



Kestanbol Jeotermal Akışkanının Hidrokimyasının ve Çevresel Etkilerinin Belirlenmesi
Hydrochemistry and Environmental Impacts of Kestanbol Geothermal Fluid

Harika Marmara¹, Deniz Şanlıyüksel Yücel^{2*}, Süha Özden³, Mehmet Ali Yücel⁴

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Jeoloji Mühendisliği A.B.D., 17100 Çanakkale
²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Maden Mühendisliği Bölümü, 17100 Çanakkale
³Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 17100 Çanakkale
⁴Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Harita Mühendisliği Bölümü, 17100 Çanakkale

Geliş/Received : 09.08.2019

• Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received : 04.10.2019

• Kabul/Accepted : 12.11.2019

• Çevrimiçi Yayın/Available online : 15.01.2020

• Baskı/Printed : 31.01.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Alexandria Troas Antik Kenti'nde yer alan Kestanbol jeotermal alanı, Biga Yarımadası'nın plütonik yükselimleri ile komşu metamorfik kayaların kontakta bulunmaktadır. Bu alan aynı zamanda Kuzey Anadolu Fayı'nın güney kolunun batıya olan uzantılarını temsil eden DKD-BGB uzanımlı sağ yanal doğrultu atımlı bir fay segmenti ile kontrol edilmekte olup, Biga Yarımadası'ndaki en yüksek sıcaklığa sahip jeotermal alanlardan biridir. Kestanbol jeotermal alanında bulunan sondajdan çıkan jeotermal akışkan tesisin ısıtılması, termal turizm ve balneolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Jeotermal akışkan çevreye düşük debi ile sürekli olarak sızmakta ve ayrıca kaplıcanın atık suyu Ilıca deresine deşarj edilmektedir. Bu çalışmada, Kestanbol jeotermal alanında yer alan sondaj ve kaynakların hidrokimyasal karakteristiği belirlenerek, toprak ve dere sedimenti üzerindeki çevresel etkileri ve antropojenik kirlilik yaratma potansiyeli değerlendirilmiştir. Kestanbol jeotermal akışkanının sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC) ve pH değerleri sırasıyla 59,5-74,1°C, 30,3-35,5 mS/cm ve 6,45-6,71 arasındadır. Jeotermal kaynaklar NaCl su tipinde olup, ortalama NaCl konsantrasyonu 19511 mg/l'dir. Kestanbol jeotermal akışkanının yüksek EC değeri ve toplam çözülmüş katı madde içeriğinin yanı sıra Na⁺, Cl⁻, B, Ba, Fe ve Mn konsantrasyonu bakımından TS 266'ya göre izin verilen maksimum değerlerin üzerindedir. Ayrıca jeotermal akışkanın EC değeri ve Na⁺, Cl⁻, B ve Fe konsantrasyonu Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'ne göre çok kirlenmiş su (IV. sınıf) kalitesindedir. Kestanbol jeotermal alanında kabuklaşma problemi vardır. XRD ve SEM-EDX analizleri ile kabuğu oluşturan minerallerin kalsit, halit ve siderit olduğu tespit edilmiştir. Jeokimyasal analiz sonuçlarına göre kabuk, toprak ve dere sedimentindeki As, Fe ve Mn konsantrasyonunun Dünya kıtasal kabuk ortalama değerinden yüksek olduğu saptanmıştır. Zenginleşme faktörü ve jeobirikim indeksi değerlerine göre yoğun kayaç etkileşiminde kalan jeotermal akışkanın deşarjı sonucunda toprak ve dere sedimenti As ve Mn metal(loid)leri açısından zenginleşmiştir. Kestanbol jeotermal akışkanın ve tesisin atık suyunun çevresindeki toprağa ve Ilıca deresine deşarj edilmemesi önerilir.

Anahtar Kelimeler: Kestanbol jeotermal akışkanı, çevresel etki, hidrokimya, kabuklaşma.

Abstract: Kestanbol geothermal field, located in the ancient town of Alexandria Troas, is at the contact between plutonic intrusions and neighboring metamorphic rocks in the Biga Peninsula. This area is also controlled by an ENE-WSW striking right lateral strike-slip fault segment representing the extension of the southern branch of the North Anatolian Fault to the west and is one of the geothermal fields with highest temperature in the Biga Peninsula. Kestanbol geothermal fluid from a well is used to heat facilities for thermal tourism and balneological purposes. The

geothermal fluid continuously seeps into the environment with low flow rate and additionally, wastewater from the facility is discharged into Ilıca stream. This study was conducted to determine the hydrochemical characteristics of the well and springs located in Kestanbol geothermal field and to evaluate the environmental effects of geothermal fluids on the soil and stream sediment. The temperature, electrical conductivity (EC) and pH of Kestanbol geothermal fluids are 59.5-74.1°C, 30.3-35.5 mS/cm, and 6.45-6.71, respectively. The geothermal fluids are NaCl water type, with mean NaCl concentration of 19511 mg/L. In addition to higher EC values, and total dissolved solid content, Na⁺, Cl⁻, B, Ba, Fe and Mn concentrations of the Kestanbol geothermal fluid are above the tolerance limit of TS 266. Moreover, the geothermal fluid is heavily polluted water (class IV) according to the Turkish Inland Water Quality Regulations in terms of EC, Na⁺, Cl⁻, B and Fe. There is a scaling problem in the Kestanbol geothermal field. XRD and SEM-EDX analyses identified the minerals causing scale as calcite, halite and siderite. Arsenic, Fe and Mn concentration of scale, soil and stream sediment samples are higher than the mean value of world continental crust. According to the enrichment factor and geoaccumulation index, the geothermal fluid with intense rock interaction enriches soil and stream sediment in terms of As and Mn metal(loid)s as a result of discharge. It is recommended that geothermal fluids and waste waters from the facility should not be discharged into the soil and Ilıca stream.

Keywords: Kestanbol geothermal fluid, environmental impact, hydrochemistry, scaling.

GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. 2015 yılı itibariyle, Dünya'daki elektrik üretiminde toplam santral kurulu gücü 12635 MWe'e ve doğrudan kullanım için ısı üretimi 70329 MWt'a ulaşmıştır (Bertani, 2015; Şimşek, 2015). Alp-Himalaya dağ kuşağında bulunan Türkiye, jeolojik ve aktif tektonik yapısı nedeniyle yüksek jeotermal enerji potansiyeline sahiptir. Türkiye'de sıcaklıkları 20 ile 287°C arasında değişen 227 jeotermal alan ve yaklaşık 2000 adet sıcak ve mineralli su kaynağı saptanmıştır (Mertoğlu vd., 2015; Lund ve Boyd, 2016). Jeotermal akışkan tarih öncesi devirlerden günümüze kadar banyo yapmak, yemek pişirmek, bulaşık ve çamaşır yıkamak, termal turizm, balneolojik uygulamalar, seracılık, konut ısıtması, elektrik enerjisi üretimi gibi jeotermal akışkanın sıcaklığına ve kimyasına bağlı olarak çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır (Şanlıyüksel ve Baba, 2011). Gerekli önlemler alınmadığı takdirde; jeotermal akışkanın içindeki yüksek çözünmüş madde içeriği, deşarj sonrasında meydana gelen ısı değişimleri ve limit değerlerin üzerindeki metal(loid) konsantrasyonu nedeniyle çevresindeki su kaynaklarında ve tarım arazilerinde çevresel kirliliğe neden olabilmektedir (Birkle ve Merkel,

2000; Kristmannsdottir ve Armannsson, 2003; Özen Balaban vd., 2017). Türkiye'de jeotermal akışkanın deşarjı ile çevresel kirliliğe maruz kalan birçok jeotermal alan vardır. Gemici ve Tarcan (2002) Batı Anadolu'daki Germencik, Salihli, Kızıldere ve Seferhisar gibi jeotermal alanlarda yüksek bor (B) konsantrasyonu içeren jeotermal atık suyun çevreye deşarjı sonucunda yüzey ve yeraltı sularında ve tarım arazilerinde kirlenmeye neden oluşunu saptayarak, çevresel kirliliğin önlenmesi için reenjeksiyonun en uygun yöntem olduğunu vurgulamıştır. Denizli-Kızıldere jeotermal alanında yüksek B konsantrasyonu içeren jeotermal akışkanın kullanıldıktan sonra Büyük Menderes Nehri'ne deşarjı nehirde ötrofikasyona neden olup, suda yaşayan canlı hayatını olumsuz etkilemekte ve çevresindeki tarım arazilerine zarar vermektedir (Şimşek vd., 2005; Erkul, 2012). Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli jeotermal alanlarında kullanılan jeotermal akışkanın Akarçay deresine deşarjı, Akarçay deresinin döküldüğü Eber Gölü'nde kirliliğe neden olmaktadır. Akarçay Havzası'nda bulunan yeraltı sularında yüksek arsenik (As), yüzey sularında ise yüksek B konsantrasyonu tespit edilmiştir (Doğdu ve Bayarı, 2005). Simav'daki Eynal, Çitgöl ve Naşa jeotermal akışkanlarının As, B, demir (Fe) ve mangan (Mn) konsantrasyonu limit değerlerin

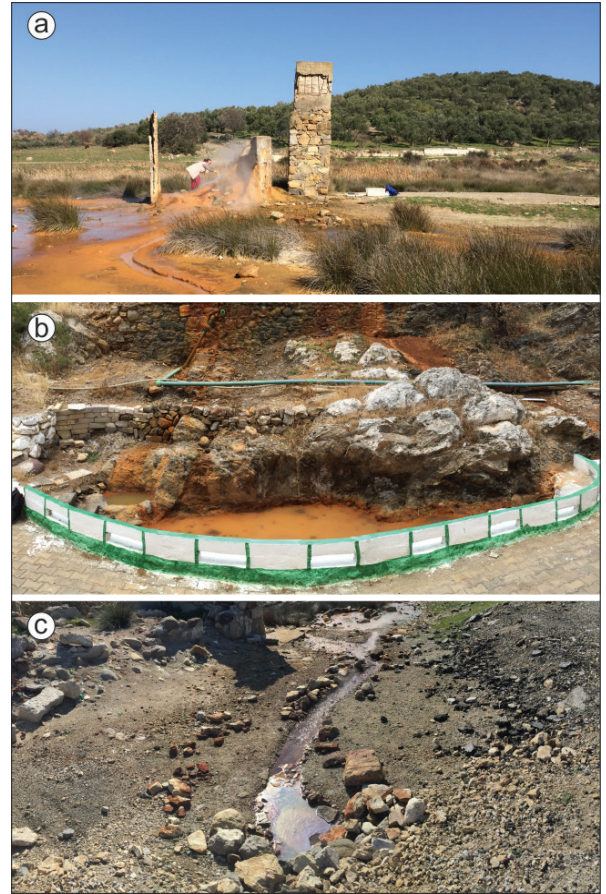
jeolojik, hidrojeolojik ve hidrokimyasal özellikleri ile jeotermal akışkanın kökeninin belirlenmesine yönelik araştırmalardan oluşmuştur (Çağlar, 1947; Yenal vd., 1975; Gevrek vd., 1986; Balderer, 1994; Mützenberg, 1997; Çağlar ve Demirörer, 1999; Baba ve Ertekin, 2007; Yalçın ve Sarp, 2012; Mutlu vd., 2014). Bu çalışmada, (i) Kestanbol jeotermal akışkanının hidrokimyasal özelliklerinin belirlenmesi, (ii) jeotermal akışkanın sebep olduğu kabuklaşmanın karakterizasyonunun saptanması, (iii) çevreye deşarj edilen jeotermal akışkanın toprak ve dere sedimenti üzerindeki etkileri ve antropojenik kirlilik yaratma potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Saha Çalışmaları

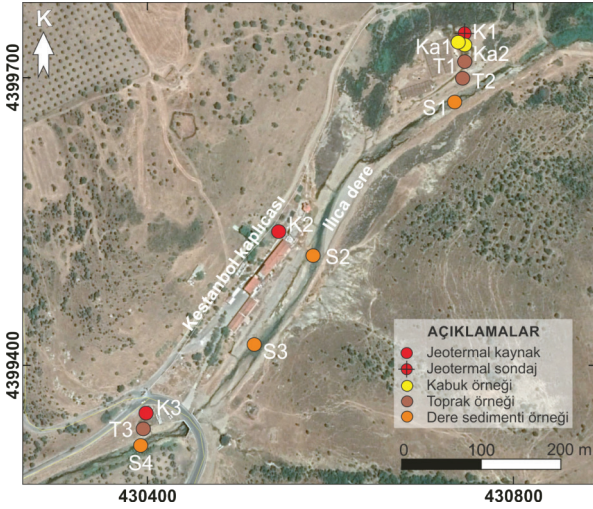
Kestanbol jeotermal alanında yer alan bir jeotermal sondaj (K1) ve iki jeotermal kaynaktan (K2 ve K3) üç farklı dönemde (Temmuz, Ekim 2018 ve Ocak 2019) örnekleme yapılmıştır (Şekil 3). Jeotermal sondaj ve kaynakların konum ve yükseklik bilgileri Garmin GPSMAP 62s el tipi GPS kullanılarak saptanmıştır. Koordinatlar Universal Transverse Mercator (UTM) projeksiyonu World Geodetic System 1984 (WGS84) datumu 35. dilimdedir. Jeotermal akışkanın fizikokimyasal parametrelerinden sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC) ve pH değerleri WTW Multi 340i cihazı kullanarak arazide ölçülmüştür. Propların günlük kalibrasyonları tampon çözeltiler kullanılarak yapılmıştır. İndüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) analizi için alınan su örnekleri, 0,45 µm gözenekli filtre ile filtrelenerek ilk kez kullanılan polietilen 50 ml'lik kaplara alınmıştır. Elementlerin dibe çökmelerini ve yüzeye tutunmalarını önlemek amacıyla, su örneklerinin pH'nın 2'nin altına düşmesi için 0,2 ml derişik nitrik asit (HNO₃) ilave edilmiştir. Filtreleme işlemi, iyon kromatografisi (IC) analizleri için alınan örneklerde de tekrarlanmıştır ancak, HNO₃ ilavesi yapılmamıştır. Tüm örnekler

su kabında hava kabarcığı kalmayacak şekilde doldurularak arazi tipi buzdolabında (+4°C) saklanmıştır. Ayrıca jeotermal akışkanın çevresel etkilerinin belirlenmesi amacıyla Ocak 2019 tarihli arazi çalışmasında kabuktan, topraktan ve dere sedimentinden örnekler alınmıştır (Şekil 4). Kabuk örnekleri (Ka1 ve Ka2) jeotermal sondajın çıkış noktasındaki farklı birikimlerden temsili olacak şekilde yaklaşık 1 kg olarak alınmıştır. Toprak (T1-T3) ve dere sedimenti (S1-S4) örnekleri kürek yardımı ile 0-20 cm derinlikten, 7 farklı lokasyondan yaklaşık 1 kg olarak alınmıştır.



Şekil 3. a) Kestanbol jeotermal sondajı (K1). b) ve c) Kestanbol jeotermal kaynakları (K2 ve K3).

Figure 3. a) Kestanbol geothermal well (K1). b) and c) Kestanbol geothermal springs (K2 and K3).



Şekil 4. Jeotermal akışkan, kabuk, toprak ve dere sedimenti örneklerinin konumu.

Figure 4. Sampling locations for geothermal fluid, scale, soil and stream sediment.

Laboratuvar Çalışmaları

Jeotermal akışkanın sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{+2}), magnezyum (Mg^{+2}), B, baryum (Ba), Fe ve Mn analizleri PerkinElmer Optima 8000 markalı ICP-OES cihazı ile yaptırılmıştır. Sülfat (SO_4^{-2}) ve klorür (Cl^-) analizleri Shimadzu LC-20A SP markalı IC cihazı ile ölçülmüştür. ICP-OES ve IC analizleri Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yaptırılmıştır. Jeotermal akışkanın bikarbonat (HCO_3^-) tayini örneklemelerin yapıldığı günde Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarı'nda titrasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Kabuk, toprak ve dere sedimenti örneklerinin majör ve iz element bileşimi LiBO_2 füzyon metodu ve STD SO-18 standart materyali kullanılarak induktif olarak eşleştirilmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) (Elan 9000, PerkinElmer SCIEX) ile saptanmıştır. ICP-MS analizi Bureau Veritas Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır. Kabuk, toprak ve dere sedimenti örneklerinin mineralojik bileşimi X-ışını kırınım (XRD) analizi ile Maden Tetkik ve

Arama Genel Müdürlüğü Mineraloji ve Petrografi Araştırma Birimi'nde yaptırılmıştır. Standart kalitatif XRD analizinde Philips PW 1830 Ni filtreli Cu X-ışın tüplü cihazı kullanılarak çekimler $2-70^\circ$ arasında gerçekleştirilmiştir. Kabuk, toprak ve dere sedimenti örneklerinin kristal morfolojisi ve elementel içeriğini belirlemek amacıyla alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (SEM) (JEOL JSM-7100F) ve X-ışını spektroskopisi (EDX) (Oxford Instruments X-Max) analizleri Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yaptırılmıştır.

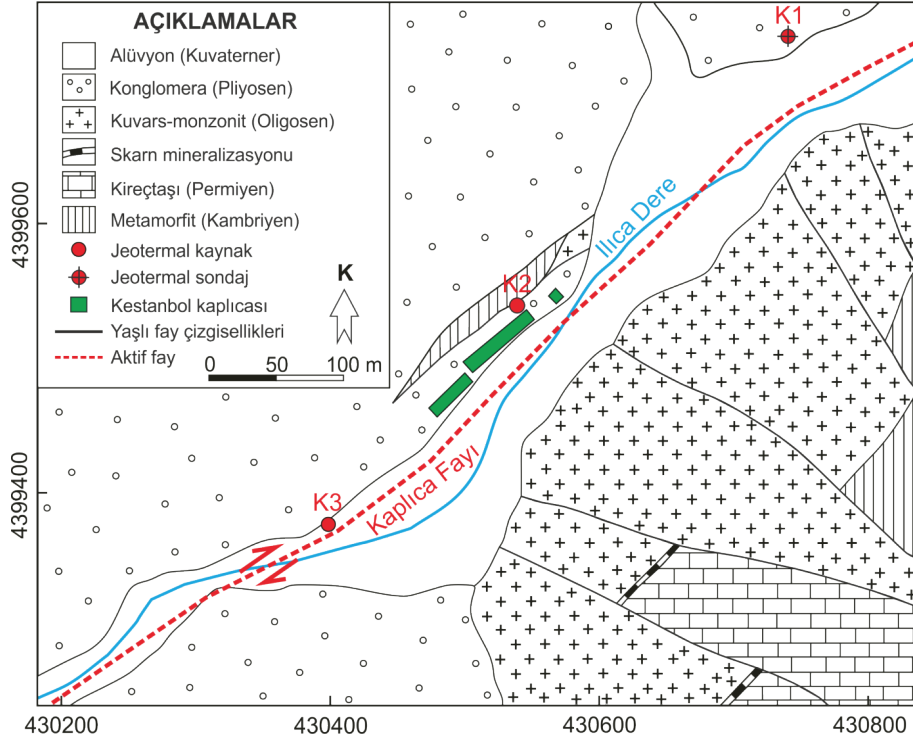
BULGULAR

Çalışma Sahasının Jeolojisi

Kestanbol jeotermal alanın temelinde düşük dereceli metamorfizmaya uğramış klorit, muskovit, fillit, şist ve mermer türü kayalardan oluşan Kambriyen yaşlı Geyikli Metamorfitleri (Beccalotto, 2003) yer almaktadır (Şekil 5). Permien yaşlı Bozalan Formasyonu bu birimi uyumsuz olarak üzerlemektedir. Bu birim ilk kez Kalafatçıoğlu (1963) tarafından Permien kalkerleri olarak adlandırılmış, daha sonra Beccalotto ve Jenny (2004) tarafından, rekristalize kireçtaşları, düşük dereceli metamorfizmaya uğramış meta-kumtaşları ve meta-çamurtaşlarından oluşan Geç Permien yaşlı Bozalan Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Üst Oligosen-Alt Miyosen yaşlı kuvars monzonit, monzonit, monzonit porfir ve granit türü kayalardan oluşan Kestanbol Plütону, Geyikli Metamorfitleri ve Bozalan Formasyonu'nu keserek bölgeye yerleşmiştir (Gözler vd., 1984). Arazi çalışmalarında Kestanbol jeotermal alanı ve çevresinde yüzlek veren granitlerin alterasyon sonucu yer yer arenileşmiş olduğu gözlenmiştir. Mützenberg (1997) Kestanbol Plütону'nun temel kayaların içine sokulmuş ve temel kayalarla dokanağında kontakt metamorfizma zonu ve skarn mineralizasyonu geliştiğini ifade etmiştir. Bu birimler Siyako vd. (1989) tarafından

adlandırılan Pliyosen yaşlı konglomera, kumtaşı ve yer yer kireçtaşlarıyla temsil edilen Bayramiç Formasyonu tarafından uyumsuzlukla örtülmektedir. Kuvaterner yaşlı tutturulmamış kil, kum ve çakıldan oluşan, Ilıca deresinde yüzlek veren alüvyon çalışma alanındaki tüm birimleri uyumsuz olarak örtmektedir.

segmentleri (Tuzla, Kestanbol Fayları vb.) bölgenin küçük-orta büyüklükteki deprenselliğinin kaynakları konumundadır. Kestanbol jeotermal alanında MTA tarafından 1975 yılında 290,7 m derinliğinde bir sondaj açılmış olup, jeotermal akışkanın debisi 25 l/sn olarak saptanmıştır. Sondajın 100-139 m ve 237-290 m arasında



Şekil 5. Kestanbol jeotermal alanının jeoloji haritası (Mützenber, 1997'den değiştirilerek).

Figure 5. Geological map of the Kestanbol geothermal field (modified from Mützenber, 1997).

Kestanbol jeotermal alanı çevresinde Miyosen'den günümüze kadar gelişen tektonik aktiviteler farklı doğrultulardaki faylanmalar bölgedeki etkinliğini göstermektedir (Şamilgil, 1966). Çalışma alanında Ilıca deresine paralel olarak uzanan DKD-BGB uzanımlı sağ yönlü doğrultu atımlı Kaplıca Fayı bulunmaktadır. Fay, doğuda metamorfite ile granitlerin dokanağında başlayıp, batıda muhtemelen denizin içinde de devam ederek son bulurken yaklaşık 10 km uzunluğa ulaştığı düşünülmektedir. Farklı doğrultularda uzanan bu fay ve benzeri aktif fay

iki basınçlı akifer vardır ve jeotermal akışkan artezyen etkisi ile yüzeye ulaşmaktadır (Ölmez, 1976). Çağlar ve Demirörer (1999), Kestanbol jeotermal alanında jeolojik çalışmalar ve doğal gerilim yöntemi ile jeofizik kesitler hazırlayarak jeotermal akışkanının debisini arttırmak için jeotermal alanının güneybatısında 100-150 m derinlikte yeni bir sondaj yeri önermiştir. Şimşek (1997), Kestanbol jeotermal alanındaki rezervuar kayacın granit, siyenit ve gnays, örtü kayacın ise kumtaşı, konglomera, masif gnays ve granitten oluştuğunu ifade etmiştir. Baba ve Sözbilir (2012),

Kestanbol jeotermal alanının ısıtıcı kayacının Kestanbol Plütunu olduğunu vurgulamıştır. Yalçın ve Sarp (2012), Kestanbol jeotermal akışkanının kökenini derine yerleşmiş hareketsiz sıcak fosil suyun yükseklerden yeraltına sızan soğuk sular ile seyrelip, soğuması sonucunda oluştuğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, Kestanbol jeotermal akışkanı ısıtıcı kaynağının plütomatik kayalar ve jeotermal gradyan olduğu düşünülmektedir. Jeotermal akışkan, orta-derin dolaşımda ısınarak yeryüzüne yakın bölgedeki temel birimlerin dokanakları, kayalar içerisindeki çatlakları ve aktif fay segmentlerini kullanarak yüzeye çıkmaktadır. Ilıca deresi boyunca uzanan Kaplıca Fayı bu alanda jeotermal kaynağı kontrol eden temel unsurdur. Jeotermal kaynakların DKD-BGB doğrultulu bu fay boyunca sıralanması bunun en önemli göstergesidir.

Jeotermal Akışkanın Hidrokimyası

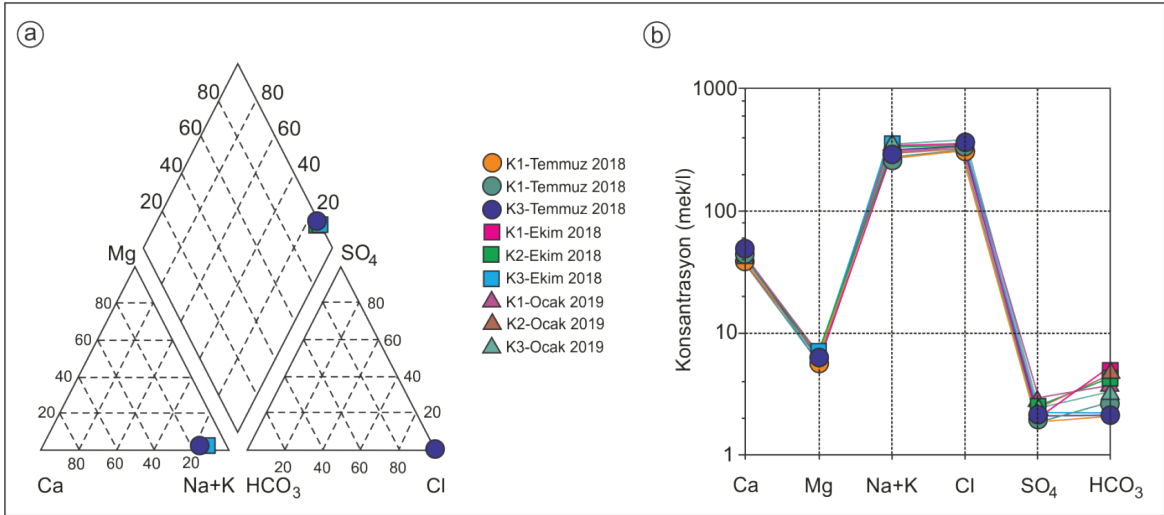
Kestanbol jeotermal sondaj ve kaynaklarının yüzey sıcaklık ve pH değerleri sırasıyla 59,5 ile 74,1°C ve 6,45 ile 6,71 arasındadır (Çizelge 1). Jeotermal akışkanın EC değeri 30,3 ile 35,5 mS/cm arasında olup, ortalama değeri 32,96 mS/cm'dir. Jeotermal akışkanın EC değerleri Erguvanlı ve Yüzer (1973) tarafından yapılan sınıflamada "kullanılmayacak sular" sınıfındadır. Sudaki çözülmüş toplam iyon miktarı ile EC değerleri arasında genellikle doğrusal bir ilişki vardır (Şahinci, 1991; Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017). Kestanbol jeotermal akışkanının EC değeri TS 266 (2005) tarafından izin verilen maksimum değer olan 2,5 mS/cm'in yaklaşık 13 kat üzerindedir. Toplam çözülmüş katı madde miktarı (TDS) EC değerinin 0,55 ile 0,75 arasında bir değer ile (genellikle 0,67) çarpılmasıyla hesaplanır (Chapman ve Kimstach, 1996). Hesaplanan TDS değeri 20,3 ile 23,79

mg/l arasında olup, ortalama değeri 22,08 mg/l'dir. Jeotermal akışkanının kimyasal karakteristiği belirlenerek elde edilen analiz sonuçları jeotermal akışkanın litoloji ile ilişkileri ve dolaşım sistemleri boyunca meydana gelen hidrojeokimyasal süreçler hakkında bilgi vermektedir. Su fasiyesini belirlemek amacı ile majör iyon analiz sonuçları Piper(1944) diyagramında gösterilmiştir (Şekil 6a). Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979) su sınıflamasına göre Kestanbol jeotermal akışkanının su tipi NaCl olup, ortalama NaCl konsantrasyonu 19511 mg/l'dir. Jeotermal akışkanın majör katyon dizilimi $Na^+ > Ca^{+2} > K^+ > Mg^{+2}$, anyon dizilimi $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$ şeklindedir. Schoeller (1955) diyagramına göre çizgilerin birbirine paralel olması akışkanın benzer kökenli beslenme alanı ve rezervuara sahip olduğunu göstermektedir. Schoeller diyagramında jeotermal sondaj ve kaynaklar birbirine paralel bir dizilimdedir (Şekil 6b). Jeotermal akışkanın ortalama Na/K oranı 8,79'dur. Düşük Na/K oranı (<15), daha az soğuk su ile karışarak, yüzeye kısmen hızla ulaşan yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklarda ortaya çıkma eğilimindedir (Nicholson, 1993). Yalçın ve Sarp (2012) tarafından Kestanbol jeotermal akışkanının rezervuar sıcaklığı SiO_2 , Na/K, Na/K/Ca ve Na/Li jeotermometrelerine göre sırasıyla 156, 251, 239 ve 139°C olarak hesaplanmıştır. Baba ve Ertekin (2007) K1 no'lu jeotermal sondajın trityum içeriğinin 0,22 TU olduğunu belirtmiştir. Jeotermal akışkanın düşük trityum içeriği dolaşım yaşının 55 yıldan fazla olduğunu göstergesidir. Yüksek Cl^- konsantrasyonu doğrudan, derinden ve yüksek debili bir beslenmeyi, düşük Cl^- konsantrasyonu ise yüzey sularının giriş doğrultularını belirtir (Eroğlu ve Aksoy, 2003). Düşük trityum içeriği, yüksek EC değeri ve Cl^- konsantrasyonu Kestanbol jeotermal akışkanının derin dolaşım sular olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1. Kestanbol jeotermal akışkanının hidrokimyasal özellikleri.

Table 1. Hydrochemical characterization of Kestanbol geothermal fluid.

Örnek Adı	Örnekleme tarihi	Yüzey sıcaklığı °C	pH	EC		TDS	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	B	Ba	Fe	Mn
				mS/cm	mg/l												
K1		72,3	6,71	30,9	20,7	5921	670	785	64	11389	133	90	10,66	1,24	6,8	1,1	
K2	Temmuz 2018	63,1	6,6	32,8	21,98	6130	720	845	69	11921	166	90	10,43	1,41	3,06	1,34	
K3		69,5	6,45	35,2	23,58	6893	810	961	67	13339	133	100	11,76	1,85	8,8	1,45	
K1		74	6,5	30,3	20,3	7457	862	812	72	12706	300	98	11,64	1,35	9,04	1,79	
K2	Ekim 2018	59,5	6,61	32,9	22,04	7340	802	819	80	12415	266	122	19,11	1,5	5,13	1,65	
K3		69,4	6,5	35,2	23,58	7552	936	795	87	13427	166	108	9,31	1,75	10,96	1,83	
K1		74,1	6,61	31,9	21,37	7123	709	879	73	12387	240	140	15,17	1,23	5,08	1,07	
K2	Ocak 2019	60,6	6,53	32	21,44	6544	684	956	79	12018	266	120	16,8	1,41	2,94	1,25	
K3		68,9	6,47	35,5	23,79	7566	915	1034	71	13472	200	120	16,9	1,5	10,03	1,31	
Minimum		59,5	6,45	30,3	20,3	5921	670	785	64	11389	133	90	9,31	1,23	2,94	1,07	
Maksimum		74,1	6,71	35,5	23,79	7566	936	1034	87	13472	300	140	19,11	1,85	10,96	1,83	
Ortalama		67,93	6,55	32,96	22,08	6947,33	789,78	876,22	73,55	12563,78	207,77	109,77	13,53	2,12	6,87	1,42	
TS 266 (2005)		25	6,5-9,5	2,5	-	200	-	-	-	250	-	250	1	-	0,2	0,05	
Yerüsti Su Kalitesi Yönetmeliği, Su Kalite Sınıfı (2015)		IV	I	IV	-	IV	-	-	-	IV	-	I	IV	II	IV	III	



Şekil 6. a) Kestanbol jeotermal akışkanın Piper diyagramında değerlendirilmesi. b) Kestanbol jeotermal akışkanın Schoeller diyagramında değerlendirilmesi.

Figure 6. a) Piper diagram for Kestanbol geothermal fluid. b) Schoeller diagram for Kestanbol geothermal fluid.

Jeotermal Akışkanın Çevresel Etkileri

Kestanbol jeotermal alanında K1 no'lu sondajdan çıkan jeotermal akışkan çevreye düşük bir debi ile sürekli olarak sızmaktadır. Bu nedenle sondajın çevresindeki toprağın rengi değişerek kırmızı-kahverengi olmuştur (Şekil 7a). Kaplıcanın atık suyu Ilıca deresine deşarj edilmektedir ve arazi çalışmalarında deşarj sonucunda Ilıca deresinde sıcaklık artışı ve renk değişimleri gözlenmiştir (Şekil 7b). Ocak 2019 tarihinde jeotermal atık suyun Ilıca deresine karıştığı yerlerde sıcaklık 26,9-32,2°C arasında ölçülmüştür. Kestanbol jeotermal akışkanı sıcaklık ve EC değerlerinin yanı sıra Na⁺, Cl⁻, B, Fe ve Mn konsantrasyonu bakımından TS 266'ya (2005) göre izin verilen maksimum değerlerin üzerindedir. Ayrıca Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'ne (2015) göre jeotermal akışkan sıcaklık, EC, Na⁺, Cl⁻, B ve Fe çok kirlenmiş (IV. sınıf) su olarak sınıflanmıştır. Ayrıca jeotermal akışkan Mn konsantrasyonuna göre III. sınıf su kalitesinde, Ba konsantrasyonuna göre II. sınıf su kalitesindedir. Şanlıyüksel Yücel vd. (2013), Kestanbol jeotermal akışkanının B, Ba, Fe, lityum (Li), Mn ve stronsiyum (Sr)

konsantrasyonun sırası ile 15,01, 1,8, 14,99, 13,96, 1,69 ve 60,64 mg/l olduğunu saptamıştır. Baba ve Sözbilir (2012), Kestanbol jeotermal akışkanındaki As konsantrasyonunun 184,3 µg/l olduğunu ve TS 266 (2005) limit değeri olan 10 µg/l'den oldukça yüksek olduğunu ifade etmiştir.

Bor, bitkilerin büyümesi için temel element olmasına rağmen, sınır değer aşılması durumunda bitkiler ölmekte ve birikerek toprağın çoraklaşmasına yol açmaktadır. Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'nde (2015) B için belirtilen limit değer 1 mg/l'dir. Biga Yarımadası'nda Tuzla, Kestanbol, Kepekler, Gönen, Manyas, Çan, Alibey, Palamutoba, Güre, Şanlı-İlıca gibi jeotermal alanlarda belirlenen B konsantrasyonu limit değerden yüksektir (Yalçın ve Sarp, 2012). Tarım arazilerinin bulunduğu ovalarda derindeki jeotermal akiferden yüzeye yakın kesimlerdeki soğuk su akiferine sızıntı ile karışan sular bu akiferlerde B konsantrasyonunun artmasına neden olabilmektedir. Tarım arazilerinin bu akiferlerden beslenen sondajlarla sulanması sırasında B toprağa karışarak toprağın verimsizleşmesine sebep olmaktadır. Kestanbol kaplıcasında kullanılan

jeotermal akışkan kullanıldıktan sonra Ilıca deresine deşarj edilmekte ve batıya doğru Ilıca dere ile taşınarak Ege Denizi'ne drene olmaktadır. Ayrıca Ilıca deresi yüzey akım yolu boyunca, alüvyon akiferden geçmekte ve mevsimsel olarak alüvyon akiferi beslemektedir. Kestanbol jeotermal akışkanı yüksek konsantrasyonda As, B, Fe ve Mn içermesi nedeni ile alüvyon akiferi kirletebilir özelliktedir.

olursa suda yüksek oranda Na^+ bulunduğunu ve sulama için uygun olmadığını gösterir. Yüksek Na^+ konsantrasyonu topraktaki geçirgenliği azaltarak, bitki gelişimini olumsuz etkilemektedir. Hesaplanan KI değeri 5,25 ile 7,01 arasında olup, ortalama değer 6,1'dir. Elde edilen sonuçlara göre Kestanbol jeotermal akışkanının çevreye deşarjı uygundur.



Şekil 7. a) Sondajdan toprağa sızan jeotermal akışkan. b) Kaplıcanın atık suyunun Ilıca deresine deşarjı.
Figure 7. a) Leakage from the well to soil. b) Discharge of waste geothermal fluid into Ilıca stream.

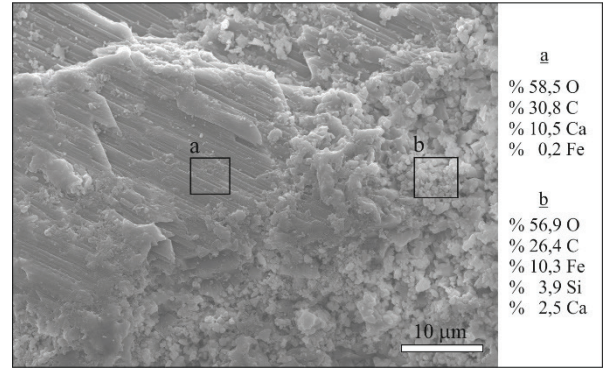
Bu çalışmada, hidrokimyasal analiz sonuçları sodyum absorpsiyon oranı (SAR) (Richards, 1954) ve Kelly indeksi (KI) (Kelly, 1963) kullanılarak jeotermal akışkanın çevreye deşarjının uygunluğu değerlendirilmiştir (Eşitlik 1 ve 2). Hesaplamalarda kullanılan tüm iyon konsantrasyonları mek/l'dir. SAR değeri 26'dan büyük ise sulama için uygun olmayan su sınıfını göstermektedir. Kestanbol jeotermal akışkanının SAR değeri 54,52 ile 67,89 arasında olup, ortalama SAR değeri 60,67 olarak hesaplanmıştır. Kelly indeksi 1'den küçük ise sulama için uygun olup, bu değer 1'den büyük

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})}{2}}} \quad (1)$$

$$\text{Kelly indeksi (KI)} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}} \quad (2)$$

Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç ortamında kayaç ile akışkanın etkileşimde olmaları, minerallerin çözünerek jeotermal akışkanın toplam çözünmüş madde miktarının artmasına

yol açmaktadır. Çözünen mineraller belirli termodinamik koşullarda duraylıdır, ancak bu koşulların değişmesiyle mineraller akışkanda doygun hale gelerek çökebilir (Haklıdır Tut, 2017). Kabuklaşma (mineral çökmesi) jeotermal akışkanın geçtiği kıyı, boru hattı vb. yerlerde akışkanın içerisindeki element ve bileşiklerin uygun koşullar sağlandığı takdirde çökerek mineral ve katı bileşikler oluşturması olarak tanımlanmaktadır (Aksoy, 2007). Kestanbol jeotermal akışkanı yüzeye ulaştığında değişen sıcaklık ve basınç koşulları ile mineral çökmesi meydana gelmektedir. Kestanbol jeotermal akışkanın sebep olduğu kabuklaşma arazide genellikle sarı ve turuncu, yer yer beyaz renklere gözlenmiştir. ICP-MS analiz sonuçlarına göre kabuk %30,35 Fe₂O₃, %25,19 CaO, %12,65 SiO₂, %1,04 Na₂O, %0,44 MnO, %0,23 K₂O, %0,22 MgO ve %0,01 Al₂O₃ bileşimindedir. Metal(loid) konsantrasyonu Fe>Mn>As>Al>Zn>Pb>Ni diziliminde olup, As, Fe ve Mn konsantrasyonu Krauskopf (1979) tarafından belirlenen Dünya kıtasal kabuk ortalama değerinden yüksektir (Çizelge 2). XRD analizine göre kabuk, kalsit ve halit minerallerinden oluşmaktadır. SEM-EDX analizi ile kabuk örneklerinde kalsit ve halit minerallerinin yanı sıra XRD analizi ile tespit edilmeyen siderit olduğu düşünülen FeCO₃ mineralleri saptanmıştır (Şekil 8). EDX analiz sonuçlarına göre siderit mineralinin bileşimi %10,3 Fe, %26,4 C ve %56,9 O'den oluşmaktadır. Ayrıca kabuk örneklerinin EDX analizlerinde O, C, Fe, Ca, Si, Na, Cl, Al, Mg ve Mn saptanmıştır. Kestanbol jeotermal sondajındaki kabuklaşma problemi tesise ısıtma ve balneolojik amaçlar için taşınan akışkanın boruların daralması veya tıkanması ile debinin ve ısı transferinin azalmasına ve verim kaybına sebep olabilir.



Şekil 8. Kabuk örneğinde saptanan kalsit ve siderit minerallerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları.

Figure 8. SEM image of calcite and siderite minerals in scale and EDX analyses.

Toprak örnekleri ICP-MS analizine göre %43,88CaO,%8,2Fe₂O₃,%6,64SiO₂,%1,21Na₂O,%0,68Al₂O₃ ve %0,65MnO'ten oluşmaktadır. Toprağın metal(loid) konsantrasyonu dizilimi sırası ile Fe>Mn>Al>As>Zn>Pb>Ni olup, As, Fe ve Mn konsantrasyonu kıtasal kabuk ortalama değerinden yüksektir. Toprak mineralojik olarak kalsit, halit, plajyoklas ve kuvars minerallerinden oluşmaktadır. SEM analizi ile toprak örneklerinde kalsit mineralleri saptanmış olup, EDX analizi ile kalsitin %9,5 Ca, %29,6 C ve %60,4 O'den oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 9a). Toprak örneklerinin EDX analizinde O, C, Ca, Fe, Si, Na, Cl, Al, Mn, Mg ve K elementleri tespit edilmiştir. Ayrıca SEM-EDX analizleri ile toprak örneklerinde farklı türlere ait 2-4 µm genişliğinde ve 8-12 µm uzunluğunda silindirik şeklinde, gözenekleri 250-330 nm çapında diatom kavrıkları saptanmıştır (Şekil 9b). Diatom, kavrıkları amorf silisten oluşan, ökaryotik, tek hücreli, her türlü sucul ortamda yaşayabilen mikroskobik algdir. Bu amorf silis çeşitli oranlarda Al, Fe, Ca, Mg, Na, K elementlerinin silikatları ile birlikte bulunmaktadır

Çizelge 2. Kabuk, toprak ve sediment örneklerinin metal(loid) konsantrasyonları, zenginleşme faktörü (EF) ve jeobirikim indeksi (I_{geo}) değerleri.

Table 2. Metal(loid) concentrations of scale, soil and sediment, and degree of contamination.

		Al	As	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Kabuk (n=2)		100	462,6	212300	3400	0,1	0,45	5,5
Toprak (n=3)	mg/kg	3600	76,45	57400	5000	1,85	4,9	5,25
Sediment (n=4)		63000	231,85	90700	1100	20,7	35,8	46
Dünya kıtasal kabuk ortalaması*		81000	1,8	54000	1000	75	12,5	70
Zenginleşme faktörü (EF)	Kabuk	0,0003	65,36	-	0,86	0,0003	0,009	0,01
	Toprak	0,041	40,05	-	4,7	0,02	0,36	0,07
	Sediment	0,46	76,68	-	0,65	0,16	1,7	0,39
Jeobirikim indeksi (I_{geo})	Kabuk	-10,24	7,42	1,39	1,18	-10,13	-5,38	-4,25
	Toprak	-5,07	4,82	-0,49	1,73	-5,92	-1,93	-4,32
	Sediment	-0,94	6,42	0,16	-0,44	-2,44	0,93	-1,19

*Krauskopf (1979)

(Özbey ve Atamer, 1987). Diyatomlar ekosistemdeki değişiklikleri yansıtmaları sebebi ile biyoizleme çalışmalarında biyoindikatör olarak kullanılmaktadır (Cattaneo vd., 2011; Şanlıyüksel Yücel ve Baba, 2018). EDX analiz sonuçlarında diyatomun kimyasal bileşimi temel olarak %68,5 O ve %15,3 Si'dan oluşmaktadır. Dere sedimentinin kimyasal bileşimi SiO_2 (%49,75), Fe_2O_3 (%12,97), Al_2O_3 (%11,9), CaO (%6,11), Na_2O (%3,18), K_2O (%3,06) ve MgO 'ten (%1,47) oluşmaktadır. Dere sedimentinin metal(loid) konsantrasyonu $Fe > Al > Mn > As > Zn > Pb > Ni$ diziliminde olup, As, Fe ve Mn konsantrasyonu kıtasal kabuk ortalama değerinden yüksektir. XRD analiz sonuçlarında dere sedimentinin kuvars, illit/mika, aktinolit-tremolit, plajiolklas, alkali feldspat, pirit, smektit grubu mineral, kalsit, kaolen grubu mineral, halit minerallerinden oluştuğu tespit edilmiştir. EDX analizi ile dere sedimentinde O, C, Si, Fe, Al, Ca, Na, K, Mg ve Mn tespit edilmiştir.

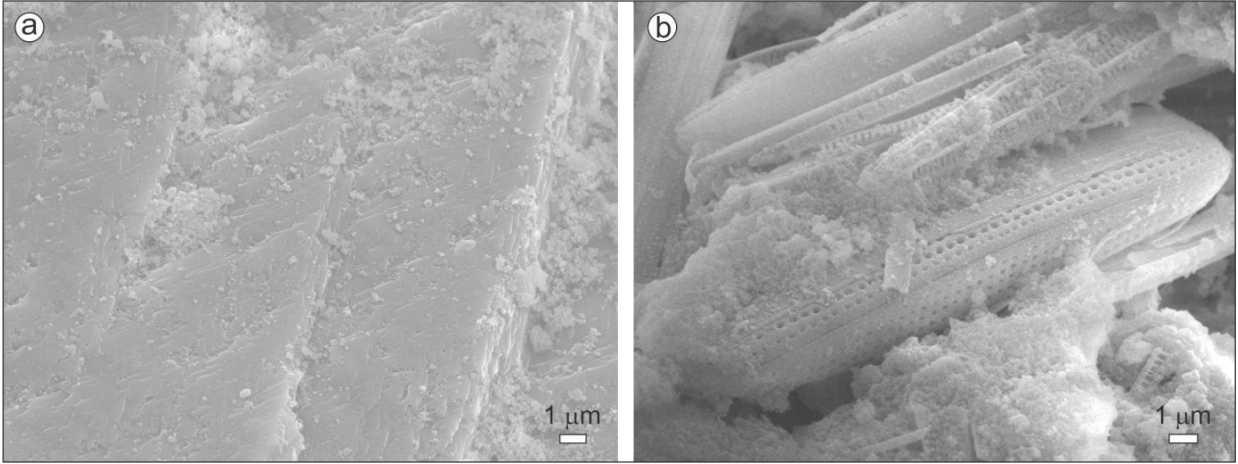
Jeotermal akışkanın toprak ve dere sedimenti üzerindeki antropojenik kaynaklı metal(loid) kirliliğinin saptanmasında kantitatif indekslerden olan zenginleşme faktörü (EF) ve

jeobirikim indeksinden (I_{geo}) yararlanılmıştır (Eşitlik 3 ve 4). EF, ölçümü yapılan elementlerin ve background (temel) değerlerin referans elementlere oranlanması ile hesaplanır. Kullanılan referans elementler genellikle Al, Fe ve Mn'dır (Liu vd., 2005; Şanlıyüksel Yücel, 2019). Bu çalışmada zenginleşme faktörü hesaplanırken referans element olarak Fe kullanılmıştır. EF ve I_{geo} hesaplamalarında Dünya ortalama kıtasal kabuk değerleri background değerler olarak kullanılmıştır. Sutherland (2000), EF değerini beş ayrı kirlilik sınıfında değerlendirmiştir (Çizelge 3). Müller (1979; 1986) I_{geo} sonuçlarını yedi ayrı sınıfta değerlendirmiştir (Çizelge 4).

$$EF = \frac{(C_x/C_{ref})_{örnek}}{(C_x/C_{ref})_{background}} \quad (3)$$

$(C_x/C_{ref})_{örnek}$: Örnekte ölçülen metal(loid) konsantrasyonunun aynı örnekte ölçülen Fe konsantrasyonuna oranı,

$(C_x/C_{ref})_{background}$: Kıtasal kabuktaki metal(loid)in Fe konsantrasyonuna oranıdır.



Şekil 9. a) Toprak örneklerinde saptanan kalsit mineralinin SEM görüntüsü. b) Toprak örneklerinde saptanan diatom morfolojilerinin SEM görüntüsü.

Figure 9. a) SEM image of calcite mineral in soil. b) SEM image of diatom morphologies in soil.

Çizelge 3. Zenginleşme faktörü sınıflaması (Sutherland, 2000).

Table 3. Classification of enrichment factor (Sutherland, 2000).

Değer aralıkları	Sediment kalitesi
EF < 2	Az zenginleşme
2 ≤ EF < 5	Orta derecede zenginleşme
5 ≤ EF < 20	Önemli derecede zenginleşme
20 ≤ EF < 40	Çok yüksek miktarda zenginleşme
EF ≥ 40	Aşırı miktarda zenginleşme

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5B_n} \quad (4)$$

C_n : Örnekte ölçülen metal(loid) konsantrasyonu,
 B_n : İlgili metal(loid) konsantrasyonunun kıtasal kabuktaki background değeridir. Hesaplama kullanılan 1,5 sabit değeri background değerindeki litojenik etkilere bağlı olarak olası küçük değişimlerin etkisini en aza indirmek için kullanılmaktadır (Salah vd., 2012; Şanlıyüksel Yücel ve Baba, 2018).

Çizelge 4. Jeobirikim indeksi sınıflaması (Müller, 1979; 1986).

Table 4. Classification of geoaccumulation index (Müller, 1979; 1986).

Değer aralıkları	Sınıf	Sediment kalitesi
$I_{geo} < 0$	0	Kirlenmemiş
$0 < I_{geo} < 1$	1	Kirlenmemiş-orta kirlenmiş
$1 < I_{geo} < 2$	2	Orta kirlenmiş
$2 < I_{geo} < 3$	3	Orta-çok kirlenmiş
$3 < I_{geo} < 4$	4	Çok kirlenmiş
$4 < I_{geo} < 5$	5	Çok-aşırı kirlenmiş
$I_{geo} > 5$	6	Aşırı kirlenmiş

Kabuk, toprak ve dere sedimenti örneklerinde hesaplanan EF-As değerleri 40'tan büyük olduğu ve Sutherland (2000) EF sınıflamasına göre örneklerin As açısından aşırı miktarda zenginleşme gösterdiği saptanmıştır (Çizelge 2). Toprak örneği için hesaplanan EF-Mn değeri 4'ten büyük olup, Mn orta derecede zenginleşme göstermektedir. Diğer metallerin EF değeri 2'den küçük olarak hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama I_{geo} sonuçlarına göre metal(loid) birikim düzeyleri

sıralaması; kabukta $As>Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Al$, toprakta $As>Mn>Fe>Pb>Zn>Al>Ni$ ve dere sedimentinde $As>Pb>Fe>Mn>Al>Zn>Ni$ diziliminde olduğu tespit edilmiştir. Müller (1979; 1986) sınıflamasına göre kabuktaki I_{geo} -As değeri sınıf 6'da, I_{geo} -Fe ve Mn değeri sınıf 2'de yer almaktadır. Topraktaki I_{geo} -As değeri sınıf 5'te ve I_{geo} -Mn ise sınıf 2'dedir. Dere sedimentindeki I_{geo} -As sınıf 6'da ve I_{geo} -Fe ve Pb sınıf 1'de yer almaktadır. Tüm örneklerde I_{geo} -Al, Ni ve Zn değerlerinin 0'ın altında olması nedeni ile bu metaller herhangi bir kirlilik sunmamaktadır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kestanbol jeotermal alanı jeolojik ve morfolojik özellikleri, jeotermal kaynakları, Ege Denizi'ne olan yakın konumu gibi farklı özelliklerine bağlı olarak tarih boyunca ilgi odağı olmuştur. Bu çalışmada Kestanbol jeotermal alanında bulunan bir jeotermal sondaj ve iki jeotermal kaynağın hidrokimyasal özellikleri belirlenerek, çevre üzerindeki etkileri saptanmıştır. Jeotermal akışkanın sıcaklığı 59,5 ile 74,1°C arasında değişmektedir. Yüksek EC değerine sahip akışkan NaCl su tipinde olup, toplam ortalama NaCl konsantrasyonu 19511 mg/l'dir. Kestanbol jeotermal akışkanının EC değeri ve Na^+ , Cl^- , B, Ba, Fe ve Mn konsantrasyonu bakımından TS 266'ya göre izin verilen maksimum değerlerin üzerindedir. Bu nedenle içilerek tüketilmesi uygun değildir. Tesisin jeotermal atık suyunu Ilıca deresine deşarj etmesi sonucunda ısıl ve kimyasal kirlenmeye neden olmaktadır. Ayrıca Kestanbol jeotermal akışkanı yüksek oranda çözünmüş iyon içermesi nedeni ile alüvyon akiferi kirletebilir özelliktedir. Saha çalışmalarında Kestanbol jeotermal akışkanının sebep olduğu kabuklaşma problemi tespit edilmiştir. XRD ve SEM-EDX analizleri ile kabuğu oluşturan minerallerin kalsit, halit ve siderit olduğu saptanmıştır. Jeotermal sondajdaki kabuklaşma problemi tesise ısıtma

ve balneolojik amaçlar için taşınan akışkanın boruları daraltması veya tıkanması ile debinin ve ısı transferinin azalmasına sebep olmaktadır. Jeokimyasal analiz sonuçlarına göre kabuk, toprak ve dere sedimentindeki As, Fe ve Mn konsantrasyonunun Dünya kıtasal kabuk ortalama değerinden yüksek olduğu saptanmıştır. Hem jeotermal akışkanda hem de kabuk örneklerinde saptanan yüksek metal(loid) konsantrasyonunun sebebi su-kayaç etkileşimidir. Toprak ve dere sedimentindeki As ve Mn zenginleşmesi antropojenik etki ile jeotermal akışkanın çevreye deşarjı ile ilişkilidir. Isıl ve kimyasal kirliliğin önlenmesi için jeotermal akışkanın Ilıca deresine deşarj edilmemesi gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda Kestanbol jeotermal alanındaki soğuk yüzey ve yeraltı sularından örneklemeler yapılarak jeotermal akışkan ile soğuk suyun hidrokimyasal ilişkisinin ortaya konması önerilir. Tesisin ısıtılması, termal turizm ve balneolojik uygulamalarda kullanılan Kestanbol jeotermal akışkanının konut ve sera ısıtması gibi kullanım alanlarının geliştirilmesi ile bölgenin ekonomisine ve çevreye olumlu yönde katkı sağlayacaktır.

EXTENDED SUMMARY

Turkey, located in the Alpine-Himalayan orogenic belt, has high geothermal energy potential due to geologic and active tectonic structure. In Turkey, 227 geothermal fields with temperature varying from 20 to 287°C and nearly 2000 hot and mineral springs have been identified (Mertoğlu et al., 2015; Lund and Boyd, 2016). The Kestanbol geothermal field located in the ancient city of Alexandria Troas is one of the geothermal areas with highest temperature in the Biga Peninsula, affected by the western extension of the North Anatolian Fault and Western Anatolia Graben Systems. Kestanbol geothermal field contains several geothermal springs with low flow and a well drilled by MTA in 1975. The geothermal fluid obtained from the well

is used to heat facilities for thermal tourism and balneological aims. The waste geothermal fluid from the facility is discharged into Ilıca stream and the geothermal fluid seeping from the well is discharged into soil. In this study, hydrochemical characterization of Kestanbol geothermal fluid was determined, and the environmental effects of geothermal fluid on soil and stream sediment were evaluated.

The Kestanbol geothermal well and springs have surface temperature, pH and electrical conductivity (EC) values of 59.5 to 74.1°C, 6.45 to 6.71, and 30.3 to 35.5 mS/cm, respectively. According to International Association of Hydrogeologists (IAH, 1979) water classification, the Kestanbol geothermal fluid is NaCl water type, with mean NaCl concentration of 19511 mg/L. The major cation sequence in Kestanbol geothermal fluids is $Na^+ > Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$, with anion sequence of $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$. Yalçın and Sarp (2012) calculated the reservoir temperature for Kestanbol geothermal fluid as 156, 251, 239 and 139°C using SiO_2 , Na/K, Na/K/Ca and Na/Li geothermometers, respectively. Baba and Ertekin (2007) stated the tritium content of the geothermal well was 0.22 TU. Low tritium, high EC and Cl concentration indicate the Kestanbol geothermal fluid has deep water circulation.

The temperature and EC of Kestanbol geothermal fluid, in addition to Na^+ , Cl, B, Ba, Fe, and Mn concentrations, are above the maximum values permitted by the TS 266 (2005). Additionally, according to the Turkish Inland Water Quality Regulations (2015), the temperature, EC, Na^+ , Cl, B and Fe in the geothermal fluid are classified as heavily polluted water (class IV). The Kestanbol geothermal fluid has very high B, Ba, Fe, Li, Mn, and Sr concentrations identified as 15.01, 1.8, 14.99, 13.96, 1.69, and 60.64 mg/L, respectively (Şanlıyüksel Yücel et al., 2013). Baba and Sözbilir (2012) stated the As concentration of

Kestanbol geothermal fluid was 184.3 µg/L and this far exceeds the TS 266 limit value of 10 µg/L. After the geothermal fluid is used in the Kestanbol facility it is discharged into Ilıca stream and the geothermal fluid is carried west by the stream to drain into the Aegean Sea. Additionally, the surface flow path of the stream passes through an alluvium aquifer and occasionally feeds the aquifer. Due to the elevated concentrations of As, B, Fe and Mn, Kestanbol geothermal fluid can contaminate the alluvium aquifer.

One of the most important problems in Kestanbol geothermal field is scaling. Scale samples are generally observed to have yellow and orange, or occasionally white color in the field. According to XRD and SEM-EDX analysis, the scale comprises calcite, halite and siderite minerals. ICP-MS analysis results of scale found 30.35% Fe_2O_3 , 25.19% CaO, 12.65% SiO_2 and 1.04% Na_2O composition. The metal(loid) concentration sequence is $Fe > Mn > As > Al > Zn > Pb > Ni$ and As, Fe and Mn concentrations are above the mean values for continental crust determined by Krauskopf (1979). As scaling reduces the well diameter, continuous flow reduction causes production and efficiency loss. The scaling in Kestanbol geothermal well also causes narrowing or blockage of pipes carrying fluid to the facility and a reduction in flow and heat transfer.

Soil samples mineralogically comprise calcite, halite, plagioclase and quartz. ICP-MS analysis of soil samples found 43.88% CaO, 8.2% Fe_2O_3 , 6.64% SiO_2 , 1.21% Na_2O , 0.68% Al_2O_3 , and 0.65% MnO. The metal(loid) concentration sequence for soil is $Fe > Mn > Al > As > Zn > Pb > Ni$ with As, Fe and Mn concentrations above the mean value for continental crust. The SEM-EDX analysis of soil identified different species of diatoms. As diatoms reflect changes in the ecosystem, they are used as bioindicators in biomonitoring studies (Cattaneo et al., 2011; Şanlıyüksel Yücel and

Baba, 2018). The EDX results showed that the chemical composition of diatoms is 68.5% O and 15.3% Si. XRD analysis results identified quartz, illite/mica, actinolite-tremolite, plagioclase, alkali feldspar, pyrite, smectite group minerals, calcite, kaolin group minerals and halite minerals in stream sediment. The chemical composition of stream sediment comprised SiO₂ (49.75%), Fe₂O₃ (12.97%), Al₂O₃ (11.9%), CaO (6.11%), Na₂O (3.18%), K₂O (3.06%), and MgO (1.47%). The metal(loid) concentration of stream sediment is Fe>Al>Mn>As>Zn>Pb>Ni, with As, Fe and Mn concentrations above the mean value for continental crust.

In this study, the geoaccumulation index (I_{geo}) and enrichment factor (EF) were used to assess the levels of metal(loid) contamination in scale, soil and stream sediment. The EF-As calculated for scale, soil and stream sediment samples were identified to be above 40. According to Sutherland (2000) classification, scale, soil and stream sediment were determined to be extremely enriched in As. The EF-Mn calculated for the soil sample was greater than 4 and Mn showed moderate enrichment. The EF values for Al, Ni, Pb and Zn indicate minimal enrichment. Among the studied metal(loid)s, the I_{geo} values were in increasing order of As>Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Al, As>Mn>Fe>Pb>Zn>Al>Ni and As>Pb>Fe>Mn>Al>Zn>Ni in the scale, soil and stream sediment, respectively. From the I_{geo} -As values, scale and stream sediment samples were determined to be “extremely contaminated”. For scale, the I_{geo} -Fe and Mn were calculated as 1.39 and 1.18, respectively, which indicates moderate metal contamination. In soil, I_{geo} -As and Mn was determined as class 5 (strongly to extremely strongly contaminated) and 2 (moderately contaminated), respectively. I_{geo} -Fe and Pb values of stream sediment were class 1 (uncontaminated to moderately contaminated). For all samples, the I_{geo} -Al, Ni and Zn values were less than 0 and defined as “practically uncontaminated”.

Arsenic, Fe and Mn enrichments in scale, soil and stream sediments are due to interactions between geothermal fluids and reservoir rocks. Discharged into the environment with anthropogenic effects, the geothermal fluids cause metal(loid) pollution in soil and stream sediments. To prevent environmental pollution, it is recommended that geothermal fluids and waste waters from the facility should not be discharged into the soil and İlica stream. Sampling should be performed for cold surface waters and groundwater in the Kestanbol geothermal field to reveal the hydrochemical relationship between geothermal fluid and cold water. Areas of use, such as residential-greenhouse heating, etc., should be developed for the Kestanbol geothermal fluid, currently used to heat facilities for thermal tourism and balneological purposes, which will positively contribute to the economy and environment in the region.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FHD-2019-2877 no’lu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar görüş ve önerileri için hakemlere teşekkürlerini sunar.

ORCID

Harika MARMARA  <https://orcid.org/0000-0001-8044-715X>

Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL  <https://orcid.org/0000-0001-6546-5624>

Süha ÖZDEN  <https://orcid.org/0000-0001-6321-0812>

Mehmet Ali YÜCEL  <https://orcid.org/0000-0001-6956-5219>

DEĞİNİLEN BELGELER / REFERENCES

- Aksoy, N., 2007. Jeotermal sahalarda kabuklaşma ve çözüm yöntemleri. Jeotermal Enerji Semineri, 143–153.
- Baba, A., Ertekin, C., 2007. Determination of the source and age of the geothermal fluid and its effects on groundwater resources in Kestanbol (Çanakkale-

- Turkey). GQ07: Securing Groundwater Quality in Urban and Industrial Environments, 7th International Groundwater Quality Conference, Fremantle, Western Australia, 2–7 December 2007, 1–8.
- Baba, A., Sözbilir, H., 2012. Source of arsenic based on geological and hydrogeochemical properties of geothermal systems in Western Turkey. *Chemical Geology*, 334, 364–377.
- Balderer, W., 1994. A multidisciplinary approach for the study of the effects of active tectonics along the North Anatolian fault zone: possibilities for the application of the electrical self potential method. *Annals of Geophysics*, 37(5), 1269–1282.
- Beccaletto, L., 2003. Geology, correlations, and geodynamic evolution of the Biga Peninsula (NW Turkey). Lozan Üniversitesi, İsviçre, Doktora tezi, 140 s., (yayımlanmamış).
- Beccaletto, L., Jenny, C., 2004. Geology and correlation of the Ezine zone: a Rhodope fragment in NW Turkey?. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13 (2), 145–176.
- Bertani, R., 2015. Geothermal power generation in the World-2010-2014 update report. World Geothermal Congress (WGC2015), Proceedings of World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015, R. Horne ve T. Boyd (eds.), International Geothermal Association, Melbourne, 1–19.
- Birkle, P., Merkel, B., 2000. Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufres, Michoacán, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 124(3-4), 371–410.
- Cattaneo, A., Couillard, Y., Wunsam, S., Fortin, C., 2011. Littoral diatoms as indicators of recent water and sediment contamination by metals in lakes. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 572–582.
- Chapman, D., Kimstach, V., 1996. Selection of water quality variables. In: D. Chapman (ed.), *Water Quality Assessments-A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, 2nd ed., Chapman & Hall: E&FN Spon, Cambridge, 59–126.
- Çağlar, K.Ö., 1947. Türkiye maden suları ve kaplıcaları. Maden Tetkik Arama Yayınları, Ankara, Fasikül 2, Seri B, No 11, 249–250.
- Çağlar, I., Demirörer, M., 1999. Geothermal exploration using geoelectric methods in Kestanbol, Turkey. *Geothermics*, 28(6), 803–819.
- Çardak, M., Şanlıyüksel Yücel, D., Ay, M., Söküt Acar, T., Erol Tınaztepe, Ö., 2019. Jeotermal akışkanın hidrokimyasal karakterizasyonunun belirlenmesi: Simav (Kütahya) örneği. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 1–15.
- Doğdu, M.S., Bayarı, S., 2005. Environmental impact of geothermal fluids on surface water, groundwater and streambed sediments in the Akarcay Basin Turkey. *Environmental Geology*, 47, 325–340.
- Erguvanlı, K., Yüzer, E., 1973. Yeraltı Suları Jeolojisi (Hidrojeoloji). İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, Sayı 967, 339 s.
- Erkul, H., 2012. Jeotermal enerjinin ekonomik katkıları ve çevresel etkileri: Denizli-Kızıldere jeotermal örneği. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 10(19), 1–30.
- Eroğlu, A., Aksoy, N., 2003. Jeotermal suların kimyasal analizi. VI. Ulusal Tesisat Kongresi, İzmir, Türkiye, 8-10 Ekim 2003, Jeotermal Enerji Semineri Kitapçığı, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 149–183.
- Gemici, U., Tarcan, G., 2002. Distribution of boron in thermal waters of western Anatolia, Turkey, and examples of their environmental impacts. *Environmental Geology*, 43, 87–98.
- Gevrek, A.İ., Şener, M., Ercan, T., 1986. Çanakkale-Tuzla jeotermal alanının hidrotermal alterasyon etüdü ve volkanik kayaların petrolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 103-104, 55–81.
- Gündüz, O., Şimşek, C., Hasözbeke, A., 2010. Arsenic pollution in the groundwater of Simav Plain, Turkey: its impact on water quality and human health. *Water Air & Soil Pollution*, 205, 43–62.
- Gözler, M.Z., Ergül, E., Akçaören, F., Genç, Ş., Akat, U., Acar, Ş., 1984. Çanakkale boğazı doğusu-

- Marmara Denizi güneyi-Bandırma-Balıkesir-Edremit ve Ege Denizi arasındaki alanın jeolojisi ve kompilasyonu. MTA Rapor No: 7430, (yayımlanmamış).
- Haklıdır Tut, F.S., Batı Anadolu'da Yüksek Sıcaklıklı Jeotermal Sistemlerde Gözlenen Kabuklaşma Türleri ve Kabuklaşma Oluşumunun Kontrolünün Sağlanmasında Kullanılan Sistemler; Kızıldere-II (Denizli) Jeotermal Güç Santrali Örneği. Türkiye Jeoloji Bülteni, 60 (3), 363–382.
- IAH, 1979. Map of mineral and thermal water of Europe. Scale 1:500.000, International Association of Hydrogeologists, Paris, France.
- Kalafatçıoğlu, A., 1963. Ezine civarının ve Bocaada'nın jeolojisi, kalker ve serpantinlerinin yaşı. MTA Dergisi, 60, 61–70.
- Karagülle, M.Z., Doğan, M.B., 2002. Kaplıca Tıbbi ve Türkiye Kaplıca Rehberi. Nobel Tıp Kitapevi, İstanbul, 48 s.
- Kelly, W.P., 1963, Use of saline irrigation water. Soil Science, 95, 355–391.
- Koçak, A., 2002. Jeotermal uygulamalar ve MTA. Jeotermalde Yer bilimsel Uygulamalar Yaz Okulu Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeotermal Enerji ve Araştırma Merkezi, İzmir, 119–131.
- Krauskopf, K.B., 1979. Introduction to Geochemistry, 2nd edition. McGraw-Hill International series in the Earth and Planetary Sciences, 617 s.
- Kristmannsdottir, H., Armannsson, H., 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. Geothermics, 32(4-6), 451–461.
- Liu, W.H., Zhao, J.Z., Ouyang, Z.Y., Soderlund, L., Liu, G.H., 2005. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China. Environment International, 31(6), 805–812.
- Lund, J.W., Boyd, T.L., 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. Geothermics, 60, 66–93.
- Mertoğlu, O., Şimşek, Ş., Başarır, N., 2015. Geothermal country update report of Turkey (2010–2015). Proceedings of World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-24 April 2015, International Geothermal Association, Bonn, 1–7.
- Mutlu, H., Güleç, N., Hilton, D.R., 2014. Chemical and isotopic constraints on the origin of thermal waters in Anatolia, Turkey: fluid-mineral equilibria approach, (Geothermal Systems and Energy Resources: Turkey and Greece, Editörler: Baba, A., Bundschuh, J., Chandrasekharam, D.), Sustainable Energy Development Series, CRC Press, Taylor & Francis, 39–50.
- Müller, G., 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. Umschau, 79, 778–783.
- Müller, G., 1986. Schadstoffe in Sedimenten-Sedimente als Schadstoffe. Mitt, Österreichische Geologische Gesellschaft, 79, 107–126.
- Mützenber, S., 1997. Nature and origin of the thermal springs in the Tuzla area, Western Anatolia, Turkey. (Active Tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Poly-Project, Editörler: Schindler, C., Pfister, M.). VDF Hochschul Verlag AG an der ETH Zurich, 301–320.
- Nicholson, K., 1993. Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques. Springer-Verlag, Berlin, 263 s.
- Ölmez, E., 1976. Çanakkale-Ezine Kestanbol sıcak su 1. sondajı kuyu bitirme raporu. Manden Tetkik ve Arama Enstitüsü Rapor No: 5595, 3 s., (yayımlanmamış).
- Özbey, G., Atamer, N., 1987. Kizelgur (Diatomit) hakkında bazı bilgiler. 10. Türkiye Madencilik Bilimsel Teknik Kongresi, 11-15 Mayıs 1987, Ankara, 493–502.
- Özen Balaban, T., Bülbül, A., Tarcan, G., 2017. Review of water and soil contamination in and around Salihli geothermal field (Manisa, Turkey). Arabian Journal of Geosciences, 10, 523.
- Piper, A.M., 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Transactions of the American Geophysical Union, 25, 914–928.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agricultural hand book

- 60, U.S. Deptment of Agriculture, Washington D.C., 160 s.
- Salah, E.A.M., Zaidan, T.A., Al-Rawi, A.S., 2012. Assessment of heavy metals pollution in the sediments of Euphrates River, Iraq. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 1009–1023.
- Sarp, S., Burçak, M., Yıldırım, T., Yıldırım, N., 1998. Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları ile Balıkesir-Havran-Derman kaplıca sahasının detay jeotermal etüdü ve gradyan sondajları. MTA Rapor No: 10537, (yayımlanmamış).
- Schoeller, H., 1955. *Geochimie des Eaux Souterraines*. Revue de l'Institut Francais du Petrole, Paris, 10 (3), 181–213, 10 (4), 219–246.
- Siyako, M., Burkan, K.A., Okay, A.I., 1989. Biga ve Gelibolu Yarımadaı'nın Tersiyer jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği (TPJD) Bülteni*, 1 (3), 183–199.
- Sutherland, R.A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39, 611–627.
- Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası. Reform Matbaası, Beyler, İzmir, 548 s.
- Şamilgil, E., 1966. Çanakkale'nin Tuzla ve Kestanbol sıcak su havzalarında jeotermik enerji araştırması yönünden hidrojeolojik etüt. MTA Rapor No: 4274, 53 s., (yayımlanmamış).
- Şanlıyüksel, D., Baba, A., 2011. Hydrogeochemical and isotopic composition of a low temperature geothermal source in northwest Turkey: Case study of Kirkgeçit geothermal area. *Environmental Earth Sciences*, 62, 529–540.
- Şanlıyüksel Yücel, D., Karaca, Z., Yücel, M.A., 2013. Determining hydrogeochemical characteristics of geothermal resources in Biga Peninsula (city of Canakkale), NW Turkey. 40th International Association of Hydrogeologists Congress, 15-20 September 2013, Perth, Australia, 261.
- Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M.A., 2017. Determining hydrochemical characteristics of mine lakes from abandoned coal mines and 3D modelling of them using unmanned aerial vehicle. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23 (6), 780–791.
- Şanlıyüksel Yücel, D., Baba, A., 2018. Determining water and sediment quality related to lead and zinc mining activity. *Archives of Environmental Protection*, 44 (3), 19–30.
- Şanlıyüksel Yücel, D., 2019. Characterization and comparison of mine wastes in Can Coal Basin, northwest Turkey: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 78, 154.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., 1992. Türkiye Diri Fay Haritası (Ölçek 1/2.000.000). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Şimşek, Ş., 1997. Geochemical potential in northwestern Turkey. (Active Tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Poly-Project, Editörler: Schindler, C., Pfister, M.). VDF hochschulverlag AG an der ETH Zurich, 111–123.
- Şimşek, Ş., Yıldırım, N., Gülgör, A., 2005. Developmental and environmental effects of the Kızıldere geothermal power project, Turkey. *Geothermics*, 34 (2), 234–251.
- Şimşek, Ş., 2015. Dünya'da ve Türkiye'de jeotermal gelişmeler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası III. Jeotermal Kaynaklar Sempozyumu, 4-6 Kasım 2015, Ankara, 1–17.
- TS 266, 2005. İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Resmî Gazete Tarihi: 17.02.2005, Resmî Gazete Sayısı: 25730.
- Yalçın, T., 2007. Geochemical characterization of the Biga Peninsula thermal waters (NW Turkey). *Aquatic Geochemistry*, 13 (1), 75–93.
- Yalçın, T., Sarp, S., 2012. Biga Yarımadası Termal Sularının Jeokimyasal ve Jeotermal Potansiyeli. Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi, E. Yüzer ve G. Tunay (Editörler), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayın Serisi, Ankara, 289–301.
- Yenal, O., Kanan, E., Bilecen, L., Öz, G., Öz, Ü., Göksel, A., Alkan, H., Kutluat, S., Yassa, K., 1975.

Türkiye Maden Suları: Marmara Bölgesi, İstanbul Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Hidroklimatoloji Kürsüsü, İstanbul, 212 s.

Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği, 2015. Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, Resmî Gazete Tarihi: 15.04.2015, Resmî Gazete Sayısı: 29327.