

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Geological Engineering Journal

Cilt - Volume 31 - 32

ISSN 1116 - 9172

Sayı - Number 2 - 2007, 1-2008



TMMOB JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey

Editörler /Editors

Abidin TEMEL

Hacettepe Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06532 Beytepe - Ankara
Tel: 0312 297 77 55
Fax: 0312 299 20 34
E-Posta: atemel@hacettepe.edu.tr

Mehmet ŞENER

Niğde Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
51200 Niğde
Tel: 0388 225 22 61
E-Posta: msener@nigde.edu.tr

Yurdal GENÇ

Hacettepe Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06532 Beytepe-Ankara
Tel: 0312 297 77 55
Fax: 0312 299 20 34
E-Posta: ygenç@hacettepe.edu.tr

Yardımcı Editörler/Asistant Editors

Hüseyin YILMAZ

Cumhuriyet Üniversitesi - Sivas

Sedat TÜRKMEN

Mersin Üniversitesi - Mersin

M. Şefik İMAMOĞLU

Dicle Üniversitesi

Yazışma Adresi

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası

PK 464 Yenışehir, 0644 Ankara
Tel: 0312 434 36 01
Fax: 0312 434 23 88
E-Posta: jmo@jmo.org.tr

Yayın Kurulu / Editorial Board

Kemal AKDAĞ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Musa ALPASLAN (Mersin Üniversitesi)

Fehmi ARIKAN (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Eşref ATABEY (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Serdar BAYARI (Hacettepe Üniversitesi)

Emel BAYHAN (Hacettepe Üniversitesi)

Berk BESBELLI (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Muazzez ÇELİK KARAKAYA (Selçuk Üniversitesi)

Tandoğan ENGİN (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Yavuz ERKAN (Hacettepe Üniversitesi)

Okay EROSKAY (Kültür Üniversitesi)

Candan GÖKÇEÖĞLU (Hacettepe Üniversitesi)

Ergun GÖKTEN (Ankara Üniversitesi)

Fikret KAÇAROĞLU (Cumhuriyet Üniversitesi)

Erçin KASAPOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)

Mustafa KORKONÇ (Niğde Üniversitesi)

Halil KUMSAR (Pamukkale Üniversitesi)

Mahmut MUTLUTÜRK (Süleyman Demirel Üniversitesi)

Eran NAKOMAN (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Ahmet SAĞIROĞLU (Fırat Üniversitesi)

Sönmez SAYILI (Ankara Üniversitesi)

Şakir ŞİMŞEK (Hacettepe Üniversitesi)

Asuman TURKMENOĞLU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Necati TÜYSÜZ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Reşat ULUSAY (Hacettepe Üniversitesi)

Hasan YAZICIGİL (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Jeoloji Mühendisliği Dergisi Makale ve Dizin Özleri

ULAKBİM GeoREF ve Geobase/Geo Abstracts Uluslararası

Indexler tarafından taranmaktadır.

*The Geological Engineering Journal is indexed and abstracted
by Ulakhim, GeoRef and GeoAbstracts.*

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

ÇAĞLAN Dündar
ATIL Hakkı
ERCAN Sami
KURTOĞLU Çetin
ALAN Hüseyin
ULUŞAHİN Adem
YENER Ali Burak

Başkan / President
İkinci Başkan / Vice President
Yazman / Secretary
Sayman / Treasurer
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.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi / Geological Engineering Journal

Cilt 31 - 32

Sayı 2 - 2007, 1-2008

Volume

Number

Araştırma Makaleleri / Research Articles

- 1- **Muhsin EREN**
Küçük Ölçekli Karstik Yüzey Yapıları (Karen)
Smallscale Karstic Surface Features (Karren)

- 9- **Aysel BÜYÜKSAĞIŞ**
Afyonkarahisar Jeotermal Isıtma Sisteminde Oluşan Kabuklaşma ve Korozyon
Formation of Deposit and Corrosion in Afyonkarahisar Geothermal Heating System

- 25- **Bülent YALÇINALP, Hakan ERSOY, Arzu FIRAT ERSOY, Canan KEKE**
Bahçecik (Gümüşhane) Travertenlerinin Jeolojik ve Jeoteknik Özellikleri
Geological and Geotechnical Properties of Bahçecik Travertine (Gümüşhane)

- 37- **Arzu FIRAT ERSOY - Hakan ERSOY**
Stuyfzand Hidrojeokimyasal Modelleme Sistemi: Gümüşhacıköy (Amasya) Akiferi Örneği
Stuyfzand Hydrogeochemical Modeling System: A case Study of Gümüşhacıköy (Amasya) aquifer

Küçük Ölçekli Karstik Yüzey Yapıları (Karen)

Smallscale Karstic Surface Features (Karren)

Muhsin EREN

Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
33343 Çiftlikköy / Mersin
e-mail: m_eren@yahoo.com

Makale Geliş Tarihi: 2 Şubat 2008, Kabul Tarihi : 2 Nisan 2008

Received: 2 February 2008, Accepted 2 April 2008

Öz

Karen (veya lapye) küçük ölçekli (< 10 m) karstik yüzey yapılarını tanımlayan genel bir terimdir. Kireçtaşı yüzeylerinde yaygındır. Başlıca karen tipleri; kaval yapısı, basamak yapısı, çözünme olukları (oluk yapısı, yuvarlanmış oluk yapısı, menderesli oluk yapısı), sivri doruklu karen, yarık kareni, çözünme havuzları ve çözünme çukurlarıdır. Kaval yapısı, basamak yapısı ve çözünme havuzları yüzey sularından, çözünme olukları kanalize sulardan, yarık kareni süreksizliklerin çözünmeyle genişletilmesinden, sivri doruklu karen süreksizliklerle sınırlı masif kayaçların çözünmesiyle ve çözünme çukurları kök boyunca sızan sulardan çözünmeyle yoluyla oluşur. Çözünme işlemi örtüsüz kayaçlarda veya ince yüzey örtüsü (toprak, kar) altında gelişir.

Anahtar sözcükler: Çözünme, diyajenez, karen, karst, kireçtaşı

Abstract

Karren (or lapies) is a general term, describing small-scale (< 10 m) karstic surface features. They are common on limestone surfaces. The main types of karrens are solution flutes (rillenkarren), trittkarren (heelprints), solution runnels (rinnenkarren, rundkarren, meanderkarren), spitzkarren (solution spikes, pinnacle karren), kluftkarren (solution slots, grikes), solution pan (kamenitza, tinajita) and solution pit (or hollow). They form by dissolution from surface water or water-sheets as solution flutes, trittkarren, and solution pans, from channelized water as solution runnels, from enlargement of structural weakness as kluftkarren, from draining water along roots as solution pit, and from massive rocks between discontinuities as spitzkarren. The dissolution process develops on bare rocks or beneath a thin surface cover (soil, snow).

Key words: Dissolution, diagenesis, karren, karst, limestone

GİRİŞ

Karst terimi, Slovenya'nın (eski Yugoslavya) İtalya sınırına yakın ve Trieste körfezinin kuzeydoğusunda yeralan kireçtaşı ile kaplı, belirgin yüzey şekillerine ve hidrolojiye sahip bölgeye verilen addan türetilmiştir. Bölgeye Slovence kras, Almanca karst ve İtalyanca carso adı verilmektedir (Sweeting, 1973; Gams, 1993). Genel anlamda karstlaşma, kimyasal çözünmeden çok fazla etkilenen kayaların oluşturduğu karakteristik yeryüzü şekillerini, yeraltı drenaj sistemini ve buna bağlı gelişen

yapılarını ifade etmektedir (Sweeting, 1973; Wright, 1982; Ford ve Williams, 1989). Karstlaşmanın yaygın olarak görüldüğü kayaların başlıcaları kireçtaşı, dolomit ve evaporitlerdir (tuz, anhidrit, jips). Diğer kayalarda meydana gelen karstik yapılara yalancı karst (pseudokarst) ve jeolojik dönemlerde oluşmuş karstik yapılara ise paleokarst (fosil karst) adı verilmektedir (Wright, 1982). Karstlaşma ve paleokarstlaşma çok sayıda yayının konusunu oluşturmaktadır (Sweeting, 1973; Bögli, 1980; Esteban ve Klappa, 1983; James ve Choquette, 1984; White, 1988; Ford ve Williams, 1989; Şahinci, 1991; Vanstone, 1998; Molina vd., 1999; Miller ve

Mitchell, 2003). Karstik yüzey yapıları karakteristik boyutlarına (çap, uzunluk gibi) göre üç gruba ayrılır. Bunlar; (i) küçük ölçekli (< 10 m), (ii) orta ölçekli (10-1000 m), ve (iii) büyük ölçekli (> 1000 m) yapılarıdır (Ford ve Williams, 1989). Küçük ölçekli karstik yapılar yaygın olarak Almanca terim olan “karren” veya Fransızca eş anlamlısı olan “lapies” terimleriyle adlandırılır (Bögli, 1960; Sweeting, 1973; James ve Choquette, 1984; White, 1988). Başlıca karen türleri Çizelge 1’ de verilmektedir. Çalışmanın amacı yaygın küçük ölçekli karstik yüzey yapılarını (karren) tanıtmak ve oluşumlarını açıklamaktır.

Çizelge 1. Karen türleri (Sweeting, 1973 ve White, 1988’den değiştirerek)
Table 1. Karren types (modified from Sweeting, 1973 and White, 1988)

Akış Türleri		Çözünme Türleri	
Yüzeysel Akış	Kanal Akışı	Yapısal Zayıflıklar	Masif Kayaç
Artan yamaç eğimi ↑	Kaval yapısı (rillenkarrn)	Çözünme olukları (rinnenkarrn)	Sivri doruklu karen (spitzkarrn, pinnacle)
	Basamak yapısı (trittkarrn)		
	Çözünme havuzu (kamenitza)	Yuvarlanmış oluk yapısı (rounded runnels, rundkarrn)	Yarık yapısı (kluftkarrn)
	Menderesli oluk yapısı (meandering runnel)		

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ KARSTİK YÜZEY YAPILARI (KARREN)

Kaval yapısı (rillenkarren; solution flute): İlk tanımlanan karen türlerinden biri olan kaval yapıları Alplerde ve Dinar karstlarında yaygındır. Bunlar genellikle 40-80° eğimli yüzeylerin üst kısımlarında gelişen, paralel veya yarı paralel çözünme oluklarından oluşurlar (Şekil 1a). Oluklar keskin sırtlarla birbirinden ayrılan yuvarlanmış çukurluklar şeklindedir ve genellikle 1-2 cm derinliğinde, 1-2 cm genişliğinde ve 50 cm varan uzunluklardadır (Sweeting, 1973).

Basamak yapısı veya topuk izleri (trittkarren; heelprints): Bunlar yay şekilli arka duvara, düz tabana, yamaç eğimi yönünde açık, genellikle 10-30 cm çapında karstik yapılarıdır (Ford ve Williams, 1989; Sweeting, 1973). Arka duvar yüksekliği 3 cm ile 50 cm arasındadır. Genel görünümüleri kayaç içine doğru kemirilmiş bisküvit dizilimlerini andırmaktadır (Şekil 1b). Kaval yapısı (rillenkarren) ve basamak yapıları birbirini izleyecek şekilde bulunabilirler. Dik yamaçlarda kaval yapıları ve düzlerde ise basamak yapıları bulunabilir.

Çözünme olukları (rinnenkarren; solution runnels or channels): Bu tür karenler, fazla yüzey sularının daha derin ve geniş akış olukları oluşturmasıyla tipiktir. Oluk yapıları birkaç cm ile 30-40 cm arasında genişliğe, 50 cm'ye varan derinliğe ve birkaç metreden 15-20 m'ye ulaşan uzunluğa sahiptir (Sweeting, 1973; Ford ve Williams, 1989). Dik eğimli yamaçlarda oluk yapıları birbirine paraleldir, yaklaşık doğrusal ve yamaç eğimi yönünde artan genişlik ve derinliğe sahiptir. Bunların keskin kenarlı, düz veya yuvarlanmış tabanlı olanlarına oluk yapısı (rinnenkarren; Şekil 1c) ve yuvarlanmış kenar ve tabana sahip olanlarına yuvarlanmış oluk yapısı (rundkarren; rounded solution runnels; Şekil 1d) adı verilir (Ford ve Williams, 1989). Yuvarlanmış şekiller toprak örtüsü altında gelişmekten kaynaklanmaktadır. Bu tip oluk yapıları

(rinnenkarren ve rundkarren) Alplerde ve Dinar karstlarında kaval yapılarına (rillenkarren) benzer ortamlarda oluşurlar ve onlardan daha büyük olmalarıyla ayrılırlar. Az eğimli yamaçlarda suyun akışı kayaç yüzeylerinde menderesli bir oluk oluşturur, bunlara menderesli oluk yapıları (meanderkarren; Şekil 1e) denir.

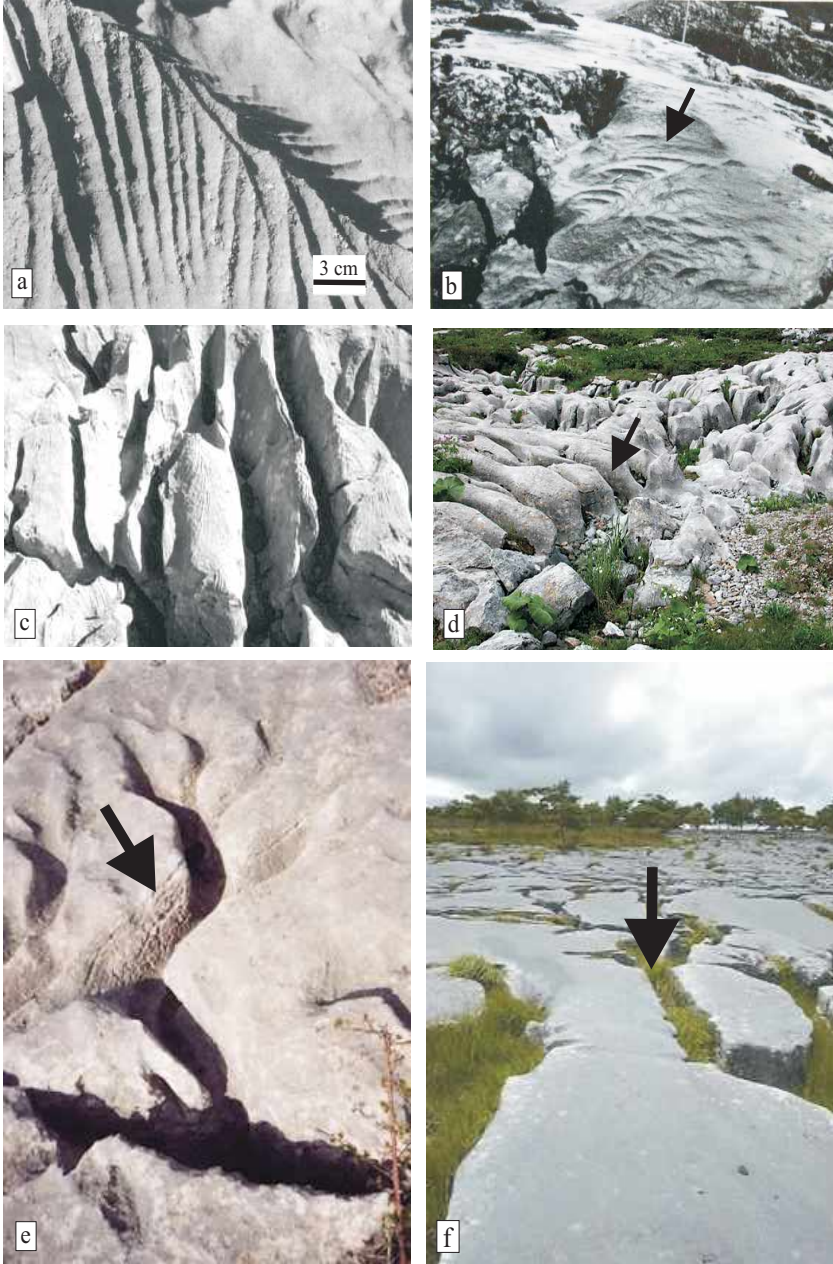
Sivri doruklu karen (spitzkarren; solution spikes; pinnacle karren): Çok değişken ve en az anlaşılmış karen türlerinden biridir. Sivri doruklu karenler; süreksizliklerle sınırlandırılmış masif kayaçların çözünmeyle oyuklu, delikli ve keskin hatlı sivrilmiş ayrık kısımlara bölünmesiyle ortaya çıkan ve peribacalarını andıran küçük ölçekli yapılarıdır (Şekil 1g). Boyları 0,5 ile 3 m arasındadır. Sivri konik kısımlar arasında düzensiz şekilli çözünme çukurlukları bulunur. Konik yükseltelerin aşınarak yok olduğu yerler, yerini keskin kenarlı, tipik süngerimsi karsta bırakır (Öztaş, 1992; Field, 2002).

Yarı yapısı (kluftkarren; solution slots; grikes): Kireçtaşlarında çatlak, kırık, tabaka düzlemleri gibi süreksizliklerin çözünmeyle genişletilmesi sonucu oluşan karen tipidir (Şekil 1f). Yarı yapıları 15-20 cm genişliğinde, cm boyutundan birkaç metre boyutuna değişen derinliğe ve 10 metreye varan uzunluğa sahiptir (White, 1988; Ford ve Williams, 1989; Şahinci, 1991; Öztaş, 1992; Wray, 1997).

Çözünme havuzları (solution pan; rock pool; kamenitza; tinajita): Kireçtaşı yüzeyi üzerindeki düzlüklerde göllenen durgun suların kayacı çözmesiyle oluşan çanak şekilli karstik yapılarıdır (Şekil 1h). Çözünme tavalalarının çapları birkaç cm ile birkaç m ve derinlikleri birkaç mm ile 80 cm arasında değişmektedir. Genellikle yuvarlak, elips veya düzensiz şekilli düzlemsel görünüme ve keskin, dik veya dike yakın, veya aşmalı kenarlara ve düz tabana sahiptir. Kamenitzalarla birlikte genellikle taşkın kanalları da bulunur (Sweeting, 1973; Vincent, 1995).

Çözünme çukurları (solution pits or hollows): Bu tür karen yapıları çözünme havuzlarından (kamenitza) daha küçük çaplı ve daha derin olmalarıyla ayrılır. Genellikle silindirik şekilli çukurluklardır (Şekil 1i). Ayrıca huni

(funnel), koni (conical), kase (bowl) veya düzensiz şekilli olabilir (Vanstone, 1998). Tabanları yuvarlanmış veya sivri görünümlüdür. Tek, grup veya bir hat boyunca dizili olarak bulunabilirler.



Şekil 1

Şekil 1. Küçük ölçekli karstik yüzey yapıları: a) kaval yapısı (rillenkarren; Fiol vd., 1996); b) basamaklı karen yapısı (ok) (trittkarren; heelprints; White, 1988); c) çözünme olukları (rinnenkarren; www.gosaunet.at/tipps/wasser-bergeschnee/der-dachstein-eine-vielfaeltige-urlandschaft.htm' den); d) yuvarlanmış oluk yapısı (rounded solution runnels (ok); www.geo.unizh.ch/.../haltepunkt09/1b.htm' den); e) menderesli oluk yapısı (menderesli karen (ok); www.limestone-pavements.org.uk/geology.shtml' den); f) yarıklık yapısı (ok) (kluftkarren; solution slots; grikes; www.limestone-pavements.org.uk/geology.shtml' den); g) sivridoruklukaren (www.shadow.eas.gatech.edu/kcobb/speleo/Fieldtrip2005.html' den); h) çözünme havuzları (kamenitza) taşkın kanalı ile birlikte (ok), i) çözünme çukurları (oklar).

Figure 1. Small-scale karstic surface features: a) solution flute (rillenkarren; Fiol et al., 1996); b) solution steps (ok) (trittkarren; heelprints; White, 1988); c) solution runnels (rinnenkarren; from www.gosaunet.at/tipps/wasser-bergeschnee/der-dachstein-eine-vielfaeltige-urlandschaft.htm); d) rounded solution runnels (rundkarren (ok); from www.geo.unizh.ch/.../haltepunkt09/1b.htm); e) meanderkarren (ok; from www.limestone-pavements.org.uk/geology.shtml); f) solution slot or grike (kluftkarren (ok); from www.limestone-pavements.org.uk/geology.shtml); g) solution spikes (spitzkarren; pinnacle karren; from www.shadow.eas.gatech.edu/kcobb/speleo/Fieldtrip2005.html); h) solution pan (kamenitza; rock pool; tinajita) with an overflow channel (arrow); i) solution pits or hollow (arrows).
ne-pavements.org.uk/geology.shtml); g) solution spikes (spitzkarren; pinnacle karren; from www.shadow.eas.gatech.edu/kcobb/speleo/Fieldtrip2005.html); h) solution pan (kamenitza; rock pool; tinajita) with an overflow channel (arrow); i) solution pits or hollow (arrows).

YORUM VE TARTIŞMA

Karstlaşma diyajenetik bir olaydır ve belli kayaç gruplarının, özellikle kireçtaşlarının çözünmesini ve buna bağlı olarak oluşan yapıları ifade eden bir terimdir. Kireçtaşlarını oluşturan kalsit minerallerinin çözünmesi ve çökelişi genellikle aşağıda verilen kimyasal reaksiyonla ifade edilmektedir (James ve Choquette, 1984; Dreybrodt, 1988; Ford ve Williams, 1989):



Bu denklemde su içerisindeki CO₂ çözünürlüğü kireçtaşlarının çözünürlüğünü kontrol eden en önemli faktördür. CO₂ çözünürlüğü sıcaklık tarafından kontrol edilmekte ve sıcaklık arttıkça CO₂ çözünürlüğü azalmaktadır (Sweeting, 1973). Çizelge 2'de kalsiyum karbonat (CaCO₃) çözünürlüğünün artan sıcaklıkla azalışı ve artan CO₂ basıncındaki artışı deneysel olarak gösterilmektedir (Sweeting 1973' den Hutchinson 1957). Bütün yağmur suları küçük miktarlardaki CO₂'i atmosferden absorbe etmekte ve toprak suyu büyük miktarlarda biyolojik kökenli CO₂'i içermektedir. Hafifçe asitik yağmur suları kireçtaşlarını çözebilecek özelliktedir. Bu olay yaygın olarak kimyasal bir reaksiyon olarak kabul edilmektedir (White, 1988). Bununla birlikte bazı yazarlar çoğu karstik olayda biyolojik etkinin de önemini vurgulamaktadır (Viles, 1984; Trudgill, 1985; Fiol vd., 1996).

Direk yağış, yüzeysel akış, kanal akışı ve değişik yüzey örtüsü (toprak, kar) altında sızan sular çözünebilir taban kayacının yüzeyinde çok sayıda küçük ölçekli çözünme yapıları oluşturabilir. Bu yapılara karen (karren) adı verilmektedir. Karenler küçük boyutlu (< 10 m) yapılardır, genellikle birinden diğerine geçiş gösterirler ve gelişimlerinde ortamsal ve litolojik etkenler önemlidir. Kaval yapıları (rillenkarren) dik yamaçların veya keskin sırtlı blokların üst kısımlarında oluşur, birbirine paralel ve keskin sırtlarla ayrılan oluklardan meydana gelir.

Çözünme olukları yamaç eğimi yönünde yok olurlar ve uzunlukları yamaç eğimine bağlı olarak artar. Kaval yapıları yüzeysel akışın başlangıç evresinde direk ince su tabakasından çözünme yoluyla düşük hızlarda oluşur (White, 1988; Wray, 1997). Fiol vd. (1996) ise algerin kireçtaşı yüzeylerinin ayrışmasında kayacın yapısını zayıflatarak, küçük partiküllerin yağmur damlalarınca daha kolay taşınmasını sağladığını ve dolaylı olarak kaval yapılarının oluşumunu kolaylaştırdığını belirtmiştir. Basamaklı yapılar (trittkarren) eğimli yüzeylerin eğiminin azaldığı düzlüklere yakın kısımlarında, yüzey sularının gerileyici aşındırmasıyla yamaç yukarı göç eden kesme basamakları şeklinde oluşurlar. Yarı dairesel şekil at nalı düşme etkisi (horseshoe fall effect) tarafından korunur. Yüzey sularının büyük kısmı topoğrafya iç kısmında yoğunlaşır. Basamağın üst kenarında su yüksek hıza sahiptir. Suyun kalınlığı akış hızıyla dolaylı olarak ilişkilidir. Yüksek akış hızları yeryüzündeki akışa eklenen taze yağışın daha büyük etkisine ve ayrıca atmosferik CO₂'nin difüzyonuna ve daha yaygın aşınmaya neden olur. Çözünme havuzları (kamenitza), yüzey sularının kireçtaşlarının yüzeyindeki düzlüklerde göllenmesi ve kireçtaşlarını eritmesiyle oluşan karstik çukurluklardır (Wray, 1997). Buradaki suların yosunlardan, alglerden ve diğer bitki kalıntılarında organik kökenli CO₂ sağlanması, bu suların yüzey sularına oranla aşındırıcı özellik kazanmasına neden olur (White, 1988). Kanal yapılarından çözünme kanalları (rinnenkarren) yaygındır. Nadiren dallanma veya birleşme gösterirler. Dik eğimli yüzeylerde hemen hemen çizgiseldirler. Yüzey eğimi azaldıkça menderesli (meanderkarren) olma özelliği artar. İnce toprak örtüsü altında oluşan kanal yapıları daha yuvarlanmış şekillere sahiptir. Bunlar rundkarren olarak adlandırılır. Çözünme olukları, bir yamaçta yüzeysel akış veya yıkanmanın yamaç aşağı kanal akışına dönüşmesiyle oluşurlar. Kanal yapıları farklı

eğime sahip yüzeyler üzerinde gelişebilirler. Fazla eğimli yüzeylerde çizgisel özellik gösterirler, birkaç derecelik eğimli yüzeylerde menderesli özelliği artar. Rinnenkarren keskin kenarlı olup, örtüsüz yüzeylerde gelişir. Rundkarrenler yuvarlanmış şekilleriyle rinnenkarrenlerden ayrılırlar, bu toprak altındaki suların oluşmasından dolayıdır. Sivri doruklu karenler (spitzkarren) süreksizliklerle sınırlı masif kayaların çözünmeyle peribacalarını andıran sivri uçlu konik şekilli yapılara dönüşmesiyle oluşurlar (Field, 2002). Bunlar yüzeyde veya toprak örtüsü altında gelişebilir. Toprak örtüsü altında gelişen sivri doruklu karenler daha yuvarlanmış şekillere sahiptir

(White, 1988).Yarık yapıları kayaç içindeki süreksizler boyunca kanalize olan suların çözünmeye bağlı olarak süreksizlikleri genişletmesiyle oluşurlar (Wray, 1997). Çözünme çukurları (solution pits), çözünme havuzlarından (kamenitza) daha küçük çaplı ve daha derin olmalarıyla ayrılır. Bunlar kök boyunca drene edilen suların kayaçları çözdürmesiyle oluşurlar, ayrıca bitkiler organik kökenli CO₂' de sağlarlar (Vanstone, 1998). Miller ve Mitchell (2003) ise çözünme çukurlarının ilerleyici çözünmeyle oluştuğunu belirtmiştir. Çözünme çukurları yüzeyde veya toprak örtüsü altında gelişebilir (Ford ve Williams, 1989).

Çizelge 2. İki önemli CO₂ basıncı için farklı sıcaklıklardaki CaCO₃'ün çözünürlüğü (Sweeting, 1973' den Hutchinson, 1957; s. 25).
Table 2. The solubility of CaCO₃ at various temperatures for two important CO₂ pressures (Hutchinson, 1957 from Sweeting, 1973; p. 25).

Sıcaklık °C	CO ₂ Basıncı	
	0.033 %	0.44 %
0	96	106
5	86	94
10	75	83
15	67	74
20	59	65
25	54	59
29	49	54

SONUÇ

Küçük ölçekli karstik yüzey yapıları (< 10 m) karen olarak adlandırılır. Başlıca karen tipleri; kaval yapısı (rillenkarren), basamak yapısı (trittkarren), çözünme havuzları (kamenitza), çözünme olukları (solution runnuls, rinnenkarren, rundkarren, meanderkarren), sivri doruklu karen (spitzkarren), yarık kareni (kluftkarren) ve çözünme çukurlarıdır (solution pits). Kaval yapısı, basamak yapısı ve çözünme havuzları yüzey sularından ve sırasıyla azalan yüzey eğimlerinde, çözünme olukları eğimli yüzeylerde kanalize sulardan, yarık kareni süreksizliklerin çözünmeyle genişletilmesinden, sivri doruklu karen süreksizliklerle sınırlı masif kayaların çözünmesiyle ve çözünme çukurları kök boyunca sızan sulardan çözünmeyle yoluyla oluşur. Karen gelişimi yüzey eğimi, yüzey örtüsü ve yapısal süreksizlikler tarafından kontrol edilir. Çıplak yüzeyler üzerinde gelişen karen yapıları ince yüzey örtüsü altında gelişen karenlere oranla daha keskin şekiller sunar.

KATKI BELİRTME

Yazar, makaleye katkılarından dolayı Yrd. Doç.Dr. Cüneyt Güler'e ve dergi hakemlerine teşekkür eder.

KAYNAKÇA

- Bögli, A. 1960, Kalklösung und Karrenbildung. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary issue 2, Internationale Beiträge zur Karstmorphologie 4-21.
- Bögli, J. 1980: Karst hydrology and physical speleology. Springer, Berlin, 285.
- Dreybrodt, W., 1988: Process in karst systems: physics, chemistry, and geology. Springer-Verlag, Berlin, 288 p.
- Esteban, M. Klappa, C.F. 1983: Subaerial exposure environment. In: Scholle, P.A., Bebour, D.G. Moore, C.H. (Eds.): Carbonate Depositional Environments. American Association of Petroleum Geologists Memoir 33, 1-54.
- Field, M.S., 2002, A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology. U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment- Washington Office, Washington, 214 p. (<http://www.karstwaters.org/files/glossary.pdf>)
- Fiol, L.I., Fornos, J.J., and Gines, A., 1996, Effects of biokarstic process on the development of solutional rillenkarren in limestone rocks. Earth Surface Processes and Landforms, 21, 447-452.
- Ford, D.C. and Williams, P.W., 1989, Karst Geomorphology and Hydrology. Chapman Hall, London, 601 p.
- Gams, I., 1993, Origin of the term karst, and the transformation of the classical karst (kras). Environmental Geology 21/3, 110-114.
- Hutchinson, G.E., 1957, A Treatise on Limnology. Wiley, London,
- James, N.P. Choquette, P.W. 1984: Diagenesis 9. Limestones- The meteoric diagenetic environment. Geoscience Canada, 11, 161-194.
- Miller, D.J. and Mitchell, S.F., 2003. Palaeokarstic surfaces in the upper Cretaceous limestones of central Jamaica. Cretaceous Research 24, 119-128.
- Molina, J.M., Ruiz-Ortiz, P.A. Vera, J.A. 1999: A review of polyphase karstification in extensional tectonic regimes: Jurassic and Cretaceous examples, Betic Cordillera, southern Spain. Sedimentary Geology 129, 71-84.
- Öztaş, T. 1992: Karst and karstification features of the surrounding area of Boğsak karst spring (Mersin-Taşucu). Jeoloji Mühendisliği Dergisi 41, 118-130.
- Sweeting, M.M., 1973, Karst Landforms. Columbia University Pres, New York, 362 p.

- Şahinci, A., 1991, Karst. Reform Matbaası, İzmir, 173 s.
- Trudgill, S. 1985, Limestone geomorphology. Longman, London, 196 p.
- Vanstone, S.D., 1998, Late Dinantian palaeokarst of England and Wales: implications for exposure surface development. *Sedimentology* 45, 19-37.
- Viles, H.A. 1984: Biokarst: review and prospect. *Progress in Physical Geography* 8, 523-542.
- Vincent, P., 1995, Limestone pavements in the British Isles: A review. *Geographical Journal* 161, 265-274.
- White, W.B., 1988, *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, Oxford, 464 p.
- Wray, R.A.L., 1997, A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. *Earth Science Reviews* 42, 137-160.
- Wright, V.P., 1982, The recognition and interpretation of paleokarsts: two examples from the Lower Carboniferous of South Wales. *Journal of Sedimentary Petrology* 52, 83-94.
- www.gosaunet.at/tipps/wasser-berge-schnee/der-dachstein-eine-vielfaeltige-urlandschaft.htm.
- www.geo.unizh.ch/.../haltepunkt09/1b..htm.
www.limestone-pavements.org.uk/geology.shtml.
- www.shadow.eas.gatech.edu
[edu/kcobb/speleo/Fieldtrip2005.html](http://www.shadow.eas.gatech.edu/kcobb/speleo/Fieldtrip2005.html)

Afyonkarahisar Jeotermal Isıtma Sisteminde Oluşan Kabuklaşma ve Korozyon

Formation of Deposit and Corrosion in Afyonkarahisar Geothermal Heating System

Aysel BÜYÜKSAĞIŞ

Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Fen Edb. Fak. Kimya Böl. A.N.S. Kam.

AFYONKARAHİSAR

Makale Geliş Tarihi: 2 Ekim 2007, Kabul Tarihi : 2 Aralık 2008

Received: 2 October 2007, Accepted 2 December 2008

Öz

Akışkanın kimyasal içeriğine bağlı olarak oluşan kabuklaşma ve korozyon, jeotermal sistemlerin işletilmesinde karşılaşılan önemli sorunlardan biridir. Bu çalışmada, Afyonkarahisar jeotermal şehir ısıtma sisteminden (AFJET) alınan su örneklerinde iyon kromatografisi(IC) ve indüktif eşlenmiş plazma optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) analizleri gerçekleştirilmiştir. Boru içinde oluşan kabukların XRD analizleri yaptırılmış ve TS 266'ya göre suların toplam sertlikleri analiz edilmiştir. Yapılan XRD analizleri şehir dışı jeotermal ısıtma boru hattında CaCO_3 kabuklaşması olduğunu, şehir içi kuyu suyu geçen boru hattında ise $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{OH})_6$, CaCO_3 ve MgAlSi içeren bir kabuk oluşumu olduğunu göstermektedir. NaCl ile yumuşatılan kuyu suyunun geçtiği boru hattında çukur korozyonu olmakta aynı durum jeotermal suyun geçtiği borularda da olmaktadır. Geri dönüş sularında çözünen madde miktarlarının artması sistemde kullanılan St 37 çeliğinin suyun etkisiyle erozyona uğrayarak çözüldüğünü (korozyona uğradığını) göstermektedir. Toplam sertliklerdeki artış kabuklaşma olayını desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal su, kabuklaşma, korozyon, XRD, ICP-OES

Abstract

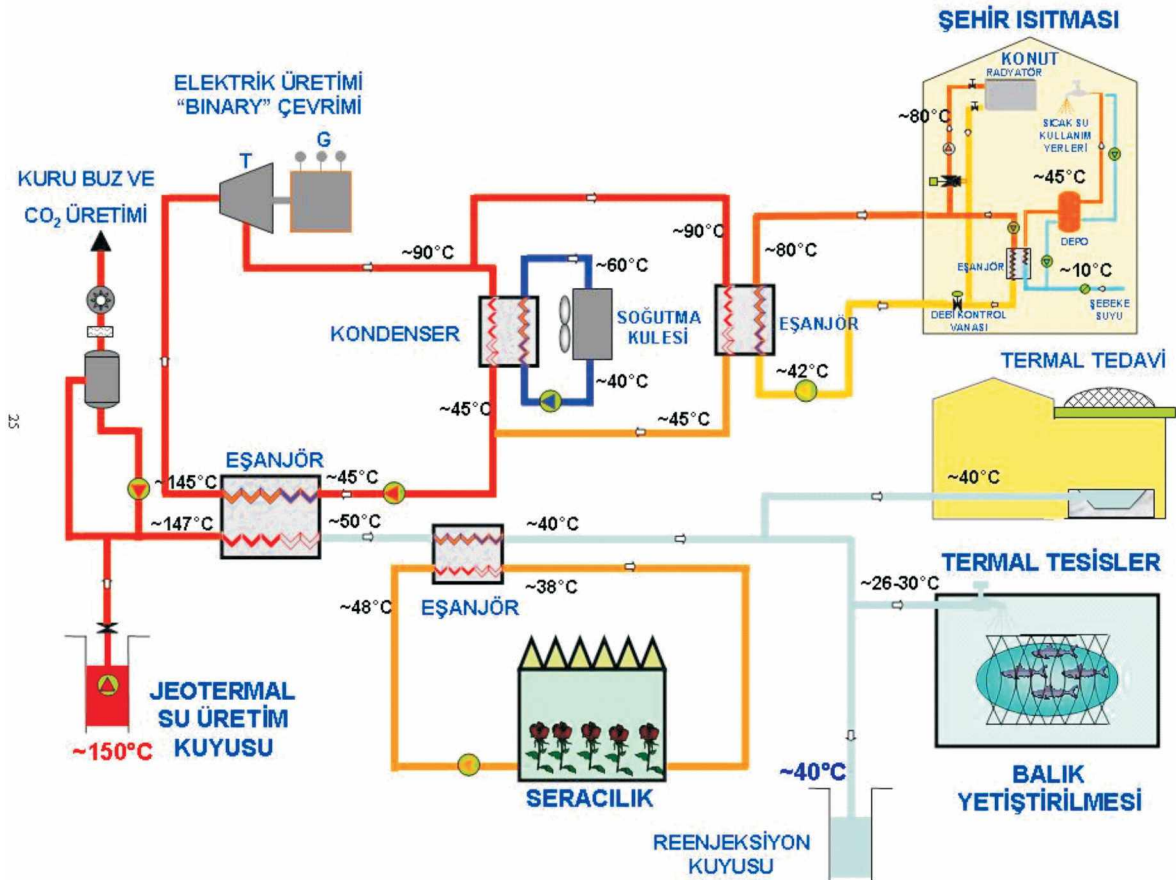
The formation of deposit and corrosion, which was formed depending on the chemical composition of the geothermal water, is one of the most serious problems at the geothermal systems. In this study, ion chromatography (IC) and inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP_OES) analysis were carried out for water samples that are taken off Afyonkarahisar Geothermal Heating System. Analysis of the deposits formed in pipeline was carried out by using X-Ray Diffraction Technique and total hardness of water was analyzed by TS 266 method. The results of XRD analysis showed that the deposit of CaCO_3 formed in the suburban geothermal pipelines while the deposit of containing $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{OH})_6$, CaCO_3 and MgAlSi formed in the inner city well water pipelines. Pitting and erosion corrosion occurred in the pipelines running well water decalcified with NaCl . Also same case occurred in the geothermal pipelines. The increase of amount of dissolved substance in the return water indicated that St37 steel was exposed to erosion corrosion. The increase of total hardness favored the formation of deposit

Key Words : Geothermal water, deposit, corrosion, XRD, ICP-OES

GİRİŞ

Jeotermal enerji yeni, yenilenebilir, sürdürülebilir, çevre dostu ve yerli bir enerjidir. Fosil ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının içerisinde en temiz ve en ucuz enerji kaynağı jeotermaldir. Türkiye jeotermal potansiyel açısından Dünyanın 7. ülkesidir. Jeotermal elektrik dışı uygulamalarda ise Dünyanın 5. ülkesi konumundadır (Mertoğlu, 2000). Jeotermal enerji yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde bulunan birikmiş ısının oluşturduğu sıcaklıkların, bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığının üzerinde olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına

göre daha fazla çözülmüş mineral, çeşitli tuzlar ve gaz içerebilen basınç altındaki sıcak su ve buhar (akışkan) yolu ile sürekli yüzeye taşınan ısı olarak tanımlanmaktadır. Enerji olarak konutların ve binaların ısıtılmasında ve soğutulmasında kullanıldığı gibi, sıcak su temininde ve ayrıca endüstrinin ısı gereksiniminin karşılanmasında doğrudan kullanılır. Jeotermal sistemlerde entegrasyonun yani, jeotermal akışkanların çeşitli sıcaklık kademelerine göre farklı alanlarda değerlendirilmesi, jeotermal yatırımları daha ekonomik hale getirmektedir (Özbek,2000). (Şekil 1)



Şekil 1 Entegre jeotermal değerlendirme akım şeması (Anonymous, 2006)

Fig. 1. Integrated geothermal evaluation flow schema (Anonymous, 2006)

Jeotermal sistemlerde oluşan kabuklaşma ve korozyon ile ilgili çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Bununla ilgili olarak Söylemezoğlu ve Harper (1982) çalışmalarında, H₂S içeriği yüksek olan jeotermal buhara yüksek basınçta (650 kPa) oksijen enjekte etmişler ve bunun karbon çeliğinin korozyon hızını etkili bir şekilde arttırdığını gözlemişlerdir. Sistemde artan oksijen miktarı jeotermal buhar borusunda daha önce oluşan koruyucu tortu tabakasının yerine, yarı koruyucu korozyon ürünleri olarak bilinen pyrrhotite, marcasite, pyrite and magnetite içeren tortu oluşturmuştur. Oksijen katodik depolarizatör etkisi yapmaktadır. Xyla vd. (1992) çalışmalarında sentetik olarak hazırlanmış 4 bileşiğin sulu ortamda CaCO₃ tortu oluşumuna etkisini incelemişler. 1,2-dihidroxy-1,2-bis(dihydroxyphosphonyl)ethane (DDPE), 2-dihydroxyphosphonyl-2-hydroxypropionic acid (DHHPA), 1,3-bis[(1-phenyl-1-dihydroxyphosphonyl)methyl]-2-imidazolidinone (BPDMI), and 2,3-bis(dihydroxyphosphonyl)-1,4-butanedioic acid (BDDBA) bileşikleri 25 °C ve 8,5 pH'da çalışılmış. Süper doygun şartlar altında P---C---C---P bağı içeren moleküller etkin inhibitör olmuşlardır. Gallup (1993) yaptığı çalışmada sıcaklığı çok yüksek ve çok tuzlu sularda ferrik silikat kabuklaşmasını inhibe etmek için bir proses geliştirmiştir. Kabuk kontrolü için Fe⁺³'ün Fe⁺²'ye indirgeyecek şekilde yeterli miktarda indirgeyici eklenmiştir. Ferrous (Fe³⁺) silikat, ferrik (Fe²⁺) silikattan daha çözünür olduğu için kabuk oluşumu azalmıştır. 0,5 birim asit değişimi ile bu desteklenmiştir. George ve Batis (1997) çalışmalarında Yunanistan'da bulunan Sousaki Bölgesi'ndeki jeotermal akışkan sisteminde kullanılan çeliğin korozyon davranışını ve organik kaplamaların belli birleşimlerinin koruyucu özelliklerini incelemişler. Epoksi reçine içeren kaplamalar su bazlı boyalardan daha iyi sonuç verdiğini bulmuşlardır. Sampedro vd. (1998) Meksika'da jeotermal kuyu inşaatında

kullanılacak çeliklerin özelliklerini belirlemek için çalışmışlardır. Çalışmalar üç ana alanda yapılmıştır.

- Birkaç Meksika açık alanında malzeme analizi
- Jeotermal akışkana maruz kalan örneklerin genel, bölgesel ve stres korozyonu kuyu başında basınçlı odalarda incelenmiş
- Kontrollü hidrodinamik şartlar altında laboratuvar testleri

Gallup (1998) silisyum kabuklaşmasını önlemek için jeotermal akışkana silisyum kompleksleştiriciler eklenmiş. Sonuçlar silika kabuklaşmasının engellendiğini göstermiştir. Mornet ve Neville (2002) yaptıkları çalışmada polikarboksilik asiti (PAA) elektrokimyasal esaslı teknik film oluşum derecesini belirlemek için kullanılmışlardır. Çözelti içinde Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonlarının varlığı ve metal yüzeyinin katodik elektrokimyasal aktivitesi; çözülden metal yüzeyine inhibitörün taşınmasına yardımcı olarak inhibitör film oluşumunu desteklemiştir. Kabuk oluşumunu geciktiren inhibitör film süper doygun CaCO₃ çözeltisi içine daldırılan elektrot üzerinde oluşan tortu kullanılarak belirlenmiştir. Kubiak ve Beltran (2002) çalışmalarında bir jeotermal türbin üzerinde kabuk oluşumu etkisini simule ederek incelemişler. Türbinlerde jeotermal akışkanın türbine girdiği ilk basamak önemlidir. Türbin kapasitesi ve verimi ile ilgili ilk basamak nozzle (meme) grup içinde; ilk basamaktan önce ve sonra buhar basıncı ölçülerek akış alanındaki değişim tahmin edilmiş ve gerçek sonuçlara yakın değerler bulunmuştur. Bu metodun kabuk deposition hassaslığını ölçmek için herhangi bir türbine uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Gallup ve Barcelon (2005) çalışmalarında yapay olarak hazırlanan jeotermal su kullanılarak laboratuvarda basınçlı reaktörde farklı üreticilerden elde edilen inhibitörler çalışılmıştır. Korozyonu sınırlayan ve güvenli

olan asit öncüleri (precursor) güçlü asitlere alternatif olarak değerlendirilmiştir. Richter ve Hilbert (2006) çalışmalarında Iceland jeotermal bölge ısıtma sitemlerini incelemişler. Iceland jeotermal bölge ısıtma sitemlerinde genellikle genel korozyon hızları oldukça düşük (1 m.yıl^{-1}), pH yüksek (9,5), iletkenlik düşük ve çözünmüş oksijen miktarı ihmal edilebilir düzeydedir. Korozyonu önlemek için elektrokimyasal yöntemlerden lineer polarizasyon yöntemi ve elektrokimyasal empedans(EIS) deneyleri yapılmış. Lineer polarizasyon 0.001 mV/s ile çok düşük tarama hızında deposition oluşumunu göstermemiştir. EIS ölçümleri ise 10^{-5} civarında difüzyon etkileri nedeni ile frekans tamamlanamamıştır. Elektrokimyasal olmayan diferansiyel elektrik direnci ölçme yöntemi en iyi sonucu vermiştir. Banas vd. (2007) $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{S}$ sisteminde demir alaşımlarının korozyon davranışını incelemişler. Sonuçlar ortamda bulunan CO_2 ve H_2S seçilmiş sıcaklık ve yüksek basınç altında $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{S}$ sisteminde pasif filmin kararlılığını etkilemiştir.

Bu çalışmanın amacı ısıtma kaynağı olarak jeotermal akışkanın kullanıldığı Afyonkarahisar şehir içi ısıtma şebekesindeki korozyon ve kabuklaşma olaylarının nedenlerini; su analizleri ve XRD yöntemi kullanılarak belirlemektir. AFJET şehir ısıtma sisteminin Ömer-Gecek havzasında bulunan kuyulardan biri olan AF 21'den jeotermal su örneği alınmıştır. Jeotermal su ($95 \text{ }^\circ\text{C}$) Gecek'den Afyon'a boru hattı ile gelmekte, merkezde bulunan ısı değiştiriciler vasıtasıyla kuyudan çıkarılan suyu ısıtma için kullanılmakta ve tekrar reenjeksiyon için geri gönderilmektedir. Bu ısıtma işlemi ile kuyu suyunun sıcaklığı $60-65 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmaktadır. Bu kuyu suyunun sertliği NaCl ile yumuşatılmakta ve şehir içine yumuşatılmış kuyu suyu olarak $60-65 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de verilmektedir. Kuyu suyu dönüş sıcaklığı $40-45$

$^\circ\text{C}$ olmaktadır. Şehir içi dolaşan kuyu suyunun bazen kaçaklar nedeni ile debisi düşmekte sistemin çalışmasını sağlamak için jeotermal su ile beslenmektedir. Basınç düşüşlerini karşılamak içinde sisteme hava basılmakta buda kuyu suyu içinde çözünmüş oksijen ve karbondioksit miktarını arttırmaktadır. Şehir içinde dolaşan suyun geri dönüş hatlarından da su örnekleri alınarak analiz edilmiştir. Burada kuyu suyunun NaCl ile yumuşatılması, şehir içi boru hattının arada bir jeotermal su ile beslenmesi ve sisteme hava basılması korozyonu ve kabuklaşmayı artırıcı etmenler olarak göz önüne alınabilir. Sistemde katodik koruma yapılmış ama uygulanmamaktadır. Jeotermal suda P3 Ferrofos 8402 ticari inhibitör kullanılmaktadır. İnhibitör jeotermal toplama havuzuna ton başına $10-12 \text{ g}$ olacak şekilde dozajlanmaktadır ve 48 saat etkinliğini sürdürmektedir.

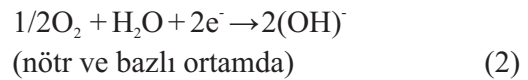
KOROZYON

Genel anlamda korozyon, metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeleri sonucu bozunumlarıdır. Kimyasal korozyon metal ve alaşımların gaz ortamlar içindeki oksitlenmeleridir (kuru korozyon). Metal ve alaşımların sulu ortamlar içindeki bozunumları ise elektrokimyasal veya ıslak korozyon olarak adlandırılır (Üneri, 1998).

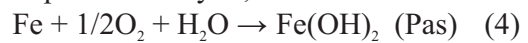
Demirin korozyon olayında anodik reaksiyon;



Katodik Reaksiyonlar;



Toplam Reaksiyon;



şeklinde özetlenebilir.

Jeotermal suda önemli olan korozyon yapıcılar hidrojen iyonu, klorür iyonu, hidrojen sülfür, karbondioksit, oksijen ve demirdir.

Bunların etkisi özet olarak Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Jeotermal ısıtma sistemlerinde korozyon yapıcı elemanlar ve etkileri (Çakır, 2005)
Table 1. Corrosion maker components and effects in Geothermal heating systems (Çakır, 2005)

Korozyon yapıcı	Etkisi
Oksijen	50 ppb üzerinde oyulma yapar
pH	pH ≥ 8 olursa korozyon hızı azalır
CO ₃ ²⁻	pH değerini düşürür, korozyonu artırır
H ₂ S	Katodik polarizasyonu engeller, GKÇ'yi artırır
Sıcaklık	Artışı hasarı hızlandırır
Cl ⁻ iyonu	GKÇ'yi ve genel korozyonu teşvik eder

Jeotermal Akışkan Sistemlerindeki Korozyon Türleri

Jeotermal akışkan sistemlerde pek çok farklı korozyon olayı gözlemlenmiştir. Düşük ve orta dereceli jeotermal su sistemlerde çoğunlukla oluşan korozyon türleri aşağıda verilmiştir:

Çukurcuk korozyonu

Erozyon korozyonu

Gerilimli korozyon çatlakları (GKÇ)

Homojen dağılımlı korozyon

Mikrobiyolojik korozyon

Galvanik korozyon

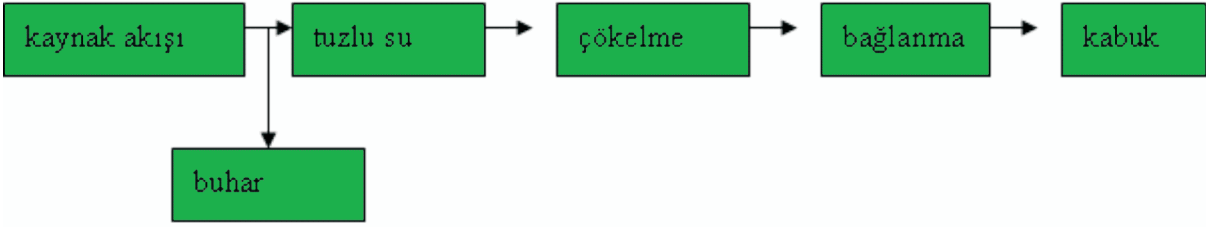
Taneler arası korozyon

Aralık korozyonu

KABUKLAŞMA

Jeotermal akışkanlar, kullanım sırasında termodinamik davranışlarıyla metal yüzeylere etki ederek, kabuklaşma ve korozyon sorunlarına neden olan çözünmüş gaz ve katı maddeler içermektedir. Kabuklaşma, jeotermal kaynaklardan yararlanma sırasında oluşan en önemli sorunlardan biridir (Gendenjamts, 2005). Jeotermal akışkanlar Si, O₂, Ca²⁺, SO₄²⁻ ve F⁻ iyonları ile doymuş haldedirler. Sıcaklık ve basınç değişiklikleri denge halindeki bu doymuş çözeltinin kabuklaşma eğilimini artırır.

Kalsiyum karbonat çökmesi, jeotermal sahalarda ve bazı petrol sahalarındaki üretim veya enjeksiyon kuyularında yer altı ve yerüstü donanımlarında daralmalara ve tıkanmalara neden olarak bir takım işletim sorunlarına ve dolayısıyla ekonomik kayıplara neden olur. Gazlaşma, buharlaşma ve soğumaya bağlı olarak ortaya çıkan kabuklaşmanın ana sebebi CaCO₃'ün göreceli çözünmezliğidir (Patzay vd.,1998). Şekil 2'de kabuk oluşum mekanizması akım şeması olarak verilmiştir.



Şekil 2. Kabuk oluşumunun mekanizması

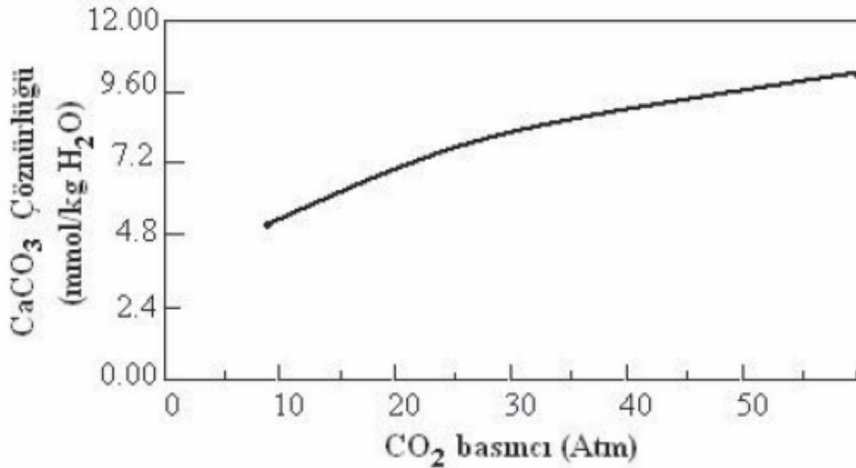
Fig.2. The mechanism of deposit formation

Kalsiyum karbonat çökmesini açıklamak için sudaki karbonat bileşenlerinin davranışlarının bilinmesi gerekir. Karbonatların çökmesinde doğal olarak en etkin parametre pH'dır. pH'ın yüksek olması çözeltideki karbonat iyonlarının derişimi arttıracığı için çökeltmeyi artırır. Çözünmüş CO_2 veya karbondioksitin kısmi basıncı çözeltide karbonik asit oluşmasına neden olduğu için pH değerini düşürmekte dolayısıyla CaCO_3 'ün çökmesini önlemektedir (Gendenjamts, 2005). Kalsiyum karbonatın çözünürlüğü,

- sıcaklık,
- kalsiyum iyon oranı ve
- akışkan içinde çözünmüş diğer

elementlere bağlıdır.

Karbonat iyon oranı ise karbonat ve bikarbonat iyonlarının dağılımını kontrol eden akışkanın pH'ine bağlıdır. Çoğu jeotermal akışkanın pH'ı karbondioksit basıncı ile kontrol edilir. Karbondioksit çıkışı akışkanın pH'ının artmasına, dolayısı ile de kalsiyum karbonatın çökmesine neden olur. Kalsiyum karbonatın akışkan içindeki çözünürlüğü azalan sıcaklık ile artar. Bunun anlamı, akışkanın basıncı, karbondioksit çıkışını önleyecek basınçta tutulursa kalsiyum karbonat çökmesi önlenir. Şekil 3'de karbondioksitin kısmi basıncı ile CaCO_3 'ün çözünürlüğü arasında ilişki gösterilmiştir. CO_2 'in basıncı arttıkça CaCO_3 'ün çözünürlüğü de artmaktadır.

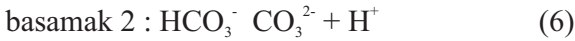


Şekil 3. 100°C'deki CaCO_3 - CO_2 - H_2O içinde basıncın fonksiyonu olarak CaCO_3 çözünürlüğü (Patzay vd.,1998)

Fig. 3. Solubility of CaCO_3 - CO_2 - H_2O at 100°C at various CO_2 pressures (Patzay vd.,1998)

Kalsiyum karbonat polimorfik bir mineral olup, yaygın bulunan üç polimorfu kalsit, aragonit ve vateritdir. Sulu bikarbonat-karbonat çözeltilerinde CO₂'in hidrasyonu ve dehidrasyonu paralel iki mekanizma ile yürür.

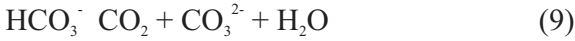
1. reaksiyon mekanizması (asidik mekanizma)



2. reaksiyon mekanizması (alkali mekanizma)



Toplam reaksiyon sulu bikarbonat-karbonat çözeltilisinden CO₂ desorbe olduğunda oluşur [Al-Rawajfeh vd., 2005]



SUYUMUŞATMA

Yumuşatma terimi , suyun sertliğini azaltan veya tamamen yok eden prosesler için kullanılır.

Sertlik artışı, suyun iletkenliğinin de artmasına sebep olur. Sertlik giderilirse;

- a. Sabun ve deterjan sarfiyatı azalır.
 - b. Korozyon kontrolüne yardımcı olur.
 - c. Taşlaşmanın (kabuklaşmanın) önüne geçilir.
- Suyun içerdiği çözünmüş kalsiyum ve magnezyum tuzları, suların sertliğini belirler. Suların sertliği, uygulamada yaygın olarak içerdikleri sertlik veren maddelerin CaCO₃ cinsinden miktarı ile (yani mg/L CaCO₃ olarak) belirlenir. Sertlik ikiye ayrılır

- Geçici sertlik (alkali sertliği)
- Kalıcı sertlik

Geçici sertlik

Suyun içerdiği kalsiyum ve magnezyum bikarbonat tuzlarının miktarını belirler. Su ısıtıldığı zaman geçici sertlik veren maddeler karbondioksit vererek ayrışır. Kalsiyum karbonat ve magnezyum hidroksit çökerek ayrılır. (Bunların çözünürlükleri sıcaklıkla ters orantılıdır.) Bu şekilde ısıtılarak giderilen sertliği geçici sertlik denir.

Kalıcı sertlik

Magnezyum ve kalsiyum sülfat, klorür ve nitrat tuzlarından oluşan sertliğe ise kalıcı sertlik denir. Kalıcı sertlik veren maddeler ısı ile ayrışmaz. Bu tuzlar nötr olup, alkalite oluşturmaz ve ısı aktarım yüzeylerinde sert birikinti oluşturlar.

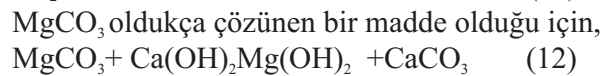
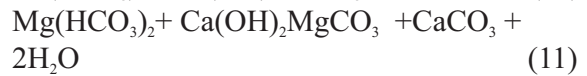
Geçici sertlik ile kalıcı sertliğin toplamına, **toplam sertlik (ya da sertlik bütünü)** denir. Sertlik magnezyum ve kalsiyum tuzlarından oluştuğundan bazen magnezyum ve kalsiyum sertliği diye de ikiye ayrılarak tanımlanabilirler. Yeraltı sularından çözünen kaya ve minerallerdeki Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonları, suyun sert olmasına neden olur. Suyun sertliği, sertlik dereceleri olarak ifade edilir. En yaygın kullanılan Fransız, İngiliz ve Alman sertlik dereceleridir. Ülkemizde Fransız sertlik derecesi kullanılmaktadır.

Sertlik giderme yöntemleri;

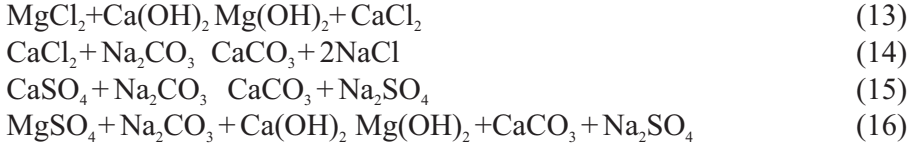
- * Kireç-soda yöntemi
- * Sodyum hidroksit ile muamele
- * Sodyum sülfatla yumuşatma
- * iyon değiştirme

En çok kullanılan sertlik giderme yöntemi kireç-soda prosesidir. Bu prosesin modern uygulaması, biri soğuk kireç ve diğeri sıcak kireç prosesi olmak üzere iki şekilde yapılır. Sert sudaki kalsiyum iyonu CaCO₃ ve magnezyum iyonu Mg(OH)₂ şeklinde uzaklaştırılır.

Karbonat sertliği için:



Çözünebilen kalsiyum ve magnezyum tuzlarından kaynaklanan karbonat dışı sertlik için Ca(OH)₂ ve Na₂CO₃ kullanılmaktadır. Reaksiyonlar aşağıda verilmiştir (Çataltaş, 1985).



Çizelge 2. Sertlik derecelerine göre suların sınıflandırılması

Table 2. Water classify according to degrees of hardness

(<http://www.kazancionline.com/>, <http://www.mayerkimya.com/endustriyel.htm>,

<http://www.cevrettek.com/>, <http://www.coskunaritma.com/anatur.asp>, <http://www.detayaritma.com/>)

Suyun sertliği	Alman	Fransız	İngiliz
Çok yumuşak	0-4	0-7,2	0-5
Yumuşak	5-8	7,3-14,2	6-10
Orta sert	9-12	14,3-21,5	11-15
Oldukça sert	13-18	21,6-32,5	16-22,5
Sert	19-30	32,6-54,0	22,5-37,5
Çok sert	30'dan fazla	54'den fazla	37,5'tan fazla

MATERYAL VE YÖNTEM

XRD Analizleri

Jeotermal suyun çıkış noktasında korozyona uğramış borunun iç kısmında oluşan kabuk örneği ve şehir içi dolaşan boru hattındaki korozyona uğramış borunun iç kısmındaki kabuk örneği alınarak XRD yöntemi ile analiz edilmiştir. Kabuk örnekleri porselen havanda iyice öğütülerek 100 mesh elek altı elde edilmiştir. Daha sonra Shimadzu marka XRD-6000 model cihazda analizler yapılmıştır. Sistemde kullanılan St37 çelik borunun % bileşimi C:0,10, Mn:0,40, Si:0,25, P:0,45 ve S:0,45'dir.

Su Analizleri

Korozyon olayı ve kabuklaşmanın incelenmesi için jeotermal kaynak su örneği, bu suyun ısıttığı kuyu suyu örneği ve şehir içi dolaşan kuyu suyunun geri dönüş hatlarından (5 geri dönüş hattı) su örnekleri alınmıştır. Su içinde bulunan iyonların analizleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde bulunan IC (Dionex GP50) ve ICP-OES (ICP-AES Varian Liberty

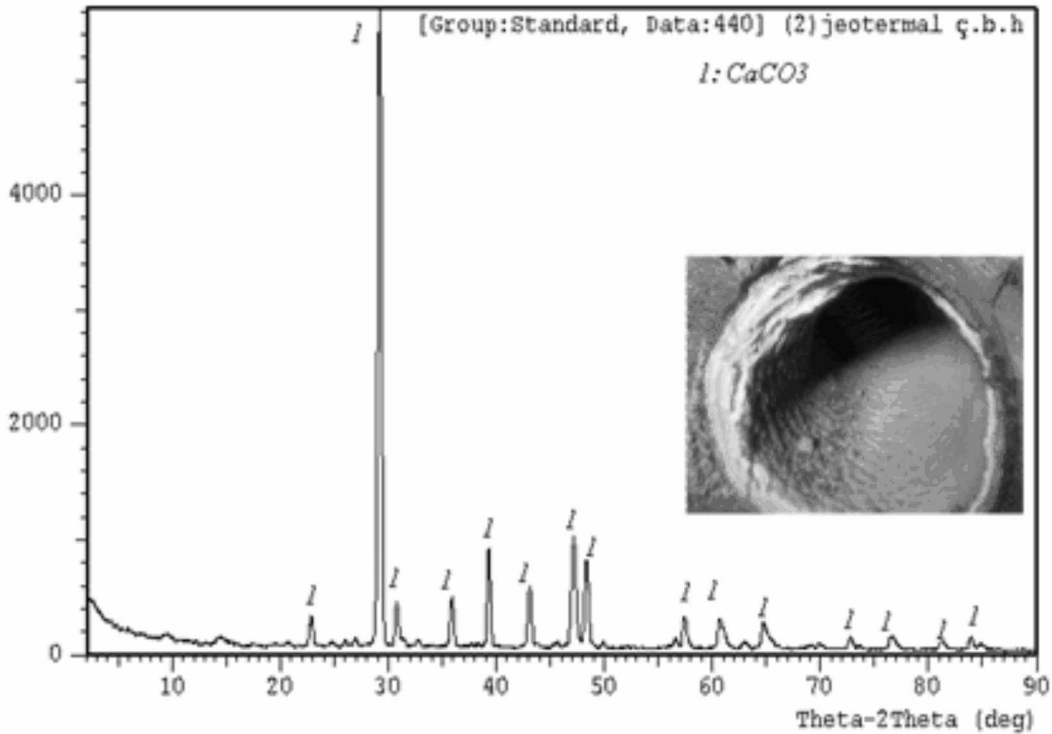
Series2 EL97093438) spektrometrelerinde yapılmıştır. Analizler öncesi numuneler mavi band süzgeç kağıdında süzülmüştür. ICP-OES analizleri numune süzöldükten sonra 500 ml suya 2,5 ml olacak şekilde saf nitrik asit ilave edilen sularda yapılmıştır. Su örneklerinin pH, gerilim değerleri WTW pH 330i/SET pH metre ile iletkenlik, toplam çözünmeyen katı madde (TDS) değerleri WTW cond 330i/SET kondüktometre ile ölçülmüştür. Toplam sertlik deneyleri TS 266'ya göre yapılmıştır.

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Jeotermal uygulamalarda kabuklaşma ve korozyon sorunlarının önlenmesi, sistemin sürekliliği için çok önemlidir. Kabuklaşmanın önlenmesi için uygulanacak yöntemler, jeotermal bölgenin kendine özgü özelliklerine bağlı olarak belirlenmelidir. Jeotermal akışkanın kimyasal içeriğinin bilinmesi, bu ortamlarda kullanılacak malzemelerin nasıl davranış göstereceklerinin belirlenmesi bakımından önemlidir. Bu nedenle, jeotermal kaynakların işletilmeye başlatılmadan önce kimyasal

analizlerinin yapılması kullanılacak malzemelerin seçimi ve uygulamanın uzun ömürlü olması bakımından büyük önem taşır (www.ansiklopedim.com). Herhangi bir özel su grubuna girmeyen termomineral sular, mikst sular diye sınıflandırılırlar ve bu sular da en sık klorür (Cl^-), sülfat (SO_4^{2-}) ve bikarbonat (HCO_3^-) anyonları, sodyum (Na^+), kalsiyum (Ca^{+2}) ve magnezyum (Mg^{+2}) kationları bulunur (Mergen vd., 2006)

Jeotermal su çıkış noktasında borunun iç kısmında oluşan kabuk örneğininin XRD analizi (Şekil 4) incelendiğinde jeotermal suyun çıkış noktasındaki borunun içinin tamamen CaCO_3 kabuğundan oluştuğu görülmektedir. Jeotermal su ICP-OES analizleri incelendiğinde (Çizelge 4) Ca içeriği 96,348 ppm olduğu görülmekte bu da bu oluşumun normal olduğunu göstermektedir.

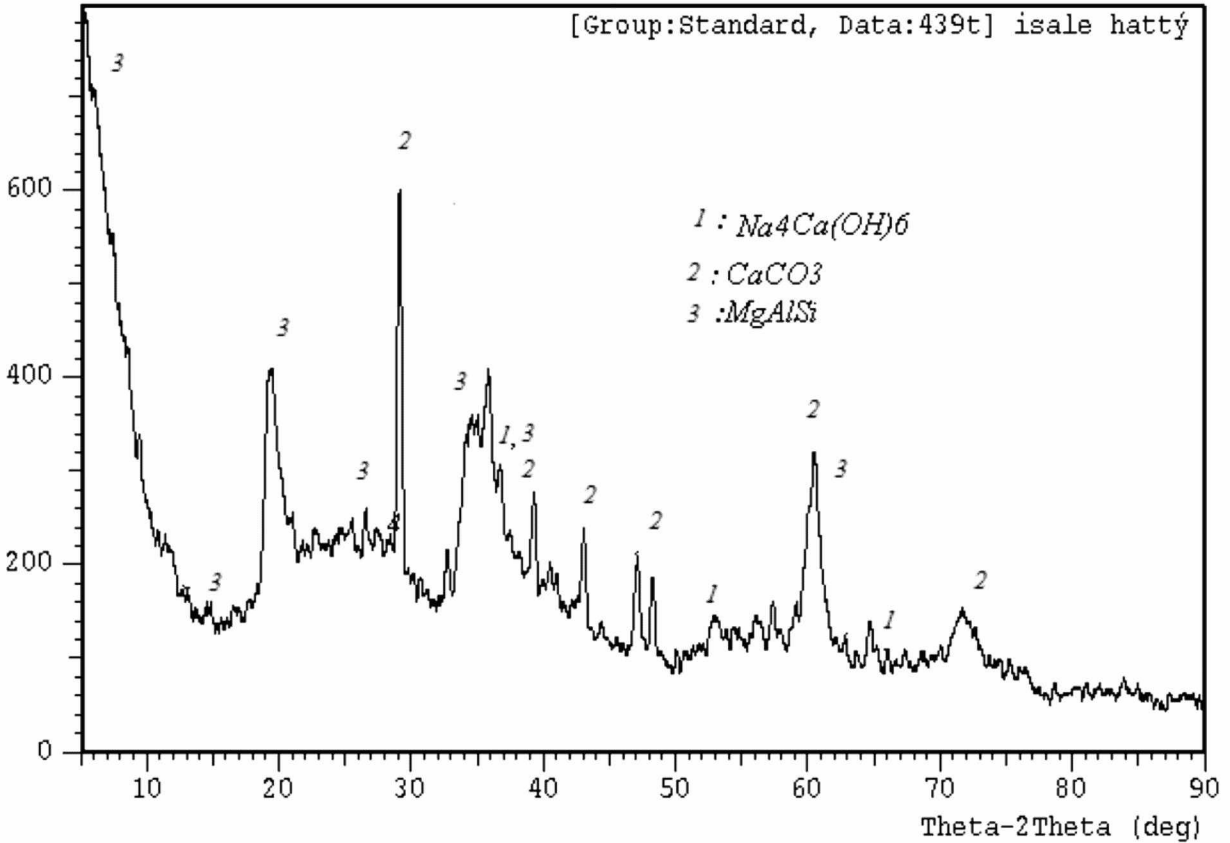


Şekil 4. Jeotermal su çıkış noktasında borunun iç kısmında oluşan kabuk örneğininin XRD analizi

Fig 4. XRD analysis geothermal water exit point example of deposit pipe inside

Şekil 5; Şehir içi dolaşan yumuşatılmış kuyu suyunun geçtiği korozyona uğramış borunun iç kısmındaki kabuk örneğinin XRD analizini göstermektedir. Yumuşatılmış kuyu suyu örneğinin ICP-OES analizleri (Çizelge 4) incelendiğinde Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ içeriği oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle XRD analizinde $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{OH})_6$, CaCO_3 ve MgAlSi piklerinden oluşan bir kabuk görülmektedir. $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{OH})_6$ ve MgAlSi yumuşatılmış kuyu suyunun oluşturduğu kabuk bileşenleri, CaCO_3 ise sistemin jeotermal su ile

beslenmesinden kaynaklanan kabuk bileşendir. Bütün su örnekleri yüksek oranda Ca^{2+} iyonu içermekte bu da CaCO_3 oluşumunu desteklemektedir. ICP-OES sonuçları incelendiğinde (Çizelge 4) AF 21 inhibitörsüz gidiş jeotermal suyunun Ca^{2+} iyon derişimi 96,348 ppm iken jeotermal geri dönüş suyunun 153,30 ppm olduğu görülmektedir. Kalsiyum miktarının artması jeotermal suyun geçtiği boru hattında CaCO_3 kabuklaşması olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Şehir içi kuyu suyu boru hattı içindeki kabuğun XRD analizi
 Fig. 5. XRD analysis city well water example of deposit pipe inside

Yeraltı sularında bölgenin jeolojik özelliklerine bağlı olarak çeşitli derişimlerde bulunan eser elementlerden biri de florürdür. Florürün yeraltı sularındaki derişimleri bölgenin jeolojik özelliklerinden, iklim şartlarından, yeraltı sularındaki diğer iyonların varlığı vb. fiziksel faktörlerden etkilenmektedir (<http://envijsnu.net/newslet/v7n3/surface.html>). Su örneklerinin IC analiz sonuçları incelendiğinde (Çizelge 3) F⁻ iyonu derişiminin inhibitörsüz jeotermal suda ve inhibitörlü jeotermal geri dönüş suyunda fazla olduğu görülmektedir. Kuyu suyunda F⁻ iyonu derişimi az olmasına rağmen yumuşatılmış kuyu suyu geri dönüş hatlarından alınan su örneklerinde F⁻ iyonu derişimi jeotermal sudaki F⁻ iyonu derişimine yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni boru hattının su kaçakları durumunda jeotermal su ile beslenmesindedir. (Hepsağ vd.,2005).

Cl⁻ iyonu derişimi incelendiğinde (Çizelge 3); Cl⁻ iyonunun yumuşatılmamış kuyu suyunda az olduğu görülmektedir. Kuyu suyu NaCl ile yumuşatıldığı (% 0,05 NaCl) için Cl⁻ derişimi yumuşatılmamış kuyu suyuna göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Sabit korozyon oranı, akışkanda klorür iyonunun bulunmasıyla artar. Düşük sıcaklıklarda ve 100 ppm'lik derişimlerde korozyon oranının, klorür derişiminin kare köküyle doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Klorür iyonu, korozyona dayanıklı alaşımların dayanımlarının azalmasına ve östenit paslanmaz çeliğinde gerilme çatlmasına neden olur. Sıcaklığın 50 °C' nin üzerinde olduğu durumlarda 5-10 ppm'lik klorür iyonu derişimi, paslanmaz çeliklerde (AISI 316) gerilme çatlama başlatmak için yeterlidir. Cl⁻ derişimleri (yumuşatılmamış kuyu suyu hariç) 17 ppm'in üstünde olmaktadır. Bu da sistemde kullanılan St37 çeliğinde çukur korozyona neden olmaktadır. Klorür iyonları çok hareketli olduğundan ve çukur ve çatlaklarda doygunluğa erişebildiğinden, akışkandaki ortalama klorür iyonu derişimi yanıltıcı olabilir (Mutlu, 1997).

Sülfat iyonları genellikle jeotermal akışkanlarda bulunur fakat klorür gibi bölgeselleşmiş şiddetli etkilerde bulunmazlar. Sularda tespit edilen düşük sülfat derişimleri büyük olasılıkla bakteriyel sülfat indirgenmesi nedeniyledir. Bu yüzden, sülfat indirgenmesi doğal, sularda beklenmedik şekilde düşük SO₄²⁻ derişimlerine sebep olabilmektedir. SO₄²⁻ iyonu yumuşatılmamış kuyu suyunda diğerlerine göre yaklaşık 3 ppm kadar daha azdır. Sülfat iyonunun korozyon olayında inhibitör etkisi olmakla birlikte Cl⁻ iyonu çukur korozyonunda daha baskın olmaktadır. SRB ortamında sülfat indirgenmesi aşağıdaki basit eşitliklerle gösterilebilir (Higgins vd,2003);



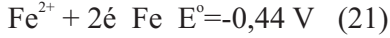
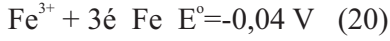
Burada Me²⁺ metalik katyonu göstermektedir. Sülfatın indirgenmesi sonucu H₂S oluşmakta bu da demir ile birleşerek pirit (FeS) oluşturmaktadır.

Sıcaklıkları ortalama 98 °C olarak kabul edilebilen Ömer-Gecek jeotermal sahası Na ve HCO₃'ça zengin bir karakter sergiler. Termal sulara göre daha asidik. olan bu sular, yüksek HCO₃ derişimlerinden kaynaklanan anyon fazlalığını dengelemek üzere çevre kayaçları çözerek Na⁺ ve K⁺ gibi katyonları bünyelerine alırlar. Mg²⁺ iyonları ise büyük ihtimalle jeotermal akışkanın geçtiği yerlerdeki kayaçları çözmesi sonucu akışkanda bulunmaktadır. Mg(HCO₃)₂ akışkan içinde geçici sertliğe neden olmakta, MgSO₄, MgCl₂ ise akışkan içinde kalıcı sertliğe neden olmaktadır.

Çizelge 4'deki Mn derişimleri incelendiğinde AF21 gidiş inhibitörsüzde Mn hiç yokken ve yumuşatılmamış kuyu suyunda 1,6479 ppm'dir. AF21 inhibitörlü geri dönüş suyu ve 5 bölgenin geri dönüş suları incelendiğinde en düşük mangan derişimi 14,8120 en yüksek 24,232 ppm olduğu görülmektedir. Buda St37 çeliğinin yapısında bulunan manganın (%0,45 Mn) çözünerek akışkana geçtiğini göstermektedir. Mn'nin elektrokimyasal indirgenme potansiyeli negatif olduğundan



kolaylıkla yükseltgenen Mn²⁺ iyonları halinde akışkana geçmektedir. Aynı durum demir içinde söz konusu



Bu da St 37 çelik boru üzerinde galvanik çiftler oluştuğunu göstermektedir. Çelik bölgesel ya da çukur korozyona uğramaktadır. AF 21 inhibitörsüz gidiş jeotermal suyunda demir 37,565 ppm iken jeotermal geri dönüş suyunda 234,45 ppm olduğu görülmektedir. Demirin derişimi yaklaşık 6 kat artmıştır.

Buda borunun korozyona uğradığını, demirin Fe²⁺ veya Fe³⁺ iyonları şeklinde çözüldüğünü göstermektedir. Karbon ve düşük alaşımli çeliklerin korozyonu, genellikle pH (hidrojen iyonu) ile kontrol edilir. Çeliğin korozyon oranı pH arttıkça azalır. Düşük pH'lı çözeltiler; aşınma, gerilme çatlama gibi korozyon türlerine neden olabilir. Teorik hesaplamalar, 80 °C'ye kadar CO₂ ve NaCl'li ortamda uniform korozyon oranının yüksek olduğunu gösterir. 80 °C'nin üstünde kararlı demir katmanları oluşur ve bu tabaka korozyon oranını tahmin edilen değerlere göre daha da yavaşlatır. Ağır ve geçiş metal iyonları yükseltgenmiş şekillerinde bulunursa korozif etkili olabilirler fakat, genellikle jeotermal akışkanlarda en düşük yükseltgenmiş durumlarında bulunurlar.

Çizelge 3. Su Örneklerinin İyon Kromatografisi (IC) Analiz Sonuçları
Table 3. The results of Ion Chromatograph (IC) of water samples

Numune Adı	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)
1.bölge dönüş	0.0217	19.788	-	-	4.9606
2.bölge dönüş	0.0263	20.040	-	-	5.0473
3.bölge dönüş	0.0294	17.727	-	-	4.5675
4.bölge dönüş	0.0195	19.086	-	-	4.8621
5.bölge dönüş	0.0285	19.791	-	-	5.0148
AF-21 gidiş inhibitörsüz	0.0332	19.526	-	0.3999	4.9169
AF-21 dönüş inhibitörlü	0.0266	19.510	-	-	4.9623
Yumuşatılmış kuyu suyu	-	1.7726	-	1.1325	1.6750
Yumuşatılmış kuyu suyu	0.0131	19.841	0.3191	0.2862	5.0182

Çizelge 4. Su Örneklerinin ICP-OES Analiz Sonuçları
Table 4. The results of ICP-OES of water samples

Numune Adı	Ca ²⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Li ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	Fe ²⁺ , Fe ³⁺ (ppm)	Mn ²⁺ (ppm)
1.bölge dönüş	150.50	136.10	14.764	10.498	1121.1	116.05	22.893
2.bölge dönüş	154.65	137.59	14.846	13.553	1124.6	381.44	22.447
3.bölge dönüş	152.90	134.03	14.778	13.288	1141.8	148.82	17.484
4.bölge dönüş	153.32	135.55	14.788	12.734	1159.0	252.90	14.821
5.bölge dönüş	153.07	134.90	14.769	12.286	1122.9	138.12	17.406
AF-21 gidiş inhibitörsüz	96.348	153.75	14.766	13.770	1142.4	37.565	-
AF-21 dönüş inhibitörlü	153.30	138.38	14.838	13.436	1150.6	234.45	24.232
yumuşatılmamış kuyu suyu	164.21	15.846	12.892	52.604	95.051	-	1.6479
yumuşatılmış kuyu suyu	158.96	136.06	14.814	14.130	1122.0	93.918	11.921

Alınan su örneklerinin pH, gerilim, iletkenlik, TDS ve toplam sertlik değerleri incelendiğinde toplam sertlik olarak inhibitörsüz jeotermal su(AF 21) sertliği 57,96 FSD iken inhibitörlü dönüş suyunda toplam sertlik 91,44 FSD olarak bulunmuştur. Toplam sertliğin artması jeotermal su içinde kalıcı sertlik veren iyonlardan Cl⁻ ve SO₄²⁻ miktarının arttığını göstermektedir. Bu sonucun IC analizleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Kuyu suyu geri dönüş hatlarında alınan su örneklerinde pH, iletkenlik ve TDS'nin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni jeotermal havuzdan alınan suyun arada bir kaçakları tamamlamak için şehir içi kuyu suyuna katılması ve bu işlemler sırasında sisteme hava girişi gibi nedenlerden dolayı şehir içi dolaşan suyun içindeki O₂ ve CO₂ miktarı artması ve bunun sonucu olarak pH'nın artmasıdır. pH artması kabuklaşmayı artırır. TDS değerinin artması boru içinde bazı elementlerin(Mn²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺) çözüldüğünü göstermekte veya daha önce geçen suyun bıraktığı maddeleri sürükleyip almakta buda korozyon ve kabuklaşma olduğunu göstermektedir. Artan TDS'ye bağlı olarak

iletkenliğin artması korozyon ve kabuklaşmanın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca kuyu suyunun NaCl ile yumuşatılması da bunu desteklemektedir. Gerilim değerleri daha negatif değerler kaymıştır. Bu oksijenin katodik depolarizatör etkisi nedeniyle. Jeotermal akışkanlardaki en önemli kirlenici, çözülmüş durumda bulunan oksijen'dir. Havalandırılmış jeotermal akışkan, karbon çeliğindeki sabit korozyon hızını on kat artırır. Oksijen, klorür iyonuyla birlikte belirli sıcaklıklarda gerilme çatlamasına neden olabilir. Sıcaklığın yükselebileceği geri dönüş hatlarında oksijen kirliliğinin önlenmesi çok önemlidir

Jeotermal akışkanlarda, metal yüzeylerde korozyona neden olan başlıca kimyasal maddeler; oksijen, hidrojen iyonu (pH), klorür iyonu, hidrojen sülfid, karbondioksit, amonyak ve sülfat iyonudur. Bazı jeotermal akışkanlarda daha az rastlanan veya daha az etkili olan florür iyonu, ağır metaller ve boron gibi diğer bazı bileşenler de korozif etkiler yaratabilir. Bu maddelerin korozif etkilerinin miktarını tahmin edebilmek aşağıdaki nedenlerden dolayı güçtür:

Karbondioksit (CO_2), çözülmüş durumda bir çok jeotermal akışkanda doğal olarak bulunur ve karbon çeliği ve düşük alaşımlı çelikler üzerinde korozif etkilidir. CO_2 , jeotermal akışkanlarda pH'ı kontrol etmek için en önemli maddedir. Bir çok durumda, yoğunlaşmış buharda çözülmüş olarak bulunan CO_2 'den kaynaklanan

düşük pH, jeotermal buhar hatlarındaki pH'ı kontrol eden en önemli etmendir. CO_2 kısmi basıncının artması, çözeltinin pH'ını düşürür . (www.ansiklopedim.com).

Çizelge 5. Su örneklerinin pH, gerilim, TDS, iletkenlik değerleri (23 °C)
Table 5. The values of pH, voltage, TDS, conductivity of water samples (23 °C)

Numune	Toplam sertlik FSD	pH	Gerilim (mV)	TDS (ppm) 0,45	İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$, $k=0,104$ l/cm)
AF21 gidiş inhibitörsüz	57.96	7.477	-41.8	748	1572
AF21 dönüş inhibitörlü	91.44	7.990	-71.9	773	1625
Yumuşatılmamış kuyu suyu	112.68	7.018	-14.8	172	362
Yumuşatılmış kuyu suyu	95.4	7.964	-70.4	764	1610
1.bölge dönüş suyu	68.76	8.072	-76.7	751	1585
2.bölge dönüş suyu	80.64	7.974	-70.9	771	1626
3.bölge dönüş suyu	109.44	7.991	-72.0	750	1578
4.bölge dönüş suyu	94.32	8.218	-85.3	738	1558
5.bölge dönüş suyu	92.52	8.055	-75.7	753	1587

SONUÇLAR

Deneyisel sonuçlardan elde edilen verilere göre Afyon Jeotermal Tesisleri (AFJET) ısıtma sisteminde korozyon ve kabuklaşma olmaktadır. Kuyu suyu yumuşatma işleminde NaCl yerine kireç-soda yönteminde kullanılan Na_2CO_3 ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile yumuşatma işlemi yapılmalıdır. Çünkü Cl çukur korozyonunda çok etkili bir iyondur. Aktif üretim yapan jeotermal su kuyularının ve yumuşatılmış kuyu suyu geri dönüş hatlarının periyodik olarak jeokimyasal ve inhibitör testleri yapılarak en uygun inhibitörün seçimi yapılmalıdır. Maddi olanaklar çerçevesinde elyafla desteklenmiş fiberglas plastik (FRP)

boruların kullanımı hem maliyet hem de işletme kolaylığı ve korozyona dayanıklılık açısından tercih edilmelidir. Bunlara ek olarak boru hattı korozyona karşı katodik koruma uygulaması ile korunmalıdır.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmada AFJET Tesislerindeki çalışmalar sırasında bilgi ve deneyimlerini aktaran ve destekleyen AFJET yetkililerine, IC ve ICP-OES su analizlerini yapan İzmir Yüksek Teknolojisi Enstitüsü yetkililerine katkılarından dolayı teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Anonymous, 2006 . <http://www.magnetix-tr.com/jeotermal.html>
- Banaś, J., Lelek-Borkowska, U., Mazurkiewicz, B. ve Solariski, W., 2007, "Effect of CO₂ and H₂S on the composition and stability of passive film on iron alloys in geothermal water", *Electrochimica Acta*, 52(18), 5704-5714
- Çataltaş, İ., 1985, *Kimyasal Proses Endüstrileri 1*, İnkılap Kitabevi, İstanbul, 500 sayfa
- Çakır, A. ,2005, Jeotermal Su Kullanımında Kabuklaşma Ve Korozyon Problemleri, , Jeotermal Enerji Semineri, TESKON, 303-316
- Gallup, D.L., 1993, "The use of reducing agents for control of ferric silicate scale deposition", *Geothermics*, 22 (1), 39-48
- Gallup, D.L., 1998, "Inhibition of silica precipitation"
Applied Thermal Engineering 18(6), 19
- Gallup, D. L. ve Barcelon, E., 2005, "Investigations of organic inhibitors for silica scale control from geothermal brines-II", *Geothermics* 34 (6), 756-771
- Batis, G., Kouloumbi, N. ve Kotsakou, K., 1997, "Corrosion and protection of carbon steel in low enthalpy geothermal fluids. The case of SOUSAKI IN Greece", *Geothermics*, 26(1), 65-82
- Gendenjamts, OE., 2005 The United Nations University, Geothermal Training Programme, 'Interpretation Of Chemical Composition Of Geothermal Fluids From Árskógsströnd, Dalvík, And Hrísey, Niceland And In The Khangai Area, Mongolia', Reports Number 10, Reykjavik, Iceland
- Higgins, J. P. Ve Hard, B. C., 2003, "Bioremediation of Rock Drainage Using Sulphate-Reducing Bacteria", SUDBURY 2003, www.jacqueswhitford.com
- Kubiak, J. A. ve Urquiza-beltrán, G., 2002, "Simulation of the effect of scale deposition on a geothermal turbine", *Geothermics*, 31(5), 2002, 545-562
- Mergen, H., Mergen, B.E., Erdoğan, A.B., 2006, "Jeotermal Enerji ve Balneoterapi Uygulamaları", *FTR Bil Der J PMR Sci*, 9(3), 108-113
- Mertoğlu, O., 2000, Türkiye'de Jeotermal Enerji Uygulamaları Ve Gelişimi, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Yerel Yönetimlerde Jeotermal Enerji Ve Jeoteknik Uygulamalar Sempozyumu, Editör:Ö. Ersin Gırbalar ,Aydoğdu Ofset , Ankara, 1-9
- Mornet ve Neville (2002) Morizot, A. P. ve Neville, A., 2002, "Insights into Electrodeposition of an Inhibitor Film and Its Inhibitive Effects on Calcium Carbonate Deposition", *Journal of Colloid and Interface Science*, 245, 40-49
- Mutlu, H., 1997, "Gazlıgöl (Afyon) Termal ve Maden Sularının Jeokimyasal Özellikleri ve Jeotermometre Uygulamaları", *Jeoloji Müh. Dergisi*, 50
- Özbek, T., 2000, Jeotermal Akışkanın Entegre Olarak Sağlık ve Termal Turizmde Değerlendirilmesi, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Yerel Yönetimlerde Jeotermal Enerji Ve Jeoteknik Uygulamalar Sempozyumu, Editör:Ö. Ersin Gırbalar ,Aydoğdu Ofset, Ankara, 241-263
- Patzay, G., Stahl, G., Karman, F.H. And Kalman, E., 1998, Modeling of scale formation and corrosion from geothermal water, *Electrochim. Acta*, 43, p.137-147
- Al-Rawajfeh, A. E., Gladeb, H., Ulrich, J., 2005, Scaling in multiple-effect distillers: the role of CO₂ release, *Desalination*, 182, 209-219
- Richter, S., Hilbert, L.R., ve Thorarinsdottir, R.I., 2006, "On-line corrosion monitoring in geothermal district heating systems. I. General corrosion rates", *Corrosion Science*, 48(7), 1770-1778
- Sampedro, J. A., Rosas, N. ve Díaz, R., Domínguez, B., 1998, "Developments in geothermal energy in Mexico—part nineteen. Corrosion in Mexican geothermal wells", *Heat Recovery Systems and CHP*, 8 (4), 355-362
- Soylezmezoglu, S. ve Harper, R. , 1982, "Oxygen ingress into geothermal steam and its

effect on corrosion of low carbon steel at Broadlands, New Zealand”, Geothermics, 11(1), 31-42

Şahmurova, A., Hepsağ, E. Ve Özkan, A., 2005, “Azerbaycan'ın Yeraltısularında Eser Element Konsantrasyonları ve Florür Seviyesinin Değerlendirilmesi”, Trakya Univ J Sci, 6(2), 57-63

Üneri, S., 1998, Korozyon ve Önlenmesi, Korozyon Derneği Yayınları, Ankara, 413 s

Xyla, A. G., Mikroyannidis, J. ve Koutsoukos, P. G., 1992, The inhibition of calcium carbonate precipitation in aqueous media by organophosphorus compounds, Journal of Colloid and Interface Science, 153 (2), 537-551 TS 266

(www.ansiklopedim.com)

(<http://envisjnu.net/newslet/v7n3/surface.html>).

(<http://www.kazancionline.com/>

<http://www.mayerkimya.com/endustriyel.htm>

<http://www.cevrettek.com/>

<http://www.coskunaritma.com/anatur.asp>

<http://www.detayaritma.com/>)

Bahçecik (Gümüşhane) Travertenlerinin Jeolojik Ve Jeoteknik Özellikleri

Geological And Geotechnical Properties Of Bahçecik Travertine (Gümüşhane)

Bülent YALÇINALP, Hakan ERSOY, Arzu FIRAT ERSOY, Canan KEKE

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

Makale Geliş Tarihi: 5 Ekim 2007, Kabul Tarihi : 5 Ocak 2008

Received: 5 October 2007, Accepted 5 January 2008

Öz

Doğu Karadeniz Bölümü'nde özellikle Bayburt, Gümüşhane ve Şiran çevresinde önemli traverten oluşumları bulunmaktadır. Bölgede son 10 yılda gözle görülebilir şekilde doğal taş üretimi artmış, bu rakam 2003 yılı itibariyle 450 milyon ton seviyesine ulaşmıştır. Travertenler genel olarak Kuzey Anadolu Fayına (KAF) dik yönde gelişmiş KD-GB yönlü ana kırık sistemleriyle ilişkilidir. Bu çalışmada, günümüzde işletilen ve Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki en büyük traverten yatağı olan Bahçecik traverteninin oluşum koşulları ve fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Bahçecik travertenleri, yağışla yeraltına süzülen suların karbonik asitçe zenginleşmesi, Berdiga kireçtaşlarını çözmesi ve bu çözeltilerin düşey faylara bağlı olarak yüzeye çıkmasıyla beraber bünyelerindeki karbondioksit gazını bırakarak ortama CaCO_3 çökeltmesi sonucunda oluşmuşlardır. Az eğimli topoğrafyada, yüzeye çıkan kalsiyum bikarbonatlı sular eğim aşağı akarken geniş yayılımlar gösteren teras veya setler şeklinde morfolojik yapılar oluşturmuştur. Morfolojik özelliklerine ve oluşum koşullarına göre teras tipi traverten olarak tanımlanan Bahçecik travertenin rezervi yaklaşık 400000 m^3 'dür.

Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı belirlemede, gerek örneklerin deneye hazır hale getirilmesi gerekse deneyin zaman alıcı olması nedeniyle, Bahçecik travertenlerine ait örneklerinin dayanım özellikleri ile indeks özellikleri arasında doğrusal bir ilişki olup olmadığı test edilmiştir. Sonuç olarak tek eksenli basınç direnciyle boyuna dalga hızları arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeolojik ve jeoteknik özellikler, Bahçecik traverteni

Abstract

There are important travertine deposits in the eastern Black Sea Region, especially in Bayburt, Gümüşhane and Şiran. In the region, production of natural stones has been increased in the last decade and production of travertine reached to 450 millions tons in 2003. Traverten formations are controlled with NE-SW directed fault systems crosscutting NAF. In this study, physico-mechanical properties and formation condition of Bahçecik travertine as the biggest travertine deposit in the region were determined.

Bahçecik travertine was formed with carbonic acid-rich water percolated through rocks in limestone, the water dissolved the Berdiga limestones and becomes saturated with it. When the water resurfaced related with vertical faults, the sudden drop in pressure caused the water to release the carbon dioxide gas and the calcium carbonate then recrystallized. Widely outcropping terraced-mount type travertine

was formed by saturated water resurfaced on the low slopes topographical surface. Considering to its morphological properties and formation condition, reserve of terraced-mount type Bahçecik travertine is about 400000 m³.

Determination of uniaxial compressive strength of intact rocks can be quite difficult owing to time consuming and expensive to prepare specimens and to conduct this test. Thus, if there is a linear correlation between strength and index properties of travertine samples is tested. As a result of this study, it is concluded that there is a linear correlation between uniaxial compressive strength and sonic velocity test results.

Key words: *Properties of geotechnical and geological, Bahçecik travertine*

GİRİŞ

Doğu Karadeniz Bölgesi, jeolojik yapısı nedeniyle sınırlı sayıda mermer ve doğal taş çeşitliliğine sahiptir. Daha çok bölgenin güney kesimlerinde önemli yatak ve rezervler mevcuttur. Bölgede özellikle Bayburt, Gümüşhane ve Şiran çevresinde önemli traverten ve oniks oluşumları bulunmaktadır. Bölgenin kuzey kesimlerinde ise daha küçük oluşumlar görülmektedir (Arslan vd., 2005; Alp vd., 2005, Çavuşoğlu vd., 2006). Bölgede 10 adet traverten ocağı yaklaşık 600000 m³ işletilebilir rezerve sahiptir.

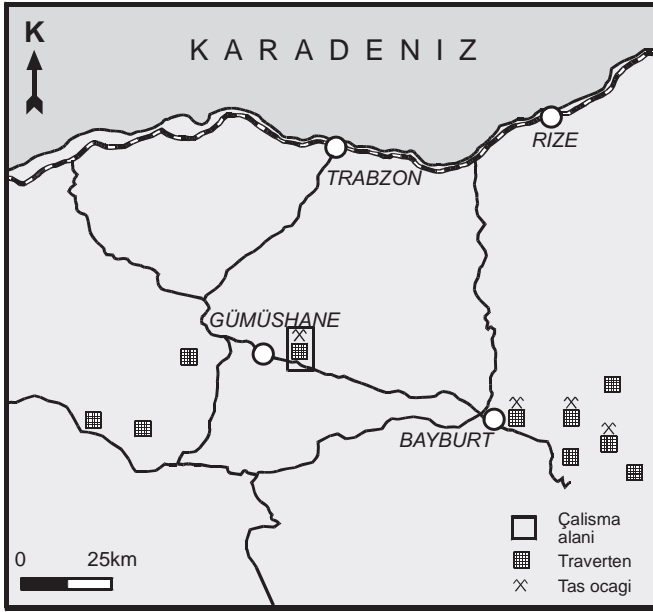
Travertenler, yağışla yeraltına süzülen ve karbonik asitçe zenginleşen suların karbonatlı kayaları çözmesi, bunu takiben kalsiyum karbonat veya kalsiyum bikarbonat içeriği artan suların bünyelerindeki karbondioksit gazını bırakarak ortama CaCO₃ çökeltmesi sonucunda oluşan genellikle iri gözenekli, ince taneli ve bantlı yapıları kayalardır. Kalsitik tufa, kalk tufa, sinter kabuk, bitki tufası gibi adlarla bilinirler (Atabey, 2002). Tufa ile traverten birbirinden farklı kılan fiziksel ve dokusal özellikler bulunmaktadır. Tufa, gözenekli, süngerimsi, odunsu dokulu soğuk su karbonat birikimlerini olarak tanımlanırken, traverten iyi taşlaşmış spari kalsit dokulu, diyajenetik eski kalkerli tufa çökeli olarak tanımlanabilir (Pedley, 1990)

Travertenler ve tufaların oluşum koşulları,

sınıflaması, kökenleri, jeomorfolojik, sedimantolojik ve ekonomik özellikleri daha önce birçok araştırmacı tarafından çeşitli yönleriyle ele alınarak incelenmişlerdir. (Bargar, 1978; Meredith, 1980; Folk ve Chafetz 1984; Love ve Chafetz, 1988; Gua ve Riding, 1998; Ayaz ve Atalay, 2001; Ersoy, 2001; Atabey, 2002)

Ancak kalsiyum karbonat bileşimli kayaların jeoteknik özellikleri ve fiziko-mekanik özelliklerinin ilişkilendirilmesine yönelik çalışmalar son derece kısıtlıdır. Başarır vd. (2004), Alp vd. (2005), Singh vd. (2007) yapmış oldukları çalışmalarda kayaların fiziksel ve indeks özelliklerini, dayanım özellikleriyle ilişkilendirmişler genel olarak karbonat bileşimli kayaların dayanım özelliklerinin indeks özellikleriyle doğrusal ilişki gösterdiğini belirlemişlerdir.

Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki toplam 10 adet traverten yatağının işletilebilir rezervi yaklaşık 600000 m³'dür. Bahçecik travertenleri (Gümüşhane) ise 400000 m³ rezervle bölgedeki en büyük traverten sahasıdır (Şekil 1). Bölgedeki toplam traverten rezervinin yarısından fazlasına sahip olduğu için, bu çalışmada Bahçecik travertenlerinin (Gümüşhane) oluşum ortamı, kökeni araştırılmış, travertenlerin fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiş, deney sonuçlarından yararlanılarak indeks ve dayanım özellikleri arasında doğrusal bir ilişkinin olup olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 1. Doğu Karadeniz Bölümü'ndeki travertenler sahaları ve çalışma alanının konumu
Figure 1. Travertine deposits in the eastern Black Sea Region and location of study area

GENELJEOLJİ

Çalışma alanı ve çevresinde Dogger-Malm yaşlı Berdiga Formasyonu, Üst Kretase yaşlı Kermutdere Formasyonu, Eosen yaşlı Alibaba Formasyonu, Kuvaterner yaşlı travertenler ve alüvyonlar yer almaktadır (Şekil 2 ve 3)

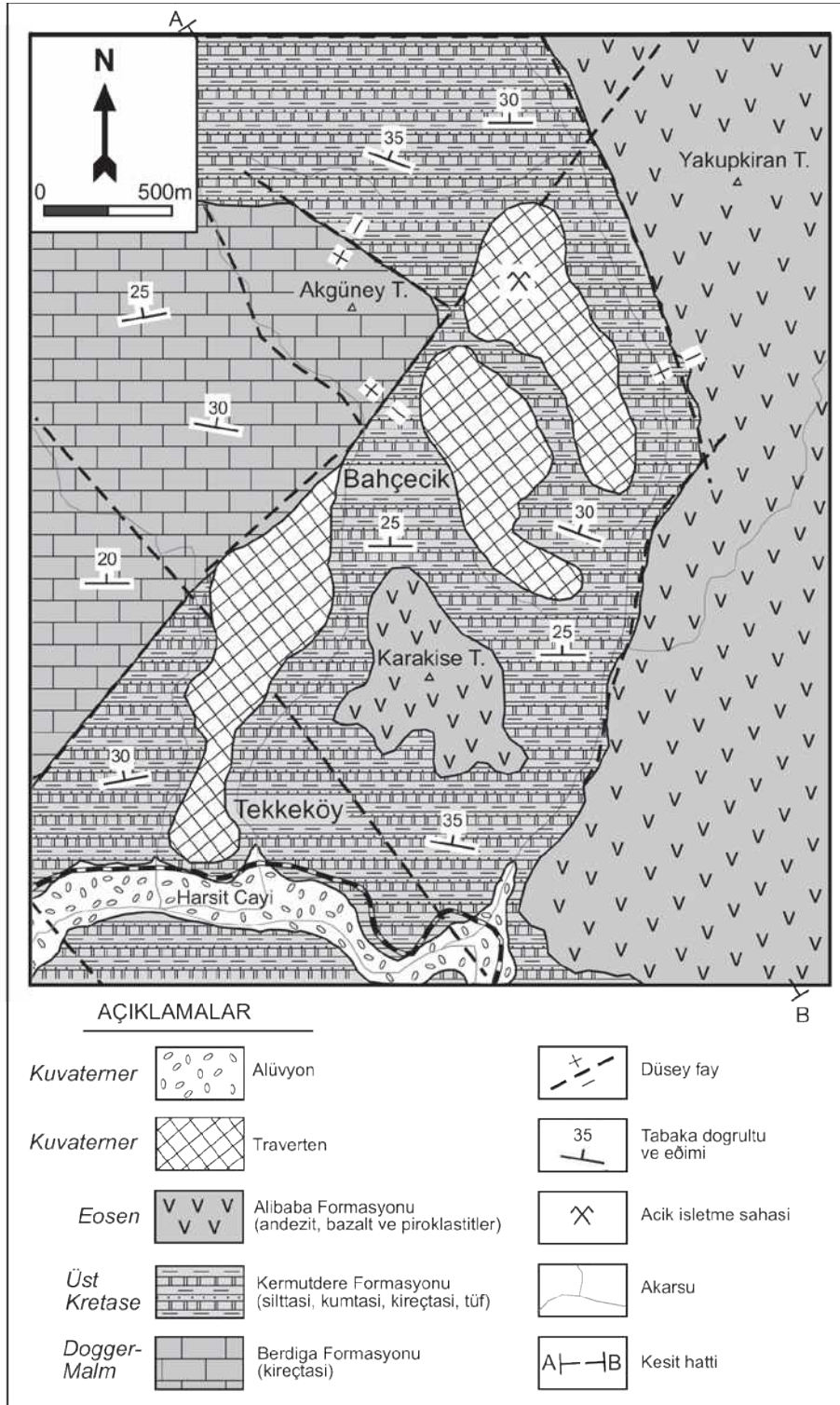
Pelin (1977) tarafından tanımlanan Dogger-Malm yaşlı Berdiga Formasyonu Akgüney Tepesi çevresinde geniş yayılımlar göstermekte ve dolomitik kireçtaşı ve kristalize kireçtaşlarından oluşmaktadır. Birim, yanal ve düşey yönde değişik litofasiyeler sunan platform karbonatlarından oluşmaktadır. Genel olarak gri, grimsi beyaz renklerde olup, yoğun çatlaklı, masif olması (yer yer tabakalı) ve sarp kayalıklar şeklinde gözlenmesi ile çevre birimlerden kolaylıkla ayırt edilebilmektedir.

Tokel (1972) tarafından tanımlanan Üst Kretase yaşlı Kermutdere Formasyonu, Dogger-Malm yaşlı Berdiga Formasyonu üzerinde uyumlu olarak bulunmaktadır. Çalışma alanında özellikle Bahçecik ve Tekkeköy çevresinde geniş yayılımlar gösteren birimin en alt kesiminde kumtaşları ve kumlu kireçtaşları bulunmaktadır. Çoğunlukla kırılğan bir yapı gösteren ve koyu gri, gri renkli kumtaşları ve kireçtaşları üst

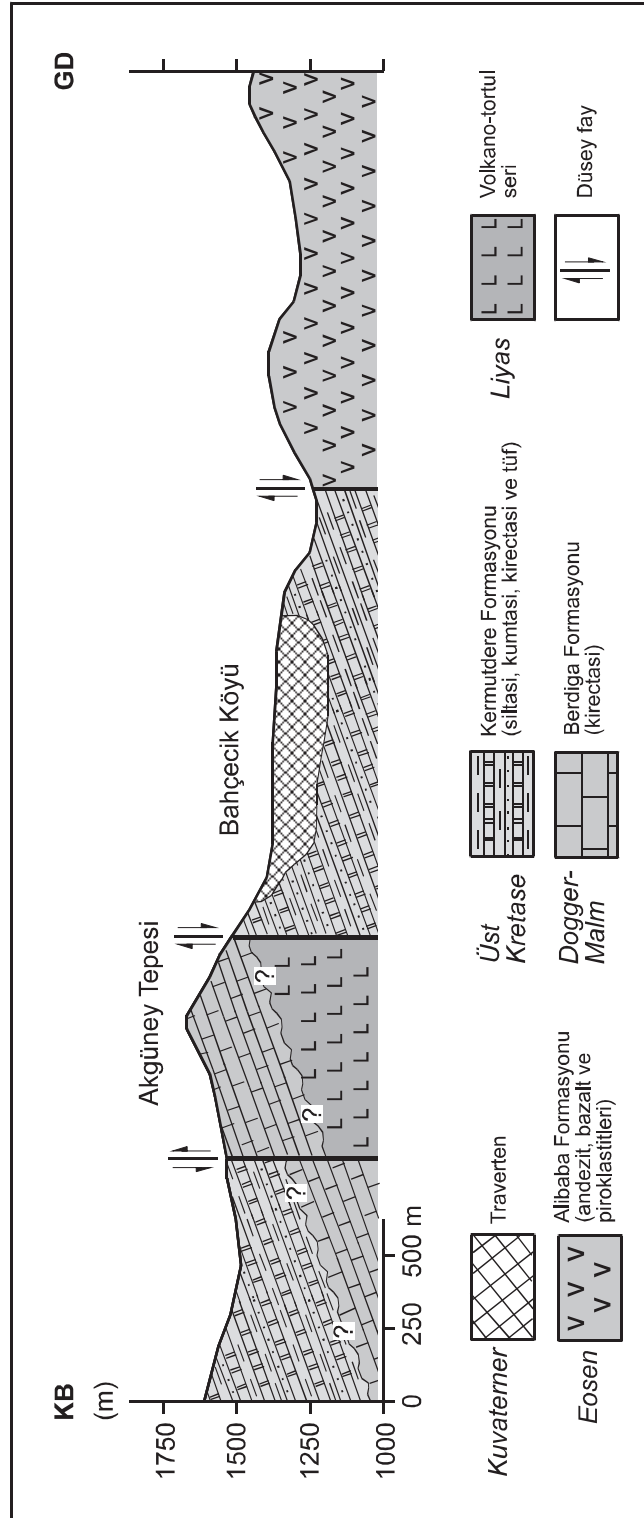
kesimlere doğru daha açık renkli silttaşları ve killi kireçtaşlarına geçmektedir. Açık gri, bej renkli siltli kireçtaşları ile silttaşları ardışıklı bulunmaktadır. Bu kayalar, formasyonun taban kesiminde bulunan kayalara nazaran daha kırılğan özelliktedir. Bunlar üzerine kırmızı renkli kireçtaşları ara seviyeler halinde gelmektedir.

Tokel (1972) tarafından tanımlanan Eosen yaşlı Alibaba Formasyonu, Üst Kretase yaşlı Kermutdere Formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. Yakupkıran Tepesi'nin güney kesimlerinde geniş yayılımlar gösteren birim, bazalt, andezit ve piroklastitlerden oluşmaktadır. Birim içindeki tüfler volkanik breşlerle ardalı olarak bulunmaktadır. Formasyon volkano-tortul birimlerden sonra kuzeye doğru andezitlere ve tüfit ara katkılı piroklastitlere geçiş göstermektedir.

İnceleme alanında, birçok alanda gerek oluşumu sona ermiş, gerekse de güncel oluşumu devam eden travertenler bulunmaktadır. Bahçecik çevresinde (Şekil 3a) geniş yayılımlar sunan beyazımsı gri renkli, nispeten az boşluklu ve sert bir yapı gösteren travertenlerin kalınlıkları 8-10 metre arasındadır (Arslan vd., 2005).



Şekil 2. Çalışma alanına ait jeoloji haritası (Güven, 1993'den değiştirilerek)
Figure 2. General geological map of study area (Modified from Güven, 1993)



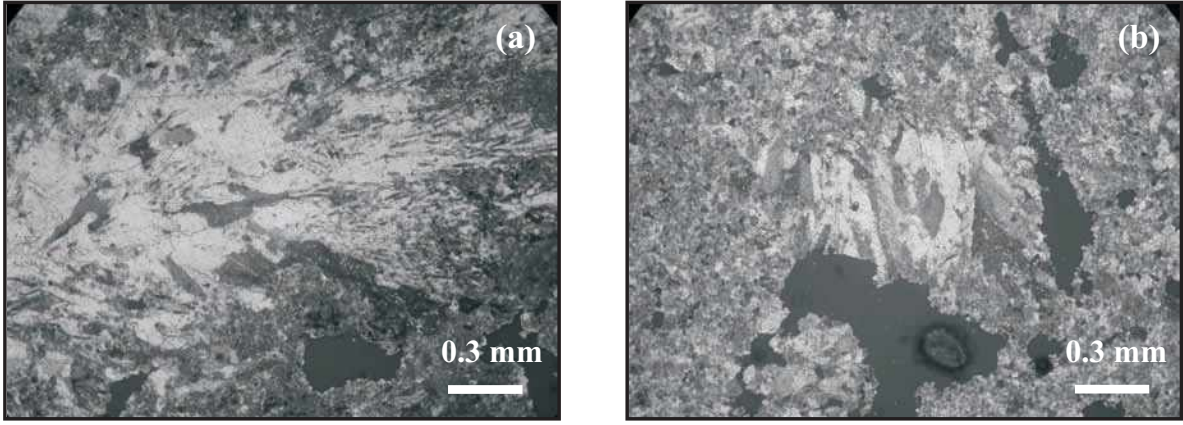
Şekil 3. Çalışma alanına ait jeolojik kesit
Figure 3. Geological cross section of study area

PETROGRAFİK ÖZELLİKLER

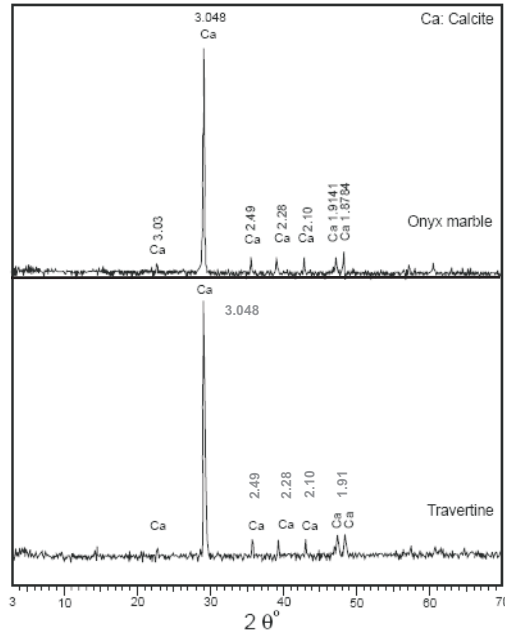
Çalışmada travertenlerin petrografik özelliklerini belirlemek için örneklere ait ince kesitler James Swift (Model MP3500MBL) marka polarize mikroskopta incelenmiş, XRD incelemeleri Rigaku marka DMAX IIIC model X ışınları difraktometreleri kullanılarak yapılmıştır. İncelemeler sonucunda, kayacın büyük çoğunluğunun kalsit kristallerinden oluştuğu ve

buna az oranda aragonitin eşlik ettiği görülmüştür. Kuvars ve kil mineralleri ise çok az miktarda bulunmaktadır. Bunun yanı sıra yer yer fosil veya bitki izlerine de rastlanılmıştır (Şekil 4). Kalsitler tek nikolde röliyef pleokroizması ve dilinimleriyle tipiktir.

Traverten örneklerine ait XRD incelemeleri sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Travertenlerin polarizon mikroskoptaki görünüşleri (a: tek nikol, b: çapraz nikol)
Figure 4. Microphotos of travertine samples (a: plane polarized light, b: cross polarized light)

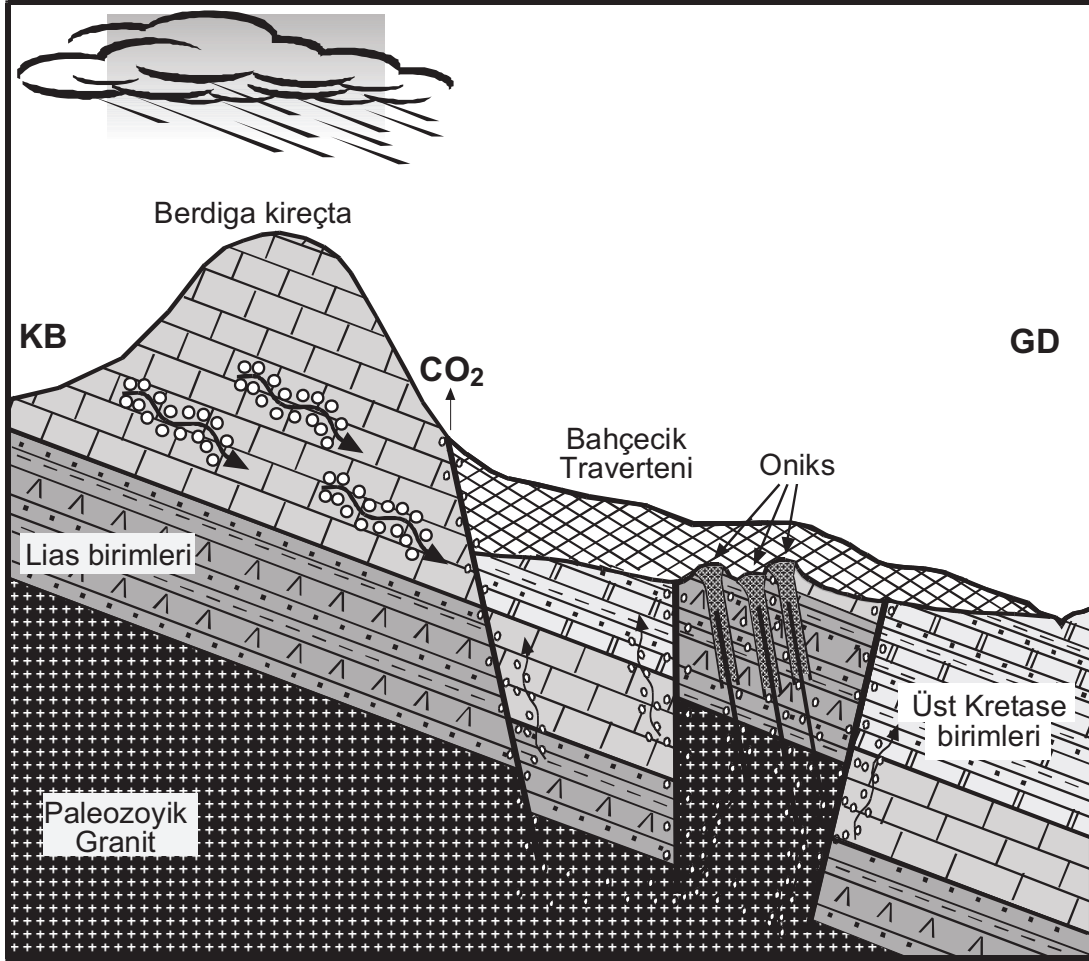


Şekil 5. Travertenlere ait XRD incelemeleri sonuçları (Arslan vd., 2005)
Figure 5. XRD patterns of travertine

MORFOLOJİK ÖZELLİKLER

Traverten yataklarında gözlenen morfolojik yapılar, teras (set) tipi travertenler, sırt (semer) tipi travertenler, dom (koni) tipi travertenler, tabaka tipi travertenler, damar tipi travertenler, fay önü travertenleri, kanal tipi travertenler ve mağara travertenleri (damlataşlar) şeklinde sekiz temel sınıfa ayrılırlar (Ayaz, 2002). Bahçecik traverteni ise yağışla yeraltına süzülen suların karbonik asitçe zenginleşmesi, yüksek falezler şeklinde yüzeylenme veren Bergida Formasyonu'na ait kireçtaşlarını

çözmesi ve bu çözeltilerin faylara bağlı olarak yüzeye çıkmasıyla beraber bünyelerindeki karbondioksit gazını bırakarak ortama kalsiyum karbonat çökeltmesi sonucunda oluşmuşlardır. Bahçecik travertenleri başlangıçta, az eğimli bir topoğrafya üzerinde akan suların, tabandaki çakıl veya blok birikintileri ile kaya çıkıntıları ya da akışa dik eksenli küçük tümseklerle karşılaşması sonucunda çökelen teras tipi travertenlerdir. Bahçecik travertenlerinin oluşumunu gösteren blok diyagram Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Çalışma alanındaki travertenlerin oluşum mekanizmasını gösteren blok diyagram (Arslan vd., 2005'den değiştirilerek)
Figure 6. Schematic model showing formation condition of Bahçecik travertine in the study area (Modified from Arslan et al., 2005)

JEOTEKNİK ÖZELLİKLER

Kayacın dokusu ve tane özelliği ile ilgili olarak kayaç malzemesini tanımlamaya yönelik özellikler, fiziksel özellikler olarak bilinmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2002). Bu çalışmada, travertenlerden alınan karot örneklerinin doğal su içeriği, yoğunluk, birim hacim ağırlık, porozite, boşluk oranı, ağırlıkça su emme, Schmidt çekici geri tepme sayısı gibi fiziksel ve indeks özellikleri belirlenmiştir. Deneylerde ISRM

(1981), ASTM (1992a ve b; 1994), CANMET (1997a ve b), TSE (1975, 1987 ve 1990) ve RILEM (1980) önerilen standartlardan yararlanılmıştır.

Bunun yanı sıra karot örnekleri üzerinde sonik hız ve tek eksenli basınç deneyleri ISRM (1981) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 1, 2 ve 3'te sunulmuştur.

Çizelge 1. Bahçecik travertenlerinin fiziksel özellikleri
Table 1. Physical properties of Bahçecik travertine

Örnek No	Porozite $n=V_b/V$ (%)	Boşluk Oranı $e=n/(100-n)$ (%)	Ağırlıkça Su Emme $A_w=((w_d-w_k)/w_k)*100$ (%)	Birim Hacim Ağırlık $\gamma = 9.81 \times r$ (KN/m ³)	Su İçeriği $w=(w-w_k)/w_k$ (%)
P-1	2,93	3,02	1,21	23,95	0,29
P-2	3,65	3,79	1,56	23,06	0,28
P-3	3,63	3,77	1,60	22,32	0,13
P-4	3,33	3,45	1,41	23,27	0,26
P-5	4,04	4,21	1,78	22,38	0,15
P-6	3,16	3,27	1,33	23,37	0,29
P-7	5,93	6,31	2,78	21,00	0,16
P-8	4,33	4,53	1,89	22,53	0,32
P-9	4,29	4,49	1,88	22,52	0,26
P-10	5,32	5,63	2,35	22,25	0,22
P-11	3,69	3,83	1,54	23,66	0,33
P-12	3,64	3,78	1,57	22,77	0,17
P-13	4,34	4,54	1,84	23,23	0,32
P-14	4,89	5,15	2,13	22,60	0,28
Ortalama değer	4,09	4,3	1,78	22,778	0,247
D-1	4,407	4,6	1,88	22,88	0,29
D-2	4,603	4,8	1,99	26,32	0,21
D-3	3,601	3,7	1,51	20,42	0,14
D-4	4,537	4,8	1,96	23,68	0,14
D-5	4,877	5,1	2,10	22,72	3,48
D-6	5,720	6,1	2,47	23,63	0,15
D-7	3,943	4,1	1,77	21,93	0,17
Ortalama değer	4,53	4,7	1,95	23,08	0,66

Not: P nolu örnekler su akış çizgisine paralel, D nolu örnekler ise dik doğrultuda alınmıştır.

Çizelge 2. Traverten örneklerine ait tek eksenli basınç direnci değerleri
Table 2. Uniaxial compressive strength of Bahçecik travertine samples

Örnek No	Tek eksenli basınç direnci (kg/cm ²)	Örnek No	Tek eksenli basınç direnci (kg/cm ²)
P -2	438,10	D -1	277,63
P -3	247,07	D -2	249,61
P -4	379,52	D -3	323,48
P -5	374,42	D -4	257,25
P -6	355,27	D -5	170,65
P -8	362,35	D -6	281,50
P -10	376,97	D -7	224,14
P -11	399,23		
P -12	374,42		
Ortalama	367,48	Ortalama	254,89
Ayrışmamış yüzeyler için ortalama Schmidt geri tepme Sayısı 54, ayrıışmış yüzeyler için 47'dir.			
Not: P nolu örnekler su akış çizgisine paralel, D nolu örnekler ise dik doğrultuda alınmıştır.			

Çizelge 3. Traverten örneklerine ait sonik hız değerleri
Table 3. Sonic velocity values of travertine samples

Karot No	Vp (kuru) (m/sn)	Vp (doygun) (m/sn)	Karot No	Vp (kuru) (m/sn)	Vp (doygun) (m/sn)
P -1	4597	5286	D -1	4749	5263
P -2	4693	5263	D -2	4220	4980
P -3	4100	5098	D -3	4942	4910
P -4	4710	5394	D -4	4193	4980
P -5	4304	5019	D -5	4448	5208
P -6	4529	5416	D -6	4304	5000
P -7	4452	5058	D -7	4237	5060
P -8	4676	5200			
P -9	4780	5263			
P -10	4529	5220			
P -11	4832	5349			
P -12	4498	5138			
P -13	4580	5172			
P -14	4642	5284			
Ortalama	4566	5226	Ortalama	4442	5057
Not: P nolu örnekler su akış çizgisine paralel, D nolu örnekler ise dik doğrultuda alınmıştır.					

Doğal taşların kullanım alanlarının ve kullanım alanına göre uygun olup olmadıklarının belirlenmesinde bozunma durumlarının bilinmesi yapı ve kaplama taşı olarak kullanımlarında önemli rol oynamaktadır. Kayaçların dayanımın tahmin edilmesi ve kayaçların bozunma derecesinin belirlenmesi amacıyla Schmidt çekici geri tepme sayısından yararlanılmaktadır. Bozunma indeksi Gökçeoğlu (1997) tarafından önerilen aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$W_c = R_f / R_w \quad (1)$$

Burada, R_f : taze yüzeyin Schmidt geri tepme sayısı, R_w : bozunma sınıflaması yapılan süreksizlik yüzeyinin Schmidt geri tepme sayısıdır.

Bu formüle göre travertenlerin bozunma indeksi 1.149 olarak hesaplanmıştır. Bu değere göre Bahçecik travertenleri, ISRM (1981)

tanımlama ölçütlerine göre "çok az bozunmuş-bozunmamış kayaç" sınıfında yer almaktadır.

Çalışmada fiziko-mekanik deneyler sonucunda elde edilen verilerle sismik hızlar arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı test edilmiştir (Şekil 7). Örneklerin tek eksenli basınç dirençleriyle sonik hızları arasında anlamlı doğrusal bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Buna karşın sonik hızlarla fiziksel özellikler arasında bir ilişkinin olmadığı tespit edilmiştir.

Tek eksenli basınç direnci-sonik hız verilerine ait regresyon eşitlikleri ve regresyon katsayısı değerleri aşağıda verilmiştir.

Su akış çizgisine dik alınan örnekler için:

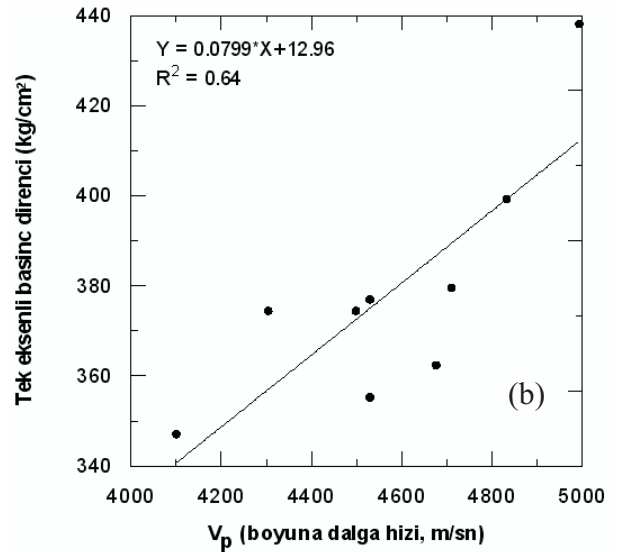
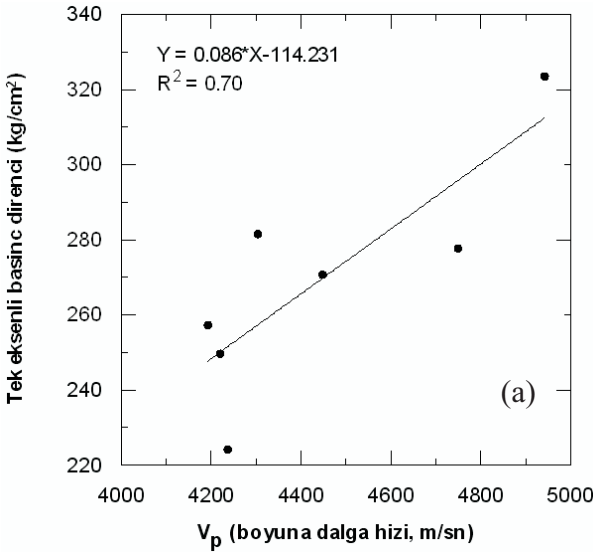
$$Y = 0.086 X - 114.231$$

$$R^2 = 0.70 \text{ ve } R = 0.84$$

Su akış çizgisine paralel alınan örnekler için:

$$Y = 0.0799 X + 12.96$$

$$R^2 = 0.64 \text{ ve } R = 0.80$$



Şekil 7. Traverten örneklerine ait sonik hız değerleriyle tek eksenli basınç direnci değerleri arasındaki lineer ilişki (a: su akım yönüne dik alınan örnekler, b: su akım yönüne paralel alınan örnekler)

Figure 7. Linear correlation between uniaxial compressive strength and sonic velocity test results (a: samples with perpendicular to water flow direction, b: samples with water flow direction)

Stuyfzand Hidrojeokimyasal Modelleme Sistemi: Gümüşhacıköy (Amasya) Akiferi Örneği***Stuyfzand Hydrogeochemical Modeling System: A case Study of Gümüşhacıköy (Amasya) aquifer*****Arzu FIRAT ERSOY**

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon.

Hakan ERSOY

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon.

Makale Geliş Tarihi: 2 Şubat 2008, Kabul Tarihi : 2 Mayıs 2008

Received: 2 February 2008, Accepted: 2 May 2008

Öz

Doğada, su tiplerini belirlemek amacıyla geliştirilen yaklaşık 10 farklı sınıflama sistemi bulunmaktadır. Mevcut sınıflama sistemlerinin bir kombinasyonu olan Stuyfzand Sınıflama Sistemi, yeraltısuyu ortamının hidrojeokimyasal gelişimini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, Merzifon-Gümüşhacıköy Havzası sınırları içerisinde yer alan Gümüşhacıköy Akiferi'nin hidrojeokimyasal evrimini belirlemek amacıyla akiferde bulunan toplam 79 sondaj kuyusunda yapılan su kimyası analiz sonuçları değerlendirilmiş ve yeraltısuyu kimyasal gelişimi ortaya konmuştur. Akiferde yapılan yeraltısuyu örnekleme 1951-1972 yılları arasında kapsayan 37 örnek ve 2003-2004 yıllarını kapsayan 49 örnekte olmaktadır. Çalışmanın sonucunda her iki örnekleme sonucunda geliştirilen hidrojeokimyasal model, Stuyfzand Sınıflama Sistemi'ne göre karşılaştırılarak yeraltısuyunun karakteristikleri ve hidrojeokimyasal gelişimi belirlenmiştir. Buna göre akiferde yıkanma NaHCO_3 'dan MgHCO_3 'ya doğru devam etmektedir. Gümüşhacıköy Akiferi'nin güney ve güneybatı kesimleri 1951-1972 yılları analiz sonuçlarına göre CaHCO_3 su tipinden oluşurken 2003-2004 yılları analiz sonuçlarına göre CaHCO_3 su tipindedir. Bir başka deyişle, ikinci analiz sonuçları yıkanma işleminin devam ettiğini göstermektedir. Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nde açıklanan yıkanma işleminin Gümüşhacıköy Akiferi'nde batıdan doğuya doğru devam ettiği ve yeraltısuyu bileşiminin CaHCO_3 su tipine doğru değiştiği belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Stuyfzand Sınıflama Sistemi, Hidrojeokimya, Gümüşhacıköy Akiferi.**Abstract**

Approximately 10 different systems of classification of natural water types were developed. Stuyfzand Classification System combines some features of existing classifications with new, strongly diagnostic criteria for subdivision. And this classification plays very important role for determination of hydrogeochemical evolution of groundwater plain.

In this study hydrochemical evolution of Gümüşhacıköy Plain was determined using Stuyfzand Classification System and totally 79 well water; 37 well water analyze results between 1951 and 1972, and 49 well water analyze results between 2003 and 2004, were compared with each other considering

this classification system. According to this classification system, the sequence concludes that freshening is going on from NaHCO_3^+ to MgHCO_3^+ . The south and southwest of the plain is formed CaHCO_3 water type according to the first analyses results but CaHCO_3^+ water type dominates the consequence of freshening to the second analyses results. Typical freshening is going on from west to east in time and the composition of the groundwater is turned into CaHCO_3^+ water type.

Keywords: *Stuyfzand Classification System, Hydrogeochemistry, Gümüşhacıköy Aquifer.*

GİRİŞ

Yeraltısuyu sınıflama sistemleri kaynak yönetiminde yaygın bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu sistemden geniş ölçekte birçok farklı amaç için de yararlanılmaktadır. Yeraltısularının sınıflama modeli ile ilgili takip edilen bir sistem yoktur ve bu nedenle sınıflama sistemleri kaynakların teknik özelliklerini karakterize etmek veya amaç ve ihtiyaçları belirlemek amacıyla geliştirilmiştir (Kreye ve diğ., 1998).

Sınıflama sisteminin geliştirilmesinde birçok faktör göz önünde bulundurulmak zorundadır. Sınıflama sistemi etkili ve çalışan kuyular için avantajlı olmalı, bunun yanı sıra su kimyası veri seti yeni bir kuyu ve örnekleme programı gerektirmeyecek şekilde yeterli olmalıdır. Teknik düzeyde, hidrojeolojide geniş ölçekte fonksiyonel olmak zorundadır (Kreye ve diğ., 1998).

Sınıflamanın en önemli amaçlarından bir tanesi akiferin hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi ve akifere ait hidrojeokimyasal sınırların çizilebilmesidir. Sınıflama var olan bilgilere dayandırıldığında, akifer sınırları kabul edilebilir koşullar (yeterli bilginin olması durumunda) ile genel yaklaşımlar (yeterli bilginin olmaması durumunda) arasında bulunmaktadır (Kreye ve diğ., 1998).

Sürekli yeraltısuyu kalitesi araştırmalarının amacı, yeraltısuyunun geçmişteki kalitesinin açık bir şekilde ortaya konması ve günümüzdeki özellikleri ile karşılaştırma imkanının bulunmasıdır (Nieto ve diğ., 2005).

Yeraltısuyu sınıflama sisteminin Gümüşhacıköy Akiferi'nde uygulanması, yeraltısuyunun özellikleri hakkında temel bilgilerin elde edilmesi ve yeraltısuyunu işletme stratejisinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Gümüşhacıköy Akiferi'nde yeraltısuyu tarımsal sulamada ve endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yeraltısuyuna olan gereksinimin her geçen gün artması ile onu korumak ve planlı bir işletim yönetimi oluşturmak ovada kaçınılmaz hale gelmiştir. Çünkü yerel ve bölgesel ölçekli akifer sistemlerinde meydana gelen su kalitesi problemleri günümüzde oldukça önemli bir sorun haline dönüşmüştür. Bu nedenle daha etkili bir yeraltısuyu işletim programı belirlemek için yeraltısuyuna ait verilerin elde edilmesi ve etkili karar verme tekniği uygulanması gerekmektedir. Günümüzde oldukça sınırlı hale gelen su kaynaklarını detaylı bir şekilde tanımlamak ve farklı akifer tiplerini ortaya koymak için sınıflandırma sistemleri ülkemizde kullanılmaya başlamıştır. Sistemin en önemli amaçlarından bir tanesi; akiferin haritalanması, yönetim, koruma ve iyileştirme yöntemlerinin belirlenmesidir. Yeraltısuyu sınıflama sistemi ile akifer gelişimi açısından farklı evreler ayrılabilenekte, varsa yeraltısuyu kirlilik aşamaları belirlenebilmekte ve akifer hidrojeolojik açıdan ve su kullanımı açısından tanımlanabilmektedir.

MATERYAL VE METOT

Gümüşhacıköy Akiferi'nde 2007 yılı itibarı ile tarımda sulama, içme ve kullanma suyu olarak kullanılmak üzere açılmış olan toplam 167 adet sondaj kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyu sularının 37 adedinde 1951-1972 yılları arasında Devlet Su İşleri tarafından kimyasal analizler yapılmıştır. Bu çalışmada Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nin uygulanmasında 1. aşamada bu ilk analiz sonuçları kullanılmıştır. Daha sonra 2003-2004 yılları arasında analizlerin bu makalenin yazarları tarafından yenilenmesi önerilmiş ve 49 adet kuyuda kimyasal analizler tekrarlanmıştır. 2003-2004 yılları arasında yürütülen örnekleme çalışmaları sırasında sondaj kuyularına ait su örnekleri 1000 ml'lik polietilen şişelerde pH değeri 2'ye düşürülecek şekilde alınmıştır. Su örneklerine ait kimyasal analizler Devlet Su İşleri VII. Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü'nde yaptırılmıştır. Su örneklerinin sıcaklık arazide, pH ve Elektriksel İletkenlik değeri ise laboratuvarında ölçülmüştür.

ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı Orta Karadeniz Bölümü içerisinde, Amasya İli'ne 35 km uzaklıkta ve Samsun İli'nin 100 km güneybatısında bulunmaktadır. Havzanın beslenme alanı 1/100.000 ölçekli Çorum G34 ve Çorum G35 paftaları içerisinde yer almakta ve 1060.44 km²'lik bir havza alanını kapsamaktadır. Havzanın batısında yer alan Gümüşhacıköy İlçesi ve çevresindeki serbest ve basınçlı akiferden oluşan saha Gümüşhacıköy Akiferi, havzanın doğusunda yer alan Merzifon ilçesi ve yakın çevresindeki serbest akifer ise Merzifon Akiferi olarak isimlendirilmiştir. Merzifon Akiferi 40.43 km² Gümüşhacıköy Akiferi ise 300.225 km²'lik bir alanda yayılım göstermektedir (Şekil 1).

Havzada sürekli akış gösteren en önemli akarsu, akiferi batıdan doğuya doğru kat eden Gümüşsuyu Deresi'dir. Gümüşsuyu

Deresi'nin mevsimlik akış gösteren Köşeler Deresi ve İmirler Deresi olmak üzere iki ana kolu bulunmaktadır.

Çalışma alanı iklim özellikleri açısından Karadeniz ile İç Anadolu iklim kuşağı geçiş bölgesinde yer almaktadır. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise soğuk ve yağışlı geçmektedir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından işletilen Merzifon Meteoroloji İstasyonu'na ait 40 yıllık rasatların ortalamasına göre; ortalama toplam yıllık yağış 417 mm, yıllık ortalama sıcaklık 11.33 C ve potansiyel buharlaşma 680 mm'dir (DSİ, 2005).

Gümüşhacıköy Akiferi'nde 2006 yılı itibarı ile toplam 167 adet sondaj kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyular Gümüşhacıköy Ovası'nda sulama suyu olarak, sanayi kuruluşlarında ve ovadaki yerleşim merkezlerinde içme ve kullanma suyu olarak kullanılmaktadır (Fırat Ersoy, 2007).

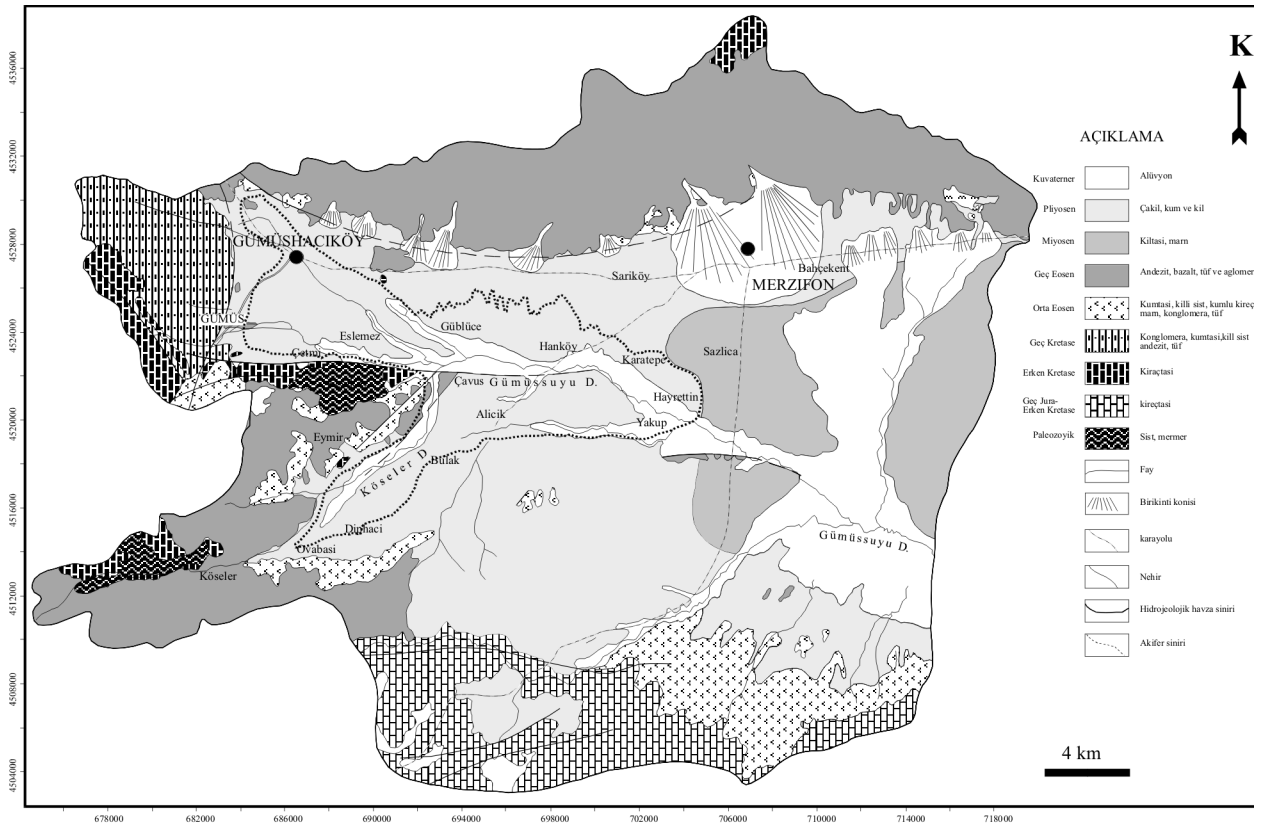


Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası
Figure 1. Location map of study area

JEOLJİ

Çalışma alanında yüzeylenen en yaşlı birim Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalardır. Metamorfik birimler, killi şist, klorit şist, yeşil şist, mermer ve rekristalize kireçtaşlarından oluşmaktadır. Metamorfik kayalar üzerine Geç Jura-Erken Kretase yaşlı kalın tabakalı, fosilli, oldukça sert ve çatlaklı kireçtaşlarından oluşan birim gelmektedir. Erken Kretase yaşlı pembe renkli, sert ve ince tabakalı kireçtaşları Jura kireçtaşının üzerinde bulunmaktadır. Erken Kretase yaşlı birimin üzerinde Geç Kretase yaşlı konglomera, marn arakatıklı ve fosilli kumtaşı, kireçtaşı, tuf ve aglomara arakatıklı andezitler bulunmaktadır. Çalışma alanında Orta Eosen

Döneminde konglomera, kumtaşı ve kireçtaşlarından oluşan birim meydana gelmiştir. Orta Eosen yaşlı birimin üzerinde Geç Eosen yaşlı andezit, tuf ve aglomeralar ile bunlarla arakatıklı kireçtaşı ve kumtaşı bulunmaktadır. Akiferde Miyosen dönemde ince katmanlı kiltası ve mavi renkli marnlar oluşmuştur. Miyosene ait bu birimin üzerinde Pliyosen yaşlı gevşek malzemeden oluşan kil, kum ve çakıl bulunmaktadır. Çalışma alanındaki en genç birim Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır. Altuğ ve Atalay (1974)'ten değiştirilerek hazırlanan Gümüşhacıköy Akiferi'ne ait jeoloji haritası Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası
Figure 2. Geological map of study area

HİDROJEOLOJİ

Merzifon-Gümüşhacıköy Havzası'nda yeraltısuyu taşıyan birimler, Kuvaterner yaşlı ve ayırık şekilde bulunan blok, çakıl, kum ve kil karışımından oluşan alüvyon ile Pliyosen yaşlı gevşek ve tutturulmamış özelliğe sahip çakıl, kum ve kil boyutunda malzemedan oluşan Söğütlü Formasyonu'dur. Gümüşhacıköy Akiferi'nde yeraltısuyu Kuvaterner yaşlı alüvyon ile Pliyosen yaşlı killi, kumlu ve çakıllı seviyelerde bulunmaktadır. Bu seviyeler yüksek iletkenlik ve depolama özelliğine sahip olduğu için yeraltısuyunun depolanması ve iletilmesi açısından önem taşımaktadır.

Gümüşhacıköy Akiferi'nin kuzey ve batı kesimlerinde Pliyo-Kuvaterner yaşlı gevşek yapılı malzemenin içerisinde geçirimsiz bir örtü tabakası bulunmadığı için akifer bu bölgede serbest akifer özelliğindedir. Ovanın doğusuna doğru gidildikçe Pliyo-Kuvaterner yaşlı malzemenin üzerinde geçirimsizliği çok düşük olan ve genellikle yüzeyden itibaren 210 m derinliğe ulaşan kil örtünün varlığı sondajlar ile belirlenmiştir. Bu kil tabakanın kalınlığı akiferin orta kesimlerinden doğuya doğru gidildikçe artmaktadır.

Gümüşhacıköy Akiferi'ni, İmirler Deresi, Köşeler Deresi, Alıcık Deresi ve mevsimlik akış gösteren yan derelerin çevre formasyonlardan getirdikleri blok, çakıl, kum, silt ve kil boyutlu gevşek yapılı malzemedan oluşmaktadır.

Gümüşhacıköy Akiferi'nde yeraltısuyu akım yönü İmirler Vadisi'nde kuzeybatıdan güneydoğuya doğru; Köşeler Vadisi'nde güneybatıdan kuzeydoğuya doğru ve Gümüşsuyu Vadisi'nde batıdan doğuya doğrudur (DSİ, 1973).

HİDROJEOKİMYA

Gümüşhacıköy Akiferi'nde hidrojeolojik amaçlı ilk çalışmalar Devlet Su İşleri tarafından 1951 yılında başlatılmıştır. Akiferde 2006 yılı itibarı ile 167 adet sondaj kuyusu bulunmaktadır.

Bu kuyulardan 154'ü ovada sulama ve sanayi tesislerinde kullanılmakta, 13'ü ise yerleşim yerlerinde içme suyu olarak kullanılmaktadır. 1951-1972 yılları arasında açılan kuyulardan 37 tanesine ait kimyasal analiz sonuçları değerlendirilerek Stuyfzand Sınıflama Sistemi oluşturulmuştur. Daha sonra 2001 yılında ovada revizyon çalışmaları başlamış ve akiferde yer alan 49 adet kuyuda Devlet Su İşleri VII. Bölge Müdürlüğü tarafından kimyasal analizler tekrar yaptırılmıştır. 2003-2004 yıllarında yaptırılan 49 adet kimyasal analiz sonucu kullanılarak Stuyfzand Sınıflama Sistemi tekrarlanmıştır. Her iki sınıflama sistemi birbiri ile karşılaştırılarak Gümüşhacıköy Akiferi'nin hidrojeokimyasal gelişim mekanizması belirlenmiştir. Çizelge'de Gümüşhacıköy Akiferi'nde yer alan kuyulara ait kimyasal analiz sonuçlarına göre su örneklerinin pH, Elektriksel İletkenlik (EC) ve Toplam Sertlik değerleri; Çizelge 2'de ise su örneklerinin majör anyon ve katyon değerleri yer almaktadır.

Çizelge 1. Su örneklerinin pH, EC ve Toplam Sertlik değerleri (2003-2004 yıllarına ait)

Table 1. pH, EC and total hardness value of the water samples (belong to 2003-2004 years)

	<u>22013</u>	<u>17156</u>	<u>53060</u>	<u>52990</u>	<u>53055</u>	<u>20099</u>	<u>22191</u>	<u>23</u>	<u>53806</u>	<u>20175</u>	<u>4</u>	<u>14581</u>	<u>14583</u>
Ph	6,9	8	7,9	8	7,3	7,2	6,9	7,4	7,2	7,6	7,4	7,4	7
EC (mikroS/cm)	724	729	601	546	596	617	979	723	659	509	638	587	1276
TS (°Fr)	36,75	23,25	26,5	22	28,75	29,5	47,25	31,25	28,5	22,5	30,75	28	57,75
	<u>14584</u>	<u>2</u>	<u>19308</u>	<u>28798</u>	<u>30714</u>	<u>52424</u>	<u>52425</u>	<u>22160</u>	<u>22163</u>	<u>20852</u>	<u>20850</u>	<u>53030</u>	<u>32</u>
Ph	7,1	6,8	6,9	7	9,9	8,7	7,9	8,2	8,2	8	8,2	7,7	7,4
EC (mikroS/cm)	915	646	745	646	551	653	1224	950	755	560	540	640	918
TS (°Fr)	38,75	30,75	35,5	31,5	2,5	20,9	35,55	32,75	29,15	21,9	19,35	25,4	41,2
	<u>33995</u>	<u>66</u>	<u>18743</u>	<u>50362</u>	<u>53054</u>	<u>52989</u>	<u>45472</u>	<u>57919</u>	<u>7216</u>	<u>47</u>	<u>25</u>	<u>39</u>	<u>100</u>
Ph	7,4	7,3	7,2	6,9	7	6,9	7,2	7	7,3	8,2	8,1	7,4	7,3
EC (mikroS/cm)	632	704	796	755	612	827	551	816	571	1122	714	694	643
TS (°Fr)	32,9	35,2	37,15	41,4	33,85	42,7	29,15	41,95	27,65	35,05	27,45	34,95	32,4
	<u>101</u>	<u>102</u>	<u>103</u>	<u>27</u>	<u>64</u>	<u>28</u>	<u>14</u>	<u>16</u>	<u>5</u>	<u>17</u>			
Ph	7,2	7,4	7,1	7,4	7,5	7,1	6,9	7,3	7,1	7,3			
EC (mikroS/cm)	665	620	714		598	612	673	476	683	479			
TS (°Fr)	34,95	32,45	38,95	37,45	32,4	33,9	36,65	24,9	37,15	25,1			

(mg/l)	22013	17156	53060	52990	53055	20099	22191	23	53806	20175	4	14581	14583
Ca ¹²	91,2	58,1	69,1	58,1	77,2	82,2	133,3	79,2	73,1	63,1	83,2	84,2	147,3
Mg ²	34	21,3	22,5	18,2	23,1	21,9	34	28	24,9	16,4	24,3	17	51,1
Na	29,9	69,9	29,9	26,91	16,1	17,04	28,98	34,96	28,98	23	11,96	14,03	42,09
K ⁺	1,95	2,34	1,56	1,56	0,78	1,56	3,12	1,56	1,17	1,17	1,56	1,17	5,07
HCO ₃ ⁻	373	247,5	225	320	245	245	385	270	275	220	282,5	220	445
Cl ⁻	11,4	19,9	21,3	15,6	19,9	12,8	44	9,9	18,5	11,4	9,94	9,9	60,4
SO ₄ ²⁻	109,4	107,5	73,9	39,4	48,5	68,2	88,8	102,2	46,6	38,9	37,4	74,9	139,7
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,15	0,05	0,4	0,05
NO ₂ ⁻	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO ₃ ⁻	4,63	3,03	5,36	2,93	5,07	4,96	1,313	5,54	3,23	5,17	2,62	5,88	15,61

(mg/l)	14584	2	19308	28798	30714	52424	52425	22160	22163	20852	20850	53030	32
Ca ¹²	89,2	92,8	104,2	88,2	4	36	57	50	75	54	47	55	100
Mg ²⁺	40,1	19,5	23,1	23,1	3,6	28,6	51,1	48,6	24,9	20,1	18,2	28	38,9
Na	42,09	13,11	19,09	11,04	106,3	59,11	126,04	69,92	41,86	29,9	37,3	31,05	49,91
K ⁺	3,12	6,24	2,34	6,63	0,78	1,95	3,51	1,17	1,95	1,56	3,51	1,95	1,56
HCO ₃ ⁻	320	275	297,5	307,5	21,5	275	340	352,5	257,5	245	250	227,5	337,5
Cl ⁻	32,7	12,8	21,3	11,4	18,5	14,2	35,5	48,3	15,6	18,5	14,2	11,4	14,2
SO ₄ ²⁻	112,3	49	69,2	23	14,9	41,8	231,4	55,7	99,8	13	7,2	75,8	156,5
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	0,3	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,2	0,05
NO ₂ ⁻	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,004	0,004	0	0	0	0
NO ₃ ⁻	10,69	4,05	7,74	3,85	0	0,1	7,3	6,75	3,35	3,05	3,35	3,4	4,55

(mg/l)	<u>33995</u>	<u>66</u>	<u>18743</u>	<u>50362</u>	<u>53054</u>	<u>52989</u>	<u>45472</u>	<u>57919</u>	<u>7216</u>	<u>47</u>	<u>25</u>	<u>39</u>	<u>100</u>
Ca ¹²	86	78	97	112	104	110	84	89	73	55	48	81	77
Mg ²⁺	27,4	37,7	31	32,2	18,8	36,5	19,5	41,3	22,5	51,1	37,1	35,3	31,6
Na	17,94	23,92	41,86	23	13,11	39,1	13,11	22,08	17,94	101,89	49,91	23,92	28,98
K ⁺	1,56	1,95	1,95	1,17	0,78	1,17	1,17	1,95	1,17	1,95	1,95	2,73	5,46
HCO ₃ ⁻	307,5	345	302,5	377,5	257,5	310	232,5	325	235	385	250	320	375
Cl ⁻	11,4	9,9	14,2	7,1	18,5	17	24,1	15,6	25,6	53,3	21,3	9,9	9,9
SO ₄ ²⁻	43,2	43,7	135,4	73,4	80,2	170,4	51,4	116,2	42,7	107	99,4	66,2	3,4
NH ₄ ⁺	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0,05	0,5	0,05	0,2	0
NO ₂ ⁻	0	0	0,03	0,001	0,002	0	0	0	0,002	0	0,002	0	0
NO ₃ ⁻	2,7	4,75	6,7	4,95	9,3	6,25	9	8	7,35	6,35	4,65	1,8	1,05

(mg/l)	101	102	103	27	64	28	14	16	5	17			
Ca ¹²	71	62	93	88	80	90	101	64	92	73			
Mg ¹²	41,3	40,7	37,7	37,1	29,8	27,4	27,4	21,3	34	16,4			
Na	14,95	13,1	19,09	11,96	13,11	14,03	23	14,03	16,1	13,11			
K ⁺	5,07	5,46	3,12	0,78	1,17	1,56	0,78	0,78	1,17	0,78			
HCO ₃ ⁻	372,5	340	400	372,5	337,5	310	307,5	195	320	225			
Cl ⁻	7,1	8,5	8,5	7,1	8,5	21,3	11,4	8,5	8,5	11,4			
SO ₄ ²⁻	3,8	5,8	20,2	16,3	2,9	28,8	88,8	69,1	71,5	37			
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	0,1	0	0,1	0,05	0	0			
NO ₂ ⁻	0	0	0	0	0	0,004	0,001	0,001	0	0,001			
NO ₃ ⁻	0,95	3,25	0,05	2,3	0,65	2,3	5,9	4	5,5	5,1			

Çizelge 2. Su örneklerinin kimyasal analiz sonuçları (2003-2004 yıllarına ait)
Table 2. Chemical analyze results of the water samples (belong to 2003-2004 years)

STUYFZAND SINIFLAMA SİSTEMİ

Stuyfzand (1986), mevcut sınıflama sistemlerinin özelliklerini birleştirerek akifer sistemlerine uygulanan hidrojeokimyasal sınıflama sistemi geliştirmiştir. Stuyfzand Sınıflama Sistemi, bir akiferdeki farklı su tiplerinin belirlenmesi esasına dayanmakta ve yeraltısuyundaki katyon değişim prensibinin ortaya konması açısından önem taşımaktadır. Bu yöntem Stuyfzand tarafından ilk kez 1985 yılında kıyılardaki akiferlerde tatlı su-tuzlu su girişimi nedeniyle katyon değişiminin meydana geldiği akifer sistemleri için geliştirilmiştir. Daha sonra 1986 yılında Stuyfzand bu sınıflama sistemini tüm akifer sistemlerine uygulanabilir duruma getirmiştir.

Bir akifer sisteminde su tipinin belirlenmesi, su örneğinin başlıca ana tür, tür, alt tür ve sınıf bileşenlerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nde 6 ana tür, 11 tür, 16 alt tür ve 3 sınıf bulunmakta ve su türlerinin farklı kombinasyonları ile 3168 tür tanımlanabilmektedir. Doğada bu su tiplerinin birçoğu bulunmamasına rağmen yine de karmaşık durumlarda ortaya çıkan su tipi sayısı gereksiz bir şekilde yüksek olmaktadır. Bu durumda karışıklığı önlemek için birçok su tipi birleştirilerek kullanılmaktadır. Çizelge 3'te bir su örneğinin ana tür, tür, alt tür ve sınıf bileşenleri

açısından gruplandırılması verilmektedir. Stuyfzand Sınıflama Sisteminde su örneğinin ana türü belirlenirken Cl⁻ içeriği dikkate alınmaktadır. Cl⁻ (mg/l) içeriğine sular F ile H arasında değişen farklı kodlarla tanımlanmakta ve tatlı tipteki sulardan süper tuzlu sulara kadar isimlendirilmektedir (Çizelge 4). Sınıflama sisteminde su örneğinin türü belirlenirken Toplam Sertlik değeri kullanılmaktadır. Su örneğinin sertlik değeri 5 ile 2560 (°F) arasında değişmekte ve suyun kodu X ile 9 arasında numaralandırılmaktadır. Buna göre sular çok yumuşak su ile aşırı sert su arasında tanımlanmaktadır (Çizelge 5). Stuyfzand Sistemi'nde suyun alt türü belirlenirken suda hakim olan anyon-katyon çifti dikkate alınmaktadır. Şekil 3'teki üçgen diyagramlar kullanılarak sudaki baskın anyon-katyon çifti belirlenmektedir. Sınıflama sisteminde suyun sınıfı katyon değişim kodu ile belirlenmektedir. Katyon değişim kodu hesaplanırken su örneğindeki (Na+K+Mg) için düzeltme yapılarak kodu belirlenmekte ve su örneği (Na+K+Mg)_{fa z l a}, (Na+K+Mg)_{e k s i k} ve (Na+K+Mg)_{d e n g e d e} olarak isimlendirilmektedir (Çizelge 6). Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nde yer alan 4 sınıflama kriterine isimlendirme yapıldıktan sonra bir su örneği için son isimlendirme Şekil 4'te görüldüğü gibi yapılmaktadır.

Çizelge 3. Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nin 4 alt bölümden oluşan genel tablosu
Table 3. The hierarchical structure of the classification system, with four levels of subdivision.

İsmlendirme	Alt Bölüm	Kriter	Kod
Ana tür	6	Cl ⁻	F, F _b , B, B _s , S, H
Tür	11	Toplam sertlik	x, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
Alt tür	16	Hakim anyon-katyon	NaCl, NaSO ₄ , NaHCO ₃ , NaMix, KNO ₃ , NH ₄ SO ₄ , CaCl, CaSO ₄ , CaNO ₃ , CaHCO ₃ , CaMix, MgCl, MgHCO ₃ , MgMix, AlSO ₄ , FeSO ₄
Sınıf	3	(Na+K+Mg) düzeltilmiş	-, φ, +

Çizelge 4. Cl⁻ içeriğine göre su tipinin belirlenmesi

Table 4. Determination of the first symbol for water type according to the Cl content.

Ana tür	Kod	Cl ⁻ (mg/l)
Tatlı	F	<150
Tatlı-Az tuzlu	F _b	150-300
Az tuzlu	B	300-1000
Az tuzlu-Tuzlu	B _s	1000-10.000
Tuzlu	S	10.000-20.000
Çok tuzlu	H	>20.000

Çizelge 5. Toplam sertlik değerine göre su tipinin belirlenmesi

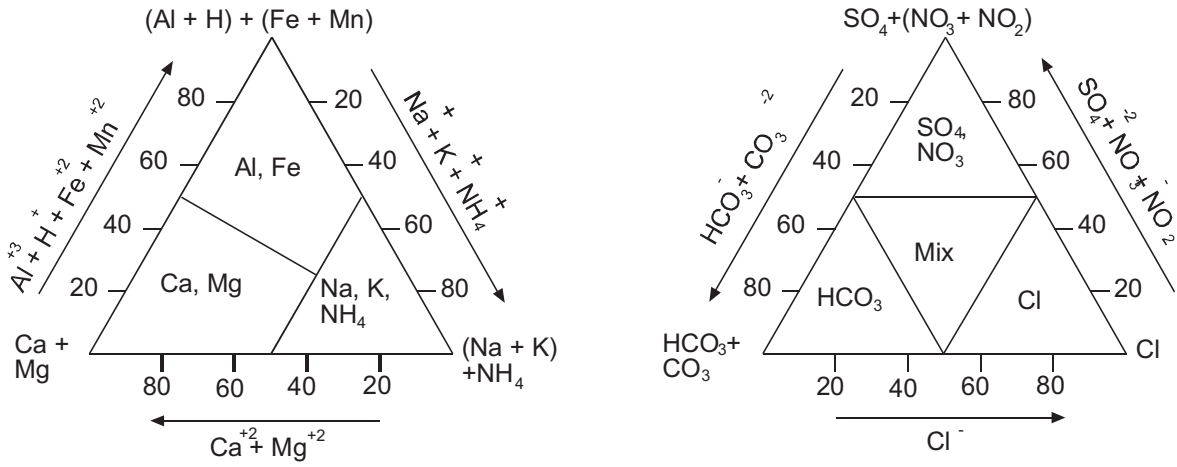
Table 5. Determination of the second symbol for water type according to the total hardness.

İsimlendirme	Kod	Toplam sertlik (°F)
Çok yumuşak	X	<5
Yumuşak	0	5-10
Kısmen sert	1	10-20
Sert	2	20-40
Çok sert	3	40-80
Çok fazla sert	4	80-160
Çok fazla sert	5	160-320
Çok fazla sert	6	320-640
Çok fazla sert	7	640-1280
Çok fazla sert	8	1280-2560
Çok fazla sert	9	>2560

Çizelge 6. Katyon değişim koduna göre su tipinin belirlenmesi

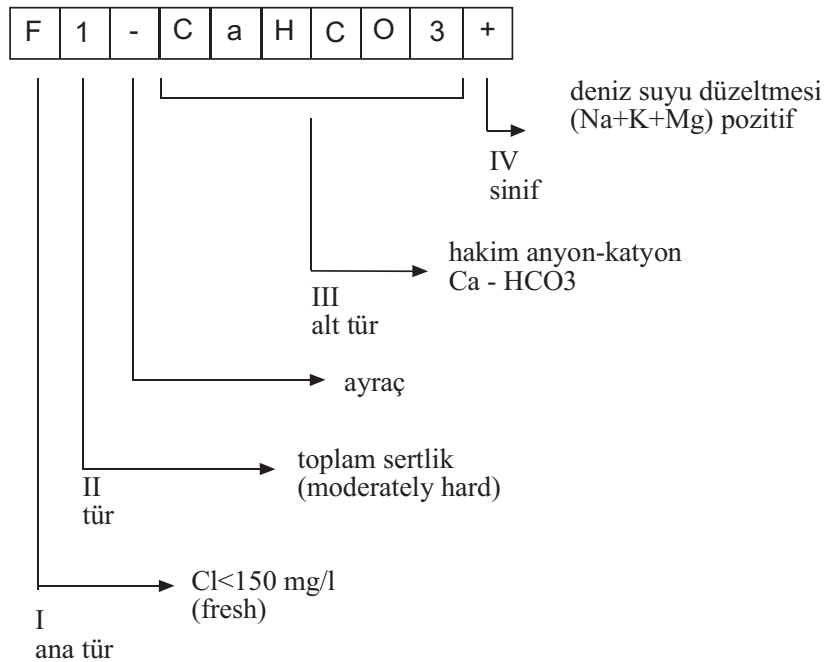
Table 6. Determination of cation exchange code

İsimlendirme	Kod	Açıklama
(Na+K+Mg)-eksik	-	$(Na+K+Mg)_{düzeltilmiş} < -(1/2 Cl)^{1/2}$
(Na+K+Mg)-dengede	φ	$-(1/2 Cl)^{1/2} \leq (Na+K+Mg)_{düzeltilmiş} \leq (1/2 Cl)^{1/2}$
(Na+K+Mg)-fazla	+	$(Na+K+Mg)_{düzeltilmiş} > (1/2 Cl)^{1/2}$



Şekil 3. Su örneğindeki hakim anyon-kasyon çiftinin belirlenmesi

Figure 3. Subdivision of types on the basis of the proportional share of main constituents in the sum of cations (left) and anions (right) in meq/l



Şekil 4. Su tipinin kodlanması ve isimlendirilmesi

Figure 4. Coding and explaining of a water type in 10 positions

STUYFZAND SINIFLAMA SİSTEMİ'NİN GÜMÜŞHACIKÖY AKİFERİ'NDE UYGULANMASI

1951-1972 Yılları Kimyasal Analizlerine Göre Yapılan Sınıflama

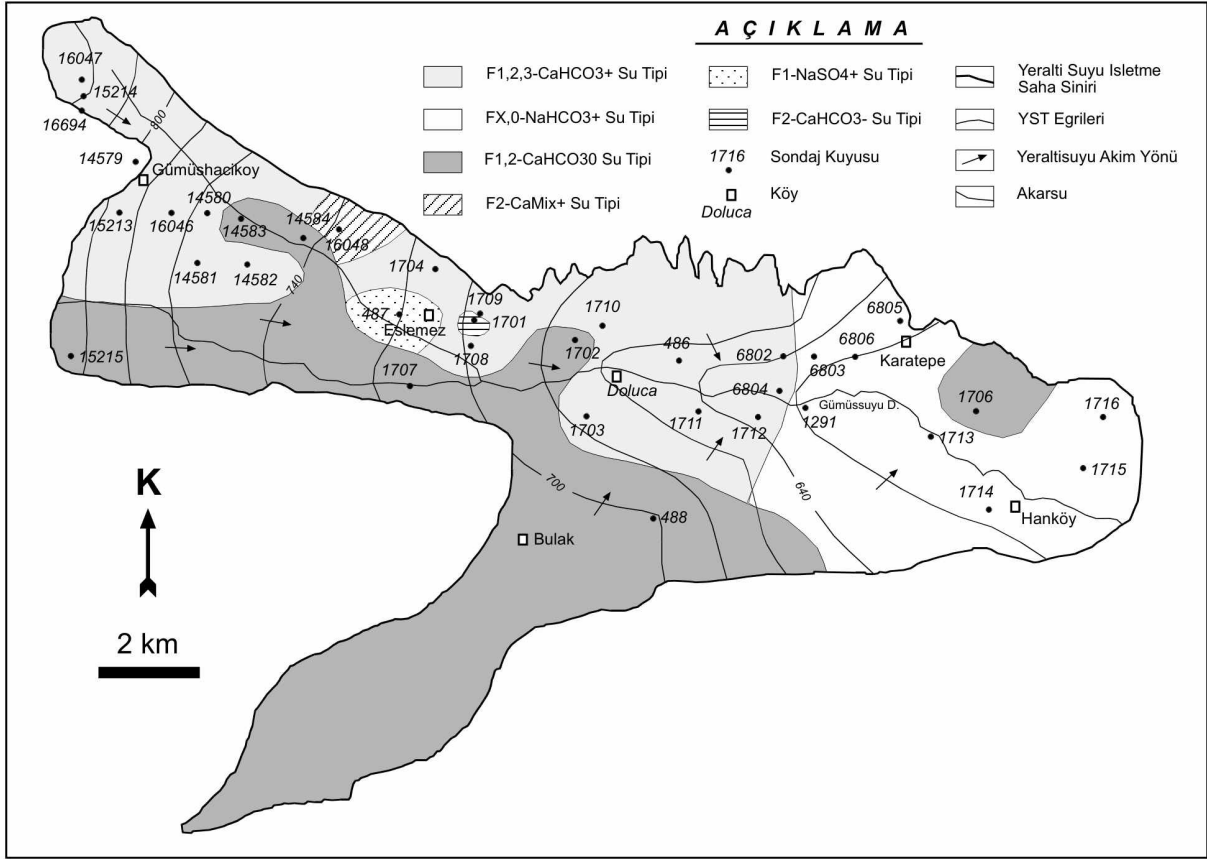
Gümüşhacıköy Akiferi'nde ilk hidrojeokimyasal örneklemeler 1951-1972 yılları arasını kapsayan ve aynı zamanda ovanın ilk hidrojeolojik bulgularını da içeren çalışmalar sırasında elde edilmiştir. Bu süre içerisinde akiferde yer alan kuyulardan 37 adedinde örnekleme yapılarak bu örneklere kimyasal analizler yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçlarında Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nin gerektirdiği parametreler kullanılarak ilk verilere göre sınıflama sistemi oluşturulmuştur. Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nde ilk sembol ile ifade edilen Cl⁻ içeriğine göre yeraltısuyunun “tatlı tip” su sınıfında olduğu diğer bir deyişle tüm örneklerin “F” karakteri ile tanımlandığı

belirlenmiştir. Sınıflamada 2. sembol olarak belirtilen Toplam Sertlik değerine akiferdeki yeraltısuyunun “yumuşak” ile “çok sert” arasında değişim gösterdiği ve sertlik değerlerinin “X” ile “3” arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Stuyfzand Sistemi'nde 3. sembol yeraltısuyundaki hakim anyon-katyon çiftine göre belirlenmektedir. Buna göre yeraltısuyundaki anyon-katyon çiftinin Şekil 3'teki üçgen diyagramların kullanılması ile CaHCO₃, NaHCO₃, Na-karışım, Ca-karışım ve NaSO₄, bileşiminde oldukları görülmektedir. Sınıflamada kullanılan 4. sembol olan katyon değişim kodunun belirlenmesi Çizelge 6 kullanılması ile yeraltısuyunun (Na+K+Mg)_{fazla}, (Na+K+Mg)_{eksik} ve (Na+K+Mg)_{dengede} olduğu belirlenmiştir. Sınıflama sisteminde kullanılan bu 4 bileşen bir araya getirilerek Gümüşhacıköy Akiferi için Stuyfzand Sınıflama Sistemi tablosu ve haritası elde edilmiştir (Çizelge 7, Şekil 5).

Çizelge 7. Gümüşhacıköy yeraltısuyunun 1951-1972 kimyasal analiz sonuçlarına göre hazırlanan Stuyfzand Sınıflama Sistemi tablosu

Table 7. Stuyfzand classification system of Gümüşhacıköy well waters according to 1951-1972 analyses results

Kuyu no	Su sınıfı	Kuyu no	Su sınıfı
486	F2-CaHCO ₃ +	6802	F1-CaHCO ₃ +
487	F1- NaSO ₄ +	6803	F0-NaHCO ₃ +
488	F2- CaHCO ₃ φ	6804	F1-CaHCO ₃ +
1291	F1-NaHCO ₃ +	6805	F0-NaHCO ₃ +
1701	F2-CaHCO ₃ -	6806	F0-NaHCO ₃ +
1702	F1-CaHCO ₃ φ	14579	F2-CaHCO ₃ +
1703	F1-CaHCO ₃ +	14580	F1-CaHCO ₃ +
1704	F2-CaHCO ₃ +	14581	F2-CaHCO ₃ +
1706	F1-CaHCO ₃ φ	14582	F2-CaHCO ₃ +
1707	F1-CaHCO ₃ φ	14583	F2-CaHCO ₃ φ
1708	F1-CaHCO ₃ +	14584	F3-CaHCO ₃ φ
1709	F1-CaHCO ₃ +	15213	F2-CaHCO ₃ +
1710	F1-CaHCO ₃ +	15214	F2-CaHCO ₃ +
1711	F1-CaHCO ₃ +	15215	F2-CaHCO ₃ φ
1712	F1-CaHCO ₃ +	16046	F2-CaHCO ₃ +
1713	Fx-NaHCO ₃ +	16047	F2-CaHCO ₃ +
1714	Fx-NaHCO ₃ +	16048	F2-CaMix+
1715	F0-NaHCO ₃ +	16694	F1-CaHCO ₃ +
1716	Fx-NaHCO ₃ +		



Şekil 5. Gümüşhacıköy yeraltısuyunun 1951-1972 kimyasal analiz sonuçlarına göre hazırlanan Stuyfzand Sınıflama Sistemi haritası

Figure 5. Stuyfzand classification system map designed according to 1951-1972 water analyses results of Gümüşhacıköy groundwater

Tablo 7'de görüldüğü gibi akiferde birçok su sınıfı bulunmaktadır. Pratikte bu sınıflamada CaHCO₃⁺ ve CaHCO₃⁰ tipinde olan sular iki ayrı su tipi olarak ve toplam sertliği 1 ve 2 numaralı olan sular tek su tipi olarak düşünülebilir. NaHCO₃⁺ tipindeki sulara ise X ve 0 sertlik su sınıfları bir sınıf olarak kabul edilebilir. Sınıflama böylece daha genel hale gelmektedir. Buna göre akiferde elde edilen FX,F0-NaHCO₃⁺, F1,F2-CaHCO₃⁺ ve F1,F2,F3-CaHCO₃⁰ sınıfında bulunan su tiplerinin akiferin genelini oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi Gümüşhacıköy Akiferi'nin kuzey ve kuzeybatı kesimlerinde yeraltısuyu F2-CaHCO₃⁺ su tipindedir. Havzaya

tatlı yeraltısuyunun girişi ile katyon değişimi meydana gelmiş ve akiferin orta kesimleri F1-CaHCO₃⁺, batısı F2-CaHCO₃⁺ ve güneybatısı F2-CaHCO₃⁰ su tipine doğru değişim göstermiştir. Gümüşhacıköy Akiferi'nde yeraltısuyu akım yönünün kuzeybatıdan ve güneybatıdan doğuya doğru olduğu düşünüldüğünde yeraltısudaki yıkanmanın yeraltısuyu akım yönü ile uyumlu olarak geliştiği görülmektedir. Akiferin doğu ve güneydoğusunda yeraltısuyu FX,F0-NaHCO₃⁺ su tipi ile karakteristiktir.

1951-1972 yılları arasını kapsayan yeraltısuyu örnekleme ile hazırlanan Stuyfzand Sınıflama Sistemi sonuçlarına Göre

Gümüşhacıköy Akiferi'nde tipik bir yıkanmanın hakim olduğu ve bu yıkanmanın akiferin batısından başlayarak doğusuna doğru geliştiği görülmektedir.

Kil mineralleri yüzeyinde adsorbe olan tuzlu su koşulları ortama tatlı suyun girişi ile tatlı su koşullarına dönüşmektedir. Böylece kil mineralinin yüzeyinde bulunan Na^+ , K^+ ve Mg^{++} katyonları Ca^{++} katyonu ile yer değiştirmekte ve bunun sonucunda yeraltısuyunda NaHCO_3 ve CaHCO_3 su tipleri oluşmaktadır. Gümüşhacıköy Akiferi'nde NaHCO_3 ve CaHCO_3 , su tipinin hakim olduğu ve yeraltısuyu akım yönü de dikkate alındığında akiferde yıkanmanın doğuya gidildikçe arttığı belirlenmiştir. Akiferde yeraltısuyu bileşimindeki değişim katyon değişiminin sonucunda meydana gelmektedir. Katyon değişimi ovanın batısında son aşamada bulunmaktadır ve bu bölgede yeraltısuyu CaHCO_3 , ϕ tipindedir. Akiferin doğusunda ve güneydoğusunda ise katyon değişimi henüz devam etmektedir ve bu bölgede yeraltısuyu NaHCO_3 tipinde bulunmaktadır.

Bir akiferde yıkanma gerçekleşebilmesi için başlangıç şartlarının $\text{SNaCl}\phi$ olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda ortam, ilksel deniz suyu ile karakterize edilmekte ve deniz suyunda beslenmenin etkisiyle yıkanma işleminin gerçekleşmesi ile deniz suyu koşulları S (tuzlu)'den F (tatlı)'ye doğru değişim göstermektedir. Deniz suyunun yıkanması;

S(Tuzlu) Bs(Az tuzlu-tuzlu) B(Az tuzlu)
Fb(Tatlı-az tuzlu) F(Tatlı)

şeklinde gerçekleşmektedir.

Yıkanma işleminde ikinci aşama kil minerallerinin katı matriks yüzeyinde gerçekleşen katyon değişimi prosesidir. Kil mineralinin yüzeyi değiştirici rol oynamakta ve gözeneklerdeki tuzlu su yıkanmaya

başlamaktadır. Na^+ , K^+ ve Mg^{++} gibi denizel koşulları ifade eden katyonlar yıkanma sonucunda ortamdaki Ca^{++} konsantrasyonunu artması ile birlikte azalmaya başlar. Na^+ iyonu Ca^{++} ile yer değiştirmesi sonucunda ortamda Na^+ iyonu azalırken Ca^{++} iyonu artmaya başlamaktadır. Katyon değişim işlemi;



Şeklinde meydana gelmektedir. Buna göre NaHCO_3 , MgHCO_3 ve CaHCO_3 yıkanma işlemi sonucunda oluşan su tipleridir.

2003-2004 Yılları Kimyasal

Analizlerine Göre Yapılan Sınıflama

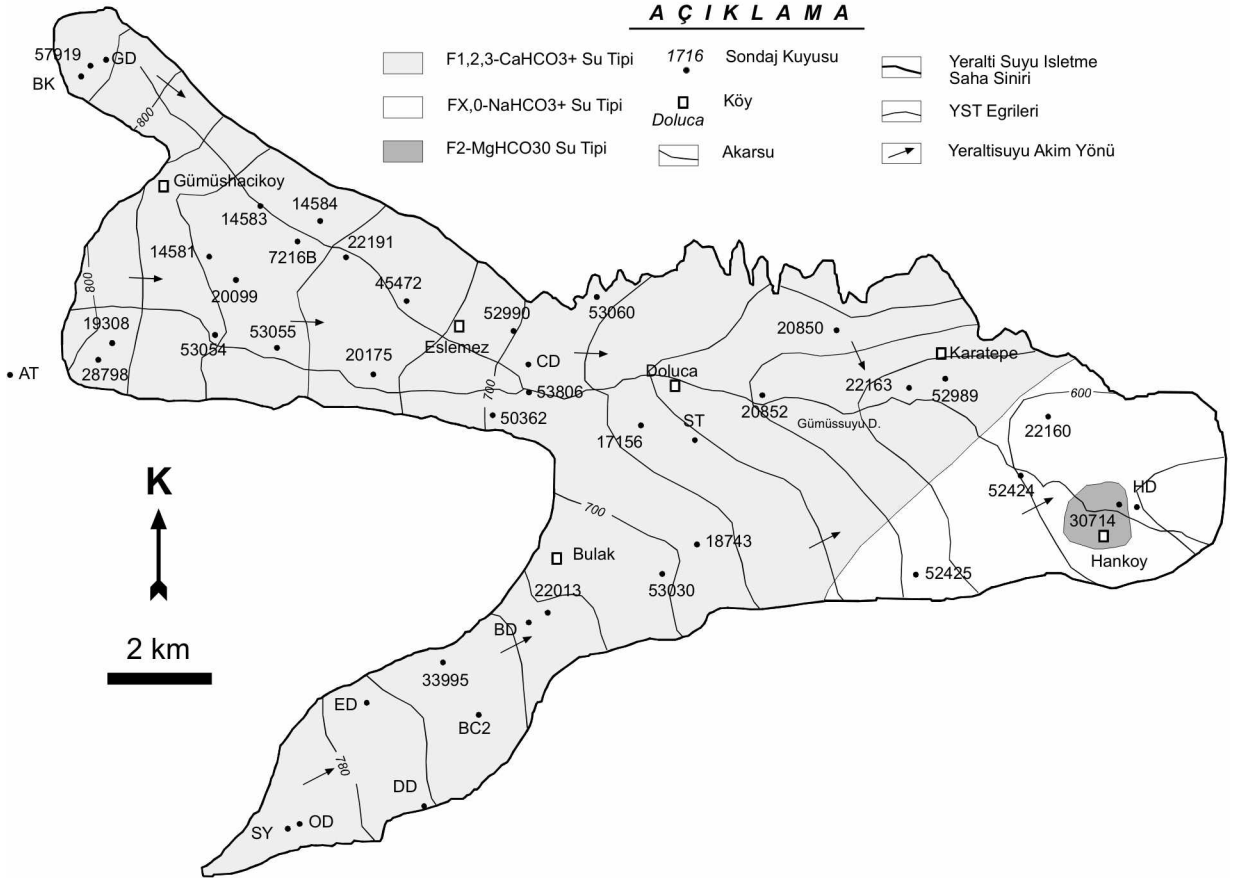
Gümüşhacıköy Akiferi'nde yapılan ilk kimyasal örneklemelerin ardından ovada 2001 yılında ayrıntılı hidrojeoloji çalışmaları başlamıştır. Bu çalışmalar sırasında, 2003-2004 yıllarında akiferde bulunan 49 adet kuyuda kimyasal analizler yenilenmiştir (Çizelge 8). Elde edilen kimyasal analiz sonuçları yeniden Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nde değerlendirilerek akifere ait hidrojeokimyasal gelişim aşamaları belirlenmiştir.

Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nde 1. sembol olan Cl içeriğine göre akiferdeki yeraltısuyunun "tatlı tip" su sınıfında olduğu, 2. sembol olan toplam sertlik değerine göre ise yeraltısuyunun "çok yumuşak" ile "çok sert" arasında değiştiği belirlenmiştir. Sınıflamada 3. sembol olan baskın anyon-katyon çiftine göre ise akiferdeki yeraltısuyunun NaHCO_3 , MgHCO_3 ve CaHCO_3 tipinde olduğu görülmektedir. Sınıflama sisteminde 4. sembol olan katyon değişim koduna göre yeraltısuyu akiferin tamamında $(\text{Na} + \text{K} + \text{Mg})_{\text{fazla}}$ tipinde bulunmaktadır. Böylece Stuyfzand Sınıflama Sistemi Gümüşhacıköy Akiferi'nde yeni analizler için tekrar hazırlanarak yeraltısuyunun hidrokimyasal değişimi yeniden haritalanmıştır (Şekil 6).

Haritada görüldüğü gibi Gümüşhacıköy Akiferi'nin batısı tamamen F1,2,3-CaHCO₃+ su tipinden oluşmakta iken, akiferin doğusunda dar bir alanda FX,0-NaHCO₃+ su tipinin hakim olduğu görülmektedir.

Çizelge 8. Gümüşhacıköy yeraltısuyununun 2003-2004 kimyasal analiz sonuçlarına göre hazırlanan Stuyfzand Sınıflama Sistemi tablosu
Table 8. Stuyfzand classification system of Gümüşhacıköy well waters according to 2003-2004 analyses results

Kuyu no	Su sınıfı	Kuyu no	Su sınıfı
22013	F2-CaHCO ₃ +	22163	F2-CaHCO ₃ +
17156	F2-CaHCO ₃ +	20852	F2-CaHCO ₃ +
53060	F2-CaHCO ₃ +	20850	F1-CaHCO ₃ +
52990	F2-CaHCO ₃ +	53030	F2-CaHCO ₃ +
53055	F2-CaHCO ₃ +	BC2	F3-CaHCO ₃ +
20099	F2-CaHCO ₃ +	33995	F2-CaHCO ₃ +
22191	F3-CaHCO ₃ +	SY	F2-CaHCO ₃ +
ST	F2-CaHCO ₃ +	18743	F2-CaHCO ₃ +
53806	F2-CaHCO ₃ +	50362	F3-CaHCO ₃ +
20175	F2-CaHCO ₃ +	53054	F2-CaHCO ₃ +
BK	F2-CaHCO ₃ +	52989	F3-CaHCO ₃ +
14581	F2-CaHCO ₃ +	45472	F2-CaHCO ₃ +
14583	F3-CaHCO ₃ +	57919	F3-CaHCO ₃ +
14584	F2-CaHCO ₃ +	7216B	F2-CaHCO ₃ +
AT	F2-CaHCO ₃ +	HD	F2-MgHCO ₃ +
19308	F2-CaHCO ₃ +	BD	F2-CaHCO ₃ +
28798	F2-CaHCO ₃ +	DD	F2-CaHCO ₃ +
30714	FX-NaHCO ₃ +	OD	F2-CaHCO ₃ +
52424	F2-MgHCO ₃ +	ED	F2-CaHCO ₃ +
52425	F2-MgHCO ₃ +	CD	F2-CaHCO ₃ +
22160	F2-MgHCO ₃ +	GD	F2-CaHCO ₃ +



Şekil 6. Gümüşhacıköy yeraltısuyunun 2003-2004 kimyasal analiz sonuçlarına göre hazırlanan Stuyfzand Sınıflama Sistemi haritası

Figure 6. Stuyfzand classification system map designed according to 2003-2004 water analyses results Gümüşhacıköy groundwater

KARŞILAŞTIRMA VE SONUÇLAR

Merzifon-Gümüşhacıköy Havzası içerisinde yer alan Gümüşhacıköy Akiferi'nde 1951-1972 yılları arasında gerçekleştirilen ilk hidrojeokimyasal örnekleme çalışmalarından elde edilen analiz sonuçları Stuyfzand Sınıflama Sistemi'nde değerlendirilmiş ve akifere ait hidrojeokimyasal sınıflama belirlenmiştir. Buna göre Gümüşhacıköy Akiferi'nin kuzey kesimlerinde yeraltısuyunun F2-CaHCO₃+ su tipinde olduğu, akiferin orta kesimlerinde F1-CaHCO₃+, batısında F2-CaHCO₃+ ve güneybatısında ise F2-CaHCO₃ su tipine doğru değişim gösterdiği belirlenmiştir. Gümüşhacıköy Akiferi'nde yeraltısuyu akım yönü batıdan, kuzeybatıdan ve güneybatıdan doğuya doğru gerçekleşmektedir. Akiferin doğu ve güneydoğusunda yeraltısuyu FX,F0-NaHCO₃+ su tipinden oluştuğu düşünüldüğünde akiferdeki yıkanmanın yeraltısuyu akım yönü ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Gümüşhacıköy Akiferi'nde 2002-2003 yıllarında yapılan ikinci örnekleme çalışmalarından elde edilen kimyasal analiz sonuçlarına göre ovada yeraltısuyu için yeniden haritalama çalışması yapılmış ve akiferdeki hidrojeokimyasal gelişim mekanizması Stuyfzand Sınıflama Sistemi'ne göre belirlenmiştir. Buna göre akiferin batısında yeraltısuyunun F1,2,3-CaHCO₃+ su tipinden oluştuğu, doğuda dar bir alanda ise FX,0-NaHCO₃+ su tipinin hakim olduğu belirlenmiştir.

Gümüşhacıköy yeraltısuyu için Stuyfzand Sınıflama Sistemi'ne göre hazırlanan iki harita karşılaştırıldığında önceki analiz sonuçlarına göre NaHCO₃+ su tipinde olan gölgenin sonraki analiz sonuçlarında MgHCO₃+ su tipine dönüştüğü belirlenmiştir. Bu da akiferde yıkanma etkisinin NaHCO₃+'ten MgHCO₃+'e doğru ilerlediğini göstermektedir. Yine ilk analiz sonuçlarına göre akiferin güneyi ve güneybatısı CaHCO₃ su tipinden oluşmakta iken sonraki

analiz sonuçlarına göre yeraltısuyunda meydana gelen yıkanma sonucunda CaHCO₃+ su tipine dönüştüğü belirlenmiştir. Her iki harita karşılaştırıldığında akiferde yıkanmanın zaman içerisinde batıdan doğuya doğru yeraltısuyu akım yönüne uygun olarak devam ettiği ve su tipinin CaHCO₃+ su tipine doğru geliştiği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- DSİ, 2006. Yıl Sonu Faaliyet Raporu, İşletme Bakım Şube Müdürlüğü, Samsun.
- DSİ, 1973. Merzifon-Gümüşhacıköy Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltıları Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Fırat Ersoy, A., 2007. Gümüşhacıköy (AMASYA) Akiferi'nin Yeraltısuyu Akım Modeli. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Doktora Tezi, 182s (Yayınlanmamış).
- Kreye, R., Ronneseth, K., Wei, M., 1998. An aquifer classification system for groundwater management in the British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks Water Management Division, Hydrology Branch Province of British Columbia.
- Matthess, G., 1982. The properties of groundwater, John Wiley & Sons, New York, 406 pp.
- Nieto, P., Custodio, E., Manzano, M., 2005. Baseline groundwater quality: a European approach, Environmental Science and Policy, 399-409.
- Stuyfzand, P.J., 1985. Hydrochemistry and hydrology of the coastal dunes between Egmond Wijk aan Zee, KIWA report, SWE-85-012, 205 pp. Stuyfzand, P.J., 1986. New hydrochemical classification of watertypes: principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands, Proceedings 9th Salt water Intrusion Meeting, Delft 12-16 May 1986, 641-655