

Jeotermal Akışkanın Hidrokimyasal Karakterizasyonunun Belirlenmesi: Simav (Kütahya) Örneği

Mine Çardak^{1*}, Deniz Şanlıyüksel Yücel², Mustafa Ay³,
Tuğba Söküt Acar⁴, Özlem Erol Tınaztepe⁵

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu Balıkçılık Teknolojisi Bölümü

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

³Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Gıda Teknolojisi Bölümü

⁴Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, İstatistik Bölümü,

⁵Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Programı

01.04.2019 Geliş/Received, 24.05.2019 Kabul/Accepted

Özet

Yüksek sıcaklık ve basınç altında jeotermal akışkan ile uzun süre etkileşim içerisinde olan kayadaki birçok metal(loid) çözünerek suya geçmektedir. Jeotermal akışkanın içerdiği yüksek metal ve iz element konsantrasyonu nedeni ile çevresindeki su kaynakları üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Kütahya ili Simav ilçesinde Eynal, Naşa ve Çitgöl jeotermal alanları yer almaktadır. Jeotermal akışkan termal turizm, konut ve sera ısıtması amaçlı olarak kullanılmakta, atık suyu Simav çayına deşarj edilmektedir. Bölgede reenjeksiyon kuyusu bulunmamaktadır. Bu çalışmada Simav ilçesindeki jeotermal akışkanın hidrokimyasal karakterizasyonunun belirlenmesi ve olası çevresel etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç ile Eynal, Naşa ve Çitgöl jeotermal alanlarından 2014 ve 2015 yıllarında yağışlı ve kurak dönem olmak üzere 2 kez ve toplam 22 jeotermal sondajdan su örnekleme yapılmıştır. Elde edilen hidrokimyasal analiz sonuçları ulusal standartlarla karşılaştırılarak, istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Jeotermal akışkanın sıcaklığı 60.05-88.8 °C, elektriksel iletkenlik değeri 1596-2271 µS/cm arasında ölçülmüştür. Jeotermal akışkanın katyon dizilimi Na⁺> K⁺> Ca²⁺> Mg²⁺, anyon dizilimi ise SO₄²⁻> HCO₃⁻> Cl⁻ şeklinde olup, akışkanın su tipi Na-SO₄-HCO₃'tür. As (684 µg/l), B (4203 µg/l), Fe (612 µg/l) ve Mn (531 µg/l) konsantrasyonu limit değerlerin üzerindedir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre jeotermal akışkan Na⁺, SO₄²⁻, As ve B konsantrasyonuna göre çok kirlenmiş sular sınıfında yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: çevresel etki, jeotermal akışkan, hidrokimya, Simav

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Mine Çardak

(e-posta: mine_bio98@hotmail.com)

ÇOMÜ BAP Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje numarası: FBA-2014-226

Hydrochemical Characterization of Geothermal Fluid: A case study from Simav (Kütahya)

Abstract

Many metal(loid)s in rocks are dissolved during long-term interactions with geothermal fluids at high temperature and pressure. Due to the high metal and trace element concentration contained in geothermal fluids, they have negative effects on surrounding water resources. The Eynal, Naşa and Çitgöl geothermal fields are located in Simav county in Kütahya province. The geothermal fluids are used for thermal tourism, residential and greenhouse heating, with wastewater discharged into the Simav river. There is no reinjection well in the region. This study aimed to determine the hydrochemical characterization and to assess the probable environmental effects of the geothermal fluid in Simav county. With this aim, water samples were taken from the Eynal, Naşa and Çitgöl geothermal fields twice during rainy and dry periods in 2014 and 2015 and from a total of 22 geothermal well. The hydrochemical analysis results were compared with national standards and statistically assessed. The geothermal fluids had temperature of 60.05-88.8 °C with electrical conductivity values measured as 1596-2271 µS/cm. The cation sequence in the geothermal fluid was $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$, with anion sequence of $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$ and the water type of the fluid was Na-SO₄-HCO₃. Arsenic (684 µg/l), B (4203 µg/l), Fe (612 µg/l), and Mn (531 µg/l) concentrations were above limit values. According to the Turkish Water Pollution Control Regulations, the geothermal fluids are classified as heavily polluted water according to Na⁺, SO₄²⁻, As and B concentrations.

Keywords: environmental effect, geothermal fluid, hydrochemistry, Simav

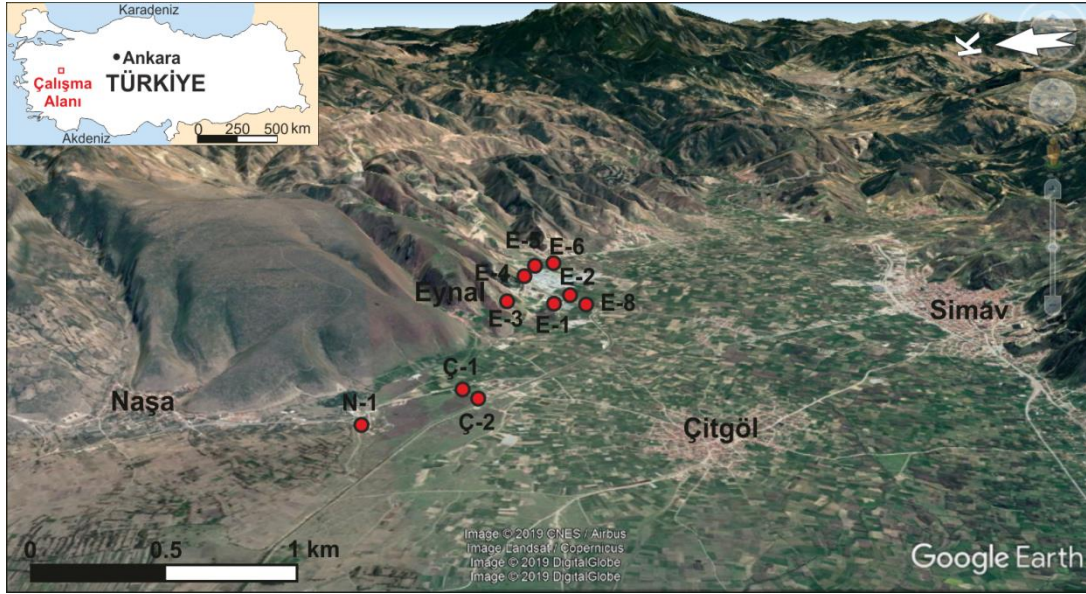
1. Giriş

Jeotermal enerji, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu, sıcaklıkları sürekli olarak bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki normal yer altı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su ve buharın yeryüzüne taşıdığı ısı enerjisi olarak tanımlanır (Akkuş, 2002). Genç tektonizma ve volkanizmanın yoğun olduğu, Alp-Himalaya orojenik kuşağı içerisinde yer alan Türkiye, jeotermal kaynak zenginliği açısından dünyada yedinci sırada bulunmakta olup, Avrupa'da ise birinci sırada yer almaktadır (Şanlıyüksel ve Baba, 2011). Türkiye'deki ilk jeotermal çalışmalar 1960'lı yıllarda Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından başlatılmıştır. Türkiye'de sıcaklığı 20-287°C arasında değişen yaklaşık 2000 sıcak ve mineralli su kaynağı ve ekonomik ölçekte kullanılabilen 227 jeotermal alan belirlenmiştir (Şimşek, 2015). Türkiye'nin teorik jeotermal enerji potansiyeli 31.500 ile 60.000 MWt arasında tahmin edilmekte olup fiili kullanılabilir teknik kapasitesi ise 4809 MWt olarak hesaplanmaktadır (Zaim ve Çavşi, 2018).

Metaller sucül ekosistemlere doğal kaynakların yanı sıra artan antropojenik etki (kentsel ve endüstriyel etkiler, madencilik faaliyetlerinin etkileri, jeotermal kaynaklı etkiler vb.) ile ulaşmaktadır. Ağır metaller ve arsenik doğrudan kansere neden olan kimyasallar olarak tüm Dünya'da dikkatle takip edilmektedir. Bangladeş, Hindistan, Amerika Birleşik Devletleri, Arjantin, Şili, Tayvan ve Çin gibi pek çok ülkede su kaynaklarındaki yüksek metal konsantrasyonlarına bağlı olarak sağlık problemleri saptanmıştır (Baba ve Sozbilir, 2012). Yüksek sıcaklık ve basınç altında su-kayaç etkileşimi çok sayıda mineral, metal ve iz

elementlerin doğal çözünmesinden sorumludur. Jeotermal akışkanın içerdiği yüksek konsantrasyondaki metal ve iz elementlerin yüzey ve yeraltı sularına karışımı ile önemli çevresel kirliliğe neden olmaktadır (Baba ve Armannsson, 2006). Ayrıca yapılan deşarj sonrasında alıcı ortam sıcaklığında oluşan ani değişimler sucul yaşam üzerinde tahribat yaratmaktadır (Gündüz ve ark., 2012). Davraz ve ark. (2017) Büyük Menderes Havzası'nda yer alan Hüdai jeotermal alanındaki jeotermal akışkanın yüzey sularına karıştığını ve yüzey sularında As, Al, B, Fe, Cr, Li, Pb, Mn ve Zn konsantrasyonunun artışına sebep olduğunu saptamıştır. Özen Balaban ve ark. (2017) Salihli jeotermal akışkanının As, B, Br, Fe ve Ni element içeriğinin içme ve sulama suyu standartlarından daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Jeotermal akışkanın kimyasal içeriği rezervuar kayaçlarına bağlı olarak bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Türkiye'de potansiyel oluşturan jeotermal alanların % 78'i Batı Anadolu'da yer almaktadır. Batı Anadolu'daki jeotermal kaynaklar genellikle Batı Anadolu plakasının jeolojik özelliği olan arsenik, bor, antimon, demir ve mangan ile ilişkilendirilmektedir (Gündüz ve ark., 2012; Baysal ve Gündüz, 2016).

Batı Anadolu'daki en önemli jeotermal alanlardan olan Eynal, Naşa ve Çitgöl, Kütahya ili Simav ilçesi sınırlarında yer almaktadır (Şekil 1.1). Simav ilçesi 1515 km² yüz ölçüme sahip olup, bağlı olduğu Kütahya il merkezine 142 km uzaklıktadır. İlçenin toplam nüfusu 64015 kişidir (TUİK, 2018). Simav ilçesi ve çevresi, Ege Bölgesi iklim tipi ile İç Anadolu iklim tipi arasında geçiş bölgesi özelliklerini gösteren Orta Ege iklim bölgesinde yer almaktadır (Şimşek ve Gündüz, 2007). Kütahya meteoroloji istasyonu 1929-2017 yılları arasındaki ölçüm verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık değeri 10.7 °C'dir. En düşük sıcaklık 29.12.1948 tarihinde -28.5 °C, en yüksek sıcaklık 29.07.2000 tarihinde 39.5 °C ölçülmüştür. Sıcaklık ortalamasının en düşük olduğu ay 0.3 °C ile Ocak ayı, en yüksek olduğu ay 20.8 °C ile Temmuz ayıdır. Ortalama aylık toplam yağış miktarı 558 mm, yağışın en düşük olduğu ay 15.8 mm ile Ağustos ayıdır. En yüksek kar yağışı 26.01.2006 tarihinde 60 cm ölçülmüştür. Simav ilçesinde yer alan basınçlı akifer niteliğinde olan ve jeotermal sahaların oluşmasına neden olan derin akifer sistemi olup, bölgede jeotermal akışkanın üretilmesi amacıyla derinliği 1000 m'ye ulaşan sondajlar açılmıştır (Gündüz ve ark., 2012). Sondajlardan elde edilen verilere göre bölgedeki jeotermal akışkanın sıcaklığı 42 ile 162 °C, debisi ise 0.2 ile 80 l/sn arasında değişmektedir. Eynal, Naşa ve Çitgöl jeotermal alanlarındaki akışkan termal turizm, konut ve sera ısıtması amaçlı olarak kullanılmakta, atık suyu kontrolsüz olarak çevredeki derelere deşarj edilmektedir. Bölgede reenjeksiyon kuyusu bulunmamaktadır. Bu çalışmada jeotermal akışkanın hidrokimyasal özelliklerinin belirlenerek olası çevresel etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1.1. Çalışma alanının ve jeotermal sondajların 2018 yılı uydu görüntüsündeki konumu

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Arazi Çalışmaları

Simav ilçesindeki arazi çalışmaları kurak ve yağışlı dönemlerde (Eylül 2014 ve Mart 2015) gerçekleştirilmiştir. Eynal jeotermal alanındaki sondajlardan sekiz (E-1'den E-8'e kadar), Çitgöl jeotermal alanındaki sondajlardan iki (Ç-1 ve Ç-2), Naşa jeotermal alanındaki sondajlardan ise bir (N-1) örnekleme yapılmıştır. Arazi çalışmaları sırasında jeotermal sondajların koordinatları ve yükseklik değerleri Garmin Nuvi 200 marka el tipi GPS ile belirlenmiştir. Jeotermal akışkanın sıcaklık (T, °C), pH, elektriksel iletkenlik (EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$), değerleri arazide WTW Multi 340i pH/iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Kullanılan proplar her ölçüm öncesi ve ölçüm sonrasında saf su ile yıkanarak temizlenmiş, her arazi çalışmasından önce buffer solüsyonları ile günlük kalibrasyonları yapıldıktan sonra kullanılmıştır. Örnekleme için ilk kez kullanılacak olan sert plastik su kapları kullanılmıştır. Suların örnekleme sırasında, örnek kapları doldurulmadan önce örnekleme yapılacak sularla üç kez çalkalanmıştır. İndüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) analizi için alınan su örnekleri, 0.45 μm gözenekli filtrelerle (Millipore), 50 ml'lik kaplara filtrelenmiştir. Elementlerin dibe çökmelerini ve yüzeye tutunmalarını önlemek amacıyla, su örneklerinin pH'ını 2-3 aralığına indirmek için 0.2 ml yüksek saflıktaki nitrik asit (Merck) ilave edilmiştir. Filtreleme işlemi, iyon kromatografisi (IC) analizleri için alınan örneklerde de tekrarlanmıştır ancak, nitrik asit ilavesi yapılmamıştır. Tüm örnekler su kabında hava kalmayacak şekilde doldurularak arazi tipi buzdolabında saklanıp (+4 °C), laboratuvara ulaştırılmıştır.

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Jeotermal akışkanın sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}), alüminyum (Al), arsenik (As), bakır (Cu), baryum (Ba), bor (B), çinko (Zn), demir (Fe), kobalt (Co), krom (Cr), kurşun (Pb), lityum (Li), mangan (Mn), silisyum (Si) analizleri ICP-MS (Nexion 2000, Perkin Elmer, Kağıthane, İstanbul) cihazı ile ACME Laboratuvarında Kanada'da yaptırılmıştır. Analizi yapılan elementlerin dedeksiyon limitleri $\mu\text{g}/\text{l}$ olarak; Na (50), K (50), Ca (50), Mg (50), Al (1), As (0.5), B (5), Ba (0.05), Co (0.02), Cr (0.5), Cu (0.1),

Fe (10), Li (0.1), Mn (0.05) Ni (0.2), Pb (0.1), Si (40), Zn (0.5) şeklindedir. Klorür (Cl^-) ve sülfat (SO_4^{2-}) analizleri IC (LC-20A SP, Shimadzu, Japan) cihazı ile Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi yaptırılmıştır. Bikarbonat (HCO_3^-) tayini Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme laboratuvarında titrasyon yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

2.3. İstatistiksel Analizler

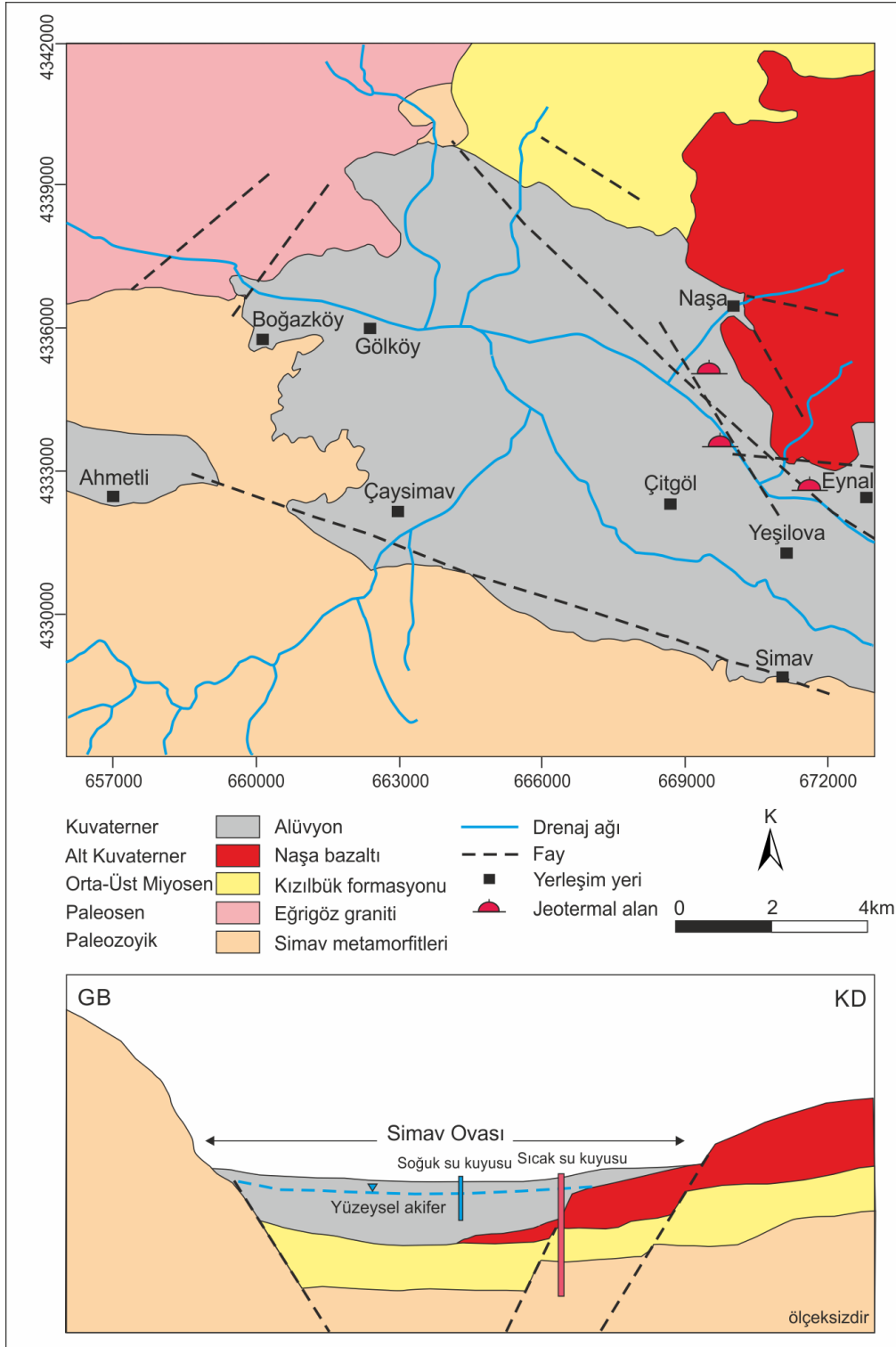
Araştırma için gerekli olan hidrokimyasal veriler elde edildikten sonra bilgisayar ortamına SPSS (SPSS 19.0, IBM, Armonk, NY, ABD) paket programı ile aktarılmıştır. Her bir değişkene ait betimsel istatistikler elde edilmiştir (ortalama \pm standart sapma). Parametrik testlerin uygulanabilmesi için gerekli olan koşullardan biri değişkenlerin normal ya da normale yakın bir dağılım göstermesidir. Bu doğrultuda verilerin normal dağılan bir kitleden gelip gelmediğini sınamak için Shapiro-Wilk testi uygulanmıştır. Test sonucunda dokuz değişkenin (sıcaklık, pH, Ca^{2+} , Ba, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb) normal dağılıma uygunluk göstermediği saptanmıştır. Örneklem genişliği ($n=11$) yeterince büyük olmadığından ve değişkenlerin yaklaşık % 40'ı normal dağılım sergilemediğinden istatistiksel testlerde parametrik olmayan yöntemler kullanılmıştır. İki değişken arasındaki ilişki belirlenirken parametrik olmayan korelasyon katsayısı olan Sperman's rho katsayısı kullanılmıştır. Araştırmada önem düzeyleri 0.01 ve 0.05 olarak alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Simav GD-KB yönlü bir graben ovası olup, sahada beş ana jeolojik birim gözlenmektedir. Bu birimler yaşlıdan gence doğru Paleozoyik yaşlı Simav metamorfileri, Paleosen yaşlı Eğrigöz graniti, Orta-Üst Miyosen yaşlı Kızılbük formasyonu, Alt Kuvaterner yaşlı Naşa bazaltı ve Kuvaterner yaşlı alüvyondur (Gündüz ve ark., 2010; 2012) (Şekil 3.1). Çalışma alanı ve yakın çevresinde depremsellik açısından oldukça yoğun bir aktivite söz konusudur. Bölgede aletsel dönemde meydana gelmiş en büyük deprem 28 Mart 1970 tarihinde meydana gelmiş olan $M=7.2$ büyüklüğündeki Gediz depremidir (Ateş ve Tutkun, 2014). Çalışma sahasındaki Eynal, Çitgöl ve Naşa jeotermal alanlar fay hatları boyunca dizilmiş olup, tektonizmaya bağlı olarak gelişen bu jeotermal kaynakların rezervuar kayacı, bölgede yüksek veren Simav metamorfileri içerisinde yer alan mermerler ve alanda yaygın olarak gözlenen Neojen yaşlı kumtaşı, kiltası, marn ve volkanik kayalardan oluşan birimlerdir. Bölgedeki temel birimleri kesen Eğrigöz graniti ile Naşa bazaltı sıcak su kaynaklarının ısıtıcı kayacını oluşturmaktadır. Alüvyon ise örtü kaya özelliğindedir (Gündüz ve ark., 2012). Eynal sahasında 1990 yılında Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından jeotermal akışkanın elde edildiği akifere fay hatları boyunca açılan ve derinliği 958 m olan sondajda 162 °C kuyu dibi sıcaklığı ve 72 l/s debi saptanmıştır (MTA, 2001; Gemici ve Tarcan, 2002). Simav ilçesinde 167 °C rezervuar sıcaklığı ile 8830 konut ısıtılmakta ve Simav Eynal'da 265.000 m²'lik alanda sera ısıtılması yapılmaktadır (Mertoğlu ve ark., 2015; Akkuş ve Alan, 2016).

Çalışma alanındaki jeotermal akışkanının sıcaklık değerleri 60.05-88.8 °C arasında değişmektedir (Çizelge 3.1). En yüksek sıcaklık Eynal jeotermal alanındaki E-8 no'lu sondajda ölçülmüştür. Sudaki çözülmüş toplam iyon miktarı ile EC değerleri arasında genellikle doğrusal bir ilişki vardır (Şahinci, 1991; Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017). Jeotermal akışkanın EC değeri 1596-2271 $\mu S/cm$ arasındadır. Bu değer TS 266 (2005) tarafından tavsiye edilen maksimum değer olan 400 $\mu S/cm$ 'in oldukça üzerindedir. Jeotermal akışkanın pH'ı bazik karakterde olup, 7.29-8.4 arasında ölçülmüştür. Temel anyon ve katyonlar incelendiğinde jeotermal akışkanın Na^+ , Li^+ , SO_4^{2-} ve HCO_3^- açısından zengin olduğu görülmüştür. Jeotermal akışkanın katyon dizilimi $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$, anyon dizilimi ise $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$ şeklinde olup,

Uluslararası Hidrojeologlar Birliği su sınıflamasına göre tüm jeotermal akışkanların su tipi Na-SO₄-HCO₃'tür (Şekil 3.2). Simav'daki jeotermal sondajlarda Na⁺ konsantrasyonu 278.15-506.5 mg/l arasında olup, ortalama değer 378.4 mg/l'dir. SO₄²⁻ iyonu için minimum, maksimum ve ortalama değerler sırası ile 341.26, 575.2 ve 475.21 mg/l 'dir. En düşük Na ve SO₄²⁻ konsantrasyonu Naşa, en yüksek değer Eynal jeotermal alanında ölçülmüştür. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre jeotermal akışkan Na⁺ ve SO₄²⁻ için çok kirlenmiş sular (sınıf IV) sınıfında yer almaktadır. Sodyum potasyum oranı, sıcaklığa bağlı mineral sıvı dengeleri tarafından kontrol edilir. Örnekleme yapılan jeotermal akışkanın Na/K oranı 5.82 ile 8.68 arasındadır. Düşük Na/K oranı (< 15), daha az soğuk su ile karışarak, yüzeye hızla ulaşan yüksek sıcaklıklı jeotermal sularda ortaya çıkma eğilimindedir (Nicholson, 1993; Gemici ve Tarcan, 2002). Jeotermal sahalarda kayaçların doğası ve suyun kökenini belirlemek için, yaygın olarak en az tepkimeye girme eğilimine sahip iyon olan Cl⁻ kullanılır (Palabıyık, 2006). Bir kez çözüldükten sonra başka minerallerin bünyesine kolay girmemesi nedeniyle doğrudan jeotermal akışkanı karakterize eder (Nicholson, 1993). Yüksek Cl⁻ derişimi doğrudan, derinden ve yüksek debili bir beslenmeyi, düşük Cl⁻ derişimi ise yüzey sularının giriş doğrultularını belirtir (Eroğlu ve Aksoy, 2003). Jeotermal akışkanın Cl⁻ konsantrasyonu 45.84-105.6 mg/l arasında ölçülmüş olup, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre jeotermal akışkan az kirlenmiş sular (sınıf II) sınıfında yer almaktadır. Tritiyum izotopu içeriğinde göre Eynal, Çitgöl ve Naşa jeotermal akışkanları sırasıyla 0.36±0.27 TU, 0.64±0.28 TU ve 1.44±0.28 TU değerlerine sahiptir (Bayram ve Şimşek, 2005). Naşa'daki jeotermal akışkan diğer jeotermal sahalara nazaran daha yüksek trityum ve daha düşük EC ve Cl⁻ içeriğine sahip olduğundan diğer jeotermal akışkanlara göre daha genç sular olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.1. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası ve jeolojik kesiti (Gündüz ve ark., 2010)

Çizelge 3.1. Simav ovasındaki jeotermal akışkanın hidrokimyasal karakterizasyonu ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne (2008) göre su kalite sınıfları

Parametre	Birim	Eynal jeotermal alanı								Çitgöl jeotermal alanı		Naşa jeotermal alanı	Su Kalite Sınıfları			
		E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	Ç-1	Ç-2	N-1	I	II	III	IV
T	°C	86.2	83.7	85.7	85.6	85.4	87.6	87.8	88.8	73.55	67.4	60.05	25	25	30	> 30
pH	-	7.38	7.31	7.42	7.32	7.68	7.7	7.29	7.52	8.4	7.71	7.57	6.5-8.5	6.5-8.5	6-9	<6 veya >9
EC	µS/cm	2271	2227	1666	2167	2214	2006	2056	1954	1681	1804	1596	-	-	-	-
Na ⁺	mg/l	506.5	321.23	431.78	281.09	447.68	310.35	401.11	453.75	425.18	305.65	278.15	125	125	250	> 250
K ⁺		64.97	47.83	57.33	48.26	58.93	49.23	50.14	63.25	48.96	45.21	33.92	-	-	-	-
Ca ²⁺		32.37	41.12	45.5	36.92	28.9	37.85	35.76	29.13	37.09	42.6	63.78	-	-	-	-
Mg ²⁺		1.92	4.07	8.65	2.72	7.53	2.08	7.75	1.16	1.14	2.98	10.29	-	-	-	-
Cl ⁻		74.98	82.83	90.05	85.69	80.2	105.6	94.36	85.73	62.55	58.91	45.84	25	200	400	> 400
HCO ₃ ⁻		550.23	326.2	484.63	255.61	496.7	261.89	407.15	420.3	499.61	332.85	428.11	-	-	-	-
SO ₄ ²⁻		575.2	468.17	507.46	489.11	528.75	430.36	472.62	551.48	467.7	395.22	341.26	200	200	400	> 400
Al		µg/l	157	186	114	125	208	192	133	146	4	16	9	300	300	1000
As	378.3		400.1	392	684.1	678.4	594.1	325.4	327.3	432.9	317.8	204.1	20	50	100	> 100
B	3476		3798	3531	3891	3706	3047	4067	4203	3116	2573	2448	1000	1000	1000	> 1000
Ba	66.78		69.18	73.03	78.29	75.22	38.79	53.05	60.64	60.64	78.45	135.62	1000	2000	2000	> 2000
Cr	2		2.9	1.1	0.8	0.5	1.2	2.9	3.3	3	1.8	1.5	20	50	200	> 200
Cu	1.7		1.4	3.1	3	2.3	5.3	2.8	1.9	1.5	1.8	2.7	20	50	200	> 200
Fe	134		36	28	30	54	19	31	17	77	612	44	300	1000	5000	> 5000
Li	1575		1557	922.2	1068.4	923.2	1233	1760	1566.1	1286	1071.1	419	-	-	-	-
Mn	50.86		45.63	301.57	96.75	409.46	27.71	15.25	23.99	24.75	165.66	531.55	100	500	3000	> 3000
Ni	1.6		1.4	1	0.8	0.3	0.6	0.8	0.5	0.3	4.2	3.6	20	50	200	> 200
Pb	0.4		1.4	0.3	1	0.7	5.7	0.9	0.2	1	0.9	3.3	10	20	50	> 50
Si	93437		11535	71938	65168	70966	104406	130967	114702	42676	95855	80295	-	-	-	-
Zn	15.8		19.4	29.4	24	4.5	12.6	5.5	3.1	4.2	24.6	11.5	200	500	2000	> 2000

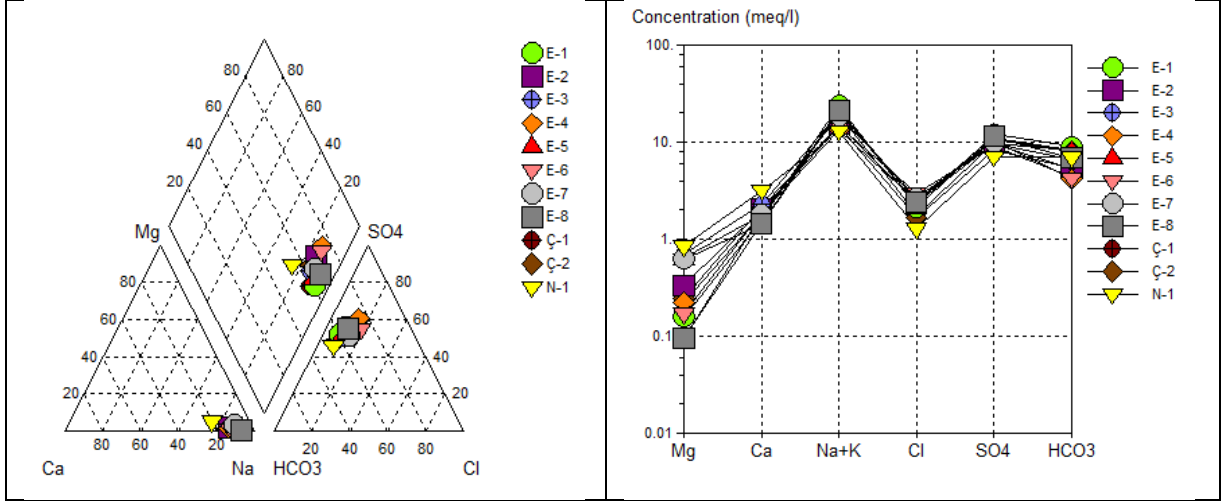
Kurak ve yağışlı örnekleme döneminde elde edilen sonuçların ortalama değerleri alınarak çizelge oluşturulmuştur.

Çizelge 3.2. Jeotermal akışkanın hidrokimyasal parametrelerinin korelasyonu

	T	pH	EC	Na ⁺	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Al	As	B	Ba	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn	
T	r	,000																						
pH	r	,418	,000																					
EC	r	,327	,500	,000																				
Na ⁺	r	,536	,073	,345	,000																			
K ⁺	r	,755**	,173	,391	,918**	,000																		
Ca ²⁺	r	,573	,155	,627*	,655*	,736**	,000																	
Mg ²⁺	r	,273	,327	,236	,364	,318	,464	,000																
Cl ⁻	r	,827**	,409	,191	,191	,427	,236	,009	,000															
HCO ₃ ⁻	r	,091	,245	,091	,673*	,500	,236	,082	,409	,000														
SO ₄ ²⁻	r	,627*	,409	,536	,836**	,891**	,736**	,255	,309	,391	,000													
Al	r	,500	,273	,755**	,382	,500	,555	,064	,482	,155	,464	,000												
As	r	,127	,036	,427	,100	,200	,364	,318	,336	,173	,282	,436	,000											
B	r	,655*	,664*	,455	,409	,482	,627*	,118	,564	,182	,664*	,373	,255	,000										
Ba	r	,729*	,087	,219	,442	,506	,401	,487	,670*	,009	,228	,355	,182	,342	,000									
Cr	r	,191	,059	,050	,278	,073	,118	,474	,064	,155	,005	,223	,446	,228	,489	,000								
Cu	r	,373	,082	,282	,282	,064	,145	,382	,609*	,364	,064	,082	,173	,009	,068	,606*	,000							
Fe	r	,655*	,309	,127	,009	,227	,055	,027	,809**	,455	,191	,264	,218	,509	,410	,023	,618*	,000						
Li	r	,582	,373	,518	,455	,418	,518	,518	,300	,027	,345	,273	,127	,482	,720*	,733*	,400	,009	,000					
Mn	r	,627*	,209	,209	,282	,291	,400	,573	,509	,164	,155	,118	,018	,509	,861**	,738**	,155	,327	,864**	,000				
Ni	r	,392	,210	,114	,410	,469	,642*	,383	,405	,137	,351	,333	,638*	,442	,511	,002	,132	,369	,114	,374	,000			
Pb	r	,443	,151	,082	,776**	,740**	,475	,105	,110	,493	,790**	,068	,155	,470	,030	,126	,096	,041	,205	,050	,137	,000		
Si	r	,600	,036	,127	,127	,318	,191	,000	,373	,091	,055	,109	,536	,082	,383	,219	,382	,273	,373	,364	,082	,265	,000	
Zn	r	,236	,227	,018	,355	,318	,582	,355	,018	,345	,145	,118	,009	,245	,442	,465	,218	,100	,336	,445	,670*	,068	,209	,000

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**-. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



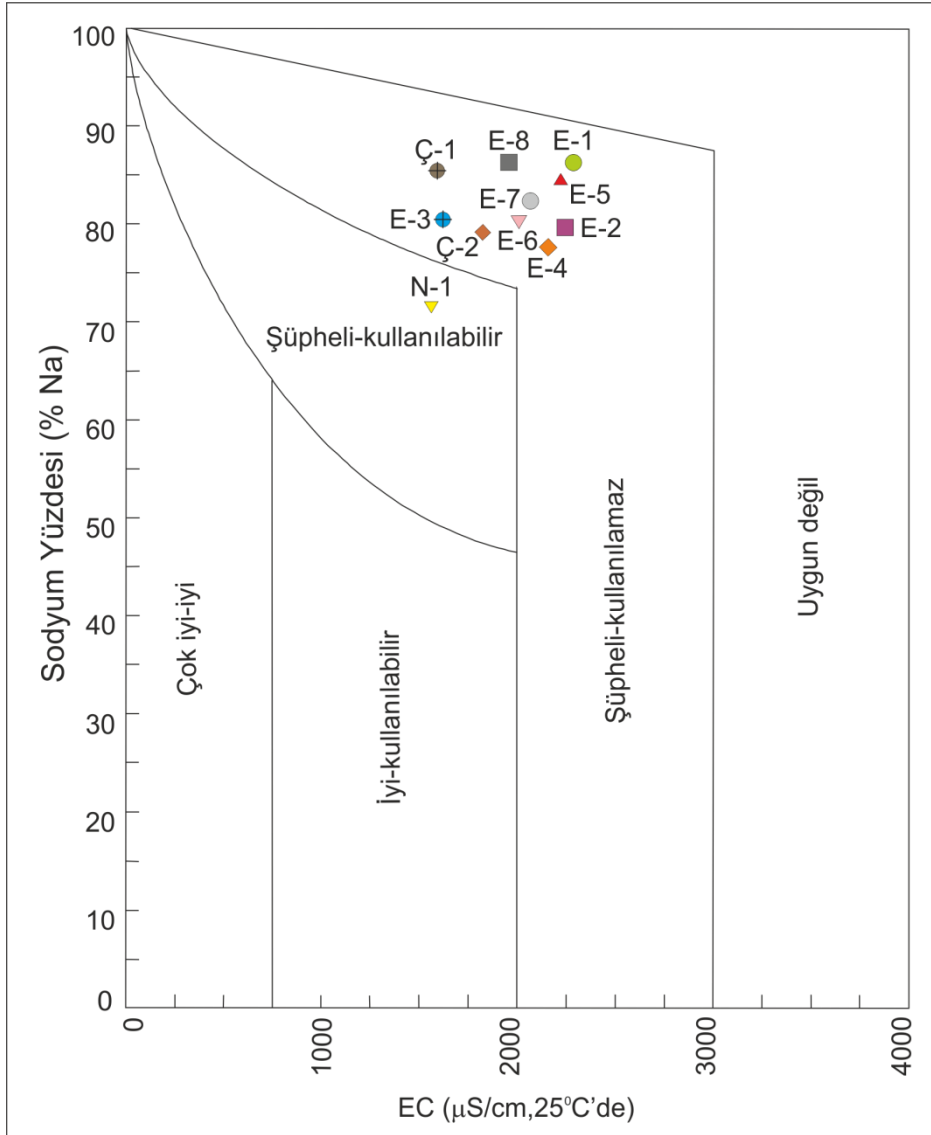
Şekil 3.2. Jeotermal akışkanın Piper ve Schoeller diyagramında gösterilmesi

Jeotermal akışkanın çevreye deşarj için uygun olup olmadığını belirlemek için sulama suyu kullanım sınıflamalarından olan Wilcox (1955) diyagramında kimyasal analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Sodyum yüzdesi ve EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) değerleri karşılaştırılarak çizilen diyagramda sular "çok iyi-iyi", "iyi-kullanılabilir", "şüpheli-kullanılabilir", "şüpheli-kullanılmaz" ve "uygun değil" sınıflarına ayrılmaktadır. Sodyum yüzdesi; suyun toplam majör katyonları içinde % Na değerini ifade eder. İyon derişimleri meq/l olmak üzere;

$$\%Na = 100x \frac{Na}{(Na + K + Ca + Mg)}$$

eşitliğiyle hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre N-1 hariç tüm jeotermal akışkanın "şüpheli-kullanılmaz" sınıfında olduğu saptanmıştır (Şekil 3.3). Jeotermal akışkan, sahada herhangi bir reenjeksiyon kuyusu olmaması nedeni ile çevreye deşarj edilmektedir. Böylelikle akışkan yüzey ve yeraltı sularına karışarak bölgede yaşayan halkın geçim kaynağı olan tarım arazilerine ulaşmaktadır. Wilcox diyagramı sonuçlarına göre jeotermal akışkanın çevreye deşarjı önerilmemektedir.

Yüksek sıcaklık ve basınç altında jeotermal akışkan ile uzun süre etkileşim içerisinde olan kayaçtaki birçok metal(loid) çözünerek suya geçmektedir. Jeotermal sulardaki As konsantrasyonu 204.1-684.1 $\mu\text{g}/\text{l}$ aralığında değişmektedir. Ortalama As konsantrasyonu 430.41 mg/l olup, bu değer TS 266 (2005) tarafından tavsiye edilen maksimum değerden 43 kat daha fazladır. Jeotermal akışkandaki arseniğin ana kaynağı metamorfik kayaçlar olup, metamorfik kayaçlardaki As konsantrasyonu maksimum 660.4 mg/kg olarak tespit edilmiştir. (Gündüz ve ark., 2010). Ayrıca çevreye kontrolsüz olarak deşarj edilen jeotermal akışkan sebebiyle Gündüz ve ark. (2012) yüzeysel sulara sıcaklık artışı ile birlikte yüksek konsantrasyonda As bulunduğunu ifade etmiştir. Bor konsantrasyonu 2448-4203 $\mu\text{g}/\text{l}$ aralığında olup, ortalama değeri 3441.45 $\mu\text{g}/\text{l}$ 'dir. En yüksek As ve B konsantrasyonu Eynal, en düşük konsantrasyon ise Naşa jeotermal alanında ölçülmüştür. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne (2008) göre Simav ovasında örnekleme yapılan tüm jeotermal akışkanlar As ve B için çok kirlenmiş sular (sınıf IV) sınıfında yer almaktadır. Naşa jeotermal akışkanı Mn konsantrasyonuna göre çok kirlenmiş sular (sınıf III), Çitgöl jeotermal akışkanı Fe konsantrasyonuna göre az kirlenmiş sular (sınıf II) sınıfında yer almaktadır. Bölgedeki jeotermal kaynaklardan faydalanmak için kurulmuş olan 7 adet yün yıkama tesisi jeotermal akışkanı kullandıktan sonra hiç bir arıtma yapmadan çevredeki derelere deşarj etmektedir (Gündüz ve ark., 2010). Bu durum bölgedeki kirlilik yükünü arttırmaktadır. Yaz aylarında ise konut ısıtması amaçlı jeotermal kullanımı olmadığından jeotermal akışkan deşarjında belirgin bir azalma gözlenmektedir.



Şekil 3.3. Jeotermal akışkanın Wilcox diyagramında gösterilmesi

Jeotermal akışkanın hidrokimyasal analiz sonuçlarına uygulanan Pearson Korelasyon Analizi değerlendirmesi Çizelge 3.2'de sunulmuştur. Jeotermal akışkanın içerdiği Na^+ ve K^+ iyonları arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir korelasyon tespit edilmiştir ($r=0,91$, $p<0,01$). K^+ ve Cl^- 'ün sıcaklık ile arasında pozitif yönde kuvvetli bir korelasyon vardır ($r=0,75$, $r=0,83$, $p<0,01$). K^+ ve Ca^{2+} arasında negatif yönde kuvvetli bir korelasyon vardır ($r=0,75$, $p<0,01$). SO_4^{2-} ile Na^+ ve K^+ arasında pozitif yönde kuvvetli bir ilişki vardır ($r=0,84$, $p<0,01$). Ca^{2+} ile SO_4^{2-} arasında negatif yönde kuvvetli korelasyon vardır. Elementler içerisinde sadece Al ile EC arasında pozitif yönde kuvvetli bir ilişki tespit edilmiştir. Baryum ile sıcaklık arasında negatif yönde kuvvetli bir ilişki vardır. Demir ve Cl^- arasında aynı zamanda Li^+ ve Ba arasında negatif yönde kuvvetli bir ilişki vardır. Mn ile Ba arasında pozitif, Cr ve Li arasında ise negatif yönlü kuvvetli bir ilişki vardır. Bununla birlikte Pb ile Na^+ , K^+ ve SO_4^{2-} iyonları arasında negatif yönde kuvvetli bir ilişki tespit edilmiştir. Korelasyon sonuçlarına göre As ve B arasında anlamlı bir korelasyon tespit edilmemiştir. Arsenik ile Nikel arasında negatif yönde bir ilişki tespit edilmiştir ($r=-0,63$, $p<0,05$). Nikel ile Ca^{2+} ve Zn arasında pozitif yönlü bir ilişki vardır.

Bakır ile Cr ve Fe arasında negatif yönde, Cl⁻ ile pozitif yönde ilişki vardır. Ayrıca Cl⁻ ile Ba arasında negatif, Cu arasında ise pozitif yönde ilişki tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, Eynal, Çitgöl ve Naşa jeotermal akışkanının kimyasal analiz sonuçlarına göre As, B, Fe ve Mn elementlerinin akışkanda yüksek konsantrasyonda olduğu tespit edilmiştir. Sıcak ya da soğuk su kaynaklarının özellikle As gibi yüksek toksik etkileri sahip metal(loid) içermesi ve bu suyun içerek tüketilmesi, tarım arazilerinin sulanması ya da çevreye bilinçsizce deşarjı halk sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Suda As varlığının arıtılmadığı ve özellikle içilerek tüketildiği durumlarda çok önemli sağlık sorunlarına sebep olmaktadır (Wang ve Mulligan, 2006). Yapılan çeşitli çalışmalar, arseniğin içme suyu ile alınması neticesinde insanlarda çeşitli deri lezyonları, deri ve akciğer kanseri başta olmak üzere kanserojenik etkiler gösterdiğini kanıtlamıştır (Sorg ve ark., 2014). Bu durum, yüksek As içeren jeotermal akışkanın çevresel etkileri açısından değerlendirilmesinin önemini daha da arttırmıştır.

4. Sonuç

Konut ve sera ısıtılması gibi uygulamalar sonucunda ortaya çıkan atık jeotermal akışkan için en uygun bertaraf yöntemi yeraltına reenjeksiyondur. Reenjeksiyonun yapılmadığı durumlarda jeotermal akışkan aşırı çekim nedeni ile azalabilir hatta tükenme tehlikesi ile karşı karşıya gelebilir. Jeotermal akışkan ancak deşarj standartlarına uyulmak kaydıyla arıtılarak yüzeysel sulara deşarj edilmelidir. Çalışma sahasındaki tüm jeotermal alanlarda reenjeksiyon uygulaması bulunmamakta ve yeraltından çıkan jeotermal akışkanın tamamı kullanıldıktan sonra çevredeki derelere deşarj edilmektedir. Jeotermal akışkan kontrolsüz olarak deşarj edildiğinde çevresindeki su kaynaklarına karışarak ısıl ve kimyasal kirlenmeye (As, B, Fe, Mn, Na⁺, SO₄²⁻) neden olabilir. Gelecek çalışmalarda jeotermal alanların çevresindeki yüzey ve yeraltı sularının yanı sıra dere sedimanı ve toprağın jeotermal akışkandan ne kadar etkilendiğinin saptanması için mevsimsel örneklemeler yapılarak, analiz edilmesi önerilir.

Teşekkür

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2014-226 no'lu proje ile desteklenmiştir. Bu çalışma özgün araştırma makalesi niteliğindedir.

Kaynakça

- Akkuş İ., 2002. Jeotermal Uygulamalar ve MTA. Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Jeotermalde Yerbilimsel Uygulamalar Yaz Okulu Ders Notları, İzmir, Türkiye. 1–32.
- Akkuş İ., Alan H., 2016. Türkiye'nin Jeotermal Kaynakları, Projeksiyonlar, Sorunlar ve Öneriler Raporu. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, Türkiye.
- Ateş Ö., Tutkun S.Z., 2014. Simav (Kütahya) Depremlerinin Jeotermal Sistemlerdeki Hidrojeokimyasal Değişimleri. Türkiye Jeoloji Bülteni 57(3): 25–40.
- Baba A., Armannsson H., 2006. Environmental Impact of the Utilization of Geothermal Areas. Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy 1:267–278.
- Baba A., Sözbilir H., 2012. Source of Arsenic Based on Geological And Hydrogeochemical Properties of Geothermal Systems in Western Turkey. Chemical Geology 334(12): 364-377.
- Bayram A.F., Şimşek Ş., 2005. Hydrogeochemical and Isotopic Survey of Kütahya-Simav Geothermal Field. World Geothermal Congress Proceedings, 1–11.
- Baysal R.T., Gündüz O., 2016. The Impacts of Geothermal Fluid Discharge on Surface Water Quality with Emphasis on Arsenic. Water, Air, and Soil Pollution 227:165.
- Davraz A., Aksever F., Afşin M., 2017. Assessment of Stream Water Chemistry and Impact of Geothermal Fluid in the up-Buyuk Menderes Basin, Turkey. Environmental Science and Pollution Research 24: 26806–26820.
- Eroğlu A., Aksoy N., 2003. Jeotermal Suların Kimyasal Analizi, VI. Ulusal Tesisat Kongresi, Jeotermal Enerji Semineri Kitapçığı. 149–183.
- Gemici Ü., Tarcan G., 2002. Hydrogeochemistry of the Simav Geothermal Field, Western Anatolia. Journal of Volcanology and Geothermal Research 116: 215–233.

- Gündüz O., Şimşek C., Hasözbeğ A., 2010. Arsenic Pollution in the Groundwater of Simav Plain, Turkey: Its Impact on Water Quality and Human Health. *Water, Air and Soil Pollution* 205(1): 43–62.
- Gündüz O., Mutlu M., Elçi A., Şimşek C., Baba A., 2012. Jeotermal Akışkan Deşarjının Yüzeysel Su Kalitesine Etkisi: Örnek Saha Simav Ovası Kütahya. *Çevre Bilim & Teknoloji* 3(4): 231–246.
- Mertoğlu O., Şimşek Ş., Başarır N., 2015. Geothermal Country Update Report of Turkey (2010-2015). *World Geothermal Congress Proceedings, Melbourne, Australia.*
- MTA, 2001. Türkiye Jeotermal Envanteri. MTA Yayınları, Ankara.
- Nicholson K., 1993. *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques.* Springer, Berlin.
- 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.
- Palabıyık Y., 2006. Kütahya-Simav Jeotermal Sahasının Jeokimyasal Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Piper A.M., 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses. *Transactions of American geophysical Unions* 25: 914–923.
- Schoeller H., 1955. *Geochimie des Eaux Souterraines, Rev. Inst. Franc. Petrole, Paris.* 219–246.
- Sorg T.J., Chen A.S.C., Wanga L., 2014. Arsenic Species in Drinking Water Wells in the USA with High Arsenic Concentrations. *Water Research* 48: 156–169.
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 2008. Online. 10.03.2019, <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.7221&sourceXmlSearch=&MevzuatIliski=0>
- Şahinci A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası. Reform Matbaası. İzmir, Türkiye.

- Şanlıyüksel D., Baba A., 2011. Hydrogeochemical and Isotopic Composition of a Low Temperature Geothermal Source in Northwest Turkey: Case Study of Kirkgecit Geothermal Area. *Environmental Earth Sciences* 62: 529–540.
- Şanlıyüksel Yücel D., Yücel M.A., 2017. Terk Edilmiş Kömür Ocaklarında Oluşan Maden Göllerinin Hidrokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi ve İnsansız Hava Aracı ile Üç Boyutlu Modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 23(6): 780-791.
- Şimşek C., Gündüz O., 2007. IWQ Index: a GIS-integrated Technique to Assess Irrigation Water Quality. *Environmental Monitoring and Assessment* 128(1–3): 277–300.
- TS 266, 2005. Sular - İnsanî Tüketim Amaçlı Sular. Türk Standardı.
- Şimşek Ş., 2015. Dünya'da ve Türkiye'de Jeotermal Gelişmeler. III. Jeotermal Kaynaklar Sempozyumu Bildiriler Kitabı. 1–17.
- Wang, S., Mulligan, C.N., 2006. Occurrence of Arsenic Contamination in Canada: Sources, Behavior and Distribution. *Science of the Total Environment*, 366:2-3, 701-721.
- Wilcox L.V., 1955. Classification and Use of Irrigation Waters, U.S. Dept. Agric. Circ. 969, Washington D.C., 19 p.
- Zaim A., Çavşi H., 2018. Türkiye'deki Jeotermal Enerji Santrallerinin Durumu. *Mühendis ve Makine* 59(691): 45–58.