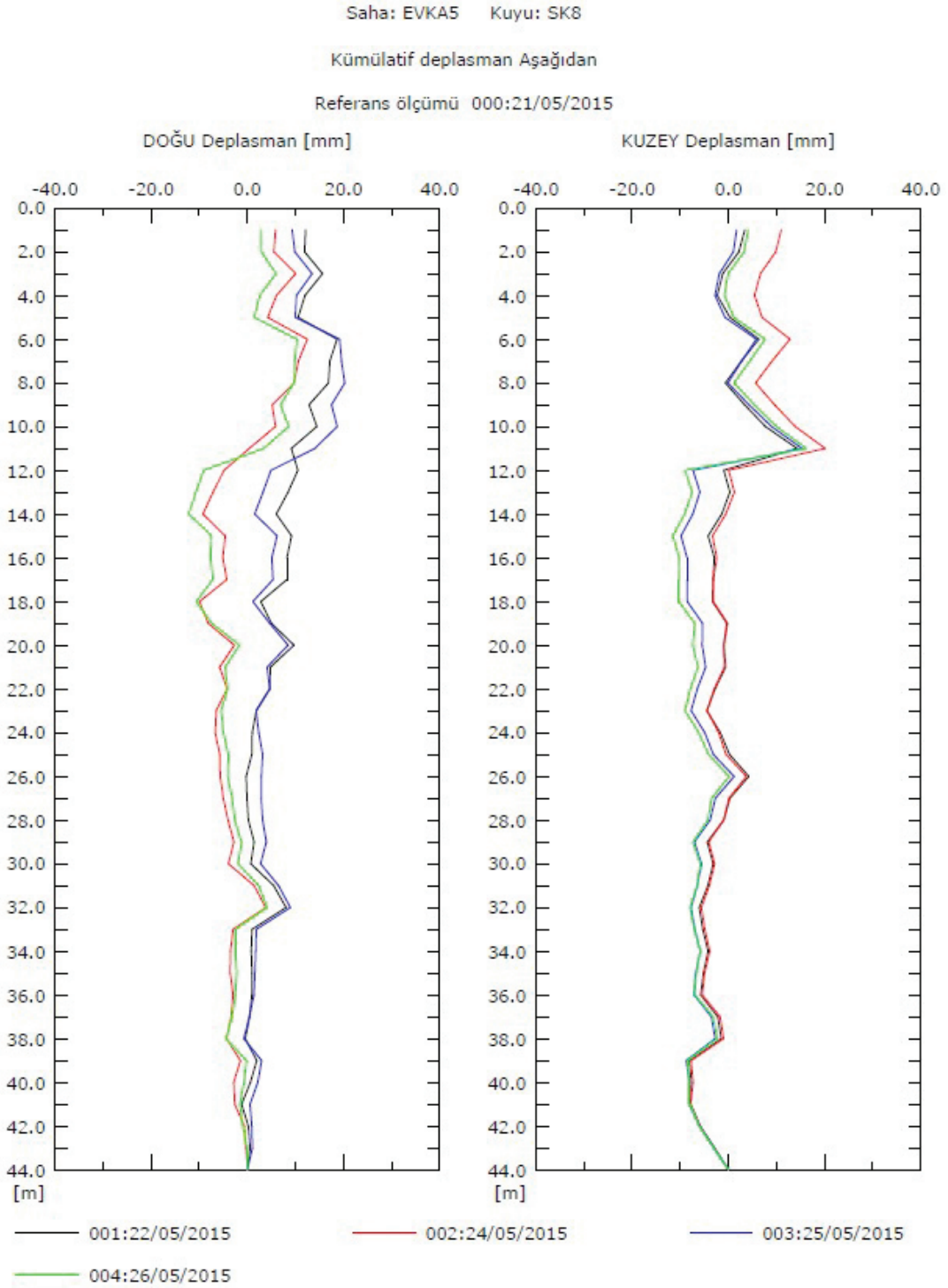
Referans Ölçümü : 21/05/2015



Şekil 14. SK-5 sondaj kuyusundan alınmış inklinometre okumalarının sonuçları.

Figure 14. The results of inclinometer readings taken from the borehole-5.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca



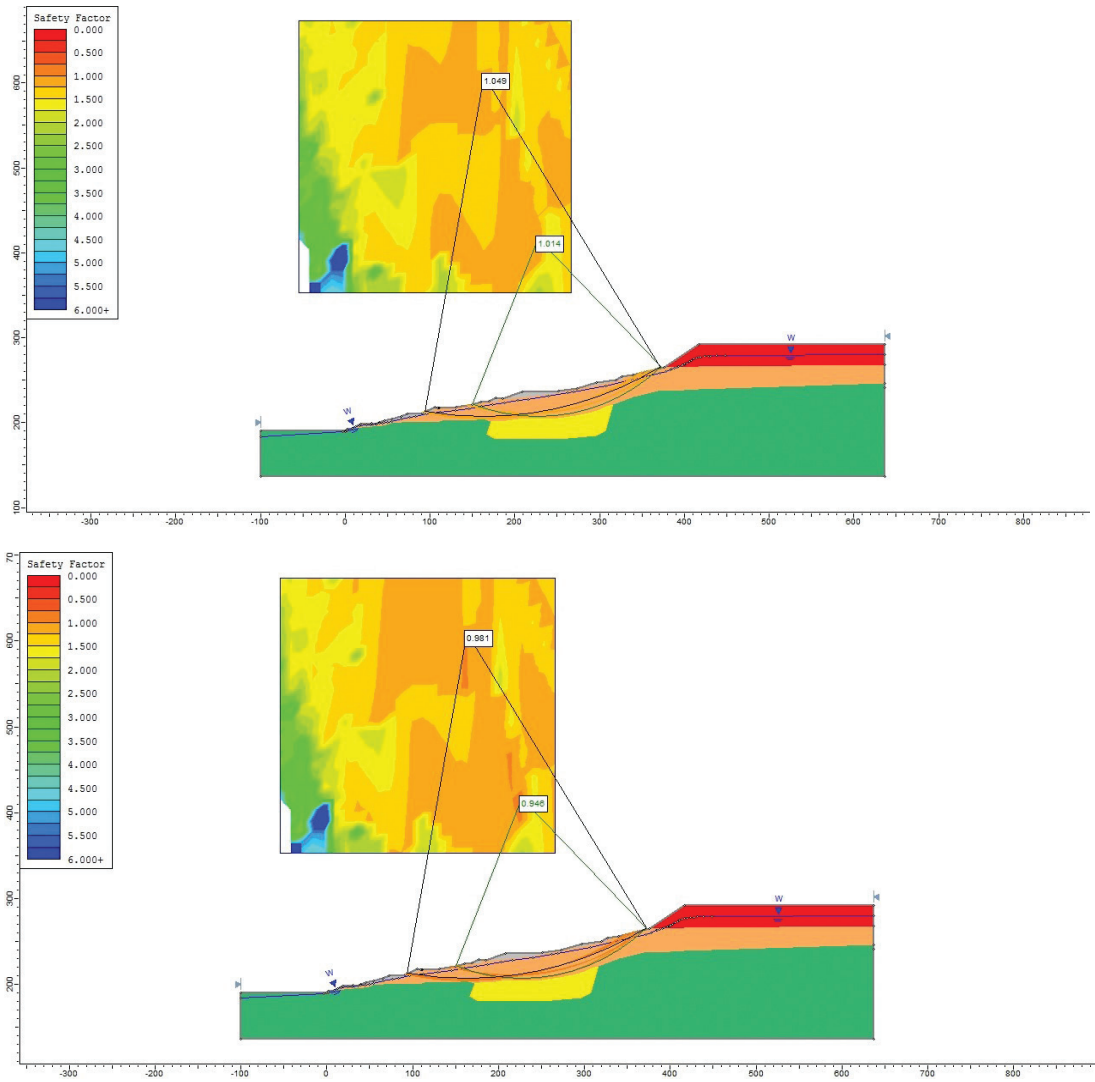
Şekil 15. SK-8 sondaj kuyusundan alınmış inklinometre okumalarının sonuçları.

Figure 15. The results of inclinometer readings taken from the borehole-8.

Kayma dairesi yerinin şev duraylılığı çalışmalarında belirlenmesi

Heyelan sahası için Bishop Limit Denge Yöntemi kullanılarak şev duraylılığı araştırmaları yapılmıştır (Şekil 16). Burada amaç kayma dairesinin yerinin kestirilmesi ve

diğer yöntemlerden yararlanılarak elde edilen kayma dairesinin yeriyile karşılaştırılmasıdır. Şev stabilite analizlerinde CH-MH tipi yüksek plastik killer ve killi siltler için konsolidasyonlu-drenajlı makaslama direnci parametreleri kullanılmıştır. Diğer tüm jeolojik birimlerin direnç parametreleri Çizelge 6'da toplu olarak verilmiştir.



Şekil 16. Basitleştirilmiş Bishop yöntemiyle gerçekleştirilen şev stabilite analizlerinden elde edilen kayma daireleri ve FoS değerleri.

Figure 16. Slip circles acquired from the slope stability analyses performed using the simplified Bishop's method and the values of FoS.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

Çizelge 6. Şev stabilite analizlerinde kullanılan jeolojik birimlerin birim ağırlık ve makaslama dayanımı parametresi değerleri.
Table 6: Unit weight and shear strength values of the geological units used in the slope stability analyses.

Birim	Birim ağırlık (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	FoS
Yamaç molozu	16.85	3.0	21	
Rezidüel zemin (CH/MH)	16.65	8.0	12	
Andezit(soğuma yüzeyi), Koca ve Kıncal (2004)	23.05	260	16	0.946 - 0.981
MW-HW aglomera-matriks (zayıf kaya), Koca (1995)	20.60	40	33	
Kumtaşı (filiş), Köse (2007)	23.05	250	38	

Aglomera ayrışma ürünü yüksek plastik killerin/siltlerin makaslama dayanımı parametrelerinden $\phi = 13^\circ$ alındığında (diğer parametreler aynı kalmak üzere) FoS= 1.014'e çıkmaktadır (Şekil 16a). $\phi = 16^\circ$ için ise FoS= 1.019'a çıkmaktadır. İncelenen heyelanın duraylılığı içsel sürtünme açısından çok kohezyon değerine duyarlıdır. Analizlerden elde edilen kayma dairesinin yeri inklinometre sonuçlarından ve sondaj karot tanımlamalarından elde edilen derinliklerle örtüşmektedir. Kayma dairesi başlangıçta (güneydoğudan itibaren) aglomera ayrışma ürünü plastik kil/silt içerikli rezidüel zemin katmanının altından, daha sonra aglomera-fliş dokanağından ilerlemekte ve F₄ fayının çok yakınından geçmektedir (Şekil 16). Kayma zonunun güncel topoğrafyayı kestiği yer; F₄ fayının 30 - 35 m güneybatısında, yaklaşık 190 m kotunda yer almaktadır. Burada kayma zonu yüzeylenmiştir (Şekil 17). Ancak geniş bir makaslama zonu şeklinde belirgin hale gelmiş bir görüntü henüz bu noktada oluşmamıştır. Bu

durum heyelanın henüz progresif bir aşamaya geçmediğine işaret etmektedir. Heyelanın esas kayma dairesi, yüzeye yakın konumda, en derin noktası 15 m kadar olan (İlkokul binasının kuzey cephesi) ve F₁ ile F₄ fayları arasından geçen yay şekilli yüzeydir (Şekil 16). Kayma yüzeyi üzerinden bu malzemeler kuzeybatıya doğru (K 55 B yönünde) hareket etmektedir.

İlkokulu da içine alan heyelanlı sahanın kayma ve çökme bölgeleri, jeolojik bir hendek ve/veya faya yaslanmış bir cep üzerinde yer almaktadır. Bu cep F₅ ve F₁ faylarının fay önü düzlüklerinde yer alır (Şekil 18). F₂ fayının ise fay düzleminin gerisinde, güneydoğuda yer alır. F₅, F₁ ve F₂ faylarıyla denetlenmiş çöküntü alanı su birikimi için uygun bir alandır.

Bu nedenle fay cebi içinde yeraltı suları birikmektedir. F₅ fayını GB-KD yönünde kesen ve yarı basınçlı akifer oluşumunu gösteren şematik kesit Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 17. Heyelanın topuk bölgesinde meydana gelen deformasyonlar (kuzeybatıdan güneydoğuya doğru fotoğraf çekimi yapılmıştır).

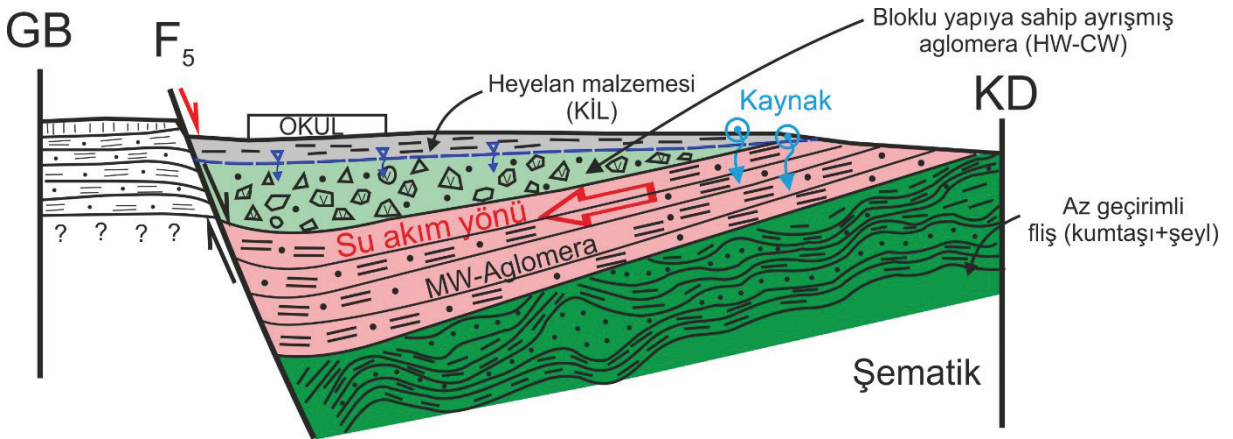
Figure 17. Deformations occurred in the toe of the landslide (photograph was taken from NW towards SE-direction).

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

Bu cebin en altında az geçirimli fliş, en üstünde aglomeraların yerinde ayrışmasıyla oluşmuş 10-15 m kalınlığında plastik killerden ve kumlu, killi siltlerden oluşmuş heyelan malzemesi yer almaktadır. Aglomera yığılma bantlarının eğim yönleri nedeniyle su akım yönü F_5 fayına doğrudur (Şekil 18). Üç tarafı geçirimsiz ve/veya az geçirimli malzemelerle kaplı fay cebi su gelişiyile (aşırı beslenmeyle) yarı basınçlı bir akifere dönüşmüştür. Cep üzerinde açılan SK-1, SK-2 ve SK-4 sondaj kuyularında yeraltı suyunun artezyen yaptığı gözlenmiştir. F_2 fay engeli nedeniyle akiferin KD cephesi kısmen açıktır. Ancak hidrolik eğim F_5 fayına doğru (batıya doğru) olduğundan su havza dışına kaçamamaktadır (Şekil 19).

edilen kohezyon değerlerinden ($8 \leq c' \leq 20$ kPa) ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak elde edilen tüm kohezyon değerlerinin birbirine oldukça yakın değerlerde oldukları görülmüştür.

F_1 ve F_5 fayları sırasıyla kuzeybatıya ve kuzeydoğuya eğimli faylardır ve birbirlerini keserek bir kama oluşturmaktadırlar. Kamanın ara kesitinin konumu K 18 D/65 KD'dur. İlginç bir şekilde, meydana gelen heyelan hareketi fay düzlemlerinin oluşturduğu ara kesit boyunca değil, F_5 fayının doğrultusuna yakın bir konumda gelişmiştir. Kesişen iki fay düzleminin ara kesitinin dalım yönü şev dışına değil, şev tabanına doğru olduğundan kama tipi kayma olasılığı yoktur. Bu durum, kaymanın derin bir kayma olmayıp, yüzeyde mevcut fayları da kesen



Şekil 18. F_5 fayının düşen bloğu üzerinde fay hareketi nedeniyle oluşmuş fay cebi ve yarı basınçlı akifer oluşumu.

Figure 18. Fault pocket formed at the hanging wall of F_5 fault due to the faulting mechanism and the formation of confined aquifer.

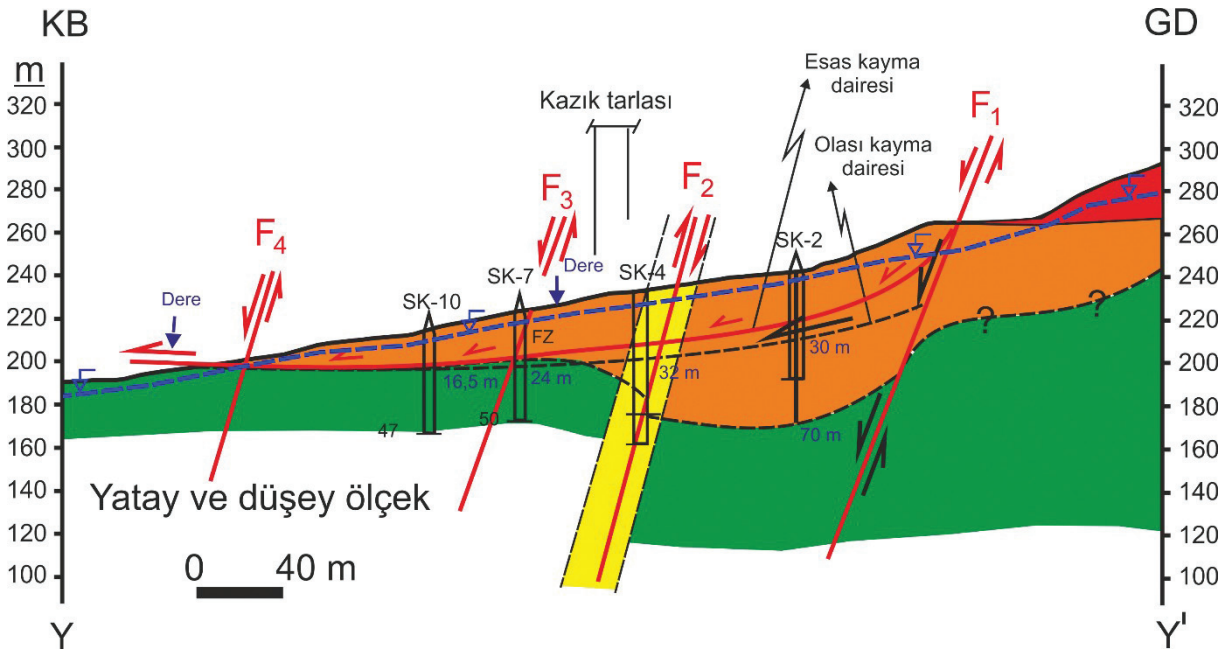
DEĞERLENDİRME

Presiyometre net limit basınçları yardımıyla killerin drenajsız kayma dayanımı değerleri $25 \leq c_u \leq 38.7$ kPa olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin konsolidasyonlu-drenajlı makaslama deneylerinden elde edilen kohezyon değerleriyle (10-38 kPa) örtüştüğü, hızlı deneylerden elde

(faylar kayma düzlemi tarafından kesildikleri için bu düzlemin içinde kalmışlardır ve hareketin yönünde eğim kazanmışlar, tilt olmuşlardır) bir kayma dairesinin olduğuna işaret etmektedir. Bir diğer anlatımla, F_5 fayı, F_1 fayının eğim yönünde hareket eden kütlelerin yan duvarı olarak çalışmıştır.

Gerek limit denge analizlerinin sonuçları gerekse de karot determinasyonları ve inklinometre ölçümlerinin sonuçları kayma dairesinin hendekte 12-15 m, F_2 fayından sonra yüzeye daha yakın konumda olacak şekilde 8-10 m derinlikten geçtiğini göstermiştir. F_2 fayı heyelan hareketinin önünde, derin kayma hareketini önleyici bir jeolojik bariyer görevi yapmaktadır. Bu durumda F_1 fayından itibaren ve F_5 fayının doğrultusu boyunca büyük bir kütlelin kuzeybatıya doğru hareket etme olasılığı F_2 fayı tarafından engellenmiştir. Bir diğer anlatımla,

F_2 ters fayı sahada oluşabilecek derin kaymayı durdurmuştur. Olası bir derin kaymayı engellediği için F_2 fayı pozitif bir etkiye sahiptir. F_2 fayının jeolojik bariyer rolü olmasaydı, kayma dairesi olasılıkla SK-1, SK-2 ve SK-4 sondajlarında sırasıyla 28 m, 30 m ve 32 m'den, SK-7, SK-9 ve SK-10 sondajlarında ise aglomera-Bornova Karmaşığı kantağından olmak üzere sırasıyla 21 m, 17 m ve 15.5 m'den geçeceği düşünülmektedir (Şekil 19). Yukarıda verilen olası kayma zonu karotların jeoteknik loglanması sırasında yapılan gözlemlerden belirlenmiştir.



Şekil 19. F_2 ters fayının olmaması durumunda gelişecek olası derin kaymanın sınırları ve heyelanı önleyici bir çözüm olarak önerilen kazık grubunun konumu.

Figure 19. In the case of the absence of F_2 fault, the location of possible deep slip surface and the location of pile group proposed in order to prevent the landslide.

Kıncal, Kadakçı Koca, Koca

Yukarıda verilen derinliklerde aglomeraların ayrışma dereceleri, direnç özellikleri değişmektedir. Bu derinliklerin altında aglomeralar sert kaya özelliğini koruyan bir yapıda bulunmaktadır. Aglomeralar bu derinliklerden itibaren yüzeye doğru ilerleyen profil boyunca, az ayrılmış kayadan zemine dönüşen bir ayrışma profili sunarlar. Yüzeye yakın kesimlerde ($d < 15$ m) makaslama dalga hızları $150 \leq V_s \leq 500$ m/s arasında değerler almıştır.

Bu araştırma başlatılmadan önce (1. etap çalışmaları), F_1 fayının fay önü düzlüğünde, ilkokul binasının 22 m GD'da, KD-GB yönelimli, 185 m uzunluğunda ve 12 m derinliğinde kazıklı istinat duvarı imalatı gerçekleştirilmiştir. Projenin uygulama aşamasında yapılan derin kazıda aglomeralardaki ayrışma durumu ve profil boyunca su içeriğindeki değişim yerinde gözlenmiştir (Şekil 12). F_1 fayı boyunca kayan malzeme temizlendikten sonra açılan kazı şevinde (kazıklı istinat duvarı imalatı işlemi) açığa çıkan aglomeralarda sert zemin-zayıf kaya geçişi izlenebilmiştir (Şekil 12). Aglomera ayrışma ürünü, orta katı-yumuşak kıvamdaki plastik kil ve siltler heyelan sahasındaki zemin profilinin en üstünde yer alır. İlkokul binasını da içine alan hendekte bu seviyenin kalınlığı 12-15 m arasındadır. Bu zemin seviyesinin altında aglomeralar oldukça-tamamen ayrılmış ($600 \leq V_s \leq 700$ m/s) zayıf kaya (15-28m) özelliğindedir ve daha sonra göreceli sert/sağlam kaya özelliği göstermektedir ($700 \leq V_s \leq 950$ m/s). Sağlam kaya özelliğindeki aglomeralar, 60 m derinliğe kadar hendek içinde devam etmekte ve daha sonra Bornova Karmaşığı'na girmektedir (Şekil 19). Karmaşıktaki MASW ölçümlerden elde edilen makaslama dalga hızları $V_s > 1300$ m/s mertebesindedir.

Hendek dışında (F_2 fayının kuzeydoğusunda) sağlam kaya özelliğindeki aglomeralara hiçbir

sondajda rastlanmamıştır. Bu sondajlarda aglomeralar ya zemin özelliğinde ya da oldukça-tamamen ayrılmış, örselenmiş kaya malzemesi özelliğindedir. Bu nedenle sondajlarda zemin-kaya-zemin olarak tekrarlanan seviyeler geçilmiştir. Aglomeralarda, tuf matriksin ayrışma potansiyeli bloklara nazaran daha yüksektir. Bu nedenle, tuf seviyeleri genellikle kile dönüşmüş durumdadır. Bloklar ise göreceli taş olma özelliğini korumaktadır. $F_2 - F_3$ fayları arasında Bornova Karmaşığı'na ait kayaçlar, genelde kumtaşı baskın bir litoloji göstermeleri nedeniyle sağlam kaya özelliğindedir. F_4 fayının yer aldığı kesimde bu litoloji yüzeylemektedir. Buna ek olarak, kayma dairesi de bu noktada ışıklanmaktadır (Şekil 17). Bu nokta henüz geniş bir makaslama zonu şeklini almış değildir ve kayma yönünde 44 cm'lik bir ötelenmenin meydana geldiği (Y-Y' kesiti, Şekil 19) daha sınırlı bir kayma zonu özelliği taşımaktadır. Tüm bu gözlem ve verilerin ışığında, heyelan hareketi sığ derinlikte, aglomeraların yerinde ayrışmasının ürünü olan rezidüel zemin özelliğindeki plastik kil ve siltlerden oluşan malzemelerle, bu seviyenin altında yer alan zayıf kaya özelliğindeki aglomeralar arasındaki zayıflık zonunda başlamıştır. Hareketin bu zonda başlamasının nedeni; heyelan başlangıcındaki yüksek topoğrafik eğim ($\alpha \cong 30^\circ$), F_1 fayının gerisinde yer alan ve fay gerisinde yaklaşık 100 m genişliğe erişen düzlüğün (çatlaklı yapıdaki andezitlerin yer aldığı arazi kesimi, şev üst yüzeyi) heyelan sahasının beslenme alanı (bath area) olma özelliğini göstermesi, hendek oluşumu nedeniyle heyelan sahasında yarı basınçlı bir akiferin gelişmesi ve buna bağlı olarak gelişen yüksek su basınçlarının kayma eğilimini arttırması olarak gösterilebilir. Şekil 16'da görüldüğü gibi kayma dairesi aglomera-Bornova Karmaşığı kayaları arasından geçen dokanağı takip etmektedir. Heyelan sığ

derinlikte, moloz akması şeklinde gelişmiş bir kütle hareketi özelliği göstermektedir (Şekil 17).

2. etap jeoteknik çalışmaların sonucu olarak, yeni yağış dönemine kalmamak üzere, heyelan hareketinin durdurulmasına yönelik çalışmaların başlatılması zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Harekete geçmiş bir kütlelerin durdurulmasına yönelik başlangıç tedbirleri; heyelan sahasında yer alan binalarda su tüketiminin sınırlandırılması ve atık su isale hatlarının elden geçirilmesi olmuştur. Kayma hareketinin kalıcı olarak durdurulmasına yönelik öncelikli tedbirlerin başında da kazık imalatı gelmektedir. Kazık yerleri ve derinlikleri en ekonomik ve en güvenli olacak şekilde belirlenmiştir. Bunun için F_2 ve F_3 faylarının arasında yer alan bölge en uygun alan olarak seçilmiştir. Bornova Karmaşığı'nın hem yüzeye daha yakın olması hem de bu bölgedeki kumtaşlarının baskın litolojiyi oluşturması bu seçimde etken olmuştur. Kazıkların şaşırtmalı düzende ve iki sıra (kademe) olarak kumtaşlarına soketlenmesi (bağlanması) planlanmıştır. Boylarının 1/3'ü oranında bir derinlikte, kazıkların sağlam kayaya bağlanması önerilmiştir. Heyelan hareketine dik yönde (KD-GB yönünde), birinci kademe kazıklar (üst bölüm) 45 m derinlikte ve 174 adet ve ikinci kademe kazıklar (alt bölüm) 26 m derinlikte 82 adettir. Teşkil edilen kazık grubunun yeri Şekil 19'daki kesit üzerinde gösterilmiştir. Kazık grubu hareketi önleyici bir bariyer görevi görmektedir. Buna ek olarak, gömülü dere yatakları boyunca, yeterli genişlikte hazırlanan beton kutularla (box-culvert) yeraltı ve yüzey sularının drenajının yeterlilikle sağlanması önerilmiştir. Böylece heyelan nedeniyle yüzey dolgularında meydana gelen hareketler önemli ölçüde sınırlandırılmış olacaktır. 50 noktada ve daha uzun zaman aralıklarında, periyodik olarak deformasyon ölçümlerinin alınmasına devam edilmektedir. Hareketin tamamen durdurulması, yoğun yağışlı

dönemlerde fay cebinde biriken suların açılacak kuyu veya kuyularla heyelan sahasının dışına tahliyesiyle sağlanabileceği öngörülmektedir. Bu tür yüksek yamaç açısında, eğimli ve özel jeolojik koşullara sahip sahalarda su drenajının gerçekleştirilmesi adeta bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır.

F_2 ters fayına bağlı blok hareketi nedeniyle Bornova Karmaşığı'nın heyelan hareketine karşı yönde yükselmesi, bir bariyer oluşturması, kazık derinliklerini azaltmış, böylece maliyeti önemli derecede düşürmüştür. Aksi durumda, ya çok daha derin kazık imalatlarına gereksinim olacak ya da hareket etmiş malzemeler inceltme kazısıyla kaldırılarak daha başka, maliyeti yüksek ve sonuçları tartışmalı olan çözümler aranmak durumunda kalınacaktı.

SONUÇLAR

Yukarıda yapılan ölçüm, gözlem ve değerlendirmelerin ışığında Çiğli heyelan sahasıyla ilgili aşağıdaki sonuçlara erişilmiştir:

1. Aglomeralar ve fliš taban kayasında ters ve normal fayların fay geometrileri nedeniyle bir hendek/cep oluşumu belirlenmiş ve bu cebin heyelan mekanizmasını denetlediği kanıtlanmıştır. F_5 , F_1 ve F_2 fayları F_1 fayının fay önü düzlüğünde üç tarafı faylarla çevrili bir hendek/cep oluşturmuştur. Bu alan yağışlı mevsimlerde ve/veya aşırı beslenmelerle suya doymun hale gelmektedir (yarı basınçlı akifer oluşumu). Fay cebinin üzerinde ve altında geçirimsiz ve/veya az geçirimli zeminler yer almaktadır. Bu nedenle söz konusu cepte yarı basınçlı bir akiferin oluştuğu ve akiferin üzerinde yer alan 10 - 15 m kalınlığındaki heyelan malzemesinin akiferin üzerini bir tıkaç gibi örttüğü belirlenmiştir. Hareketin tamamen durdurulması, yoğun yağış alan dönemlerde fay

cebinde biriken suların açılacak su kuyusu veya kuyularıyla heyelan sahasının dışına tahliyesiyle sağlanabilecektir.

2. Kayma dairesi aglomera ayrışma ürünü plastik killerle, kaya dokusunu korumuş, ayrılmış aglomeralar arasındaki geçiş zonu boyunca meydana gelmiştir. Kayma dairesinin, düşen blok fay cebinin (hanging wall fault pocket) üzerinden geçtiği belirlenmiştir. Cep tamamen suya doygun koşullardadır. Bu nedenle, hareket eden plastik kil ve siltlerin kaymasını kolaylaştırıcı yönde boşluk suyu basıncı oluşturmaktadır. Topuk bölgesinde kayma dairesi yüzeylemiştir. Ancak hareket tam tamamlanmadığı için, yüzeylediği zonda önemli makaslama deformasyonlarının gözlemlendiği derin bir yüzey oluşmamıştır. Heyelan progresif aşamaya geçmeden kayma hareketi önlemlerle sınırlandırılmıştır.

3. Yavaş akma şeklinde gelişen kütle hareketi (yaklaşık 4 ayda maksimum yer değiştirme 50 cm, ~ 12.5 cm/ay) yüzeyde gerilme çatlakları, bazı binalarda ise verevine gelişmiş çatlaklar şeklinde gelişen deformasyonlara neden olmuştur. Yüzeyde gözlenen çatlaklarda en fazla açılmalar F_1 ve F_2 fayları arasında kalan göreceli genel şev açısının yüksek olduğu (12° - 15°) arazi kesiminde meydana gelmiştir. Bina kenar dolgularının topoğrafik eğim yönündeki hareketleri, binaların her iki tarafında yer alan kenar dolgularının heyelan hareketine farklı tepkileri nedeniyle meydana gelmiştir. Binalara yüklenen farklı gerilmeler (farklı momentler oluşturmaktadır) duvarlarda gözlenen verevine gelişmiş çatlak şeklindeki deformasyonların asıl nedenidir.

4. Jeolojik bariyer olarak F_2 ters fayının sahada olası bir derin kaymayı engellediği jeolojik ve jeoteknik çalışmalarla belirlenmiştir. Olası bir derin kaymanın fayın yükselen bloğu tarafından önlediği anlaşılmıştır. Burada ilginç olan; ters

fayın stabiliteyi sağlayan jeolojik bir bariyer olarak ortaya çıkmış olmasıdır. Sığ derinlikte (8-15 m) gelişen heyelanın önlenmesine yönelik önerilen kazık grubunun yer seçiminde de ters fayın sağlam kaya özelliğindeki yükselen bloğu yarar sağlamıştır. Çünkü, heyelanı önlemek üzere önerilen kazık imatları bu bölgeye yapılmış ve bu uygulamadan önemli bir ekonomi sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akartuna, M., 1962. On the geology of Izmir, Torbalı, Seferhisar, Urla districts. MTA Bulletin, 5, 1-19.
- Akgün, A., Kıncal, C., Pradhan, B., 2012. Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to İzmir city (west Turkey). Environmental Monitoring and Assessment, 184, 5453-5470.
- ASTM 1971. Standard test method for plastic limit and plasticity index of soil. D. 424-59, 127-128.
- ASTM 1979a. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. D. 3080-72, 487-497.
- ASTM 1979b. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils. D. 2166-67, 332-335.
- ASTM D0422-63, 2007. Test method for particle-size analysis of soils. Annual book of ASTM standards, section 4, Vol. 04.08, soil and rock, building stones. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4622-86, 1993. Standard test method for rock mass monitoring using inclinometers (Withdrawn 2000), in soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4719 2000. Standard test method for pre-bored pressuremeter testing in soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bishop, A. W., 1955. The use of the slip surface in stability analysis of slopes. Geotechnique, 5 (1), 7-17.
- Kıncal, C., 2005. İzmir İç Körfezi çevresinde yer alan birimlerin coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan

- algılama teknikleri kullanılarak mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Doktora Tezi, 342 s.
- Kıncal, C., Akgün, A., Koca, M. Y., 2009. Landslide susceptibility assessment in the İzmir (West Anatolia, Turkey) city center and its near vicinity by the logistic regression method. *Environmental Earth Sciences*, 59, 745-756.
- Koca, M. Y., 1995. Slope stability assessment of the abandoned andesite quarries in and around the Izmir city centre. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, İzmir, PhD Thesis, 430 p.
- Koca, M. Y, Kıncal, C., 2004. Abandoned stone quarries in and around the Izmir city centre and their geo-environmental impacts –Turkey. *Engineering Geology*, 75, 49-67.
- Köse, G., 2007. Grafitli şeyl ayrışma ürünü killer ve kaymaya olan etkileri, örnek çalışma: Narlıdere heyelan bölgesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Yüksek Lisans Tezi, 114 s.
- Rocscience, 2010. Slide: Stability analysis for soil and rock slopes. Rocscience, Toronto.
- Tarcan, G., Koca, M. Y., 2001. Hydrogeological and geotechnical assessments of the Kadifekale landslide area, İzmir, Turkey. *Environmental Geology*, 40 (3), 289-300.



Araştırma Makalesi / Research Article

Lara - Kundu (Antalya) Düzlüğünün Sıvılaşma Şiddeti İndeksi'ne (LSI) Dayalı Sıvılaşma Haritası

Liquefaction Severity Index (LSI) – Based Liquefaction Map of the Lara - Kundu Plain (Antalya)

Nihat DİPOVA, Bülent CANGİR

Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kampüs, ANTALYA

Geliş (Received): 02 Ağustos (August) 2016 / Düzeltme (Revised): 09 Aralık (December) 2016 / Kabul (Accepted): 27 Ocak (January) 2017

ÖZ

Bu çalışmada Antalya Lara-Kundu kıyı alanındaki zeminlerin mühendislik özellikleri ve bölgedeki kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Bu amaçla, her biri 20 metre derinliğinde 20 adet sondaj kuyusu açılarak her 1.5 m'de bir numune alınmış, zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri laboratuvarında belirlenmiştir. Arazide SPT ve CPT deneyleri yapılmıştır. Bölgede hakim zemin cinsi sıkı kum olmakla birlikte bazı bölümlerde gevşek kum, kil ve turba da bulunmaktadır. Sismik tehlike analizi yapılarak maksimum yer ivmesi haritası elde edilmiştir. Zemin profilindeki kum katmanlarının sıvılaşma potansiyeli, olasılıksal sıvılaşma potansiyeli analizi ile araştırılmıştır. Bir inceleme noktasındaki tüm katmanlar için belirlenen olasılıksal sıvılaşma potansiyeli değerleri (PL) kullanılarak sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm veriler ışığında coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak zemin sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) haritası oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: CBS, CPT, Lara-Kundu, LSI, Sıvılaşma, SPT.

ABSTRACT

In this research, engineering properties of Lara-Kundu coastal plain soils and liquefaction potential of the sands in the region have been investigated. For this purpose, samples which were taken at an interval of 1.5 m from 20 boreholes of 20 m depth, were investigated in the laboratory, and soil index, strength and compressibility properties were determined. In situ tests which are SPT and CPT were executed. Dense sand is the main soil type of the region, and also in some parts loose sand, clay and peat are also available. Carrying out seismic hazard analysis, a peak ground acceleration contour map has been generated. Probabilistic liquefaction potential analysis was performed to search for liquefaction potential of sand layers in the soil profile. LSI (Liquefaction Severity Index) value was calculated with the help of PL values which were determined for every depth of the searching location. By using all the data and Geographical Information Systems (GIS) technique; liquefaction severity index (LSI) map of the soils of Lara - Kundu Region has been created.

Keywords: GIS, CPT, Lara-Kundu, LSI, Liquefaction, SPT.

GİRİŞ

Depremi oluşturduğu tekrarlı yüklerin etkisiyle gevşek, suya doymun durumdaki daneli zeminlerin taşıma güçlerini kaybederek sıvı gibi davranış göstermesine, “zemin sıvılaşması” denilmektedir. Suya doymun gevşek kum/kumlu zeminler, tekrarlı yükler altında sıkışma ve hacim daralması eğilimi gösterirler. Bu durum, drenajın olmadığı koşullarda boşluk suyu basıncını artırır. Toplam normal gerilme boşluk suyu basıncına eşit değere ulaşır ve kohezyonsuz zemin bir sıvı gibi davranarak büyük yer değiştirmelere maruz kalır (Das, 1983). Genellikle jeolojik olarak genç ve gevşek çökellerin, özellikle kum ve silt tane boyutundaki malzemenin depolandığı ve yeraltı suyu seviyesinin sığ olduğu ortamlar, sıvılaşmanın gelişmesi için en uygun ortamlardır. Sıvılaşma olayı, pek çok depremde gelişmesine karşın, ülkemizde 1992 Erzincan depremiyle dikkate alınmaya başlanmış, 1999 Marmara depreminde meydana gelen sıvılaşma olayları ile de önem kazanmıştır.

Bu çalışmaya konu olan Lara-Kundu kıyı alanı, Antalya-Alanya karayolunun güneyinde, Lara ve Kundu Kumsalı'nın, turistik otellerin, alışveriş merkezlerinin ve konutların bulunduğu yaklaşık 15 km²'lik bir alanı kapsamaktadır. Bölge 90'lı yıllara kadar tarımsal ve doğal alan özelliğini korumuş, ancak bundan sonra yapılaşmaya açılmıştır. 2010'lu yıllarda özellikle kıyı şeridinde inşaat faaliyetleri hızlanmış ve günümüzde sahil şeridi neredeyse tümüyle yapılaşmıştır. Alandaki yapılarda aşırı oturma ve farklı oturma (eğilme) sorunlarına sıkça rastlanmaktadır. Bunun yanı sıra bölgede suya doymun halde bulunan gevşek kum tabakalarının sıvılaşma potansiyeli de merak konusu olmuştur. Yüzeydeki gevşek kumulların varlığından hareketle bölgede sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu kanısı yaygın hale gelmiştir.

Çalışma alanının sınırları belirlenirken batı ve kuzey batıdaki kayalıklar, diğer kısımlarda ise imar alanı sınırı dikkate alınmıştır.

Literatürde Antalya bölgesinin depremselliği ve sıvılaşma riskinin belirlenmesi için sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Acar ve Budak (2004) yaptıkları çalışmada Antalya bölgesinde oluşabilecek deprem riski analizinde bölgenin tamamını tek bir alan kaynak olarak dikkate almıştır. Dipova ve Cangir (2011), belirlenen kaynak bölgelerine göre deterministik olarak deprem tehlike analizlerini gerçekleştirirken, Deniz ve Yüçemen (2005), yaptıkları olasılıksal deprem tehlike hesabı sırasında Antalya yöresi için Bommer vd. (2002) tarafından önerilen kaynak bölgelerini temel almıştır. Bu çalışmalar dikkate alındığında bölge için yapılan hesaplamalarda kullanılan azalım ilişkilerinin, deprem üretebilecek kaynak bölgelerin farklılığından dolayı, güncel azalım ilişkisi ve sismik kaynak bölgelemesi kullanılarak bir deprem tehlike analizi yapılması ve sıvılaşma analizleri için gerekli olan en büyük deprem ivmesi (a_{maks}) belirlenmesinin gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

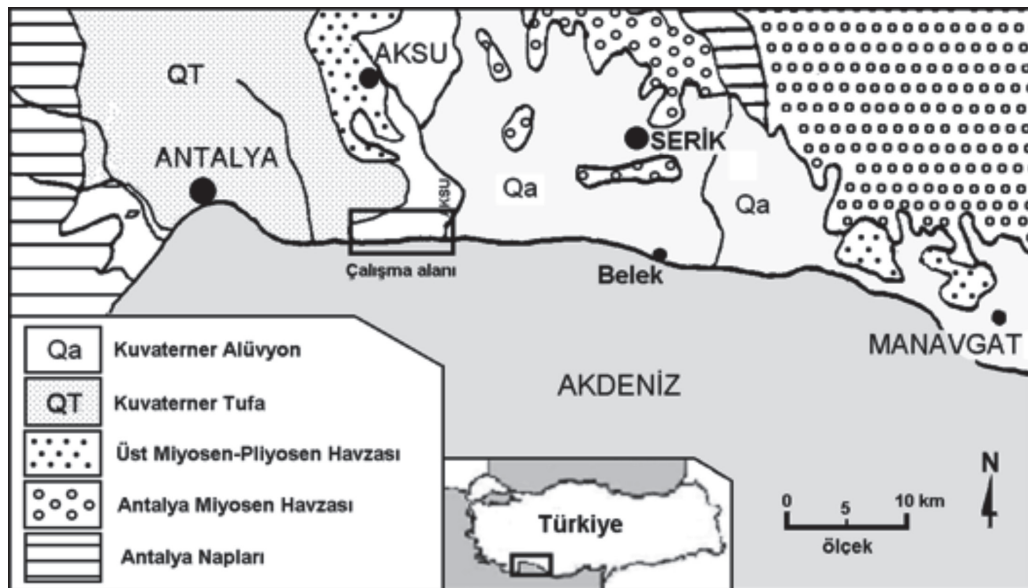
Bu çalışmada, çalışma alanının hakim zeminleri olan kum, kil ve organik kökenli (turba) zeminlerin indeks, dayanım ve sıkışabilirlik özellikleri laboratuvar ve arazi deneyleri ile incelenmiştir. Ayrıca, güncel sismik kaynak bölgelemesi kullanılarak, deprem tehlike analizi yapılmış ve sıvılaşma analizleri için gerekli olan parametrelerden olan a_{maks} elde edilmiştir. Arazi ve laboratuvar deney sonuçları kullanılarak bölgede bulunan suya doymun kum zeminlerin sıvılaşma potansiyeli araştırılmıştır. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı bir bilgisayar yazılımı olan ArcGIS r.9.3 (ESRI, 2009) kullanılarak veri tabanındaki tüm veriler, sayısal haritalar ve sondaj noktaları birlikte değerlendirilerek

çalışılan bölgelerin sıvılaşma potansiyeli araştırılmış ve zemin sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) haritası oluşturulmuştur. Depreme bağlı olarak denize doğru gelişebilecek olası yanal yayılma türü sıvılaşmaya bağlı zemin hareketleri ve olası deniz altı heyelanları gibi olgular bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

JEOLJİK VE JEOMORFOLOJİK ÖZELLİKLER

Kıyı alanının batısı ve kuzeyi yer yer 40 m yüksekliği bulan falez niteliğinde olan tufa kayalıkları ile çevrilidir. Kıyı alanının doğu komşusu ise Belek kıyı alanı ve Aksu Ovası'nın doğu bölümüdür (Şekil 1). Alanın güneyi Akdeniz ile sınırlıdır. Alanın imara açık bölümleri ve tarım alanı olarak kullanılan kesimlerinde kot denizden ortalama 3 m yükseklikindedir. Kıyı kumullarında ise yükseklik 15 m'ye kadar ulaşmaktadır (Dipova ve Oğuz, 1998). Yeraltı suyu seviyesi sığ olup derinlik 1 m'ye kadar düşmektedir.

Lara-Kundu kıyı alanı zeminleri, Aksu ve Köprüçay akarsularının taşıdığı sedimanlarla oluşmuştur. Bu mekanizma içinde ince taneli malzemeler denize kadar taşınarak Lara kıyı şeridini oluşturmuştur. Düşük eğimli taban topoğrafyası ve denizden esen hakim rüzgarlar sonucu "kıyı kumul"u oluşmaya başlamıştır (Dipova, 2002). Çeşitli jeolojik evrelerde taşınan malzemede kil ve silt içeriği arttığında ya da gölsel ve bataklıklal çökelim söz konusu olduğunda kum içinde kil, silt ve turba katman yada mercekleri gözlenebilmektedir. Kıyı kumullarının oluşturduğu bariyer arkasında lagün oluşmuştur (Yamansaz sulak alanı). Antalya ve çevresinde yürütülen bataklık kurutma çalışmaları kapsamında bu alanda da kanallar açılarak Yamansaz'ın bir kısmı kurutulmuştur. Sulak alanın kuruması sonucu ortaya "turba" sınıfı bir zemin ortaya çıkmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının jeoloji haritası (Akay vd., 1985'ten değiştirilerek).

Figure 1. Geological map of the study area (modified from Akay et al., 1985).

ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Antalya'daki yerel yönetim ve proje bürolarının arşivleri taranarak çalışma alanında daha önceden yapılmış zemin etüdü çalışmaları temin edilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu kaynaklardan akademik düzeyde nitelikli veri sağlanamadığı için araştırmaya özgü veriler üretmek amacıyla arazi programı başlatılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında 20 adet 20 metre derinliğinde sondaj kuyuları açılarak her 1.5 m'de bir alınan numuneler laboratuvarda incelenmiş, zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sondajlar sırasında 1.5 m'de SPT (Standart Penetrasyon Deneyi) yapılmıştır. Kum, kil, turba türü zeminlerden oluşan zeminde sondaj kuyusunun göçmemesi, örselenmenin en aza indirilmesi ve iş veriminin artırılması amacıyla içi boş burgu (hollow stem auger) sistemi kullanılmıştır (Şekil 2A). Bölgede yapılan sondajlarda kaynama problemi bilindiğinden sondaj takımının iç boşluğu su ile dolu tutularak ilerleme yapılmıştır. Örselenmemiş örnek alımı ve SPT deneyleri takım yukarı çekilmeden kanatlı kısmın ortasındaki boşlukta gerçekleştirilmiştir.

10 ayrı lokasyonda CPT (Koni Penetrasyon Deneyi) gerçekleştirilmiştir. Kamyon üzerine monteli, Hogentogler marka CPT ve boşluk suyu basıncı (CPT-U) ölçme donanımına sahip tam otomatik CPT makinesi (Şekil 2B) kullanılarak uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri ölçülmüştür. Statik sondalama ile CPT penetrometresi ortalama 2 cm/sn hızla zemine itilmektedir. Penetrometre, konik uçlu, uç açısı 60° , çapı 35.5 mm, sürtünme çevre yüksekliği 134 mm olan direnç ölçerdir. Zemin uç direnci (q_c) 1000 mm^2 'lik uç alanında, çevre sürtünmesi direnci (f_s) 15000 mm^2 'lik yanal yüzeyde ölçülür. Uç direnci değerleri itme sırasında oluşan boşluk suyu basıncına göre düzeltme işlemine tabi tutulmuş ve düzeltilmiş uç direnci (Q_t) değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın başında SPT ve CPT verilerinin birlikte değerlendirilmesi düşünülmüş olmakla birlikte, zemin profilindeki iri daneli ve sıkı seviyeler CPT probunun istenilen derinliklere ulaşmasına izin vermemiştir. Bu nedenle CPT verileri çalışmaya ait veriler olarak sunulmuş olmasına rağmen sıvılaşma analizlerinde kullanılmamış, aynı lokasyonlarda ilave sondaj ve SPT deneyi yapılmıştır.



(A)

(B)

Şekil 2. A) İçi boş burgu takımlı hidrolik sondaj makinesi ile delgi işlemi, B) Boşluk suyu basıncı (CPT-U) ölçme donanımına sahip CPT makinesi kullanılarak statik sondalama.

Figure 2. A) Drilling operation with hydraulic drilling rig and hollow stem augers, B) Static probing using CPT machine and pore pressure equipment (CPT-U).

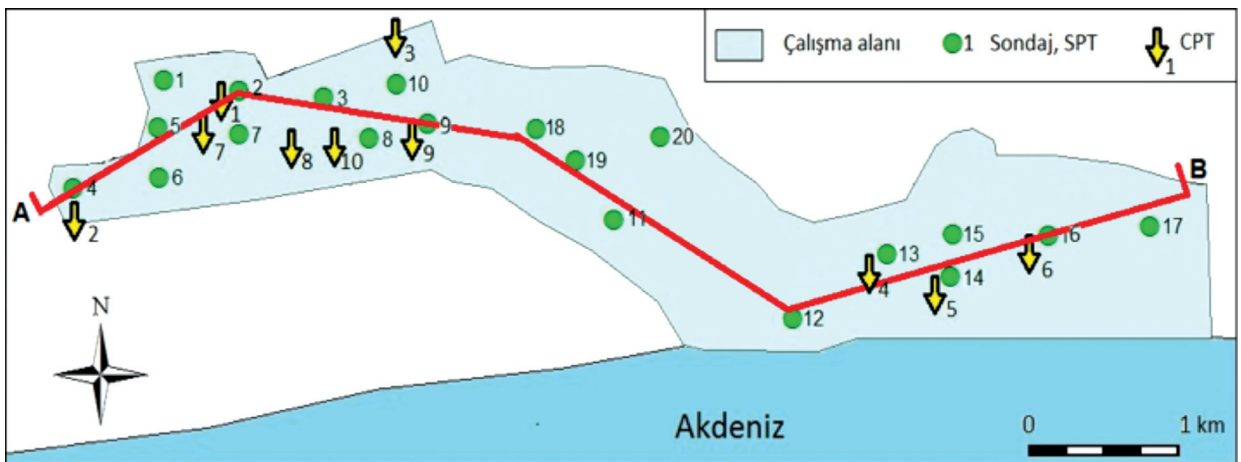
Sondaj ve CPT lokasyonları Şekil 3'te, sondaj bilgilerinden elde edilen A-B zemin kesiti ise Şekil 4'te verilmiştir. Arazi çalışmaları kapsamında yapılan SPT ve CPT deneylerinin sonuçları sırasıyla Şekil 5 ve 6'da verilmektedir.

Tüm sondaj kuyularında elde edilen örselenmiş numuneler üzerinde yapılan dane boyu dağılımı analizi sonuçlarına göre bölgedeki hakim zemin cinsinin siltli kum (SM) ve kötü derecelenmiş kum (SP) olduğu görülmüştür. Yapılan hidrometre deney sonuçlarına göre ise SP ve SW karakterli kumların ince tane oranının % 5 - % 12 arasında değiştiği ve ince maddenin çoğunlukla silt (M) olduğu, böylece de hakim zemin cinsinin SP-SM veya SW-SM olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kum zeminlerin kum, çakıl ve ince dane yüzdeleri Şekil 7A'da sunulmaktadır.

Zemin sıvılaşma araştırmalarının ilk adımı zemin profilinde potansiyel olarak sıvılaşacak zemin katmanlarının bulunup bulunmadığının belirlenmesidir. "Temiz kum" olarak nitelendirilen üniform kumların potansiyel olarak sıvılaşabilirliği genel kabul görmüş olmasına

rağmen siltli kumlar ve çakıllı zeminlerin sıvılaşabilirliği konusunda halen bir uzlaşma sağlanamamıştır. Tsuchida (1970) literatürdeki sıvılaşmış kumların tane boyu dağılımlarını inceleyerek zemin sıvılaşmasına etkisini araştırmış ve dağılım sınırlarını belirlemiştir. Buna göre, üniform kumlar iyi derecelenmiş kumlara kıyasla, ince kumlar ise iri taneli kumlara kıyasla daha kolay sıvılaşırabilir. İnceleme alanındaki 20 sondaj kuyusuna ait 227 adet tane boyu dağılımı grafiği Şekil 7B'de sunulmuştur. Zeminler çoğunlukla "olası sıvılaşabilir" bölgede, kısmen de "sıvılaşabilir" bölgede yer almaktadır.

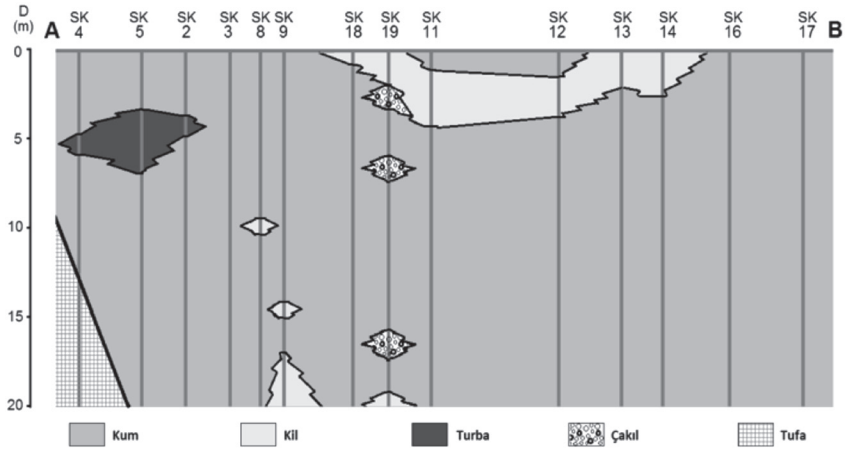
Her ne kadar yaygın zemin türü kum, çakıllı kum, siltli-killi kum olsa da, bölge zemininde yer yer kil tabakalarının da olduğu görülmüştür. Bu kil tabakalarından sondaj sırasında alınan örselenmemiş numuneler üzerinde Atterberg Limitleri, yoğunluk, su içeriği, ödometre ve konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılarak zemine ait indeks, sıkışabilirlik ve mukavemet parametreleri elde edilmiştir (Tablo 1).



Şekil 3. Sondaj ve CPT lokasyonlarının çalışma alanındaki dağılımı.

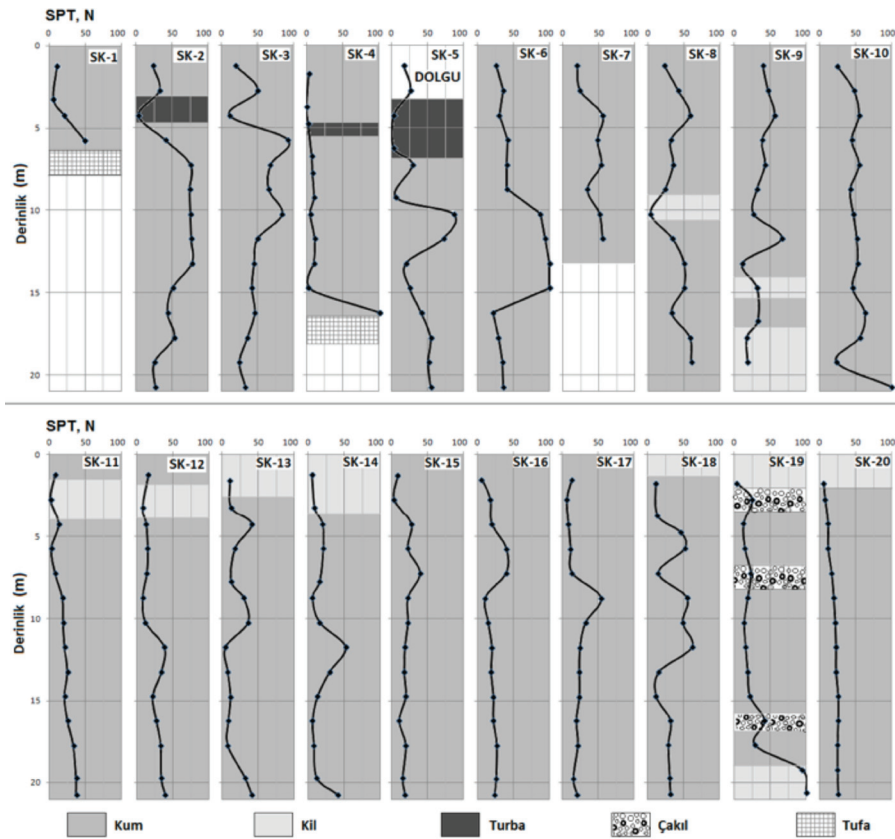
Figure 3. Distribution of borehole and CPT locations in the study area.

Dipova, Cangir



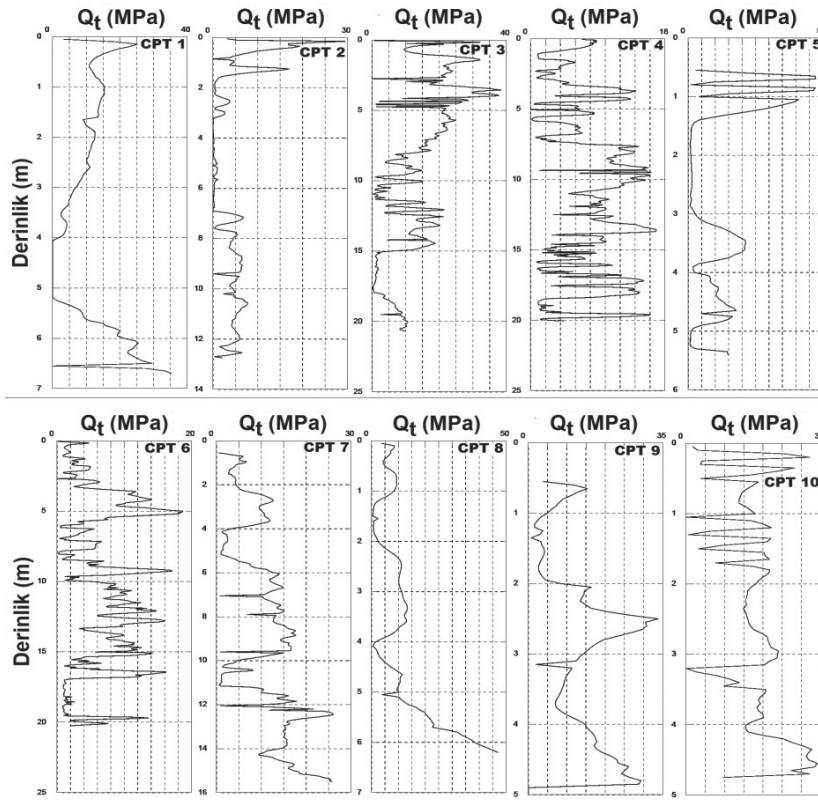
Şekil 4. A-B zemin kesiti (kesit doğrultusu Şekil 2' de gösterilmektedir).

Figure 4. A-B cross section (section line is shown in Figure 2).



Şekil 5. SPT darbe sayısının (N) derinlikle değişimi.

Figure 5. Variation of SPT count (N) with depth.



Şekil 6. CPT deneylerinde elde edilen düzeltilmiş uç direnci (Q_t) değerlerinin derinlikle değişimi.

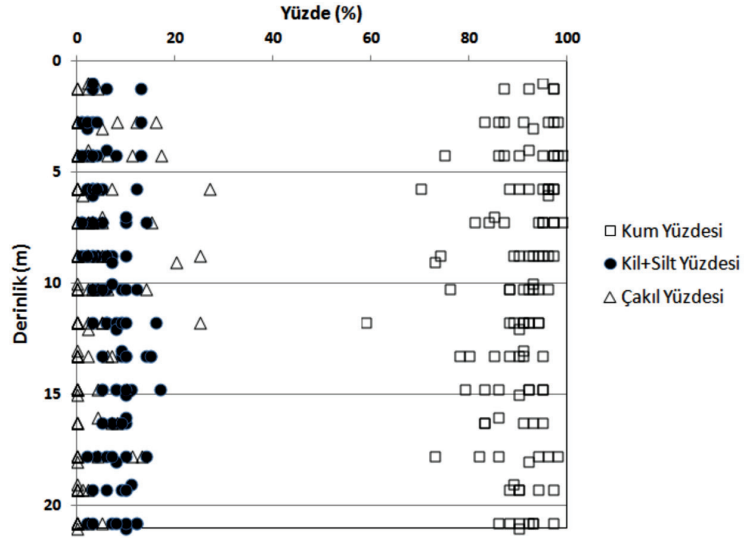
Figure 6. Variation of the corrected tip resistance (Q_t) values obtained from CPT tests with depth.

Çizelge 1. Zeminlerin indeks, sıkışabilirlik ve dayanım parametreleri:

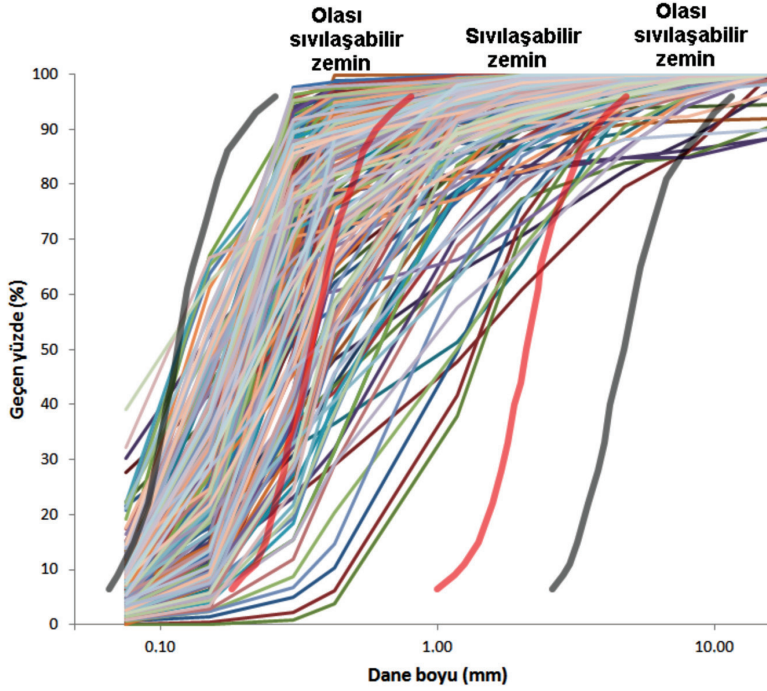
Table 1. Index, compressibility and strength parameters of the soils.

Sondaj	Derinlik (m)	γ (kN/m ³)	w_n	LL	PL	PI	c_u (kPa)	C_c	Açıklama
SK-4	3.00-3.50	17.2	64	53	-	-	29	0.423	Kil-Turba
SK-5	5.50-6.00	10.8	354	117	-	-	30	0.637	Turba
SK-9	16.00-16.5	19.5	30	51	26	25	133	0.123	CH
SK-9	19.0-19.50	20.6	29	43	20	25	192	0.125	CL
SK-12	2.50-3.00	19.1	45	57	38	19	92	0.386	MH
SK-13	1.00-1.50	20.9	26	39	22	17		0.218	CL
SK-14	2.00-2.50	19.2	36	41	21	20	36		CL
SK-14	2.50-3.00	20.1	40	64	29	35		0.300	CH
SK-16	1.00-1.50	21.5	24	47	23	24		0.186	CL
SK-19	1.50-2.00			42	19	23			CL
SK-19	17.5-18.00			46	23	23			CL

Dipova, Cangir



A



B

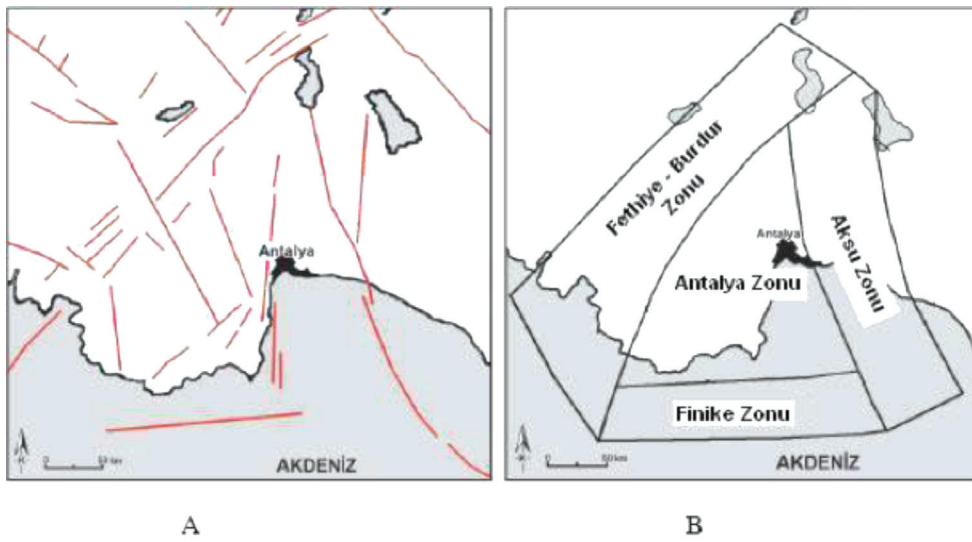
Şekil 7. A) Zeminlerin çakıl, kum ve ince tane yüzdelерinin derinlikle değışimi, B) Tüm örneklerin tane boyu dağılım eğrileri (sınırlar Tsuchida, 1970'den alınmıştır).

Figure 7. A) Variation of gravel, sand and fine grains percentage with depth B) Grain size distribution curves of all samples (borderlines are taken from Tsuchida, 1970).

SİSMİK KAYNAK KARAKTERİZASYONU

Sismik tehlike analizinin en önemli aşamalarından birisi sismik kaynak karakterizasyonudur. Bu aşamada ilk olarak sismik kaynakların geometrileri belirlenir, diri fay haritası çıkartılır ve makrosismisite kataloğu derlenir. Elde edilen bu katalog verileri kullanılarak büyüklük-tekrar ilişkileri modellenir

ve her fayın üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü belirlenir. Bu çalışmada Erdik vd. (1999)'un Türkiye geneli için gerçekleştirdikleri çalışma temel alınarak Dipova ve Cangir (2011) tarafından önerilen sismik kaynak karakterizasyonu kullanılmıştır (Şekil 8). Dipova ve Cangir (2011) tarafından tanımlanan sismik kaynaklara ait büyüklük-tekrar verileri Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 8. A) Antalya yöresinde aktif ve potansiyel aktif fay zonları (Erdik vd., 1999'dan değiştirilerek), B) Çalışmada baz alınan sismotektonik bölgeler (Dipova ve Cangir, 2011).

Figure 8. B) Active and potentially active fault zones in the Antalya region (modified from Erdik et al., 1999), B) Seismotectonic regions as the basis for the study (Dipova and Cangir, 2011).

Çizelge 2. Antalya ve civarındaki sismotektonik bölgelerin a ve b parametreleri (Dipova ve Cangir, 2011).

Table 2. The a and b parameters of seismotectonics zones around Antalya (Dipova and Cangir, 2011).

SİSMOTEKNİK BÖLGE	a	b	$M_w(\text{min}) - M_w(\text{maks})$
Fethiye-Burdur	6.65	0.98	4.0-6.7
Antalya	6.59	1.06	4.0-5.9
Finike	5.74	0.86	4.0-6.5
Aksu	5.61	0.92	4.0-6.0

SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ

Sismik tehlike analizi deterministik ve olasılıksal yöntemlerle yapılmaktadır. Deterministik yöntem en kötü yer hareketi koşulunun değerlendirilmesi için doğrusal bir yaklaşım dikkate alırken, olasılıksal yöntem depremin büyüklüğü, yeri, tekrarlanma aralığı ve bunlara bağlı olarak yer hareketi üzerindeki belirsizlikleri dikkate almaktadır (Kramer, 1996). Her iki yöntem de uygulama yönünden avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Bu sebeple, hangi modelin daha iyi sonuçlar verdiği sorusuna cevap halen aranmakta ve tartışılmaktadır (Seyrek, 2009). Her iki yöntemin de analizlere ışık tutabilmesi için birbirlerine tamamlayıcı olmaları gerekir. Alınacak kararın önemine, sismik aktiviteye ve projenin konumuna bağlı olarak bir yöntemin diğerine önceliği ortaya çıkabilecektir (McGuire, 2001).

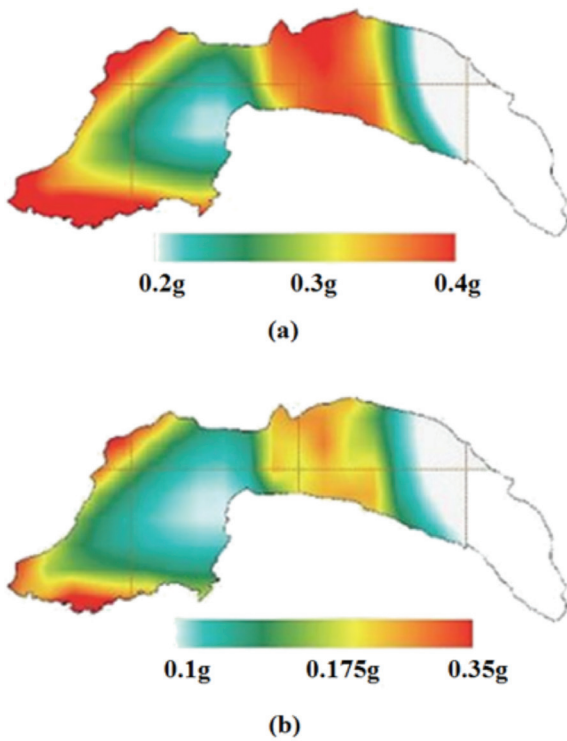
Deterministik sismik tehlike analizi yaklaşımında önce proje sahasını etkileyebilecek deprem kaynaklarından daha önceden meydana gelmiş en büyük depremleri ortaya koymak gereklidir. Eğer deprem kayıt tarihçesi yeterince eski değil veya deprem kayıtlarında bazı eksiklikler söz konusu ise en büyük deprem değeri, yerine göre 0.5 birim arasında arttırılabilir. İkinci aşamada ise, proje sahasının bulunduğu bölgenin karakteristiklerine en uygun azalım ilişkisi seçilir. Proje sahasına belirli bir uzaklıkta bulunan deprem kuşağındaki maksimum büyüklükteki depremin proje sahasında ana kayada oluşturacağı maksimum yer ivmesi, azalım ilişkisi yoluyla hesaplanır. Bu yaklaşımın oldukça pratik olması yanında en büyük dezavantajı proje sahasını etkileyecek maksimum yer ivmesi değerinin ortaya konulmasında rol oynayan belirsizliklerin yeterince hesaba katılmamasıdır.

Olasılıksal sismik tehlike analizinde (OSTA), depremin büyüklüğü, yeri ve tekrarlanma zaman

aralığına bağlı olarak, belirlenen sahada yapı tasarımı veya performans değerlendirilmesi için seçilen yıllık aşılma olasılıklarına karşılık gelen yer hareketi parametreleri hesaplanır. OSTA'nın genel aşamaları şöyle sıralanabilir; 1) proje alanında geçmişte meydana gelen deprem kayıtlarının derlenmesi ve güvenilir bir deprem kataloğunun oluşturulması, 2) ana şokların, öncü ve artçı şoklardan belirli bir zaman uzaklık penceresine göre ayrılması, 3) sismik kaynakların belirlenmesi, (4) oluşturulan deprem kataloğundaki depremlerin merkez üstlerinin konumuna göre sismik kaynaklara dağıtılması, belirlenen sismik kaynaklarla ilişkilendirilemeyen depremlerin katkısını da hesaba katmak üzere geri plan alan kaynakların tanımlanması, 5) uygun bir stokastik modelin seçilmesi, 6) bölge için bir azalım ilişkisi geliştirilmesi veya mevcut azalım ilişkilerinden uygun birinin seçilmesi, 7) bütün bu verileri kullanarak proje alanının sismik tehlikesini hesaplamak üzere hazırlanmış uygun bir bilgisayar yazılımının kullanılması (Yüçemen, 2008).

Çalışma alanında olasılıksal sismik tehlike analizi yöntemi uygulanarak, kaya taban ve zemin seviyesi için $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ karelaç yapılarak 475 yıllık tekerrür süresi için maksimum yatay yer ivmeleri hesaplanmıştır. Sismik tehlike analizinin yapılmasında CRISIS2007 yazılımı (Ordaz vd., 2007) kullanılmıştır. Boore ve Atkinson (2008) azalım ilişkisi kullanılarak Antalya ili için ana kayada ve $V_{s30} = 200$ m/sn zemin için 475 yıllık tekerrür süresine karşılık gelen eş-ivme haritaları elde edilmiştir (Şekil 9). Buna göre $V_{s30} = 200$ m/sn için hesaplanan maksimum yer ivmesi değerinin 0.31g ile 0.38g arasında, ana kaya ($V_{s30} = 1000$ m/sn) için ise bu değer 0.11 g ile 0.18 g arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Daha sonra, Boore ve Atkinson (2008) azalım ilişkisi kullanılarak yapılan deterministik tehlike

analizi ile 475 yıllık tekerrür süresine karşılık gelen ivme değeri, Lara bölgesinde $V_{s30} = 200$ m/sn için hesaplanmıştır. Buna göre $V_{s30} = 200$ m/sn için hesaplanan en büyük yer ivmesi 0.46 g olarak bulunmuştur. Deterministik ve olasılıksal yöntemler kullanılarak, elde edilen bu sonuçlara göre bölgede $V_{s30} = 200$ m/sn olan zeminler için yapılacak olan sıvılaşma hesaplarında $a_{max} = 0.4g$ olarak alınmasının uygun olacağı düşünülmüştür.



Şekil 9. Boore ve Atkinson (2008) bağıntısına göre 475 yıllık tekerrür süresine karşılık gelen eş-ivme haritası; A) $V_{s30} = 200$ m/sn, B) Kayada.

Figure 9. Iso-acceleration map corresponding to 475 years return period, according to Boore and Atkinson (2008); A) $V_{s30} = 200$ m/s, B) in rock.

SIVILAŞMA

Literatürde, sismik faaliyetleri yüksek bölgelerde yer alan gevşek kum/siltli kum zemin

tabakalarının sıvılaşabilirliğini belirlemede kullanılan değişik yöntemler bulunmaktadır. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde en yaygın şekilde kullanılan yöntem Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilen yöntem olup, zemin katmanının sıvılaşmaya karşı emniyet katsayısı (Kayma dayanımı/Kayma gerilmesi) şeklinde belirlenmektedir. 1960'lı ve 1970'li yıllarda H. B. Seed ve arkadaşları tarafından Kaliforniya Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar, sıvılaşma olayının anlaşılmasında büyük rol oynamıştır. Bu çalışmalar genellikle sıvılaşmayı tetikleyen yükleme koşullarının ortaya konmasına dönük çalışmalardır. Kum kaynaması, yüzey çatlakları veya yanıl yayılma görülen zeminlerde sıvılaşmanın olduğu kabul edilerek toplanan veriler, çoğunlukla düz yüzeyli ve sığ derinliklerdeki alüvyon ve nehir çökellerinden alınmıştır. Seed ve Idriss yöntemi zeminlerin sıvılaşma dirençlerinin belirlenmesi için iki değişkenin hesaplanmasını veya tahmin edilmesini gerektirir.

- Zemin tabakasındaki sismik gerilmeyi ifade eden devirsel gerilme oranı, CSR (Cyclic Stres Ratio)
- Zeminin sıvılaşmaya karşı direncini gösteren devirsel direnç oranı, CRR (Cyclic Resistant Ratio)

Bir zeminin sıvılaşabilirliğinin göstergesi olan sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FL), aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$FL = (CRR_{7.5} / CSR) \times MSF \quad (1)$$

$CRR_{7.5}$: 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için CRR

CSR : Deprem neden olduğu tekrarlı gerilme oranı

MSF : Deprem büyüklüğü için önerilen ölçek faktörüdür.

Kuramsal olarak; sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının 1'den küçük ve eşit değerleri için

Dipova, Cangir

sıvılaşmanın meydana geleceği, 1'den büyük değerleri için sıvılaşmanın olmayacağı kabul edilir (Seed ve Idriss, 1982). Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı, belli bir derinlikteki bir zemin seviyesinin sıvılaşma direncinin, bir başka deyişle ilgili zemin seviyesinin sıvılaşabilirliğinin göstergesidir. Herhangi bir noktada sıvılaşmanın olup olmayacağını bilmesi ya da sıvılaşma olasılığının hesaplanması, araştırılan bölgedeki hasarın tahmin edilmesi için yeterli değildir. Sadece güvenlik faktörünün hesaplanması, geniş ve derin alanlar için göreceli bir değerlendirme yapılmasına ve sıvılaşma potansiyeli açısından sıvılaşma haritalarının hazırlanmasına doğrudan imkân vermemektedir. Sıvılaşma olasılığı bulunan bir zeminde sıvılaşma şiddet indeksinin değer aralığının ne olacağı büyük önem kazanmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak, Iwasaki vd. (1982) tarafından güvenlik faktörünü de içerecek şekilde "sıvılaşma indeksi (IL)" adı verilen bir parametre önerilmiş ve bu indeksin hesaplanması için aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 2) verilmiştir.

$$IL=0.20FzWzdz \quad (2)$$

$$FL < 1.0 \text{ için } F(z)=1-FL$$

$$FL \geq 1.0 \text{ için } F(z)=0$$

$$z < 20m \text{ için } W(z)=10-0.5z$$

$$z \geq 20m \text{ için } W(z)=0$$

z: Yüzeyden zemin tabakasının orta noktasına olan derinlik (m)

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (FL), sıvılaşmanın gelişmeyeceği sınır değeri üzerinde bir mutabakat olmaması, analizlerde kullanılan deprem ve zemin parametrelerinin içerdikleri belirsizlikler, sıvılaşma açısından olasılığa dayalı bir değerlendirmenin yapılmasına ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bazı araştırmacılar (Chen ve Juang, 2000; Juang vd., 2003; Çetin vd., 2004) sıvılaşmanın olasılık esaslı değerlendirilmesine yönelik çalışmalar yapmıştır.

Çalışma alanındaki suya doymun kum katmanlarının sıvılaşma davranışının araştırılması amacıyla olasılıksal sıvılaşma potansiyeli (P_L) ve Iwasaki vd. (1982) tarafından geliştirilen, Yılmaz ve Çetin (2004) tarafından revize edilen "sıvılaşma şiddeti indeksi" (LSI) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşıma göre (LSI); sıvılaşma olasılığı (PL), potansiyel olarak sıvılaşabilir tabaka kalınlığı (TH) ve potansiyel olarak sıvılaşabilir tabakaya olan derinliğin (WF) bir fonksiyonudur (Eşitlik 3).

$$LSI = \sum_{i=1}^n PL \cdot TH \cdot WF \quad (3)$$

Burada:

P_L = Sıvılaşma olasılığı (ondalık sayı olarak)

TH = potansiyel olarak sıvılaşabilir tabaka kalınlığı

WF= $1-0.05 \cdot z$ ($z < 20m$, z: yüzeyden metre cinsinden derinliği ifade eder).

Sıvılaşma olasılığı (PL) Çetin vd. (2004) tarafından Eşitlik 4'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$P_L = \Phi \left(- \frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05 \cdot FC + 44.97 \right)}{2.70} \right) \quad (4)$$

Burada:

$N_{1,60}$: Düzeltilmiş SPT darbe sayısı

FC: İnce tane oranı

CSR: Devirsel kayma gerilmesi oranı

M_w : Deprem moment büyüklüğü

s_v : Efektif gerilme

Φ : Standart kümülatif normal dağılım ($\Phi^{-1}_{(PL)}$) standart kümülatif normal dağılımın tersini ifade etmektedir.)

Tüm SPT, N değerleri düşey gerilme durumları için düzeltilmiş ve Liao ve Whitman (1986) CN değerleri ile çarpılarak, 1 atm'lik efektif düşey gerilme altında ölçüleceği varsayılan N1 değerine çevrilmiştir. Bir sonraki aşamada ise farklı enerji, ekipman ve prosedür uygulamaları için Eşitlik 5'te özetlendiği şekilde düzeltilerek, $N_{1,60}$ değerleri elde edilmiştir

$$N_{1,60} = N1 \cdot CR \cdot CS \cdot CB \cdot CE \quad (5)$$

Burada:

CR: Tij uzunluğu düzeltmesi (Skempton, 1986)

CS: Numune alıcı düzeltmesi (Skempton, 1986)

CB: Delgi çapı düzeltmesi (Skempton, 1986)

CE: Tokmak enerji verim düzeltmesi (Clayton vd., 1995)

LSI indeksi sınırları aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Yılmaz ve Çetin, 2004).

- $0 < LSI < 0.35$ sınılaşma potansiyeli çok düşük
- $0.35 < LSI < 1.30$ sınılaşma potansiyeli düşük
- $1.30 < LSI < 2.5$ sınılaşma potansiyeli yüksek
- $LSI > 2.5$ sınılaşma potansiyeli çok yüksek

Temiz kumlar dışında ince taneli zeminlerin de bazı koşullarda sınılaşabileceği bilinmektedir. Önalp ve Arel (2002)'nin Adapazarı Kriterine göre; siltlerde kesin sınılaşma belirmesi için; siltlerin, düşük plastisiteli silt (ML) sınıfında olması, numunelerin doğal su muhtevasının (w) likit limite (w_L) eşit olması, w_L değerinin %30'dan küçük olması ve zeminin içerdiği kil danelerin %15'ten az olması durumunun aynı anda oluşması gerekmektedir (Önalp ve Arel, 2002). Çalışma alanındaki ince daneli zeminler bu özellikleri taşımadığından, sınılaşma analizleri sadece suya doygun kum katmanları için uygulanmıştır.

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) ÇALIŞMALARI

Mühendislik veri üretimi ve analizi sonrasında, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) yardımı ile elde edilen tematik haritalar bu verilerin kolay ve anlaşılır bir biçimde sunulmasına olanak sağlamaktadır. Bu amaçla, çalışma alanına ait çeşitli tematik haritalar, CBS kullanılarak bilgisayara ortamına aktarılmıştır. Öncelikle bölgenin 1/25000 ölçekli topoğrafik haritası sayısallaştırılmıştır. Yerleşim alanının 1/5000 ölçekli imar paftaları da ArcInfo programları kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Arazide yapılan mekanik sondajlar ve CPT deney noktaları da CBS ortamına aktararak lokasyon haritası hazırlanmıştır. Çalışmada sınılaşma şiddet indeksi haritası ArcGIS r.9.3 (ESRI, 2009) programında Kriging interpolasyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. İnterpolasyon yöntemleri, bilinen değerlerden bilinmeyen değerler türetmeye (başka bir deyişle ara değer bulmaya) yarayan sayısal yöntemlerdir. İnterpolasyonla üretilen haritalarda sondaj sıklığı ve sahaya yayılımının belirsizlikler üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle LSI

Dipova, Cangir

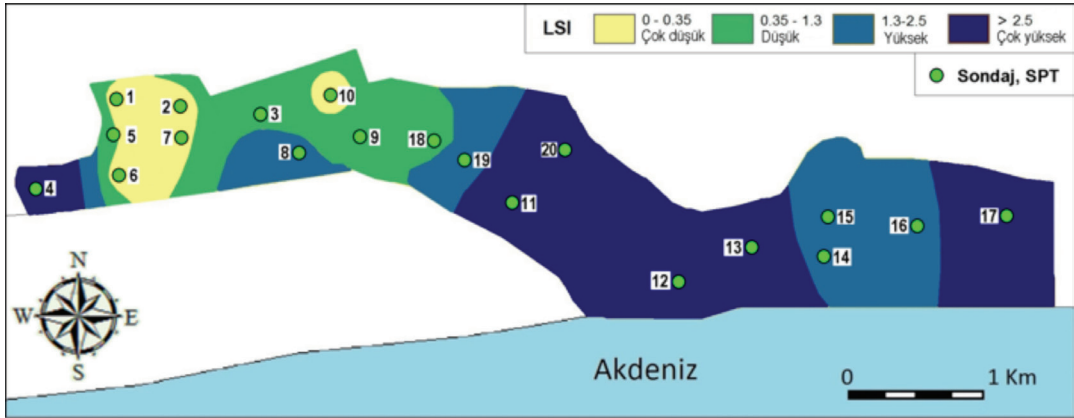
haritasının sondajlardan uzaklaşan bölgelerinde kısmen bazı belirsizlikler içerebileceği hesaba katılmalıdır.

Arazideki bir inceleme noktasındaki tüm katmanlar için belirlenen olasılıksal sıvılaşma potansiyeli değerleri kullanılarak sıvılaşma şiddeti indeksi değerleri elde edilmiş ve CBS ortamında oluşturulan zemin sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) haritası Şekil 10'da sunulmuştur. Buna göre; çalışma alanının % 41'lik kısmında sıvılaşma şiddeti çok yüksek, % 27'lik kısmında yüksek, % 19'luk kısmında düşük, % 13'lük kısmında da çok düşük çıkmıştır. Arazinin doğu ve denize yakın bölümlerinin sıvılaşma şiddetinin batı ve kara tarafındaki zeminlere göre sıvılaşma şiddetinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

SONUÇLAR

Çalışmalar sonucunda; arazi geneli için sıkı kumun egemen olduğu, bazı bölümlerde ise gevşek kum, kil ve turba bulunduğu belirlenmiştir. Kumda SPT-N değerleri 0-5 m arasında 15 ile 30, 5-10 m arasında ise 20 ile 40 aralığındadır. Killi zeminlerde sıkışma İndisi (Cc) değerinin 0.123-0.386 arasında, drenajsız kayma dayanımının $c_u = 36-192 \text{ kN/m}^2$ arasında olduğu bulunmuştur. Turbanın sıkışma indisi (Cc) değerleri 0.423-0.637 arasındadır.

(Boore ve Atkinson) 2008 azalım ilişkisi kullanılarak zemin profili $V_{s30} = 200 \text{ m/sn}$ için yapılan olasılıksal ve deterministik sismik tehlike analizlerine göre, 475 yıllık tekerrür süresine karşılık gelen maksimum yer ivmesi değerinin Antalya Lara-Kundu bölgesinde 0.40 g olarak alınmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Fay hatlarının geometrilerindeki belirsizlikten dolayı yapılan analizlerde alan kaynak kullanılarak bölgede oluşabilecek maksimum yer ivmesi değerleri belirlenmiştir.



Şekil 10. Çalışma alanı için LSI indeksi dağılım haritası.
Figure 10. LSI index distribution map for the study area.

Elde edilen tüm veriler ışığında coğrafi bilgi sistemleri (CBS) yöntemi kullanılarak zemin sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) haritası oluşturulmuştur. SPT sonuçları kullanılarak hazırlanan LSI haritasına göre çalışma alanının % 41'lik kısmında sıvılaşma şiddeti çok yüksek, % 27'lik kısmında yüksek, % 19'luk kısmında düşük, % 13'lük kısmında da çok düşük çıkmıştır. Arazinin doğu ve denize yakın bölümlerinin sıvılaşma şiddetinin batı ve kara tarafındaki zeminlere göre sıvılaşma şiddetinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Acar, M. H., Budak, G., 2004. Antalya Yamansaz Bölgesi'nin sıvılaşma potansiyelinin araştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi. 469, İstanbul.
- Akay, E., Uysal, Ş., Poisson, A., Cravatte, J., Müller, C., 1985. Antalya Neojen havzasının stratigrafisi. T.J.K. Bülteni, 28 (2), 105-121.
- Bommer, J., Spence, R., Erdik, M., Tabuchi, S., Aydınoglu, N., Booth, E., Del Re, D., Peterken, O., 2002. Development of an earthquake loss model for Turkish catastrophe insurance. Journal of Seismology, 6, 431-446.
- Boore, D. M., Atkinson, G. M., 2008. Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV and 5% damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s. Earthquake Spectra, 24 (1), 99-138.
- Çetin, K. O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Kayen, R. E., Moss, R. E. S., 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 130 (12), 1314-1340.
- Chen, C. J., Juang, C. H., 2000. Calibration of SPT and CPT-based liquefaction evaluation methods, In: Innovations and applications in geotechnical site characterization, edited by: Mayne, P.W., Hryciw, R., Vol. 97. Geotechnical Special Publication, ASCE, Reston, 49-64.
- Clayton C. R. I., Mathews M. C., Simons N. E., 1995. Site investigation. 2nd edition, Blackwell Science.
- Das, Braja M., 1983. Fundamentals of soil dynamics. Elver Science Publishers Co., Inc, New York, NY, 1983.
- Deniz, A., Yüccemen, M. S., 2005. Antalya yöresi için deprem tehlikesinin stokastik yöntemler ile tahmini. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 22-25 Eylül 2005, Antalya.
- Dipova, N., 2002. Antalya kıyı düzlüklerinin oluşumu ve mühendislik özellikleri, IV. Kıyı. IV. Kıyı Mühendisliği Ulusal Sempozyumu, 24-27 Ekim 2002, Antalya, Bildiriler Kitabı, 429-442.
- Dipova, N., Cangir, B., 2011. Antalya ili yerleşim alanının depremselliğinin araştırılması. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 35 (2), 93-114.
- Dipova, N., Oğuz, C., 1998. Lara (Antalya) kumulları ve kıyı alanı. Türkiye'nin Kıyı ve Deniz Alanları II. Ulusal Konferansı Bildiriler Kitabı, 22-25 Eylül, ODTÜ, Ankara.
- Erdik, M., Alpay Biro, Y., Onur, T., Şeşetyan, K., Birgören., 1999. Assessment of earthquake hazard in Turkey and neighboring regions. Annali Di Geofisica, 42 (6), 1125-1138.
- ESRI, 2009. ArcGIS Desktop: release 9.3. Environmental Systems Research Institute, Redlands CA, USA.
- Iwasaki T, K., Tokida K. Tatsuoka, Watanabe, S., Yasuda, S., Sato, H., 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. Proceedings of the 13th International Conf. on Microzonation", Seattle, USA, 3, 1319-1330.
- Juang, C. H., Yuan, H., Lee, D. H., Lin, P. S., 2003. Simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 129 (I), 66-80.
- Kramer, S. L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, New Jersey.
- Liao, S. S. C., Whitman, R. V., 1986. Overburden correction factor for SPT in sand. Journal of

Dipova, Cangir

- Geotechnical Engineering, ASCE, 112 (3), 373-37.
- McGuire, R. K., 2001. Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 377-384.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J., 2007. CRISIS2007, Ver. 7.2, Program for Computing Seismic Hazard, Instituto de Ingeniería, UNAM, Mexico.
- Önalp, A., Arel, E., 2002. Siltlerin sıvılaşma yeteneği: Adapazarı kriteri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, 1, 363-372, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Seed, H. B., Idriss. I. M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97 (SM9), 1249-1273.
- Seed, H. B., Idriss. I. M., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA*, 134 p.
- Seyrek, E., 2009. Baraj yeri sismik tehlike analizlerinde sayısal çözümleme modelleri ve bir uygulama. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Doktora Tezi*, 184 s (yayımlanmamış).
- Skempton, A.W., 1986. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation. *Geotechnique*, 36 (3), 425-447.
- Tsuchida, H., 1970. Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. *Abstract of the Seminar in the Port and Harbor Research Institute, Japan*.
- Yılmaz, Z., Çetin, K. Ö., 2004. GIS-based seismic soil liquefaction assessment for Sakarya city after 1999 Kocaeli-Turkey earthquake. *Proc. of the 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and The 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, 7th-9th January 2004, University of California, Berkeley, USA, 909-916.
- Yüçemen, M. S., 2008. Deprem tehlikesinin tahmininde olasılıksal yöntemler, Bölüm: Binalar için deprem mühendisliği temel ilkeleri. *Editörler, E. Canbay v.d., Bizim Büro Basımevi*, 365-413, Ankara.



Araştırma Makalesi / Research Article

Karstik Bölge Akarsularında Taban Akışının Ayrılması

Baseflow Separation in Karstic Region Streams

Ebru ERİŞ

Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bornova, İZMİR

Geliş (Received): 19 Eylül (September) 2016/ Düzeltme (Revised): 13 Aralık (December) 2016 /Kabul (Accepted): 14 Aralık (December) 2016

ÖZ

Taban akışının tahmini; su temini, sulama, akarsu taşımacılığı, enerji üretimi ve yeraltı suyu çalışmaları vb. hidrolojik faaliyetler için önemlidir. Bu çalışmada, taban akışının tahminine yönelik literatürde kabul görmüş farklı yöntemler karstik özelliğe sahip Akdeniz Bölgesi akarsularına uygulanmıştır. Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi, İngiliz Hidroloji Enstitüsü Yöntemi ve Dijital Filtreleme Yöntemi havzadaki akım gözlem istasyonlarına ait günlük akımlara uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Uygulanan yöntemlerin taban akış miktarını uygulama alanı ile ilgili mevcut çalışmalarda belirlenen taban akışına yakın tahmin ettiği görülmüş; uygulanan yöntemler arasında önceki çalışmalara en yakın sonuçların Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi ile elde edildiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akdeniz Bölgesi, Dijital Filtreleme Yöntemi, Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi, İngiliz Hidroloji Enstitüsü Yöntemi, Karstik Bölge, Taban Akışı.

ABSTRACT

Baseflow estimation is important for hydrological activities such as water supply, irrigation, river transportation, energy production and groundwater practice. In this study, different methods widely used in the literature for baseflow estimation are applied on streams in the karstic Mediterranean Region. Three methods, the nonlinear baseflow separation, United Kingdom Institute of Hydrology and Recursive Digital Filter, were performed on daily flows of gauging stations in the region and results were compared. It is seen that the calculated baseflow is not far from results of previous case studies available for the study area. However, the nonlinear baseflow separation method is found to be the closest in terms of approaching the results of the previous studies.

Keywords: Mediterranean Region, Digital Filter Method, Nonlinear Baseflow Separation Method, United Kingdom Institute of Hydrology Method, Karstic Region, Baseflow.

GİRİŞ

Akarsudaki toplam akış dolaysız ve dolaylı olmak üzere iki ana bileşene ayrılabilir. Dolaysız (doğrudan) akış, yüzey akışı ve yüzeyaltı akışının gecikmeyen kısmı; dolaylı akış ise yeraltı akışı ile yüzeyaltı akışının gecikmeye uğramış kısmı olan taban akışı olarak tanımlanmaktadır. Dolaysız akış ancak yağış şiddetinin zeminin sızma kapasitesini aştığı zamanlarda meydana geldiği için şiddetli yağışlardan sonra önem kazanmaktadır. Yağışsız kurak dönemlerde akarsuyu besleyen en önemli kaynak taban akışı olduğundan taban akışının önemi özellikle kurak dönemlerde ortaya çıkar.

Taban akışının tahmini, hidroloji ve su kaynaklarını ilgilendiren pek çok konu ile doğrudan ilişkilidir. Bu amaçla yapılan yağış-akış modelleri, hidrograf analizi, düşük akım istatistikleri, havza depolama kapasitesi tahmini gibi hidrolojik ve su kaynakları ile ilgili çalışmalarda taban akışının belirlenmesi gereklidir.

Taban akışının belirlenmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan teknolojik izleme yöntemleri masraflıdır. Taban akışını ayırmada kimyasal izleyiciler ve saha çalışma ve gözlemleri gibi yöntemler geniş havzalarda uygulanamamaktadır. Bu yüzden hidrograf analizine dayanan taban akışı ayırma yöntemleri geliştirilmiştir. Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de henüz genel kabul görmüş bir taban akışı ayırma yöntemi bulunmadığından uygulamada basit ancak son derece öznel grafik yöntemlerle yetinilmektedir. Bu yöntemlerin her biri diğerinden farklı sonuçlar verebilmektedir.

Grafik yaklaşımların (Hall, 1971; Chapman, 1999) yanında konu ile ilgili analitik (Birtles, 1978; Szilagyi ve Parlange, 1998) veya sayısal modeller de (Nathan ve McMahon, 1990; Arnold vd., 1995) geliştirilmiştir. Grafik yaklaşımlar

içerisinde yeraltı suyu biriktirme sisteminin doğrusal bir hazne olduğu kabulü üzerine kurulmuş çok sayıda yöntem bulunmakla birlikte doğrusal olmayan hazne kabulüne dayanan yöntemler de bulunmaktadır. Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi’nin (DOHY) Türkiye’de uygulamaları mevcuttur (Wittenberg ve Aksoy, 2010; Aksoy ve Wittenberg, 2011, 2015; Eris ve Wittenberg, 2015). Sayısal yöntemlerden İngiliz Hidroloji Enstitüsü Yöntemi (İHEY) ve Dijital Filtreleme Yöntemi (DFY) ise yine taban akışı ayırmada kullanılmaktadır. İHEY adında anlaşılacağı üzere İngiliz Hidroloji Enstitüsü tarafından önerilmiş (IH, 1980) ve Piggott vd. (2005) tarafından revize edilmiştir. DFY ise Lyne ve Hollick (1979) tarafından önerilen algoritmanın günlük akım verilerine uygulanması ile geliştirilmiştir (Nathan ve McMahon, 1990; Eckhart, 2005; Li vd., 2014; Su vd., 2016). Sayısal yöntemler ve regresyon denklemleri ile taban akışı tahmini ülkemiz akarsuları için de gerçekleştirilmiştir (Kurt, 2007; Aksoy vd., 2008; Saphioğlu ve Çimen, 2010; Zaifoğlu, 2013; Kayan, 2014).

Öte yandan, Türkiye akarsu havzalarının üçte birinin karstik bölgelerde bulunduğu bilinmektedir (Benzeden vd., 1993; Graf ve Bozcu, 2006). Mevcut su kaynaklarının önemli bir kısmının bu akarsu havzaları üzerinde bulunduğu dikkate alındığında, özellikle karstik pınar boşalmalarının önem taşıdığı akarsu havzalarında yapılacak planlamalarda taban akışının doğru olarak belirlenmesinin önemi anlaşılabilir. Bu çalışma için seçilen ve karstik yapıya sahip bölgelerimizden biri olan Akdeniz Bölgesi akarsularında da çekilme eğrisi parametrelerinin ve yeraltı suyu miktarının belirlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Ünal, 1981; Baran ve Harmancıoğlu, 1993; Saphioğlu, 2005; Koç, 2008).

Bu çalışmada, DOHY, İHEY ve DFY karstik yapıya sahip Akdeniz Bölgesindeki akarsulara uygulanmıştır. Çalışmanın temel amacı söz konusu yöntemlerin karstik bölgelere uygulanabilirliğin araştırılması, farklı yöntemlerle elde edilen taban akışı ve buna bağlı olarak yüzeysel akışa karst katkı miktarlarının belirlenmesi ve mevsimsel değişimlerinin karşılaştırılmasıdır.

YÖNTEMLER

Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi (DOHY)

Havzadaki biriktirme sisteminin doğrusal bir hazne olduğu kabulü üzerine kurulmuş çok sayıda yöntemin yanı sıra, söz konusu sistemin doğrusal olmayan yapısını dikkate alarak taban akışını toplam akıştan ayıran bir yöntem de mevcuttur. Wittenberg (1999) tarafından geliştirilen ve Wittenberg ve Sivapalan (1999), Wittenberg (2003), Wittenberg ve Aksoy (2010), Aksoy ve Wittenberg (2011, 2015) tarafından da kullanılan yöntemin esası aşağıda verilmektedir.

Doğrusal olmayan hazne teorisinde, depolama hacmi (S); debi (Q) ile,

$$S = aQ^b \quad (1)$$

şeklinde ilişkilendirilmiştir. Hazneye girdi olmadığında (havzaya yağış düşmediğinde) süreklilik denklemi

$$\frac{dS}{dt} = -Q \quad (2)$$

şeklinde (1) ve (2) eşitliklerinin birleştirilmesi ile elde edilen diferansiyel denklemin Q_0 başlangıç koşulu göz önünde bulundurularak yapılan çözümü

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{1-b}}{ab} t \right]^{\frac{1}{b-1}} \quad (3)$$

olarak bulunur. (3) eşitliğinde geçen a ve b parametreleri gözlenen günlük akım verileri

kullanılarak ayarlanır (kalibre edilir). Yapılan çok sayıda uygulama sonrasında $b = 0.5$ alınabileceği sonucuna ulaşılmış, serbest yüzeyle akiferler için $b = 0.5$ 'in standart bir üs olarak kullanılabilceği, a 'nın ise zeminin boşluk oranı, hidrolik iletkenliği ve diğer morfometrik özellikleri ile ilgili bir parametre olabileceği düşünülmüştür. Nitekim bu çalışmada da b parametresi sabit kabul edilerek her bir ay için a parametreleri belirlenmiştir. Bu işlem sırasında hesaplanan ve gözlenen çekilme eğrileri arasındaki benzerliğin kriteri olarak varyasyon katsayısı kullanılmıştır. Varyasyon katsayısı;

$$CV = \frac{1}{Q_{gözlem}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i,gözlem} - Q_{i,tahmin})^2}{N-1}} \quad (4)$$

ile hesaplanmıştır. Burada $Q_{gözlem}$, Q_{tahmin} sırasıyla gözlenen ve tahmin edilen akım değerlerini; N çekilme eğrisindeki gün sayısını göstermektedir. Çekilme parametreleri belirlendikten sonra her bir istasyon için taban akışı BNLP adı verilen bir FORTRAN programı (Wittenberg, 1999) ile toplam akıştan ayrılmıştır.

İngiliz Hidroloji Enstitüsü Yöntemi (İHEY)

Taban akışını toplam akıştan ayırmak için kullanılan dijital filtreleme tekniklerinden biri olan İHEY İngiliz Hidroloji Enstitüsü tarafından önerilmiştir (İH, 1980). Yöntem, $0.9y_i \leq \min(y_{i-1}, y_{i+1})$ günlük akım gözlem serilerinin dönüm noktalarının belirlenmesi ve bu noktalar arasındaki doğrusal enterpolasyona dayanmaktadır. Birbirleriyle çakışmayacak şekilde günlük akımlar beşer günlük gruplara ayrılır ve bu grupların minimumları belirlenir. Yöntemde sağlandığı takdirde i numaralı minimum (y_i) dönüm noktası olarak kabul edilir. Yöntemde kullanılan 0.9 katsayısı kesin

bir katsayı olmamakla birlikte bu çalışmada değiştirilmeden kullanılmıştır. Dönüm noktaları belirlendikten sonra, söz konusu noktalar doğrusal enterpolasyon ile birleştirilerek taban akışını temsil eden bir zaman serisi elde edilir.

Dijital Filtreleme Yöntemi (DFY)

Bu yöntemde, toplam akışın taban akışı ve yüzey akışını içeren iki bölümden oluştuğu kabul edilir (Nathan ve McMahon, 1990). Yöntemde taban akışı,

$$f_t = \alpha f_{t-1} + \frac{(1+\alpha)}{2}(y_t - y_{t-1}) \quad (5)$$

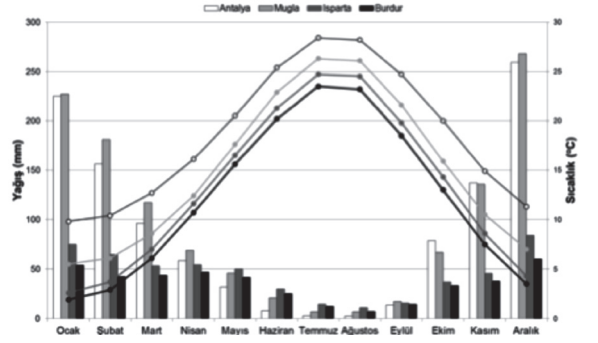
ile ayrılır. Burada f_t , t zamanındaki filtre edilmiş yüzey akışı y_t , t zamanındaki günlük akım, α ise filtre parametresidir. Buna göre taban akışı;

$$b_t = y_t - f_t \quad (6)$$

şeklinde elde edilebilir. Filtre parametresi için en uygun değer Nathan ve McMahon (1990) tarafından 0.925 olarak verilmiş ve bu çalışmada aynen kullanılmıştır. Taban akışı ileri, geri ve tekrar ileri olmak üzere üç kez yapılan filtreleme sonucu elde edilmiştir.

ÇALIŞMA ALANI VE VERİ

Çalışma alanı karstik yapıya sahip Akdeniz Bölgesi'dir. Kışın ılık ve yağışlı, yazın kurak ve sıcak iklime sahip Akdeniz Bölgesi'nde nadiren kar yağışı görülmektedir. Şekil 1'den anlaşılacağı üzere bölgenin iç kesimi kıyı kesimlerine göre daha az yağış almaktadır. Antalya, Muğla, Isparta ve Burdur verilerine dayanarak bölgenin yıllık toplam yağış ortalaması yaklaşık 420 mm ile 1160 mm arasında değişmektedir. Bölgenin sıcaklık ortalaması ise 15 °C'dir (MGM, 2015).



Şekil 1. Çalışma alanına ait uzun yıllar (1954-2013) için yıllık toplam yağış ve sıcaklık ortalaması.

Figure 1. Mean total precipitation and temperature of the study area for long-term (1954-2013).

Taban akışının belirlenmesinde bölgedeki üç Akım Gözlem İstasyonu'na (AGİ) ait günlük akım verileri kullanılmıştır. İstasyonların konumları Şekil 2'de, ve istasyonlara ait genel özellikler Çizelge 1'de verilmiştir. Bu istasyonların ikisi Manavgat Nehri, diğeri ise Köprüçay üzerinde bulunmaktadır.

Manavgat Nehri ortalama akımının yaklaşık üçte ikisinin karstik pınarlardan geldiği, nehir üzerinde bulunan Oymapınar Baraj Gölü altında kalan Dumanlı Pınarı'nın ortalama akımının 50 m³/s olduğu, Dumanlı dışında kalan ve debileri 1-10 m³/s arasında değişen 40 kadar pınarın nehri beslediği bilinmektedir (Öziş ve Keloğlu, 1979; Karanjac ve Günay, 1980). Köprüçay üzerinde ise Bolasan AGİ'sinin mansabında kalan Olukköprü kaynağı başta olmak üzere irili ufaklı pek çok karstik kaynak mevcuttur (Değirmenci, 1989). Çekilme eğrilerinin belirlenmesinde ayrıca civardaki yağış gözlem istasyonlarının günlük yağış verileri kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan akım gözlem istasyonlarına ait genel özellikler.

Table 1. General characteristics of flow gauging stations used in the study.

İstasyon No	E09A012	E09A019	E09A020
İstasyon Adı	Sinanhoca (Manavgat N.)	Bolasan (Köprüçay)	Şahapköprü (Manavgat N.)
Enlem	31°36'31" D	31°11'23" D	31°39'29" D
Boylam	36°58'46" K	37°18'15" K	37°4'28" K
Drenaj Alanı (km ²)	625.6	1538.4	438
Yükseklik (m)	245	435	432
Gözlem süresi	10.1963-09.2013	10.1984-09.2009	10.1991-09.2012
Ort. Akım (m ³ /s)	70.5	22.9	19.3
Kuru gün sayısı (Gözlem süresi içinde)	608	332	566

UYGULAMA

Taban akışını ayırmada; DOHY, İHEY ve DFY yöntemleri kullanılmıştır. DOHY; doğrusal olmayan hazne teorisini kullanmakta; günlük akım verilerinden elde edilen çekilme eğrisinin parametrelerini akımın periyodikliğine bağlı olarak hesaplamaktadır. Buna göre çalışma alanına ait günlük akım verileri kullanılarak her bir aya ait çekilme eğrileri belirlenmiştir. Çekilme eğrileri seçiminde yağışsız dönemler göz önüne alınmıştır. Bu nedenle akım gözlem istasyonlarına ait hidrograflar civardaki yağış istasyonlarının günlük yağış verileri ile karşılaştırılmıştır. Çekilme eğrisinin en az 5 gün boyunca devam etmesi öngörülmüştür. Bir sonraki aya (aylara) uzayan çekilme eğrileri çekilmenin başladığı aya ait sayılmış, böylece her bir ayı temsil edecek nitelikte çekilme eğrileri belirlenmiştir.

Çekilme eğrileri belirlendikten sonra çekilme parametresi $b = 0.5$ sabit alınarak, her bir çekilme eğrisi için a parametresi kalibre

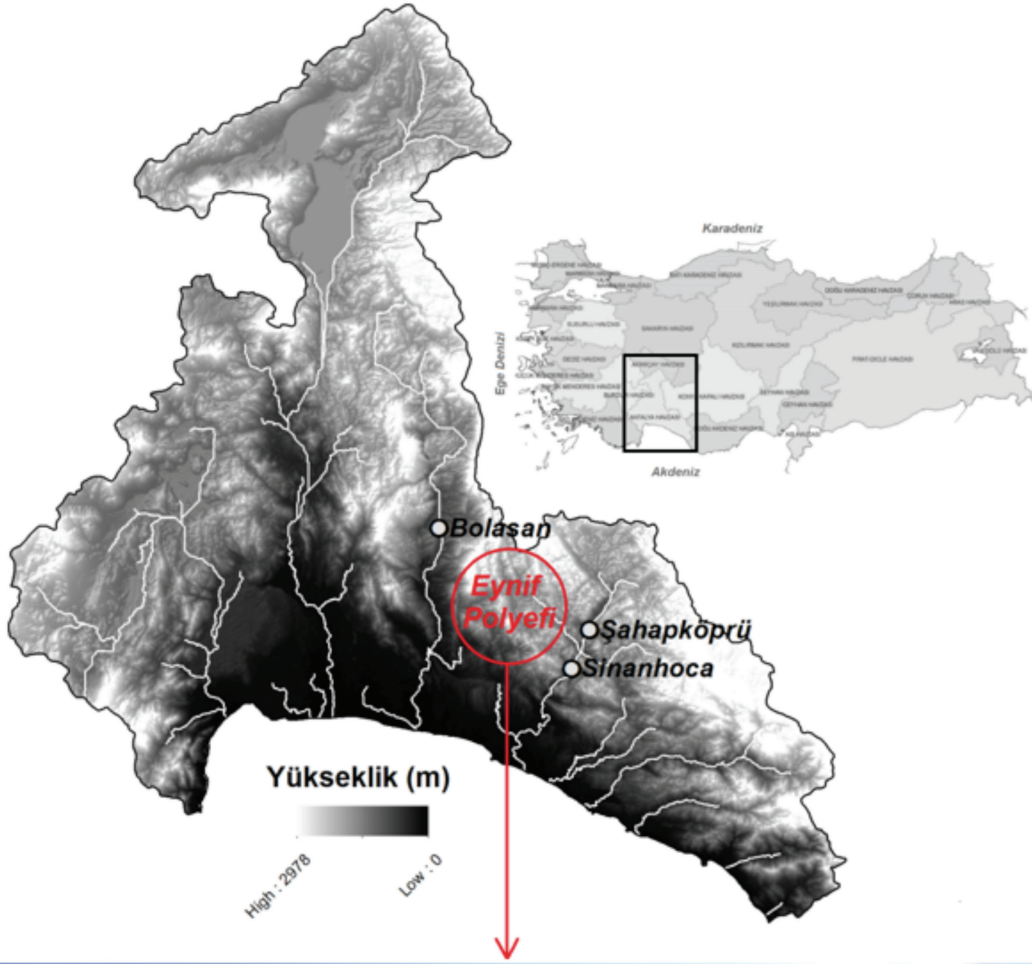
edilmiştir. Varyasyon katsayısı %10'dan büyük olmayacak şekilde kalibrasyon yapılmıştır (Eris ve Wittenberg, 2015). Çekilme parametresi belirlendikten sonra BNLP adlı FORTRAN programı (Wittenberg, 1999; Wittenberg ve Sivapalan, 1999) yardımıyla taban akışı her bir istasyon için ayrılmıştır.

İHEY yöntemi çerçevesinde öncelikle çalışma bölgesindeki AGİ'lerin günlük akımları beşerli gruplara ayrılmış, her gruba ait minimum değerler ve dönüm noktaları belirlenmiştir. Dönüm noktaları doğrusal enterpolasyon ile birbirine bağlanarak toplam akıştan taban akışı ayrılmıştır. DFY yöntemiyle günlük akım verileri ileri-geri-ileri olmak üzere üç kez filtre edilerek taban akışı toplam akıştan ayrılmıştır.

Buna göre, Bolasan, Şahapköprü ve Sinanhoca havzaları için toplam akış ve taban akışı ayırma yöntemlerine göre belirlenen taban akışı grafikleri örnek olmak üzere Şekil 3'te sunulmuştur.

Eriş

(a)



(b)



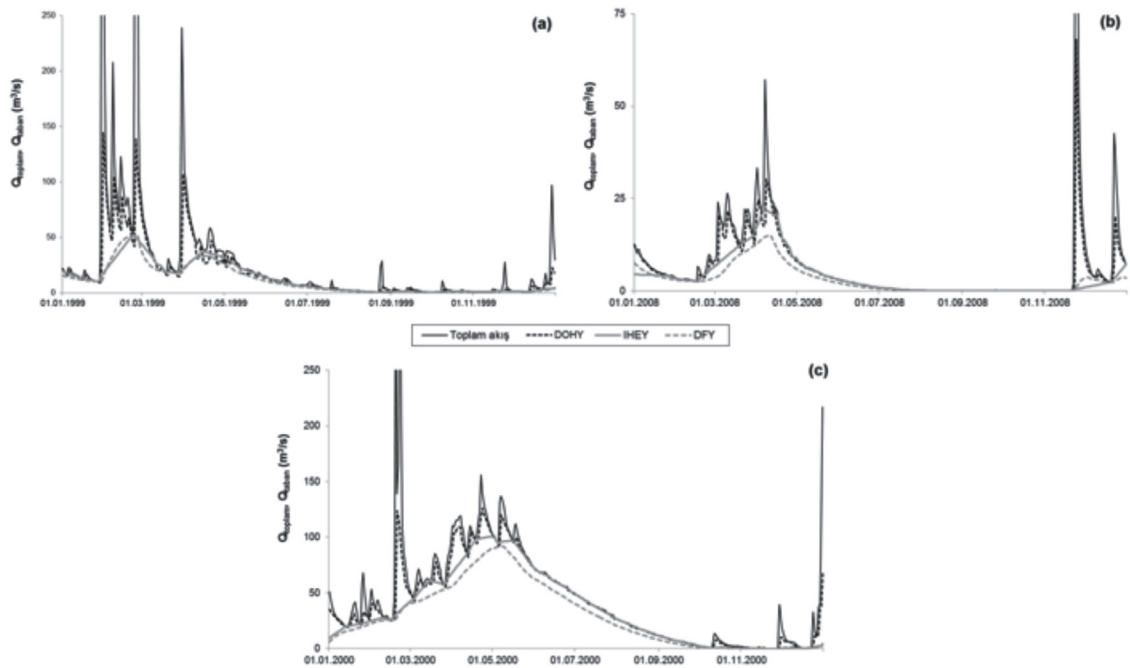
Şekil 2. (a) Çalışma alanı ve AGİ'lerin konumları, (b) Eynif Polyesi.

Figure 2. (a) Study area and locations of the flow gauging stations, (b) Eynif Polje.

Ayrıca aylık toplam akış ile hesaplanan aylık taban akışı miktarları Şekil 4'te görülmektedir. Farklı yöntemlere göre belirlenen taban akışlarının aylık değişimleri birbirine benzemekle birlikte her üç istasyon için DOHY ile bulunan taban akışı miktarları diğerlerine göre daha büyük sonuçlar vermektedir. Tüm yöntemler için taban akışı değerleri kış aylarında yükselmeye başlamakta, sonbaharda ise minimum değerlerine ulaşmaktadır. Bolasan ve Şahapköprü AGİ'leri için minimum akımlar Ağustos-Eylül aylarında görülürken (Şekil 4a ve b) Sinanhoca AGİ'si için minimum taban akışları Ekim ortasında görülmektedir. Aylık toplam akış ve taban akışlarında görülen bu kayma günlük akım ve taban akışı grafiklerinde de fark edilmektedir (Şekil 3).

Bu üç AGİ'ye ait 1992-2008 ortak gözlem dönemi göz önüne alınarak aylık toplam akış,

taban akışı ve doğrudan akım değerleri; taban akışının toplam akışa oranları ile birlikte hesaplanmış ve Çizelge 2'de sunulmuştur. Çizelge 2'den görüldüğü üzere her üç yöntem sonucunda bulunan taban akışı miktarları toplam akışın büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Taban akışının toplam akışa oranı özellikle Sinanhoca AGİ'sinde DOHY, İHEY ve DFY'ye göre sırasıyla % 88, 74 ve 63'e kadar ulaşmıştır. Bu oran Şahapköprü ve Bolasan istasyonları için daha düşük olarak tayin edilmiştir. Aylık taban akış miktarlarında görülen durum Çizelge 2'den de görülmektedir. Yani DOHY ile bulunan taban akışları diğer yöntemlere göre daha büyük orandadır. Bu durum aslında DOHY'de esas alınan taban akışı tanımından ileri gelmektedir. Bu yöntemde yalnızca yeraltı suyu değil yüzey altı akışı da taban akışı içinde değerlendirilmektedir.



Şekil 3. AGİ'lere ait örnek günlük toplam akım ve farklı yöntemlere göre belirlenmiş taban akışı değerleri; (a) Bolasan, (b) Şahapköprü, (c) Sinanhoca.

Figure 3. Daily total flow and baseflow determined by different methods for (a) Bolasan, (b) Şahapköprü, (c) Sinanhoca.

Eriş

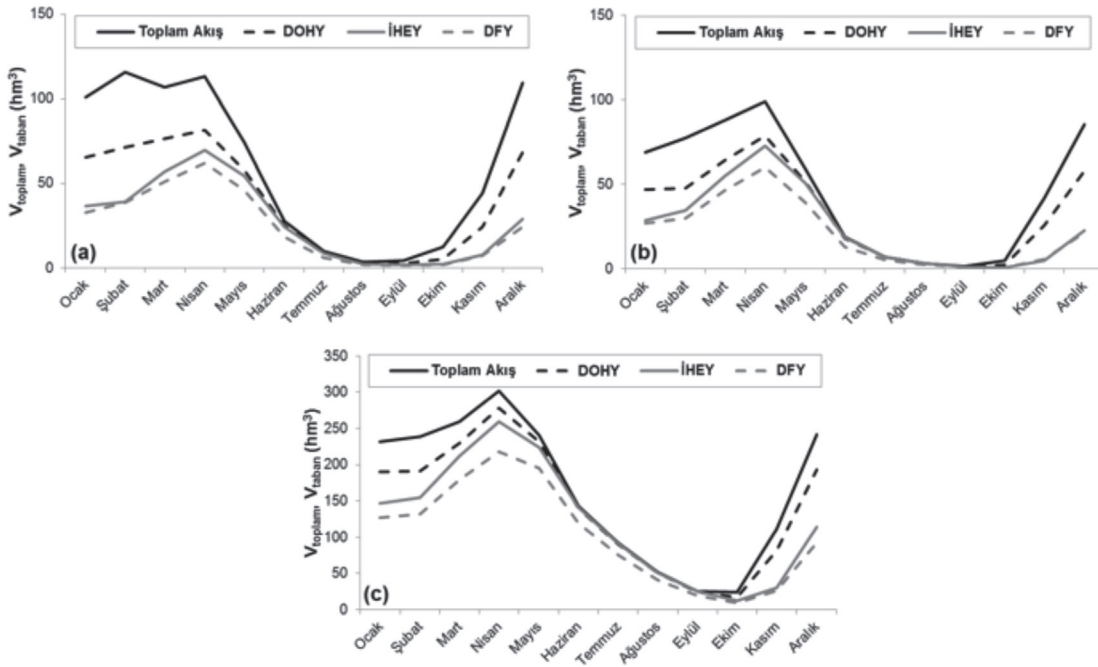
Çizelge 2. AGİ'ler için toplam, doğrudan, taban akışı değerleri ve taban akışının toplam akışa oranı.
Table 2. Total, direct and base flows, and ratio of baseflow to total flow for the flow gauging stations.

Taban Akışı Ayırma Yöntemi	DOHY				İHEY			DFY		
	V_{toplam}	$V_{doğrudan}$	V_{taban}	$\frac{V_{taban}}{V_{toplam}}$	$V_{doğrudan}$	V_{taban}	$\frac{V_{taban}}{V_{toplam}}$	$V_{doğrudan}$	V_{taban}	$\frac{V_{taban}}{V_{toplam}}$
İstasyon	(10 ⁶ m ³)			(%)	(10 ⁶ m ³)		(%)	(10 ⁶ m ³)		(%)
Bolasan (Köprüçay)	723	233	490	68	390	333	46	431	292	40
Şahapköprü (Manavgat N.)	554	151	404	73	245	299	54	303	251	45
Sinanhoca (Manavgat N.)	1964	244	1720	88	502	1462	74	731	1233	63

Öziş ve Keloğlu (1979) Manavgat havzası için yaptıkları çalışmada, Manavgat nehri akımının % 80-85'inin karst yeraltı suyu tarafından sağlandığını belirtmektedir. Baran vd. (1987), Türkiye'de karst pınar katkıları üzerine yaptıkları çalışmada ise Sinanhoca, Şahapköprü ve Bolasan AGİ'leri için pınar katkısının 65, 18 ve 22 m³/s olduğunu bulmuşlardır. Bu değerler çalışmada göz önüne alınan gözlem süresindeki toplam akımın (yüzeysel ve taban akışı birlikte) sırasıyla yaklaşık % 80, % 70 ve % 77'sine karşılık gelmektedir. Önceki çalışmalarda bulunan taban akışı oranları bu çalışmada kullanılan DOHY'e göre bulunan değerlere daha yakındır. DOHY'e göre taban akışının toplam akışa oranı (1992-2008 yılları arası) sırasıyla % 88, % 73 ve % 68 hesaplanmıştır. İHEY ve DFY'ye göre ise bu değerler çok daha düşüktür. Bu yönüyle DOHY'nin karstik bölgelerde

kullanılabilirliğinden ve daha gerçekçi değerler verdiğinden bahsetmek mümkündür.

Önceki çalışmalar (Eris ve Wittenberg, 2015) karstik yapıya sahip çalışma alanında Manavgat Havzası'na doğru bölgenin kuzeyinden ve Bolasan Havzası'ndan (kuzeybatı) yeraltı suyu transferi olduğunu ve bu transferin özellikle Şahapköprü ve Sinanhoca AGİ'leri arasında kalan kısımdan nehre katıldığını düşündürmektedir (Eynif Polyesi, Şekil 2b). Şekil 4'te sunulan aylık değişimler Bolasan ve Şahapköprü AGİ'leri için minimum akımların Ağustos-Eylül aylarında, Sinanhoca için ise Ekim ortasında gerçekleştiğine işaret etmekle birlikte, Manavgat Nehri'nin özellikle kuzey ve kuzeybatısından geldiği düşünülen yeraltı suyunun gecikme süresinin yaklaşık 1-1.5 ay olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Aylık toplam akış (V_{toplam}) ve taban akışı (V_{taban}) hacimleri; (a) Bolasan, (b) Şahapköprü, (c) Sinanhoca.

Figure 4. Monthly total flow (V_{total}) and baseflow (V_{base}) volumes for (a) Bolasan, (b) Şahapköprü, (c) Sinanhoca.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, taban akışını toplam akıştan ayırmada farklı yöntemler kullanılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Daha önce gerek ülkemizdeki havzalarda gerekse diğer ülke havzalarında tecrübe edilmiş sayısal filtreleme teknikleri ile Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi taban akışını ayırmada kullanılmıştır. Söz konusu yöntemler, Türkiye'nin yaklaşık üçte birini kaplayan karstik bölge havzalarına uygulanmıştır. Çalışma alanı olarak özellikle Oymapınar Barajının yapımıyla birlikte 1970'li yıllardan beri pek çok çalışmaya konu olan Akdeniz Bölgesi karstik akarsuları seçilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda toplam taban akışının miktarının önceki çalışmalarda hesaplanan taban akışından çok uzak olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte önceki çalışmalarla

karşılaştırıldığında Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi'nin karstik bölgelerde daha tatminkâr sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi'nin, İngiliz Hidroloji Enstitüsü Yöntemi ve Dijital Filtreleme Yöntemi'ne göre daha yüksek taban akışı oranları vermesi Doğrusal Olmayan Hazne Yöntemi'nin yeraltı suyu ile birlikte yüzeyaltı suyunu da göze almasından kaynaklanmaktadır.

Önceki çalışmalardan farklı olarak elde edilen aylık değişimler incelendiğinde Şahapköprü ve Bolasan için minimum taban akışının Ağustos-Eylül aylarında olduğu gözlenirken; Sinanhoca için minimum taban akışının Ekim ortasına kadar geciktiği görülmüştür. Bu gecikme; Sinanhoca havzasının, bölgenin karstik yapısı nedeniyle özellikle kuzeyden ve kuzeybatıdan (Eynif Polyesi'nden) beslendiğini düşündürmektedir.

Sinanhoca yeraltı suyu drenaj alanının, Şahapköprü ve kuzeyi ile Bolasan havzasının bir kısmını kapsayacak şekilde, yerüstü drenaj alanından yaklaşık üç kat daha büyük olduğu tahmin edilmektedir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın bir bölümü TÜBİTAK'ın 2219-Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı tarafından desteklenmiştir. Yazar, makalenin gelişmesinde katkıda bulunan hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Aksoy, H., Unal, N. E., Pektaş, A. O., 2008. Smoothed minima baseflow separation tool for perennial and intermittent streams. *Hydrological Processes*, 22, 4467-4476.
- Aksoy, H., Wittenberg, H., 2011. Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow. *Hydrological Sciences Journal*, 56 (2), 226-237.
- Aksoy, H., Wittenberg, H., 2015. Baseflow recession analysis for flood-prone Black Sea watersheds in Turkey. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 43 (6), 857-866.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., Muttiyah, R., Bernhardt, G., 1995. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Groundwater*, 33 (6), 1010-1018.
- Baran, T., Harmancıoğlu, N. B., 1993. Assessment of mathematical models with exponential functions describing karstic spring discharges. UKAM, IAHS & IAH, International Symposium and Field Seminar on Hydrogeologic Processes in Karst Terrains, Antalya, Turkey. (Editors: LaMoreaux, Assaad and McCorley) *Hydrogeological Processes in Karst Terrains*. IAHS Publ. No. 207, 231-241.
- Baran, T., Harmancıoğlu, N., Öziş, Ü., 1987. Türkiye'nin akarsularında karst pınar katkıları. Türkiye İnşaat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi, 299-311.
- Benzeden, E., Olcay, M. S., Bağalı, K., 1993. Flood frequency analysis in karst river basins, UKAM, IAHS & IAH, International Symposium and Field Seminar on Hydrogeological Processes in Karst Terranes, Antalya, Turkey. (Editors: LaMoreaux, Assaad and McCorley). IAHS Publ. No. 207, 187-202.
- Birtles, A.B., 1978. Identification and separation of major base flow components from a stream hydrograph. *Water Resources Research*. 14 (5), 791-803.
- Chapman, T., 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 13, 701-714.
- Değirmenci, M., 1989. Köprüçay havzası ve dolayının (Antalya) karst hidrojeolojisi incelemesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, 398 s (yayımlanmamış).
- Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19, 507-515.
- Eris, E., Wittenberg, W., 2015. Estimation of baseflow and water transfer in karst catchments in Mediterranean Turkey by nonlinear recession analysis. *Journal of Hydrology*, 530, 500-507.
- Graf, İ. K., Bozcu, A., 2006. Yapısal özelliklerin lapy gelişimindeki rolü: Kızıllörü Dağı doğusu (Korkuteli-Antalya). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 30, 9-16.
- Hall, A. J., 1971. Baseflow recessions and baseflow hydrograph separation problem. *Proceedings of the Hydrology Symposium, Institution of Engineers, Australia, Canberra*, 159-170.
- Institute of Hydrology (IH), 1980. Low flow studies research report. Institute of Hydrology Report No=1, 50 p (unpublished).
- Karanjac, J., Günay, G., 1980. Dumanlı spring, Turkey-The largest karstic spring in the World? *Journal of Hydrology*, 45, 219-231.
- Kayan, G., 2014. Sakarya ve Batı Karadeniz akarsu havzaları için taban akışı ayırma modeli. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 113 s (yayımlanmamış).

- Koç, A. C., 2008. Evaluation of karstic aquifers contribution to streams by the statistical analysis of recession curves. *Journal of Earth System Science*, 117 (1), 59–67.
- Kurt, İ., 2007. Filtre edilmiş yuvarlatılmış minimumlar taban akışı ayırma yöntemi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 158 s (yayımlanmamış).
- Li, L., Maier, H. R., Partington, D., Lambert, M. F., Simmons, C.T., 2014. Performance assessment and improvement of recursive digital baseflow filters for catchments with different physical characteristics and hydrological inputs. *Environmental Modelling and Software*, 54, 39–52.
- Lyne, V., Hollick, M., 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. Institute of Engineers Australia National Conference. Publ. 79/10, 89–93.
- MGM, 2015. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Türkiye. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A>, son erişim 29.03.2015.
- Nathan, R. J., McMahon, T. A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26 (7), 1465–1786.
- Öziş, Ü., Keloğlu, N., 1979. Stochastic analysis of Manavgat flows, Antalya. International Seminar on Karst Hydrogeology, Oymapınar 1979, Proceedings (Editor: Günay). 305–315.
- Piggott A. R., Moin S., Southam, C., 2005. A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (5), 911–9203.
- Saplıoğlu, K., 2005. Akarsu çekilmelerine etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve çekilmenin modellenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Yüksek Lisans Tezi, 72 s (yayımlanmamış).
- Saplıoğlu, K., Çimen, M., 2010. Taban akışı ayırımı için yeni bir yöntem. *e-Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences*, 1A0108, 5(4), 580–589.
- Su, C.-H., Costelloe, J. F., Peterson, T. J., Western A. W., 2016. On the structural limitations of recursive digital filters for base flow estimation. *Water Resources Research*, 52, 4745–4764.
- Szilagyı, J., Parlange B. M., 1998. Baseflow separation based on analytical solutions of the Boussinesq equation. *Journal of Hydrology*, 204, 251–260.
- Ünal, E., 1981. Karst bölgelerindeki baraj haznelerinin yeraltı biriktirme hacminin Oymapınar örneğinde alçalma hidrografi yöntemiyle incelenmesi. Ege Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İzmir, Yüksek Lisans Tezi, 68 s (yayımlanmamış).
- Wittenberg, H., 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes*, 13, 715–726.
- Wittenberg, H., Aksoy, H., 2010. Groundwater intrusion into leaky sewer systems. *Water Science and Technology*, 62 (1), 92–98.
- Wittenberg H., 2003. Effects of season and man-made changes on baseflow and flow recession: case studies. *Hydrological Processes*, 17, 2113–2123.
- Wittenberg H., Sivapalan, M., 1999. Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *Journal of Hydrology*, 219, 20–33.
- Zaifoğlu, H., 2013. Fırat akarsu havzası için topoğrafik ve hidrometeorolojik veriye dayanan taban akışı ayırma modeli. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 97 s (yayımlanmamış).



Araştırma Makalesi / Research Article

Değirmendere (Trabzon) Havzası Kaynak Sularında Su-Kayaç Etkileşimi *Water-Rock Interaction of Springwater in the Değirmendere Basin (Trabzon-NE Turkey)*

Elham TAHMASEBZADEH BASTAM, Fatma GÜLTEKİN
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, TRABZON

Geliş (Received): 22 Ağustos (August) 2016 / Düzeltme (Revised): 21 Kasım (November) 2016 / Kabul (Accepted): 13 Aralık (December) 2016

ÖZ

Genel olarak volkanik kayaların yüzeylendiği Değirmendere Havzası'nda litolojik olarak bazalt, altere bazalt, andezit, altere andezit, tuf, dasit, volkanik katkılı marn türü kayalar tespit edilmiştir. Havzada tektonik hatlarla ilişkili olarak karbondioksit ve çözülmüş madde miktarı yüksek çok sayıda su kaynağı bulunmaktadır. Bunlar arasında incelenen 4 kaynaktan debilerin 46-158 ml/sn, pH'nın 5.32-6.99, özgül elektriksel iletkenlik değerlerinin (ÖEİ) 603-1899 $\mu\text{S/cm}$, çözülmüş oksijenin (ÇO) 3.20-9.35 mg/l ve toplam çözülmüş madde miktarının (TÇK) 380-1230 mg/l arasında değiştiği belirlenmiştir. Ca-HCO₃ su tipinde olan kaynakların kimyasal gelişiminde silikat ayrışması, karbonat ayrışması ve iyon değişimi türü su-kayaç etkileşim süreçlerinin etkili olduğu belirlenmiştir. İyon değişimini açıklamak için hesaplanan negatif Chloro Alkaline Indices (CAI) değerleri ters değiş tokuş olduğunu göstermiştir. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ ilişkisine göre meteorik kökenli olan kaynak suları Doğu Karadeniz Meteorik Su Doğrusu üzerinde yer almaktadır. İzotop değerlerine göre genç ve sık dolaşımli yeraltı suyunu boşaltan kaynakların kimyasal bileşimleri yoğun ayrışmanın gözlemlendiği volkanik kayaların üst kısımlarındaki hareket sırasında gelişmiştir. Ba, Sr ve Zn elementleri kayalarda olduğu gibi kaynak sularında da yüksek değerlerdedir. Kaynak sularındaki Br (0.036-0.070 mg/l) ve Cr (0.0625 mg/l) değerleri Doğal Mineralli Sular Hakkındaki Yönetmelik (2004)'te önerilen sınırların üzerindedir.

Anahtar Kelimeler: Değirmendere Havzası, Hidrokimya, Kaynak suyu, Su-kayaç etkileşimi, Trabzon.

ABSTRACT

In general, the rock types; basalt, andesite, altered andesite, tuff, dacite, and marl intercalating with volcanics, have been identified lithologically in the Değirmendere Basin. In the basin, there are many springs with a high carbon dioxide content and total dissolved solids, all of which are related to tectonic lines. Of these, four springs have discharge rates, pH, specific electrical conductivity (SEC) and total dissolved solids (TDS), respectively, 46-158 ml/sec, 5.32-6.99, 603-1899 $\mu\text{S/cm}$ and 380-1230 mg/l. It is determined that silicate weathering, carbonate weathering and ion-exchange type water-rock interaction processes were effective on the chemical evaluation of the Ca-HCO₃ water type springs. The Chloro Alkaline Indices (CAI), which are calculated to explain the ion-exchange, indicated a reverse exchange. Based on $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ correlation, the springs which have a meteoric origin lie on the Eastern Black Sea Meteoric Water Line. According to the isotopic values, the chemical composition of the young and shallow circulating springs was developed during circulating to the upper parts of the volcanic rocks where an intense weathering was observed. The concentration of Ba, Sr and Zn are high as in the rocks. Br (0.036-0.070 mg/l) and Cr (0.062 mg/l) values of the springs exceed the limit recommended in the Natural Mineral Water Regulation (2004).

Keywords: Değirmendere Basin, Hydrochemistry, Spring water, Water-rock interaction, Trabzon.

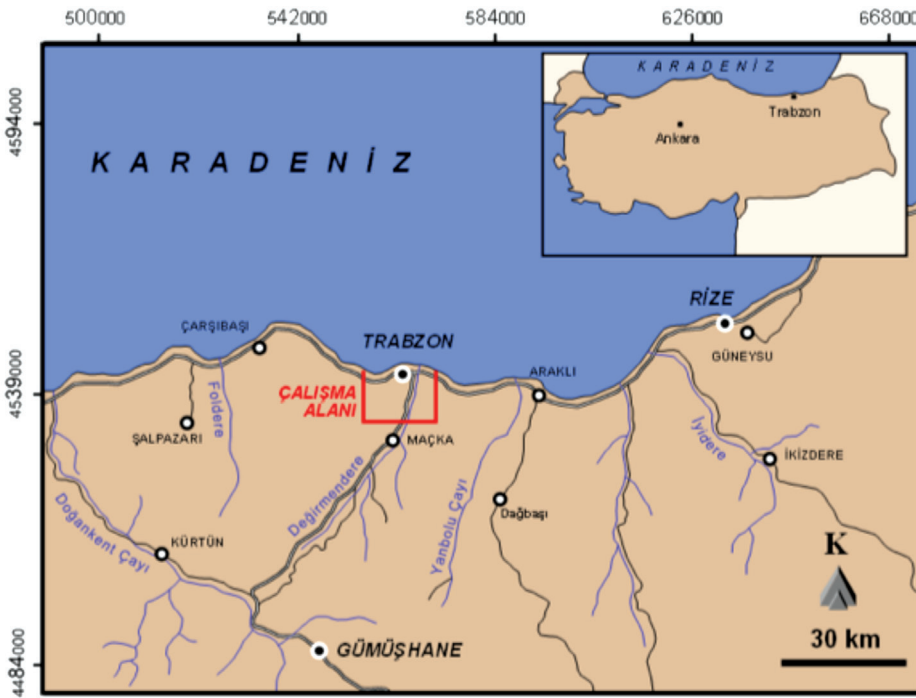
GİRİŞ

Yeraltı sularının doğal boşalımı olan kaynakların kimyasal bileşimleri, suyun içerisinden geçtiği kayaçların ve zeminlerin kimyasal bileşimine, jeokimyasal süreçlere, suyun jeolojik formasyonlardaki minerallerle karşılaşma sırasına bağlı olarak değişiklik gösterir (Freeze ve Cherry, 1979). Bu değişiklikler kayaçların kimyası ile yakından ilişkilidir. Su-kayaç etkileşimi hakkında yapılan çalışmalarda kayaçlardaki kimyasal ayrışmanın su kimyasını doğrudan etkilediği görülmüştür (Davraz, 2003; Zhu, 2005; Scislawski ve Zuddas, 2010; Hamzaoui-Azaza vd., 2011).

Ilıman ve yağışlı bir iklime sahip Doğu Karadeniz Bölümü'nde engebeli topoğrafya sunan volkanik kayaçların çatlaklarından boşalan küçük debili kaynaklara sıklıkla rastlanmaktadır. Bir kısmı yöre halkı tarafından şifalı su olarak anılan bu kaynakların toplam çözünmüş madde miktarları genelde 500-1500 mg/l arasında değişiklik gösterir. Bu çalışmada normal yeraltı sularına göre daha fazla iyon içeriğine sahip bu sulara kayaç kimyasının su kimyası ve içilebilme özellikleri üzerine etkisi araştırılmak istenmiştir. Bu amaçla Aşağı Değirmendere (Trabzon-KD Türkiye) Havzası'nda yer alan ve çevre sakinleri tarafından kullanılan Gözalan, Akoluk, Durali ve Yanlıca kaynakları incelenmiştir. Yörede daha önce yapılan çalışmalardan kaynakların

pH değerlerinin 5.5 ile 6.2, elektriksel iletkenlik değerlerinin ise 500 ile 1850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Gültekin vd., 2010), CO_2 miktarlarının 16-6 ile 71.3 mg/l (Kara, 1997) arasında değiştiği belirtilmiştir. Gültekin vd. (2005) aynı alanda yaptıkları çalışmada bazı kaynaklarda Cr, Sb, Se ve Pb değerlerinin standartlarda verilen sınır değerleri aştığını belirtmişlerdir. Değirmendere Havzası'nda yüzey sularında yapılan çalışmada ise nitrit, nitrat, amonyum, fosfat ve sülfat değerlerinin sırasıyla 0.037 mg/l, 3.85 mg/l, 0.118 mg/l, 0.068 mg/l ve 18.5 mg/l (Alkan vd., 2013) olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanı Trabzon İli sınırları içerisinde olup, yaklaşık 1061 km^2 'lik yağış alanına sahip Değirmendere Havzası'nın aşağı kısımlarında yer alır (Şekil 1). Meteoroloji 11. Bölge Müdürlüğü'nün 1970-2012 yılları arasındaki kayıtlarına göre çalışma alanında ortalama toplam yıllık yağış 821.6 mm ve ortalama sıcaklık ise 14.7°C 'dir (MGM, 2015). Havzada en fazla yağış Ekim ayında, en düşük yağış ise Temmuz ayında kaydedilmiştir. Havzadaki yıllık gerçek buharlaşma-terleme miktarı ise 550 mm olarak hesaplanmıştır. Yoğun bitki örtüsü ile kaplı olan alan engebeli bir topoğrafyaya sahiptir. Dağınık ve kırsal yerleşimin olduğu çalışma alanında başlıca fındık, kısmen sebze tarımı yapılmakta ve tarım faaliyetleri ile ilgili olarak tarımsal ilaç ve gübre kullanılmaktadır.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.

MATERYAL VE YÖNTEM

Haziran 2012 tarihinde başlayıp, Mart 2013'te tamamlanan arazi çalışmaları sırasında jeolojik çalışmalar, kayaç ve su örneklemeleri ile yerinde su kimyası ölçümleri yapılmıştır. Jeolojik haritalama işlemleri, alanda daha önce yapılmış olan çalışmalardan revize edilmiştir. Kayaç jeokimyası için havzada yüzeylenen kayaçların ayrılmış ve ayrılmamış kısımlarından örnekler alınmıştır.

Kaynaklara ait sıcaklık, pH, debi, özgül elektriksel iletkenlik (ÖEİ), toplam çözülmüş madde miktarı (TÇK) ve çözülmüş oksijen (ÇO) değerleri YSI 556 model çok parametrelili ölçüm cihazı ile yerinde ölçülmüştür. Kaynaklardan Haziran 2012 tarihinde kimyasal ve izotopik analizler yapılmak üzere örnek alınmıştır. Örneklemelerde majör iyon analizleri için 1

litrelik, iz element analizleri için 100 ml'lik polietilen şişeler, Oksijen-18 ve Döteryum izotopu için 100 ml, trityum izotopu için 500 ml'lik polietilen şişeler kullanılmıştır. Örnek alınmadan önce şişeler 3 kez kaynak suyu ile çalkalanmıştır. Laboratuvar çalışmalarında alınan su örneklerinden majör iyon ve Trityum analizleri Hacettepe Üniversitesi, Hidrojeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Su Kimyası Laboratuvarı'nda, iz element analizleri ACME Analitik Laboratuvarı'nda (Kanada), Oksijen-18 ve Döteryum izotopları ISO ANALYTICAL (İngiltere) Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.

Kayaç örnekleri öncelikle Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında ince kesit haline getirilerek polarizan mikroskopta incelenmiş ve kayaç türleri

tespit edilmiştir. Daha sonra her bir litolojiden seçilen ayrıışmış ve ayrıışmamış kayaç örnekleri aynı laboratuvarında çeneli kırıcıda kırılıp, bilyeli değirmende öğütülmüştür. Toz haline gelen örneklerle ait tüm kayaç analizleri Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde ICP-MS yöntemi ile analiz edilmiştir.

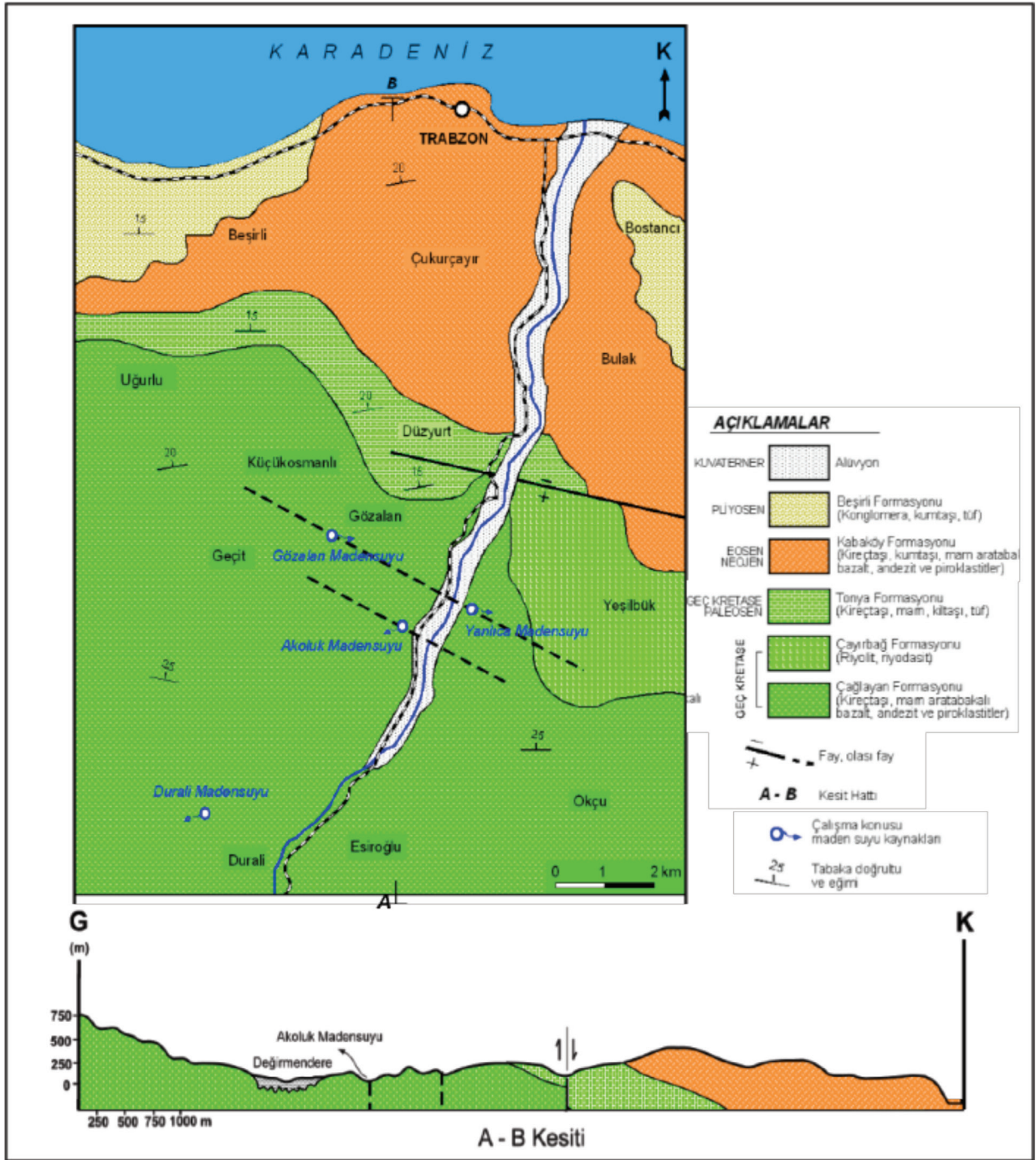
Suların farklı minerallere doygunluk durumlarının belirlenmesi için PhreeqC (Parkhurst ve Appelo, 1999) yazılımı kullanılmıştır.

JEOLJİK-HİDROJEOLJİK YAPI

Çalışma alanında genellikle tortul ara seviyeler içeren volkanik kayaçlar yüzeyleir. Alandaki en yaşlı birim Geç Kretase yaşlı, altta koyu renkli bazalt, andezit ve piroklastitlerden, üst seviyelerde kırmızı mikritik kireçtaşı, killi kireçtaşı ve marnlardan oluşan Çağlayan formasyonudur (Güven, 1993). Bazalt ve andezitlerde kloritleşme ve epidotlaşma görülmektedir. Bazaltik yastık lavlarda gaz boşlukları genellikle kalsit, klorit ve zeolit gibi minerallerle dolmuştur. Çağlayan formasyonu, alt seviyelerde dasitik, riyolitik ve riyodasit ve bunların piroklastiklerinden, üst seviyelerde ise kumtaşı, killi kireçtaşı, marn ve tuf ile temsil edilen Çayırbağ formasyonu tarafından uyumlu olarak üstlenir (Güven, 1993). Geç Kretase-Paleosen yaşlı Tonya formasyonu (Korkmaz, 1993) genel olarak beyaz, açık gri, sarımsı renkli kireçtaşı, killi kumlu kireçtaşı ve marn ardalanmasından oluşur. Eosen-Neojen yaşlı Kabaköy formasyonu (Güven, 1993) inceleme alanında daha çok

bazalt türü kayaçlarla temsil edilir. Birim yer yer kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn ara tabakaları içeren masif veya kalın tabakalanmalı bol ojit ve hornblendli bazalt, andezit ve piroklastlarının oluşturduğu bir volkano tortul istifdir. Kabaköy formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelen Pliyosen yaşlı Beşirli formasyonu (Güven, 1993) konglomera, kumtaşı ve tüflerden oluşmuştur (Şekil 2). Elemanlarının çoğunluğu çakıl, kum ve silt az miktarda da kilden oluşan alüvyonlar Değirmendere Havzası'nda güneyden kuzeye doğru genişleyen yüzeylemeler sunar.

Havzadaki birimleri genellikle volkanik kayaçlar oluşturmaktadır. Bu kayaçların geçirgenliklerini soğuma çatlakları ile bozunmaya bağlı kırık-çatlak sistemleri denetlemektedir. Bazalt-andezit türü volkanik kayaçlarda prizmatik kolonsu yapılar belirgindir. Bu yapılar volkanik kayaçların birincil porozitelerini oluşturur. Tektonik faaliyetler sonucunda kazanmış oldukları çatlaklı oldukları çatlaklı yapı ikincil gözeneklilik olmayan bu geçirimli düzeyler yüzeyden beslenimin sığ derinliklere inmesini sağlar. Eğimli bir topoğrafyanın egemen olduğu alanda bu sığ derinliklere inen sular yamaçlardan genellikle küçük debili kaynaklar şeklinde boşalırlar. Dolayısıyla volkanik kayaçlar yeraltı suyu bakımından sadece çatlaklı oldukları yersel alanlarda önem taşımaktadır. Bu küçük kaynaklar mevsimlere bağlı olarak değişen debilerle boşalırlar. İnceleme alanında Geç Kretase yaşlı birimlerle Eosen yaşlı birimlerin faylı dokanağı ve kaynak sularının belirli bir hat boyunca dizim göstermeleri, incelenen kaynakların fay kaynağı olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 2. Aşağı Değirmendere Havzası (Trabzon) jeoloji haritası (Güven, 1993'ten değiştirilerek).

Figure 2. Geological map of the Lower Değirmendere Basin (Trabzon) (modified from Güven, 1993).

KAYAÇ KİMYASI

Geç Kretase yaşlı farklı formasyonlardan alınan kayaçların makroskobik ve mikroskobik incelemelerinden genellikle bazalt, altere bazalt, andezit, altere andezit, tuf (andezitik ?), dasit, volkanik katkılı marn oldukları belirlenmiştir (Çizelge 1). Bazaltlar ve altere bazaltlar yaklaşık % 70- 80 Ca'lı plajioklas ve % 10 ojit minerallerinden oluşmakta olup ikincil olarak kalsit ve kuvars mineralleri içerirler. Altere türlerinde ikincil mineral oranları daha düşüktür. Andezitler % 75-80 Na'lı plajioklas ve % 10-15 hornblend minerallerinden oluşmaktadır. Dasitler plajioklas, kuvars ve altere biyotitlerden meydana gelmiştir. Dasitik tüfler % 30 kayaç parçası, % 70 civarında kuvars, plajioklas ve diğer mineral tanelerinden oluşmuştur. Ayrılmış ve ayrılmamış kayaçların kimyasına göre; marnlar dışındaki tüm kayaçlarda (andezit, bazalt, dasit ve altere türleri) SiO₂ en bol bulunan oksittir. İkinci sırada genellikle Al₂O₃ yer alır (Çizelge 1). Alterasyonun etkileri bazaltlarda MgO'lerde % 30, Al₂O₃'lerde % 20 ve Na₂O'lerde %10'luk artışlar, CaO'lerde % 25 ve Fe₂O₃'lerde %20'lik azalmalar şeklinde görülmektedir. Ayrılmış andezitik kayaçlarda % 40- 50 Al₂O₃ artışlarına karşılık, % 80- 90 Na₂O, % 85- 90 CaO, % 30-80 MgO değerlerinde azalmalar görülmektedir. Her iki kayaç grubunda SiO₂ ve K₂O değerleri ayrılmış türlerinde artmıştır. Kimyasal analizi yapılan kayaçların iz element değerleri ise Çizelge

2'de verilmiştir. Kayaçların iz element içerikleri incelendiğinde Ba, Sr, Zr, Rb, Zn ve Ce gibi iz elementlerin yüksek değerlerde, Se, Cd, Sn, Sb ve Hg gibi elementlerin ise düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Ayrılmış bazaltlarda Co, Ni, Cu ve Zn değerlerinde azalma, Rb, Sr, Ba, Cs ve Pb değerlerinde artma gözlenmektedir. Andezitlerin ayrılmış türlerinde ise Co, Zn ve Mo elementlerinde azalma, Rb, Zr ve Ba elementlerinde artış görülmektedir. Çağlayan formasyonunu temsil eden altere andezitlerde iz element değerleri diğer kayaç türlerine göre daha yüksektir.

SU KİMYASI

Değirmendere vadisindeki Gözalan, Akoluk, Durali ve Yanlıca kaynak sularının fizikokimyasal özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. İnceleme alanındaki kaynak sularının sıcaklıkları 12.48-17.54 °C, debileri 46-158 ml/sn, pH değerleri 5.32-6.99, özgül elektriksel iletkenlik değerleri (ÖEİ) 603-1899 µS/cm, çözülmüş oksijen miktarı (ÇO) 3.20-9.35 mg/l ve toplam çözülmüş madde miktarı (TÇK) 380-1230 mg/l arasında değişmektedir. Bu parametreler açısından kaynaklarda mevsimsel değişimler görülmemektedir. Akoluk kaynağında ilk ölçümlerde gözlenen farklılık, ölçümlerin kaynağın boru ile taşındığı yerde yapılmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 1. Ayrışmamış ve ayrışmış volkanik kayaların ana element analiz sonuçları (% ağırlık).
Table 1. Major oxides compositions of unaltered and altered volcanic rocks (wt. %).

Örnek No	Ba-2	Ba-1	Mac	AK-1	AK-2	DU-2	ES-1	A-2	DU-1	A-1	S-1
Litoloji	Bazalt	Altere Bazalt	Tüf	Marn (volkanik katkı)	Volkanik Breş	Tüf	Andezit	Altere Andezit	Altere Andezit	Dasit	Bazalt
Formasyon adı	Çatak	Çatak	Çatak	Çağlayan	Çağlayan	Çağlayan	Çağlayan	Çağlayan	Çağlayan	Çayırbağ	Kabaköy
Na ₂ O	2.23	2.53	3.01	0.081	0.22	1	5.08	0.8	0.37	2.4	3.07
MgO	8.731	11.33	3.422	0.283	8.595	1.267	0.987	0.679	0.14	0.946	6.714
Al ₂ O ₃	12.29	14.89	12.99	3.798	12.19	11.57	11.84	16.65	21.65	13.91	13.09
SiO ₂	43.62	46.32	59.33	25.7	48.74	67.96	62.54	63.79	57.25	62.36	51.66
P ₂ O ₅	0.1614	0.3155	0.1187	0.0345	0.0098	0.0628	0.161	0.0817	0.1077	0.0403	0.0637
SO ₃	0.0331	0.0039	0.6868	0.0150	0.0007	0.0007	0.0605	0.0822	0.0078	0.0133	0.0074
K ₂ O	1.539	1.167	0.8747	1.067	0.7847	2.242	0.2071	3.659	6.773	1.551	0.3659
CaO	7.714	5.914	7.924	39.62	7.261	2.358	3.742	0.3487	0.5384	4.844	6.982
TiO ₂	1.155	1.458	0.6528	0.1348	0.4858	0.2632	0.6875	0.3654	0.3139	0.2062	0.6354
V ₂ O ₅	0.0211	0.0402	0.0297	0.0029	0.0207	0.008	0.0123	0.0092	0.0212	0.007	0.0474
Cr ₂ O ₃	0.0152	0.0039	0.0017	0.0028	0.0064	0.0020	0.0074	0.0118	0.0025	0.0356	0.002
MnO	0.1871	0.2023	0.1416	0.272	0.0666	0.043	0.1554	0.0781	0.0474	0.0323	0.1936
Fe ₂ O ₃	13.24	10.5	7.371	2.145	10.374	3.408	6.737	3.411	3.549	2.673	11.23
Ateşte Kayıp	8.79	4.87	3.82	26.62	11.37	8.9	6.93	9.73	8.69	10.76	5.95

Tahmasebzadeh Bastam, Gültekin

Çizelge 2. Ayrışmamış ve ayrışmış volkanik kayaların iz element analiz sonuçları (ppm).

Table 2. Trace element results of unaltered and altered volcanic rocks (ppm).

Element	Ba-2	Ba-1	Mac	AK-1	AK-2	DU-2	ES-1	A-2	DU-1	A-1	S-1
Co	56.7	51.7	29	16.5	53.7	35.7	37.2	17.8	22	16	43.9
Ni	90.1	48.9	12.5	6.3	20.1	7.6	2.1	5	17.4	5.2	7.7
Cu	4.6	5.3	17.6	17.4	40.3	10.5	7.2	15.9	6.1	6.3	38.6
Zn	155.6	120.3	77.4	29.4	56.5	80.9	70	41	71.7	28.1	62.3
Ga	15.3	19	14.9	6.9	15.4	17.4	11.7	15.6	23.9	11.9	11.8
Ge	0.8	1.1	2.4	1.1	1.3	1.4	0.9	1.5	2.3	0.8	0.8
As	3.7	3.9	17	5.5	3.3	2	5.8	5.2	5.1	1.4	1.2
Se	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.3	0.4
Br	0.4	0.4	0.4	0.9	0.3	0.4	0.9	1	1	0.3	0.4
Rb	22.3	25.1	25.9	62.3	14.1	57.8	1.3	48	77.6	23.8	3.7
Sr	104	510.5	283.1	413.7	120.7	941	107.6	28.5	2974	71.1	239.5
Y	29.9	28.2	21.7	13.8	3.9	64.5	28.4	43.6	25.7	22.9	8.6
Zr	154.9	169.8	92.6	49.5	44.5	176.5	68.9	225.1	315	164.5	31.2
Nb	8.1	6.5	6	3.6	3.1	11.2	3	3.3	96.1	2.7	3.5
Mo	4.4	4.9	3.3	3.1	3.2	3.9	7.9	3.5	4.9	5.9	3.6
Cd	1	1	0.8	0.9	0.8	1.4	0.8	1.3	1	0.7	1.2
Sn	1.1	2.2	1.7	1.2	1.3	3.7	1.2	2.7	2	0.8	1
Sb	1	1	2.8	1.1	0.9	1	0.9	0.9	1.1	0.9	1
Cs	3.8	22.3	3.7	16.3	15.5	3.8	13.5	8.8	7.9	3.6	7
Ba	360.4	469.7	154.1	174.8	53.8	280.6	57.5	163.2	2868	110.9	29.2
La	29.5	72.7	31.5	75	48.9	7.6	40.1	35.9	146.7	35.4	19.9
Ce	51.9	124.2	51	100.4	69.2	86.8	50.2	49.2	232.3	54.8	23.6
Hf	5.1	4.8	6.3	4.8	5.8	3.7	3.7	5	4.2	3.7	6.1
Ta	5.2	4.7	5	4.6	6.4	3.9	3.6	4	4.4	3.1	6.9
W	6.4	5.5	4.2	4	3.9	3.9	4.4	2.9	4.5	3	4.3
Hg	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	0.9	1.2	1.1	1.6	1	1.3
Tl	1.7	1.7	1.7	1.2	1.3	1.2	1.2	1.1	1.6	1	1.4
Pb	9.3	18.5	62.8	25.5	1.4	7.3	4.2	2.3	51.8	7.5	1.4
Th	1.7	1.5	6.5	5.8	1.2	3	1.1	4.5	75.5	4.6	0.4
U	8.9	8.8	8.3	13.4	8.6	18.9	1.04	13	9.3	2.3	17.7

Çizelge 3. Kaynak sularında yerinde ölçülen parametreler.

Table 3. In-situ measured parameters of springs waters.

Parametreler	Kaynaklar	Haz.2012	Ekim 2012	Kas. 2012	Ara. 2012	Mart 2013
T (°C)	Gözüalan	13.9	13.9	13.8	13.7	13.6
	Akoluk	15.1	17.5	13.5	12.5	12.9
	Durali	13.3	14.4	14.8	13.6	12.8
	Yanlıca	13.9	14.4	14.2	14.2	13.9
Q (ml/sn)	Gözüalan	71	69	65	61	84
	Akoluk	46	46	50	48	52
	Durali	78	101	142	173	158
	Yanlıca	82	81	87	95	92
pH	Gözüalan	-	6.31	5.88	5.86	5.82
	Akoluk	-	6.99	5.83	6.18	6.26
	Durali	-	6.08	5.32	5.56	5.54
	Yanlıca	-	6.22	5.60	6.03	6.20
ÖEİ (µS/cm)	Gözüalan	1880	1899	1885	1872	1781
	Akoluk	922	1710	1613	1587	1538
	Durali	885	910	919	922	903
	Yanlıca	630	619	614	610	603
TÇK (mg/l)	Gözüalan	1220	1230	1220	1210	1150
	Akoluk	590	1110	1040	1030	990
	Durali	570	590	590	590	580
	Yanlıca	400	400	390	390	380
ÇO (mg/l)	Gözüalan	3.97	3.20	3.82	7.06	4.75
	Akoluk	3.81	8.69	8.06	9.35	7.77
	Durali	3.62	5.09	4.96	4.34	4.42
	Yanlıca	4.85	7.80	8.12	8.44	7.90

Çalışma alanındaki kaynak sularının major iyon ve iz element içeriği Çizelge 4'te verilmiştir. Kaynaklarda en yüksek değere sahip iyonlar katyonlarda Ca^{+2} , anyonlarda ise HCO_3^- 'dir. Piper diyagramına göre kaynak sularının $Ca-HCO_3$ 'lü su sınıfında ve karbonat sertliklerinin % 50'den fazla olduğu görülmektedir (Şekil 3a). Schoeller diyagramı ise suların kimyasal açıdan benzer bileşimde olduklarını göstermektedir (Şekil 3b).

Suların doygunluk durumlarının değişimi, hidrokimyasal evrimin safhalarını belirlemede yardımcı olur ve hangi kimyasal reaksiyonların su kimyası üzerinde etkili olduğunu göstermesi (Drever, 1997; Langmuir, 1997) açısından önemlidir. İnceleme alanında yüzeylenen volkanik kayalarda birincil olarak plajiyoklas ile ojit, hornblend ve kuvars gibi silikatlı mineraller, ikincil olarak kalsit, kuvars ve klorit türü mineraller belirlenmiştir. Kayalarda

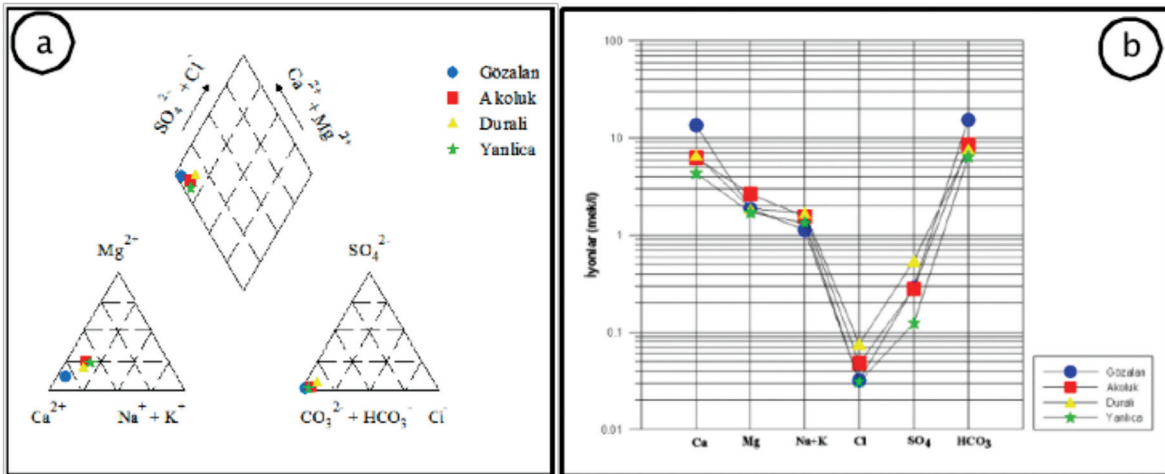
Tahmasebzadeh Bastam, Gültekin

bulunan bu minerallere göre kaynak sularının doygunluk durumları incelenmiş (Şekil 4), genel olarak montmorillonit, illit ve kaolinit gibi kil minerallerine aşırı doygun, götit, mika ve kuvars minerallerine doygun olduğu belirlenmiştir. Aşırı doygunluk uyumsuz çözünme, ortak iyon etkisi, hızlı sıcaklık artışı, buharlaşma ve CO₂ kaybı gibi değişik faktörlerden meydana gelebilir (Appelo ve Postma, 1994; Langmuir, 1997). Sular kalsit, aragonit, albit, serizit, florit, K-feldispat, rodokrozit, siderit gibi minerallere doygun değildir. Bu durum kaynak sularının kimyasal gelişiminde silikatlı kayaç ayrışmasının karbonatlı kayaçlardan daha etkili olduğunu göstermektedir.

DOĞAL İZOTOPLAR

Son yıllarda izotop çalışmaları ile suyun kökeni, beslenme alanı ve su-kayaç etkileşimleri gibi konulara açıklık getirilebilmektedir. İncelenen kaynak sularında $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ve ^3H çevresel izotop içerikleri belirlenmiştir. Kaynakların $\delta^{18}\text{O}$ değerleri -9.64 ile -8.89 (‰

SMOW), $\delta^2\text{H}$ değerleri -60.42 ile -56.23 (‰ SMOW) ve trityum değerleri 6.60 - 8.40 TU (± 0.40) arasında olup bu değerlere göre kaynak suları meteorik kökenlidir. Küresel Meteorik Su Doğrusu (Craig, 1961), Doğu Karadeniz Meteorik Su Doğrusu (DKMD: $\delta^2\text{H}=8 \delta^{18}\text{O}+16$) (Ekmekçi ve Gültekin, 2015) ve kaynakların $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ ilişkileri Şekil 5a'da verilmiştir. İncelenen kaynak suları DKMD üzerinde yer almaktadır. $\delta^2\text{H}$ değeri daha küçük olan Gözalan kaynağının diğer kaynaklara göre daha yüksek kottardan beslendiği, Durali kaynağında ise göreceli olarak bir $\delta^{18}\text{O}$ zenginleşmesi olduğu söylenebilir. Kaynak sularının birbirlerine göre bağlı yeraltında kalış süreleri trityum-klorür ilişkisi (Şekil 5b) ile belirlenmeye çalışılmıştır. Trityum değerleri arasında çok büyük farklar bulunmamakla beraber yüksek trityum değerleri Gözalan ve Akoluk kaynaklarında, nispeten yüksek klorür değeri ise Yanlıca kaynağında görülmektedir. Bu durum Yanlıca kaynak suyunun yeraltında kalış süresinin kısmen diğer kaynaklara göre daha uzun olabileceğini göstermektedir.



Şekil 3. Kaynak suyu örneklerinin Piper (a) ve Schoeller (b) diyagramları.

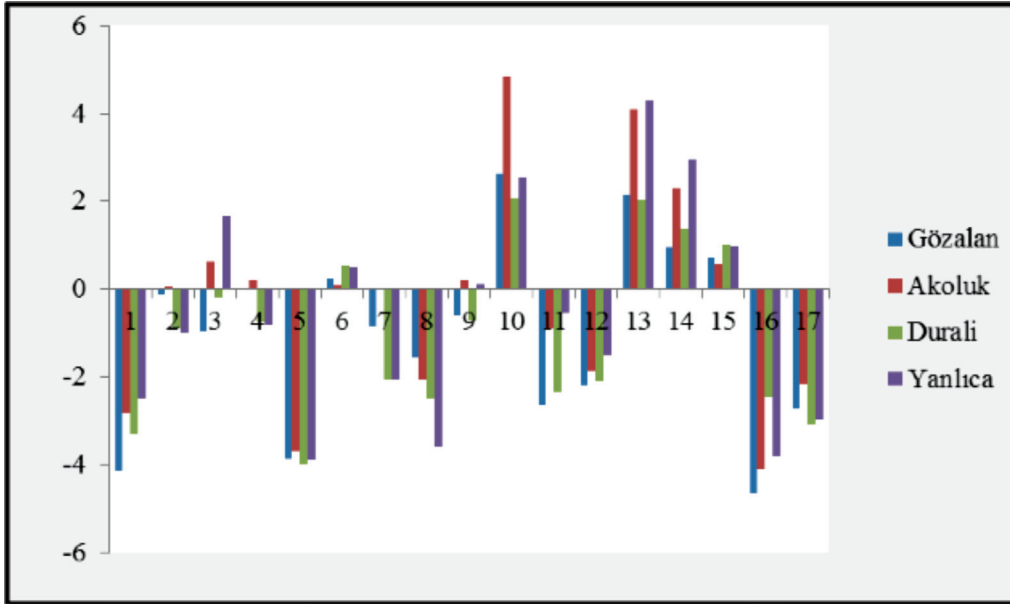
Figure 3. Piper diagram (a) and Schoeller diagram (b) of the spring water samples.

Çizelge 4. Kaynak sularının kimyasal analiz sonuçları (mg/l).

Table 4. Results of chemical analysis of springs waters (in mg/l).

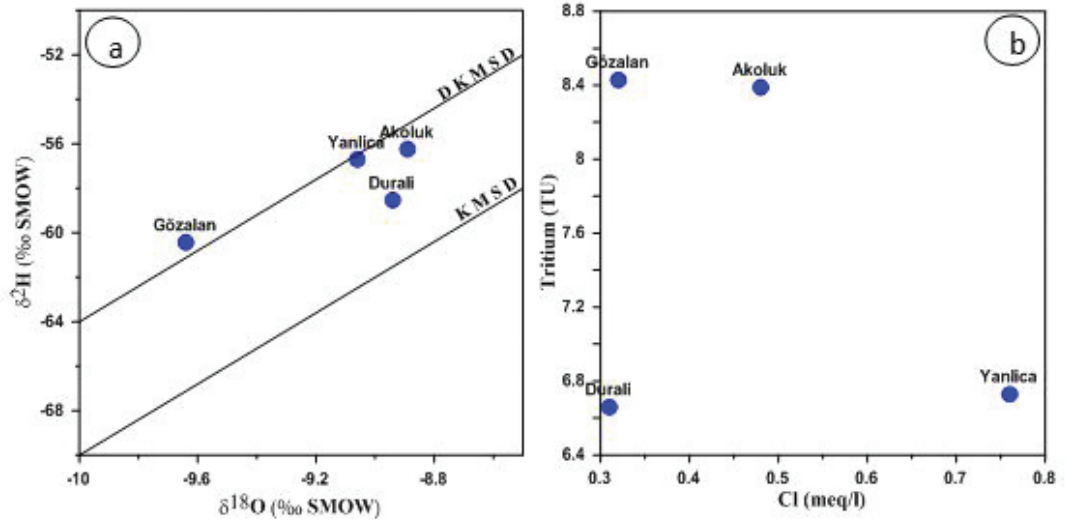
Parametre	Gözalın	Akoluk	Duralı	Yanhca
Ca ⁺²	270.1	125.6	86.5	134.3
Mg ⁺²	22.3	31.5	20.6	22.6
Na ⁺	22.3	35.2	30.0	37.6
K ⁺	6.2	1.0	1.0	2.0
HCO ₃ ⁻	941.0	519.2	389.4	467.2
SO ₄ ⁻²	14.0	13.5	6.0	26.2
Cl ⁻	11.4	17.4	11.1	27.2
F ⁻	0.27	0.21	0.04	0.12
SiO ₂	44.5	33.5	84.4	88.5
NO ₂	<0.01	<0.01	<0.01	0.07
NO ₃	10.45	33.9	50.37	14.5
PO ₄	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NH ₄	0.82	0.52	0.45	0.25
Al	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
As	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008
B	0.032	0.037	0.014	0.023
Ba	0.48995	0.05022	0.02299	0.00309
Br	0.024	0.036	0.046	0.04
Cd	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005
Cr	0.0625	0.0304	0.0351	0.0267
Cs	0.00021	<0.00001	0.00042	<0.00001
Cu	0.0007	0.0004	0.0005	0.0003
Fe	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Li	0.0057	0.0015	0.0053	0.0024
Mn	<0.00005	<0.00005	0.01075	0.00038
Mo	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001
Pb	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Rb	0.01776	0.00056	0.00355	0.00018
Sc	0.01	0.006	0.013	0.012
Se	0.001	0.0006	0.0025	0.0008
Sr	1.65287	0.43925	0.30241	0.17113
U	0.00246	0.00148	0.00025	0.00009
Zn	<0.0005	<0.0005	0.0084	<0.0005

Tahmasebzadeh Bastam, Gültekin



Şekil 4. Seçilen bazı minerallere göre doygunluk indisleri (SI). 1:albit, 2:aragonit, 3:Ca- montmorillonit, 4:kalsit, 5:seruzit, 6: kalsedon, 7:dolomit, 8:florit, 9:gibbsit, 10:götüt, 11:illit, 12:K- feldspat, 13:K-mika, 14:kaolinit, 15:kuvars, 16:rodokrozit, 17:siderit).

Figure 4. Saturation indices (SI) of some selected minerals. (1:albite, 2:aragonite, 3:Ca- montmorillonite, 4:calcite, 5:cerusite, 6: chalcedony, 7:dolomite, 8:fluorite, 9:gibbsite, 10:goethite, 11:illite, 12:K- feldspar, 13:K-mica, 14:kaolinite, 15:quartz, 16:rhodochrosite, 17:siderite).



Şekil 5. İncelenen kaynak sularında $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ (a) ve Cl-Tritiyum (b) ilişkisi. (KMSD: Küresel Meteorik Su Doğrusu, DKMSD: Doğu Karadeniz Meteorik Su Doğrusu).

Figure 5. $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ (a) and Cl-Tritium (b) relation for the studied spring waters (KMSD: Global Meteoric Water Line, DKMSD: Eastern Black Sea Meteoric Water Line).

SU- KAYAÇ ETKİLEŞİMİ

Yeraltı sularındaki majör iyon derişimlerini karbonat ayrışması ve çökmesi, silikat ayrışması, iyon değişimi ve buharlaşma gibi hidrojeokimyasal süreçler kontrol etmektedir. Silikat ayrışmasının, yeraltı suyundaki SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ ve K^+ derişimleri, kalsit ve dolomit gibi karbonat ayrışmasının Ca^{2+} , Mg^{2+} ve HCO_3^- derişimleri açısından etkili olduğu bilinmektedir. Buharlaşma sürecinin etkileri ise Na^+ ve Cl^- iyonları ile TÇK değerlerinde gözlenmektedir (Gibbs, 1970). İncelenen kaynak sularında TÇK değerlerinin 400-1250 mg/l ve $(\text{Na}^{++}\text{K}^+)/(\text{Na}^{++}\text{K}^++\text{Ca}^{2+})$ oranlarının 0.09-0.26 arasında olması, kaynak sularının kimyasını başlıca su-kayaç etkileşiminin kontrol ettiğini göstermektedir. Beslenme havzalarında kireçtaşı, kumlu kireçtaşı, killi kireçtaşı ve marn arakatlı bazalt, andezit ve dasit türü volkanik kayalar yüzeylenen kaynak sularında en fazla bulunan katyon 86.5-270.1 mg/l değerleri ile Ca^{+2} , en fazla bulunan anyon ise 389.4- 941 mg/l değerleri ile HCO_3^- tür. Kaynaklarda Mg^{+2} 20.6-31.5 mg/l, Na^+ ise 22.3-37.6 mg/l arasında değişen değerlerde bulunur. Silikatlı arazilerde yapılan su kimyası çalışmalarında Ca^{+2} ve HCO_3^- iyonlarının mek/l cinsinden oranının 1:2 olduğunda kalsit, 1:4 olduğunda dolomit çözünmesinin etkili olduğu belirtilmiştir (Garrels ve Mackenzie, 1971). Kaynaklarda bu oranın 0.67-0.88 arasında olması

kalsit ve dolomit dışındaki kayaç ayrışmasının daha etkili olduğunu göstermektedir. Majör iyonların hangi kimyasal olaylar sonucu su-kayaç etkileşimi ile suya geçmiş olabilecekleri Hounslow (1995)'e göre değerlendirilmiş ve incelenen kaynakları etkileyen kimyasal süreçler belirlenmiştir (Çizelge 5). Çizelge 5'e göre kaynak sularının kimyasal gelişiminde plajioklas ayrışması, ferromagnezyen mineraller içeren silikat ayrışması, iyon değişimi ve karbonat ayrışması süreçleri etkili olmuştur.

$(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)/(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-+\text{Ca}^{+2})$ oranının <0.2 ve $\text{Na}^+ / (\text{Na}^++\text{Cl}^-)$ oranının >0.5 olması Na^+ iyonlarının kaynağının plajioklas ayrışması ve iyon değişimi olduğunu göstermektedir. $\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_2 >10$ veya <5 olma durumu karbonat veya silikat ayrışmasını gösterir (Hounslow, 1995). Ancak çevre kayaların bileşimleri ve Ca ve HCO_3^- oranları dikkate alındığında çalışma alanındaki suların kimyası üzerinde silikat ayrışmasının karbonat ayrışmasından daha etkili olduğu söylenebilir. Doğal sularda genellikle 1-30 mg/l (Hem, 1970) arasında bulunan SiO_2 , incelenen kaynak sularında 33.5 ile 88.5 mg/l arasında değişir. Silikatların bozunması albit, anortit, K-feldispat, piroksen ve biyotitin kaolinite dönüşme reaksiyonları (1-5) eşitlikleri (Appelo ve Postma, 1994), amfibolün ayrışma reaksiyonu ise (6) eşitliği (Sami, 1992) ile verilmiştir.

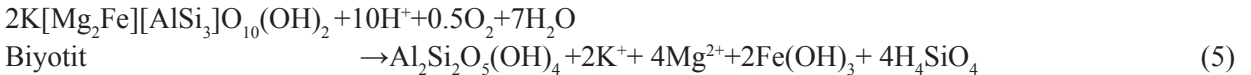
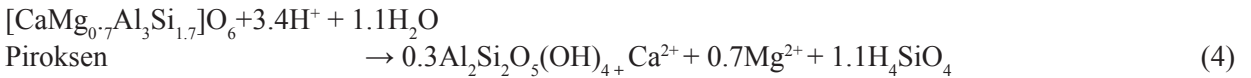
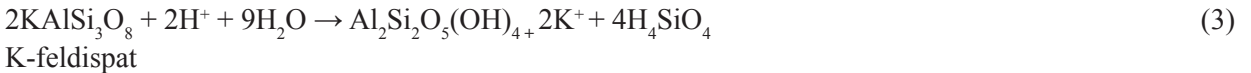
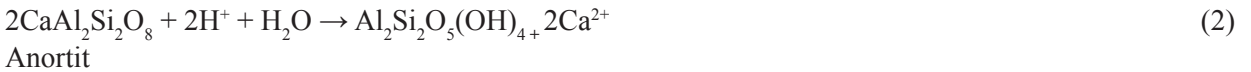
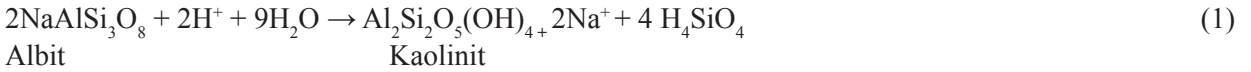
Tahmasebzadeh Bastam, Gültekin

Çizelge 5. İncelenen kaynak sularında gelişen su-kayaç etkileşim süreçleri (Hounslow, 1995).

Table 5. Water-rock interaction processes in the investigated spring waters (Hounslow, 1995).

Parametre ve süreç	Gözalan	Akoluk	Durali	Yanlıca
$(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl})/(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}+\text{Ca}^{+2})$	0.07 Plajioklas Ayrışması	0.19 Plajioklas Ayrışması	0.19 Plajioklas Ayrışması	0.23 Olası Plajioklas Ayrışması
$\text{Na}^+/(\text{Na}^++\text{Cl})$	0.96 İyon değişimi	0.96 İyon değişimi	0.98 İyon değişimi	0.97 İyon değişimi
$\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ $\text{Mg}^{+2}/(\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2})$	21.13 0.12 Karbonat ayrışması	15.5 0.29 Karbonat ayrışması	4.61 0.21 silikat ayrışması (Ferromagnezyen mineraller)	5.2 0.28 silikat ayrışması (Ferromagnezyen mineraller)
$\text{Ca}^{+2}/(\text{Ca}^{+2}+\text{SO}_4^{-2})$	0.97 Karbonat veya silikat ayrışması	0.95 Karbonat veya silikat ayrışması	0.92 Karbonat veya silikat ayrışması	0.97 Karbonat veya silikat ayrışması
$(\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2})/\text{SO}_4^{-2}$	52.78 Dedolomitleşme yok	31.63 Dedolomitleşme yok	15.77 Dedolomitleşme yok	48.66 Dedolomitleşme yok
$\text{Cl}/\Sigma\text{anyon}$	0.002 Kayaç ayrışması	0.005 Kayaç ayrışması	0.009 Kayaç ayrışması	0.004 Kayaç ayrışması
$\text{HCO}_3^-/\Sigma\text{anyon}$	0.97 silikat veya karbonat ayr.	0.96 silikat veya karbonat ayr.	0.92 silikat veya karbonat ayr.	0.97 silikat veya karbonat ayr.

*Çizelgede iyon derişimleri mg/l'dir.



Kaynak sularındaki Ca^{+2} 'un kaynağını çoğunlukla çevre kayalarda yaklaşık % 70-80 oranında bulunan Ca'lu plajyoklaslar, % 5-10 oranındaki ojit ve hornblend gibi silikatlı mineraller, az miktarda da volkanik kayalarda ikincil mineral olarak bulunan kalsit ve ara seviyeler şeklinde bulunan kireçtaşları oluşturur. Mg^{+2} ise sulara volkanik kayalardaki piroksen, amfibol ve biyotit gibi koyu renkli minerallerden geçmiştir. Na^+ ise andezit, altere andezit ve dasit türü volkanik kayalarda % 70 oranında bulunan Na'ca zengin plajyoklasların ayrışması ve kation değişimi olayları sonucu yeraltı suyuna karışmıştır. Havzada volkanik kayalarda yapılan ayrıntılı petrografik çalışmalarda (Aydın, 2003) feldispatoitlerde sodalitlerin ve opak mineral olarak piritlerin bulunduğu belirtilmiştir. Bu mineraller sulara düşük derişimlerde bulunan Cl^- (11.1-27.2 mg/l) ve SO_4^{-2} (6-26.2 mg/l) iyonlarının kaynağı olarak düşünülmektedir.

Kaynak sularında gelişen su-kayaç etkileşim süreçlerinde iyon değişiminin de etkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle yeraltı suyu ile çevre kayalar arasındaki iyon değişimini açıklamak için Schoeller (1965 ve 1967) tarafından önerilen CAI (Chloro Alkaline

Indices) indisleri hesaplanmıştır (Çizelge 6). Sulardaki Na^+ ve K^+ ile kayalardaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} un yer değiştirmesi doğrudan değiş tokuş, değişimin tersi olduğu durum ise ters değiş tokuş olarak adlandırılmaktadır. Doğrudan değiş tokuş işleminde indislerin her ikisi de pozitif, tersi durumda negatif değerler almaktadır. Kaynak suları için hesaplanan CAI indislerinin negatif değerler alması (Çizelge 6), ters değişimin olduğunu göstermektedir.

Kil mineralleri gibi kolloid boyutunda partikül içeren jeolojik birimlerde, partikül yüzeylerinde adsorplanmış iyonik bileşenler sudaki diğer iyonlarla yer değiştirme yeteneğine sahiptir. Bu tür iyonik yer değiştirmenin neden olduğu yüzey yükünün karakteri pH'a bağlıdır (Freeze ve Cherry, 1979; Appelo ve Postma, 1994). Yeraltı sularının pH değeri (6.5-8.5) kaolinit ve montmorillonit türü kil minerallerinin pH_{pzc} değerlerinden (4.6 ve 2.5) büyük olduğu için bu mineraller kation absorplama eğilimindedir (Appelo ve Postma, 1994). pH değerleri 5.3 ile 6.9 arasında olan kaynaklarda, sulardaki Ca^{+2} ile kil minerallerine tutunmuş olan Na^+ 'un yer değiştirmesinden söz edilebilir.

Çizelge 6. İncelenen kaynak sularında CAI (Chloro Alkaline Indices) indisleri.

Table 6. CAI (Chloro Alkaline Indices) of the studied spring waters.

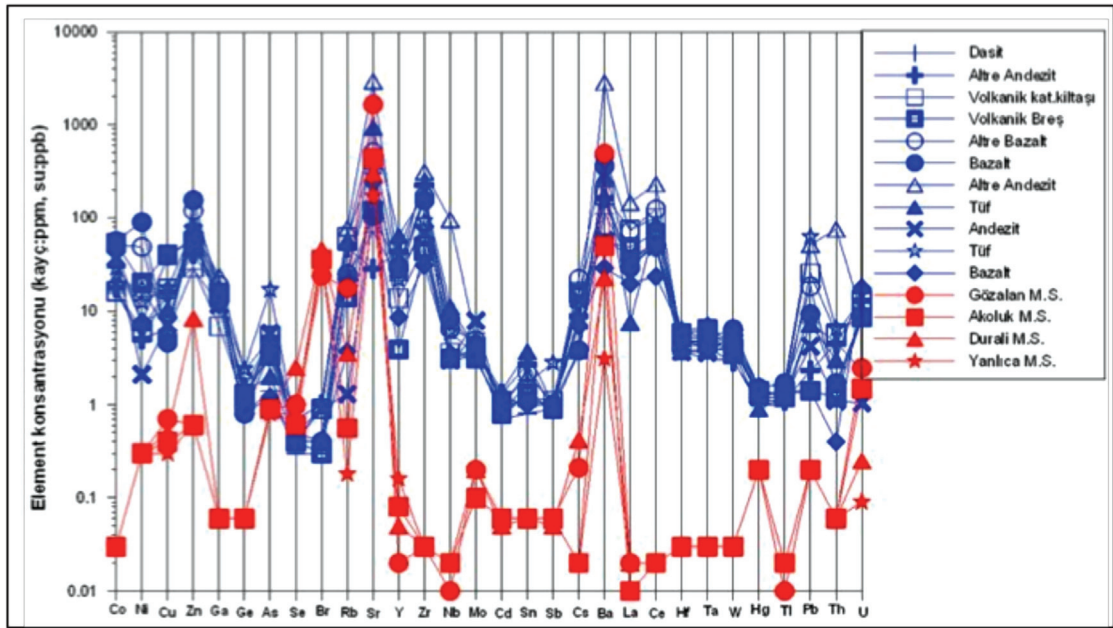
CAI	Gözalın	Akoluk	Duralı	Yanlıca
$r \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}$	-1.128	-1.55	-1.68	-1.32
$r \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{SO_4^{-2} + HCO_3^- + NO_3^-}$	-0.055	-0.13	-0.14	-0.15

Florür değerleri ise 0.04-0.27 mg/l gibi oldukça düşüktür. Florür'ün kaynağı olarak bilinen ve oldukça düşük çözünürlüğü olan florit (CaF_2) hem sedimanter hem de magmatik kayalarda bulunur. İnceleme alanında yüzeyleme veren tuf gibi piroklastik kayalar da florür için kaynak oluşturur, ancak yüksek pH ve düşük Ca^{+2} değerlerinde yüksek F derişimleri görülmektedir (Hem, 1970). Ayrıca yeraltı sularındaki florür derişiminin yağışın potansiyel buharlaşmaya oranına göre belirlenen iklim türü ile ilişkili olduğu belirtilmiştir (Brant vd., 2004). Nemli iklim özelliğine sahip havzada (Gültekin vd., 2005) yer alan kaynakların pH değerinin düşük, Ca^{+2} derişiminin yüksek olması sularındaki F değerlerinin düşük olmasına neden olmuştur.

Sularda ölçülen iz element değerleri genel olarak düşüktür. Kaynaklarda gözlenen en yüksek değere sahip iz element Sr (0.17113-1.65287 mg/l), ikinci sırada ise Ba (0.00309-0.48995 mg/l) elementidir. Ba, doğada normal sularda daha düşük konsantrasyonlarda (0.043 mg/l) (Hem, 1970), doğal mineralli sularda ise daha yüksek değerlerde (0.16 mg/l) (Garboš ve Swiecicka, 2013), en yüksek değerde ise petrol sahalarındaki tuzlu sularda (650 mg/l) (Collins, 1975) gözlenmiştir. Karbonatlı kayalarda az miktarda bulunan Sr ve Ba kimyasal özellikleri Ca^{+2} ile benzer olup, granit siyenit gibi magmatik kayalardaki potasyum ve kalsiyum ile yer değiştirebilirler (Rankama ve Sahama, 1950). Sularda Cr (0.0267- 0.0625 mg/l), Br (0.024-0.046 mg/l) ve B (0.014- 0.037 mg/l) elementleri daha düşük değerlerde bulunur. Çözeltilerde iki değerlikli baskın türler olan Cu, Zn ve Cd, incelenen kaynaklarda düşük değerlerdedir. Bunlar ve benzeri metalik element içeren minerallerin çözünürlükleri indirgeyici şartlar altında ve asidik koşullarda daha yüksektir.

Metalik elementler yüksek pH'larda (örğ. $\text{pH}>8$) ve oksik koşullarda oksit ve hidroksit mineralleri şeklinde çökeltme eğilimindedir. Ortamda indirgeyici sülfür türleri olduğunda Cu ve Pb içeren minerallerin çözünürlüğü indirgeyici koşullarda, yükseltgeyici koşullara göre daha düşüktür (Hem, 1970). Doğal sularda, Zn cevherleşmelerinin bulunmadığı alanlarda Zn konsantrasyonunun genellikle 10 ppb'nin altında, Cd konsantrasyonunun oldukça düşük (Hem, 1970) olduğu belirtilmiştir. Lokal yeraltı suyu sistemlerini temsil eden kaynak sularında eğilim oksijen tüketimine ve dolayısıyla indirgeyici (redüksiyon) koşullara doğru olduğundan Cu, Zn, Pb ve Cd elementlerini içeren minerallerin çözünürlükleri düşüktür.

Yeraltı sularının kimyasal gelişiminde içerisinde bulunduğu jeolojik birimi oluşturan minerallerin çözünürlüğü ve açığa çıkan elementlerin jeokimyasal hareketliliği önemlidir. Kaynak sularının iz element içerikleri ile kayaların iz element içerikleri karşılaştırıldığında indirgeyici koşullarda hareketli olan Ba ve Sr değerlerinin sularda da kayalarda olduğu gibi yüksek değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 6). Sulardaki içeriği kayalardaki derişimleri ile paralellik gösteren Zn indirgen ortamlarda hareketsiz olmasına rağmen karbonatlı ortamlarda hareketlidir. Ni, Cu, As, Se, Mo, Cd, Sn, Sb, Hf, Ta ve Th gibi hareketsiz olan elementler kayadaki bileşimlerine paralel derişim göstermektedir. Co, Zr, Nb ve Tl gibi elementlerin kayalardakinin aksine sulardaki derişimleri düşüktür. Hem yükseltgeyici, hem de indirgeyici şartlarda hareketli olan Br kayalardakinin aksine sularda yüksek derişimlerde bulunmaktadır.



Şekil 6. İncelenen kaynak sularında (ppb) ve çevre kayalarında (ppm) iz element konsantrasyonları.

Figure 6. The trace element concentration in the studied spring waters (ppb) and country rocks (ppm).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yağışlı bir iklime sahip olan çalışma alanı ve çevresinde sürekli akışa sahip, normal sulara göre daha yüksek iyon içeren kaynaklarda su tipi Ca-HCO_3^- türüdür. Toplam iyon miktarları yıl boyunca değişiklik göstermeyen bu kaynak sularındaki majör iyonların mek/l değerlerine göre bolluk sıralamaları birbirine oldukça benzerdir. Genel olarak düşük konsantrasyonlarda olan iz elementler açısından da kaynak suları birbirlerine benzerlik gösterir. Havzada topoğrafik eğimin yüksek ve çok sayıda yan vadilerin olması havzaya düşen yağışın sığ dolaşimlarla kısa sürede vadi tabanlarına yakın kotlardan kaynaklar şeklinde boşalmasına neden olmaktadır. Kaynakların $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ izotop değerleri de bunu destekler niteliktedir. Kaynakların beslenme havzalarında kireçtaşı, killi kireçtaşı ve marn arakatıkları içeren bazalt, andezit ve piroklastik kayalar yüzeylenir. Kloritleşme ve epidotlaşma şeklinde yoğun ayrışmanın gözlemlendiği volkanik

kayaçlarda birincil olarak plajiyoklas, piroksen, biyotit ve hornblend mineralleri, ikincil olarak kuvars ve kalsit mineralleri tespit edilmiştir.

Kaynak sularının kimyasal bileşiminde silikat ayrışması, karbonatlı minerallerin çözünmesi ve iyon değişimi süreçlerinin etkili olduğu belirlenmiştir. Silikatlı minerallerin ayrışması kaynak sularının kimyası üzerindeki ana kontrol olarak yorumlanmıştır. Kayaçların ayrılmış türlerinde yüksek derişimlerde gözlenen ve indirgeyici ortam koşullarında hareketli olan iz elementler sulara da yüksek değerlerde bulunmaktadır.

Kayaç ayrışmasının etkili olduğu Değirmendere Havzası'nda volkanik kayaların çatlak ve fay zonlarından yüzeye çıkan Gözalan, Akoluk, Durali ve Yanlıca kaynak suları normal yeraltı sularına göre daha fazla iyon içerirler. Bu iyon içerikleri ile bu tür kaynaklar Doğal Mineralli Sular Hakkındaki Yönetmelik (2004)'e göre «düşük mineralli su» ve «mineralli

Tahmasebzadeh Bastam, Gültekin

su» sınıfında değerlendirilmektedir. Bu tür suların iz element konsantrasyonları içilebilme özelliklerini etkilemektedir. İncelenen kaynak sularının Br (0.036- 0.070 mg/l) ve Cr (0.0625 mg/l) değerleri Doğal Mineralli Sular Hakkındaki Yönetmelik (2004)'te önerilen sınır değerleri aşmaktadır. Yönetmelikte verilen sınır değerleri aşmamasına rağmen Sr (0.17113-1.65287 mg/l) ve Ba (0.00309-0.48995 mg/l) konsantrasyonları da normal sulara göre daha yüksektir. Çözünmüş madde miktarı normal sular göre daha yüksek fakat mineralli sulara göre daha düşük olan bu kaynak suları, yan kayalarındaki ayrışmaya bağlı olarak su-kayaç etkileşiminin gözlemlendiği sığ dolaşıma sahip yeraltı sularıdır. Yerleşim alanı içerisinde ve yoğun tarım faaliyetlerinin etki alanında bulunan bu kaynaklar ilaç, gübre ve evsel atıklar tarafından da kirlenmeye karşı korunmasızdır. Kaynakların hepsinde NO₃ ve NH₄ değerleri normal sulara göre daha yüksek, Durali kaynağında ise NO₃ konsantrasyonu Doğal Mineralli Sular Hakkındaki Yönetmelik (2004)'te önerilen değeri aşmaktadır. Dolayısıyla bu tür kaynakların içilebilme özelliklerini etkileyen parametreler açısından bir süre takip edilip yönetmeliklerde verilen değerleri aşan parametrelerin olması durumunda da kaynakların kullanımlarının engellenmesi yöre halkı sağlığı açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- Alkan, A., Serdar, S., Fidan, D., Akbaş, U., Zengin, B., Kılıç, M.B., 2013. Physico-chemical characteristics and nutrient levels of the eastern black sea rivers. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 13, 847-859.
- Appelo, C. A. J., Postma, D., 1994. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam: Balkema, 536 p.
- Aydın, F., 2003. Değirmendere vadisi (Trabzon-Esiroğlu, KD- Türkiye) volkanitlerinin mineral kimyası, petrolojisi ve petrojenezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon. Doktora Tezi, 232 s. (yayımlanmamış).
- Brunt, R., Vasak, L., Griffioen, J., 2004. Fluoride in groundwater: probability of occurrence of excessive concentration on global scale. *International Groundwater Resources Assessment Centre (Igrac) Report nr: Sp 2004-2*.
- Collins, A. J., 1975. *Geochemistry of oil field waters*: New York, Elsevier Scientific Pub. Co. 496 p.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric water. *Science*, 133, 1702-1703.
- Davraz, A., 2003. Kaya- su etkileşimi üzerine bir çalışma, Keçiborlu- Değirmendere kaynağı (Isparta). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7 (2), 327-335.
- Drever, J. I., 1997. *The geochemistry of natural waters*. Third edition. New Jersey: Prentice-Hall. Inc. 436 p.
- Ekmekçi, M., Gültekin, F., 2015. Doğu Karadeniz bölümü suları çevresel duraylı izotop içeriğinin değerlendirilmesi. MÜHJEO'2015 Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, (Editörler: Ulusay, Ekmekçi, Ersoy ve Fırat Ersoy), Trabzon, 459-466.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. Inc. 562 p.
- Garbos, S., Swiecicka, D., 2013. Determination of barium in natural waters by ICP-OES technique. Part II: Assessment of human exposure to barium in bottled mineral and spring waters produced in Poland. *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny*. 64, (2), 91-6.
- Garrels, R. M., Mackenzie, F.T., 1971. *Evolution of sedimentary rocks*. New York: WW Norton. 413 p.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science Journal*, 170,795-840.
- Gültekin, F., Dilek, R., Fırat Ersoy, A., Ersoy, H., 2005. Aşağı Değirmendere (Trabzon) havzası'ndaki suların kalitesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 29 (1), 21-35.
- Gültekin, F., Fırat Ersoy, A., Hatipoğlu, E., 2010. Trabzon ili CO₂'ce zengin kaynak sularında su-

- kayaç ilişkisi, IV. Ulusal Jeokimya Sempozyumu, (Editör: Şaşmaz), Elazığ, 113.
- Güven, İ. H., 1993. Doğu Pontidlerin jeolojisi ve 1/250.000 ölçekli kompilasyonu. MTA Yayınları, Ankara.
- Hamzaoui-Azaza, F., Ketata, M., Bouhlila, R., Gueddari, M., Riberio, L., 2011. Hydrogeochemical characteristics and assessment of drinking water quality in Zeuss-Koutine aquifer, southeastern Tunisia. Environmental Monitoring and Assessment, 174, 283-298.
- Hem, J. D., 1970. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Geological Survey (U.S.), Water-supply paper, Second Edition, 363 p.
- Hounslow, A. W., 1995. Water quality data: analysis and interpretation. Lewis Publishers, 416 p.
- Kara, İ., 1997. Termal ve mineralli sular envanteri Trabzon, MTA Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara, (yayımlanmamış).
- Korkmaz, S., 1993. Tonya-Düzköy (GB Trabzon) yöresinin stratigrafisi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 36, 151- 158.
- Langmuir, D., 1997. Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall, Inc., 601p.
- MGM, 2015. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, İllerimize ait istatistik verileri, 20 Kasım, 2015, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik>.
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2): A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. pp. 99-4259.
- Rankama, K., Sahama, T. H. G., 1950. Geochemistry, The university of Chicago Pres, Chicago and London, 912 p.
- Sami, K., 1992. Recharge mechanisms and geochemical processes in a semi-arid sedimentary basin, Eastern Cape, South Africa. Journal of Hydrology (Amsterdam), 139, 27-48.
- Scislawski, A., Zuddas, P., 2010. Estimation of reactive mineral surface area during water-rock interaction using fluid chemical data. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74, 6996-7007.
- Schoeller, H., 1965. Qualitative evaluation of groundwater resources. In Methods and techniques of groundwater investigations and development, UNESCO, 54-83.
- Schoeller, H., 1967. Geochemistry of groundwater-an international guide for research and practice (Chap.). UNESCO, 15, 1-18.
- T.C. Resmi Gazete, 2004. Doğal mineralli sular hakkında yönetmelik, 25657.
- Zhu, C., 2005. In situ feldspar dissolution rates in an aquifer. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69 (6), 1435-1453.



Eleştirel Derleme / Review Paper

Yeraltı Suları Bütçesi Tartışmaları

Groundwater Budget Discussions

Muhterem DEMİROĞLU

İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Müh. Bölümü, Maslak, İSTANBUL

Geliş (Received): 13 Mart (March) 2017 / Düzeltme (Revised): 11 Mayıs (May) 2017 / Kabul (Accepted): 24 Mayıs (May) 2017

ÖZ

Yeraltı suları bilançosu, belirli bir zaman aralığında dengede olduğu kabul edilen herhangi bir akifere giren ve çıkan suyun, depolanmadaki değişimi de dikkate alınarak, eşit olması prensibine dayanır. Kısa sürede yenilenebilen yüzey suları bilançoları doğrudan güncel beslenme ve boşalım ilişkileridir. Yeraltı sularında derin dolaşım hatta farklı iklim koşullarında sisteme giren ve çıkan değişik yaşlardaki sular, beslenme boşalım eşitliğini karmaşık hale getirir. Beslenme, boşalım değişikliğiyle ilgili geleceği de kapsayan hesaplamalar, yeraltı suyu bütçesi olarak adlandırılır. 1950'li yıllara kadar sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimi, "Yeraltı suyu çekimi doğal beslenimi aşmamalıdır." kabulü ile yapılmıştır. DSİ tarafından halen yeraltı suyu işletme sahaları izinleri aynı yaklaşımla verilmektedir. 1980'li yıllardan sonra bu yaklaşımın efsane olduğu ilan edilmiş, boşalım ve beslenimden alıkonan suların hesaplanması giderek beslenimi göz ardı eden bir yaklaşımı gündeme getirmiştir. Doğru yaklaşım ise sürdürülebilir yeraltı suları çekiminde doğal beslenimin yanında, boşalımdan alıkonan ve beslenme artışlarını dikkate alan yaklaşımdır. Sürdürülebilir yeraltı suları çekiminde kuyu yerleri boşalımdan alıkonan ve beslenme artışlarını dikkate alan yaklaşımla seçilmelidir. Her sene çekilen yeraltı suyu miktarıyla yıllık beslenme miktarı arasında uzun süreli bir denge kurulması ve boşalımdan alıkonan su miktarı gelecekte oluşacak çevre etkisi dikkate alınarak belirlenmelidir. Bu çalışma ile tartışmalar değerlendirilerek, yeraltı suları bütçesi ve modelleme çalışmalarında ihmal edilen ayrıntılar vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Akifer, Beslenme, Boşalım, Yeraltı Suları Bütçesi.

ABSTRACT

The groundwater balance is based on the principle that the water entering and leaving any aquifer considered to be equal over a certain time interval, taking into account the change in the storage. Groundwater, a renewable resource, is quite complicated in its balances, as the equilibrium conditions take place in very long periods. Surface waters are directly related to current recharge and discharge, while circulating groundwater, is in a different age and even in different climatic conditions in the system and complicate this relationship. Accountings of all the inflows, outflows, and including changes in the future, are called a groundwater budget. Sustainable groundwater management until the 1950s was made with the understanding that the groundwater discharge should not exceed the natural recharge and the permission for groundwater withdrawal is still given by State Hydraulic Works (DSİ) with the same approach. Since the 1980s, this approach has been declared legendary, and the calculation of water retained

from discharge and recharge has come to an approach that ignores the recharge. The truth is an approach that takes into account the decreased discharge and increased recharge in addition to recharge. For a sustainable groundwater development, the well locations should be selected with an approach that takes into account the increased recharge and decreased discharge. The rate of groundwater removal should be defined by the long-term balance between recharge and discharge, and the capture rate from discharge must be defined by taking into account the long-term environmental impacts. With this study, discussions were evaluated and the importance of the groundwater budget was emphasized in sustainable groundwater management.

Keywords: *Aquifer, Recharge, Discharge, Groundwater Budget.*

GİRİŞ

Akifer olarak adlandırılan, yeraltı suyunu boşluk ya da kırık çatlaklarında depolama ve iletebilme özelliğinde olan kayalar, ayrı ayrı su kütlelerini oluştururlar. Sular yağışla, hareket halindeki su kütlelerine sürekli eklenir (beslenir) ve sürekli ayrılır (boşalır). Yeraltı suyunun beslenimi yağıştan (yağmur, kar, çığ vb.), yüzey sularından, komşu akiferlerden, sulamadan dönen sulardan, suni beslenmeden ve şebeke kayıplarından eklenen sularla gerçekleşir (Freeze ve Cherry, 1979; Alley vd., 1999; Dumlu, 2005; Aksever, 2012). Yeraltı suyu boşalımı ise buharlaşma-terleme, komşu akiferlere sızma, akarsulara boşalım, kuyu, drenaj, kanal ve benzeri yollarla yapılan yapay çekimler şeklindedir.

Akiferlerdeki tüm girişler, çıkışlar ve değişikliklerle ilgili geleceği de kapsayan

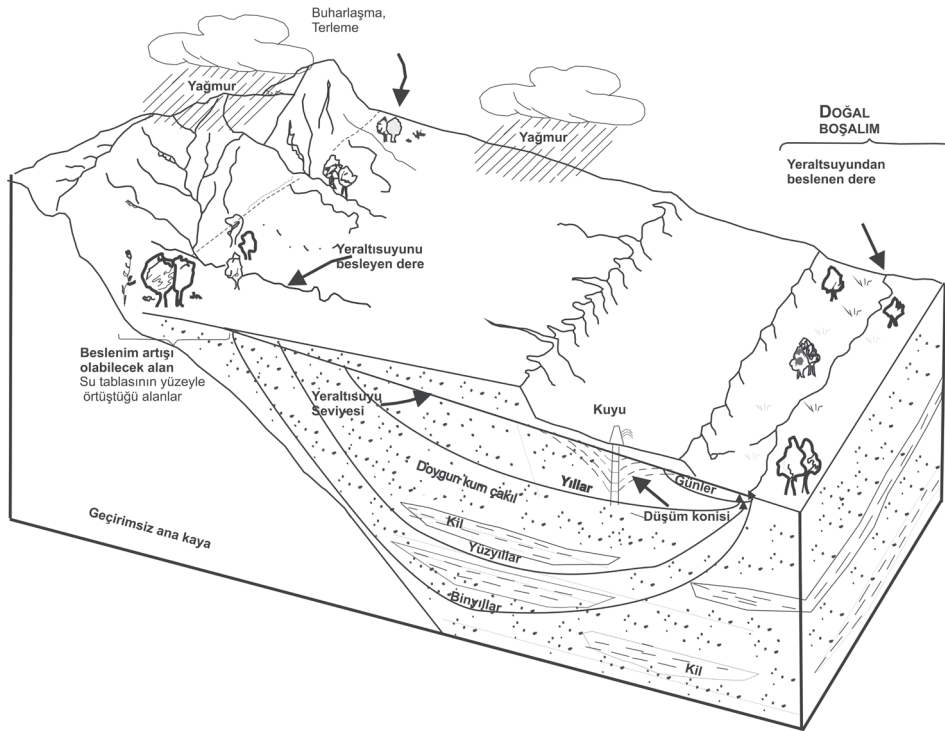
hesaplamalar, yeraltı suyu bütçesi olarak adlandırılır. Belirli bir zaman aralığında dengede olduğu kabul edilen herhangi bir akifere giren ve çıkan su, depolanmadaki değişim de dikkate alınarak, eşit kabul edilir (Çizelge 1).

Küresel bazda, yüzey suyu her 9 ile 16 günde bir, ortalama 11 günde, yenilenir (Korzoun vd., 1978; L'vovich, 1979; Ponce vd., 2000). Yüzey suları bilançoları güncel beslenim ve boşalımla ilişkilidir. Yeraltı suyu dönüş hızı, akiferin türü, derinliği ve hidrolik iletkenlik özelliklerine bağlı olarak, günler, yüzyıllar, bin yıllar arasında değişebilir (Şekil 1). Yeraltı sularının yenilenmesi için ortalama süre 1400 yıldır (Ponce vd., 2000). Aynı akifer sisteminde yavaş akış ve hızlı akış koşulları gerçekleşebilmektedir (Atkinson, 1977). Yeraltı suları denge koşulları çok uzun vadelerde gerçekleştiği için yüzey suları bilançolarından daha karmaşıktır.

Çizelge 1. Doğal koşullar altında bir yeraltı suyu sistemine giren ve çıkan olası su kaynakları.

Table 1. Possible sources of water entering and leaving a ground-water system under natural conditions.

Beslenim	Boşalım
Yağıştan doymamış zon boyunca süzülen beslenim	Dereler, göller, sulak alanlar, tuzlu su kütleleri (koylar, haliçler veya okyanuslar) ve kaynaklarla boşalım
Akarsular, göller ve sulak alanlardan gelen sularla beslenim	Yeraltı sularının buharlaşma terleme ile boşalımı
Komşu havzalardan gelen beslenim	Komşu havzalara boşalım



Şekil 1. Kuyularla çekim yapılan bir akiferde beslenme boşalım ilişkisi (Theis, 1940'tan değiştirilmiştir).

Figure 1. Relation of recharge and discharge in an aquifer to discharge by wells (modified from Theis, 1940).

Şekil 1'de Theis (1940) tarafından oluşturulan sığ dolaşımli serbest akifere derin dolaşım ilave edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi güncel ve yaşlı sular derede taban akışı oluşturmaktadır.

Bazı hidrojeologlar, bir yeraltı suyu sistemindeki tüketime uygun su miktarını (veya emniyetli verimi), suyun kullanılmaya başlanmadan önceki doğal koşulları dengede varsayarak hesaplamaktadır. Dengedeki sistemde, yeraltı suyu çekimi doğal beslenimi aşmıyorsa "güvenli" olarak kabul edilir (Lee, 1915; Todd, 1959; Muller ve Price, 1979; Alley vd., 1999). 1950'li yıllara kadar sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimi, "Yeraltı suyu çekimi doğal beslenimi aşmamalıdır." kabulü ile yapılmıştır. DSİ tarafından yenilenen hidrojeolojik etütlerde yeraltı suyu bütçeleri ve emniyetli verim halen

bu yaklaşımla verilmektedir. İlk olarak Theis (1940), bu yaklaşımın maddenin korunumu yasasına uymadığını ve bir akiferden pompajla çekilen suyun mutlaka bir yerlerden eksilmeye karşılık geldiğini vurgulamıştır (Şekil 1). Kuyu yeri seçimlerinde akiferlerde depolanan suyun tüketilmemesi için:

1-Akifere daha fazla suyun girmesini sağlamak amacıyla yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu alanların seçilmesinin (arttırılan beslenme), 2- Kuyuların, boşalım alanına yakın açılarak sistemden daha az suyun kaçmasının (azaltılan boşalım) sağlanması gerektiği belirtmiştir.

Ancak 1980'li yıllardan sonra, boşalımdan ve beslenimden alıkonan suların hesaplanması için giderek beslenimi gözardı eden bir yaklaşım

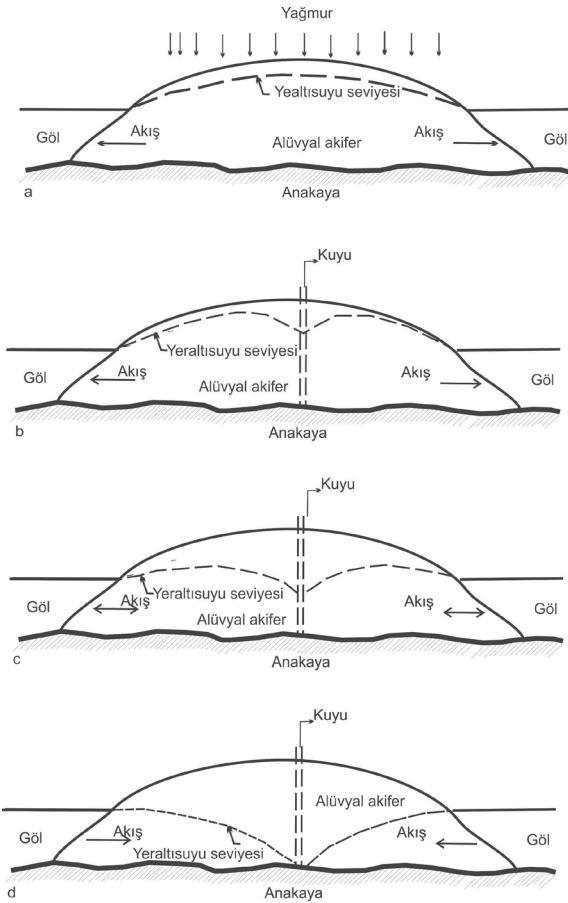
getirilmiştir (Bredehoeft vd., 1982). Bredehoeft (1997) tarafından önerilen yaklaşıma paralel bir yaklaşımla İstanbul-Bakırköy havzası modellenmiştir. Kuyulardan yapay beslenme yapılarak doğal beslenimin ihmal edilmesi durumunda yeraltı su seviyesi değişiminin önemsenmeyecek kadar küçük bir fark yarattığı ifade edilmiştir (Tufan, 2007). Bu çalışmada ihmal edilen en önemli ayrıntı, hesaplanan dönemdeki beslenme miktarının çok uzun vadede depolanan yeraltı suları miktarıyla kıyaslanmasıdır.

Sürdürülebilir yeraltı suları çekiminde doğal beslenimin yanında boşalımdan alıkonan ve beslenme artışlarını dikkate alan bir yaklaşım geliştirilmelidir. Ancak beslenme veya boşalımdan alıkonan sularla akiferde yeni denge koşullarının oluşması ve rezervden çekimin durması için çoğu zaman çok uzun yıllar gerekmektedir. Bredehoeft (1997; 2002)'de açıklanan hidrojeolojik modelle, akiferin iletkenliğine bağlı olarak buharlaşmadan alıkonan sularla dengeye ulaşması için uzun yıllar (100 yıl) gerektiği belirtilmektedir. Alley ve Leake (2004) de verdikleri Nevada Cennet Vadisi Akiferi Modeli ile beslenimin yarısı kadar çekimle bile yeniden dengeli akım koşullarının 300 yıl sonra oluştuğunu göstermişlerdir. Fazla çekim yapılan akiferler, boşalımdan alıkonan sularla rezervden su tüketiminin durması gerçekleşinceye kadar yeniden kazanılamayacak kadar tüketilmiş olabilir (Bredehoeft ve Durbin, 2009).

Ülkemizde Avrupa Birliği, Su Çerçeve Direktifi'ne (2000/60/EC) uyum kapsamında, Orman ve Su İşleri Bakanlığı tarafından, yüzeysel suları ve yeraltı sularının bütüncül bir yaklaşımla miktar ve kalite açısından korunması için çalışmalar yapılmaktadır. Son olarak yüzeysel suları ve yeraltı sularının izlenmesine dair yönetmelik yayınlanmıştır (T.C. 2014/28910). Bu yönetmelikle, yeraltı sularının miktar ve kalitesinin mevcut durumunun belirlenmesi ile tabii şartlardan ve insani faaliyetlerden kaynaklanan uzun vadeli değişimlerin değerlendirilmesi ve izlenmesi için Devlet Su İşleri yetkili kılınmıştır. Devlet Su İşleri tarafından hidrojeolojik havza etütleri ve modelleme çalışmaları yaptırılmaktadır. Yeraltı suları izleme programları ve ağlarının oluşturulduğu bu dönemde, yeraltı suları bütçesi tartışılmış, modelleme çalışmaları ve değerlendirilmelerinde ihmal edilen ayrıntılara dikkat çekilmiştir.

SU BİLANÇOLARI TARTIŞMALARI

Yeraltı suyu bütçesini efsane ilan eden ve "Beslenimin bilinmesi, sürdürülebilir bir yeraltı suyu gelişiminin belirlenmesinde önemlidir." görüşünün doğru olmadığını açıklayan çalışmalarda verilen dairesel ada örneği Şekil 2'de görülmektedir (Bredehoeft vd., 1982; Bredehoeft, 1997; 2002)



Şekil 2. Göllerle çevrili dairesel ada akiferinin çeşitli durumları a) Başlangıç b) Kuyularla yeraltı suyu çekimi c) Yeraltı suyu seviyesinin göl seviyesine inmesi d) Gölün akiferi beslemesi (Bredehoeft, 2002).

Figure 2. Schematic cross section of the island aquifer system, which illustrates that a) Virgin conditions b) The cone of depression soon after pumping has begun c) Groundwater level descending to the lake level d) Lake recharges aquifer (Bredehoeft, 2002).

Doğal şartlarda, yani yeraltı suyu kullanılmaya başlanmadan önce, dengeli akım koşullarında doğal beslenme (R) doğal boşalmaya (D) eşittir (Şekil 2 a).

$$R - D = 0 \quad (1)$$

Sistemden su çekilmeye başlanmasından sonra koşullar aşağıdaki ifadeye dönüşür (Şekil 2b, c)

$$(R + \Delta R) - (D + \Delta D) - Q + dV/dt = 0 \quad (2)$$

ΔR = Beslenimdeki değişim

ΔD = Boşalımdaki değişim

Q = Toplam çekim

dV/dt = Depolanan su miktarındaki değişim

ve (2) no'lu denklemden

$$\Delta R - \Delta D - Q + dV/dt = 0 \quad (3) \text{ elde edilir.}$$

Beslenimdeki artış, boşalımdan alıkonan sularla dengeye ulaşan akiferdeki değişim rezervden eksilen sudur (Şekil 2d).

$$\Delta R - \Delta D - Q = dV/dt \quad (4)$$

Sürdürülebilir yeraltı suyu üretimi için rezervdeki değişimin 0 olması istenir.

$$dV/dt = 0 \quad (5)$$

Bu durumda $\Delta R - \Delta D - Q = 0$ ve

$$\Delta R - \Delta D = Q \quad (6)$$

Çoğu zaman akiferlerde buharlaşmanın azaltılmasına bağlı beslenme artışı gerçekleştirilemediği için yeraltı suyu bilançosu;

$$\Delta D = Q \quad (7)$$

Yani “pompajla çekilen su, boşalımdan alıkonan sulardır” denilerek beslenme göz ardı edilmiştir.

Ancak doğada, dairesel ada örneğindeki gibi dengeli akım koşulları çoğu zaman sağlanmamıştır. Özellikle karstik akiferlerde yeraltı suyu boşalımı beslenimden fazla hesaplanmaktadır (Demiroğlu vd., 2011; Eris ve Wittenberg, 2015). Bu anlamda sisteme giren su miktarının çok üstünde boşalımı olan havzalarda, boşalımdan alıkonan suları dikkate almak,

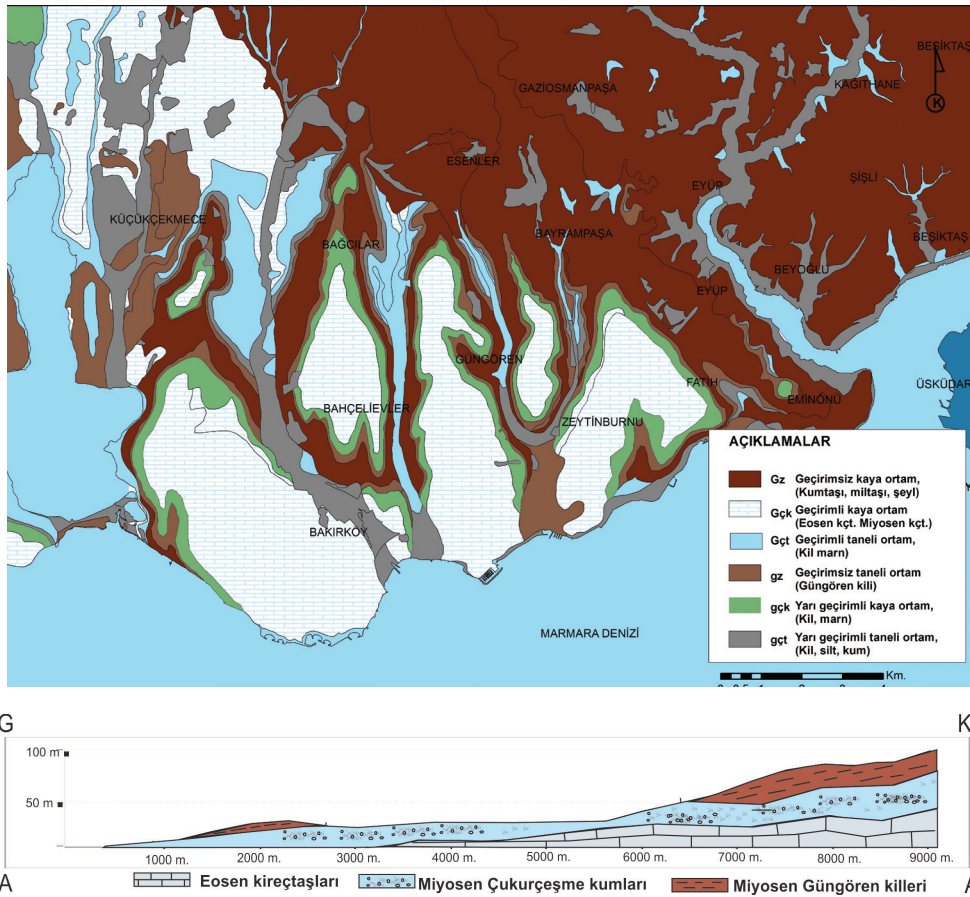
yalnız beslenimi dikkate alan yaklaşım kadar eksiktir. Bredehoeft (2002), doğal beslenimin bilinmesinin önemsiz olduğuna ilişkin sonuca, denklemlerin anlamlarının ötesinde varmıştır (Zhou, 2009).

Matematiksel modeller, gerçek hidrojeolojik sistemin belirli varsayımlar ile sadeleştirilerek matematiksel fonksiyon ve eşitlikler ile ifadesidir. Gerçek sistem (doğa) son derece karmaşık bir yapıya sahiptir ve günümüzde doğal süreçleri tüm yönleri ile matematiksel eşitlikler ile ifade etmek mümkün değildir. Bu nedenle sistemin ilgilenilen süreçlerini öne çıkaran, diğer süreçleri ise arka plana iten ya da yok sayan sadeleştirmelere gerek duyulmaktadır. Bu nedenle aynı sistemin birden fazla model ile ifadesi mümkündür (Tezcan, 1993; 2002). Her akiferin koşulları farklıdır. Akiferlerden farklı yıllarda hatta farklı iklim koşullarında sisteme giren değişik yaşlardaki sular boşalmakta ve akiferin özelliklerine ve zamana bağlı dengeler gelişmektedir. Fosil suların depolandığı akiferlerde bu denge hiç bir zaman gerçekleşmeyecektir. Yani $R - D = 0$ (1) teorik olarak sıfırdır. Dairesel ada örneğinde olduğu gibi modeller, sınır koşulları kesin olarak belirlenmiş sistemleri temsil eder. Kalibrasyon yapılan dönemlerde model ve modellenen akifer sisteminin benzer tepkileri verdiği hesaplansa da bölgesel değişimlerden ne ölçüde etkileneceğini hesaplamak oldukça karmaşık olduğu için sonraki yıllarda hiç beklenmeyen sonuçlarla karşılaşmak mümkündür. Özellikle yeraltı suyu modelleme çalışmaları; yerine getiremediği hayali vaatlerinden dolayı çoğu zaman test edilemeyen, kendi kendini destekleyen sanayi haline gelmiştir (Voss, 2011). Modellerin kalibrasyonu ve sonuçlarının başarısının kontrolü ancak etkin yeraltı suları izleme programları ve ağlarının oluşturulması ile gerçekleştirilebilir (Korzoun vd., 1978).

Emniyetli çekim miktarının belirlenmesinde beslenimin etkisinin hidrojeolojik modellerle gösterilmesine benzer bir yaklaşımla Tufan (2007), Bakırköy Havzası'nı modellemiştir. Çalışmasında İstanbul'un batısında Bakırköy ilçe sınırları içerisinde yer alan Bakırköy Havzası'nın mevcut durumu ve son 45 yıl içinde göstermiş olduğu değişimleri gösteren 3 boyutlu (3D) modeli oluşturulmuştur. Yaklaşık 15 km² alanı kaplayan akifer (Üst Miyosen yaşlı Çukurçeşme formasyonu) kum ve çakıllardan oluşmuştur. Altta yerel boşluklu Eosen Kırklareli kireçtaşı ve üstte Miyosen kil ve marnlar (Güngören formasyonu) ile sınırlı basınçlı bir akiferdir (Şekil 3).

Günümüzde kuru olan çalışma alanının yeraltı suyu modeli 1981 yılı ölçümlerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Model oluşturulduktan sonra, akiferin eski haline getirilebilmesi için gerekli beslenme miktarı, 1981 yılından günümüze kadar olan süredeki değişimi için yapılmış olan çekim miktarı ve beslenmenin bu değişimler üzerindeki etkisi, oluşturulan farklı simülasyonlarla ortaya konulmuştur.

1960 yılında akiferin tamamının yeraltı suyu ile dolu olduğu ve yeraltı su seviyesinin -10 m ile + 0,3 m arasında değiştiği bilinmektedir. 1981 yılından 1960 yılındaki duruma yeniden gelebilmek için akiferin ne kadar beslenmesi gerektiği birinci simülasyonda denenmiştir. Günümüzde kuyulardaki su seviyesi derinliği 120-130 metre civarındadır, bu da Çukurçeşme akiferinin hemen hemen kuru olduğunu göstermektedir. 1981 yılından bugünkü duruma gelirken akiferden ne kadar su çekimi yapıldığı ikinci simülasyonda belirlenmiştir.



Şekil 3. Halic Küçükçekmece arası hidrojeoloji haritası (Özgül, 2006 ve Ötaz, 2008'den değiştirilerek hazırlanmıştır).

Figure 3. Hydrogeological map in the region between Halic (Golden Horn) and Küçükçekmece (revised from Özgül, 2006 and Ötaz, 2008).

Üçüncü simülasyonda, birinci simülasyonda olduğu gibi su seviyesini 1981 yılındakinden 1960 yılındaki seviyeye getirebilmek için kuyularda yapılan su basımı işlemi sırasında, doğal beslenme ihmal edilerek beslenmenin ne derece etkili olduğu ortaya konulmuştur. Doğal beslenimin, yeraltı suyu seviyesini sadece 0.0007 metre gibi önemsenmeyecek kadar küçük bir miktar değiştirdiği belirlenmiştir. Burada 1960'lı yıllara kadar ne kadar sürede depolandığı bilinmeyen yeraltı suyunda 50 yılda oluşturulan $41 \cdot 10^6$ m³ eksilmeye, yıllık beslenme miktarı kıyaslanmıştır. Doğal olarak etkisi ihmal edilecek kadar az olacaktır.

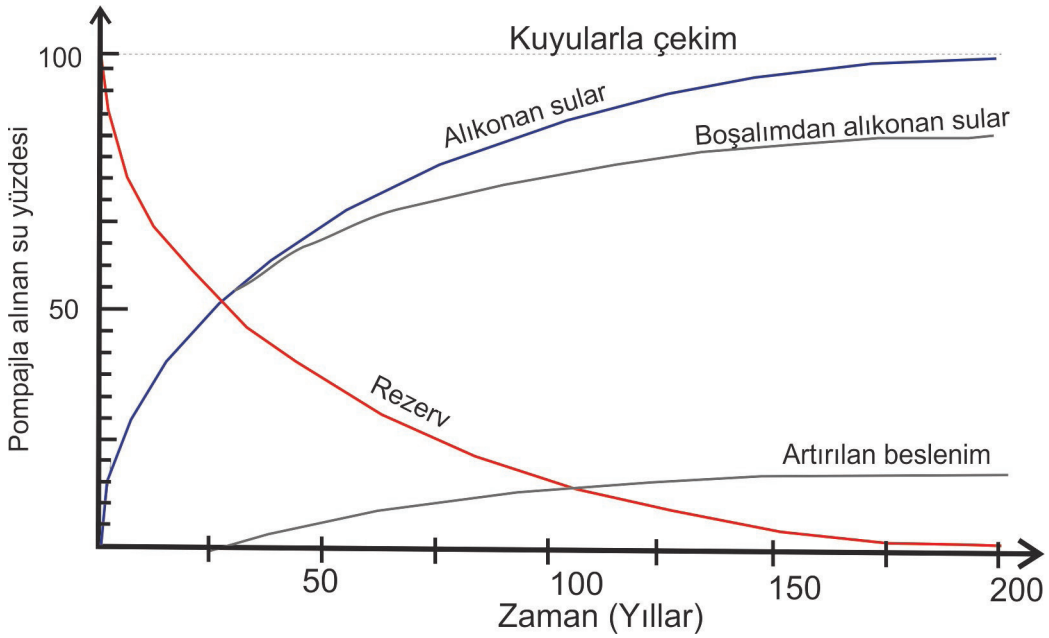
DEĞERLENDİRMELER

Theis (1940) öncesinde toplumsal bilince yerleşen “beslenimin ve boşalmanın dengede olduğu ve doğal beslenme kadar ya da doğal beslenimin %70'i kadar pompaj yapıldığı zaman doğal dengenin korunacağı” yaklaşımı hatalıdır. Pompajla çekilen su mutlaka bir yerlerden eksilmeye karşılık gelecektir. Pompaj suyunun kaynağı, (1) yeraltı suyu sistemine giren daha fazla su (artan beslenme), (2) sistemden çıkan suyun alıkonması (boşalmanın azalması), (3) sistemde depolanan suyun tüketilmesi veya bu üçünün birleşimidir (Theis, 1940; Lohman vd.,

1972; Alley vd., 1999; Bredehoeft vd., 1982; Galloway vd., 2001; Yazıcıgil, 2006; Henriksen ve Refsgaard, 2013).

Beslenimi dikkate almayı sadece boşalımı dikkate alan yaklaşım da benzer şekilde eksiktir. Baz akışı yani yeraltı suyu boşalımı yüksek olan havzalarda boşalım, beslenimden çok daha fazla olmaktadır. Yıllık beslenimler, çok uzun yıllarda depolanan sularla kıyaslandığında önemsiz görülebilir. Nitekim Devlin ve Sophocleous (2005), sürdürülebilir pompajla sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimini birbirinden ayırarak beslenimin sürdürülebilirliğin bir fonksiyonu olduğunu ve sürdürülebilir pompaj oranlarının beslenim bilinmeden tahmin edilebileceği

gerçeğine rağmen sürdürülebilir yeraltı suyu yönetiminde beslenimin önemli olduğunu göstermişlerdir. Doğal koşullar altında, yeraltı suyu sistemleri uzun vadeli ortalama beslenimin uzun vadeli ortalama boşalıma eşit olduğu dinamik denge koşullarına sahiptir. Bir akiferden yeraltı suyunun pompalanması her zaman yeraltı suyu seviyesinin azalmasına neden olacaktır (Sophocleous, 2000). Bu, suların besleniminin artırılmasını ve boşalımdan alıkonmasını sağlayacaktır. Pompalama oranı alıkonan suların daha büyük olduğunda, yeraltı su seviyeleri sürekli olarak düşecek ve yeraltı suyu eninde sonunda tükenecektir (Aeschbach-Hertig ve Gleeson, 2012).



Şekil 4. Doğal şartlarda bir akiferden yeraltı suyu çekimi başladığında ne olur? (Bjerre, 2012; Henriksen ve Refsgaard, 2013).

Figure 4. What happens when groundwater is abstracted under natural conditions? (Bjerre, 2012; Henriksen and Refsgaard, 2013).

Şekil 4'te "alikonan suların" önemi gösterilmektedir. $t = 0$ anında sabit bir yeraltı suyu çekimi başlatılır. Bu, akiferin var olan dengesini etkiler. Yeraltı suyu beslenimi zamanla artar. Boşalma (nehir akışı) azalır. Yeraltı suyu rezervi azalır. Başlangıç döneminde, çekim rezervi azaltır, ancak daha sonra yeni denge oluşur. Belli bir aşamada beslenme artışı ve boşalımdan alikonan sularla rezervden tüketim durabilir.

Bazı akiferlerde alikonan sularla dengeli akım koşulları kısa sürede gerçekleşirken, bazılarında dengeli akım koşulları sağlanıncaya kadar tükenmektedir. Rezervden tüketilen suların geri dönüşümü çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

Yeraltı su seviyesi yükselmelerinin taşkınlara önemli etkisi olmaktadır (Galloway ve Ingebritsen, 2001; Demiroglu, 2016). Komşu havzalardan büyük miktarlarda su getirilen İstanbul'un önemli akiferlerinde su bütçesi değişiklikleri takip edilmemektedir. Yeraltı sularının sel felaketlerine etkisi değerlendirilmemektedir. Ayamama Deresi ıslah çalışmaları Ayamama Deresi ile yeraltı suyu ilişkisi belirlenmeden tamamlanmıştır.

Yeraltı suyu seviye düşümleri açısından bakıldığında boşalımdan alikonan sular, derelerin, kaynakların kurumasına, kıyı ekosistemlerinin ve sulak alanların kaybedilmesine neden olabilmektedir. Bugünkü çekim miktarlarının etkilerinin uzun vadede ne olacağının hesaplanması gerekmektedir.

Dumlu (2005), emniyetli çekimin su kalitesini bozmadan en uygun düşümle bir dinamik seviye belirlenmesi olduğunu ifade etmiştir. Bu seviyenin, yağışın uzun yıllar ortalamasına eşit olduğu bir sürenin sonunda değişmemesi durumunda, emniyetli çekim olarak dikkate alınabileceğini savunmuştur. Emniyetli

çekimin, her akifer için o akiferin hidrodinamik özelliklerine göre, uzun süreli gözlemler sonucu belirlenebileceğini vurgulamıştır.

SONUÇLAR

Sürdürülebilir yeraltı suları çekiminde kuyu yerleri boşalımdan alikonan ve beslenme artışlarını dikkate alan yaklaşımla seçilmeli, her sene çekilen yeraltı suyu miktarıyla yıllık beslenme ve boşalma miktarı arasında uzun süreli bir denge kurulmalıdır. Yeraltı suyu kullanımında emniyetli çekim, her akifer için ayrı hidrodinamik özelliklere göre belirlenmelidir.

Yeraltı su seviyesi düşümlerinin ve yükselmelerinin olası olumsuz etkileri (Tuzlu su dalımı, çökmeler, sellenme ve sanat yapılarına etkileri, vb), su kalitesindeki değişimler ve boşalımdan alikonan suların uzun vadede çevreye etkileri modelleme çalışmalarıyla değerlendirilmelidir. Yeraltı suları izleme programları ve ağları ile model sonuçları takip edilmelidir. Bu değişimlere bağlı olarak emniyetli çekim miktarları güncellenmelidir.

KATKI BELİRTME

Yazar, bu makalenin hazırlanmasına ve düzeltilmesine katkıda bulunan Doç. Dr. H. Tolga Yalçın'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Aeschback-Hertig, W., Gleeson, T., 2012. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. *Nature Geoscience*, 5 (12), 853-861.
- Aksever (Seyman), F., 2012. Yeraltı suyu bilançosu nedir?, *SDUGEO* ISSN 1309-6656, 3/1, s. 37-43. (Online: www.geo.sdu.edu.tr).

- Alley, W. M., Reilly T. E., Franke O. L., 1999. Sustainability of ground-water resources. U.S. Geological Survey Circular 1186. Reston, Virginia: USGS. (on line:<http://pubs.usgs.gov/circ/circ1186>)
- Alley, W. M., Leake S. A., 2004. The journey from safe yield to sustainability. *Ground Water*, 42 (1), 12-16.
- Bjerre, T. K., 2012. Bæredygtig vandindvinding – hvad er det? ATV vintermøde.
- Bredehoeft, J. D., Papadopoulos S. S., Cooper H. H., 1982. Groundwater: The water-budget myth. In *Scientific Basis of Water-Resource Management*. 51–57. Washington, DC: National Academy. (Online: http://aquadoc.typepad.com/waterwired/files/water_budget_myth_bredehoeft_et_al..pdf)
- Bredehoeft, J. D., 1997. Safe yield and the water budget myth. *Ground Water*, 35 (6), 929.
- Bredehoeft, J. D., 2002. The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model. *Ground Water* 40 (4), 340-5.
- Bredehoeft J., Durbin T., 2009. Ground water development-the time to full capture problem. *Groundwater*, 47 (4), 506–514.
- Demiroğlu, M., Orgun, Y., Yaltırak, C., 2011. Hydrogeology and hydrogeochemistry of Gunyuzu semi-arid basin. *Environmental Earth Sciences*, 64 (5), 1433-1443.
- Demiroğlu, M., 2016. Classification of karst springs for flash-flood-prone areas in western Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 1473-1486.
- Devlin, J. F., Sophocleous, M., 2005. The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. *Hydrogeology Journal*, 13 (4), 549-554.
- Dumlu, O., 2005. Hidrojeolojide tartışılmalı konular ve görüşler (1. Baskı). Maden Mühendisleri Odası, İstanbul, 124 s.
- Eris, E., Wittenberg, H., 2015. Estimation of baseflow and water transfer in karst catchments in Mediterranean Turkey by nonlinear recession analysis. *Journal of Hydrology*, 530, 500-507.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 604 p.
- Galloway, D., Jones D. R., Ingebritsen, S. E., 2001. Land subsidence in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1182, Denver, Colorado, 175 p. (<http://pubs.usgs.gov/circ/circ1182>).
- Henriksen, H. J., Refsgaard, J. C., 2013. Sustainable groundwater abstraction, review report file:///E:/Recharge%20ve%20emniyetli%20verim/denmark%20report_2013_30.pdf).
- Korzoun, V. I., Sokolov, A. A., Budyko, M. I., Voskresensky, K. P., Kalinin, G. P., 1978. World water balance and water resources of the earth. *Studies and Reports in Hydrology (UNESCO)*, no. 25 / United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 75. Paris (France); International Hydrological Decade, Moscow (USSR). USSR National Committee , 1978 , 663 p.
- Lee C. H., 1915. The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 78, 148–151.
- L'vovich, M. I., 1979. World water resources and their future. Translation of the original Russian edition (1974), American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Lohman, S.W., Bennett, R. R., Brown, R. H., Cooper, H. H., Drescher, W. J., Ferris, J. G., Johnson, A. I., McGuinness, C. L., Piper, A. M., Rorabaugh, M. I., Stallman, R. W., Theis, C.V., 1972. Definitions of selected ground-water terms—Revisions and conceptual refinements. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1988. Reston, Virginia: USGS
- Muller, D. A., Price, R. D., 1979. Ground-water availability in Texas, estimates and projections through 2030: Texas Department of Water Resources Report 238, 77 p.
- Özgül, N., 2006. İstanbul Jeolojisi. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Planlama ve İmar Dairesi Başkanlığı Şehir Planlama Müdürlüğü, İstanbul

- Büyükşehir Nazım İmar Planı Analitik Etüdlere İş, 98 s, İstanbul, (Yayınlanmamış Proje).
- Öztaş, T., 2008. İstanbul'un su politikası sempozyumu, Bildiriler Kitabı, İstanbul, 78-106.
- Ponce, V. M., Pandey R. P., Ercan, S., 2000. Characterization of drought across climatic spectrum. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 5/2 222-224.
- Sophocleous, M., 2000. From safe yield to sustainable development of water resources – The Kansas experience. *Journal of Hydrology*, 235 (1-2), 27-43.
- T.C. Resmi Gazete, 2014. Yüzeysel suları ve yeraltı sularının izlenmesine dair yönetmelik, 28910.
- Tezcan, L., 1993. Karst akifer sistemlerinin trityum izotopu yardımıyla matematiksel modellenmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Doktora Tezi 121 s.
- Tezcan, L., 2002. New isotopes and their uses in hydrological studies. 1. Symposium on the use of isotope techniques in national hydrology, Adana.
- Theis, C. V., 1940. The source of water derived from wells—Essential factors controlling the response of an aquifer to development. *Civil Engineering*, 10, 277–280.
- Todd, D. K. 1959. *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 336 p.
- Tufan, S., 2007. Bakırköy Havzasının bilgisayar ortamında modellenmesi, İTÜ, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, Maslak 90 s.
- Voss, C. I., 2011. Editor's message: Groundwater modeling fantasies —part 1, adrift in the details. *Hydrogeology Journal*, 19, 1281–128.
- Yazıcıgil, H., 2006. Sürdürülebilir ve Emniyetli Akifer Verimleri. 59. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, 101-103.
- Zhou, Y., 2009. A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*, 370, 207–213.

YAYIN AMAÇLARI VE KURALLARI, YAYINA KABUL İLKELERİ

AMAÇ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

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

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

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

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

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

KAPSAM VE NİTELİK

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

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

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

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

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

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

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

YAZILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAYINA KABUL İLKELERİ

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

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

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

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

YAZIM DİLİ

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

YAZIM KURALLARI

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

Metin Bölümü

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

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

ÖZ

ABSTRACT

GİRİŞ

ANA BAŞLIK

Birinci Derece Alt Başlık

İkinci derece alt başlık

Üçüncü derece alt başlık

TARTIŞMALAR

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KATKI BELİRTME

KAYNAKLAR

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

Kaynaklar

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

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

Sürelili yayınlar ve bildiriler

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

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

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

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

Kitaplar

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

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

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

Raporlar ve Tezler

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

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

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

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

Eşitlikler ve Formüller

- a) Eşitlikler elle yazılmamalı ve bilgisayardan yararlanılmalıdır. Eşitliklerde, yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelere yer verilmesine özen gösterilmelidir.
- b) Her eşitliğe sırayla numara verilmeli, numaralar parantez içinde eşitliğin hizasında ve sayfanın sağ kenarında belirtilmelidir.
- c) Eşitliklerde kullanılacak alt ve üst indisler belirgin şekilde ve daha küçük karakterlerle yazılmalıdır (I_4 , x^2 gibi).
- d) Eşitliklerdeki sembollerin açıklamaları eşitliğin hemen altındaki ilk paragrafta verilmelidir.
- e) Karekök işareti yerine parantezle birlikte üst indis olarak 0.5 kullanılmalıdır ($\sigma_{\text{maks}} = \sigma_c^{0.5}$ gibi).

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

Çizelgeler

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

Şekiller (Çizim, fotoğraf ve levhalar)

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

Ek Açıklamalar ve Dipnotlar

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

YAZILARIN GÖNDERİLMESİ

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

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

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ EDITÖRLÜĞÜ TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası

Hatay Sokak No: 21 Kocatepe/Ankara

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

Faks : (312) 434 23 88

E-posta : topal@metu.edu.tr

AYRI BASKILAR

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

