

JEOLUJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 37

Sayı - Number 1

ISSN 1016 - 9172

Haziran / June 2013



TMMOB JEOLUJİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey

EDİTÖR / EDITOR

Tamer TOPAL

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06800, Ankara

Tel : 0 312 210 26 90

Faks : 0 312 210 57 50

E-Posta : topal@metu.edu.tr

TEKNİK EDİTÖR / TECHNICAL EDITOR

Yavuz KAYA

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü**Makale Gönderim Adresi:**

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası

PK. 464 Yenışehir, 06410 Ankara

Tel : (0312) 434 36 01

Faks : (0312) 434 23 88

E-Posta : jmo@jmo.org.tr

URL : www.jmo.org.tr

Yayın Türü: Yaygın Süreli Yayın**Yayın Şekli:** 4 Aylık Türkçe-İngilizce**Yayın Sahibi:** TMMOB JMO Adına

Dündar ÇAĞLAN

Yayının İdare Adresi: Kocatepe Mah.

Hatay 2 Sokak No: 21 Kocatepe/Ankara

Baskı: Afşaroğlu Matbaası,

Kazım Karabekir Cad. Altıntop İşhanı

No:87/7 İskitler/Ankara

Tel : (0312) 384 54 88

Baskı Tarihi : Haziran 2013

Baskı Adedi : 2000

Yayın Kurulu / Editorial Board

Erhan ALTUNEL (Osman Gazi Üniversitesi)

Can AYDAY (Anadolu Üniversitesi)

Serdar BAYARI (Hacettepe Üniversitesi)

Zeki ÇAMUR (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)

Vedat DOYURAN (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Mehmet EKMEKÇİ (Hacettepe Üniversitesi)

Nusret EMEKLİ (İller Bankası)

Yavuz ERGİNTAV (Karayolları Genel Müdürlüğü)

Candan GÖKÇEOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)

Reyhan Kara GÜLBAY (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Nilgün GÜLEÇ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Fikret KAÇAROĞLU (Muğla Üniversitesi)

Remzi KARAGÜZEL (İstanbul Teknik Üniversitesi)

Nurcan KARAHANOĞLU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Muazzez Çelik KARAKAYA (Selçuk Üniversitesi)

K. Erçin KASAPOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)

Recep KILIÇ (Ankara Üniversitesi)

Mehmet Yalçın KOCA (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Ayhan KOÇBAY (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü)

Halil KUMSAR (Pamukkale Üniversitesi)

İlkay KUŞÇU (Muğla Üniversitesi)

Mahmut MUTLUTÜRK (Süleyman Demirel Üniversitesi)

Cengiz SOYLU (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı)

Mehmet Lütfi SÜZEN (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Şakir ŞİMŞEK (Hacettepe Üniversitesi)

Atiye TUĞRUL (İstanbul Üniversitesi)

Necdet TÜRK (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Asuman TÜRK MENOĞLU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Taner ÜNLÜ (Ankara Üniversitesi)

Nami YALÇIN (İstanbul Üniversitesi)

Ali Bahadır YAVUZ (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Hasan YAZICIĞİL (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Işık YILMAZ (Cumhuriyet Üniversitesi)

Erdoğan YÜZER (İstanbul Teknik Üniversitesi)

Jeoloji Mühendisliği Dergisi makale ve dizin özleri

SCOPUS, ULAKBİM, GeoREF, Geobase/Geo Abstracts ve EBSCO
uluslararası indeksleri tarafından taranmaktadır.*Journal of Geological Engineering is indexed and abstracted by***SCOPUS, ULAKBİM, GeoREF, Geobase/Geo Abstracts and EBSCO****Jeoloji Mühendisleri Odası**
Chamber of Geological Engineers
Yönetim Kurulu / Executive Board

DÜNDAR ÇAĞLAN

HÜSEYİN ALAN

HALİL İBRAHİM YİĞİT

FARUK İLGÜN

ARZU ÇAĞLAYAN

ÖZCAN DUMANLILAR

ÜMİT UZUNHASANOĞLU

Başkan / President

İkinci Başkan / Vice President

Sayman / Treasurer

Yazman / Secretary

Mesleki Uygulamalar Üyesi / Member of Professional Activities

Yayın Üyesi / Member of Publication

Sosyal İlişkiler Üyesi / Member of Social Affairs

Jeoloji Mühendisliği Dergisi JMO yayını olup para ile satılmaz.

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

-
- 1- **Tülay EKEMEN KESKİN, Sonay TOPTAŞ, Filiz ERSÖZ**
Kurşunlu Maden Alanı Çevresindeki Yeraltısularında Asit Kaya Drenajı ve İz Element Kirliliği
Acid Rock Drainage, and Trace Element Pollution in Groundwater in Surrounding of Kurşunlu Mine Area
- 27- **Kadir KARAMAN**
Kaya Şev Duraylılığının Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi (Ünye, Ordu)
Evaluation of Rock Slope Stability by Different Methods (Ünye, Ordu)
- 49- **Nihat DİPOVA, Bülent CANGİR**
Doğal Zeminlerin ve Yapay Dolguların Plaka Yükleme Deneyi ile İncelenmesi
Investigation of the Natural Soils and Artificial Fills Using Plate Load Test
- 63- **Serhan HANER, Dilek ÇUHADAROĞLU**
Vollastonit: Bir Gözden Geçirme
Wollastonite: A Review

Kurşunlu Maden Alanı Çevresindeki Yeraltısularında Asit Kaya Drenajı ve İz Element Kirliliği

Acid Rock Drainage, and Trace Element Pollution in Groundwater in Surrounding of Kurşunlu Mine Area

Tülay EKEMEN KESKİN¹, Sonay TOPTAŞ², Filiz ERSÖZ³

¹ Karabük Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, KARABÜK

² Limit Teknik Araştırma, Proje Uygulama Müşavirlik Sanayi ve Ticaret A.Ş., ANKARA

³ Karabük Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, KARABÜK

Geliş (received) : 9 Ekim (October) 2012

Düzeltilme (revised) : 7 Ocak (January) 2013

Kabul (accepted) : 15 Ocak (January) 2013

ÖZ

Asit maden drenajı, pirit gibi sülfürlü minerallerin su ve oksijen ile reaksiyonu sonucunda meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda sular asidikleşmekte ve önemli su kirliliği problemleri açığa çıkmaktadır. Ortakent (Koyulhisar) çevresini kapsayan çalışma alanında, işletilmekte olan Pb-Zn-Cu maden yatakları bulunmaktadır. Yeraltısuyunun kimyasal bileşimini kontrol eden mineral-su reaksiyon proseslerini saptamak amacıyla uygulanan korelasyon, faktör ve kümeleme analizleri, sülfürlü cevherleşmeye sahip volkanik kayaların yeraltısuyuna etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Sülfür minerallerinin oksidasyonu sonucu bölgedeki sular asidik karakter kazanmakta ve yüksek oranda SO₄ ve Fe içermektedir. Asidikleşme, bazı iz elementlerin (Al, Fe, Mn Pb, Zn) sulara zenginleşmesine sebep olmaktadır. Çalışma alanındaki asidik suların Al, Fe ve Mn konsantrasyonları, Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standartları'ndaki (Sağlık Bakanlığı, 2005) sınır değerini birkaç kat aşmaktadır. Ayrıca bazı kaynakların SO₄ ve Pb içerikleri, içme suyu standart değerini aşmaktadır. Aktif olan madencilik faaliyetlerinin katı ve sıvı atıkları, sulara iz element kirliliğine sebep olmaktadır. Jeokimyasal veriler, asidik sulardaki ağır toksik metallerin çoğunlukla serbest metal ve metal-sülfat formunda olduklarını göstermektedir. Bu veriler ışığında, çalışma alanındaki yüksek düzeyde iz element kirliliği içeren yeraltısuları ve yüzeysularının insan, hayvan ve bitki sağlığı açısından oldukça yüksek risk içerdikleri anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Asit maden drenajı, Faktör ve kümeleme analizi, Korelasyon, Koyulhisar, Sülfürlü cevherleşme, Yeraltısuyu kirliliği.

T. Ekemen Keskin

E-Posta: tulayekemen@karabuk.edu.tr

ABSTRACT

Acid mine drainage occurs as a result of reactions with water and sulphide minerals such as pyrite. As a result of these reactions water gains acidic properties and significant water pollution problems could rise. The study area located in Ortakent (Koyulhisar) has an active Pb-Zn-Cu mining site. The correlation and factor analyses applied to determine mineral-water reactions controlling the chemical composition of groundwater clearly show effects of sulphide mineral bearing volcanic rocks. Sulfide minerals produce acid and groundwater contains high concentrations of SO_4 and Fe. Low pH values are also responsible for dissolved metals (Al, Fe, Mn SO_4 , Pb, Zn) in the groundwater and river. Al, Fe and Mn concentrations in the acidic waters in the study area exceed the limits of Ministry of Health-2005 Standard. In addition, several springs have SO_4 and Pb concentrations higher than the limits of drinking water standards. Solid and liquid mine wastes contribute on the trace element contamination of water as well. Geochemical modelling showed that mostly heavy toxic metals in the acidic waters may exist largely in the form of free metal and metal-sulphate. It is understood that the trace elements contained in the groundwater and river could introduce high risks to human, animals and plants.

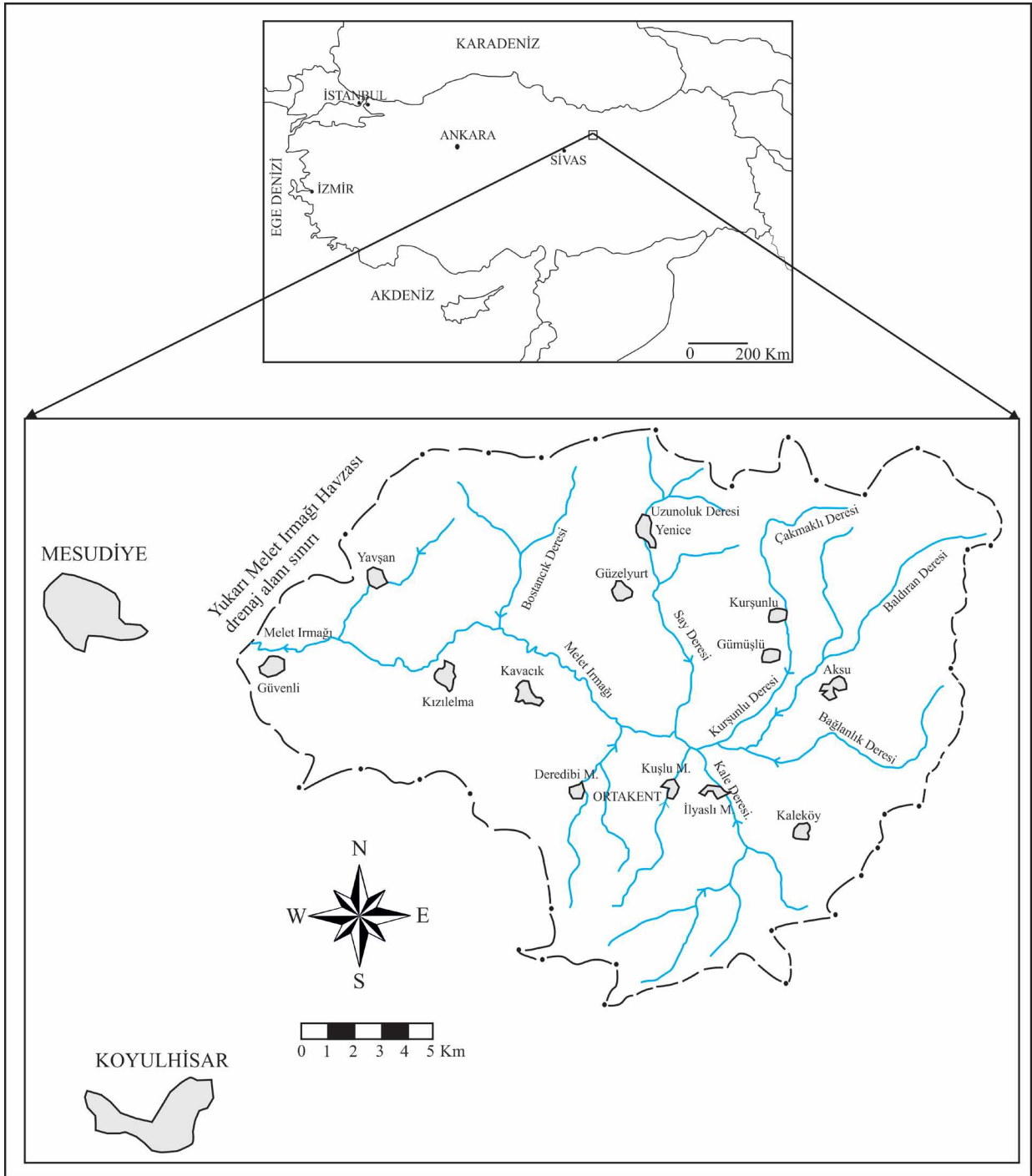
Key Words: *Acid mine drainage, Factor and cluster analysis, Correlation, Koyulhisar, Sulfide mineralization, Groundwater pollution.*

GİRİŞ

Asit maden/kaya drenajı, insan sağlığı açısından su kalitesini etkileyen oldukça önemli bir konudur. Asit maden/kaya drenajı sırasında sular asidikleşmekte ve bu asidikleşmeye bağlı olarak çeşitli elementlerin çözünürlüğü ve konsantrasyonları artmaktadır. Su-kayaç etkileşimlerinin jeokimyası, jeolojik ortama bağlıdır. Örneğin, masif sülfür yatakları ve çıkan maden atıkları, akım yolları boyunca çevreyi etkileyebilir. Piritin oksidasyonu, gang silikat ve karbonat minerallerinden ve diğer sülfür minerallerinden metallerin çözünürlüğünü artıran yüksek asidik koşullar üretebilir. Asit ve metal birlikteliği, yüzey ve yeraltısuyu kalitesini ve ilişkili olan sulu ekosistem ve içme suyu teminini olumsuz yönde etkilemektedir (Gündüz vd., 2007; Gündüz ve Baba, 2008; Seal vd., 2008; Baba ve Gündüz, 2010). Özellikle

bazı elementler (Al, Be, Pb, Cd, Fe, ve Mn) asidik koşullar altında tercihli olarak hareketli olmakta ve asidik sulara problemleri durumlar oluşturabilmektedirler (Smedley vd., 1996; Karakaya vd., 2007).

Çalışma alanı Sivas ilinin yaklaşık 220 km kuzeybatısında, Doğu Karadeniz Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi sınırında yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma alanındaki mineralleşme Üst Kretase andezitik ve dasidik volkanik ve volkanosedimanter kayaçları kesen faylar boyunca yer almaktadır. Kurşunlu (Ortakent-Koyulhisar-Sivas) Pb-Zn-Cu yatakları Kuzey Pontid Tektonik Birimleri'nin güney ve batı parçaları üzerinde geniş alanlarda gözlenen damar tipi cevherleşmelerin tipik örnekleridir. Cevher mineralleri olarak, galen (PbS), sfalarit (ZnS), pirit (FeS_2), kalkopirit ($CuFeS_2$), kalkosit (Cu_2S) ve hematit (Fe_2O_3) bulunmakta, gang



Şekil 1. Çalışma alanı ve çevresinin konum haritası.

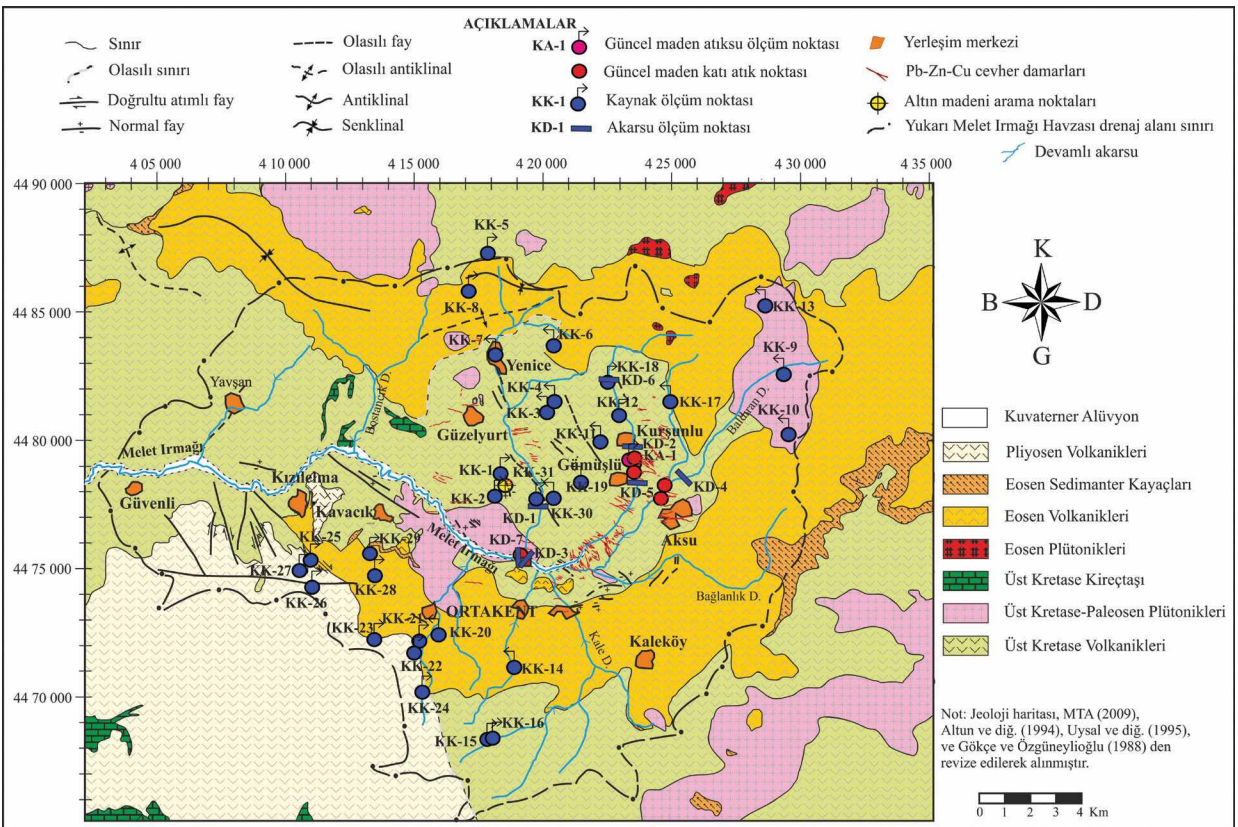
Figure 1. Location map of the study area and its vicinity.

Ekemen Keskin, Toptaş, Ersöz

mineralleri olarak ise kuvars (SiO_2), kalsit (CaCO_3) ve yer yer barit (BaSO_4) mineralleri bulunmaktadır (Gökçe ve Özgünyelioğlu, 1988). Kurşunlu, Gümüşlü ve Aksu köyleri çevrelerinde yoğun madencilik aktiviteleri gerçekleştirilmekte ve sıvı ve katı madencilik atıkları bu köyler çevresindeki akarsulara ve akarsu çevrelerine boşaltılmaktadır. Ayrıca çalışma alanında altın araştırmaları yapılmaktadır (Şekil 2).

Bu çalışmanın amacı, Pb-Zn-Cu maden yatakları çevresindeki su-kayaç etkileşiminden ve madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan

yeraltı ve yüzeysularında major ve iz element kirliliklerinin boyutlarını saptamaktır. Bu kapsamda, çalışma alanı çevresindeki yeraltı ve yüzey sularında yerinde pH, sıcaklık, özgül elektriksel iletkenlik (ÖEİ), redox potansiyeli (RP) vb. ölçümler yapılmış, ayrıca major ve iz element konsantrasyonlarını saptamak amacıyla su örnekleri alınmıştır. Çalışma alanında Pb-Zn-Cu maden yatakları ile ilişkili sülfidik cevherleşmeler bulunmaktadır. Bu cevherleşmeler içerisindeki özellikle piritin yüzeyden süzülen oksijence zengin yeraltısularınca oksitlenmesi sonucu (örn;



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Jeoloji haritası Gökçe ve Özgünyelioğlu (1988), Altun vd., (1994), Uysal vd., (1995) ve MTA (2009)'dan bazı yerleri revize edilerek alınmıştır).

Figure 2. Geological map of the study area and its vicinity (The geological map is taken from Gökçe and Özgünyelioğlu (1988), Altun et al. (1994), Uysal et al. (1995) and MTA (2009) with revision).

$2\text{FeS}_2(\text{s}) + 7\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq})$ pH düşerek sular asidikleşmekte ve sulara metalik elementler geçmektedir.

JEOLJİK BİRİMLER

Bu çalışmada kullanılan 1:100.000 ölçekli jeoloji haritası, Gökçe ve Özgüneylioğlu (1988), Altun vd., (1994), Uysal vd., (1995) ve MTA (2009)'un jeoloji haritalarının yeniden düzenlenmesi yoluyla oluşturulmuştur. Bölgenin temelini, çalışma alanında mostra vermeyen Permiyen yaşlı metamorfikler oluşturmaktadır. Metamorfikler, Jura ve Alt Kretase yaşlı volkanikler, volkano-sedimanterler, kireçtaşı ve ofiyolitler tarafından üzerlenmektedir. Bu örtü birimleri de çalışma alanında mostra vermemektedir. Çalışma alanında gözlenen en yaşlı birim, Üst Kretase yaşlı volkaniklerdir. Bu birim içerisinde cevherleşmeler gözlenmektedir. Birim, Üst Kretase-Paleosen yaşlı plütonik kayalar tarafından kesilmektedir. Bu birim, Eosen yaşlı plütonik, volkanik ve sedimanter kayalar tarafından örtülmektedir. Bu kayalar üzerine ise Pliyosen yaşlı volkanikler ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar gelmektedir (Gökçe ve Özgüneylioğlu, 1988; Altun vd., 1994; Uysal vd., 1995; MTA, 2009) (Şekil 2).

ÇALIŞMA VE DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Ortakent ve çevresinin hidrojeokimyasını konu alan araştırmanın arazi çalışmaları kurak ve yağışlı dönemleri kapsayacak şekilde, Temmuz 2009 tarihinde başlamış olup Mayıs 2010 tarihinde tamamlanmıştır. Arazi çalışması sırasında çalışma alanındaki 31 kaynak, 7 akarsu ve 1 maden atıksu noktasından yerinde

debi, özgül elektriksel iletkenlik (ÖEI), toplam çözünmüş madde miktarı (TÇM), pH, redoks potansiyeli (RP (Eh)) ve sıcaklık ölçümleri yapılmış ve major iyon, iz element ve radyoaktivite analizleri için su örnekleri polietilen şişelere alınmıştır. ÖEI ve pH ölçüm cihazı araziye çıkmadan önce kalibre edilmiştir. ÖEI kalibrasyonu için 0.01 M (1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ve 0.1 M (12.88 mS/cm) derişimli KCl çözeltileri, pH kalibrasyonu için ise 7 ve 10 değerli tampon çözeltileri kullanılmıştır. Eh ölçümleri gümüş-gümüş klorür referans çözeltisi kullanılarak platin elektrodu ile yapılmış olup, RP doğruluğu periyodik olarak arazide 475 mV değerine sahip kontrol çözeltisi ile kontrol edilmiştir. Ayrıca RP değerleri, sıcaklığa bağlı olarak Consort ölçüm cihazının katalogunda belirtildiği gibi 208-220 mV eklenerek Eh'a dönüştürülmüştür. İz element analizleri için su örnekleri 0.45 μm selüloz filtre ile filtrelendikten sonra % 65'lik nitrik asit çözeltisi ile pH'ları 2.0'ın altına düşürülmüştür. Tüm analizler için su örnekleri analizlerden önce + 4 °C sıcaklıktaki buzdolabında saklanmıştır. Major anyon ve katyon analizleri Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Su Kimyası Laboatuvarı'nda iyon kromatografi cihazı kullanarak ve Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Su Kimyası Laboatuvarı'nda, yüksek performanslı iyon kromatografi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İz element analizleri endüktif eşlenik plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) kullanılarak ACME Laboratuvarı'nda (Kanada) yaptırılmıştır. Radyoaktivite analizleri ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır. SiO_2 değerleri ACME Laboratuvarı'nda yaptırılan

Si elementinden dönüştürülerek bulunmuş ve doygunluk analizleri için kullanılan PhreeqCi programına SiO₂ olarak girilmiştir. Çalışma alanındaki kaynakların major ve iz element analizlerinin doğruluğunu/güvenilirliğini test etmek için tüm analizlerde, bazı su örneklerinde dublike ölçümler yapılmıştır. Ayrıca major iyon konsantrasyonları dikkate alınarak % elektronötralite/analitik hata (Appelo ve Postma, 1996) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 1). Çizelgede özellikle Üst Kretase volkaniklerinden boşalan kaynakların analitik hata değerleri % 5'ten yüksek gözükmemektedir. Bu durum, suların asidikliğinden kaynaklanmaktadır. Al, Fe, H vb. konsantrasyonları (Appelo ve Postma, 1996) dikkate alınarak hesaplama yapıldığında analitik hatalar % 5'in altına düşmektedir. Suların fiziksel ve kimyasal bileşimleri yardımıyla, ilgili diyagram ve grafikler kullanılarak çeşitli özellikleri saptanmış ve ayrıca Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standartları (Sağlık Bakanlığı, 2005) ve 29 Nisan 2005'te yeniden düzenlenen Dünya Sağlık Örgütü Standartları (WHO, 2006) ile karşılaştırılarak içme suyu için uygun olup olmadıkları saptanmıştır.

SU KİMYASI VE KİRLİLİĞİ

Çalışma alanında akifer özelliği gösteren birimler Üst Kretase volkanikleri, Üst Kretase-Paleosen plütonikleri, Eosen ve Pliyosen volkanikleridir. Üst Kretase volkanikleri yoğun kırıklı-çatlaklı, altere olmuş bazalt, andezit, dasit ve volkanoklastik kayaçlardan oluşmaktadır. Çalışma alanındaki kaynaklar boşaldıkları jeolojik birimlere göre fiziksel ve kimyasal açıdan birçok farklılık göstermektedir (Keskin ve Toptaş, 2012). Suların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Cevher mineralleri içeren Üst Kretase volkaniklerinden boşalan kaynaklar (KK-1, KK-2, KK-11, KK-12, KK-18, KK-19, KK-30, KK-31) asidik karakter göstermekte, yağışlı ve kurak dönemde pH değerleri 3.34 ile 4.8 arasında değişmektedir. Bu değerler Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standartları (Sağlık Bakanlığı, 2005)'te, gösterge parametreleri için verilen alt sınır değerinin (6.5) oldukça altında kalmaktadır.

Bu kaynakların özgül elektriksel iletkenlikleri (ÖEİ) ve yükseltgenme-indirgenme potansiyeli (Eh) değerleri sırasıyla 35 μ S/cm - 668 μ S/cm; ve 421 mV - 694 mV arasında değişmektedir. KK-3, KK-4 ve KK-7 kaynakları da Üst Kretase volkaniklerinden boşalmaktadır. Bununla birlikte, pH değerleri diğer Üst Kretase volkaniklerinden boşalan kaynakların pH değerlerinden bir miktar daha yüksektir. KK-3 ve KK-4 kaynaklarının yüksek kotlardan boşalmaktadır. Bu nedenle, büyük olasılıkla çok sığ sirkülasyona sahiptirler., Bu duruma bağlı olarak cevherleşmeler ile çok fazla etkileşime girememiş olmalarından dolayı bir miktar yüksek pH değerlerine sahip olabilecekleri düşünülmektedir. KK-7 çeşmesinin ise iki ayrı kaynağın karışımından oluşması ve cevherleşmeler ile etkileşimlerinin az olması bir miktar yüksek pH değerleri açıklayabilir. Akarsular ve diğer jeolojik formasyonlardan boşalan sular genellikle alkalın karakterde olup, bu suların ÖEİ değerleri 18 μ S/cm ve 204 μ S/cm arasında değişmektedir.

Yeraltısuları ve yüzey sularının fiziksel, kimyasal ve biyolojik açıdan uygunlukları canlılar için büyük önem taşımaktadır. İçme sularında özellikle ağır metallerin miktarları oldukça önemli olup, bazı metallerin küçük miktarları bile insan sağlığını olumsuz yönde

Çizelge 1. Çalışma alanındaki suların fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Table 1. The physical and chemical characteristics of the waters in the study.

Kaynak- No	Kot (m)	Boyam	Enlem	Önekleme Tarihi	Q _{EL} (m ³ /s)	T.C.M (mg/L)	pH	Eh (mV)	Sıcaklık (°C)	Debi (L/s)	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Anahtık Hata	mg/L SiO ₂
KK-1	1889	418340	4478704	27.07.2009	53	28	4.80	588	10.1	1.7	0.07	0.03	0.08	0.18	0.20	0.02	0.01	0.28	-17.24	8.67
"	1745	417368	4480419	23.04.2010	36	19	5.48	480	5.2	1.5	0.01	0.01	0.07	0.14	0.09	0.02	0.03	0.14	-9.80	7.06
KK-2	1952	418187	4477725	27.07.2009	151	80	3.84	694	8.6	0.2	0.06	0.05	0.06	0.18	0.15	0.02	<0.01	0.67	-41.42	16.37
"	"	"	"	24.04.2010	141	74	3.74	670	6.7	0.4	0.05	0.02	0.06	0.14	<0.01	0.02	<0.01	0.60	-40.00	13.96
KK-3	1991	420185	4481005	27.07.2009	30	17	6.73	350	15.4	3.2	0.05	0.03	0.06	0.14	0.15	0.01	<0.01	0.14	-4.27	8.04
"	"	"	"	23.04.2010	17	9	7.18	375	4.2	60.0	0.02	0.01	0.05	0.10	0.10	0.01	0.01	0.07	-2.70	3.86
KK-4	2089	420408	4481463	27.07.2009	84	45	6.61	482	8.2	0.2	0.11	0.02	0.09	0.41	0.30	0.01	0.04	0.26	1.61	15.86
KK-5	2460	417836	4487273	28.07.2009	33	18	6.44	495	4.2	2.0	0.07	0.02	0.03	0.20	0.25	0.01	0.10	0.04	-11.11	9.44
**	1841	418921	4484633	23.04.2010	24	14	6.58	390	4.2	(-)	0.06	0.01	0.02	0.17	0.20	0.01	<0.01	0.04	0.97	8.21
KK-6	2165	420405	4483744	28.07.2009	66	35	7.69	461	10.1	2.0	0.07	0.02	0.10	0.33	0.40	0.02	0.06	0.05	-0.95	9.50
KK-7	1734	418023	448332	28.07.2009	210	114	6.27	492	12.2	1.1	0.13	0.03	0.18	1.31	0.50	0.02	0.01	1.18	-1.79	28.91
"	"	"	"	23.04.2006	247	131	6.60	377	7.1	1.4	0.14	0.02	0.29	1.91	1.15	0.02	<0.01	0.93	5.71	23.18
KK-8	2147	417137	4485724	28.07.2009	27	14	7.09	496	10.0	6.5	0.06	0.01	0.01	0.16	0.20	0.00	<0.01	0.04	-1.03	7.34
KK-9	2543	429324	4482600	29.07.2009	27	14	7.09	470	4.7	6.0	0.06	0.00	0.18	0.15	0.25	0.01	0.02	0.03	11.43	7.59
**	1905	425538	4477140	24.04.2010	39	21	7.07	353	4.8	(-)	0.07	0.00	0.07	0.24	0.31	0.01	0.01	0.04	1.33	9.23
KK-10	2455	429581	4480292	29.07.2009	26	14	6.90	524	5.1	0.5	0.05	0.01	0.03	0.14	0.20	0.01	0.04	0.03	-9.80	8.81
KK-11	1935	422215	4479966	29.07.2009	112	59	3.94	654	6.9	0.5	0.06	0.05	0.10	0.36	0.05	0.01	<0.01	0.76	-18.28	15.23
"	"	"	"	24.04.2010	73	39	4.56	479	4.8	1.2	0.02	0.01	0.07	0.16	0.09	0.01	<0.01	0.20	-7.96	8.09
**	"	"	"	24.04.2010	35	19	4.72	514	6.7	(-)	0.02	0.01	0.07	0.21	0.11	0.01	<0.01	0.16	4.20	7.23
KK-12	1851	423019	4480990	29.07.2009	211	112	3.53	663	6.8	2.5	0.04	0.05	0.12	0.20	0.05	0.01	<0.01	0.95	-42.46	19.10
"	"	"	"	24.04.2010	204	108	3.42	623	6.7	3.5	0.06	0.05	0.13	0.22	<0.01	0.01	<0.01	0.83	-29.77	17.07
KK-13	2701	428646	4485262	30.07.2009	18	10	7.37	419	3.3	40	0.06	0.01	0.03	0.11	0.15	0.01	0.02	0.03	0.00	4.65
KK-14	1847	418888	4471127	31.07.2009	88	47	6.90	470	7.9	0.3	0.13	0.09	0.06	0.44	0.60	0.02	0.01	0.06	2.13	41.15
**	"	"	"	26.04.2010	88	46	7.02	419	7.4	(-)	0.13	0.09	0.12	0.50	0.65	0.02	<0.01	0.08	5.33	42.36
KK-15	1985	417813	4468206	31.07.2009	38	20	6.90	456	5.9	4.9	0.12	0.03	0.03	0.13	0.25	0.00	0.02	0.00	6.90	32.99
KK-16	2002	418018	4468377	31.07.2009	45	24	7.28	528	7.5	1.0	0.15	0.04	0.04	0.17	0.35	0.01	0.04	0.01	-1.23	29.38
KK-17	2088	424941	4481484	31.07.2009	37	19	6.93	486	7.5	0.8	0.12	0.01	0.04	0.13	0.25	0.01	0.04	0.06	-9.09	12.81
**	1793	421839	4477089	24.06.2010	35	19	7.25	343	8.3	(-)	0.10	0.01	0.06	0.20	0.30	0.01	0.02	0.04	0.00	11.78
KK-18	2007	422517	4482389	31.07.2009	488	239	3.49	421	8.0	0.3	0.18	0.08	0.35	2.63	0.10	0.01	<0.01	4.12	-13.31	41.51
KK-19	1886	421477	4478392	31.07.2009	248	132	3.65	626	8.5	0.9	0.11	0.04	0.18	0.58	0.10	0.01	<0.01	1.58	-30.13	35.04
"	"	"	"	24.04.2010	145	77	3.83	610	7.1	1.5	0.06	0.02	0.12	0.25	<0.01	0.01	<0.01	0.77	-27.42	18.70
KK-20	1725	415944	4472434	01.08.2009	103	55	6.63	455	6.8	0.4	0.17	0.03	0.12	0.52	0.65	0.02	0.09	0.06	1.20	25.20
KK-21	1779	415216	4472179	01.08.2009	47	25	6.42	490	6.5	1.4	0.12	0.05	0.05	0.17	0.35	0.01	0.02	0.02	-1.27	30.89

Ekemen Keskin, Toptaş, Ersöz

Çizelge 1. Devam ediyor.
Table 1. Continues.

Kaynak- Akarsu No	Kot (m)	Boydam	Enlem	Önekleme Tarihi	Ölçü (µS)	TÇM (mg/L)	pH	Eh (mV)	Sıcaklık (°C)	Debi (L/s)	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Anahtık Hata	SiO ₂ mg/L
KK-21	1779	415216	4472179	24.04.2010	58	31	6.94	387	6.5	(-)	0.09	0.05	0.12	0.27	0.43	0.01	<0.01	0.05	3.41	30.60
**	1714	415318	4472861	26.04.2010	43	23	7.44	362	9.0	(-)	0.17	0.04	0.08	0.15	0.37	0.01	<0.01	0.02	4.14	42.56
KK-22	1843	415053	4471779	01.08.2009	39	21	7.96	418	10.3	12	0.16	0.04	0.04	0.10	0.25	0.01	0.01	0.00	11.48	44.66
"	"	"	"	26.04.2010	43	23	7.38	392	9.7	17	0.13	0.03	0.06	0.15	0.37	0.01	<0.01	0.01	-3.27	39.56
KK-23	2008	413422	4472291	01.08.2009	49	26	6.80	511	5.6	4.6	0.12	0.04	0.06	0.17	0.40	0.01	0.02	0.02	-7.14	34.15
KK-24	2102	415315	4470159	01.08.2009	33	18	6.84	481	5.4	8.9	0.09	0.03	0.02	0.13	0.25	0.00	0.02	0.02	-3.57	29.86
"	"	"	"	26.04.2010	34	16	7.32	410	4.4	11.0	0.10	0.02	0.04	0.19	0.31	0.01	<0.01	0.03	-0.71	19.66
KK-25	1704	410978	4475316	01.07.2009	113	61	6.97	501	8.8	1.4	0.28	0.01	0.18	0.54	0.90	0.01	0.01	0.04	2.54	23.39
**	"	"	"	26.04.2010	98	53	7.34	418	9.3	(-)	0.27	0.01	0.22	0.56	0.88	0.02	0.02	0.03	5.47	21.73
KK-26	1890	411008	4474248	01.07.2009	73	39	7.57	463	9.4	9.3	0.27	0.00	0.08	0.28	0.50	0.01	0.03	0.02	5.88	19.52
KK-27	1778	410534	4474910	01.07.2009	88	47	7.31	488	9.4	0.6	0.27	0.01	0.11	0.38	0.70	0.01	0.02	0.02	1.32	21.30
KK-28	1908	413458	4474764	02.08.2009	204	108	7.20	490	6.8	0.2	0.37	0.07	0.46	0.85	1.65	0.02	0.02	0.03	0.86	38.68
KK-29	1827	413292	4475615	02.08.2009	138	73	7.30	510	7.1	0.4	0.25	0.07	0.17	0.79	1.10	0.01	0.01	0.04	4.92	22.29
KK-30	1548	420384	4477733	02.08.2009	664	352	3.34	490	10.1	2.3	0.62	0.05	1.52	3.09	0.05	0.03	<0.01	6.75	-12.84	52.97
"	"	"	"	23.04.2010	668	355	3.34	491	9.0	1.4	0.57	0.06	1.46	2.79	<0.01	0.03	<0.01	5.56	-6.87	52.14
KK-31	1491	419775	4477460	27.07.2009	272	133	3.60	646	9.0	0.2	0.07	0.03	0.17	0.15	0.15	0.02	<0.01	1.38	-57.47	21.28
"	"	"	"	24.04.2010	171	91	3.56	617	13.5	0.2	0.06	0.02	0.15	0.15	<0.01	0.02	<0.01	0.70	-31.53	14.54
KD-1	1487	419806	4477449	27.07.2009	403	214	7.63	338	15.9	78.3	0.25	0.05	0.55	2.55	1.20	0.04	<0.01	2.33	-2.51	16.55
"	"	"	"	24.04.2010	110	58	7.73	288	10.1	125.4	0.09	0.02	0.18	0.77	0.71	0.01	0.01	0.34	-0.47	9.66
KD-2	1690	423402	4479702	28.07.2009	139	74	7.04	415	13.7	167	0.08	0.03	0.13	0.73	0.20	0.01	0.01	0.83	-3.96	12.02
"	"	"	"	24.04.2010	43	23	7.7	369	3.7	(-)	0.03	0.01	0.06	0.28	0.24	0.01	<0.01	0.10	3.40	5.56
KD-3	1432	419278	4475363	28.07.2009	188	100	7.47	462	14.0	(-)	0.20	0.03	0.26	1.06	1.00	0.03	0.01	0.50	0.32	16.03
"	"	"	"	24.04.2010	82	44	7.77	381	10.0	(-)	0.09	0.02	0.13	0.52	0.54	0.01	<0.01	0.11	6.67	12.38
KD-4	1684	425466	4478571	30.07.2009	38	20	7.43	199	15.6	316	0.10	0.02	0.07	0.23	0.40	0.01	0.02	0.04	-5.62	8.48
"	"	"	"	25.04.2010	32	17	7.48	368	4.1	(-)	0.06	0.01	0.06	0.21	0.26	0.01	0.01	0.03	4.62	8.21
KD-5	1583	423572	4478394	30.07.2009	182	97	7.31	443	13.2	(-)	0.15	0.04	0.18	0.96	0.30	0.03	<0.01	1.07	-2.74	14.87
"	"	"	"	25.06.2010	66	35	7.69	348	7.4	(-)	0.05	0.02	0.10	0.42	0.32	0.01	0.01	0.19	5.36	6.87
KD-6	2007	422517	4482389	31.07.2009	147	78	7.50	217	14.4	679	0.09	0.02	0.11	0.91	0.55	0.01	0.00	0.57	0.00	10.35
KD-7	1431	419063	4475369	02.08.2009	208	110	7.80	435	18.0	(-)	0.19	0.04	0.28	1.18	1.00	0.04	0.02	0.59	1.20	18.27
"	"	"	"	25.04.2010	93	49	7.78	380	10.4	(-)	0.10	0.02	0.18	0.64	0.74	0.01	0.01	0.16	1.08	12.47
KA-1	1628	423546	4479308	30.07.2009	431	221	7.80	447	14.5	(-)	1.53	0.13	0.57	2.16	1.65	0.22	0.08	2.51	-0.79	38.23

* Şebeke Suyu - Örnek numarası koyu yazılanlar Üst Kretase Volkaniklerinden boşalan kaynaklardır

Çizelge 2. Çalışma alanındaki suların iz element konsantrasyonları (ppb).
Table 2. Trace element concentrations of the waters in the study area (ppb).

Su No	Tarih	Ag	Al	As	Au	B	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	S	Sb	Se	Si	U	Zn
KK-1	27.07.2009	<0.05	600	<0.5	<0.05	7	123.7	0.06	1.89	<0.5	65.5	21	<0.1	22.61	<0.1	4.5	2.5	5	0.09	<0.5	4050	0.06	29.3
"	23.04.2010	<0.05	456	<0.5	<0.05	6	168.3	<0.05	0.88	1.0	11.8	113	<0.1	9.11	<0.1	1.8	2.7	2	0.08	<0.5	3296	0.03	10.3
KK-2	27.07.2009	<0.05	2700	1.9	<0.05	11	48.68	0.38	5.29	<0.5	296.8	776	<0.1	6.34	<0.1	4.1	16.0	10	0.49	<0.5	7650	0.12	75.5
"	24.04.2010	<0.05	2517	1.4	<0.05	<5	80.58	0.27	5.30	0.9	242.5	487	<0.1	9.31	0.1	3.1	12.2	10	0.38	<0.5	6517	0.04	45.9
KK-3	27.07.2009	<0.05	73	<0.5	<0.05	8	88.23	<0.05	0.18	<0.5	16.2	282	<0.1	31.40	<0.1	1.8	2.4	3	0.13	<0.5	3759	0.03	56.1
"	23.04.2010	<0.05	52	<0.5	<0.05	<5	70.42	<0.05	0.12	0.5	2.9	54	<0.1	7.81	<0.1	0.9	1.8	1	0.08	<0.5	1802	<0.02	5.9
KK-4	27.07.2009	<0.05	72	<0.5	<0.05	9	55.22	<0.05	0.03	<0.5	13.2	12	<0.1	2.72	<0.1	1.4	1.8	5	<0.05	<0.5	7413	0.05	22.6
KK-5	28.07.2009	<0.05	41	<0.5	<0.05	<5	5.43	<0.05	0.03	<0.5	5.5	21	<0.1	2.37	0.3	0.7	0.3	<1	0.06	<0.5	4413	0.62	5.9
**	23.04.2010	<0.05	21	<0.5	<0.05	<5	5.38	<0.05	0.03	<0.5	2.2	<10	<0.1	0.08	0.2	0.3	0.5	1	0.08	<0.5	3835	0.39	1.6
KK-6	28.07.2009	<0.05	143	<0.5	<0.05	6	41.15	<0.05	0.08	1.0	10.9	102	<0.1	7.27	0.2	1.5	5.6	<1	0.18	<0.5	4440	0.20	12.6
KK-7	28.07.2009	<0.05	1730	<0.5	<0.05	11	36.57	0.10	3.62	<0.5	10.3	144	<0.1	18.93	0.1	3.5	2.1	19	0.12	<0.5	13511	0.13	26.3
"	23.04.2010	<0.05	1437	<0.5	<0.05	5	29.81	0.12	2.82	1.3	11.8	329	<0.1	17.26	0.3	2.0	3.0	16	0.17	<0.5	10823	0.07	22.6
KK-8	28.07.2009	<0.05	38	<0.5	<0.05	<5	3.42	<0.05	<0.02	<0.5	4.3	<10	<0.1	0.96	0.1	0.3	0.8	<1	<0.05	<0.5	3432	0.07	2.5
KK-9	29.07.2009	<0.05	78	3.2	<0.05	9	2.72	<0.05	0.06	0.5	15.9	22	<0.1	4.18	1.9	1.8	4.6	1	0.21	<0.5	3548	0.74	44.5
**	24.04.2010	<0.05	28	2.3	<0.05	<5	2.23	<0.05	0.04	0.8	3.7	26	<0.1	2.6	1.3	0.4	2.0	1	0.16	<0.5	4311	0.29	4.7
KK-10	29.07.2009	<0.05	62	<0.5	<0.05	9	2.45	<0.05	0.03	<0.5	14.3	15	<0.1	2.55	0.4	1.6	2.7	1	0.12	<0.5	4121	0.05	19.3
KK-11	29.07.2009	<0.05	2306	<0.5	<0.05	9	31.29	<0.05	2.45	<0.5	12.3	52	<0.1	48.61	<0.1	2.0	3.0	12	0.05	<0.5	7116	0.11	16.6
"	24.04.2010	<0.05	870	<0.5	<0.05	<5	30.90	0.05	1.02	0.9	9.7	74	<0.1	22.80	<0.1	1.4	3.0	5	0.13	<0.5	3779	0.03	20.8
**	24.04.2010	<0.05	587	<0.5	<0.05	<5	32.26	<0.05	0.56	1.3	18.8	110	<0.1	14.86	<0.1	1.8	4.9	3	0.15	<0.5	3376	0.03	44
KK-12	29.07.2009	0.95	3452	<0.5	<0.05	7	25.48	<0.05	3.72	<0.5	4.3	<10	<0.1	86.08	<0.1	2.1	0.9	14	<0.05	<0.5	8926	0.05	10.0
"	24.04.2010	<0.05	379	<0.5	<0.05	<5	27.18	0.05	3.46	0.8	8.5	17	<0.1	83.66	<0.1	2.4	2.7	15	0.09	<0.5	7971	0.05	17.6
KK-13	30.07.2009	<0.05	44	<0.5	<0.05	6	1.69	<0.05	<0.02	<0.5	7.5	<10	<0.1	1.11	0.1	0.4	1.6	<1	<0.05	<0.5	2175	0.05	6.5
KK-14	31.07.2009	<0.05	127	1.0	<0.05	11	21.87	<0.05	0.03	<0.5	9.5	35	<0.1	2.30	0.2	1.3	2.4	<1	0.07	<0.5	19229	0.26	9.0
**	26.04.2010	<0.05	244	1.0	<0.05	10	29.70	<0.05	0.12	1.4	14.3	118	<0.1	9.66	0.3	1.6	4.3	2	0.15	<0.5	19779	0.24	25.7
KK-15	31.07.2009	<0.05	37	<0.5	<0.05	5	4.69	<0.05	<0.02	<0.5	4.6	<10	<0.1	1.11	0.3	0.3	0.9	<1	<0.05	<0.5	15419	0.09	3.4
KK-16	31.07.2009	<0.05	70	<0.5	<0.05	7	4.84	<0.05	0.02	<0.5	8.0	<10	<0.1	2.31	0.3	1.0	1.3	<1	0.10	<0.5	13729	0.16	5.8
KK-17	31.07.2009	<0.05	78	<0.5	<0.05	<5	3.55	<0.05	0.06	<0.5	14.3	20	<0.1	4.20	0.2	1.6	3.4	<1	0.37	<0.5	5987	0.04	21.8
**	24.04.2010	<0.05	88	0.5	<0.05	<5	8.09	<0.05	0.06	1.0	9.0	53	<0.1	9.29	0.3	1.4	4.0	2	0.18	<0.5	5499	<0.02	16
KK-18	31.07.2009	<0.05	5167	5.0	<0.05	9	13.17	0.23	5.58	<0.5	7.5	5269	<0.1	500.2	<0.1	2.8	6.3	72	<0.05	<0.5	19398	0.24	33.5
KK-19	31.07.2009	<0.05	5700	<0.5	<0.05	13	29.70	0.14	5.42	<0.5	21.1	84	<0.1	66.23	<0.1	3.7	3.4	21	<0.05	<0.5	16375	0.21	37.7
"	24.04.2010	<0.05	2731	<0.5	<0.05	<5	45.77	0.11	3.08	0.8	13.0	85	<0.1	47.71	0.1	2.5	3.2	13	0.22	<0.5	8730	0.04	33.0
KK-20	01.08.2009	<0.05	75	<0.5	<0.05	10	17.24	<0.05	0.02	<0.5	8.3	<10	<0.1	2.01	0.2	1.0	2.4	<1	<0.05	<0.5	11776	0.12	7.3

Ekemen Keskin, Toptaş, Ersöz

Çizelge 2. Devam.
Table 2. Continued.

Su No	Tarih	Ag	Al	As	Au	B	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	S	Sb	Se	Si	U	Zn
KK-21	01.08.2009	<0.05	55	<0.5	<0.05	7	5.05	<0.05	<0.02	<0.5	6.2	<10	<0.1	1.10	0.2	0.7	1.2	<1	<0.05	<0.5	14437	0.09	3.5
"	26.04.2010	<0.05	73	<0.5	<0.05	<5	8.69	<0.05	0.05	0.5	4.2	29	<0.1	2.29	0.2	0.5	1.0	<1	0.08	<0.5	14287	0.07	7.6
**	26.04.2010	<0.05	65	1.1	<0.05	6	4.95	<0.05	0.06	0.9	4.2	38	<0.1	4.16	0.5	1.4	2.5	<1	0.33	<0.5	19870	0.04	9.1
KK-22	01.08.2009	<0.05	58	1.1	<0.05	8	2.25	<0.05	<0.02	<0.5	5.5	<10	<0.1	0.95	0.5	0.7	2.8	<1	0.07	<0.5	20871	0.11	2.9
"	26.04.2010	<0.05	30	0.9	<0.05	6	2.99	<0.05	0.03	0.5	2.3	15	<0.1	1.56	0.5	0.3	0.6	<1	0.07	<0.5	18471	0.05	5.4
KK-23	01.08.2009	<0.05	80	<0.5	<0.05	11	3.63	<0.05	<0.02	<0.5	8.4	11	<0.1	1.53	0.2	0.8	1.1	<1	<0.05	<0.5	15960	0.12	5.3
KK-24	01.08.2009	<0.05	46	<0.5	<0.05	8	3.10	<0.05	<0.02	<0.5	4.6	<10	<0.1	0.82	0.3	0.7	2.2	<1	<0.05	<0.5	13955	0.08	3.0
"	26.04.2010	<0.05	29	<0.5	<0.05	<5	3.57	<0.05	<0.02	<0.5	3.6	11	<0.1	1.78	0.2	0.3	0.7	<1	0.08	<0.5	9177	0.04	5.7
KK-25	01.07.2009	<0.05	66	<0.5	<0.05	8	6.05	<0.05	<0.02	<0.5	10.5	<10	<0.1	1.78	0.2	1.0	0.4	<1	<0.05	<0.5	10933	0.23	8.9
**	26.04.2010	<0.05	54	<0.5	<0.05	<5	5.27	<0.05	0.07	0.9	8.7	25	<0.1	4.82	0.4	1.2	2.4	<1	0.30	<0.5	10146	0.14	15.5
KK-26	01.07.2009	<0.05	70	<0.5	<0.05	10	3.35	<0.05	<0.02	<0.5	7.1	<10	<0.1	1.48	0.2	0.7	0.6	<1	<0.05	<0.5	9123	0.13	3.2
KK-27	01.07.2009	<0.05	32	<0.5	<0.05	8	5.24	<0.05	<0.02	<0.5	3.2	<10	<0.1	0.54	0.1	0.4	1.2	<1	<0.05	<0.5	9954	0.24	1.9
KK-28	02.08.2009	<0.05	100	<0.5	<0.05	7	5.11	<0.05	0.05	0.8	8.1	31	<0.1	2.77	0.3	1.3	2.5	<1	<0.05	<0.5	18077	0.37	6.0
KK-29	02.08.2009	<0.05	85	0.6	<0.05	10	4.02	<0.05	<0.02	<0.5	8.4	<10	<0.1	1.57	0.1	0.8	1.3	<1	<0.05	<0.5	10417	0.19	5.3
KK-30	02.08.2009	<0.05	6667	1.0	<0.05	14	19.42	0.47	19.83	<0.5	10.5	17992	<0.1	1.658	0.1	5.4	1.3	<1	<0.05	<0.5	24755	0.10	199.4
"	23.04.2010	<0.05	8829	1.0	<0.05	8	13.55	0.38	23.41	0.6	2.8	19084	<0.1	1.708	<0.1	4.1	0.9	100	0.08	<0.5	24342	<0.02	216.5
KK-31	27.07.2009	<0.05	5462	<0.5	<0.05	6	25.46	0.53	9.26	<0.5	89.2	30	<0.1	89.76	<0.1	5.3	4.6	18	0.07	1.2	9946	0.10	94.9
"	24.04.2010	0.22	2657	<0.5	<0.05	8	39.05	0.34	5.27	0.8	199.0	63	<0.1	65.48	0.1	11.7	6.7	13	0.34	1.5	6788	0.05	396.8
KD-1	27.07.2009	<0.05	604	0.6	<0.05	21	75.17	0.15	1.76	<0.5	18.9	282	<0.1	174.2	0.3	2.7	1.6	42	0.18	<0.5	7733	0.14	33.9
"	24.04.2010	<0.05	391	<0.5	<0.05	<5	44.48	<0.05	0.71	0.5	6	158	<0.1	43.76	0.2	1.1	1.8	8	0.19	<0.5	4513	0.06	10.2
KD-2	28.07.2009	<0.05	337	<0.5	<0.05	11	34.68	0.07	0.79	<0.5	12.9	80	<0.1	60.87	0.2	1.6	1.8	13	<0.05	<0.5	5617	0.11	14.2
"	24.04.2010	<0.05	229	<0.5	<0.05	<5	25.51	<0.05	0.35	0.7	4.3	157	<0.1	29.52	0.2	0.7	2.4	2	0.11	<0.5	2589	0.04	7.4
KD-3	28.07.2009	<0.05	183	0.6	<0.05	22	36.50	0.19	0.18	<0.5	9.9	160	<0.1	35.93	0.3	1.1	6.0	8	0.09	<0.5	7490	0.16	40.0
"	24.04.2010	<0.05	212	<0.5	<0.05	6	22.72	0.12	0.26	1.0	4.6	177	<0.1	34.73	0.2	1.1	9.9	2	0.10	<0.5	5780	0.09	25
KD-4	30.07.2009	<0.05	106	<0.5	<0.05	7	5.13	<0.05	0.08	<0.5	10.3	80	<0.1	9.55	0.3	0.7	1.6	<1	0.08	0.6	3962	0.07	6.9
"	25.04.2010	<0.05	147	<0.5	<0.05	<5	8.25	<0.05	0.15	<0.5	6.9	98	<0.1	13.65	0.2	1.9	3.5	<1	0.15	<0.5	3832	0.03	11.4
KD-5	30.07.2009	<0.05	619	<0.5	<0.05	12	54.11	0.66	1.06	<0.5	20.6	520	<0.1	116.6	0.2	2.7	93.5	14	0.16	0.6	6947	0.16	107.4
"	25.04.2010	<0.05	252	<0.5	<0.05	<5	31.24	0.19	0.39	0.8	7.6	153	<0.1	36.81	0.2	1.0	11.9	4	0.16	<0.5	3208	0.04	39.2
KD-6	31.07.2009	<0.05	474	<0.5	<0.05	6	27.58	0.06	0.56	<0.5	12.5	414	<0.1	62.07	0.4	2.3	1.8	8	0.07	<0.5	4836	0.20	25.8
KD-7	02.08.2009	<0.05	166	0.6	<0.05	19	33.19	0.19	0.17	<0.5	10.2	87	<0.1	40.88	0.3	0.9	3.2	8	0.15	<0.5	8539	0.27	21.3
"	25.04.2010	<0.05	240	<0.5	<0.05	8	25.46	0.10	0.34	1.2	14.2	127	<0.1	30.90	0.3	1.7	11.4	4	0.35	<0.5	5822	0.09	29.9
KA-1	30.07.2009	0.17	9025	5.3	<0.05	74	99.89	10.03	5.55	6.1	62.6	16214	<0.1	1632	1.1	4.4	3850	30	0.74	<0.5	17865	1.17	2049

etkilemektedir. Bazı kayaçlar ve/veya mineraller yüksek oranda iz element konsantrasyonuna sahiptirler. Fe, Cu, Zn ve Pb elementleri sıklıkla sülfür mineralleri ile ilişkilidir. Kayaçlarda Al içeren birçok mineral (feldispat, mika, piroksen grubu mineraller vb.) bulunmaktadır. Kayaçlarda Cu bulunduran sülfidik mineraller kalkosit (Cu_2S), kovellit (CuS), kalkopirit ($CuFeS$) ve benzeri minerallerdir. Kayaçlarda Fe bulunduran sülfidik mineraller pirit (FeS_2), pirolit ($Fe_{1-x}S$) ve benzeri minerallerdir. Zn içeren major sülfidik mineral ise sfalarittir (ZnS) (He vd., 2005). Çalışma alanındaki Üst Kretase volkaniklerinde galen (PbS), sfalerit (ZnS), pirit (FeS_2), kalkopirit ($CuFeS_2$), kalkosit (Cu_2S) ve hematit (Fe_2O_3) sülfürlü cevher mineralleri bulunmaktadır.

Suların iz element analiz sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, Üst Kretase volkaniklerinden boşalan kaynakların (KK-1, KK-2, KK-7, KK-11, KK-12, KK-18, KK-19, KK-30, KK-31) Al, Fe ve Mn konsantrasyonlarının, kurak ve yağışlı dönemlerde, Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standartları’nda (Sağlık Bakanlığı, 2005) ve Dünya Sağlık Örgütü Standartları’nda (WHO, 2006) verilen üst sınır değeri birkaç kat aştığı görülmektedir. Genellikle yüksek Fe ve Mn konsantrasyonları düşük yükseltgenme-indirgenme potansiyeline sahip kaynaklarda (KK-18, KK-30) gözlenmektedir (Keskin ve Toptaş, 2012).

Kaynakların Al değerleri 379 ppb ile 8829 ppb arasında değişmekte olup, standartlardaki 200 ppb olan üst sınırı aşmaktadırlar. Kaynakların Fe değerleri <10 ppb ve 19082 ppb arasında değişmektedir. Bazı kaynaklardaki (KK-2, KK-3, KK-7, KK-18, KK-30) değerler Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standartları’nda verilen

üst sınır değeri (200 ppb) birkaç kat aşmaktadır. Kaynakların Mn değerleri 6.3 ppb ile 1708 ppb arasında değişmekte olup, bazı kaynakların (KK-11, KK-12, KK-18, KK-19, KK-30, KK-31) konsantrasyonları standartlardaki üst sınır değeri (50 ppb) aşmakta veya sınır değere çok yakın değerler vermektedir.

KK-2 kaynağının Cu, Pb ve Zn değerleri diğer kaynaklara oranla daha yüksektir. Kaynağın Pb değerleri 12 ppb ile 16 ppb arasında değişmekte olup, standartlardaki sınır değeri (10 ppb) aşmaktadır. KK-30 kaynağı, 324 mg/l olan SO_4 değeri ile üst sınır değeri (250 mg/l) aşmaktadır. Çalışma alanındaki diğer birimlerden boşalan kaynaklarda belirgin bir major ya da iz element kirliliği saptanmamıştır.

Çalışma alanındaki akarsuların Al, Fe, Mn ve Pb konsantrasyonları (KD-4 hariç) kurak ve/veya yağışlı dönemde Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular ve Dünya İçme Suyu Standartları’nda verilen üst sınır değerleri aşmakta veya yakın değerler vermektedir. KD-3, KD-5 ve KD-7 akarsu ölçüm noktaları çevresinde güncel maden atıkları bulunmaktadır. Ayrıca KD-5 ölçüm noktasının hemen üzerine maden sıvı atıkları (KA-1) boşaltılmaktadır. Çizelge 2’de verilen iz element verilerine bakıldığında KA-1’in birçok iz element açısından oldukça zengin olduğu görülmektedir. KD-1, KD-2, KD-4 ve KD-6 akarsu ölçüm noktalarının üst kısımlarında ise güncel maden atıkları bulunmamaktadır. Bununla birlikte KD-1, KD-2 ve KD-6 ölçüm noktalarından önce daha üst kotlarda, sülfürlü cevherleşmelerden oldukça etkilenmiş kaynaklar boşalmaktadır. Akarsuların Al konsantrasyonları 212 ppb ve 619 ppb arasında değişmekte (KD-4 hariç) olup, kurak ve/veya yağışlı dönemde Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular ve Dünya İçme

Ekemen Keskin, Toptaş, Ersöz

Suyu Standartları'nı aşmaktadırlar. Fe değerleri 80 ppb ve 520 ppb arasında değişmekte olup, KD-4 hariç diğer akarsuların kurak ve/veya yağışlı dönemdeki Fe değerleri standartlardaki üst sınırı geçmekte veya bu değerlere yakın değerler vermektedir. Mn miktarları 30 ppb ve 174 ppb arasında değişmekte olup (KD-4 hariç), Fe konsantrasyonlarına benzer şekilde, kurak ve/veya yağışlı dönemde standartlardaki üst sınırı geçmekte veya bu değerlere yakın değerler vermektedir. Pb değerleri 1.6 ppb ve 94 ppb arasında değişmekte olan ve güncel maden atıklarının çevresinde bulunan KD-3, KD-5 ve KD-7 akarsu ölçüm noktalarının Pb değerleri, farklı dönemlerde standartlardaki üst sınır olan 10 ppb değerini aşmakta veya bu değere yakın değerler vermektedir. Birçok iz element açısından zengin olan maden atık suyundan (KA-1) hemen sonra yer alan KD-5'in özellikle Al, Fe, Mn, Pb ve Zn konsantrasyonlarının, diğer akarsu ölçüm noktalarının konsantrasyonları ile (özellikle, sıvı atıklardan önce yer alan KD-2 ölçüm noktası ile) karşılaştırıldığında, daha yüksek seviyede olduğu görülebilmektedir.

Çalışma alanındaki büyük debili ve/veya asidik suların toplam alfa ve toplam beta radyoaktivite sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Kaynakların toplam alfa radyoaktivite değeri 0.007 Bq/L ve 0.092 Bq/L arasında, beta radyoaktivite değeri ise 0.02 Bq/L ve 0.13 Bq/L arasında değişmekte olup, standartlardaki sınır değerleri aşmamaktadırlar. Bununla birlikte KK-2 Kaynağının toplam alfa değeri (0.092 Bq/L) standartdaki üst sınır değerine (0.1 Bq/L) yakın düzeyde bulunmaktadır.

Çizelge 3. Çalışma alanındaki bazı suların toplam alfa ve toplam beta radyoaktivite analiz sonuçları.

Table 3. Total alpha and total beta radioactivity analyses results of some waters in the study area.

Kaynak No	Örnekleme Tarihi	Toplam Alfa (Bq/L)	Toplam Beta (Bq/L)
KK-2	27.07.2009	0.092 ± 0.006	0.13 ± 0.01
KK-5	28.07.2009	0.058 ± 0.004	0.12 ± 0.01
KK-9	29.07.2009	0.031 ± 0.003	0.05 ± 0.01
KK-11	29.07.2009	0.083 ± 0.006	0.13 ± 0.01
KK-13	30.07.2009	0.007 ± 0.002	0.02 ± 0.01
KK-21	01.08.2009	0.010 ± 0.003	0.08 ± 0.01
KK-30	02.08.2009	0.065 ± 0.026	0.13 ± 0.04

İSTATİSTİKSEL ANALİZLER

Çalışma alanındaki yeraltısularının kimyasal bileşimini kontrol eden, mineral-su reaksiyon prosesleri sonucu oluşan elementlerin birbirleriyle ilişkilerini saptayabilmek, çalışma alanındaki yeraltısularını gruplandırabilmek ve gruplar hakkında ayrıntılı bilgilere ulaşabilmek amacıyla uygulanan korelasyon ve faktör analizleri sonuçları Çizelge 4 ve Çizelge 5'te verilmiştir. Çalışma verilerinin değerlendirilmesinde SPSS 15.0 programı (Inc, 2006) uygulanmıştır. Verileri indirgemek, sınıflamak ve birçok parametre açısından benzer hidrokimyasal fasiyese sahip yeraltısularını saptamak amacıyla hiyerarşik kümeleme analizi yapılmış ve analiz sonucu oluşan ağaç grafiği (dendogram) Şekil 3'te verilmiştir.

Çalışma alanındaki yeraltısuları için yapılan Pearson's Korelasyon Analizi'nde Na, Ca, Mg, SO₄, Fe, Mn, Co ve Al arasında çoğunlukla kuvvetli pozitif korelasyonlar saptanmıştır. Ayrıca bu elementler ile ÖEİ arasında da kuvvetli korelasyonlar mevcuttur. Bu durum, bu elementlerin ortak bir beslenme kaynağından (cevherli volkanik kayalar) geldiğini ve

Çizelge 4. Çalışma alanındaki yeraltısularının seçilen bazı bileşenlerine ait korelasyon matrisi.
Table 4. The correlation matrix of some selected components of the groundwaters in the study area.

	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	pH	Al	B	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Si	Zn	ÖEİ	Eh	
Na	1																					
K	.22	1																				
Mg	.82**	.27	1																			
Ca	.69**	.43	.83**	1																		
HCO ₃	.44	.21	.03	.02	1																	
Cl	.43	.31	.57**	.46	.16	1																
SO ₄	.57**	.34	.87**	.90**	-.31	.46**	1															
NO ₃	-.10	-.34	-.22	-.23	.15	.02	-.33	1														
pH	-.04	-.38	-.42	-.45	.47**	-.35	-.68**	.43	1													
Al	.26	.35	.60**	.62	-.40*	.40	.83**	-.45	-.90**	1												
B	.40*	.37	.45	.47**	.04	.44	.45	-.33	-.33	.42	1											
Co	.51**	.26	.84**	.71**	-.34	.57**	.92**	-.38	-.76**	.88**	.44	1										
Cu	-.19	.10	-.06	-.12	-.18	.32	.04	-.22	-.41	.25	.16	.25	1									
Fe	.72**	.24	.94**	.84**	-.22	.47**	.92**	-.21	-.45	.61**	.41	.85**	-.02	1								
Mn	.70**	.25	.95**	.84**	-.24	.47**	.94**	-.23	-.49**	.65**	.40	.87**	-.05	.996**	1							
Ni	.15	.22	.52**	.46**	-.34	.66**	.66**	-.40	-.80**	.80**	.40	.81**	.49**	.50**	.53**	1						
Pb	-.23	.20	-.04	.04	-.20	.31	.13	-.18	-.38	.30	.20	.22	.87**	.02	-.01	.45	1					
Si	.62**	.64**	.52**	.58**	.20	.25	.51**	-.26	-.19	.39	.50**	.42	-.15	.49**	.49**	.16	-.09	1				
Zn	.46**	.12	.80**	.59**	-.34	.60**	.81**	-.32	-.61**	.72**	.41	.92**	.34	.82**	.83**	.80**	.30	.25	1			
ÖEİ	.63**	.46**	.85**	.91**	-.09	.53**	.95**	-.36	-.70**	.86**	.49**	.89**	.08	.82**	.85**	.67**	.16	.58**	.74**	1		
Eh	-.20	.16	-.03	-.15	-.20	.19	.08	-.27	-.66**	.47**	.14	.32	.56**	-.08	-.05	.52**	.38	-.10	.19	.17	1	

Korelasyon 0.05 düzeyinde önemlidir.

Korelasyon 0.01 düzeyinde önemlidir.

Ekemen Keskin, Toptaş, Ersöz

Çizelge 5. Çalışma alanındaki yeraltısularının varimax faktör matrisi ve faktör skorları.

Table 5. Varimax factor matrix and factor scores of the groundwaters in the study area.

	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4
Co	.960	-.117	-.171	.025
SO ₄	.956	.106	-.192	-.099
EC	.954	.100	.037	-.097
Mn	.902	.282	-.260	.052
Mg	.887	.360	-.082	.165
Fe	.886	.298	-.241	.099
Zn	.872	-.144	-.234	.256
Al	.859	-.312	-.082	-.252
Ca	.842	.367	.023	-.041
Ni	.773	-.490	-.024	.131
pH	-.729	.537	.052	.269
Cl	.617	-.057	.281	.568
Na	.611	.641	.176	.207
B	.565	.035	.408	-.009
Si	.550	.424	.443	-.311
K	.425	.041	.664	-.355
NO ₃	-.404	.248	-.191	.517
Pb	.236	-.697	.294	.301
Eh	.232	-.730	.177	-.113
Cu	.205	-.772	.278	.358
HCO ₃	-.203	.499	.669	.270
İlk Özdeğerler	10.377	3.636	1.858	1.440
Varyansların Yüzdeleri	49.415	17.316	8.849	6.859
Kümülatif Yüzde	49.415	66.731	75.579	82.438

suların iletkenliğinin ve toplam çözünmüş madde miktarının artmasında, bu elementlerin etkisinin kuvvetli olduğunu göstermektedir. SO₄ ile pH arasındaki negatif korelasyon ve SO₄ ile Al, Co, Fe, Mn ve Zn arasındaki kuvvetli pozitif korelasyon ise, sülfürlü cevherlerin (özellikle pirit) oksidasyonunu işaret etmekte ve oksidasyon prosesi sonucunda suların asidikleştiğini ve bu asidikleşmenin özellikle yukarıda bahsedilen elementlerin çözünürlüğünü arttırdığını açıkça göstermektedir. Al, Co, Ni, Zn, Fe, Mn arasındaki kuvvetli ilişkiler de bu durumu desteklemektedir. Ayrıca pH ile Eh arasındaki ters ilişki ise çalışma alanındaki asidik suların çoğunlukla oksitleyici olduğuna işaret etmektedir.

Çalışma alanındaki yeraltısuları arasındaki benzerlikleri ortaya koymak ve en baskın prosesleri tanımlayabilmek amacıyla yapılan faktör analizi sonucu, çalışma alanında özellikle bir su tipinin egemen olduğu görülmüştür. Analizde 4 önemli faktör açığa çıkmıştır. Bu faktörler varyansın % 82.438'ini açıklamakta olup, en büyük pay 1. faktöre aittir ve 1. faktör varyansın % 49.4'ünü göstermektedir. Bu faktördeki önemli değişkenler Co, SO₄, ÖEİ, Mn, Mg, Fe, Zn, Al, Ca, Ni ve pH'tır. pH hariç diğer değişkenler pozitif yükleme göstermektedir. Korelasyon analizine çok yakın sonuçlar veren bu faktör, cevherli volkanik kayaçların çözünmesiyle bu elementlerce zenginleşen, sülfürlü cevherleşmelerden kaynaklanan oksidasyon proseslerinden etkilenen ve zehirli metal ve kompleksler tarafından kirlenen yeraltısularını temsil etmektedir. 2. faktör varyansın % 17.3'ünü açıklamakta ve Na, pH pozitif yüklenirken, Cu, Pb ve Eh negatif yüklenmektedir. Bu faktör, pH ile Cu, Pb ve Eh

arasındaki ters ilişkiyi göstermekte, asidik suların oksitleyici özelliğini ve asidik yeraltısularındaki Cu ve Pb zenginleşmesi olan suları temsil etmektedir. 3. faktör varyansın % 8.8'ini, 4. faktör ise varyansın % 6.8'ini açıklamakta ve bu faktörlerin, cevherli olmayan kayaçlardan beslenen suları temsil ettiği düşünülmektedir.

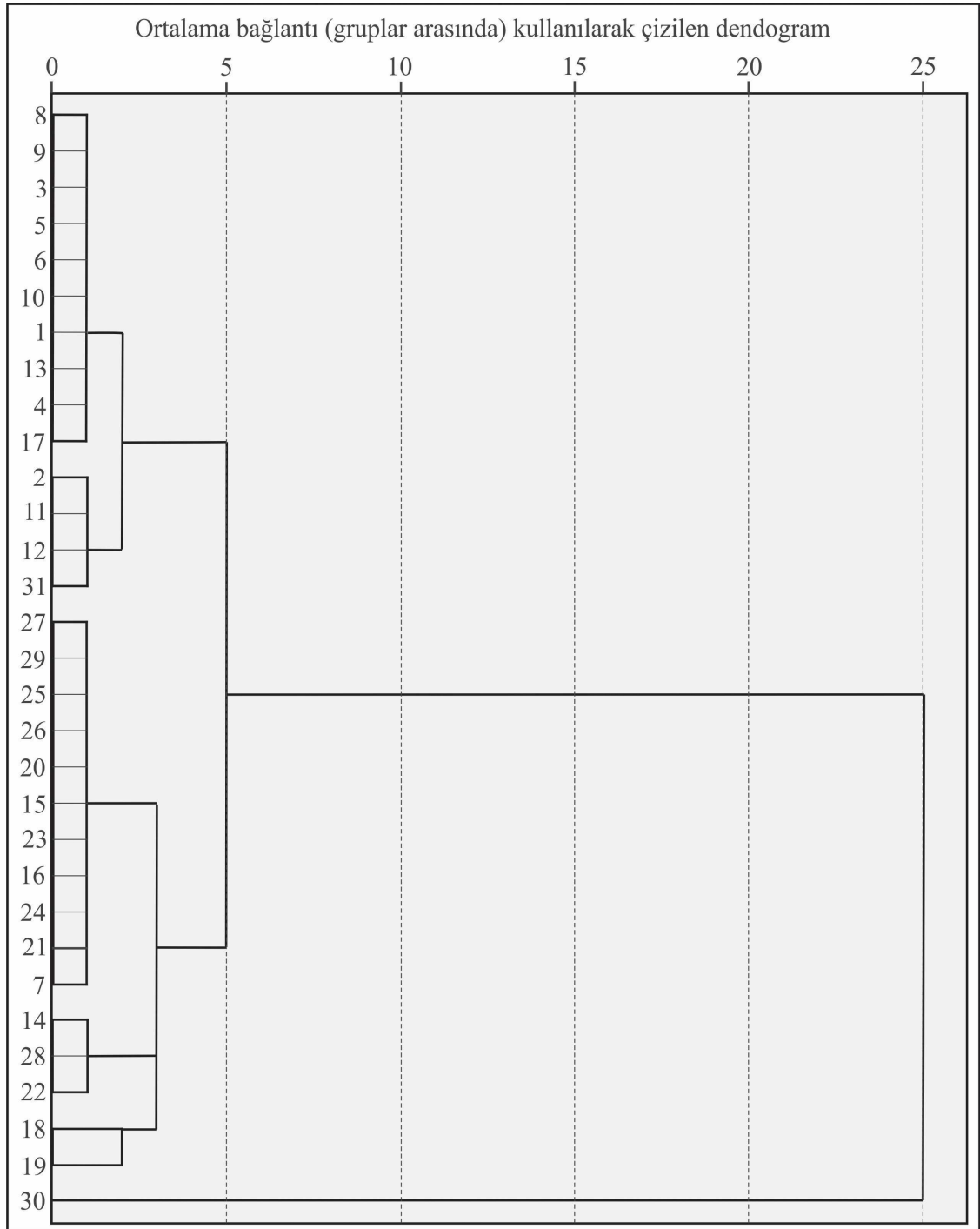
Şekil 3, hiyerarşik kümeleme analizi tarafından elde edilen dendogramı göstermektedir. Kümeleme analizi, örnekler arasındaki benzerlikleri ya da farklılıkları bulmaya yarayan istatistiksel bir tekniktir. Birimler veya değişkenler arasındaki benzerlikleri ya da farklılıkları gösteren uygun bir benzerlik ölçüsü kullanılarak birimler/değişkenler arasındaki uzaklık hesaplanır. İki nesne arasındaki uzaklığı hesaplamak için Öklid ve Karesel Öklid Uzaklığı, Manhattan Uzaklığı, Korelasyon Katsayısı ve Korelasyon Uzaklığı, Gamma Benzerlik Ölçüsü ve Jaccard Benzerlik Ölçüsü kullanılabilir. Bu çalışmada en yaygın olan Öklid Uzaklık Ölçüsü kullanılmıştır. Bu yöntem, n sayıdaki örneğe ait m sayıdaki özellik kullanılarak her bir örneğin öklid uzayındaki konumlarının belirlenmesi ve örnekler arasındaki öklid uzaklıklarına göre benzer ya da ayrı gruplar halinde sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. İki örneği (ya da değişkeni) birleştiren dallar ne kadar kısa ise bu örnekler (değişkenler) öklid uzayında birbirlerine o ölçüde yakın bulunmaktadır. Bu işlem sonucunda gözlemler arasındaki uzaklığı gösteren benzerlik veya farklılık matrisi belirlenmiş olur (Özdamar, 1999; Şahin 2008; Atilla ve Arıkan, 2001).

Dendogramda toplam 31 su kaynağı, 5 önemli istatistiksel kümeye ayrılmıştır. Her bir küme benzer hidrokimyasal fasiyesteki örnek setlerini içermektedir. Küme 1 çoğunlukla

maden yatakları tarafından kirletilmemiş veya görece olarak daha az kirlenmiş, yüksek kotlardan beslenen ve dolayısıyla kar sularından daha hızlı ve daha fazla etkilenen suları göstermektedir. Küme 2 ve 5 cevherli kayaçlar tarafından kirletilmiş ve sülfürlü cevherleşmelerden kaynaklanan oksidasyon proseslerinden etkilenen yeraltısularını temsil etmektedir. Küme 5'te yer alan kaynakların çözünmüş madde içeriği görece olarak daha yüksek olup, bu kaynaklar daha fazla konsantrasyonda Al içermektedir. Küme 3 ve 4 ise çalışma alanının güney kesimindeki, maden yataklarından daha uzaklarda bulunan volkanik kayaçlardan (çoğunlukla cevhersiz Eosen ve Pliyosen volkanikleri) boşalan ve kirlenmemiş sulara işaret etmektedir. Dendogramda kaynak kümelerine en uzak olan KK-30 kaynağı ise, çalışma alanındaki en yüksek çözünmüş madde içeriğine sahip, en fazla iz element kirliliği gösteren ve sülfürlü cevherleşmelerden kaynaklanan oksidasyon prosesinden etkilenen bir yeraltısuyudur.

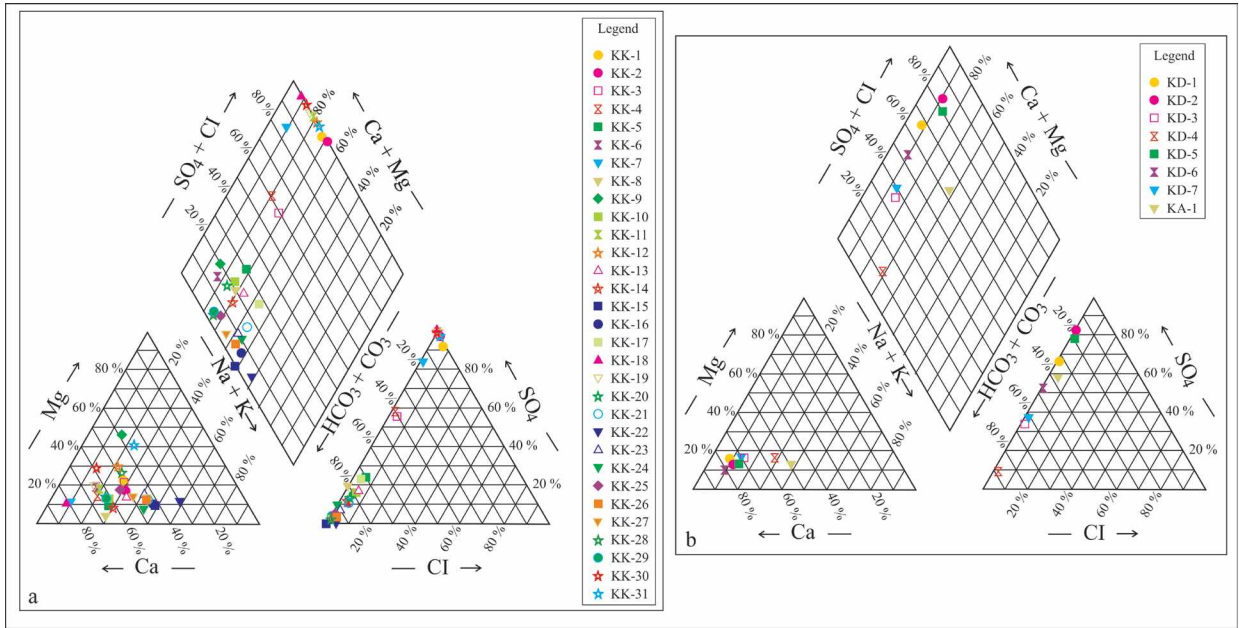
JEOKİMYASAL DEĞERLENDİRME

Şekil 4, çalışma alanındaki suların major anyon ve katyon yüzdelerine göre çizilen Piper (Piper, 1944) Diyagramı'nı göstermektedir. Bu diyagramda, yeraltısularının sülfidik cevherleşmeler ile etkileşime girip, oksidasyon prosesi sonucu SO_4 egemen fasiyese sahip olması kendini açıkça göstermektedir. Buna bağlı olarak cevherli Üst Kretase volkaniklerinden boşalan kaynaklar Ca- SO_4 fasiyesinde olup, KK-1, KK-2, KK-3, KK-12 ve KK-31 bir miktar yüksek Mg ve Na yüzdelerine sahiptirler. Diğer jeolojik formasyonlardan boşalan kaynaklar ise Ca-Na-Mg- HCO_3 fasiyesindedirler. KD-1, KD-2, KD-5 ve KD-6 akarsu örnekleri $CaSO_4$ tipinde olup,



Şekil 3. Çalışma alanındaki yeraltısularının 21 parametresi kullanılarak üretilen dendrogramları (Hiyerarşik kümeleme analizi ortalama bağlantı (gruplar arasında) kullanılarak gerçekleştirilmiştir).

Figure 3. Dendrogram produced using 21 parameters of groundwater in the study area. (Hierarchical cluster analysis was performed using average linkage).



Şekil 4. Çalışma alanındaki suların Piper diyagramı (a: kaynaklar, b: akarsular).

Figure 4. Piper diagram of the waters in the study area (a: springs, b: streams).

bu ölçüm noktaları cevherli alanlar ve maden atıklarının bulunduğu sahalardan beslenen akarsulardır. KD-3, KD-4 ve KD-7 örnekleri ise Ca-HCO₃ tipindedir. KD-4 akarsu örneği diğer akarsu örneklerine göre daha yüksek Na içermekte, KD-3 ve KD-7 örnekleri ise KD-4'den daha yüksek SO₄ içeriğine sahiptir. KD-3 ve KD-7 örnekleme noktaları, cevherli alanlar ile cevher mineralleri içermeyen jeolojik birimlerden akan akarsuların karışımı olan akarsulardır. Dolayısıyla bu akarsular seyrelmeye uğramışlardır. KD-4 ölçüm noktasının beslenme alanında ise güncel madencilik faaliyetleri ve atıkları bulunmamaktadır.

Çalışma alanındaki kaynak ve akarsuların çeşitli mineraller açısından doygunluk durumlarını saptamak amacıyla PHREEQC (Parkhurst ve Appelo, 1999) programı kullanılmış ve bu suların kurak dönemlerdeki doygunluk

durumları saptanmıştır (Çizelge 6). Genellikle çalışma alanındaki tüm sular kalsedon, kristobalit, kuvars gibi silikat minerallerine doymuş iken, karbonat, sülfür ve klorür minerallerine ise doymuş değildirler.

Minerallerin bozunması yeraltısuyuna major ve minör iyonların katılması için gereken başlıca proseslerden biridir. Doğal sularda var olan iz elementlerin en biyo-kullanılabilir ve zehirli olan formları serbest olan türleri olarak bilinmektedir (Apte vd., 1995; Edet vd., 2004). Çalışma alanındaki asidik yeraltısularındaki Al'nin ana türleri genellikle en zehirli formları olan (Bi, 2000) Al⁺³, AlSO₄⁺, AlOH⁺², Al(OH)₂⁺ ve Al(SO₄)₂⁻ (genellikle derişimi > [10⁻⁷ mol]) iken asidik olmayan kaynaklar ve akarsularda ise Al(OH)₄⁻, Al(OH)₂⁺ ve Al(OH)₃'tür. Çalışma alanındaki asidik yeraltısuları genellikle Al minerallerine doymuş değildirler. Sadece pH'ı di-

Ekemen Keskin, Toptaş, Ersöz

Çizelge 6. Çalışma alanındaki suların mineral doygunluk indeksleri.
Table 6. Mineral saturation indices of the waters in the study area.

Mineral	KK-1	KK-2	KK-3	KK-4	KK-5	KK-6	KK-7	KK-8	KK-9	KK-10	KK-11	KK-12	KK-13	KK-14	KK-15	KK-16	KK-17	KK-18	KK-19	KK-20
Adülyarya	-4.3	-6.6	-0.6	0.4	-0.5	0.4	2.0	-1.0	-0.5	-0.4	-6.4	-7.7	0.8	2.9	1.8	2.0	0.3	-6.7	-6.3	1.5
Albit	-6.7	-9.3	-3.0	-1.5	-2.8	-1.9	0.0	-2.9	-2.2	-2.3	-9.1	-11	-2.9	0.3	-0.4	-0.2	-1.4	-9.2	-8.6	-0.6
Alunit	1.1	-2.2	0.7	2.5	1.1	-3.7	8.0	-2.6	-1.0	-0.4	-2.0	-4.0	-2.6	1.7	-2.2	-2.8	0.2	-3.3	-2.4	1.8
Anortit	-12	-18	-3.4	-2.6	-4.5	-1.9	0.2	-3.7	-2.9	-3.2	-16	-21	-3.8	-0.8	-2.5	-1.8	-2.7	-19	-18	-2.1
Basaluminit	1.6	-5.2	4.6	8.0	7.6	2.5	13	3.6	7.2	7.4	-4.5	-8.0	5.4	7.6	5.2	4.2	6.9	-8.6	-6.2	7.9
Böhmit	-0.2	-2.6	2.0	2.1	1.8	1.7	3.3	1.6	2.1	2.1	-2.5	-3.6	1.7	2.3	1.9	1.8	2.1	-3.8	-3.0	2.2
Kalsedon	-0.1	0.2	-0.2	0.2	0.0	-0.1	0.4	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.3	-0.3	0.6	0.5	0.5	0.1	0.6	0.5	0.4
Kristobalit	0.0	0.3	-0.2	0.3	0.1	0.0	0.5	-0.1	0.0	0.0	0.3	0.4	-0.2	0.7	0.6	0.5	0.2	0.7	0.6	0.5
KuproFerrit	4.6	2.9	13	11	9.8	14	10	12	12	12	0.7	-2.2	12	12	11	12	12	0.5	-0.1	10
Diyaspor	1.6	-0.8	3.8	4.0	3.7	3.5	5.1	3.5	4.0	4.0	-0.7	-1.8	3.6	4.2	3.8	3.7	4.0	-2.0	-1.2	4.1
Gibsit	0.5	-1.9	2.6	2.9	2.6	2.3	4.0	2.3	2.9	2.9	-1.8	-2.9	2.5	3.1	2.6	2.6	2.9	-3.1	-2.3	2.9
Götit	-1.0	-2.5	6.2	4.0	3.5	7.9	4.3	5.5	5.5	4.8	-3.5	-5.5	5.8	5.3	4.6	5.8	5.2	-2.9	-4.1	3.8
Halloysit	-2.8	-7.0	1.3	2.5	1.6	1.0	5.2	0.7	2.0	2.1	-6.8	-8.8	0.8	3.8	2.7	2.5	2.3	-8.6	-7.1	3.1
Hematit	-0.2	-3.0	14	9.9	8.9	18	11	13	13	12	-5.0	-9.1	14	13	11	14	12	-3.8	-6.2	9.6
Illit	-3.8	-9.2	2.9	4.5	3.0	3.8	7.7	2.2	3.8	3.7	-8.8	-12	2.6	7.2	5.5	5.6	4.4	-11	-9.1	5.6
Kaolinit	2.5	-1.7	6.4	7.8	7.0	6.2	10	6.0	7.3	7.4	-1.5	-3.5	6.2	9.0	8.0	7.7	7.6	-3.3	-1.9	8.4
Kimika	2.1	-4.9	10	12	10	11	16	9.2	11	11	-4.5	-7.9	9.7	15	13	13	12	-7.5	-5.4	13
Magnetit	-5.6	-8.9	14	7.8	6.5	18	8.9	12	12	12	-12	-18	13	11	9.4	13	11	-9.7	-14	7.3
NaK-Montmorillonit	-2.3	-6.1	4.5	5.0	3.0	5.2	7.9	3.4	4.2	3.9	-6.3	-8.4	2.8	7.4	5.9	6.4	4.9	-6.6	-5.9	5.8
Ca-Montmorillonit	-0.5	-5.3	4.7	6.7	5.4	5.0	10	4.3	5.9	6.0	-5.0	-7.4	4.3	8.8	7.4	7.2	6.4	-6.6	-5.0	7.7
Profillit	3.3	-0.5	7.9	8.9	7.0	7.1	13	6.6	7.3	7.5	-0.6	-2.4	5.5	11	9.4	9.3	8.4	-1.4	0.0	9.6
Kuvars	0.4	0.7	0.3	0.7	0.5	0.4	0.9	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.2	1.1	1.0	0.9	0.6	1.1	1.0	0.9

Çizelge 6. Devam.
Table 6. Continued.

Mineral	KA-1	KD-7	KD-6	KD-5	KD-4	KD-3	KD-2	KD-1	KK-31	KK-30	KK-29	KK-28	KK-27	KK-26	KK-25	KK-24	KK-23	KK-22	KK-21
Adularya	4.4	0.9	0.7	1.6	-0.4	1.0	0.9	1.6	-7.3	-7.2	2.0	2.8	0.5	0.4	0.8	1.8	2.2	2.3	1.4
Albit	2.7	-1.1	-1.5	-0.6	-2.4	-0.9	-1.4	-0.4	-9.6	-8.9	-0.3	0.7	-0.9	-0.6	-0.4	-0.6	-0.1	0.1	-1.0
Alumit	4.0	-3.6	0.2	2.6	-4.0	-0.8	3.0	0.7	-2.8	-3.9	-1.2	-0.8	-4.5	-5.1	-1.1	-0.4	0.8	-8.7	1.1
Anortit	3.5	-0.9	-0.5	0.1	-2.6	-0.9	-0.9	0.4	-19	-20	-1.2	-0.6	-2.4	-1.9	-1.7	-2.5	-1.8	-1.8	-3.2
Basaluminit	8.6	-0.5	4.8	7.1	0.9	3.4	7.2	4.2	-6.7	-10	5.1	5.9	2.0	2.0	5.6	6.6	7.8	-2.0	7.1
Böhmit	3.2	1.3	2.2	2.5	1.6	1.8	2.5	2.1	-3.1	-4.2	1.9	2.1	1.4	1.5	2.0	2.0	2.2	1.0	2.0
Kalsedon	0.5	0.1	-0.1	0.1	-0.2	0.1	0.0	0.1	0.3	0.7	0.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5
Kristobalit	0.5	0.2	0.0	0.2	-0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	0.8	0.4	0.7	0.4	0.3	0.4	0.6	0.6	0.7	0.6
KuproFerrit	17	14	15	15	14	14	13	15	-0.1	0.5	12	12	12	13	12	11	11	13	9.5
Diaspor	5.0	3.1	4.0	4.3	3.4	3.6	4.3	3.9	-1.3	-2.3	3.8	3.9	3.2	3.3	3.8	3.9	4.1	2.8	3.8
Gibsit	3.8	2.8	2.8	3.2	2.2	2.4	3.1	2.7	-2.4	-3.5	2.6	2.8	2.1	2.2	2.7	2.8	3.0	1.7	2.7
Götit	10	7.8	8.3	7.9	7.5	7.8	6.4	8.2	-4.6	-2.7	5.8	6.0	6.0	6.6	5.0	4.4	4.4	7.0	3.2
Halloysit	5.0	1.9	1.9	3.0	0.5	1.6	2.7	2.1	-7.8	-9.1	2.4	3.2	1.2	1.3	2.5	2.9	3.5	1.0	2.8
Hematit	22	18	19	18	17	18	15	19	-7.3	-3.5	14	14	14	15	12	11	11	16	8.4
Illit	9.8	4.7	4.7	5.2	2.7	4.7	5.2	5.6	-10	-11	5.8	7.0	3.8	4.0	5.0	5.6	6.5	5.0	5.2
Kaolinit	10	7.1	7.1	8.2	5.7	6.8	7.9	7.3	-2.5	-3.9	7.7	8.5	6.5	6.6	7.8	8.2	8.8	6.2	8.1
Kimika	17	12	12	14	9.5	11	13	13	-6.6	-8.6	13	14	10	10	12	13	14	11	12
Magnetit	25	20	20	19	17	18	15	19	-15	-9.0	13	13	13	15	10	8.8	8.8	16	5.7
NaK-Montmorillonit	11	6.3	6.3	7.3	4.8	6.5	6.2	7.4	-7.0	-6.5	6.2	7.5	5.4	5.7	6.0	5.8	6.5	6.7	5.3
Ca-Montmorillonit	11	6.1	6.1	7.5	4.1	5.9	6.9	6.6	-6.2	-7.1	7.1	8.3	5.6	5.7	7.1	7.6	8.4	5.9	7.3
Profilit	13	8.2	8.7	9.9	7.2	8.7	9.5	9.4	-1.1	-1.5	8.9	10	8.0	8.0	9.3	9.5	10	8.5	9.5
Kuvars	0.9	0.6	0.4	0.6	0.3	0.6	0.5	0.6	0.8	1.2	0.8	1.1	0.8	0.7	0.8	1.0	1.0	1.1	1.0

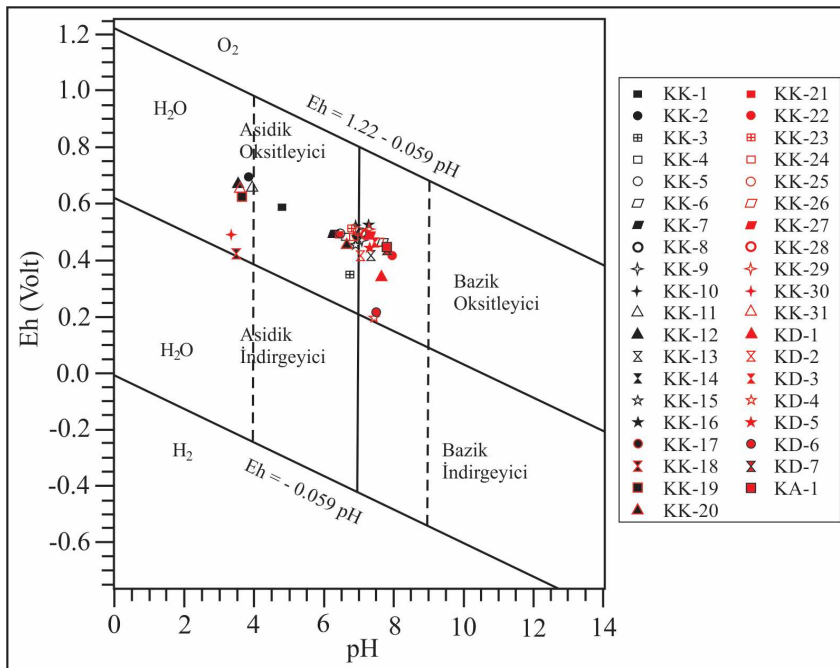
Koyu yazılan rakamlar suların ilgili minerallere uygunluğunu belirtmektedir.

ğer asidik kaynaklardan bir miktar daha yüksek olan (pH = 4.8) KK-1 Kaynağı, alünit, basaluminit, diyaspor, gibsit, kaolinit, K-mika, profil-lit gibi bazı Al içeren minerallere doygundur. Bununla birlikte asidik olmayan kaynaklar ve akarsular genellikle adularya ($KAlSi_3O_8$), alunit ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$), basaluminit ($Al_4(OH)_{10}SO_4$), böhmit ($AlOOH$), diyaspor ($AlOOH$), gibsit ($Al(OH)_3$), halloysit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), illit ($K_{0.6}Mg_{0.25}Al_{2.3}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$), kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), Kmika ($KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$), NaK-montmorillonit ($HNaK_{0.09}Mg_{0.29}Fe_{0.24}Al_{1.57}Si_{3.93}O_{10}(OH)_2$), Ca-montmorillonit ($Ca_{0.165}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$) ve profillit ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$) gibi Al içeren minerallere aşırı doygundurlar.

Asidik kaynaklardaki ana Cu türleri genellikle Cu^{+2} (genellikle derişimi $> [10^{-7}-10^{-8} \text{ mol}]$) iken, asidik olmayan kaynaklar ve akarsularda ise genellikle $Cu(OH)_2$ ve Cu^{+2} 'dir.

Asidik kaynaklar, asidik olmayan kaynaklar ve akarsular genellikle Cu ve Fe içeren kuproferit ($CuFeO_2$) mineraline doygundurlar. Ayrıca asidik olmayan kaynaklar ve akarsular genellikle Fe içeren götit ($FeOOH$), hematit (Fe_2O_3) ve magnetit (Fe_3O_4) minerallerine aşırı doygun iken asidik sular doygun değildirler. Asidik yeraltısularında ana Fe türleri genellikle Fe^{+2} ve $FeSO_4$ (genellikle derişimi $> [10^{-7}-10^{-8} \text{ mol}]$) iken asidik olmayan kaynaklar ve akarsularda ise genellikle sırasıyla Fe^{+2} , Fe^{+2} , $Fe(OH)_3$, ve $Fe(OH)_2^+$ (genellikle derişimi $> [10^{-7} \text{ mol}]$)'dir. Asidik suların birçok mineral açısından doygun olmaması, bu sulara Al ve Fe gibi bazı iz elementlerin daha fazla çözünebilir olması ile desteklenmektedir.

Şekil 5'te verilen Eh-pH diyagramına (Krauskopf, 1967; Akçay, 2002) bakıldığında asidik sular genellikle asidik-oksitleyici sular



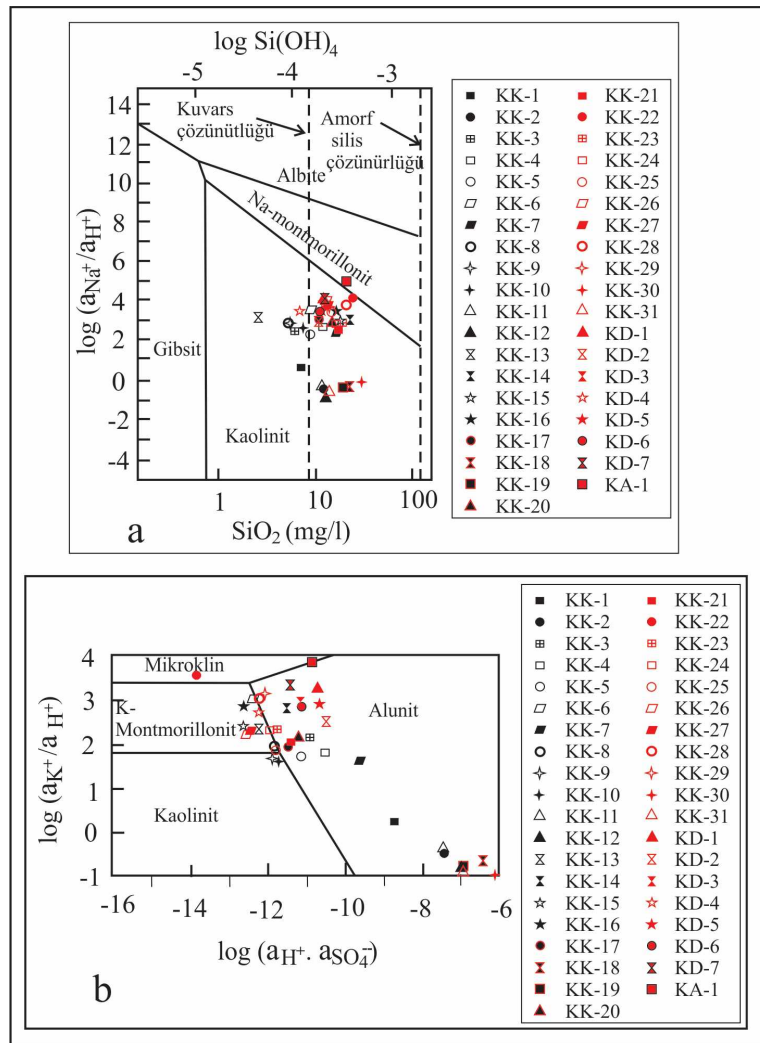
Şekil 5. Doğal ortamlarda suyun alt ve üst duraylılık alanları (Krauskopf, 1967; Akçay, 2002).

Figure 5. Upper and lower limits of water stability at the natural environments (Krauskopf, 1967; Akçay, 2002).

sınıfına girmektedir. Bununla birlikte KK-18 ve KK-30 kaynakları ise asidik-indirgeyici sular sınıfına yakın bulunmaktadır. Bu durum bu sularda Fe ve Mn konsantrasyonunun diğer sulardan daha yüksek olmasına yol açmıştır. Diğer sular ise genellikle bazik-oksitleyici sular

sınıfına girmektedir fakat KD-4 ve KD-6 akarsu örnekleri bazik-indirgeyici sular sınıfına yakın bulunmaktadır.

Bazı minerallerin 25 C° ve 1 atm basınç altında kararlılık ilişkileri, çeşitli aktivitelerin logaritmik fonksiyonu olarak Şekil 6'da



Şekil 6. 25 C° ve 1 bar basınçta gibsite, kaolinit, montmorillonit ve feldspatın duraylılık ilişkileri (a: gibsite-kaolinit-Na montmorillonit ve albite, b: kaolinit-alunit-K- montmorillonit ve mikroklın (Tardy, 1971; Knight, 1977; Freeze ve Cherry, 1979; Karakaya vd., 2007).

Figure 6. Stability relations for gibbsite, kaolinite, montmorillonite and feldspar at 25 °C and 1 bar (a: gibbsite-kaolinite-Na montmorillonite and albite, b: kaolinite-alunite-K- montmorillonite and microcline (Tardy, 1971; Knight, 1977; Freeze and Cherry, 1979; Karakaya et al., 2007).

gösterilmiştir. Bu şekile göre çalışma alanındaki sular kaolinit, alunit ve K-montmorillonit (bir kısmı) kararlılık alanına girmektedirler (Tardy, 1971; Freeze ve Cherry, 1979). Bir başka ifade ile, silikat mineralleri bozduğunda, kaolinit, alunit ve K-montmorillonit olarak kararlı halde bulunabileceklerini göstermektedir. Alunit, asidik ve sülfat taşıyan hidrotermal akışkanlar tarafından ana volkanik ve volkanosedimanter kayaların bozunması sonucu meydana gelmektedir (Hemley vd., 1969; Baba ve Gündüz, 2010).

Aktivite diyagramı ile doygunluk analizleri karşılaştırıldığında, asidik sular hariç, aktivite diyagramına göre kaolinit, alunit ve NaK-montmorillonit alanında kararlı olan suların, aynı zamanda bu mineraller açısından doygun oldukları anlaşılmaktadır (Çizelge 6). Asidik sular ise diğer sulardan farklı bir bölgede konumlanmakla birlikte, kaolinit ve alunit bölgelerinde kararlılık göstermektedirler. Fakat bu sular (KK-1 hariç) bu mineraller açısından doygun değildir. Bu durum, asidik suların dengede olmadıklarını ve mineralleri çözmeye devam edebileceklerini göstermektedir.

SONUÇLAR

Pb-Zn-Cu cevherleşmelerinin bulunduğu Kurşunlu (Ortakent-Koyulhisar-Sivas) maden sahasında bu cevherleşmelerden kaynaklanan olası kirliliğin boyutlarının ve yayılımının belirlenmesi amacıyla yüzey ve yeraltısularında çalışmalar yapılmış ve bazı major ve iz element kirlilikleri saptanmıştır. Bu kirlilikler özellikle sülfürlü cevherleşmeler içeren Üst Kretase volkaniklerinde gözlenmektedir. Sülfürlü cevherleşmelerin bulunduğu Üst Kretase

volkanikleri ve Kurşunlu Pb-Zn-Cu maden zonlarındaki bozunma- ve oksidasyon prosesleri ve bunların hızlanmasına neden olan madencilik faaliyetleri bölgedeki yeraltı ve yüzeysularının fizikokimyasal proseslerini etkilemektedir. Bu durum sülfürlü cevherleşme zonlarının bulunduğu Üst Kretase volkanitlerinden boşalan kaynak sularında ve akarsularda Al, Fe, Mn, Pb ve SO₄ kirliliklerinin oluşmasına neden olmuştur.

Al, Fe, Mn, Pb ve SO₄ kirliliği saptanan kaynakların birçoğu çevre köylerin içme ve kullanma suyu ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. KK-1 ve KK-2 kaynakları Güzelyurt köyü içme suyu olarak kullanılmakta, KK-7 kaynağı Yenice köyü köy çeşmesi olarak kullanılmaktadır. KK-11 kaynağı Kurşunlu köyü içme suyu olarak kullanılmakta ve bu kaynak yetersiz kaldığında KK-12 kaynağından takviye yapılması planlanmaktadır. KK-31 kaynağı ise Güzelyurt köyü güzergahında yol kenarında çeşme olarak kullanılmaktadır.

KK-1, KK-2, KK-7, KK-11, KK-12, KK-18, KK-19, KK-30, KK-31 kaynaklarının Al değerleri 0.0456-8.829 mg/L arasında olup, standartlardaki sınır değerinin birkaç kat üzerine çıkmaktadır. KK-2, KK-3, KK-18 ve KK-30 kaynaklarının Fe değerleri Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standartları'nda üst sınır değeri olan 0.2 mg/L'yi birkaç kat aşmakta olup, KK-12, KK-18, KK-19, KK-30 ve KK-31 kaynaklarının Mn miktarları ise Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standartları'nda üst sınır olan 0.05 mg/L değerini aşmaktadır. KK-2 kaynağının kurşun konsantrasyonu, kurak dönemdeki 0.016 mg/L ve yağışlı dönemdeki 0.0122 mg/L değeri ile Türk İnsani Tüketim Amaçlı Sular ve Dünya İçme Suyu Standartları'ndaki üst sınırı aşmaktadır. Üst Kretase volkaniklerinin cevherli zonların

bulunmadığı (çalışma alanının güney kısmında) kısımlarında ve çalışma alanındaki diğer birimlerden boşalan kaynaklarında herhangi bir kirlilik saptanmamıştır.

Çalışma alanındaki akarsuların Al, Fe, Mn ve Pb konsantrasyonları, (KD-4 hariç) kurak ve/veya yağışlı dönemlerde, standartlarında verilen üst sınır değerleri aşmakta veya bu değerlere yakın değerler vermektedir.

Çalışma alanındaki yeraltısularında, Na, Ca, Mg, SO₄, Fe, Mn, Co ve Al arasında çoğunlukla kuvvetli pozitif korelasyonlar saptanmıştır. Bu durum, cevherli volkanik kayalardan beslenen suları göstermektedir. SO₄ ile pH arasındaki negatif korelasyon ve SO₄ ile Al, Co, Fe, Mn ve Zn arasındaki kuvvetli pozitif korelasyonlar mevcuttur. Bu durumlar, çalışma alanındaki sulardaki düşük pH ve yüksek Al, Fe, Mn ve SO₄ konsantrasyonlarını kontrol eden en önemli faktörün yüzey/yüzeyaltı/yeraltı pirit oksidasyon prosesleri olduğunu göstermektedir. Çalışma alanındaki yeraltısuları için yapılan faktör analizinde, 1. faktördeki önemli değişkenler Co, SO₄, ÖEİ, Mn, Mg, Fe, Zn, Al, Ca, Ni ve pH olup, bu gruptaki sular cevherli volkanik kayaların çözünmesiyle bu elementlerce zenginleşen, sülfürlü cevherleşmelerden kaynaklanan oksidasyon proseslerinden etkilenen ve zehirli metal ve kompleksler tarafından kirlenen yeraltısularını temsil etmektedir. Kümeleme analizinde ise bu sular diğer gruplardan ayrılarak 2 grup oluşturmuşlardır. Bu sonuçlar, istatistiksel yöntemlerin, bu çalışmada olduğu gibi farklı proseslerden etkilenen suları (örneğin, sülfürlü cevherleşmelerin oksidasyonu ve asit maden drenajı) ayırmadaki önemini göstermektedir.

Akarsulara ve bu alanların yakınlarına atılan madencilik atıkları, bölgedeki suların (özellikle

yüzeysularının) kirlenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bölgedeki suların daha fazla kirlenmemesi için gerekli tedbirlerin alınması önerilmektedir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar finansal desteğinden dolayı Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı'na ve arazi çalışmaları sırasındaki katkılarından dolayı köy halklarına teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR

- Akçay, M., 2002. Jeokimya: Temel Kavramlar ve Uygulamaya Aktarım. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, Trabzon, 506.
- Altun, İ.E., Senin, M., Akbaş, B., Keskin, H., Mengi, H., Köse, Z., Arslan, H., Deniz, N., Yaşar, T., Erdoğan, K., Acar, Ş., 1994. Giresun-Piraziz-Şebinkarahisar arasında kalan bölgenin jeolojisi. Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Appelo C.A.J., Postma, D., 1996. Geochemistry, Groundwater and Pollution. A.A. Balkema, Rotterdam, 536 p.
- Apte, S.C., Benko, W.I., Day, G.M., 1995. Partition and complexation of copper in the Fly River, Papua, New Guinea. Journal of Geochemical Exploration, 52, 67-79.
- Atilla, A.Ö., Arıkan, A., 2001. Antalya traverten platosu yeraltısularının kümeleme ve faktör analizi ile sınıflandırılması. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 25, 41-53.
- Baba, A., Gündüz, O., 2010. Effect of alteration zones on water quality: a case study from Biga Peninsula, Turkey. Archives of Environmental

Ekemen Keskin, Toptaş, Ersöz

- Contamination and Toxicology, 58, 499-513.
- Bi, S., 2000. Speciation of aluminium in the stream waters from the Susquehanna River watershed, Chesapeake Bay. *Environmental Geology*, 40, 300-304.
- Edet, A.E., Merkel, B.J., Offiong, O.E., 2004. Contamination risk assessment of fresh groundwater using the distribution and chemical speciation of some potentially toxic elements in Calabar (southern Nigeria). *Environmental Geology*, 45, 1025-1035.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, New Jersey, 604 p.
- Gökçe, A., Özgüneylioğlu, A., 1988. Kurşunlu (Ortakent-Koyulhisar-Sivas) Pb-Zn-Cu yataklarının jeolojisi, oluşumu ve kökeni. *Yerbilimleri, Mühendislik Fakültesi Bülteni, Cumhuriyet Üniversitesi*, 5, 23-36.
- Gündüz, O., Baba, A., 2008. Fate of acidic mining lakes in Can Lignite District, Turkey. In *Proceedings of the XXXVI IAH congress integrating groundwater science and human well-being*, Proceedings CD-ROM, 26 October–1 November 2009, Toyoma, Japan.
- Gündüz, O., Okumuşoğlu, D., Baba, A., 2007. Acidic mining lakes and their influence on water quality: a case study from Can (Canakkale)-Turkey. In: Trefry MG (ed) *Proceedings of the 6th groundwater quality conference (GW07: securing groundwater quality in urban and industrial environments)*, Fremantle, Western Australia.
- He, Z.L., Yang, X.E., Stoffella, P.J., 2005. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 19, 125-140.
- Hemley, J.J., Hostetler, P.B., Gude, A.J., Mountjoy, W.T., 1969. Some stability relations of alunite. *Economic Geology*, 64, 599-612.
- Inc, S., 2006. *SPSS for Windows (15.0 ed.)*. SPSS 15.0 Command Syntax Reference, Chicago Ill.
- Karakaya, N., Karakaya, M.Ç., Nalbantçılar, M.T., Yavuz, F., 2007. Relation between spring-water chemistry and hydrothermal alteration in the Şaplıca volcanic rocks, Şebinkarahisar (Giresun, Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*, 93, 35-46.
- Keskin, T.E., Toptaş, S., 2012. Heavy metal pollution in the surrounding ore deposits and mining activity: a case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 67, 859-866.
- Knight, J.E., 1977. A thermochemical study of alunite, enarjite, luzonite and tennantite deposits. *Economic Geology*, 72, 1321-1336.
- Krauskopf, K.B., 1967. *Introduction to Geochemistry*. New York, McGraw Hill, 721 p.
- MTA, 2009. 1/100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları-Giresun G39, G40, H39, H40 paftaları. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Araştırma Dairesi, Ankara (yayımlanmamış).
- Özdamar, K., 1999. *Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi 2 (Çok Değişkenli Analizler)*. Kaan Kitabevi, Eskişehir, 502 s.
- 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*. US Geological Survey, Denver, 312 p.
- Piper, A.M., 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*, 25, 914-923.
- Seal, R.R. II, Hammarstrom, J.M., Johnson, A.N., Piatak, N.M., Wandless, G.A., 2008. Environmental geochemistry of a Kuroko-type massive sulfide deposit at the abandoned Valzinco mine, Virginia, USA. *Applied Geochemistry*, 23, 320-342.

- Smedley, P.L., Edmunds, W.M., Pelig-Ba, K.B., 1996. Mobility of arsenic in groundwater in the Obuasi gold-mining area of Ghana: some implications for human health. *Special Publications Geological Society London*, 113, 163-181.
- Tardy, Y., 1971. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crastakine massifs. *Chemical Geology*, 7, 253-271.
- Sağlık Bakanlığı, 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. Sağlık Bakanlığı, Ankara, Turkey.
- Şahin, A., 2008. Risk Koşullarında Tarım İşletmelerinin Planlanması: Oyun Teorisi Yaklaşımı. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 219 s.
- Uysal, Ş., Bedi, Y., Kurt, İ., Kılınç, F., 1995. Koyulhisar (Sivas) dolayının jeolojisi. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Araştırma Dairesi, Ankara.
- WHO (World Health Organization), 2006. Guidelines for Drinking-Water Quality. First Addendum to Third Edition, 1, Recommendation. Geneva Switzerland.

Kaya Şev Duraylılığının Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi (Ünye, Ordu)

Evaluation of Rock Slope Stability by Different Methods (Ünye, Ordu)

Kadir KARAMAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, TRABZON

Geliş (received) : 01 Şubat (February) 2013

Düzeltilme (revised) : 07 Mart (March) 2013

Kabul (accepted) : 19 Mart (March) 2013

ÖZ

Bu çalışmada, iki adet kaya şevinin duraylılığı kinematik analizler, Olasılıksal Şev Duraylılığı Sınıflandırma Sistemi (SSPC) ve Şev Kütle Puanlaması (SMR) ile değerlendirilmiştir. Kinematik analiz sonuçları şevlerde düzlemsel, kama tipi ve devrilme türü yenilmelerin oluşmayacağını göstermiştir. SSPC yönelime bağlı duraylılık analizine göre; şev-1 kayma türü yenilmeye karşı % 100, devrilme türü yenilmeye karşı > % 95 duraylıdır. Şev-2 kayma ve devrilme türü yenilmeye karşı > % 95 duraylıdır. Yönelimden bağımsız duraylılık analizine göre şevlerin duraylı kalabileceği yükseklikler ve eğim açıları belirlenmiştir. Yönelimden bağımsız duraylılık analizine göre güvenli şev açıları şev-1 için 75° ve şev-2 için 70° olarak bulunmuştur. SMR sistemine göre şev-1 “kısmen duraylı” şev-2 ise “duraysız” sınıfına dahil olmuştur.

Anahtar kelimeler: Kinematik analiz, Olasılıksal Şev Duraylılığı Sınıflandırma Sistemi (SSPC), Şev Kütle Puanlaması (SMR), Şev stabilitesi.

ABSTRACT

In this study, the stability of two rock slopes was evaluated by means of kinematic analysis, Slope Stability Probability Classification System (SSPC), and Slope Mass Rating (SMR). The results of the kinematic analyses have revealed that planar, wedge and toppling failures would not occur in the analyzed slopes. Based on the SSPC orientation-dependent stability analysis, the slope-1 has 100% stability against the sliding failure, and over 95% stability against the toppling failure. The probability of stability of the slope-2 is over 95% against the sliding and toppling failures. The maximum possible heights and dip angles of the slopes were determined according to the orientation-independent stability analysis. Based on the SSPC orientation-independent stability analysis, the angles for a safe slope are proposed to be 75° for the slope-1 and 70° for the slope-2. According to the SMR system, the stabilities of the slope-1 and the slope-2 were determined as “partially stable” and “unstable”, respectively.

Key Words: Kinematic analysis, Slope Stability Probability Classification System (SSPC), Slope Mass Rating (SMR), Slope stability.

K. Karaman

E-Posta: kadirkaraman@ktu.edu.tr

GİRİŞ

Kaya şevi duraylılığının incelenmesi, açık ocak madenleri ve karayolları gibi birçok mühendislik sürecinin tasarlanması için oldukça önemlidir. Uygun ve doğru yöntemler kullanılarak yapılan şev tasarımları sadece şev duraylılığını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda kazaları azaltarak güvenli ortamda çalışma imkanı da sağlar. Kaya şevlerindeki yenilmeler çoğunlukla kütle içindeki süreksizliklere bağlıdır. Kaya şev problemlerinin çoğu süreksizlikler arasında geometrik ilişkilerin değerlendirmesini gerektirdiğinden (Koca, 1995; Bye ve Bell, 2001; Hack vd., 2003; Koca ve Kıncal, 2004; Kıncal ve Koca, 2009), süreksizliklerin kinematik olarak değerlendirilmesi kaya mühendisliği alanında önemli bir konudur.

Kaya şev duraylılığının değerlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemler vardır. Şev duraylılığı genellikle kinematik analizler, limit denge analizleri, sayısal analizler (nümerik) ve Şev Kütle Puanlaması (SMR) gibi kaya kütle sınıflandırma sistemleri ile değerlendirilmektedir (Hoek ve Bray 1981; Hoek, 1999; Ulusay vd., 2001; Pantelidis, 2009; Alejano vd., 2011). Veri olarak, şev geometrisi ve süreksizliklerin kayma dayanımı parametrelerinden içsel sürtünme açısının kullanıldığı kinematik analizler, kaya şevlerindeki yenilmelerin süreksizlikler tarafından kontrol edildiği durumlarda kullanılabilir (Kliche, 1999; Kıncal ve Koca, 2009; Kulatilake vd., 2011). Kinematik analizler ile kaya şevlerindeki olası yenilme türleri (düzlemsel, kama tipi ve devrilme türü yenilmeler) belirlenebilmektedir. Kinematik analiz sonucunda herhangi bir yenilme tehlikesi ortaya çıkarsa, limit denge analizleri ile olası tehlike araştırılır. Limit denge analizleri yenilme düzlemi boyunca gelişen makaslama dayanımını,

boşluk suyu basıncını ve maksimum yatay yer ivmesi gibi dış kuvvetleri dikkate almaktadır (Kentli ve Topal, 2004; Gürocak vd., 2008). Limit denge analizleri şevlerin duraylılığının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan basit bir yöntem olmasına rağmen, şevler kazı örselenmesi, süreksizlik yönelimleri gibi karmaşık mekanizmalar tarafından duraysızlığa uğradığında limit denge analizleri zaman zaman yetersiz kalmaktadır (Eberhardt, 2003).

Kaya kütle sınıflandırmaları tünel ve yer-altı madenciliğinde yıllarca başarı ile uygulanmaktadır (Barton 1976, 1988; Bieniawski, 1989; Laubscher, 1990). Yeraltı kazıları için geliştirilen bazı kaya kütle sınıflandırmaları sonraki yıllarda şevler için de uygulanabilmiş (Bieniawski, 1989) veya yeniden düzenlenmiştir (Haines ve Terbrugge, 1991; Romana, 1985, 1991; Selby, 1980, 1982). Shuk (1994) ve Hack (1998) özellikle kaya şev duraylılığının değerlendirilebilmesi için farklı sistemler geliştirmişlerdir. Ancak, kaya kütle sınıflandırma sistemleri çoğunlukla yüzeyleşmiş kaya şevleri ile oluşturulacak kaya şevleri arasında bir ayırım yapmamaktadır. Ayrışma durumu ve kazı yöntemi gibi etkenler farklılığın ana nedeni olabilmektedir (Hack vd., 2003). Ayrıca şevlerin duraylı kalabileceği en büyük şev yüksekliği değerini de birçok kaya kütle sınıflandırma sistemi dikkate almamaktadır. Bu nedenle, Hack (1998) tarafından geliştirilen Olasılıksal Şev Duraylılığı Sınıflandırma Sistemi (SSPC); olasılıksal olarak şev duraylılığını değerlendiren bir sistemdir. SSPC özellikle üç konuda diğer sınıflama sistemlerine üstünlük sağlamaktadır: (1) Yüzeyleşmiş, referans ve şev kaya kütleliğini tanımlamak için “üç adım sınıflama sistemi”ni sunar. (2) Tek bir puan vermek yerine farklı yenilme mekanizmalarının

meydana gelme olasılığını belirterek duraylılık değerlendirmesi yapar. (3) Arazide veri toplamak için basit işlemler uygular. SSPC sistemi, kaya kütlelerinin makaslama dayanım parametrelerinin belirlenmesinde, yamaçların duraysızlığının değerlendirilmesinde ve kaya kütlelerinde açılan veya açılacak olan kazı şevlerindeki yenilme olasılığının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Hack, 1998; Lindsay vd., 2001; Hack vd., 2003). Lindsay vd. (2001) kaya kütle dayanımı, içsel sürtünme açısı, kaya kütlelerinin kohezyonu gibi tasarım parametrelerine ek olarak, SSPC sisteminin, şevlerin duraylı kalabileceği en büyük şev yüksekliğini ve kinematik analizleri içerdiğini belirtmiştir. SSPC sistemi üç adım yaklaşımı (Yüzeylenmiş Kaya Kütleli (ERM), Referans Kaya Kütleli (RRM) ve Şev Kaya Kütleli (SRM)) ile geçmişteki ve gelecekteki ayrışmaları, kazı yönteminden kaynaklanan

örselenmeyi ve farklı yenilme mekanizmaları için olasılık değerlendirmesini içermektedir (Şekil 1). SSPC, kesme kutusu testi gibi ölçümü oldukça zor deneyler gerektirmemektedir (Hack, 2002; Hack vd., 2003). SSPC sisteminde duraylılık iki farklı koşul için olasılıksal olarak analiz edilir. Birincisi yönelime bağlı duraylılık analizi olup süreksizliklerin ve şevin yönelimi ile ilgilidir. İkincisi ise kaya kütlelerinin dayanımına, içsel sürtünme açısına ve kohezyonuna bağlı olarak gelişen yönelimden bağımsız duraylılık analizidir (şev ve süreksizliklerin yöneliminden bağımsız olarak gelişmektedir) (Hack, 1998).

Bu çalışmada, seçilmiş iki karayolu şevine SSPC sistemi uygulanmıştır. Söz konusu şevler, önce kinematik analizlerle, daha sonra ise literatürde oldukça yaygın kullanıma sahip olan SMR kaya kütle sınıflama sistemi ile değerlendirilmiştir.



Şekil 1. SSPC sisteminde üç adım yaklaşımın akım şeması (Hack vd., 2003).

Figure 1. Flow diagram of the three-step concept of the SSPC system (Hack et al., 2003).

ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

İnceleme alanı Orta Karadeniz Bölümü'nde Ordu ili Ünye ilçesine bağlı Saraycık köyü sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 2). Ünye ilçesine yaklaşık 20 km uzaklıktaki köyde, tipik Karadeniz iklimi görülmektedir.

Doğu Karadeniz Bölümü, Karadeniz'in güneydoğu sahili boyunca, yaklaşık 500 km uzunluğa ve 100 km genişliğe sahip bir dağ zincirinden oluşmaktadır ve jeolojik açıdan, Doğu Karadeniz kuzey ve Doğu Karadeniz güney olmak üzere iki zona ayrılmaktadır (Gedikoğlu vd., 1979; Özsayar vd., 1981). Doğu Karadeniz'in



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresine ait yerbuldurular haritası.

Figure 2. The location map of the study area.

kuzey zonunda Kretase öncesi jeolojik yapının büyük bir kısmını örten Geç Kretase–Eosen yaşlı volkanik ve volkanoklastik kayalar hakim olmakla birlikte Kretase öncesi kayaların da yaygın olarak yüzeylendiği Doğu Karadeniz’in güney zonunda, aynı zaman periyodunda, silisli tortul kayalar yaygın olarak yüzeylenmektedir (Okay ve Şahintürk, 1997). Çalışma sahasındaki şevler andezitlerden oluşmaktadır. Bu kayaların makroskopik incelemelerinde, ana mineralin plajiyoklas olduğu ve bunlara yer yer amfibol ve piroksen minerallerinin eşlik ettiği gözlenmiştir.

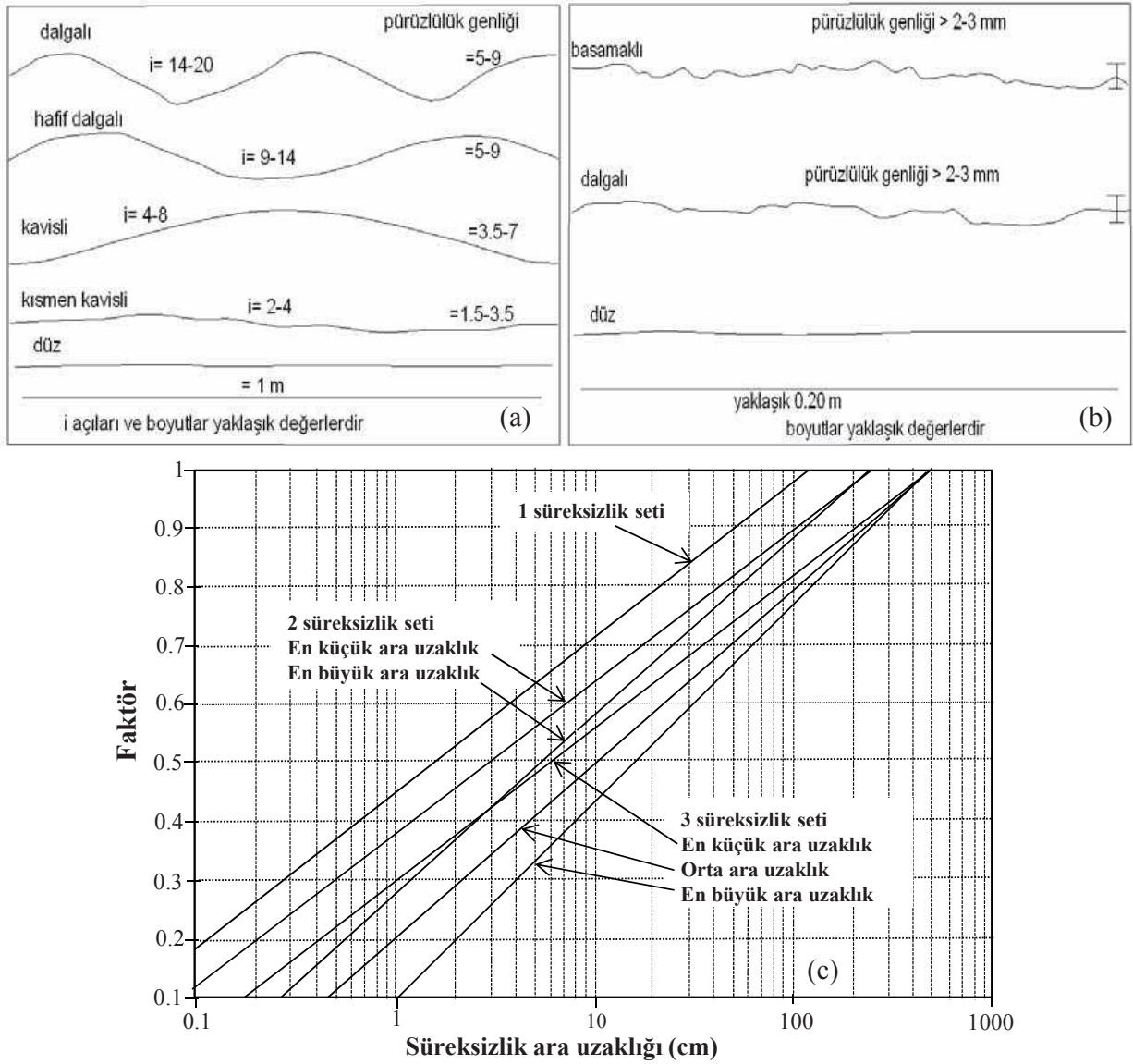
Çalışma alanında yüzeylenen kaya kütlelerinin mühendislik ve jeoteknik özellikleri laboratuvar deneyleri ve arazi ölçümleri/gözlemleri ile belirlenmiştir. Bu çalışmada, arazide gözlemsel olarak duraysızlık gelişmesi durumunda en çok etkilenecek olan iki adet kaya şevi seçilmiştir (Şekil 3a ve 3b). Büyük (Şekil 4a) ve küçük ölçekli pürüzlülük ölçümleri (Barton pürüzlülük tarağı ile) (Şekil 4b), dolgu malzemesi ve karstik koşulların değerlendirilmesi SSPC sistemine göre yapılmıştır (Çizelge 1).



Şekil 3. Şev-1 (a) ve şev-2'nin (b) görünümü.

Figure 3. The views of the slope-1 (a) and the slope-2 (b).

Karaman



Şekil 4. Büyük ölçekli (a) ve küçük ölçekli (b) pürüzlülük profilleri ve SPA parametresi için faktör hesabı (c).

Figure 4. Large-scale (a) and small-scale (b) roughness profiles and factor computation (c) for the SPA parameter.

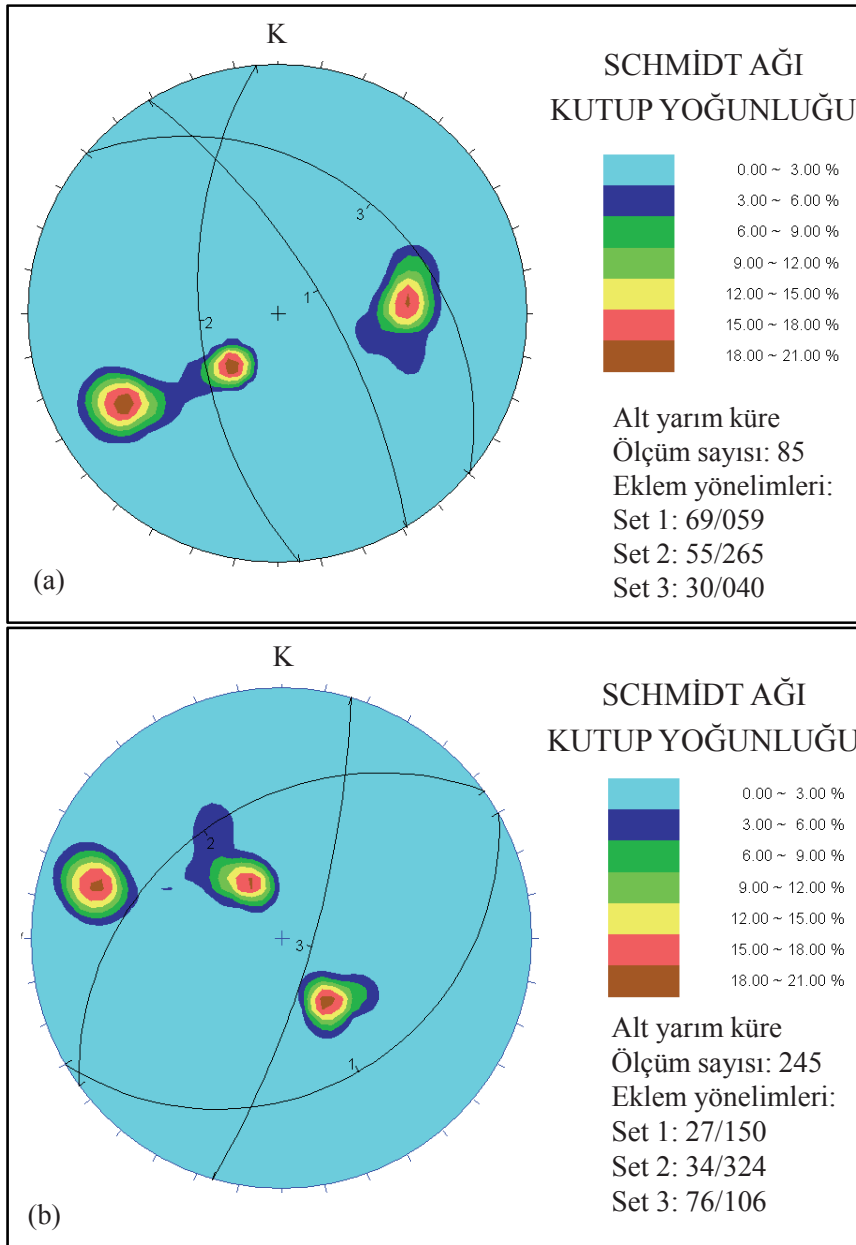
Andezitlerde karstik boşluk olmadığından karstik puanlama değeri olarak 1.00 alınmıştır. Şevlere ait kayaların süreksizlik parametreleri kaya yüzlekleri üzerinde ISRM (International Society for Rock Mechanics) tarafından önerilen

“Hat Etüdü Yöntemi” kullanılarak belirlenmiştir (ISRM, 1981). Toplam 330 adet süreksizlik ölçümü yapılmış, hem kinematik analizler hem de ana eklem setlerinin ortalama yönelimini belirlemek için DIPS 5.0 (Rocscience, 1999)

Çizelge 1. TC hesaplamasında kullanılan puanlamalar.

Table 1. Points used in the computation of the discontinuity condition factor (TC).

Büyük ölçekli pürüzlülük (R1)	Dalgalı		1.00	
	Hafif dalgalı		0.95	
	Kavisli		0.85	
	Hafif kavisli		0.80	
	Düz		0.75	
Küçük ölçekli pürüzlülük (Rs)	Pürüzlü basamaklı		0.95	
	Düz basamaklı		0.90	
	Kaygan basamaklı		0.85	
	Pürüzlü dalgalı		0.80	
	Düz dalgalı		0.75	
	Kaygan dalgalı		0.70	
	Pürüzlü düzlemsel		0.65	
	Düz düzlemsel		0.60	
	Kaygan düzlemsel		0.55	
Dolgu Malzemesi (Im)	Çimentolu/çimentolu dolgu		1.07	
	Dolgu yok/yüzey boyanmış		1.00	
	Yumuşamayan ve makaslanmamış	İri	0.95	
		Orta	0.90	
		İnce	0.85	
	Yumuşak veya makaslanmış	İri	0.75	
		Orta	0.65	
		İnce	0.55	
	Dolgu kalınlığı < pürüzlülük			0.42
		Dolgu kalınlığı > pürüzlülük		0.17
Malzeme akıcı				0.05
Karstik boşluk (Kc)		Yok		1.00
	Var		0.92	



Şekil 5. Şev-1 (a) ve şev-2'deki (b) süreksizliklerin kontur diyagramları.

Figure 5. Contour diagrams of discontinuities in the slope-1 (a) and the slope-2 (b).

bilgisayar programı kullanılmıştır. Süreksizlik düzlemlerinden alınan çatlak ölçümleri kontur diyagramları üzerinde değerlendirilmiş ve kontur diyagramı analizi sonucunda kaya kütlelerinde

gelişen süreksizliklerin her iki şev için de üç eklem takımından oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 5a ve 5b).

Şevlerde süreksizlik makaslama deneylerine yönelik süreksizlik içeren 10 adet örnek eğim yönleri işaretlenerek toplanmıştır. Süreksizlik makaslama deneyi için kalıplara sığmayan örnekler laboratuvarda taş kesme makinasında boyutları (50 mm x 50 mm) olacak şekilde ISRM (2007) tarafından önerildiği şekilde hazırlanarak kalıplara konulmuş ve deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 6a ve 6b).



Şekil 6. Süreksizlik içeren örnekler (a) ve süreksizlik makaslama deneyi için kalıp hazırlama (b).

Figure 6. Samples containing discontinuities (a) and mold making for the shear strength test (b).

Araziden laboratuvar ortamına getirilen blok örneklerden NX çapında (54.7 mm) karot örnekleri alınmıştır. Örneklerin alt ve üst kısımları karot kesme makinasında düzeltildikten sonra, tek eksenli basınç deneyi, beş (şev-1) ve üç adet örnek üzerinde (şev-2), yükleme hızı 0.5–1.0 MPa/s arasında olacak şekilde 300 ton kapasiteli bilgisayar kontrollü pres ile gerçekleştirilmiştir. Süreksizlik makaslama (içsel sürtünme açısı, f) ve tek eksenli basınç dayanım (UCS) deneyi sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Deney sonuçları.

Table 2. Results of the tests.

Şevler	Parametreler	Ortalama	Standart sapma	En düşük	En yüksek
Şev-1	UCS (MPa)	125	15.9	109.9	144.4
	f (°)	33	1.7	31.4	34.7
Şev-2	UCS (MPa)	74	10.6	64.4	85.5
	f (°)	27	1.0	26.1	28.0

ŞEV DURAYLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

Kinematik analizler

İlk olarak Hoek ve Bray (1981) tarafından tanımlanan, Goodman (1989) tarafından geliştirilen ve Wyllie ve Mah (2004) tarafından yeniden düzenlenen kinematik analiz yöntemi, kaya şevlerinin düzlemsel, kama tipi ve devrilme türü yenilmelerinin araştırılmasında kullanılmaktadır. Bu yöntem kayma düzleminin, makaslama dayanım parametrelerinden sadece içsel sürtünme açısını (f) dikkate almakta, kohezyonu dikkate almamaktadır. Bu çalışmada her iki karayolu şevi için projeksiyon teknikleri kullanılarak kinematik analizler gerçekleştirilmiş ve olası yenilme türleri belirlenmiştir. Her bir şevde üç adet ana eklem seti (J_1 , J_2 ve J_3) bulunmakta olup, Çizelge 3’te kinematik

Karaman

analizler sonucu bulunan baskın süreksizlik setlerinin yönelimi yer almaktadır.

Çizelge 3. Kinematik analizler sonucu belirlenen baskın süreksizlik yönelimleri.

Table 3. The orientations of the major discontinuities based on the kinematic analysis.

Şev No	Süreksizlik yönelimleri (eğim yönü/eğim açısı)			Şevin yönelimi (eğim yönü/eğim açısı)	Süreksizlik makaslama f (°)
	J ₁	J ₂	J ₃		
1	059/69	265/55	040/30	152/69	33
2	150/27	324/34	106/76	204/80	27

SSPC: yönelime bağlı duraylılık analizi

Süreksizlik yönelimine bağlı şev duraylılığını değerlendirmek için kullanılan SSPC sisteminde, sadece kayma ve devrilme tipi kütle hareketleri analiz edilebilmektedir. SSPC sisteminin en önemli eksikliği, kama tipi kayma analizi yapmamasıdır (Lindsay vd., 2001). Kayma kriterinde süreksizlik durum değeri (TC) ve süreksizliğin yamaç eğimi yönündeki görünür eğimi (AP) arasında bir ilişki dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada TC, Hack vd. (2003) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik yardımı ile elde edilmiştir:

$$TC = R_1 * R_s * I_m * K_c \quad (1)$$

Burada; R₁ ve R_s sırasıyla süreksizlik düzlemlerinin büyük ve küçük ölçekli pürüzlülük

puanlarını ifade etmektedir. I_m, süreksizliklerdeki dolgu malzemesi puanını, K_c ise süreksizlikler boyunca gelişen erime boşluklarının puanını ifade etmektedir. TC bu dört faktörün çarpımı ile elde edilmektedir. Bir süreksizlik için durum faktörü olan TC'nin hesaplamasında kullanılan süreksizlik setlerinin özellikleri Çizelge 4'te yer almaktadır. Aşağıda kayma (Eşitlik 2) ve devrilmenin (Eşitlik 3) oluşabileceği ön sınır koşullarını ifade eden eşitlikler verilmiştir. Söz konusu eşitliklerdeki durum geçerli olduğunda kayma ve/veya devrilme oluşabilmektedir (Hack vd., 2003).

$$TC < 0.0113 * AP \quad (2)$$

$$TC < 0.0087 * (-90^\circ - AP + \text{eğim}_{\text{süreksizlik}}) \quad (3)$$

$$AP = \arctan(\cos \delta * \tan \text{eğim}_{\text{süreksizlik}}) \quad (4)$$

Burada; $\delta = \text{eğim yönü}_{\text{şev}} - \text{eğim yönü}_{\text{süreksizlik}}$ eğer $AP > 0 \Rightarrow AP$; Süreksizlik düzleminin görünür eğim açısının şevin eğim yönünde olduğunu, eğer $AP < 0 \Rightarrow |AP|$; Süreksizlik düzleminin görünür eğim açısının şevin eğim yönüne zıt yönde olduğunu gösteren bir değerdir.

Yönelime bağlı duraylılık analizinde kayma ve devrilme yenilmesinin değerlendirilmesinde

Çizelge 4. TC hesaplamasında kullanılan eklem setlerinin SSPC sistemine göre puanları.

Table 4. Rates of the joint sets used in the computation of the discontinuity condition factor (TC) using the SSPC system.

Şev No	J ₁					J ₂					J ₃				
	Rl	Rs	Im	Kc	TC	Rl	Rs	Im	Kc	TC	Rl	Rs	Im	Kc	TC
1	0.80	0.75	1.00	1.00	0.60	0.80	0.80	1.00	1.00	0.64	0.85	0.80	1.00	1.00	0.68
2	0.95	0.80	0.75	1.00	0.57	0.85	0.80	1.00	1.00	0.68	0.85	0.80	1.00	1.00	0.68

Rl: Büyük ölçekli pürüzlülük; Rs: Küçük ölçekli pürüzlülük; Im: Dolgu malzemesi; Kc: Karstik durum

dikkate alınan, şev eğimi ve AP arasındaki ilişkiye dayanan ek koşullar Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelge 5'e göre şev ve AP arasındaki ilişki uygun ise analizi yapılan süreksizlik seti % 100 duraylı anlamına gelmektedir. Örneğin AP ile şev eğimi arasında, koşul 4'teki gibi bir ilişki varsa bu süreksizlik seti için kayma grafiği,

Süreksizliklerin yönelimine bağlı olmayan duraysızlık analizi için öncelikle süreksizliklerin durumu (CD), süreksizlik ara uzaklığı parametresi (SPA), şevin duraylı olarak kalabileceği en büyük şev yüksekliği (H_{maksimum}) ve kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı (ϕ'_m) bulunmuştur. Süreksizliklerin yönelimine bağlı

Çizelge 5. Yönelime bağımlı duraylılık analizinde kayma ve devrilme tipi yenilme türleri için dikkate alınan ek koşullar (Hack, 1998; Hack vd., 2003).

Table 5. Additional conditions considered for the modes of sliding and toppling failures in orientation-dependent stability analysis (Hack, 1998; Hack et al., 2003).

Koşul	Duraylılık değerlendirmesi	Kayma	Devrilme
1	AP > 84° veya AP < -84°	% 100	% 100
2	Şev eğimi+5° < AP < 84°	% 100	% 100
3	Şev eğimi-5° < AP < Şev eğimi+5°	% 100	% 100
4	0° < AP < (şev eğimi-5°)	Kayma grafiği kullan	% 100
5	AP < 0° ve -90° -AP+şev eğimi<0°	% 100	% 100
6	AP < 0° ve -90° -AP+şev eğimi>0°	% 100	Devrilme grafiği kullan

koşul 6'daki gibi bir ilişki varsa, devrilme grafiği kullanılmaktadır.

SSPC: yönelimden bağımsız duraylılık analizi

Hack (1998) arazide duraysız olarak değerlendirilen bazı şevlerin, yönelime bağlı duraylılık analizleri değerlendirmesinde duraylı çıktığını ifade etmiştir. Bu şevler için, şev yüksekliği ve şev açısını da dikkate alan yönelimden bağımsız duraylılık analizlerinin uygun olduğu ortaya çıkmaktadır (Lindsay vd., 2001; Hack vd., 2003). Bu çalışmada daha önceden açılmış mevcut karayolu şevleri kullanıldığı için Yüzeylemiş Kaya Kütleleri (ERM) ve Şev Kaya Kütleleri (SRM) özellikleri aynı olmakta ve kazı yönteminden kaynaklanan örselenme ile gelecek ayrışma etkisi için herhangi bir dönüştürme işlemine gerek kalmamaktadır.

olmayan duraysızlık analizi için ($H_{\text{maksimum}}/H_{\text{şev}}$) oranı ile (ϕ'_m/β_s) oranı karşılaştırılmaktadır. Burada; β_s , şev eğimini göstermektedir. Kaya kütleleri içindeki süreksizliklerin durumu (CD) üç süreksizlik seti için süreksizlik seti durumunun ağırlıklı ortalamasına bağlı olarak bulunmaktadır (Eşitlik 5).

$$CD = \frac{\frac{TC_1}{DS_1} + \frac{TC_2}{DS_2} + \frac{TC_3}{DS_3}}{\frac{1}{DS_1} + \frac{1}{DS_2} + \frac{1}{DS_3}} \quad (5)$$

Burada; $TC_{1,2,3}$ süreksizlik durumunu ve $DS_{1,2,3}$ 1. 2. ve 3. süreksizlik setlerinin ortalama ara uzaklığını (m) ifade etmektedir. Eşitlik 6, 7 ve 8 sırasıyla kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısını (ϕ'_m) ve kohezyonu (c'_m) ile şevlerin duraylı kalabileceği en büyük şev yüksekliğinin hesabını

Karaman

göstermektedir. SPA parametresi Hack vd. (2003) tarafından önerilen Şekil 4c'deki grafiğe göre hesaplanmaktadır. Faktörler hesaplandıktan sonra SSPC sisteminde belirtildiği üzere birbirleriyle çarpılarak SPA parametresi hesaplanır. Çizelge 6'da yönelimden bağımsız duraylılık analizinde kullanılan parametreler yer almaktadır. Ayrıca bu çalışmada yer verilemeyen SSPC sistemi ile ilgili ayrıntılı bilgilere literatürden ulaşılabilir (Hack vd., 2003; Karaman, 2011).

yapmadan bulunan temel RMR puanıdır. F1 faktörü şev düzlemi ile süreksizlik düzlemi arasındaki paralellik ilişkisini, F2 faktörü süreksizlik yüzeyinin eğim açısını, F3 faktörü ise şev düzlemi ile süreksizlik düzleminin eğim açısı arasındaki ilişkiyi gösterir. F4 faktörü ise şevin kazı yöntemine bağlı olarak örselenme durumunu gösteren parametredir. Örneğin bu çalışmadaki şevler mekanik kazı ile oluşturulduğundan F4 puanı 0 olmaktadır (Çizelge 7). SMR puanına göre kaya kütlelerine

Çizelge 6. SSPC yönelimden bağımsız duraylılık analizinde kullanılan parametreler.

Table 6. The parameters used in the orientation-independent SSPC analysis.

Şev No	UCS (MPa)	SPA	CD	ϕ'_m (deg.)	c'_m (Pa)	DS ₁ (m)	DS ₂ (m)	DS ₃ (m)	H _{şev} (metre)	H _{maks.} (metre)
1	125	0.238	0.63	46.26	20861	0.175	0.255	0.338	12	27.72
2	74	0.184	0.61	31.00	14435	0.073	0.19	0.334	5	5.67

$$\phi'_m = 0.2417 * UCS + 52.12 * SPA + 5.779 * CD \quad (6)$$

$$c'_m = 94.27 * UCS + 28629 * SPA + 3593 * CD \quad (7)$$

$$H_{maksimum} = 1.6 \times 10^{-4} c'_m \frac{\sin(\beta_S) \cos(\phi'_m)}{1 - \cos(\beta_S - \phi'_m)} \quad (8)$$

Şev Kütle Puanlaması (SMR)

SMR (Slope Mass Rating), kaya şevlerinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir kaya kütle sınıflandırma sistemidir (Romana, 1985; 1993; Romana vd., 2003). SMR temel kaya kütle oranından (RMR), kazı yöntemi, şev ve süreksizliklerin konumu arasındaki geometrik ilişkiden yararlanarak aşağıdaki eşitlikle elde edilir.

$$SMR = RMR_b + (F_1 F_2 F_3) + F_4 \quad (9)$$

Burada; RMR_b, Bieniawski (1989) RMR sınıflamasından herhangi bir düzeltme

yönelik duraylılık tanımlaması Çizelge 8'de yer almaktadır. SMR ile ilgili ayrıntılı çizelgelere ve grafiklere bu çalışmada yer verilememiş olup, farklı kaynaklardan ayrıntılı bilgilere ulaşmak mümkündür (Romana, 1985; Calcaterra vd., 1998; Romana vd., 2003; Tomas vd., 2012).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kinematik, SSPC yönelime bağlı duraylılık, SSPC yönelimden bağımsız duraylılık ve SMR analizleri çalışma sahasındaki iki adet yol şevine uygulanmıştır. Kaya şevlerindeki meydana gelebilecek düzlemsel, kama ve devrilme tipi yenilmeleri değerlendirmek için kinematik analizler yapılmıştır (Şekil 7). Şekil 7a, 7b ve 7c şev-1 için, şekil 7d, 7e ve 7f ise şev-2 için sırasıyla düzlemsel, kama tipi kayma ve devrilme

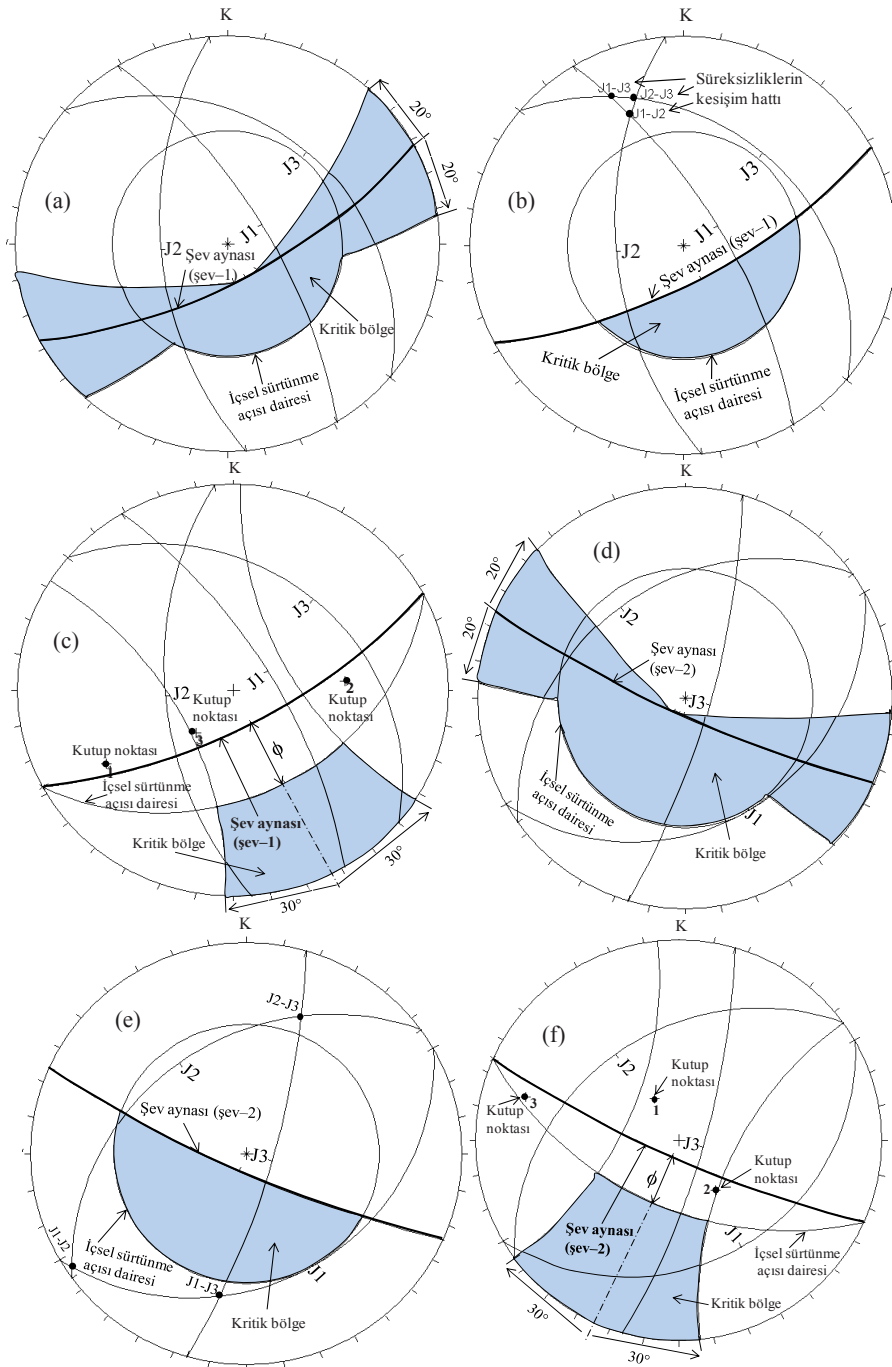
Çizelge 7. SMR sisteminde süreksizlik için düzeltme faktörleri (Romana, 1985).

Table 7. Adjustment factors for discontinuity in SMR system (Romana, 1985).

Süreksizlikler için düzeltme faktörleri (F1, F2, F3 ve F4)	$\alpha_j =$ Süreksizlik yüzeyinin eğim yönü açısı		$\beta_j =$ Süreksizlik yüzeyinin eğim açısı		
	$\alpha_s =$ Şevin eğim yönü açısı		$\beta_s =$ Şevin eğim açısı		
	Çok uygun	Uygun	Zayıf	Uygun değil	Hiç uygun değil
Düzlemsel kayma için $ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
Devrilme için $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
F1 değeri	0.15	0.4	0.7	0.85	1
	$F_1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$				
$ \beta_j $	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
Düzlemsel kayma, F2 değeri	0.15	0.4	0.7	0.85	1
Devrilme, F2 değeri	1				
	$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$				
Düzlemsel kayma için $(\beta_j - \beta_s)$	>10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	<(-10°)
Devrilme için $(\beta_j + \beta_s)$	<110°	110°-120°	>120°	-	-
F3 değeri	0	-6	-25	-50	-60
Kazı metodu için düzeltme puanı	Doğal şev	Ön çatlatma	Tarama patlatması	Mekanik kazı	Kötü patlatma
F4 değeri	+15	+10	+8	0	-8

türü yenilme analizlerini göstermektedir. Çalışma sahasındaki şevlerin kinematik olarak düzlemsel, kama ve devrilme türü yenilmelere karşı duraylı oldukları anlaşılmaktadır.

Yönelime bağlı SSPC analizine göre, her iki şev için ön koşullara (Eşitlik 2 ve 3) bağlı olarak gelişebilecek herhangi bir duraysızlık olasılığının (düzlemsel ve devrilme)



Açıklama: J_1 , J_2 ve J_3 şevlere ait eklem setlerini, J_1 - J_2 süreksizliklerin kesişim noktasını, 1, 2 ve 3 sırasıyla J_1 , J_2 ve J_3 'e ait kutup noktalarını göstermektedir.

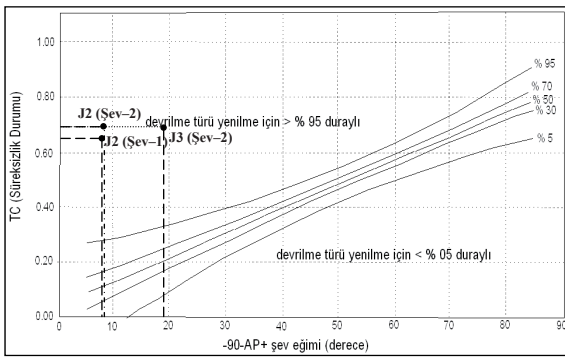
Şekil 7. Şevlerin kinematik analizleri.

Figure 7. Kinematic analyses of the slopes.

Çizelge 8. SMR puanına göre kaya kütle tanımlaması (Romana vd., 2003).

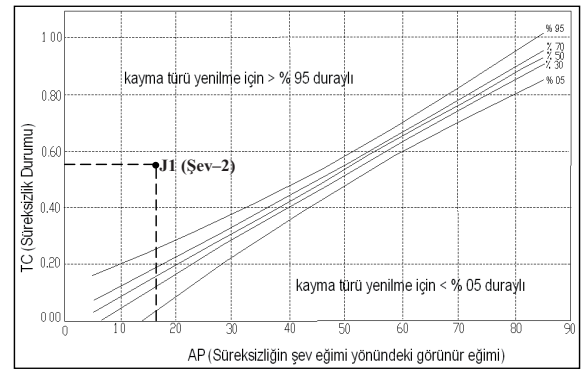
Table 8. Rock mass description based on the SMR Value (Romana et al., 2003).

Sınıf	SMR	Tanımlama	Duraylılık	Yenilmeler
1	81-100	Çok iyi	Tamamen duraylı	Yok
2	61-80	İyi	Duraylı	Bazı bloklarda
3	41-60	Normal	Kısmen duraylı	Bazı eklemelerde veya birçok kama
4	21-40	Kötü	Duraysız	Düzlemsel veya büyük kama
5	0-20	Çok kötü	Tamamen duraysız	Büyük düzlemsel veya zemin gibi



Şekil 8. Şev 1 (J_2) ve şev 2 (J_2 ve J_3) için devrilme analizi.
Figure 8. Toppling failure analysis for slope-1 (J_2) and slope-2 (J_2 and J_3).

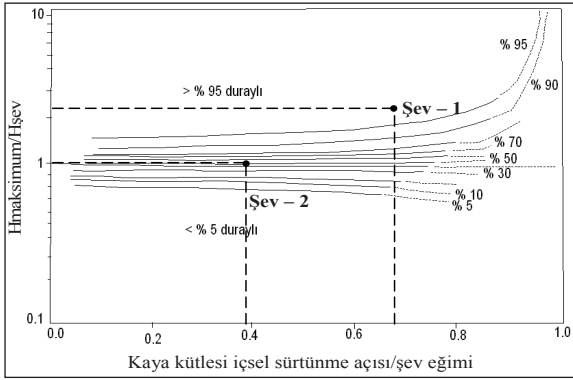
olmadığı anlaşılmaktadır. Çizelge 5'teki AP ile şev eğimi arasındaki ilişkiye dayanan ek koşullara bakıldığında, şev-1'e ait süreksizlik takımlarından J_1 ve J_3 'ün kayma ve devrilmeye karşı % 100 duraylı olduğu ortaya çıkmıştır. Şev-1'in 2. süreksizlik takımı (J_2) için " $AP < 0^\circ$ ve $-90 - AP + \text{şev eğimi} > 0^\circ$ " kuralına göre devrilme grafiği kullanılmıştır (Şekil 8). Grafiğe göre; şev-1'in 2. süreksizlik takımının devrilme türü yenilmeye karşı $> \% 95$ duraylı olduğu görülmüştür. Şev-2'nin 1. süreksizlik takımı (J_1) için " $0^\circ < AP < (\text{şev eğimi} - 5^\circ)$ " kuralına göre (Çizelge 5) kayma grafiği kullanılmıştır (Şekil 9). Şev-2'nin 1. süreksizlik takımının kayma yenilmesine karşı $> \% 95$ duraylı olduğu



Şekil 9. Şev 2'nin 1. eklem takımı (J_1) için kayma yenilmesi analizi.

Figure 9. Sliding failure analysis for the first discontinuity set (J_1) of slope-2.

görülmüştür. Şev-2'nin 2. ve 3. süreksizlik setleri için ek koşullardaki " $AP < 0$ ve $-90 - AP + \text{şev eğimi} > 0^\circ$ " kural geçerli olmuş ve devrilme türü yenilmenin olup olmadığına bakılmıştır (Şekil 8). Her iki süreksizlik takımının da devrilme yenilmesine karşı $> \% 95$ duraylı olduğu anlaşılmaktadır. Mevcut şev açılarında yönelime bağlı duraylılık analizine göre her iki şevin de düzlemsel kayma ve devrilmeye karşı duraylı olduğu ortaya çıkmıştır. Şev-1'in 90° olması durumunda bile SSPC yönelime bağımlı duraylılık analizine göre ek koşullar dikkate alınarak J_1 ve J_3 eklem takımının devrilme türü için $> \% 95$ duraylı olduğu anlaşılmıştır. 90° için,



Şekil 10. SSPC sisteminde yönelimden bağımsız duraylılık için olasılık grafiği.

Figure 10. Probability graph for the SSPC orientation-independent stability analysis.

Şev-2’de meydana gelebilecek düzlemsel kayma ve devrilme türü yenilmelere karşı duraylılık olasılığı mevcut durumdakinin (80°) aynıdır. Bu nedenle, şevlerin düzlemsel kayma ve devrilme türü yenilmeye karşı duraylı oldukları anlaşılmaktadır. Şev-2’nin 1. süreksizlik takımı hariç diğer süreksizlik takımlarına

En büyük şev yüksekliğinin mevcut şev yüksekliğine oranı ile kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısının şev eğimine oranı arasındaki ilişkiye dayanan SSPC yönelimden bağımsız duraylılık analizine göre şevler değerlendirilmiştir (Şekil 10). Bunun için öncelikle şevlerin duraylı kalabileceği yükseklikler şev 1 ve şev 2 için sırasıyla 27.72 ve 5.67 metre olarak hesaplanmıştır. Şev 2’nin duraylı kalabileceği maksimum yüksekliğinin düşük olmasının, tek eksenli basınç dayanımının şev 2’ye göre düşük olmasından (kohezyon ve içsel sürtünme açısını düşürmekte) ve şev eğiminin de oldukça yüksek açıda (80°) olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. En büyük şev yüksekliğinin mevcut yüksekliğe oranları şev 1 için 2.31 ve şev 2 için 1.13 olarak bulunmuştur. İçsel sürtünme açısının şev eğimine oranı ise şev 1 ve şev 2 için sırasıyla 0.67 ve 0.39 olarak hesaplanmıştır. Şev-1, yönelimden bağımsız duraylılık analizine göre

Çizelge 9. Ek koşullara göre yönelime bağlı duraylılık değerlendirmesi.

Table 9. Assessment of orientation-dependent stability analyses according to additional conditions.

Şev No	J_1				J_2				J_3				Duraylılık tanımı
	TC	AP	Ky %	Dv %	TC	AP	Ky %	Dv %	TC	AP	Ky%	Dv %	
1	0.60	-7.76	100	100	0.64	-29.16	100	> 95	0.68	-12.20	100	100	Duraylı
2	0.57	16.67	> 95	100	0.68	-18.64	100	> 95	0.68	-29.17	100	>95	Duraylı

Ky: Kayma; Dv: Devrilme

ait süreksizliklerin görünür eğimlerinin şev içine doğru olmaları (AP değerlerinin eksi işaretli olmaları) şevlerde düzlemsel kaymanın oluşumunu engellemiştir. Şevlere ait süreksizlik setleri (J_1-J_3) için düzlemsel kayma ve devrilme olasılıkları Çizelge 9’da yer almaktadır.

mevcut şev açısında duraylıdır (> % 95). Ancak Şev-1’in eğim açısının 90° olması durumunda duraylı kalabileceği maksimum yükseklik (Eşitlik 8) 8.32 metreye düşmekte, dolayısıyla yönelimden bağımsız duraylılık olasılığı % 5’e inmektedir. Söz konusu şevde, eğimin daha dik

olduğu noktalarda kısmi şev yenilmelerinin olduğu Şekil 3a'dan gözlenmektedir. Şev-1'in eğim açısının 75° olması durumunda (en büyük şev yüksekliği 18.09 metre) yönelimden bağımsız duraylılık olasılığının yaklaşık % 92'ye inmesine karşın şev duraylı kalmaktadır. Bu nedenle şev-1 için güvenli şev açısı 75° olarak düşünülmüştür. Şev-2 mevcut durumda yaklaşık % 60 duraylılık olasılığına sahip olup, SSPC tanımlamasına göre kısmen duraylı sınıfta yer almaktadır. Ayrıca SSPC sistemine göre; duraysız şevler için duraysız kaya kütlesi ağırlığı "ton" mertebesinde ise "büyük problemlili duraysız"lık, "kg" mertebesinde ise "küçük problemlili duraysız"lık söz konusudur. Yapılan gözlemler sonucunda şev-2 için yalnızca küçük ölçekli yönelimden bağımsız duraysızlık gelişebileceği, bunda küçük çapta kaya düşmeleri (küçük problemlili duraysız) şeklinde gelişebileceği sonucuna varılmıştır. Bu olumsuzlukların giderilmesi açısından şev-2'nin yönelimden bağımsız duraylılık olasılığını artırmak için ($> \% 90$) şev eğiminin 70° 'ye indirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu durumda şevin duraylı kalabileceği en büyük yükseklik 8.35 metreye çıkmaktadır. Genel olarak şevler değerlendirildiğinde, şev-1'in yeni açılması (yaklaşık 5 yıl önce) ve dolayısıyla taze yüzeylere sahip olması tek eksenli basınç dayanım değerlerini ve süreksizlik özelliklerini etkilemiştir. Şev-2'nin ise yaklaşık 35-40 yıllık olması şev yüzeyinde orta derecede ayrışmanın gözlenmesini açıklamış olup, tek eksenli basınç dayanımı aynı litolojiye sahip şev-1'den daha düşük çıkmıştır. Andezitlerde ayrışmanın önemli olduğu düşünüldüğünde (kil minerallerine dönüşme), SSPC yönelimden bağımsız duraylılık önem kazanmaktadır.

Temel RMR puanı, tek eksenli basınç dayanımı, kaya kalite göstergesi (% RQD), süreksizlik aralığı, süreksizlik ve yeraltı suyu durumuna bağlı olarak hesaplanmıştır (Çizelge 10). Bieniawski (1989) tarafından önerilen RMR'ye göre kaya sınıflamasında, şev-1 "iyi kaya", şev-2 ise "orta kaya" sınıfına dahil edilmiştir. SMR değerlerinin hesaplanmasında Romana (1985) ve Romana vd., (2003) tarafından önerilen düzeltme faktörleri kullanılarak Eşitlik 9'a göre nihai puanlar hesaplanmıştır (Çizelge 10). Anbalagan vd., (1992) düzlemsel ve kama tipi kaymanın farklı değerlendirilmeleri gerektiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle önerildiği gibi kama tipi kayma analizi için süreksizliklerin ara kesit doğrusunun yönelim ve dalım açısı değerleri kullanılmış ve buna göre düzeltilmiş SMR puanları hesaplanmıştır.

SMR sınıflama sistemine göre; şev-1 incelendiğinde, iki süreksizlik seti için (059/069, J_1 ve 040/30, J_3) düzlemsel kayma tehlikesinin olmadığı (SMR > 60), J_2 'ye (265/55) ait SMR puanının 59 olması nedeniyle düzlemsel kayma tehlikesinin bulunduğu görülmüştür. 059/69 (J_1) ve 265/55 (J_2) yönelimli süreksizlik setleri için "az miktarda ve sıklıkta" devrilme tehlikesinin olduğu ve bütün süreksizlik setlerinin ara kesiti boyunca "bazı bloklarda" kama tipi kayma olasılığının olduğu ortaya çıkmıştır. SMR puanına göre genel bakıldığında, J_2 'nin SMR puanı 59 olduğundan şev-1 için tanımlama "kısmen duraylı" olmaktadır. Şev-2 incelendiğinde; üç süreksizlik seti için de düzlemsel kayma tehlikesinin olduğu, üç süreksizlik seti için yüksek olasılıkla devrilme yenilmesinin oluşabileceği, süreksizliklerin ara kesit doğrusu boyunca yüksek olasılıkla kama tipi yenilme tehlikesinin oluşabileceği ortaya çıkmıştır.

Karaman

Çizelge 10. Şevlerin temel RMR ve SMR puanları.

Table 10. The ratings of basic RMR and SMR of slopes.

Şev No	RMR _b	Yenilme türü	SMR (J ₁)	SMR (J ₂)	SMR (J ₃)	Duraylılık (eklem setleri)	Duraylılık (Şev)
Şev-1	68	Düzlemsel	64.25	59	61.7	Kısmen duraylı	
		Devrilme	64.25	64.25	68	Duraylı	Kısmen duraylı
		Kama	64.4	66.65	66.65	Duraylı	
Şev-2	48	Düzlemsel	44.4	41.7	40.5	Duraysız	
		Devrilme	48	47.1	44.25	Kısmen duraylı	Duraysız
		Kama	46.65	44.4	31.2	Duraysız	

Ancak kinematik analizlere göre şev-2’de düzlemsel kayma tehlikesi bulunmamaktadır. Ayrıca SSPC sistemine göre AP eksi (-) değer aldığıında “süreksizlik düzleminin görünür eğim açısı şevin eğim yönüne zıt yönde” anlamına gelmektedir. Bu nedenle şev-2’nin J₂ (324/34) ve J₃ (106/76) eklem setlerine ait AP değerinin eksi değer alması bu iki süreksizlik seti için kayma tehlikesini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, 150/27 (J₁) yönelimli süreksizlik seti için görsel olarak devrilme tehlikesinin söz konusu olmadığı ve SMR analizinde de RMR_b puanını düşürecek bir düzeltmenin olmadığı (Çizelge 10) görülmüştür. Bununla beraber RMR_b puanının düşük olması şevde devrilme yenilmesi oluşacağı izlenimini vermiştir. Ancak, devrilme türü yenilme kütleli özellikte değil süreksizlik-şev yönelimi ile ilişkilidir. Bu anlamda süreksizlik kontrollü bir yenilme türüdür. Şev-2’ye SMR puanına göre genel olarak bakıldığında, şev tanımlaması “duraysız” olup, olası kütleli yenilmenin oluşabileceği varsayılmıştır. SMR sisteminin şevlerin değerlendirilmesinde tutarsız sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

Kinematik analizlere göre; şevlerde düzlemsel, kama ve devrilme türünde yenilmenin oluşmayacağı, SSPC yönelime bağımlı duraylılık analizine göre de şevlerde düzlemsel ve devrilme türü yenilmelerin meydana gelmeyeceği sonucu ortaya çıkmıştır. SMR sınıflama sistemine göre, şev-1 “kısmen duraylı” ve şev-2 “duraysız” sınıfına dahil olmuştur. SMR sistemi yalnızca düzlemsel, kama tipi ve devrilme türü yenilmeler üzerinden değerlendirme yapmaktadır. SSPC sistemi yönelimden bağımsız duraylılık analizinde kaya kütlelerinin dayanım parametrelerine (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) göre yenilmeleri dikkate almaktadır. Diğer taraftan, SMR sınıflandırma sisteminin bir miktar tutucu ve güvenli tarafta kalma eğiliminde olduğu bilinmektedir (Romana vd., 2003). Hack vd. (2003) SSPC sisteminin duraylı ve duraysız şevler arasında daha ayırt edici farklar sunduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, SSPC sistemi yönelimden bağımsız duraylılık analizini de içermektedir. Sistem, SMR sınıflamasının dikkate almadığı şevlerin duraylı kalabileceği en büyük şev yüksekliğini içermektedir. SMR

sınıflandırma sisteminin RMR puanına doğrudan bağlı olması ve sadece süreksizlik kontrollü yenilmelerin değerlendirilmesini dikkate alması diğer dezavantajlarından. Oysa süreksizlik kontrollü yenilmeler kaya kütle özelliklerinden daha çok süreksizlik-şev yönelimi ve süreksizlik makaslama dayanımı ile ilişkilidir. Sonuç olarak, maden ocakları, karayolları vb. yerlerdeki şevlerde gelişebilecek olası yenilme türlerinin, kinematik analizler ile araştırılmasının yanı sıra SSPC gibi sistemlerin kullanımının, güvenli şevlerin açılmasına ve emniyetli madencilik faaliyetlerinin yürütülmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, zaman zaman küçük ölçekte kaya düşmelerinin yaşandığı iki adet kaya şevinin duraylılığı kinematik, SSPC ve SMR analizleriyle değerlendirilmiştir. Kinematik analiz sonuçlarına göre; şevlerde düzlemsel, kama tipi ve devrilme türü yenilmelerin oluşmayacağı ortaya çıkmıştır. SSPC yönelime bağlı duraylılık değerlendirmesine göre; şevler kayma ve devrilme yenilmesine karşı duraylı çıkmıştır. SSPC yönelimden bağımsız duraylılık analizine göre; şev-1 için duraylılık olasılığı > % 95 (tamamen duraylı), ancak şev-2'nin ise kısmen duraylı (% 60) olduğu anlaşılmıştır. Yönelimden bağımsız duraylılık analizine göre mevcut durumda 69° olan şev-1'in 75°'ye kadar güvenli olduğu bununla beraber şev-2'nin mevcut eğim açısının (80°) 70°'ye düşürülmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. SMR analizine göre şev-1 "kısmen duraylı", şev-2 ise "duraysız" sınıfına dahil olmuştur. Kaya şevlerinin değerlendirilmesinde birden fazla yöntemin birlikte ele alınmasının, iş güvenliği ve araç-yaya trafiği açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde arazide bana yardımcı olan babam Musa KARAMAN'a ve ayrıca değerli yorumlarından dolayı hakemlere teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Alejano, L.R., Ferrero, A.M., Oyanguren, P.R., Fernandes, M.I.A., 2011. Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 16–26.
- Anbalagan, R., Sharma, A., Sanjeev, B., Raghuvanshi, T. K., 1992. Rock Mass Stability Evaluation Using Modified SMR Approach. *Proceedings of the Sixth National Symposium on Rock Mechanics*, Bangalore, India, 258-268.
- Barton, N.R., 1976. Recent experiences with the Q system of tunnel support design. In: Bieniawski ZT (ed) *Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg. Balkema, Rotterdam, 107–117.
- Barton, N.R., 1988. Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the Q-system. In: Kirkaldie L (ed). *Proceedings Symposium on Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM Special Technical Publication 984, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 59–88.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, Chichester. 251 p.
- Bye, A.R., Bell, F.G., 2001. Stability assessment and slope design at Sandsloot open pit, South Africa. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 449–466.
- Calcaterra, D., Gili, J.A., Iovinelli, R., 1998. Shallow landslides in deeply weathered slates of the Sierra de Collcerola (Catalonian Coastal Range, Spain). *Engineering Geology*, 50, 283–298.

- Eberhardt, E.D., 2003. Rock slope stability analysis–utilization of advanced numerical techniques. Earth and Ocean sciences at UBC. 4 p.
- Gedikoğlu, A., Pelin, S., Özsayar, T., 1979. The main lines of geotectonic development of the Eastern Pontides in Mesozoic era. Proceeding of the 1st Geological Congress of the Middle East (GEOCOME), 555-580.
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics. John Wiley&Sons, New York. 478 p.
- Gürocak, Z., Alemdag, S., Zaman, M.M., 2008. Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapıkaya dam site, Turkey. Engineering Geology, 96, 17–27.
- Hack, R., 1998. Slope stability probability classification. SSPC, 2nd edition. ITC, Enschede, The Netherlands, 258 p.
- Hack, R., 2002. An evaluation of slope stability classification. Eurock, ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions, Madeira, Frunchal, Portugal, 1–32.
- Hack, R., Price, D., Rengers, N., 2003. A new approach to rock slope stability–a probability classification (SSPC). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 62, 167–184.
- Haines, A., Terbrugge, P.J., 1991. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems. In: Wittke, W. (editor) Proceedings 7th Congress on Rock Mechanics 2, ISRM. Aachen, Germany. Balkema, Rotterdam, 887–892.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1981. Rock Slope Engineering. 3rd edition. London, Institute of Mining and Metallurgy. 358 p.
- Hoek, E., 1999. Putting numbers to geology - an engineer's viewpoint. Quarterly Journal of Engineering Geology, 32, 1-19.
- ISRM, 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 p.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods. International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628 p.
- Karaman, K., 2011. Taşönü (Trabzon–Araklı) kalker ocağındaki şevlerin duraylılık açısından incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Yüksek Lisans Tezi, 123 s (yayımlanmamış)
- Kentli, B., Topal, T., 2004. Assessment of rock slope stability for a segment of the Ankara–Pozanti motorway, Turkey. Engineering Geology, 74, 73–90.
- Kliche, C.A., 1999. Rock slope stability. SME, Littleton, CO.
- Kıncal, C., Koca, M.Y., 2009. A proposed method for drawing the great circle representing dip angle and strike changes. Environmental and Engineering Geoscience, 15, 145–165.
- Koca, M.Y., 1995. Slope stability assessment of the abandoned Andesite quarries in and around the Izmir city centre. Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Science, Izmir, PhD thesis, 430 p (yayımlanmamış).
- 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.
- Kulatilake, P.H.S.W., Wang, L., Tang, H., Liang, Y., 2011. Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses. Computers and Geotechnics, 38, 846–860.

- Laubscher, D.H., 1990. Geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 90 (10), 257–273.
- Lindsay, P., Campbell, R.N., Fergusson, D.A., Gillard, G.R., Moore, T.A., 2001. Slope stability probability classification. *Waikato Coal Measures, New Zealand. International Journal of Coal Geology*, 45, 127–145.
- Okay, A. I., Şahintürk Ö., 1997. Geology of Eastern Pontides, in A. G. Robinson, edition, *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region: AAPG Memoir 68*, 291–311.
- Özsayar, T., Pelin, S., Gedikoğlu, A., 1981. Doğu Pontidler’de Kretase, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yer Bilimleri Dergisi, 2, 66-115.
- Pantalidis, L., 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 315–325.
- Rocscience, 1999. DIPS 5.0 – Graphical and statistical analysis of orientation data rocscience. Canada. 90 p.
- Romana, M., 1985. New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes. *Proceedings International Symposium on Rock Mechanics, Mining Civil Works, ISRM, Zacatecas, Mexico*, 59–63.
- Romana, M., 1991. SMR classification. In: Wittke W (editor) *Proceedings 7th Congress on Rock Mechanics 2, ISRM, Aachen, Germany. Balkema, Rotterdam*, 955–960.
- Romana, M., 1993. A Geomechanics Classification for Slopes: Slope Mass Rating. (In *Comprehensive Rock Engineering*. Ed. I. Hudson). Pergamon, 3, 575-600.
- Romana, M., Serón, J.B., Montalar, E., 2003. SMR geomechanics classification: application, experience and validation. In: Merwe, J.N. (Ed.), *Proceedings of the 10th Congress of the International Society for Rock Mechanics, ISRM 2003—Technology Roadmap for Rock Mechanics. South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1–4.
- Selby, M.J., 1980. A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand. *Geomorphology*, 23, 31–51.
- Selby, M.J., 1982. *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, Oxford, 264 p.
- Shuk, T., 1994. Key elements and applications of the natural slope methodology (NSM) with some emphasis on slope stability aspects. *Proceedings 4th South American Congress on Rock Mechanics, Santiago de Chile*, 255–266.
- Tomas, R., Cuenca, A., Cano, M., Barba, J.G., 2012. A graphical approach for slope mass rating (SMR). *Engineering Geology*, 124, 67–76.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Tuncay, E., 2001. Causes, mechanism and environmental impacts of instabilities at Himmetoğlu coal mine and possible remedial measures. *Environmental Geology*, 40 (6), 769–786.
- Wyllie, D.C., Mah, C.W., 2004. *Rock slope engineering civil and mining*. 4th edition. New York, Spon Press 431 p.

Doğal Zeminlerin ve Yapay Dolguların Plaka Yükleme Deneyi ile İncelenmesi

Investigation of the Natural Soils and Artificial Fills Using Plate Load Test

Nihat DİPOVA, Bülent CANGİR

Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ANTALYA

Geliş (received) : 11 Haziran (June) 2012
Düzeltilme (revised) : 14 Kasım (November) 2012
Kabul (accepted) : 21 Kasım (November) 2012

ÖZ

Doğal zeminlerin, zemin iyileştirmesi uygulanmış zeminlerin ve yapay dolguların taşıma gücü ve oturma değerlerinin yerinde doğrudan ölçülebildiği plaka yükleme deney düzeneği, zeminin üzerine oturan rijit bir plakadan, yükün alındığı bir ölü yükten ve bu yükü alttaki plakaya aktaran bir kriko ile oturma miktarını ölçen komparatörlerden oluşmaktadır. Günümüzde, doğal zeminlerden daha çok karayolu, baraj gövde dolguları ve havaalanlarında dolgu sıkıştırma kontrolü amacıyla tercih edilmektedir. Plaka yükleme deneyi kaya ortamlar üzerinde de uygulanmaktadır. Basit bir düzeneğe sahip olması ve hızlı sonuç vermesi gibi avantajlarının yanı sıra deneyin bazı sınırlı yönleri de vardır. Etki derinliği problemi bunlardan en önemlisidir. Deney sonuçları, zeminin doğal yoğunluk ve nem miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yapılan örnek uygulamalarda, zayıf kayaların ve suya hassas zayıf çimentolu zeminlerin gerilme - deformasyon ilişkisinin de plaka yükleme deneyi ile belirlenebileceği görülmüştür. Bu çalışmada; özellikle dolgu zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesinde avantajlara sahip olan plaka yükleme deneyinin ayrıntıları ve deney sonunda elde edilebilecek verilerin yorumlanabilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar belirtilmiş ve örnek uygulamalar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Dolgu zemin, Oturma, Plaka yükleme deneyi, Taşıma gücü.

ABSTRACT

A plate load test apparatus, which can be used for direct measurement of bearing capacity and settlement of natural soils, improved soils and man-made fills, consists of rigid plates located on the ground, a dead load to apply pressure on the soil, a jack to transfer load and dial gauges to measure deflection. Nowadays, this test is preferred for artificial fill compaction control of motorways and airfields more than the natural soils. The plate load test can also be used on rocks. Besides having simple components

N. Dipova

E-Posta: ndipova@akdeniz.edu.tr

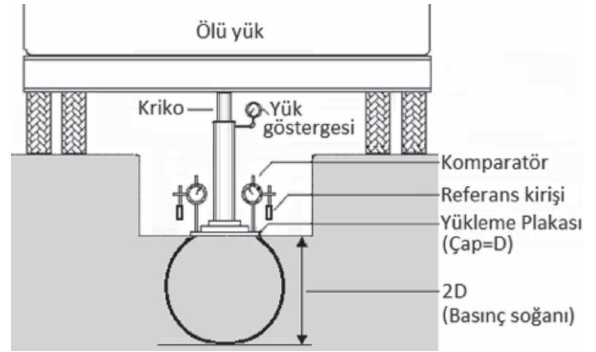
and giving results quickly, the test has some limitations. Shallow depth of influence is the most important limitation. Test results are affected by humidity and density of the natural soil. In this study; details of the plate load test procedure are given which have advantages especially in determination of bearing capacity and settlement of fill grounds, important aspects which should be attended to interpret test results are emphasized and some sample cases are presented.

Key Words: Fill ground, Settlement, Plate load test, Bearing capacity.

GİRİŞ

Yüzeysel temellerin taşıma gücünün belirlenmesine yönelik birçok yöntem bulunmaktadır. Laboratuvar deneyleri yardımıyla zemin cinsine göre kesme kutusu, üç eksenli basınç, serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve konsolidasyon deneyleri ile zemin parametreleri elde edilerek analizler yapılmaktadır. Taşıma gücü değerlerinin belirlenebildiği arazi deneyleri arasında koni penetrasyon, standart penetrasyon, presiyometre ve plaka yükleme deneyleri yer almaktadır. Başarılı örselenmemiş örnek alınmasının veya penetrasyonun çok zor olduğu iri taneli zeminler, zayıf veya ayrışmış kayalar ve yapay dolgularda plaka yükleme deneyi tüm diğer deneylere göre avantajlı duruma geçmektedir. Taşıma gücü ve oturmanın yerinde doğrudan ölçülebildiği plaka yükleme deney düzeneği, zeminin üzerine oturan rijit bir plakadan, üstte yükün uygulandığı bir ölü yükten ve bu yükü alt plakaya aktaran bir kriko ile oturma (veya çökme) miktarını ölçen komparatörlerden oluşmaktadır (Şekil 1). Deney sırasında plakaya uygulanan yük ile plakanın yapacağı oturma komparatörler ile belirlenir. Elde edilen veriler ile yük-oturma ilişkisinden zeminin güvenle taşıyabileceği yük bulunur. Plaka yükleme deneyi, doğal zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesinin yanı sıra günümüzde

daha çok karayolu ve havaalanlarında dolgu sıkıştırma kontrolü amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 1. Plaka yükleme deney düzeneği.

Figure 1. Plate load test set-up.

Plaka yükleme deneyi, üzerine çok büyük yapıların inşa edileceği zeminler için çok güvenilir sonuçlar vermese de özellikle dolgu yapılan zeminlerin kalitesi ve taşıma gücünün belirlenmesinde oldukça başarılı bir deneydir. Plaka yükleme deneyi, ilgili standartlarda DIN 18134, 1999; BS 5930, 1999; ASTM D1196, 1997; TS 5744, 1988 tanımlanmıştır. Genel olarak zeminin yapı genişliğinin 2 - 3 katı derinliğe kadar homojen olduğu, örselenmemiş zemin örneği alınmadığı veya çok güç alınabildiği durumlarda plaka yükleme deneyine

başvurulmaktadır. Plaka yükleme deneyi, kaya ortamlar üzerinde de uygulanmaktadır (Coates ve Gyenge, 1966; Gökay, 1988; Hobbs, 1975).

Deneyin bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi, etki derinliği problemi. Plaka yükleme deneyinde etki derinliği, plaka çapının 2 katıyken, temellerin yük etki alanları çok büyük olduğundan homojen olmayan zeminlerde sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir. Deney sonuçları, zeminin doğal yoğunluk ve rutubet miktarına bağlı olarak değişmektedir. Kumlu zeminlerde taşıma gücü temel boyutlarına göre değişiklik gösterdiğinden, yapılan plaka yükleme deneyi sonuçları, plaka boyutları ve temel boyutları arasındaki ölçek farkından dolayı yanıltıcı olabilir. Killi zeminlerde ise taşıma gücü temel boyutlarından bağımsız olduğu için, plaka yükleme deneyi gerçek temel için kullanılabilir fakat kısa süreli bir deney olduğu için, suya doygun kil zeminlerde oturmaya bağlı taşıma gücü hesabı yapılması uygun değildir. Bu çalışmada; plaka yükleme deneyi tanıtılacak, uygulamada karşılaşılan zorluklar vurgulandıktan sonra örnek uygulamalar verilerek kullanım alanları açıklanacaktır.

DENEY EKİPMANLARI

Deney ekipmanı deneyle ilgili standartlar olan DIN 18134, 1999; BS 5930, 1999; ASTM D1196, 1997 standartlarında tanımlanmıştır. Aşağıda bu ekipmanlar tanıtılacak ve uygulama ile ilgili önemli ayrıntılar vurgulanacaktır.

Hidrolik kriko: Araziye yapılan plaka yükleme deneylerinde zemine normal yükün verildiği hidrolik kriko (10-20 ton kapasiteli), pompa bölümü ve piston bölümü (Şekil 2A) olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Bu iki ünite

arası hidrolik hortum ile bağlanarak pistonu yağ basma sırasındaki hidrolik deney düzeneği sarsılması en düşük seviyeye indirilmiş olmakta, ölçülen düşey deformasyon verilerini pompa titreşiminin etkilemesi önlenmektedir. Pompa üzerine bağlı manometre ile uygulanan yük okunabilmektedir. Gelişmiş deney düzeneklerinde bu ölçüm elektronik yük sensörleri yardımı ile yapılmaktadır. Ölçümün doğruluğunu sağlamak için kriko düzeneği sık aralıklarla kalibre edilmelidir. Kriko için diğer bir önemli husus da sızdırmazlıktır. Hidrolik bağlantı elemanları ve sızdırmazlık keçeleri kullanıma bağlı olarak gevşeyip yağ sızdırabilmektedir. Bu durumda yükün sabit tutulması ve yüksek yük kademelerine ulaşılması zorlaşabilmektedir. Araziye çıkmadan önce bağlantı ve sızdırmazlık elemanları kontrol edilmeli, arazide anahtar takımı ve yedek yağ bulundurulmalıdır.

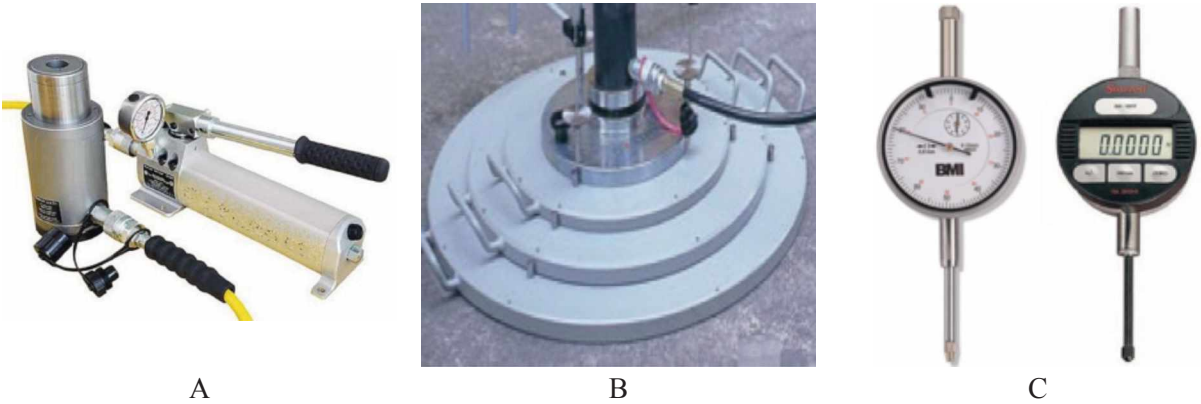
Plakalar: Zemine gerilme aktarmak için çelikten yapılmış çapı 16, 30, 45, 60, 75 cm olan rijit dairesel veya kare plakalar kullanılır (Şekil 2B). Uygulamada genelde 30 cm çaplı plakalar kullanılmakla birlikte ulaşılması istenilen gerilme ve kullanılan ölü yük ağırlıklarına bağlı olarak plaka çapları değişebilir. Deney boyunca plakanın rijit olarak davranması gerektiğinden plaka kalınlığının 25 mm den az olmaması gerekir. Büyük plakalar kullanılması gerektiğinde takımdaki küçük plakalar da üzerine konmalıdır. Üst üste yerleştirilen plakaların ve pistonun birbirini merkezlemesi gerekir. Bunu sağlamak için plakalarda merkezleme pimleri veya işaret çizgileri bulunmalıdır.

Komparatörler: Komparatör, yaylı bir pim ve buna bağlı kadrandan oluşan bir tür hassas cetveldir. Plaka yükleme deneyinde, plakanın düşey hareketini gösteren 3 adet, 0.01 mm

hassasiyetli (kalibreli) ve 30 mm (tercihen 50 mm) ölçme sığalı komparatör saati kullanılır. Aynı hassasiyete sahip elektronik komparatörler de kullanımı kolaylaştırmak açısından tercih edilebilir (Şekil 2C). Gelişmiş deney düzeneklerinde potansiyometrik veya LVDT deformasyon sensörleri kullanılarak ölçümler doğrudan bilgisayara aktarılmaktadır. Mekanik komparatörler ucuz ve kolay temin edilebilir olmakla birlikte kullanımı zordur. Her deneyin başlangıcında komparatörlerin bağlanması ve sıfırlama işlemi zaman almaktadır. Elektronik komparatör veya deformasyon sensörü kullanıldığında bu işlem daha da kolaylaşmakta fakat arazi koşullarında hasar görme durumunda yenilenmesi maliyetli ve zaman alıcı olmaktadır. Araziye çıkarken 1 takım yedek komparatör alınması yerinde bir tedbir olacaktır.

oluşturma aşırı maliyetli olabilir. Çok sayıda deney yapılmak istendiğinde yeri kolaylıkla değiştirilebilen, sabitlenince yerinden hareket etmeme özelliğine sahip iş makinelerinin kullanılması zaman ve para tasarrufu sağlar. Bu makineler en az 30 ton ağırlıklarında olmalı ve krikonun yaslanarak reaksiyon almasına izin vermelidir. Yüklemenin dengeli yapılabilmesi için kriko bu iş makinelerinin ağırlık merkezine yakın bir yere yerleştirilmelidir. İş makinasının hafif olması ve krikonun ağırlık merkezine yerleştirilmemesi, büyük yük kademelerinde makinenin yerinden oynamasına ve yüklemenin eksantrik hale gelmesine neden olabilecektir.

Referans kirişi: Plakanın ne kadar oturma yaptığı referans kirişi kullanılarak ölçülür. Referans kirişi deney boyunca sabit kalmalı ve



Şekil 2. A) Hidrolik kriko, B) Plakalar, C) Analog ve elektronik komparatörler
Figure 2. A) Hydraulic jack, B) Plates, C) Analog and electronic dial indicators.

Ölü yük: Krikoya yük aktarmak amacıyla arazide 2 noktadan zemine sabitlenmiş, ortasında deney yapılabilecek beton, çelik veya kum torbalarından oluşturulan ölü yükler kullanılır. Büyük yükler gerektiğinde bu şekilde ölü yük

plakanın deformasyonundan etkilenmemelidir. Kiriş, arası en az 5 - 6 m olan 2 ayakla zemine sabitlenir. Üzerinde, komparatörlerin sağlam bir şekilde sabitlenmesine izin verecek şekilde boru, kutu profil veya diğer profil kesitlerinden biri

olabilir. Profilin kesiti, rüzgardan etkilenmeyecek ve kendi ağırlığından sehim yapmayacak şekilde belirlenmelidir. Uzun sürecek deneylerde, sıcaklık farkları bile ölçüm hassasiyetini etkiler. Bu nedenle kirişin doğrudan güneş ışınlarına maruz kalmaması sağlanmalıdır. Çok sıcak iklimli bölgelerde çalışılıyorsa referans kirişinin metal yerine sert ahşaptan yapılması daha yararlı olacaktır.

Yardımcı ekipman: Yukarıdaki ana ekipmana ilave olarak bazı tamamlayıcı aletlerin de arazide bulundurulması gerekir. Kazma, kürek, mala benzeri aletler zeminin kazılması ve tefsiye edilmesi için gereklidir. Su terazisi ile plakanın yataylığı kontrol edilir. Bir kronometre ölçüm aralıklarının hassas belirlenmesini sağlar. Bir anahtar takımı arazide ortaya çıkacak küçük mekanik arızaların giderilmesine yardımcı olur.

DENEYİN UYGULANMASI

Deney zemin yüzeyinde veya istenen zemin derinliğine kadar kazılmış yüzeylerde yapılır. Zemin üstündeki bitkisel toprak kaldırılır, plaka pürüzsüz bir yüzeye yerleştirilir ve teraziye alınır. Plakanın altına, farkına varılmayan iri bir blok veya taş denk gelmişse, bu, deney sırasında plakanın olması gerekenden az veya dengesiz oturmasına sebep olacaktır. Fark edildiği anda deney sonlandırılmalı ve farklı bir yerde deney yapılmalıdır. Eğer zemin pürüzlüyse ve plaka ile teması tam sağlanamıyorsa zemin yüzeyine kum tabakası serilerek tesviye edilir. Plaka üzerine yükleme krikosu yerleştirilir ve krikonun diğer

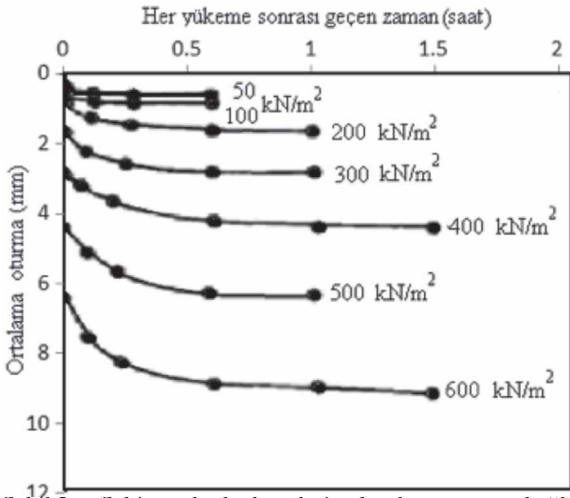
ucu ölü yük altına yaslanır. Plakanın zemine iyi yerleşmesini sağlamak amacıyla DIN 18134 (1999) standardında 30 sn süre ile 0.01 MPa gerilmeye karşılı gelecek bir önyüklemeye öngörülmektedir. Deney için çukur açılacaksa, bu çukurun genişliği, plâka genişliğinin en az 4 katı kadar olmalıdır. Plâka yükleme deneyinde ayrıca, aşağıdaki ilişkinin sağlanması istenilir.

$$\frac{D_t}{B_t} = \frac{D_p}{B_p} \quad (1)$$

Burada; D_t : temel derinliği, B_t temel genişliği, D_p : plâka derinliği, B_p : plâka genişliği.

Yükleme genellikle yük-deformasyon eğrisinde en az altı nokta elde edecek şekilde veya tahmini taşıma gücünün 1/8'ini oluşturacak yük kademelerinde yapılır. Deney esnasında uygulanan yükün sabit kaldığı manometreden kontrol edilmelidir. Her yükleme kademesinde oturmanın sona erdiğinden emin oluncaya kadar beklenir. Bu süre, yük kademesine ve zemin türüne göre değişir. Kil oranı arttıkça bu süre artar. Küçük yük kademelerinde oturmanın sabit hale gelmesi 10-15 dakikada sağlanırken, büyük yük kademelerinde bu süre 1 saatin üzerine çıkabilmektedir (Şekil 3). Toprak zeminde yapılan plaka yükleme deneyi 25 mm'lik düşey deformasyon elde edilinceye kadar sürdürülür. Craig (1992), yüklemenin, tahmini izin verilir taşıma gücünün 1.5 katına kadar sürdürülmesini öngörmektedir. Ancak zemin çok sağlam ise hidrolik pompanın azami kapasitesine ulaşıldığında yüklemeye son verilebilir.

Dipova ve Cangir



Şekil 3. Sabit yük kademeleri altında zamana bağlı ortalama oturma grafiği (Clayton vd.,1995).

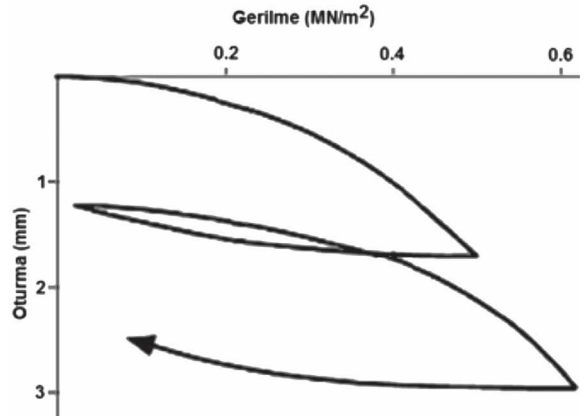
Figure 3. Time dependent settlement curves under constant load (Clayton et al.,1995).

Plakanın oturması, yükleme sisteminin etki alanı dışında sabitlenen referans kirişlerine yaslanmış komparatörlerle ölçülür. En az 3 adet 1/100 mm hassasiyetinde komparatör, plakanın oturmasını dengeli bir şekilde ölçebilecek şekilde, eşit uzaklıklarda yerleştirilmelidir.

DENEY SONUÇLARININ GÖSTERİMİ

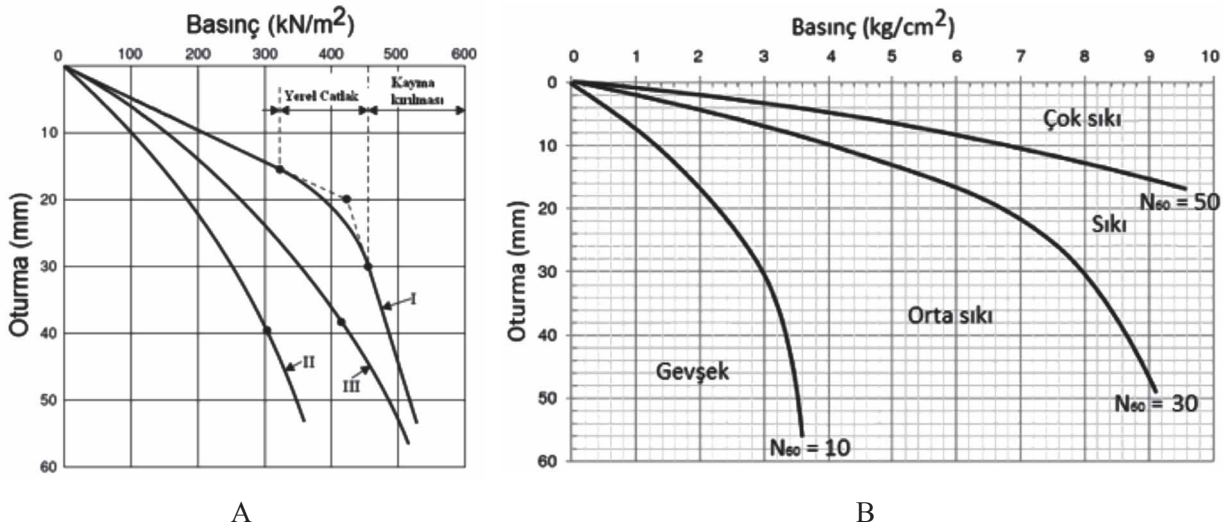
Plaka yükleme deneyi kademeli olarak tekrarlanan yükleme ve boşaltmalardan oluşan bir düzende yapılır. Deney sonuçları, grafik olarak genelde plakaya uygulanan gerilme (q) yatay ekseninde, plakanın oturması (s) düşey ekseninde olacak şekilde gösterilir. Tekrarlı

yüklerin söz konusu olduğu yol, havaalanı pisti gibi uygulamalar için DIN 18134, 1999 ve ASTM D1195, 1997 standartlarında 1 veya 2 döngü olarak yük geri boşaltma öngörülmektedir (Şekil 4). Deney sonucunda elde edilen yük - oturma eğrisi farklı zemin grupları için karakteristik şekiller almaktadır. Şekil 5A'da birinci eğri sıkı kum, kum, çakıl ya da sert killer için geçerlidir. Bu tür zeminlerde genel kayma kırılması oluşur. İkinci eğri ise gevşek kum ve yumuşak killer için geçerli olup burada yerel kayma kırılması gerçekleşir. Üçüncü eğri, birinci ve ikinci zemin özelliklerine göre ortalama bir zemine ait kırılma eğrisini göstermektedir. Şekil 5B'de ise kumlarda yapılan plaka yükleme deneyi sonuçlarına göre zeminin sıklığı ve eşdeğer SPT N değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4. Tipik bir gerilme - oturma - boşaltma grafiği.

Figure 4. Typical stress - settlement - unloading curve.



Şekil 5. A) Farklı zemin grupları için basınç - oturma eğrileri (Venkatramaiah, 1993), B) Kumlarda plaka yükleme deneyi eğrisi ile zemin sıklığı arasındaki ilişki (Terzaghi ve Peck, 1948).

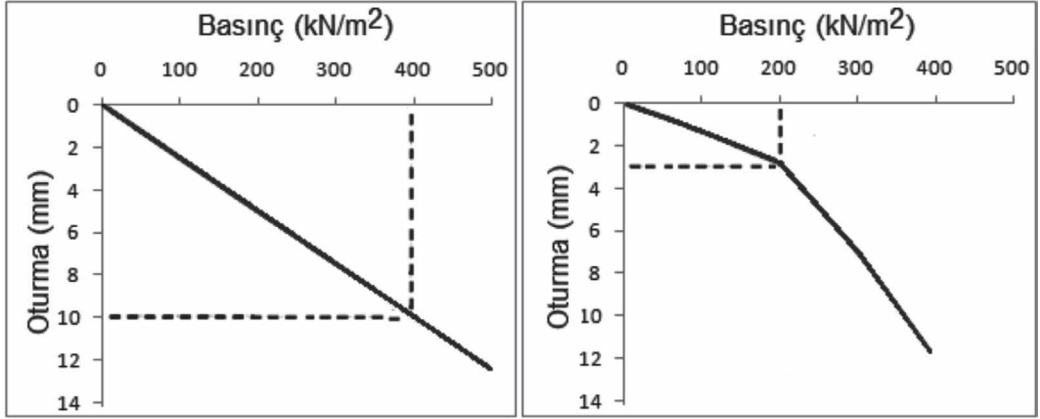
Figure 5. A) Stress - settlement curves for soil groups (Venkatramaiah, 1993), B) Relationship between plate load test curve and soil density (Terzaghi and Peck 1948).

DENEY SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN PARAMETRELER

Zemin Güvenli Taşıma Gücü (q_{em}): Plaka yükleme deney sonuçlarından elde edilen verilere göre gerilme-oturma eğrisi çizilir. Eğri 10 mm oturmaya ulaşıncaya kadar bir kırıklık göstermeden düzgün devam ediyorsa, 10 mm oturmaya karşı gelen gerilmenin (q_s) yarısı, zemin taşıma gücü (q_{em}) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 6A). Oturma - gerilme eğrisinde, kırılma gözleniyorsa, bu noktadaki plâka sınır taşıma gücü, 2-3 gibi bir güvenlik sayısına bölünerek, plâka güvenli taşıma gücü bulunur (Şekil 6B). Sıkı ve sert zeminlerde genel kayma kırılması

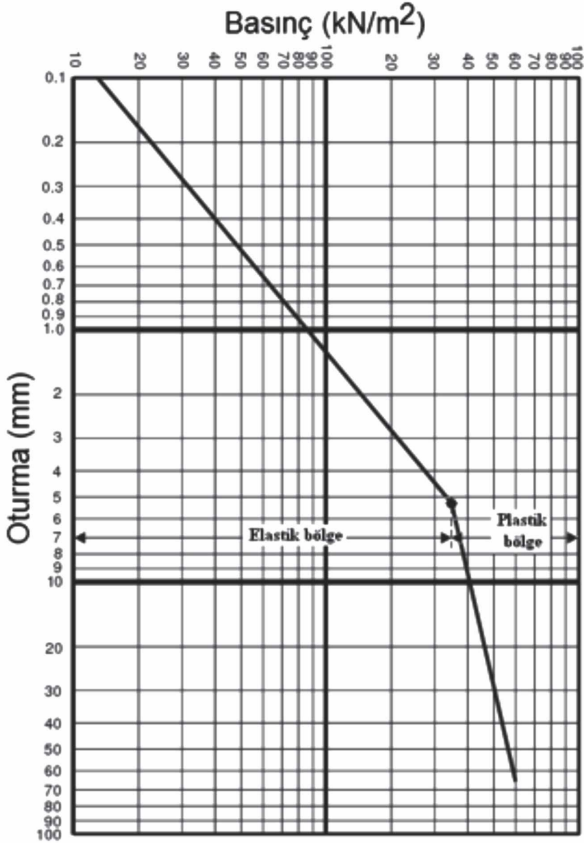
oluşur ve oturma - yük eğrisinde kırılma noktası belirgindir. Buna karşılık, bölgesel (yerel) kayma kırılmasının olduğu gevşek veya yumuşak zeminlerde, oturma-yük eğrisinde kırılma noktası belirgin değildir. Böyle bir durumda iki yol izlenebilir. Birinci seçenek olarak oturma - gerilme eğrisi her iki eksenin de logaritmik olduğu eksen takımında çizilir. Oturma (log) - gerilme (log) eğrisinin başlangıç ve son kısımları doğrusal olup, bu doğrusal kısımların kesişme noktası kırılma noktasını verir (Şekil 6C). İkinci olarak da plaka çapının % 15'ine karşılık gelen değer son taşıma gücü değeri olarak alınabilir (Yıldırım, 2009).

Dipova ve Cangir



A

B



C

Şekil 6. Basınç – oturma grafiğinden taşıma gücünün belirlenmesi.

Figure 6. Determination of bearing capacity from stress - settlement curves.

Deneyden elde edilen güvenli taşıma gücünden; temelin güvenli taşıma gücü belirlenebilir. Kohezyonlu zeminlerde taşıma gücü temel boyutundan bağımsız olup, zemin güvenli taşıma gücü aşağıdaki bağıntıyla belirlenir:

$$q_{em(\text{temel})} = q_{em(\text{plaka})} \quad (2)$$

Kohezyonsuz (taneli) zeminlerde ise, taşıma gücü, temel genişliği ile orantılı olarak arttığından, güvenli taşıma gücü eşitlik 3 ile belirlenir:

$$q_{em(\text{temel})} = q_{em(\text{plaka})} \frac{B_t}{B_p} \quad (3)$$

B_t = Temel Genişliği,

B_p = plaka derinliği

Temelin Oturması (s): Plaka yükleme deney sonuçlarından yararlanarak killi zeminlere oturan temellerin oturmaları eşitlik 4 kullanılarak tahmin edilebilir.

$$S_t = S_p^*(B_t/B_p) \quad (4)$$

Granüller zeminler için ise eşitlik 5 kullanılabilir.

$$St = Sp \cdot \left(\frac{Bt \cdot (Bp + 0,3)}{Bp \cdot (Bt + 0,3)} \right)^2 \quad (5)$$

Burada St temelin oturması (m), Sp plakanın oturmasıdır (m) (Terzaghi ve Peck, 1948).

Elastisite Modülü (E): Plaka yükleme deneyinden elastisite modülü (E) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$E = \left(\frac{\Delta q}{\Delta s} \right) \frac{\pi b}{4} (1 - \nu^2) \quad (6)$$

Burada Δq gerilme - oturma eğrisinde iki nokta arasındaki gerilme farkı, Δs gerilme - oturma eğrisinde iki nokta arasındaki oturma farkı, ν Poisson oranı ve b plaka çapı veya genişliği olarak tanımlanır (Clayton vd.,1995).

Yatak Katsayısı (k): Elastik bir zemine oturan temellerin herhangi bir noktasındaki oturmanın (S), aynı noktadaki taban basıncına (q) oranına yatak katsayısı (k) adı verilir. Yatak katsayısı değerleri plaka yükleme deneyleri ile elde edilebilir. B genişliğindeki bir temel q gerilmesi altında S kadar bir oturma meydana getirirse, bu durumda düşey yatak katsayısı (k_v):

$$k_v = \left(\frac{\Delta q}{\Delta s} \right) \quad (7)$$

şeklinde bulunur. Deney sonuçlarından çizilen q-S grafiği doğrusal ise k değeri tüm deney için aynı değeri alacaktır. Grafik eğrisel olduğunda ise p ve S değerinin konumuna göre k değeri değişecektir. Bowles (1996), yatak

katsayısı olarak başlangıç doğrusal kısmın eğimini almıştır. Hunt (2007), yatak katsayısını, arazi verisinin logaritmik grafiğinden elde ettiği yenilme değerinin yarısına karşılık gelen koordinatlar için hesaplamıştır.

Deneyde yüklenen plaka boyutları ile gerçek temel boyutları farklı olduğundan, yükleme deneyi ile bulunan yatak katsayısı kullanılırken dikkatli olunmalıdır. Yükleme plakası altında oluşan gerilme soğanı, plaka çapının yaklaşık 2 katı derinlikte önemli derecede azalmakta, oysa temel zeminin etki derinliği daha fazla olmaktadır (Şekil 7). Plaka yükleme deneyinden elde edilen yatak katsayısı değerleri, büyük yükler taşıyan geniş temel plakalarının hesabında kullanılmadan önce düzeltme işlemine tabi tutulmalıdır. Bu nedenle plaka yükleme deneyleri ile elde edilen yatak katsayısı değerleri, düzeltilmeden kullanılmaları durumunda ancak hareketli yükler altındaki uçak pisti ve yol kaplamalarının hesabında kullanılabilir. Temel için yatak katsayısı K_s ve plaka yükleme deneyinden elde edilen k_p arasında Terzaghi (1955) tarafından killi zeminler için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir.

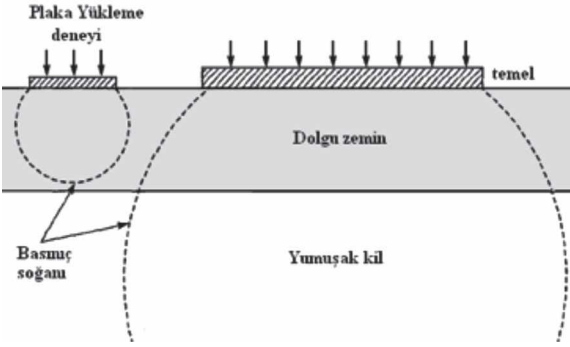
$$K_s = \left(\frac{Bp}{Bt} \right) k_p \quad (8)$$

Burada Bp , kullanılan plakanın boyutunu gösterirken, Bt tasarlanan temelin boyutunu göstermektedir. Kumlu zeminlerde ise K_s , Terzaghi'ye göre:

$$K_s = \left(\frac{Bt + Bp}{2Bt} \right)^2 * k_p \quad (9)$$

şeklindedir.

Dipova ve Cangir



Şekil 7. Plaka ve temel boyutlarına bağlı olarak zemin içerisinde oluşan basınç soğanları.

Figure 7. Pressure bulbs which occur depending on plate and foundation dimensions.

Drenajsız Kayma Mukavemeti (S_u): Killi zeminlerde plaka yükleme deneyi ile drenajsız kayma mukavemetinin değeri tahmin edilmek isteniyorsa plaka, kriko ile sabit hızda penetrasyon verecek şekilde aşağıya doğru bastırılır. Aşağıdaki eşitlikle sınır taşıma gücünden (q_s) yararlanılarak S_u bulunur.

$$S_u = \frac{qs - \gamma H}{Nc} \quad (10)$$

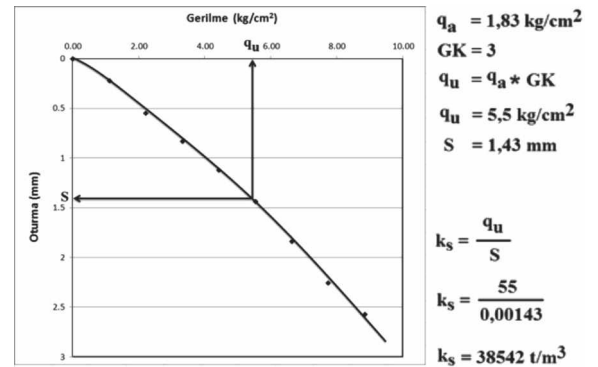
Burada γ zeminin ortalama birim hacim ağırlığı, H deneyin yapıldığı derinlik ve N_c taşıma gücü faktörüdür. Zemin yüzeyindeki yüklenen alan için $N_c = 6.15$, plakanın çapının 4 katı kadar derinlikte yapılan yüklemeler için $N_c = 9.25$ alınır (Clayton vd.,1995).

ÖRNEK ÇALIŞMALAR

Zayıf kayada yatak katsayısı belirlenmesi:

Antalya'da büyük bir eğlence ve alışveriş merkezi inşaatı temel zemininde plaka yükleme deneyi ile yatak katsayıları belirlenmiştir (Dipova, 2011a). İncelenen zemin, literatürde Antalya Travertenleri olarak bilinen, son yıllarda ise Antalya Tufası

olarak adlandırılan karasal karbonat çökellerinden oluşmaktadır. Tufanın 10 ayrı fasiyeste ve heterojen yapıda çökelmiş olması, buna ilave olarak çok değişken diyajenez düzeylerine sahip olması malzemenin mühendislik özelliklerine de yansımaktadır (Dipova ve Doyuran, 2006a; Dipova ve Doyuran, 2006b; Dipova, 2011b). Radye ile temas halinde olan ve gerilmelerin maksimum olduğu temel seviyesinde yatak katsayısının belirlenmesi yapı-zemin etkileşiminin çözümü için gereklidir. Plaka yükleme yönteminde etki derinliği sığ olmakla birlikte derindeki zemin tabakalarının yatak katsayısının korelasyonla belirlenmesi de mümkündür. Yapılan deney ayrıca taşıma gücü ve oturmaların da kontrol edilmesine imkan sağlamaktadır. Deneylerde zemin 9 kg/cm^2 gerilme değerine kadar yüklenmiş, deney eğrisinin doğrusala yakın olduğu anlaşılmış ve zeminde belirgin bir yenilme gözlenmemiştir. Yapı temelleri altında oluşacak en büyük taban basıncı değerinin (q_a) güvenlik katsayısı (GK) ile çarpımı ile elde edilen nihai taşıma gücü (q_u) değeri ve buna karşılık gelen oturma (S) değeri için yatak katsayısı değeri (k_s) hesaplanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Doğal zeminde yatak katsayısı belirleme amaçlı plaka yükleme deneyi.

Figure 8. Plate load test performed to determine modulus of subgrade reaction.

Çökebilen zemin davranışının incelenmesi: Antalya Lara bölgesinde 17 katlı bir yapının temel zemininde zeminin gerilme-deformasyon ilişkilerinin ortaya konması amacıyla temelin 4 köşesinde plaka yükleme deneyi yapılmıştır (Dipova, 2012). Antalya Tufası'nın karmaşık yapısı nedeniyle kayaç özelliği sunan tufada 1-100 MPa gibi geniş bir aralıkta dayanım gözlenmekte iken, zemin özelliği gösteren tufa çökellerinde ise çökebilen zemin davranışı gözlenebilmektedir (Dipova ve Doyuran, 2006a; Dipova ve Doyuran, 2006b; Dipova, 2011b). Yapılan deneylerde zemin 5.5 kg/cm² gerilme değerine (D = 30 cm plaka üzerinde 9300 kg düşey yük) kadar yüklenmiştir. Zayıf çimentolu tufa biriminin çökebilen zemin

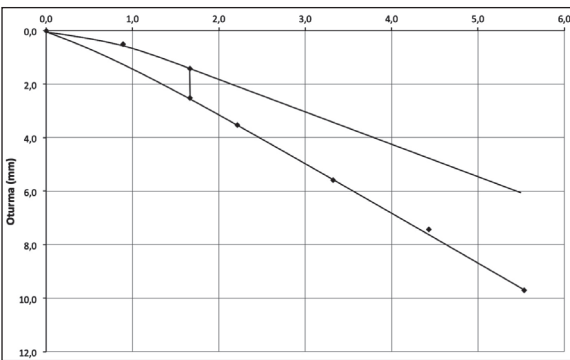
davranışı gösterebileceği dikkate alınarak, suya doyurma ile gerilme-deformasyon ilişkisindeki değişimin gözlenmesi amacıyla değişik gerilme kademelerinde zemin suya doyurularak çökme davranışı incelenmiştir. Şekil 9'da görüleceği gibi yapılan deneylerde zemin, çökme davranışı göstermektedir. Islak toplam oturma büyüklüğü dikkate alındığında zeminin taşıma gücünün tasarlanan yapı yüklerini taşımakta yetersiz olacağı anlaşılmıştır. Islanma ile ortaya çıkacak çökme potansiyellerinde gözlenen farklılık nedeniyle de farklı oturma sorunları ortaya çıkabilecektir. Bu nedenlerle her hangi bir ilave çözüm üretmeksizin projenin mevcut hâli ile uygulanmasında sakıncalar görülmüştür.



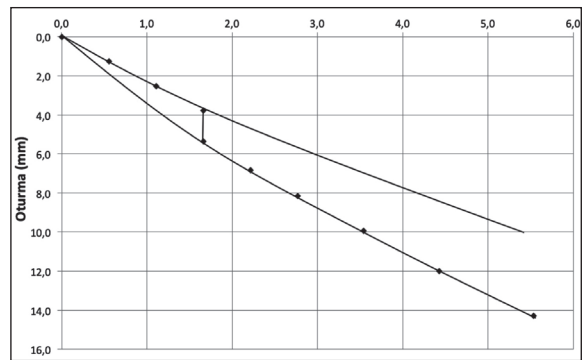
A



B



C



D

Şekil 9. A) Deneyin doğal nemde yürütülmesi, B) Islatma sonrası deneye devam edilmesi, C-D) Kuru (üstte) ve ıslak (altta) deney eğrileri.

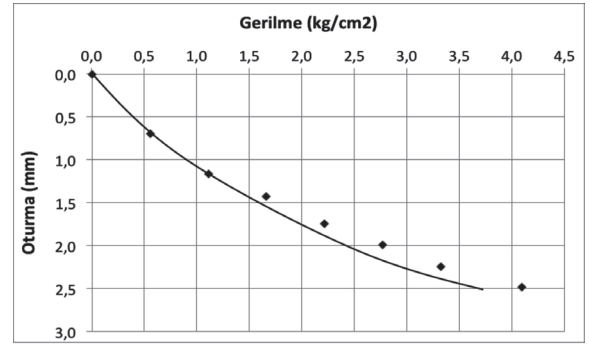
Figure 9. A) Testing steps under natural water content, B) Continuation of the test after inundation, C-D) Dry (above) and wet (below) test curves.

Dolgu zemin taşıma gücünün belirlenmesi:

Antalya Hurma bölgesinde inşa edilen bir dolgunun stabilitesinin araştırılması amacıyla plaka yükleme deneyi yapılmıştır (Dipova, 2011c). Yapılan deneylerde zemin 4 kg/cm^2 gerilme değerine ($D = 30 \text{ cm}$ plaka üzerinde 2890 kg düşey yük) kadar yüklenmiş ancak zeminde yenilme oluşmamıştır (Şekil 10). Yapı yükleri altında oluşacak oturma izin verilir sınırlar içinde kalacağı görülmüştür. Dolgu içinde sönmümlenerek azalan ilave gerilmelerin dolgu altındaki doğal zemin taşıma gücünden düşük olacağı ve taşıma gücü sorunu olmayacağı anlaşılmıştır.



A



B

Şekil 10. Sıkıştırılmış dolgu üzerinde plaka yükleme deneyi (A) ve deneye ait grafik (B).

Figure 10. Plate load testing on a compacted fill (A) and test curve (B).

SONUÇLAR

Taşıma gücü ve oturma miktarının yerinde doğrudan ölçülebildiği plaka yükleme deney düzeneği, zeminin üzerine oturan rijit bir plakadan, üstte yükün uygulandığı bir ölü yükten ve bu yükü alt plakaya aktaran bir krikoyla oturma miktarını ölçen komparatörlerden oluşmaktadır. Doğal zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesinin yanı sıra günümüzde daha çok karayolu ve havaalanlarında dolgu sıkıştırma kontrolü

amacıyla kullanılmaktadır. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan arazi deneyleri olan SPT ve CPT deneyleri ile dolgu zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesinin oldukça zor olması da, plaka yükleme deneyinin tercih nedenlerindedir. Plaka yükleme deneyi kaya ortamlar üzerinde de uygulanmaktadır. Basit bir düzeneğe sahip olması ve hızlı sonuç vermesi gibi avantajlarının yanı sıra deneyin bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlardan en önemlisi, etki derinliği problemidir. Deney sonuçları, zeminin doğal yoğunluk ve nem miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, özellikle dolgu zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesinde

avantajlara sahip olan plaka yükleme deneyinin ayrıntıları ve deney sonunda elde edilebilecek verilerin yorumlanabilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar belirtilmiştir. Yapılan örnek çalışmalar sonucunda, plaka yükleme deneyinin su içeriği değişimine hassas zeminlerin mekanik davranışının araştırılmasında da yarar sağladığı anlaşılmıştır. Yükleme sırasında istenilen bir gerilme değerinde zemine su verilmesi ile çökebilen zemin davranışı hakkında bilgi

üretilebilecektir. Karot alma ve laboratuvar deneyleri için örnek hazırlamanın zor olduğu zayıf kayalarda da plaka yükleme deneyi yapılarak gerilme-deformasyon ilişkisinin belirlenmesi ile, özellikle yüklerin en büyük olduğu temel altı seviyesi için önemli veriler elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- ASTM D1195, 1997. Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.
- ASTM D1196, 1997. Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.
- Bowles, J. E., 1996. Foundation Analysis and Design, 5th edition, McGraw-Hill, New York, 224-226 p.
- BS 5930, 1999. The code of practice for site investigation. The British Standards Institute.
- Clayton, C.R.I., Matthews, M.C., Simons, N.E., 1995. Site Investigation, Wiley-Blackwell. 497-503 p.
- Coates D.F., Gyenge, M., 1966. Plate-load testing on rock for deformation and strength properties, Testing Techniques for Rock Mechanics, ASTM STP 402, American Society for Testing and Materials.
- Craig, R. F., 1986 . Soil mechanics: 4th Edition, New York, Chapman & Hall, 302 p.
- DIN 18134, 1999. Determination of deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test, Deutsche Norm.
- Dipova, N., 2011a. Antalya büyükşehir belediyesi Antalya akvaryum projesi temel zemini özellikleri konulu Rapor, Akdeniz Üniversitesi Teknokent A.Ş., Ağustos 2011, Antalya.
- Dipova N., 2011b. The Engineering Properties of Tufa in The Antalya Area, SW Turkey, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 44 (1), 123-134.
- Dipova, N., 2011c. Antalya ili Konyaaltı ilçesi 8841 ada 07 parsel Zemin İyileştirme Kontrolü Konulu Rapor, Akdeniz Üniversitesi Teknokent A.Ş., Kasım 2011, Antalya.
- Dipova, N., 2012. Muratpaşa (Antalya) 5602 ada 02 parselin plaka yükleme yöntemi ile incelenmesi Konulu Rapor, Akdeniz Üniversitesi Teknokent A.Ş., Antalya.
- Dipova, N., Doyuran V., 2006a. Characterization of the Antalya (Turkey) tufa deposits, Carbonates and Evaporites, 21 (2), 144-160.
- Dipova, N., Doyuran V., 2006b. Assessment of the collapse mechanism of tufa deposits, Engineering Geology, 83, 332-342.
- Gökay, K., 1988. Bearing capacity analysis of layered rock for an underground mine. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, 135 s Ankara (yayımlanmamış).
- Hobbs, N.B., 1975. Factors affecting the prediction of settlement of structures on rock: with particular reference to the Chalk and Trias: General report and state-of-the-art review for session 4, Conference Proceedings on Settlement of Structures, BGS Cambridge, Pentech Press, London, 579 -610.
- Hunt, R.E., 2007. Geotechnical investigation methods, A field guide for geotechnical engineers, CRC Press, Taylor Francis Group, 236 p.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, 61 p.

Dipova ve Cangir

Terzaghi, K., 1955. Evaluation of coefficient of subgrade reaction, *Geotechnique*, 5 (4), 297-326 p.

TS 5744, 1988. İnaaat m¼hendisliđinde temel zemini ¼zelliklerinin yerinde ¼l¼m¼. T¼rk Standartları Enstit¼s¼, Ankara.

Venkatramaiah, C., 1993. *Geotechnical Engineering*, Third edition, New Delhi: John Wiley Eastern, 548 p.

Yıldırım, S., 2009. *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, 3. Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul, 63 s.

Vollastonit: Bir Gözden Geçirme

Wollastonite: A Review

Serhan HANER¹, Dilek ÇUHADAROĞLU²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi, Çünür, ISPARTA

²Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ZONGULDAK

Geliş (received) : 25 Eylül (September) 2012

Düzeltilme (revised) : 05 Aralık (December) 2012

Kabul (accepted) : 07 Ocak (January) 2013

ÖZ

Vollastonit, dünyadaki ulusal ekonomilerin çeşitli dallarında birçok kullanım alanına sahip metalik olmayan bir mineraldir. 1970'lere kadar dekoratif bir kayaç olarak kullanılan vollastonit, 1980'lerden beri ürünlerdeki asbestin yerini de alarak seramik, plastik, kauçuk, boya, kaplama, metalurji gibi pazarlarda da kullanılmaya başlamıştır. Kendine özgü klivaj özelliklerinden dolayı, kırma ve öğütme esnasında levhamsı ya da iğnemsiz kırılım gösterir. Bu tanecik morfolojisinin yapıya yüksek mukavemet katması, onu birçok pazarda oldukça önemli bir başarıya ulaştırmıştır. Avustralya Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği (NOHSC) ve Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı'nın (IARC) hazırlamış olduğu raporlarda, kanserojen etkisinin bulunmadığı sonucuna varılması, vollastonitin diğer endüstriyel mineraller ve fiberlerin yerine kullanılmasına neden olmuştur. Bu derlemede vollastonitin özellikleri, oluşumu, üretimi ve tüketimi, kullanım alanları, teknolojisi hakkında bilgiler verilmiş, toksikolojisi ve epidemiyolojisi hakkındaki çalışmaların sonuçları özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CaSiO₃, Kalsiyum metasilikat, Vollastonit.

ABSTRACT

Wollastonite is an inosilicate mineral, which is used in the different branches of the national economies in the world. Until 1970s wollastonite had been used as a decorative graywacke; however, from 1980s wollastonite has started to be used in many industries such as ceramics, plastic, rubber, paint, coating, metallurgy by taking the place of the asbestos in the products. Because of its unique cleavage properties, wollastonite breaks down during crushing and grinding into lathlike or needle-shaped particles of varying acicularity. This particle morphology imparts high strength, making it of considerable importance in many markets. In the reports of National Occupational Health and Safety

S. Haner

E-Posta: serhanhaner@sdu.edu.tr

Commision (NOHSC) and the International Agency for Research on Cancer (IARC), it has been pointed out that there is no cancerogenic effect on the human body. Accordingly, this consequence gives way to the replacement of industrial minerals and fibers with the wollastonite. In this review, the information about the occurrence, the product, the consumption and the characteristics of wollastonite, its scope of use and technology are provided. In addition, the results of the studies about the toxicology and the epidemiology of the wollastonite are summarized.

Key Words: $CaSiO_3$, Calcium metasilicate, Wollastonite.

GİRİŞ

Vollastonit doğal olarak oluşmuş bir kalsiyum metasilikattır ($CaSiO_3$). Metalik olmayan, iğnemsî (iğne uçlu) kristal yapıya sahip, alkalın (pH 9.8), beyaz renkli bir mineraldir. Vollastonitin ticari olarak kullanımını ortaya çıkartan ana sebep, kristal yapısı ve kimyasıdır (Ciullo, 1996; Kogel vd., 2006).

Vollastonitin çok sayıdaki kendine özgü özellikleri, gün geçtikçe artan birçok uygulama alanında kullanımına yol açmıştır. Bu özellikleri sayesinde seramiklerde, plastikler ve boyalar için dolgu malzemesi olarak, termal ve elektriksel yalıtkanlarda, sırlar için ergitici ile ıslatma ajanı ve metal ergitici olarak kullanılmaktadır (Springer, 1994).

Vollastonit madenciliği, muhtemelen ilk kez 1933 yılında, mineral yün üretiminde kullanılmak için Kaliforniya’da (ABD) yapılmıştır. Önemli miktarda ticari üretimine 1950’lerde ABD’nin Willsboro yatağında başlanmıştır. O zamandan beri özellikle seramik endüstrisinde büyük ölçüde kullanılmaktadır (IARC, 1997).

Çoğu vollastonit madeninde istenmeyen mineralleri uzaklaştırmak için yaş proses, yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı ve/veya ağır ortam ayırması gibi zenginleştirme yöntemleri uygulanarak yüksek saflıkta, ticari kalitede vollastonit elde edilebilmektedir.

Vollastonit, CaO ve SiO_2 kaynağı, düşük kızdırma kaybı, düşük yağ absorpsiyonu, çok düşük nem absorpsiyonu ve iğnemsî morfolojisi için kullanılmaktadır (Ciullo, 1996).

VOLLASTONİTİN TANIMI

Vollastonit İngiliz mineralog ve kimyacı William Hyde Wollaston’a (1766-1828) izafeten isimlendirilmiştir. Vollastonit kalsiyum, silisyum ve oksijenin bileşiminden oluşmuş bir kalsiyum metasilikattır. Vollastonit yararlı bir mineral olmasına rağmen, ticari olarak kullanımı kısa bir geçmişe sahiptir.

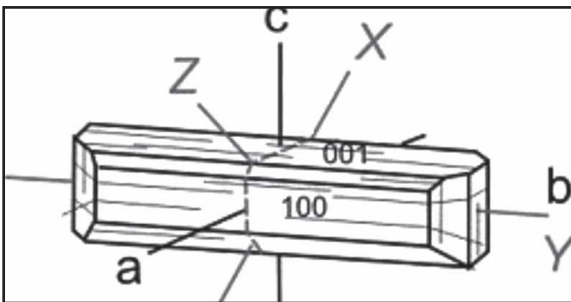
- 1700’lerin sonlarında: “tabular (kesme) billur - (table spar)” adıyla anılan mineralin kendine özgü karakteristik özellikleri bilimsel topluluklarca bilinir hale geldi.
- 1822: Tabular billur minerali, mineraloji ve kristallografi alanındaki katkılarından dolayı William Hyde Wollaston’un şerefine “Vollastonit” olarak yeniden adlandırıldı.
- 1933: Vollastonitin ilk endüstriyel kullanımı için Kaliforniya’da madenciliğe başlandı.
- 1953: NYCO’nun Willsboro’daki orijinal tesisi inşa edildi ve ticari üretime başlandı.
- 1967: Finlandiya ve Meksika’da ticari vollastonit üretimine başlandı.

- 1970: Hindistan'da ticari vollastonit üretimine başlandı.
- 1975: Afrika'da ticari vollastonit üretimine başlandı.
- 1980'lerin başları: Çin'de ticari vollastonit üretimine başlandı (Can, 1991; Sariiz, 1992; Virta, 2001; Dumont, 2004; Kogel vd., 2006; Maxim vd., 2008).

JEOLOJİ

Vollastonitin Mineralojisi, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Vollastonit, piroksen grubunun bir üyesidir. Kristal yapısı zincir $(\text{Si}_3\text{O}_9)^{6-}$ bileşimindedir. İki dörtyüzlünün aktif oksijenleri bir tarafta, üçüncü dörtyüzlünün aktif oksijeni diğer tarafta yer alır. Bu düzen mineralin dilinimi, yassı kristal şekli, lifsel dokusu ile uyum gösterir. Zincirler Ca atomları ile bağlanırlar. Ca atomları çarpık sekizyüzlüsel koordinasyon gösterirler. Vollastonit kristalleri yassıdır ve b eksenine paralel doğrultulu uzanmıştır. En fazla {001} pinakoidine ve {100} prizma yüzeylerine rastlanır. Genellikle masif, lifsel topluluklar halindedir (Şekil 1). Birleşme düzlemi {100} olan ikizler gösterir (Kumbasar, 1977).



Şekil 1. Vollastonit kristali (ICL, 2012).

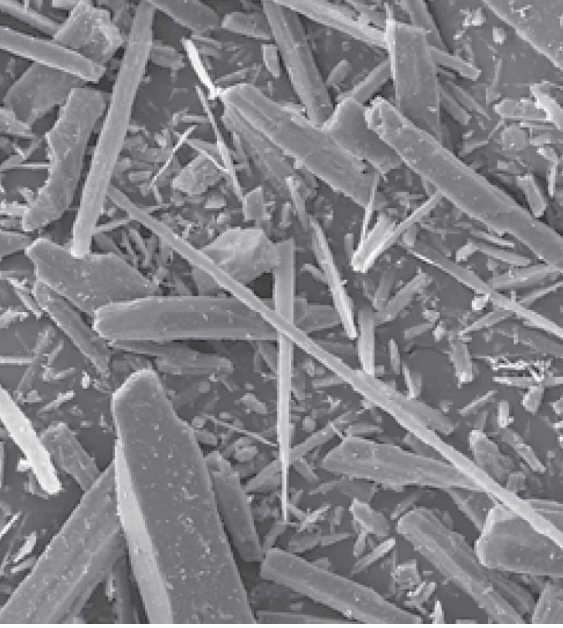
Figure 1. Wollastonite crystal (ICL, 2012).

Teorik kompozisyonu, % 48.3 CaO ve % 51.7 SiO_2 'den oluşmaktadır. Nadiren saf olarak bulunur. Genelde magnezyum, manganez, demir ve stronsiyum içermektedir. Kontak metamorfik kireçtaşları ve volkanik kayalarda andradit, granat, diyopsit, tremolit, epidot, apatit, sfen, plajyoklas feldspat, kalsit ve kuvarsla beraber bulunur (Sariiz, 1992; Virta, 2001; Dumont, 2004; Kogel vd., 2006).

Vollastonit aslında kimyasal olarak inerttir ancak hem hidroklorik asitte hem de diğer güçlü inorganik asitlerde dekompoze olabilir. Asetik asit gibi organik asitlerden, çok az etkilenebilir (Kogel vd., 2006).

Vollastonitin bazıları kısa dalga ve uzun dalga ultraviyole ışık altında floresans özellik verir ve pembe-turuncudan başlayarak yeşil-turuncuya kadar ve daha nadir olan mavimsi yeşile kadar renk değiştirirler (Sariiz, 1992; Kogel vd., 2006). Vollastonit fosforesans özellik de gösterebilir.

Vollastonitin kırma ve öğütme işlemleri esnasında, kendine özgü dilinim özelliklerinden dolayı, iğne şekilli parçacıklar oluşur. Ürünlere yüksek mukavemet katan bu parçacık morfolojisi, birçok pazardaki en önemli başarı sebebidir. Şekil 2'de seramik uygulamalar için kullanılan ticari bir vollastonitin parçacık morfolojisi görülmektedir. Parçacıkların iğnemsiliği onların boy/çap oranı ile tanımlanır. Vollastonit düşük boy/çap oranlı (genel olarak 5:1 ya da daha az) ve yüksek boy/en oranlı (genellikle 12:1 ya da daha çok) olarak pazarlanır. Başka bir deyişle, çapları $2.5 \mu\text{m}$ 'den küçük ve $40 \mu\text{m}$ 'den daha büyük aralıklarda olabilir (Kogel vd., 2006).



Şekil 2. Ticari bir vollastonitin parçacık morfolojisi (250x) (NYCO, 2012).

Figure 2. The particle morphology of a commercial wollastonite (250x) (NYCO, 2012).

Saf vollastonit parlak ve beyazdır. Safsızlıkların tip ve miktarına göre gri, krem, kahverengi, soluk yeşil ya da kırmızı renklere olabilir (Virta, 2001). Ticari vollastonit genellikle 85 - 95 arasında G.E. (General Electric reflectometer) parlaklığına sahiptir. Vollastonitin parlaklığının ölçümünde Hunter metodu da kullanılmaktadır.

Vollastonitin uygulama alanının belirlenmesinde, 1000 C°'ye kadar ısıtıldığında bünyesinden uzaklaşan uçucu madde miktarı (Kızdırma Kaybı-LOI), bir diğer önemli özelliktir. Ticari vollastonit ürünler 0.5 - 2.0 aralığında kızdırma kaybına (LOI) sahiptirler.

Kaplama endüstrisinde kullanımının başlıca sebebi, pH'ının yüksek (9.9) olmasıdır. Çizelge 1'de vollastonitin seçilmiş özelliklerinin bazıları listelenmiştir.

Çizelge 1. Seçilmiş vollastonit özellikleri (Anon., 2001; Kogel vd., 2006).

Table 1. Selected wollastonite properties (Anon., 2001; Kogel et al., 2006).

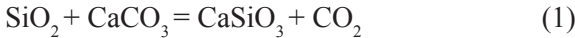
Kristal sistem	Monoklinik veya Triklirik
Kristal yapısı	Bıçak şekilli kütleler; iğnemsiz
Renk	Beyaz, bazen krem, gri ya da çok uçuk yeşil
Çizgi rengi	Beyaz
Parlaklık	İnci gibi camsı
Mohs sertliği	4.5 - 5.0
Özgül ağırlık	2.87-3.09 gr/cm ³
Ergime noktası	1540 C°
Pseudo-vollastonite geçiş noktası	1200 C°
Termal genişleme katsayısı (mm/mm/C°)	6.5 * 10 ⁻⁶
Ateş kaybı (1000 C°)	0.5 - 2 %
pH	10 - 11

Oluşumu

Magma yerkabuğundan yükselir ve yerleşirken, etrafını çevreleyen yantaşları etkiler ve onlarla reaksiyona girerek kendisi de etkilenir. Yantaşların maruz kaldığı değişimlerin en büyük sebebi magmadan gelen yüksek sıcaklıktır. Örneğin killi şistler sularını kaybeder ve kısmen pişerlerken, kalkerli formasyonlar mermerleşmektedirler. Magma ile uzun süre kontakt halinde kalan kayaçlarda kimyasal değişimler ve hatta erimeler olur. Zira magmasal sıvılar ve uçucu elemanlar yantaşlara süzülerek yeni elementler ilave ederler. Böylece kalkerler silikatlı kayaçlara (taktit veya skarn), marn ve killer ise amfibollü kayaçlara dönüşürler. Magmanın yantaşlar üzerinde meydana getirdiği değişimlerin tümüne kontakt metamorfizma (değme başkalaşımı) denir. Skarnlar, magmadan kireçtaşlarına silikat, alüminyum, demir ve

manganez transferi ile oluşmuştur (Çoğulu, 1973; Genç, 1992).

Vollastonit magmatik kayalar ile kalkerlerin kontaklarında ısıl metamorfizma ürünü olarak oluşur. Eşitlik 1 ile vollastonit oluşumu tanımlanmaktadır.



Silika + kireçtaşı = vollastonit + karbondioksit

Düşük sıcaklıklarda, kuvars ve kalsit, kararlı bir birleşme oluşturacaktır. Sıcaklığın yaklaşık 400 - 450 C°'ye yükselmesiyle birlikte reaksiyon başlamaktadır. $1 \cdot 10^5$ Pa atmosfer basınç altında gerçekleşen bu reaksiyon kalsit veya kuvars ergiyiği bitinceye kadar devam eder. Vollastonit formasyonu ile CO₂ yayılımından dolayı basınç yükselir, böylece reaksiyonun devam edebilmesi için yüksek sıcaklık ihtiyacı daha da artar (950 C°'ye kadar olabilir). Bu sırada, CO₂ gazının doğal kırık ve çatlak zonlarına kaçma eğiliminden dolayı basınç azalır. Bu basınç düşüşü ile reaksiyon düşük sıcaklıklarda devam eder. Fakat basınç yükseldiğinde reaksiyon sıcaklığı birdenbire artmaz. Tersine reaksiyon ve kalsit oluşumu gerçekleşir.

Vollastoniti oluşturan diğer sebep, nadiren yüksek miktarda karbon içeriği olan ergimiş kayadan (magma) vollastonitin direkt kristalleşmesidir. Bu magmaların kökeni tartışmalıdır ancak geçerli olan düşünce, magmanın muhtemelen alt kabuk ve üst manto kökenli olmasıdır (Andrews, 1970; Fattah, 1994; DPT, 2001; Virta, 2001; Kogel vd., 2006).

DÜNYA VOLLASTONİT REZERVLERİ VE FAALİYETLERİ

Dünya vollastonit kaynakları tam olarak hesaplanmamıştır. En büyük rezervler ve küresel vollastonit üreticileri Çin, Finlandiya, Hindistan, Meksika, Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunmaktadır (Çizelge 2, Şekil 3). Diğer önemli vollastonit kaynakları Avustralya, Kanada, Şili, Fas, Kenya, Namibya, Kuzey Kore, Pakistan, Sırbistan, Güney Afrika, Sudan, Tacikistan, Türkiye ve Özbekistan'da bulunmaktadır (Maxim ve McConnell, 2005; IMF, 2010; Virta, 2011).

Dünya görünür vollastonit rezervleri tahmini 90 milyon ton, muhtemel rezervleri tahmini 270 milyon ton civarındadır. Ancak çoğu büyük yatak, tetkik edilmediği için kesin rezerv miktarı tahmin edilememektedir (Virta, 2011; Virta, 2012).

Şekil 4 ve 5 incelendiğinde, 1990 yılına göre kullanım alanı ve tüketim miktarı hızla artan vollastonitin 2010 yılındaki üretimi yaklaşık olarak % 48'lik bir artış göstermiştir. Ayrıca dünya vollastonit üretimi verileri incelendiğinde, son 2 - 3 yıla kadar birçok ülkenin vollastonit üretiminin bulunmadığı da görülmektedir (Virta, 2011).

Dünya vollastonit üretimi ve satışı birbirine yakın seyretmektedir. 2010 yılı işlenmiş vollastonit satışı tahmini olarak 490.000 ton civarındadır (Virta, 2011).

Çizelge 2. Başlıca vollastonit üreticisi ülkeler, şirketler ve bunlara ait yatakların rezerv ve içerikleri (Kuo, 2011; Wolkem, 2005; IBM, 2005; IMY, 2011; Geo, 2011; Jilin, 2011; Nordkalk, 2012; Teir vd., 2005).

Table 2. Major wollastonite producer countries, companies and reserves and components of their owned deposits (Kuo, 2011; Wolkem, 2005; IBM, 2005; IMY, 2011; Geo, 2011; Jilin, 2011; Nordkalk, 2012; Teir et al., 2005).

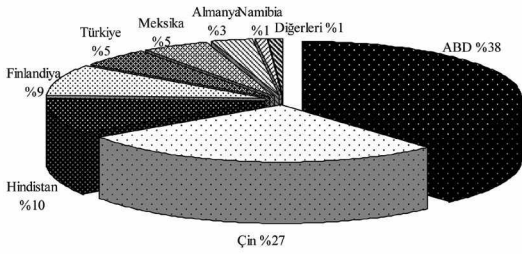
Nokta Adı	Ülke / Şirket	Yatak / Yer	Rezerv (x10 ⁶ ton)	İçerik
1	ABD / NYCO Minerals Inc.	Lewis / Essex County-New York	5.4 (M)	% 60 vollastonit, % 30 granat, % 10 diyopsit
2	ABD / R.T. Vanderbilt Company, Inc.	Harrisville / Lewis County-New York	0.9 (M)	% 90 vollastonit
3	Kanada / Canadian Wollastonite	St. Lawrence / Ontario	9.6 (M)	% 42 vollastonit, % 25-40 diyopsit/hedenberjit, % 10 albit, % 5 kuvars
4	Meksika / Minera Roca Rodando	Pilares / Hermosillo-Sonora	50 (G)	> % 50 vollastonit
5	Hindistan / Wolkem India Ltd.	Sirohi, Udaipur, Swaroop Ganj, Amliya, Belka, Khera / Rajasthan	2.49 (G) 9.9 (M)	> % 90 vollastonit
6	Çin / Jilin Shanwei Wollastonite Mining Co., Ltd.	Changwaizi / Panshi-Jilin	1.5 (M)	-
7	Finlandiya / Nordkalk Corp.	Ihalainen / Lappeenranta	10 (M)	% 25 vollastonit

G: Görünür, M: Muhtemel



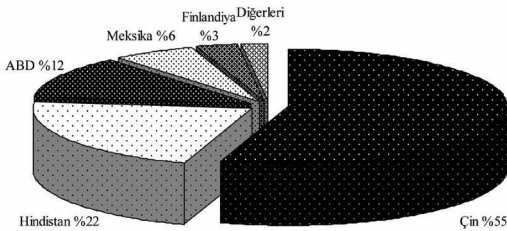
Şekil 3. Başlıca vollastonit üretilen yatakların konumu.

Figure 3. The location of major wollastonite deposits.



Şekil 4. 1990 yılı dünya wollastonit üretimi (366.000 ton) (Springer, 1994).

Figure 4. World production of wollastonite in 1990 (366.000 tonnes) (Springer, 1994).



Şekil 5. 2010 yılı dünya wollastonit üretimi (540.000 ton) (Virta, 2011; Alexandra, 2011).

Figure 5. World production of wollastonite in 2010 (540.000 tonnes) (Virta, 2011; Alexandra, 2011).

Amerika Birleşik Devletleri

New York'ta iki önemli wollastonit üreticisi şirket bulunmaktadır. Bunlar NYCO Minerals A.Ş. ve R.T. Vanderbilt A.Ş.'dir.

New York Essex'teki Adirondack Dağları'ndaki NYCO Minerals A.Ş. tarafından işletilen Lewis Yatağı % 60'a kadar wollastonit % 30 granat ve % 10 diyopsit içermektedir. Bu yatak ortalama % 49 wollastonitten oluşmaktadır. NYCO Minerals A.Ş.'nin mevcut diğer rezervleri Oak Hill (ortalama % 45 wollastonit) ve Deerhead'ta (ortalama % 25 wollastonit) bulunmaktadır. NYCO Minerals A.Ş.'ye göre,

bu üç yatakta toplam 6 milyon ton rezerv vardır. Bu yatakların hepsi, anortozit intrüzyonu ile Prekambriyen döneme ait silisli karbonatların metamorfizma ve metazomatizma kontaklı ile oluşmuşlardır.

Şirketin Willsboro'daki wollastonit işleme tesisinde yan kayaç olan granat ve diyopsit manyetik ayırma ile uzaklaştırılmaktadır. Yüksek boy/çap oranına sahip ürünler üretmek için jet değirmenler kullanılmaktadır. NYCO Minerals A.Ş. tarafından üretilen ticari wollastonitlerden bazıları Çizelge 3'te verilmiştir. NYCO Minerals A.Ş. 2004 yılında 34.8 milyon dolarlık satışa ulaşmıştır.

Diğer ticari önemi olan wollastonit yatağı New York Lewis'teki Gouverneur Bölgesi'nde, R.T. Vanderbilt A.Ş. tarafından işletilmektedir. Bu yatak siyenit intrüzyonu ile Prekambriyen döneme ait silisli karbonatların metamorfizma ve metazomatizma kontaklı ile oluşmuştur. Bu yatakta granat bulunmamaktadır. Bu cevher % 90 wollastonit yanında mavi kalsit, grafit, prehnit, manyetit ve diyopsit içermektedir. R.T. Vanderbilt A.Ş. tarafından üretilen ticari wollastonitlerden bazıları Çizelge 4'te verilmiştir.

Diğer yataklar, Amerika Birleşik Devletleri'nin batısında yaygın olarak bulunmaktadır. 1990'ların sonunda, American Wollastonite Mining Company (bugünlerde Previa Resources Ltd. olarak bilinir) Tonopah, Nevada yakınlarındaki bir yatak için değerlendirme ve yatırım araştırmaları arayışındaydı. Bu yatakta % 60 wollastonit içeren boy/çap oranı 16:1 olan 1 milyon tondan daha fazla rezerv tespit edilmiştir. 10 metrik tonluk bir pilot tesis yapım aşamasındayken, 2005 yılında bu girişim durdurulmuştur (Kogel vd., 2006; NYCO, 2012; Vanderbilt, 2012).

Kanada

Kanada'da ekonomik öneme sahip yataklar Nova, Scotia, Quebec, Ontario ve British Columbia'da bulunmaktadır (Dumont, 2004).

Quebec'te bulunan Orleans Resources Inc. 1990'larda ana üretici konumundaydı. Fakat 2000'li yıllarda başlayan ciddi teknik sıkıntılardan ve satış problemlerinden dolayı üretim durdurulmuş ve tesis demonte edilmiştir. Ülkede, 2005 yılından itibaren yalnızca bir yatak

aktif olarak Canadian Wollastonite Company tarafından değerlendirilmeye başlanmıştır. Şirketin iş ortağı arayışı devam etmektedir.

Quebec, Ontario ve British Columbia'daki yataklarda arama çalışmaları yoğunlaştırılmıştır. Jeolojik açıdan önceliği olan, mermer ve kalk-silikat kayaçlarla beraber bulunan anortozittir (Kogel vd., 2006). Yatakların birçoğunda asgari boy/çap oranının 8:1 olduğu rapor edilmiştir (Can, 1991; Sarız, 1992; Kogel vd., 2006).

Çizelge 3. NYCO Minerals A.Ş. tarafından üretilen ticari vollastonitler (Ciullo, 1996; NYCO, 2012).

Table 3. Commercial wollastonites product by NYCO Minerals Inc. (Ciullo, 1996; NYCO, 2012).

Ürün	Parlaklık (G.E.)	<325 Mesh (%)	Medyan Part. Ebadi (µm)	Yağ Abs. (lbs./100 lbs.)	Yüzey Alanı (m ² /g)	Nem (%)	K.K. (%)	Kullanım Alanı
10 Wollastocoat®	93	100	4	25	3.2	0.15	0.5	Boya ve kaplama
M400Wollastocoat®	92	99.9	8	21	1.8	0.1	0.5	
Nyad® 325	90	99	14	21	1.5	0.2	0.5	Boya ve kaplama, inşaat
Nyad® 400	92	99	8	22	1.8	0.05	0.5	
Nyad® 1250	93	100<400	4	27	3.2	0.25	0.5	
Nyad® G	82	99<100	55	35	0.4	0.02	0.5	
Aspect®3000	87	99.9	7	45	2.2	0.1	6.3	
Nyad® M100	79	90<100	55	20	0.6	0.05	0.47	İnşaat
Nyad® MD200	85	99<200	20	20	1.1	0.05	6.3	
Nyglos® M30	80	99<100	38	31	0.35	0.1	6.3	
Nycor® R	81	75<200	70	30	0.3	0.02	0.5	İnşaat, metalürji
Nyad® 5000	94	100<400	3	30	4.3	0.12	0.5	Seramik
Ultrafibe® M20	80	98<200	24	30	0.8	0.1	0.47	
Ultrafibe® 4W	92	99.9	7	55	2.9	0.1	0.5	Sürtünmeli ürünler

Çizelge 4. R.T. Vanderbilt A.Ş. tarafından üretilen ticari vollastonitler (Ciullo, 1996; Vanderbilt, 2012).

Table 4. Commercial wollastonites product by R.T. Vanderbilt Co. (Ciullo, 1996; Vanderbilt, 2012).

Ürün	Parlaklık (G.E)	<325 Mesh (%)	Medyan Part. Ebadı (µm)	Yağ Abs. (Ibs./100 Ibs.)	Yüzey Alanı (m ² /g)	Nem (%)	K.K. (%)	Kullanım Alanı
Vansil® W-10	87	97.3	<200	20	1.6	0.5	1.5	
Vansil® W-20	87	98	12	20	2.4	0.5	1.5	Aşındırıcı,
Vansil® W-30	87	99.9	4.5	21	3.7	0.5	1.5	seramik,
Vansil® WG	89	80	<200	---	---	---	0.5	boya ve
Vansil® HR-325	89	99.95	2.3	40	---	---	0.5	kaplama,
Vansil® HR-2000	89	95	<200	14	46	---	0.5	plastik

Meksika

Vollastonitin bilinen üreticileri Zacatecas ve Sonora eyaletlerinde yoğunlaşmıştır (Kogel vd., 2006). Zacatecas eyaletinin La Blanca yöresinde granat ile birlikteki vollastonit yatağının 30 milyon ton görünür, 40 milyon ton muhtemel ve 53 milyon ton da mümkün rezervi vardır. Morelas'ta 200.000 ton rezervli başka yataklar da bulunmaktadır (Can, 1991). Meksika genelinde 2010 yılındaki vollastonit üretiminin 32.400 ton olduğu tahmin edilmektedir (Virta, 2011). Vollastonit üretimi bilinen diğer eyaletler Chiapas, Durango, Morelos ve Tabasco'dur.

Minera Roca Rodando (NYCO), Pilares yatağındaki vollastonit madenini işletmektedir. Bu yatak, Kretase çağı granitik kayaların etrafını çeviren Paleozoik kalsitik mermerler ve kuvarsitlerin birbiri ardına konumlanmasıyla oluşmuştur.

Finlandiya

Nordkalk Corp., kireçtaşı ve vollastonit üretimi yapmaktadır. Rettig 2002 yılında Nordkalk'ın hisse sahibi olmaya başlamış ve hissesi zaman içerisinde artmıştır (Virta, 2011). Daha sonra Rettig Group, 2010

yılında Nordkalk'ın tamamını satın almıştır (Nordkalk, 2012). Nordkalk dünyanın beş büyük vollastonit üreticisinden birisidir (Virta, 2011). Şirket, Lappeenranta'daki zengin oluşumlardan vollastonit üretimi yapmaktadır. Kendine özgü flotasyon tekniği ile safsızlıklar uzaklaştırılarak, yüksek saflıkta ve kararlı ürünler elde edilmektedir. Kullanım alanına göre farklı boyutlarda üretilen ürünler, seramik, metalurji, plastikler, boya ve kaplama sanayinde kullanılmaktadır (Nordkalk, 2012).

Hindistan

1969 yılında Belkapahar vollastonit yatağı, Rajasthan'ın Udaipur Bölgesi'ndeki Khila köyü yakınlarında keşfedilmiştir. Bu yatak % 96 vollastonit yanında az miktarlarda kalsit, granat, diyopsit ve kuvars içermektedir. Bu yatağın görünür rezervinin yaklaşık olarak 50 milyon ton olduğu hesaplanmıştır ve muhtemel rezerv de yaklaşık 200 milyon tondur (Kogel vd., 2006).

30 yıldan daha uzun bir süredir vollastonit madenciliği ile uğraşan Wolkem India Ltd., bugünlerde dünyanın en büyük vollastonit üreticilerinden biri konumundadır (Wolkem, 2005). Rajasthan'ın Sirohi bölgesinde bulunan

madende 175.000 ton/yıl üretim yapılmaktadır (Virta, 2011).

Çin

19 vilayette yaklaşık 50 yatak keşfedilmiştir. Bunlardan 30 yatak kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Vollastonit yatakları Jilin, Yunnan, Jiangxi, Qinghai ve Liaoning vilayetlerinde yoğunlaşmıştır. Kaynaklar yaklaşık 130 milyon tondur. (Kogel vd., 2006). Çin, seramik ve metalurjik uygulamalarda kullanılan toz boyutundaki vollastonitte egemen durumdadır. Son zamanlarda yüksek boy/çap oranlı (yüksek kaliteli) vollastonit üretimi yapmaktadır.

2004 yılında S&B Industrial Minerals S.A. (S&B) ve Jilin-Shanwei Wollastonite Mining Co., Ltd. girişim ortaklığı için bir antlaşma imzalanmıştır (Virta, 2004).

Diğer Ülkeler

Vollastonitin diğer küçük üreticileri Şili'de Estudios y Proyectos Mineros Ltda., Türkiye'de Kalemaden, Fas'ta Morocco Minerals Co., Kenya'da Ati River Mining Ltd. ve Güney Afrika'da Namaqua Wollastonite (Pty) Ltd.'dir (Kogel vd., 2006).

Türkiye'de kaliteli vollastonit yatakları bulunmaktadır. MTA Genel Müdürlüğü kayıtlarına geçmiş bulunan Türkiye'deki bilinen vollastonit yatakları Bursa (muhtemel rezerv 1.078.600 ton), Balıkesir (mümkün rezerv 500.000 ton) ve Çanakkale illerinde bulunmaktadır (DPT, 2001). Ancak vollastonit konusunda detaylı bir rezerv tespit çalışması yapılmadığından bu yatakların ekonomikliğı konusunda bilgi verilememektedir.

2010 yılı Nisan ayında üretime başlamış olan Namaqua Wollastonite (Pty) Ltd.'in (Güney Afrika), 2014 yılı hedefi 23.000 ton/yıl'dır (Alexandra, 2010).

İlave olarak çok az miktarlarda vollastonit üreticilerinin Pakistan ve Kuzey Kore'de olduğu raporlanmıştır. İşlenmemiş vollastonit yataklarının Sırbistan, Çek Cumhuriyeti, Polonya, Bağımsız İngiliz Milletler Topluluğu, Litvanya, İsveç, İspanya, Fransa, İtalya, Yunanistan, İsviçre, Namibya, Küba, Yeni Zelanda, Avustralya ve Japonya'da olduğu belgelenmiştir (Kogel vd., 2006).

UYGULAMA ALANLARI

Vollastonitin ana pazarları seramikler, plastikler ve kauçuk, asbest yerine kullanım, metalurji, boyalar ve kaplamalardır. Bu pazarlarda tüketilen vollastoniti, yüksek boy/çap oranlı vollastonit ve öğütülmüş ya da toz boyutunda olan vollastonit olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür.

Yüksek boy/çap oranına sahip vollastonit (boy/çap, 10:1 ile 20:1 arasında olan), özellikle plastikler ve kauçuk (toplam tüketimin % 19 - 25), asbest yerine (% 20 - 25), az miktarda da boya ve kaplamalar (yaklaşık % 2 - 5) gibi çeşitli uygulamalarda fonksiyonel dolgu malzemesi ve takviye malzemesi olarak kullanılır. Bu uygulamalarda, vollastonit, ilave sertlik, eğilme mukavemeti, darbe dayanımı sağlamaktadır. Plastiklerde, yüksek boy/çap oranına sahip vollastonit son ürünlerin elektriksel özelliklerini, ısı ve boyutsal kararlılığını geliştirebilir.

Vollastonitin öğütülmüş boyutta olanları (toz boyutunda) hem kalsiyum oksit hem de silisyum dioksit kaynağı olarak kullanılabilir.

Bu tip vollastonitin tüketim diliminin en önemli pazarını seramikler (% 40 - 45) ve metalurji (% 12 - 15) oluşturur (IARC, 1997).

Seramikler

Vollastonitin seramiklerde özellikle de seramik beyaz eşyalarda (whitewares) kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir. Vollastonit genellikle seramik karolarda, sağlık gereçlerinde, sofa eşyalarında vesanatsal ürünlerde kullanılmaktadır. Seramik karolarda da ana kullanım alanını duvar karosu oluşturmaktadır. Bu uygulamada, vollastonit, boyutsal homojenlik, düşük küçülme ve eğilme, mukavemet, düşük nem yayılımı ve hızlı pişme sağlamaktadır (Kogel vd., 2006).

1993'te seramik sektöründeki vollastonit tüketimi yaklaşık olarak 150.000 ton olmuştur. Bu tüketim değeri o yıllardaki toplam dünya üretiminin yaklaşık olarak % 42'sine karşılık gelmektedir. Seramik sektöründe vollastonit en fazla duvar ve yer karosu bünyelerinde ve sırlarında, az miktarda da sağlık gereçleri, toprak ürünleri (earthenware) ve özel uygulamalarda kullanılmaktadır (IARC, 1997).

Sağlık gereçlerinde, vollastonitin iğnemi şeklinin bünyede ham mukavemeti geliştirdiği, su buharının daha hızlı çıkışına izin verip kurumayı çabuklaştırdığı ve florin yayılımını azaltmada katkıda bulunduğu kanıtlanmıştır. 2000 yılında verilmiş bir patente, vollastonitin kurutulmuş haldeki sağlık gereçleri bünyesinin darbe direncini % 40'tan daha fazla arttırdığı ve kuruma ile virtifikasyon sıcaklığını düşürdüğü iddia edilmektedir (Kogel vd., 2006; Robinson ve Craig, 2000).

Vollastonitin, seramik ürünlerin mineralojik ve kimyasal özelliklerine birçok katkısı vardır.

1. İğnemi yapısı sayesinde, pişirilmemiş kil bünyelerini, yüksek hızlı presleme tekniğine daha dayanıklı hale getirir.
2. Pişmemiş karoların nem çıkışına yardımcı olur, dolayısıyla nem genişlemesinin tekrarlanmasını azaltır.
3. Pişmiş ürün deformasyondan kurtulur ve yüksek darbe direnci gösterir. Böylece kırılma azalır.
4. Duvar karosu yüzeyine iyi akustik özellikler kazandırır.
5. Vollastonit düşük ısıl genişleme katsayısına sahiptir. Bu özelliği, bünyesindeki diğer minerallerin çoğu zaman neden olduğu küçülmeyi önler.
6. Vollastonitin CO₂ yayılımının çok düşük (% 1'in altında) olması, geleneksel bünye mineralleri ile kıyaslandığında çok avantajlı bir durumdur.
7. Düşük gaz içeriği, sır yüzeyindeki beneklerin (pinhol) azalmasını sağlar ve ergime esnasındaki kabarmayı azaltır.
8. Vollastonit alkali elementler ya da safsızlıklar bulundurmadığı için mükemmel bir izolatördür.
9. Düşük bir sinterleme sıcaklığına (991 - 1196 C°) sahiptir.
10. Ürüne beyazlık ve parlaklık kazandırır (Springer, 1994).

Metalurjik Uygulamalar

Düşük sıcaklıklarda ergime özelliği olan vollastonit, sac yapımında uygulanan sürekli döküm işlemi için önemli bir katkıdır. Vollastonit, cüruf şartlandırıcı olarak da kullanılmaktadır (Kogel vd., 2006).

Örneğin, bir rafınasyon potasından ergimiş çelik refrakter tandış içine döküldüğü zaman, ergimiş bir haldeki yüzeyin sürekliliği sağlanıncaya kadar vollastonit ilave edilir. Bu işlem, hava ile teması olan metal yüzeyinin oksitlenmesini önlemek, çeliğin yüzey hatalarını en aza indirmek, kalıbın çeperini yağlamak ve metalik kalıntıların emilimini sağlamak için yapılır. Vollastonit, kaynak toz formülasyonunda yanma karakteristiklerini geliştirmek ya da kıvılcımı engellemek için de kullanılır. Metalurjik kullanımlar için üretilen vollastonit, az miktarda ve nadir kullanılmaktadır (Fattah, 1994; Springer, 1994; IARC, 1997).

Metalurjik uygulamalarda kullanılan vollastonit genellikle düşük boy/çap oranlı ya da toz (45 ya da 75 µm) boyutundadır (Kogel vd., 2006).

Asbest Yerine Kullanımı

Sağlık risklerinden dolayı Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da asbestin yerine vollastonit kullanılmaktadır. Asbestin en geniş kullanımı beton boru dökümünde mekanik mukavemet kazandırmak içindir. Yüksek boy/çap oranlı vollastonitin uzun dilinim parçacıkları, bu uygulamadaki asbestin taklidini yapabilmektedir (Springer, 1994). Son 20 yılda, vollastonitin çimento üretiminde, belirli sürtünmeli ürünlerde ve ateşe dayanıklı duvar levhasında kısa lifli asbest yerine kullanımı yaygın bir hale gelmiştir. İnşaat ve yalıtım levha uygulamalarında, yıllık yaklaşık 35 - 40 bin ton yüksek boy/çap oranına sahip vollastonit tüketilmektedir. Vollastonit yaygın olarak iç ve dış mekanların duvar levhası uygulamalarında, çatı kiremitleri, kayraklar, özel şekilli yalıtım malzemeleri ve dış cephe

kaplamaların yanı sıra refrakter dışındaki yüksek ısıya dayanıklı yalıtkan levha uygulamalarında da kullanılmaktadır.

Vollastonit fren pistonu, fren balatası ve debriyajlar gibi sürtünmeli ürünlerde önemli bir katkı maddesidir. Kuzey Amerika'da, sürtünmeli ürünlerin formülasyonundaki asbestin yerine, vollastonit (yüksek boy/çap oranlı) ve fiberler (metalik ile organik) kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nin dışındaki ülkelerde, vollastonit, contalardaki asbest yerine de kullanılmaktadır (IARC, 1997).

Plastik Uygulamalar

Plastik, vollastonitin en fazla uygulama alanlarından biridir ve büyük bir pazara sahiptir (Degryse ve Elsen, 2003). Vollastonit tamamlanmış malzemenin özelliklerine katkı sağladığı için plastik dolgu maddesi pazarında diğer beyaz dolgu maddeleriyle rekabet edebilmektedir. Bu endüstride bir dolgu malzemesi olarak vollastonitin popülerliği düşük su emme, düşük reçine gereksinimi, ısıl kararlılık, ısıl iletkenlik, kimyasal saflık gibi takviye edici özelliklerine bağlıdır (IARC, 1997). Vollastonit kullanılarak en yüksek kalitede dolgu maddelerinin elde edilir. Dolgu maddelerine beyazlık ve yüksek parlaklık kazandırmasının yanı sıra bu ürünlerin çekme, çarpma ve eğilme özelliklerini de geliştirir. Seramiklerde olduğu gibi küçülmeyi azaltır. Aşınma direncini ve kaymayan zemin döşemesindeki sürtünmeyi artırır. Vollastonit, talk ya da karbonat dolgu malzemeleriyle kıyaslandığında çok düşük su emilimine sahiptir ve reçine karışımlarından etkilenmez. Plastikleştirici akışkanları absorblamaz. Plastik yüzeyindeki düşük su

emilimi sayesinde suya ve lekelenmeye karşı direnç kazandırır. Düşük elektrik iletkenliği yalıtkan plastiklerin üretimine olanak sağlar. Örneğin, polipropilende, % 40 vollastonit katkısı ile çok faydalı elektriksel yalıtım özelliklerine sahip bir malzeme elde edilir (Springer, 1994).

Vollastonitin hem termosetler hem de termoplastiklerde uygulamaları mevcuttur. Örneğin, termoplastiklerde, naylon6, naylon6/6, poliyester, sıvı kristal polimerler, mühendislik reçineleri gibi poliamidler içeren vollastonit; termosetlerde ise, fenollü kalıp bileşenleri, epoksiler, poliüretanlar, poliüre ve bazı doymamış poliesteleri içeren vollastonit kullanılır. Şu anda daha ucuz olması nedeniyle plastiklerde, kısa öğütülmüş cam elyafı, mika ve talk gibi dolgu malzemelerinin kullanımı vollastonite göre daha yaygındır (IARC, 1997).

Boya ve Kaplama Uygulamaları

Kaplamalarda, yüksek parlaklıktaki vollastonitin kullanımına, ilk kez Amerika Birleşik Devletleri pazarında (1950'lerin başlarında) başlanmıştır. O zamanlarda vollastonit sadece 3:1 - 20:1 aralığında boy/çap oranına sahip, saf beyaz renkteki iğnemsî bir katkı maddesiydi. Bu mineralin iğnemsî özelliği, boya kaplamalarının mekanik mukavemetini, kötü hava şartlarında aşınmaya karşı dayanımı gibi özelliklerini geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Ayrıca çatlama, kılcal çatlak ve zamanla oluşabilecek diğer hatalara karşı çok iyi direnç sağlamaktadır (IARC, 1997). Vollastonit beyaz rengi (çok safken), düşük yağ absorpsiyonu, yüksek pH'larda (9.9) kararlı oluşu ve iyi ıslatma kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı, renk, akışkanlık ve küf direnci gibi özelliklerin gerektiği kaplamalara katılmaktadır.

Vollastonit son zamanlarda, dış cephede kullanılan hem yağ hem de su bazlı emülsiyon boyalarında ve lateksler ile yol işaretleme boyalarında katkı ve dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (IARC, 1997). Boya dolgu malzemesi olarak kullanılan vollastonitin, beyaz renk ve parlaklık özellikleri sayesinde solgun boyalara açık parlak renkler kazandırılmaktadır. Vollastonitin süspansiyonlardaki kuvvetli bazik özelliği, iyi bir metal astar boyası bileşeni olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Polivinil asetat boyalarında asetik asit zamanla ayrışır ancak vollastonit özellikle asitli ortamlarda boyayı korur ve stabilize eder. Vollastonitli dış cephe boyları, kendi kendini temizleme özelliğine sahiptir. Özel tane yapısı ile hava şartlarına karşı direnci geliştirir. Özel boyalarda vollastonitin aşındırıcı ya da yalıtım özellikleri kullanılır (Andrews, 1970; Fattah, 1994; Springer, 1994).

Diğer Uygulamaları

Vollastonit, düşük miktarlarda, cam ve fiberglas endüstrisinde, enerji tüketimini azaltmak için kireçtaşı ve silika yerine katılmaktadır. Ek olarak, aşındırıcılarda, kaynak elektrotlarında, toprak şartlandırıcı ve bitki gübresi olarak, kağıtta dolgu malzemesi olarak ve yol malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Vollastonitin yeni bir kullanım alanı da sentetik kemik implantlarıdır. Kemik kayıplarında kullanılan bu implantlar β -vollastonit (genelde α -vollastonitten sentetik olarak üretilmiş form) içermektedir. Bu implantlar, kemik dokusuyla hızlı bir şekilde güçlü bağlar kurduğu için, omur protezlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

SENTETİK VOLLASTONİT

Sentetik vollastonit üretiminde çeşitli yöntemler içeren çok sayıda patent mevcuttur. Bu konudaki anahtar sayılabilecek patentler Çizelge 5'te listelenmiştir.

ABD, Danimarka, İtalya, Almanya ve Rusya sentetik meta silikatlar üretmektedirler. Sentetikler çoğu zaman sulu olup susuz tiplerinin hiçbiri doğal vollastonitin kristal yapısında değildir.

Danimarka'da sentetik kalsiyum meta silikatlar ülkede çok bulunan tebeşir ve kumdan elde edilir ve "Synopal" ticari adını alırlar. Tebeşir ve kum, eritken rolü gören az miktarda dolomit ile çamur halde karışır. Bu çamur 1560 C°'de kavrulur. Katılaşınca elenir ve ikinci bir fırında 1250 C° sıcaklıkta tekrar kavrulur. Nihai ürün hemen hemen köşeli, beyaz renkli ve opak olup % 50 kadar vollastonitten ibarettir. Ayrıca yanında gehlenit ve akarmanit de vardır. Sentetik üretilen "Synopal" mozaik yapımına, yer ve çatı kaplamalarındaki kullanıma uygundur.

İtalya'da sentetik vollastonit "Wollanita" diye bilinir ve silis kumu, tebeşir ve dolomitten Danimarka'dakine benzeyen bir teknikle üretilir. "Wollanita" yol malzemesi, aşındırıcı olarak ve geleneksel seramiklerde kullanılır (Anon, 1991; Can, 1991).

Sentetik vollastonitler CaSiO_3 - FeSiO_3 sisteminde bir katı solüsyon meydana getirirler. Bu

Çizelge 5. Sentetik vollastonit üretiminde anahtar patentler (Anon., 1991).

Table 5. Key patents for synthetic wollastonite production (Anon., 1991).

Patent	Üretim Yöntemi	Sahibi
U.S. 3.926.647 (1975)	Döner Fırın Kalsinasyonu	Rheinische Kalksteinwerke
U.S. 3.967.967 (1976)	Hidrotermal Proses	Reinbold A Strick
U.S. 3.966.884 (1976)	Düşük Sıcaklık Kalsinasyonu	Bureau de Recherches Geologiques et Minieres Dyckerhoff
U.S. 4.047.968 (1977)	Fosfat Cüruf Kalsinasyonu	Cement
U.S. 4.443.550 (1984)	Cam Ergitme/ Katılaştırma	Nippon Sheet Glass Co.

kombinasyonda bazen silis yerine titan geçebilir. Bu takdirde vollastonitin pseudovollastonite dönüşüm ısısı artar. Vollastonitin seramikte kullanılabilmesi için fırınlama esasında hacim değişikliği olacağından titan elementinin karışımında olması istenir (Can, 1991).

TEKNOLOJİ

Yatakların Araştırılması ve Tespiti

Ticari vollastonit yataklarının araştırılmasına, istenilen lokasyon, mineraloji ve asgari tonaj gibi hedef parametrelerin tanımlanmasıyla başlanmaktadır. Daha sonra bölgedeki bilinen yatakları, madencilik

bölgelerini ve vollastonit oluşumuna elverişli diğer jeolojik alanları kapsayan bir araştırma planı geliştirilir.

Araştırma hedefleri belirlendiğinde, öncelikle seçilmiş bölgelerin jeolojik keşfi gerçekleştirilir. Mevcut jeolojik haritalara dayanarak yankayaç litolojisini ve hava fotoğraflarını kullanarak yankayaç litolojisinin jeolojik haritalandırmasını yapılır. Daha sonra akarsu çökelti örneklerinin (örneğin garnet ve diyopsitle ilişkili) ya da arazi numunelerinin hem mineralojik, fiziksel hem de kimyasal analizi içeren çeşitli araştırma teknikleri kullanılır. Vollastonitçe zengin kayaçlar gravimetrik, elektriksel ya da manyetik özellikler göstermedikleri için, bölgesel keşif esnasında, jeofiziksel teknikler nadiren kullanılır.

Nemli iklimlere sahip bölgelerde bulunan vollastonitçe zengin kayaçlar, kötü hava şartlarına karşı düşük direnç göstermelerinden dolayı çevresine göre belirgin olmayan yer şekilleri oluşturmaktadır. Bu gibi bölgelerde, vollastonit tabakalarını takip etmek için jeomorfolojik özellikler kullanılabilir. Çok kaba taneli ya da kuvars ile kirlenmiş (ya da her ikisi) vollastonit, kimyasal hava şartlarına uzun süre maruz kaldıktan sonra değişmeden kalabilmektedir.

Daha sonra, ayrıntılı bir jeolojik inceleme yürütülür. Bu jeolojik incelemeler jeolojik haritalamayı, karotlu sondajları ve yarmaları kapsamaktadır. Araştırmanın bu aşaması esnasında alınan vollastonit örneklerine kimyasal analiz (x-ray fluorescence, XRF) ve mineralojik analiz (x-ray diffraction, XRD) uygulanır. Ek olarak, kızdırma kaybı, parlaklık ve boy/çap oranı belirlenir. Seçilmiş örneklerden elde edilen ince kesitlerin petrografik incelemesi de yararlı olabilir.

Eğer bir önceki araştırma safhasından olumlu sonuçlar alınır, ne oranda pazarlanabilir ürünler üretilebileceğini ek analizlerle belirlemek için, yataktan temsili alınan malzemenin yığın numunesini çıkarmak gereklidir. Yığın numunesi karot sondaj numuneleri gibi aynı testlere tabi tutulur. Analitik sonuçlara dayanılarak, standart ticari şartnamelere uygun malzeme geliştirmek için, yığın numuneleri üzerinde laboratuvar ölçekli zenginleştirme çalışmaları yapılır. Laboratuvar ölçekli test çalışmasında, elle ayıklama, kırma, eleme, çakıllı ya da bilyalı değirmende öğütme, flotasyon, yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı, koyulaştırma, filtrasyon, kurutma, çakıllı ya da jet değirmende öğütme gibi adımların kombinasyonunu içeren uygun zenginleştirme yöntemi belirlenir. Zenginleştirilmiş ürünlere XRD, XRF, yüzey alanı, yığın yoğunluğu, yağ absorpsiyonu ve partikül boyut dağılımı analizleri yapılır. Bir de her bir ürünün taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları çekilir (Kogel vd., 2006).

Madencilik

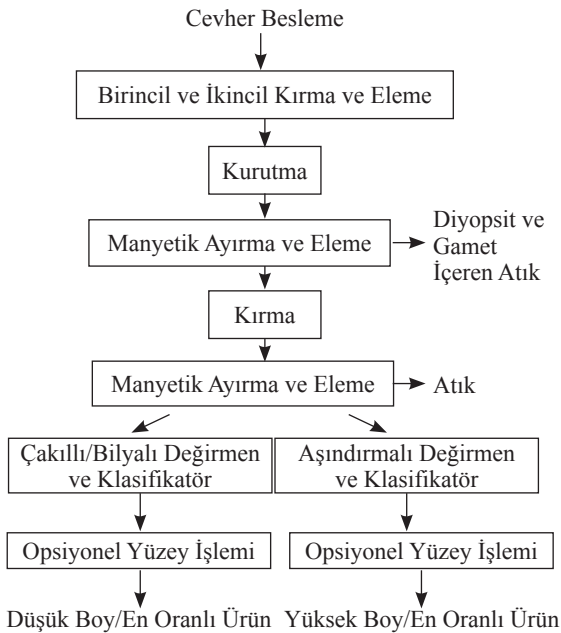
Vollastonit yatakları açık veya kapalı işletilebilmektedir. Vollastoniti parçalamak için delme ve patlatma gerekmektedir. Örneğin New York, Essex County'deki vollastonit yataklarında her iki madencilik yöntemi de uygulanmaktadır. Fox Knoll yatağında açık işletmecilik 1951 yılında başlamıştır (Kogel vd., 2006).

Türkiye'de Çanakkale Seramik Fabrikası tarafından 1988 yılına kadar açık işletmecilik yöntemiyle cevher kafaları izlenerek üretim yapılmıştır. Üretilen cevher ocakta triyajla (ayıklama ile) zenginleştirilmiştir (Sarıöz, 1992).

Proses

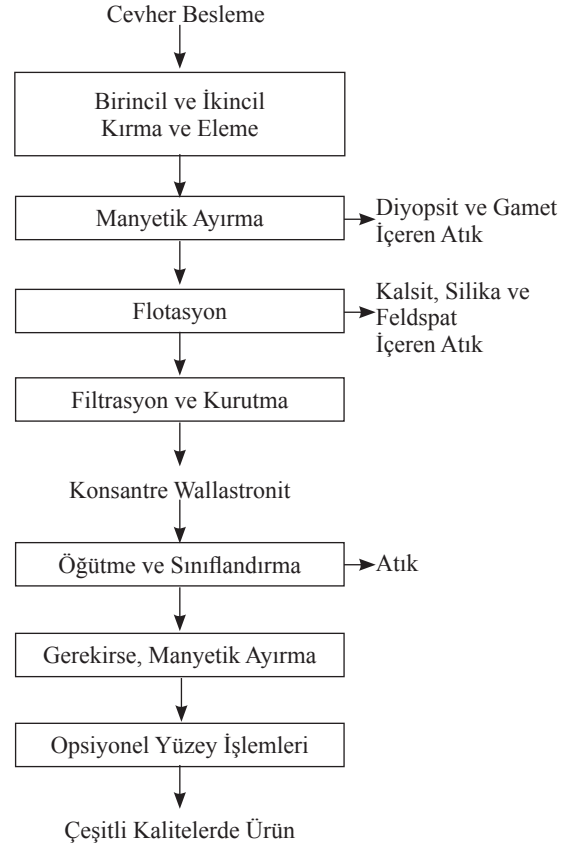
Vollastonit yatakları granat ve diyopsit içeriğinden dolayı çoğunlukla beyaz renkli değildir. Bu safsızlıkların uzaklaştırılması gereklidir. Bu minerallerin her ikisi de zayıf manyetik olduğu için, yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı kullanarak vollastonitten uzaklaştırılabilirler. Vollastonit çoğunlukla büyük miktarda kalsiyum karbonat ile birlikte bulunur ve bu mineral flotasyon ile uzaklaştırılmalıdır.

Şekil 6'da ve 7'de, kuru ve yaş yöntemlerle vollastonit zenginleştirme işleminin genel akım şeması görülmektedir. NYCO New York'ta kuru metot, Meksika'da yaş metot kullanmaktadır (Kogel vd., 2006).



Şekil 6. Vollastonit prosesi (kuru).

Figure 6. Wollastonite processing (dry).



Şekil 7. Vollastonit prosesi (yaş).

Figure 7. Wollastonite processing (wet).

EKONOMİK FAKTÖRLER

Talep ve Tüketim

Vollastonitin 2010 yılı ABD satışlarından yola çıkılarak, % 30 - 35 plastikler ve kauçuk, % 20 - 25 seramikler, % 10 - 20 metalürjik uygulamalar, % 10 - 15 boya, % 10 - 15 sürtünmeli ürünler, % 10 - 15 çeşitli uygulamalarda tüketildiği tahmin edilmektedir.

Dünya çapındaki vollastonit satışları seramik uygulamalar için muhtemelen % 30 - 40, polimerler (plastikler ve kauçuk) için % 30 - 35, boya için % 10 - 15'e tekabül etmektedir.

Geriye kalan satışlar inşaat, sürtünmeli ürünler ve metalürjik uygulamalardan oluşmaktadır.

Dünyadaki otomobil sanayi ve çelik talebi diğer vollastonit pazarlarından daha önce küresel durgunluktan kurtulmaya başladığı için, 2009 yılına kıyasla 2010 yılında yerel piyasadaki satışların dağılımı yavaş yavaş plastik ve metalürjik uygulamalara doğru kaymış olabilir. 2009 ve 2010 yıllarını kıyasladığımızda, vollastonitin yapıştırıcı, dolgu malzemeleri, seramikler, boyalar, sıva ve çatı kaplamaları gibi ürünlerde kullanımında önemli bir fark yoktur. 2010 yılında Avrupa'daki vollastonit satışlarındaki gidişat büyük olasılıkla ABD'deki ile benzerdir. Asya'da bütün pazarlardaki büyüme muhtemelen daha tekdüzedir.

Vollastonit, seramiklerde, sır ve bünye çatlağını önler ve sır hatalarını azaltır. Metalürjik uygulamalarda, kalsiyum oksitinin bir kaynağı ve cüruf şartlandırıcısıdır. Boya sektöründe, bir pH tamponlayıcı olarak rol oynar. Plastiklerde, gerilme ve eğilme mukavemetini geliştirir, reçine tüketimini azaltır, yüksek sıcaklıklarda ısı ve boyutsal kararlılığı artırır. Vollastonit yer karolarında (asbest yerine), sürtünmeli ürünlerde, yalıtkan pano ve panellerde ve çatı kaplama ürünlerinde kimyasal ve fiziksel direnci geliştiren bir hammaddedir (Virta, 2011).

Fiyatlar

İğnemsiz vollastonitin, 2012 yılı ABD fabrika teslim fiyatı 200 mesh için 210 - 240 \$/ton, 325 mesh için 220 - 250 \$/ton, yüksek boy/çap oranlı (15:1 - 20:1) vollastonit için 444 \$/tondur. 2012 yılı Çin'in Limanda Bordo'ya teslim fiyatı (FOB) 200 mesh için 80-90 \$/ton, 325 mesh için 90 -

100 \$/tondur (Indmin, 2012). Hawley (2010), vollastonitin plastik uygulamalar için, tonunun 600 - 1800 dolardan satıldığını, seramikler için, 200 - 450 dolar olduğunu belirtmiştir. Asıl fiyatlar, satıcı ve alıcı arasındaki sözleşme koşullarına bağlı olduğu için, bu fiyatlar sadece genel bilgi olarak kullanılmalıdır (Virta, 2011).

TOKSİKOLOJİ VE EPİDEMİYOLOJİ ÇALIŞMALARI

Vollastonit ile ilgili mesleki tehlikeleri tanımlamak için birçok çalışma yapılmıştır. Genel olarak bu çalışmalarda, vollastonitin akciğerlerdeki etkilerine odaklanılmıştır. Akciğer lifleri üzerindeki etkileri (pulmoner fibrozis), akciğer kanseri ve mezotelyum etkileri, negatiftir (IARC, 1997). Bu çalışmalar (i) hücrelerle ilgili/mekanistik, (ii) biopersistans, (iii) hayvan (kansere ve diğer incelemeler) ve (iv) insan çalışmalarını kapsamaktadır.

(i) Hücrelerle ilgili mekanistik çalışmalar

Hücrelerle ilgili mekanistik çalışmaların çoğu vollastonitin kötü etkiler (örneğin, sitotoksikite, iltihap ve mezotelyal hücre çoğalması) yaptığını göstermektedir. Fakat vollastonitin bu kötü etkileri fiberlerin diğer tiplerinin etkilerinden önemli derecede daha az zehirli ve kısa sürelidir.

(ii) Biopersistans çalışmaları

Biopersistans çalışmaları, vollastonitin ciğerden hızlı bir şekilde temizlendiğini ve biopersistans özelliğinin diğer birçok mineral fiberden daha kısa sürdüğünü göstermektedir.

(iii) Hayvan alışmaları

Fareler ve yakın türleri üstünde yürütülmüş birbiriinden farklı çalışmalarda, vollastonitin fibrosis ve kanser açısından negatif olduğu saptanmıştır. Yalnız vollastonit dikkate değer iki istisnada kötü etkiler üretmiştir. Bu iki çalışma istisnai sınırlar içinde kalmıştır ve yapılmış olan çok sayıdaki çalışma, kanser sonuçlarının negatif olduğunu göstermiştir (WHO, 2006; Maxim ve McConnell, 2005).

Hayvan alışmaları bazı kurumlar tarafından bir grup olarak değerlendirilmektedir. Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (International Agency for Research on Cancer - IARC) 1997 yılında, deney hayvanlarındaki kanserojenlik bulgularını yetersiz olarak sınıflandırmıştır. Bunun anlamı ise, araştırmalar referans gösterilerek kanserojen etkinin varlığı veya yokluğu hakkında yorum yapılamayacağıdır. Bu sınıflama, 1987 yılında IARC tarafından alınan, hayvanlar üzerinde yapılan vollastonit deneylerinin kanserojen etkisi hakkında sınırlı kanıtlara sahip olduğu kararını hatırlatmaktadır.

Son zamanlarda Avustralya Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği (National Occupational Health and Safety Commission - NOHSC) tarafından vollastonitin kanserojenliği konusu yeniden incelenmiştir. Bu incelemede daha kesin ve güvenilir hayvan verileri değerlendirilmiştir. Yeterli sayıdaki bu bulgularla, denek hayvanlarındaki vollastonit fiberlerin zehirsiz olduğu ve kanserojen olmadığı sonucuna varılmıştır.

(iv) İnsan alışmaları

Vollastonite maruz kalan grupların mesleki yönden ölüm oranı ve hastalıklılık durumunu

içeren birkaç epidemiyolojik çalışma vardır (Hanke vd., 1984; Huuskonen vd., 1982). alışmalar, meslek icabı vollastonite maruz kalmanın kansere neden olmadığını, ancak yüksek derecede maruz kalındığında kanser dışında bazı etkileri olabileceğini göstermiştir. Vollastonite mesleki olarak maruz kalındığında, bronşitte belirsiz bir artış, ciğer fonksiyonunda azalma ve sınırlı pnömokonyoz bulgusu saptanmıştır. Ayrıca vollastonit düşük düzeyde zehirli etkiye sahiptir ancak yüksek derecelerde maruz kalındığında plevral ve doku içi değerişimlere sebep olmaktadır.

IARC, doğal vollastoniti Grup 3 (sınıflandırma insanlar üstündeki kanserojen etkisiyle alakalı değeril) içine dahil etmiştir.

NOHSC, vollastonit liflerinin insanlar için zehirli veya kanser yapıcı etkisinin olmadığını belirtmiştir.

Alman İş Yerindeki Kimyasal Bileşiklerin Sağlık Tehlikelerini Araştırma Komisyonu (The German Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area - MAK Commission) değerlendirmesinde, “Bütün ihtimallere nazaran vollastonit liflerinin kanser yapıcı herhangi bir etkisi bulunmamaktadır” denilmektedir. (Kennedy, 1990; Maxim ve McConnell, 2005).

SONUÇ

Vollastonitin kanserojen etki taşımayışı ve birçok endüstri alanında ürünlere kattığı çok sayıdaki avantaj sayesinde üretimi ve tüketimi her geçen gün artmaktadır. Ne yazık ki ülkemizde bulunan bu değerli hammaddenin üretimi yapılmadığı gibi rezervi konusunda da sağlıklı bir bilgi bulunmamaktadır. anakkale Seramik

Fabrikası A.Ş.'nin 11.12.1979 tarihine kadar işletmiş olduğu (yaklaşık 10 yıl) Balıkesir ili, Kepsut ilçesi, Serçeören köyündeki wollastonit cevheri sadece triyajla (elle ayıklama) bile seramik endüstrisinde kullanılabilir kaliteye gelebilmektedir.

KATKI BELİRTME

Değerli katkı ve önerilerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Bülent HANER'e (Bülent Ecevit Üniversitesi) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Alexandra, F., 2011. Supply situation report- Wollastonite struggles to get back top re-crisis levels: Industrial Minerals. May. (<http://www.mineralnet.co.uk/>)
- Alexandra, F., 2010. Top stories: South Africa rejoins wollastonite supply: Industrial Minerals. March. (<http://www.indmin.com/>)
- Andrews, R.W., 1970. Wollastonite. London: Institute of Geological Sciences, Her Majesty's Stationary Office.
- Anon., 1991. Synthetic Minerals: Potential Materials from Ontario Resources. Industrial Minerals.
- Anon., 2001. Wollastonite. (<http://www.handbookofmineralogy.org/search.html?p=all>)
- Can, G., 1991. Wollastonit yataklarının jeolojisi, madenciliği ve dünya üretimi. Jeoloji Mühendisliği, 39, 55-62.
- Ciullo, P.A., 1996. Industrial Minerals and Their Uses, Noyes Publications. New Jersey, 607 p.
- Çoğulu, H.E., 1973. Petrografi ve Petroloji. İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu, Sayı:94, 318 s.
- Degryse, P., Elsen, J., 2003. Industrial Minerals,- Resources, Characteristics and Applications. Leuven University Pres, Belgium, 120 p.
- DPT, 2001. Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu. Devlet Planlama Teşkilatı, No:2611, 204 s.
- Dumont, M., 2004. Wollastonite. Canadian Minerals Yearbook, No:60, 5 p.
- Fattah, H., 1994. Wollastonite-New aspects promise growth. Industrial Minerals, 21-43.
- Genç, S., 1992. Mineraller, Kayaçlar, Jeolojik Yapılar ve Saha Jeolojisi. KTÜ Basımevi, Sayı:118, 221 s.
- Geo, 2011. Geologydata.info. (<http://www.geology-data.info/index.htm>)
- Hanke, W., Sepulveda, M.J., Watson, A., Jankovic, J., 1984. Respiratory morbidity in wollastonite workers. British Journal of Industrial Medicine, 41 (4), 474-479.
- Hawley, G.C., 2010. Wollastonite: Mining Engineering, 62 (6), 84-86.
- Huuskonen, M., Tossavainen, A., Koskinen, H., Zitting, A., Korhonen, O., Nickels, J., Korhonen, K., Vaaranen, V., 1982. Respiratory morbidity of quarry workers exposed to wollastonite (Abstract). In Proceedings of the International Conference on Occupational Lung Diseases, Chicago, Park Ridge, IL: American College of Chest Physicians.
- IARC, 1987. Silica and some silicates. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks of chemicals to humans.
- IARC, 1997. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 68, 283-305.
- IARC, 2013. International Agency for Research on Cancer. (<http://www.iarc.fr/>)
- IBM, 2005. Indian Bureau of Mines. (<http://ibm.nic.in/index.htm>)
- ICL, 2012. Imperial College London. (<http://www3.imperial.ac.uk/>)
- IMF, 2010. International Monetary Fund. Washington, DC, Kenya: Poverty Reduction Strategy Paper, 10/224, 201 p.

- IMY, 2011. Indian Minerals Yearbook (http://ibm.nic.in/imyb2010_prelims.pdf)
- Indmin, 2012. Industrial Minerals, (<http://www.indmin.com/>)
- Jilin, 2011. Jilin Shanwei Wollastonite Mining Co., Ltd. (<http://www.china-wollastonite.com>)
- Kennedy, B.A., 1990. Surface Mining (2nd Edition). Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Maryland, 1177 p.
- Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., Krukowski, S.T., 2006. Industrial Minerals & Rocks (7th Edition). Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, 1507 p.
- Kumbasar, I., 1977. Silikat Mineralleri. İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu, 170 s.
- Kuo, C.S., 2011. In Minerals yearbook. U.S. Geological Survey. (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf>)
- Maxim, L.D., McConnell, E.E., 2005. A review of the toxicology and epidemiology of wollastonite. *Inhalation Toxicology*, 17, 451-466.
- Maxim, L.D., Niebo, R., LaRosa, S., Johnston, B., Allison, K., McConnell, E.E., 2008. Product stewardship in wollastonite production. *Inhalation Toxicology*, 20, 1199-1214.
- NOHSC, National Occupational Health and Safety Commission. (<http://www.nohsc.gov.au/>)
- Nordkalk, 2012. Norkalk Corporation. (<http://www.nordkalk.com/mine>)
- NYCO, 2012. (<http://nycomineral.com/>)
- Robinson, S.M., Craig, D.B., 2000. Reinforcement of ceramic bodies with wollastonite. United States Patent, No:6 037 288, 16 p.
- Sarız, K., 1992. Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciliği. Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, 443 s.
- Springer, J., 1994. Ontario wollastonite: uses, markets and Ontario's potential as a future producer. *Industrial Mineral Background*, 17, 22.
- Teir, S., Eloneva, S., Zevenhoven, R., 2005. Production of precipitated calcium carbonate from calcium silicates and carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 46, 2954-2979.
- Vanderbilt, 2012. R.T. Vanderbilt Company, Inc.. (<http://www.rtvanderbilt.com/>)
- Virta, R.L., 2001. Wollastonite. In Minerals yearbook, U.S. Geological Survey. (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/860401.pdf>)
- Virta, R.L., 2004. Wollastonite. In Minerals yearbook, U.S. Geological Survey. (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/wollamyb04.pdf>)
- Virta, R.L., 2011. Wollastonite. In Minerals yearbook, U.S. Geological Survey. (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/myb1-2010-wolla.pdf>)
- Virta, R.L., 2012. Wollastonite. In Minerals yearbook, U.S. Geological Survey. (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/myb1-2011-wolla.pdf>)
- WHO, 2006. WHO Workshop on Mechanisms of Fibre Carcinogenesis and Assessment of Chrysotile Asbestos Substitutes World Health Organization. (http://www.who.int/ipcs/publications/new_issues/summary_report.pdf)
- Wolkem, 2005. Wolkem India Ltd. (<http://www.wolkem.com/>)