


Tunceli-Pertek Jeotermal Alanındaki Sıcak ve Soğuk Suların Hidrojeokimyasal Özellikleri

Ayten Öztüfekçi Önal*, Aysun Akkuş

Munzur Üniversitesi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

*aoztufekci@munzur.edu.tr 

Makale gönderme tarihi: 29.03.2019, Makale kabul tarihi: 13.06.2019

Öz

Pertek jeotermal alanı, Tunceli ilinin güneybatısındaki Singeç vadisi yakınında yer almaktadır ve hidrojeolojik ve jeotermal olarak şimdiye kadar çalışılmamıştır. Alandaki en baskın kaya tipi, esas olarak kireçtaşı ve mermerden oluşan Paleozoyik yaşlı Keban Metamorfizmaları'dır. Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı magmatik ve sedimanter birimler ise yaşlıdan gence doğru Pertek Magmatitleri (Üst Kretase), Harami Formasyonu (Maestrihtiyen), Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Üst Oligosen), Karabakır Formasyonu (Üst Miyosen-Pliyosen) ve alüvyon (Kuvaterner) dur. Esas olarak kireçtaşı ve mermerden oluşmuş Keban Metamorfizmaları, Pertek Magmatitleri tarafından intrüzyona uğramış ve yer yer Kırkgeçit Formasyonu tarafından örtülmüştür. Tektonik olarak oldukça aktif bir bölgede bulunan Pertek jeotermal alanında, Keban Metamorfizmaları'nın Pertek Magmatitleri üzerine bindirmesi, doğrultu atımlı Pertek Fayı'nın ve normal faylar ile makaslama kırıklarının etkisiyle, Keban Metamorfizmaları'nın porozite ve permeabilitesi çok artmış ve akifer özelliği kazanmıştır. Bu nedenle, Pertek jeotermal alanındaki hem soğuk hem de sıcak suların hazne kayasını oluşturmuştur. Bu hazne kayanın ana beslenme sahası Singeç vadisinin kuzeyinde, boşalma alanı ise bu vadinin güneyindedir. Bu beslenme sahasında, sadece sınırlı alanlarda, yarı geçirimli sedimenter (Kırkgeçit Formasyonu) ve volkanik örtü kayaları (Karabakır Formasyonu) bulunduğu için, Pertek jeotermal sistemi bir açık sistemdir. Hem sıcak hem de soğuk sular en fazla bulunan kation Ca^{+2} , anyon ise HCO_3^- dir. IAH (1979) su sınıflandırma yöntemine göre, sıcak ve soğuk sular, soğuk mineralli su ve dere suyu Ca-Mg-HCO₃ tipinde, Keban barajının göl suları ise Ca-Mg-HCO₃-SO₄ tipindedir. Soğuk kaynak suları içilebilir özellikte, fakat sıcak ve soğuk mineralli sulardaki Ca, Mg, K, Mn, As ve B gibi elementlerin derişimi içme suyu standartlarının üzerindedir. Sıcak sular genel olarak kalsit, aragonit, kalsedon, kuvars ve dolomit minerallerine doygundur. Rezervuar sıcaklıkları silis ve kation jeotermometre hesaplamalarına göre 74-105°C arasında değişmektedir. Entalpi-silis karışım modeline göre rezervuar sıcaklığı 80-225°C arasında ve sıcak suya soğuk su karışımının oranı ise %60-88 arasındadır. İzotop analizlerine göre, Pertek jeotermal alanındaki soğuk sular sıg, sıcak sular derin dolaşimli, meteorik kökenli ve sırasıyla modern ve sub-modern sulardır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojeokimya, izotop kimyası, jeoloji, jeotermal, Pertek, Tunceli

Hydrogeochemical Characteristics of Hot and Cold Waters in the Tunceli-Pertek Geothermal Area

Abstract

The Pertek geothermal area is located near the Singec valley to the southwest of Tunceli and this field has not been previously studied in terms of hydrogeology and geothermal. The dominant rock type in the area is the Permian-Triassic aged Keban Metamorphites which are be limestone and marble. The younger magmatic and sedimentary units (Upper Cretaceous-Pertek Magmatites, Middle Eocene-Upper Oligocene-Kırkgeçit Formation, Upper Miocene-Pliocene-Karabakır Formation and Quaternary-alluvium) have contact with these metamorphics. In addition to the tectonic activity of the region, the dominant lithology of Keban metamorphites (limestone and marble), intra-unit thrust faults and normal faults, shear fractures and cracks increased the porosity and permeability of Keban metamorphics. Therefore, the most important aquifer in the region is the Keban metamorphites and these metamorphites are also the reservoir rock of the hot water in the Pertek geothermal area. The area of feeding of the groundwater in the reservoir rock is located in the north of the Singec valley and the discharge area is in the south of this valley. The feeding field of this reservoir rock is to the north of the Singec valley and the discharge area to the south of this valley. The Pertek geothermal system is an open system, since only limited areas contain semi-permeable sedimentary (Kırkgeçit Formation) and volcanic cover rocks (Karabakır Formation) in the main feeding field. The pH and electrical conductivity of the thermal waters in the system are between 6,18-7,55 and 816-2330 $\mu S / cm$ respectively. The surface temperatures range from 25.5 to 38.2 °C. The pH and electrical conductivity values of cold water are between 7.52-8.31 and 402-472 $\mu S / cm$ respectively. The most common cation in both hot and cold waters is Ca^{2+} and the anion is HCO_3^- . According to IAH (1979) water classification method, hot and cold water, cold mineral water and stream water are of Ca-Mg-HCO₃ type, and the lake waters of Keban dam are Ca-Mg-HCO₃-SO₄ type. Cold spring water is drinkable, but in hot and cold mineral waters the concentration of elements such as Ca, Mg, K, Mn, As and B is above the drinking water standards. The hot waters are generally saturated with calcite, aragonite, chalcedony, quartz and dolomite minerals. Reservoir temperatures are between 74-105°C according to silica and cation geothermometer calculations. According to the enthalpy-silica mixture model, the reservoir temperature is between 80-225 °C and the ratio of cold water mixture to hot water is between 60-88%.

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

According to the isotope analysis, the cold waters in the Pertek geothermal area are shallow, the hot waters are deeply circulated, meteoric origin and respectively modern and sub-modern waters.

Keywords: Hydrogeochemistry, isotope chemistry, geology, geothermal, Pertek, Tunceli

GİRİŞ

Jeotermal enerji yenilenebilir, sürekli ve bitmeyecek bir enerji kaynağı olması açısından önemlidir. Bu yüzden Dünya’da birçok ülke ve Türkiye tarafından kullanılmaktadır. Petrol ve doğalgaz gibi enerji kaynakları açısından dışa bağımlılığımız, ülkemiz ekonomisi üzerindeki olumsuz yüklerin en başında gelmektedir. Bu yükün azaltılması, yerli kaynaklardan daha fazla yararlanarak enerji üretilmesine bağlıdır (Akkuş, 2017). Türkiye’nin batısında aktif tektonik nedeniyle meydana gelen grabenler içinde yüksek sıcaklıklara sahip birçok jeotermal sistem bulunmaktadır. Doğu Anadolu bölgesinde ise, bölgenin tektonik ve volkanik aktivitesine bağlı olarak genellikle Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayları (DAF)’nın kesişim noktaları ya da bu fayların etkisiyle oluşmuş ikincil doğrultu atımlı fay sistemlerinin etkisinde gelişmiş, önemli sayıda daha düşük sıcaklıklara sahip jeotermal su kaynağı vardır. Sodyum, bikarbonat, sülfür, sülfat, klorür vb. mineraller ihtiva eden bu kaynaklardan balneolojik kullanım, ısıtma ve seracılık alanlarında faydalanılmaktadır (Elmastaş, 2011). Doğu Anadolu’daki jeotermal kaynakların yer aldığı alanlardan birisi de Tunceli-Pertek ilçesinin hemen KB’sında yer alan Singeç Çayı vadisi ve yakın çevresindeki Pertek jeotermal alanıdır (Şekil 1). Pertek jeotermal alanındaki sıcak su kaynakları da DAF ve KAF arasındaki sıkışma gerilmesi sonucunda oluşan Pertek Fayı’nın (Aksoy, 1994) ve onun etkisiyle oluşmuş makaslama kırıklarının denetiminde yüzeye çıkmaktadır.

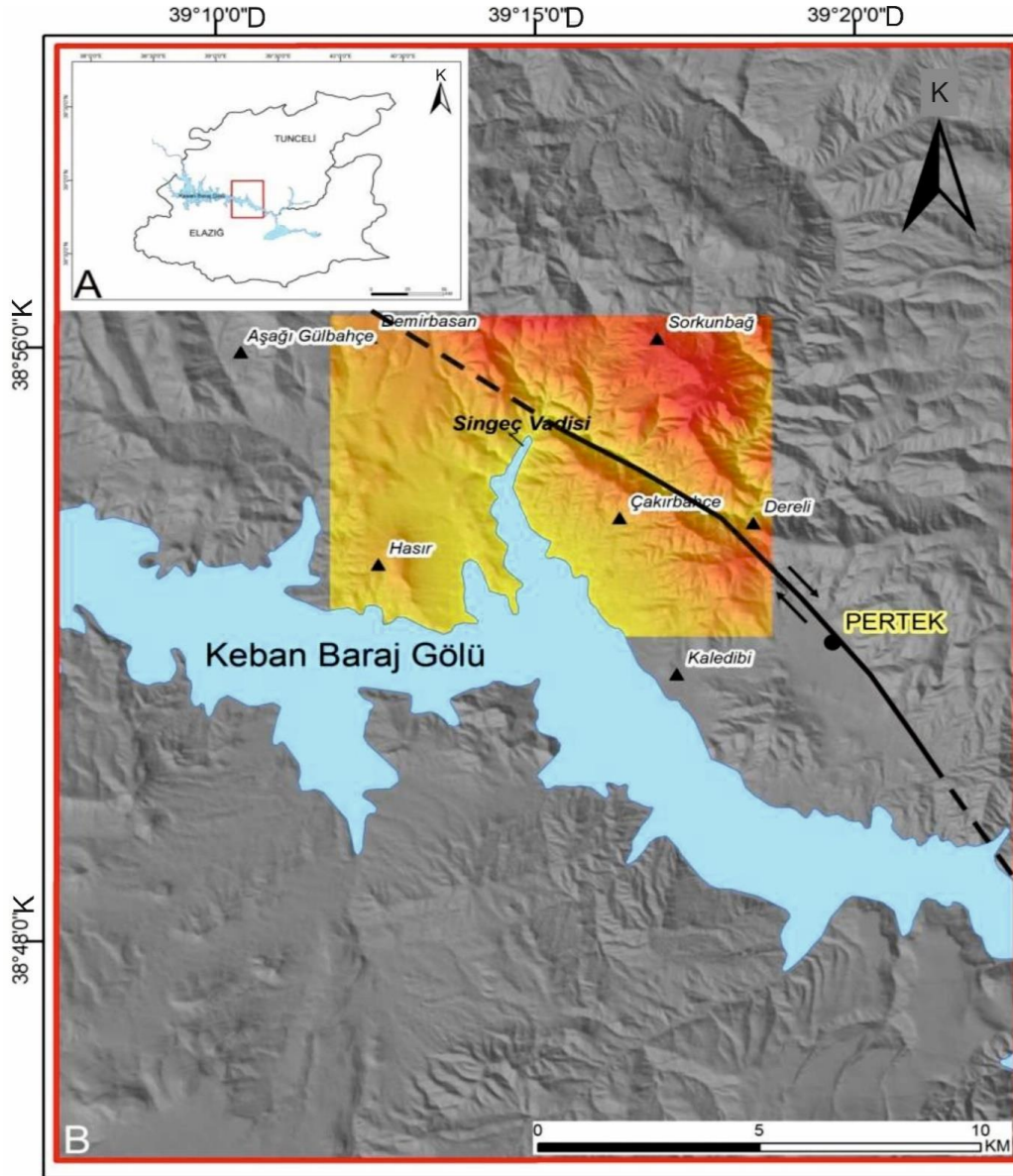
Pertek jeotermal alanı ve çevresinde birçok genel jeoloji ve petrografik-petrolojik araştırma (Aksoy, 1994; Bingöl, 1984; Herece ve Acar, 2016; Kürüm, 1994; Kürüm vd., 2011; Öztüfekçi Önal vd., 2010; Turan vd., 1993) yapılmış olmasına rağmen,

hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal açıdan, Pertek Jeotermal A.Ş. tarafından yaptırılmış münferit etüt çalışması dışında, tek araştırma Akkuş (2016) tarafından yapılmış ve yanılmamış olan Yüksek lisans tez çalışmasıdır.

Bu makalede, Akkuş (2016) tarafından gerçekleştirilen jeolojik ve jeokimyasal çalışmalar ile Pertek Jeotermal A.Ş. tarafından yaptırılan izotop jeokimyası analizleri kullanılarak; Pertek jeotermal alanındaki soğuk ve sıcak suların hidrojeokimyasal özellikleri ve kökenleri tartışılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Çalışma kapsamında Pertek jeotermal alanı ve yakın çevresinde daha önce yapılan incelemeler dikkate alınarak jeolojik birimler, yapısal unsurlar ve su örnekleme lokasyonlarının koordinatları Magellan tipi (explorist 610) GPS cihazı ile belirlenmiştir. İncelenen alanın lokasyon, drenaj ağı ve jeolojik haritası ArcGis 9.3 ortamında hazırlanmıştır. Belirlenen 14 lokasyonda, 2015 yılı Haziran ve Ekim ayında suların sıcaklık (T), hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH), redoks potansiyeli (Eh) ve elektriksel iletkenlik (EC) gibi fiziksel özellikleri CRISON marka pH-25 ve EC-25 model portatif ölçüm cihazı ile yerinde ölçülmüştür. Özellikle sıcak ve mineralli sularda HCO₃ değeri uzun süre korunamadığından, bu değişkenin miktarı da yerinde (in-situ) titrasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Titrasyon sırasında 0.1 M’lık HCl (pH= 4.3’e düşürmek için), WTW340i ölçüm cihazı, dijital büret ve SenTix41 pH probu kullanılmıştır. Su örneğinin pH’ı 4.3’e düşene kadar sarf edilen asit miktarından yola çıkılarak sudaki HCO₃ değeri mg/l olarak bulunmuştur.



Şekil 1. Pertek jeotermal alanının (A'da kırmızı ve B'de sarı renkle işaretli) lokasyon haritası

Laboratuvarda yapılacak katyon ve anyon analizleri için, sırasıyla 50 ml'lik ve 500 ml'lik polietilen şişelere su örnekleri alınmıştır.

Katyon analizlerinin yapılacağı su örnekleri şişelenirken 0.45 µm PVDF su filtresi kullanılmış ve laboratuvara transferi sırasında katyon konsantrasyonlarını korumak için, pH<2 olana kadar ultra saf HNO₃ ilave edilerek asitleştirilmiş ve kısa sürede analiz edilmiştir. Klor dahil katyon ve iz element analizleri ACME Analitik Laboratuvarında (Kanada) S200 paketi (72 element) olarak ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)'de yaptırılmıştır. ICP-MS tekniğinde, elektromanyetik

indüksiyonla 10 000°K sıcaklığa ulaştırılan argon plazması tarafından su örneğinin iyonize edilmesi, iyonize bileşenlerin kütle spektrometresi tarafından ayrıştırılarak ve element derişimlerinin elektron çoklayıcı bir dedektör tarafından ölçülerek yapılmasını içermektedir. Anyon (SO₄, NO₂, NO₃, NH₃, ortofosfat) analizleri ve toplam çözünmüş katı madde (TDS), toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM) vs. analizleri ise Munzur Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Anyon analizleri yapılmadan önce sular, su filtrasyon seti yardımıyla 0.2µ-0.45µ geçirgenlikteki filtre kağıdından

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

süzülerek, Shimadzu marka UV-1800 model spektrofotometre cihazında, APHA (2005) standardındaki metotlara göre yapılmıştır. Toplam uçucu katı madde analizi öncesinde ise süzme işlemi yapılmamıştır. Analiz sonuçları AquaChem 3.7 (Calmbach, 1997) hidrojeokimyasal ve PhreeqC (Parkhurst ve Appelo, 1999) kimyasal türleştirme programlarında değerlendirilerek hem yağışlı hem de kurak dönem için, incelenen tüm suların kalitesi ve kullanım alanları, su-kayaç ilişkileri, akifer kimyası ve mineral doygunlukları belirlenmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Meteorolojik Veriler

Tunceli meteoroloji istasyonundan temin edilen 1950-2015 yılları arasındaki 65 yıllık ortalama verilere göre; İlde yıllık ortalama sıcaklık 13°C olup, en yüksek sıcaklık Temmuz ayında (27,3 °C), en düşük sıcaklık Ocak ayında (-1,8 °C)'dir. En az yağış Ağustos (2,8 mm), en fazla yağış ise Aralık (128,9 mm) aylarında olmaktadır. Yıllık ortalama toplam yağış ise 861,4 mm'dir. Çizelge 1'de

verildiği gibi Thornthwaite (1984) formülü kullanılarak hesaplanan iklimsel su bilançosuna göre, yıllık düzeltilmiş Etp (potansiyel buharlaşma-terleme) 719,4 mm, yıllık Etr (gerçek buharlaşma-terleme) 336,3 mm'dir. Nisan ayı sonuna kadar yağış Etp'den fazladır. Bu nedenle Etp, Etr'ye eşit olur. Mayıs ayı başından Ekim ayına kadar zemin rezervi olan ve teorik olarak 100 mm olarak kabul edilen su kullanılır. Nisan ayı sonuna kadar su rezervi doludur. Mayıs ayının sonuna kadar yedekten kullanılmakta, Haziran başından Eylül sonuna kadar yeraltı su rezervi olmamakta ve tarımsal su açığı gözlenmektedir. Kasım başına kadar ise yeraltı suyu rezervi dolmuş olmaktadır. Bu verilere göre Haziran-Ekim ayları arası kurak dönem, Kasım-Mayıs arası ise yağışlı dönemdir. Yapılan su bütçesi hesaplamalarına göre yıllık 393,17 mm'lik suyun yeraltına süzülmesi görülmektedir. Bu değer 861,4 mm olan yıllık ortalama yağışın yaklaşık %46'sının yeraltına süzülmesini ifade etmektedir.

Çizelge 1. Tunceli meteoroloji istasyonu verilerine göre, Thornthwaite (1948) yöntemiyle hesaplanan su bütçesi tablosu. YT: Yıllık toplam; YSS (I): Yeraltına sızan su (Infiltrasyon); Etp: potansiyel buharlaşma-terleme (düzeltilmiş); Etr: gerçek buharlaşma-terleme

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	YT
Sıcaklık	-1,8	-0,2	5,7	12	17,1	22,7	27,3	26,9	21,6	14,6	7,0	1,1	--
Yağış (P)	123,6	108,5	110,7	108,9	69,7	20,6	3,2	2,6	15,3	65,1	104,3	128,9	861,4
Etp	0	0	14,36	43,87	79,8	119,61	157,36	144,36	93,37	49,92	15,61	1,14	--
P-Etp	0	0	13,94	39,52	64,88	96,46	124,89	122,34	89,78	52	18,58	1,39	--
Su Rezervi	100	100	100	100	89,9	0	0	0	0	15,18	100	100	--
Etr	0	0	14,36	43,87	79,8	110,5	3,2	2,6	15,3	49,92	15,61	1,14	336,3
Su Noksanı	0	0	0	0	0	9,11	154,16	141,76	78,07	0	0	0	--
Su Fazlası	123,6	108,5	96,34	65,03	0	0	0	0	0	0	0	0	--
YSS (I)	61,8	85,15	90,75	77,89	38,94	19,47	9,73	4,87	2,43	1,22	0,61	0,31	393,17

Jeolojik ve Hidrojeolojik Özellikler

Pertek jeotermal alanının temelini Permiyen-Triyas yaşlı (Aksoy, 1994) Keban metamorfik kayalar oluşturmaktadır (Şekil 2 ve 3). İnceleme alanındaki metamorfik istifin görünen tabanında amfibolit şistler üst seviyelerinde kristalize kireçtaşı ve mermer yer almaktadır. Amfibolit şistler Singeç köprüsü yakınındaki yol yarmasında izlenirken, Singeç vadisi boyunca ise kristalize kireçtaşı ve mermerler görülmektedir. Amfibolit şistler koyu gri siyahımsı, ince-orta katmanlıdır. Kristalize kireçtaşları sarımsı, grimsi renklerde ve yer yer tabakalı görünümündedir. Mermerler ise grimsi kirli

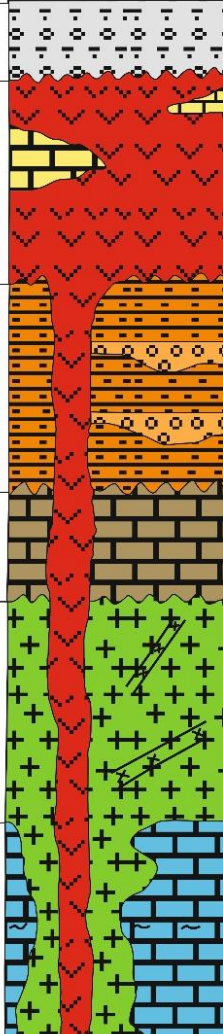
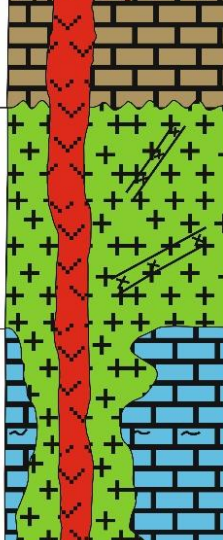
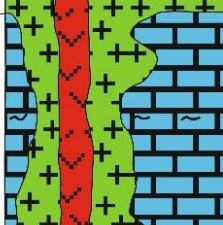
beyaz renklerde gözlenmektedir. Kristalize kireçtaşları ve mermerler kendi içerisinde çok kırıklı

ve çatlaklı olup, kristalize kireçtaşlarında kırıklar boyunca erime boşlukları ve mağaralar gelişmiştir. Birim içi faylanmalar nedeniyle tabakalar yer yer dikleşmiş, kıvrımlanmış ve Singeç vadisi içerisinde dik yarlar oluşmuştur.

Keban Metamorfitleme içerisinde Üst Kretase yaşlı magmatik kayalar sokulmuş ve kontaklarında skarn mineralleri oluşmuştur. Öztüfekçi Önal vd. (2010) ile Kürüm vd. (2011) yaptıkları çalışmada, Pertek jeotermal alanı ve çevresinde oldukça yaygın olan magmatik kayaların diyorit, tonalit,

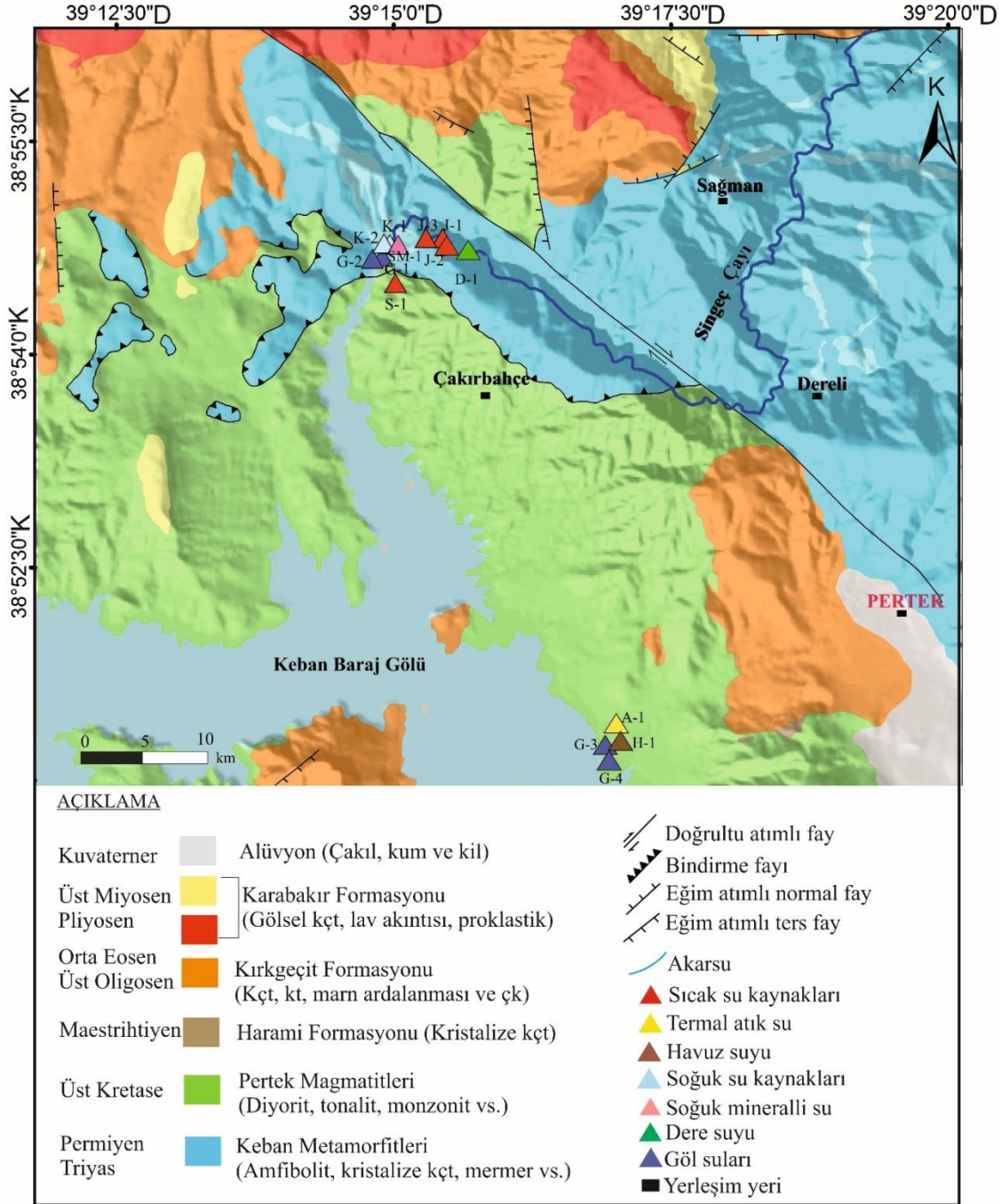
Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

granodiyorit ve monzonit ile bunları kesen aplit damarlarından oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Zaman	Sistem /Dönem	Seri/Devre	Kayaç Birimi	Kalınlık (m)	LİTOLOJİ	AÇIKLAMA	
SENOZOYİK	KUV.			5-20		Çakıl, kum ve kil	
				>50		Gösel kireçtaşları (inceleme alanı dışında), andezitik ve bazaltik lav ile tüf, volkanoklastitler	
	PALEOJEN	OLİGOSEN	MIYOSEN	ÜST	KIRABAKIR FORMASYONU	>100	Kireçtaşı, Kumtaşı-marm ardalınması, kanal dolgusu şeklinde gelişmiş çakıltaşları
				ORTA			
	MEZOZOYİK	KRETASE	MAEST.	HARAMİ FORM.	>15		Kristalize kireçtaşları
					ÜST		PERTEK MAGMATİLERİ
PALEOZOYİK	TRİYAS					Amfibolit, kristalize kireçtaşı, mermer ve kalkışist	
PERMIYEN				KEBAN METAAMORFİTLERİ		>150	

Ölçeksiz

Şekil 2. Pertek çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Aksoy, 1994'den değiştirilerek).



Şekil 3. Çalışma alanının jeoloji haritası (MTA 1/25.000 ölçekli jeoloji haritaları ve Aksoy, 1994'den yararlanılmıştır).

Bu makalede Pertek Magmatitleri (Şekil 2 ve 3) adıyla incelenen farklı litolojileri arasında, arazide belirgin bir dokanak ilişkisi gözlenmese de, monzonitler pembemsi renkli feldispat kristallerinin varlığı, diyoritler grimsi, yeşilimsi ve tonalit, granodiyoritler ise daha açık renkli mostraları ile ayrılmaktadır.

Pertek jeotermal alanı içerisindeki diyorit biriminin esas minerallerini plajiyoklaz ve amfibol (hornblend), tonalit/granodiyorit biriminin esas minerallerini ise plajiyoklaz, kuvars, ortoklas, biyotit, az hornblend, apatit ve opak mineraller oluşturmaktadır. Plajiyoklaz minerallerinde serizitleşme, ortoklaslarda killeşme, amfibol ve

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

biyotitlerde kloritleşme ve metamorfitlelere yakın olan alanlarda ise karbonatlaşma gelişmiştir. İnceleme alanındaki Keban Metamorfitleleri ve Pertek Magmatitleri uyumsuz olarak çok sınırlı bir alanda (Pertek GB'sı) kumlu kireçtaşı-masif kireçtaşından oluşan Harami Formasyonu, daha geniş alanlarda ise kireçtaşı, kumtaşı, marn ardalardan oluşan Kırkgeçit formasyonunun kırıntılı kayaçları tarafından örtülmektedir (Şekil 3). Bölgede Üst Miyosen-Pliyosen arasında etkin olan volkanik faaliyetlerin ürünü volkanoklastikler ve andezitik-bazaltik lav akıntıları ise Pertek jeotermal alanının daha çok kuzey ve kuzey batısında yer almaktadır. Singeç vadisi yamaçlarındaki traverten, taraça ve yamaç molozları ile Pertek ilçe merkezi yakın çevresinde ve Singeç vadisi tabanında, genelde tutturulmamış olan çakıl, kum ve kil boyutlu kırıntılılar Kuvaterner'de oluşmuş çökellerdir.

Aksoy (1994) çalışmasında Keban Metamorfikleri'nin, Pertek Bindirme Fayı ile Pertek Magmatikleri üzerine itildiğini ifade etmiştir. Üst Kretase sonrası bölgede etkili olan tektonik olaylar sonucunda, Singeç vadisinin hemen güneyinde yer alan Keban Metamorfitleleri, Pertek Bindirme Fayı (Aksoy, 1994) ile Pertek Magmatitleri üzerine itilmiştir. Pertek Bindirme Fayı ise, KB-GD uzanımlı sağ yanal doğrultu atımlı bir fay tarafından ötelenmiştir (Şekil 3). Singeç vadisindeki bükülme ve Pertek Bindirme Fayı'ndaki ötelenme dikkate alınarak Aksoy (1994) tarafından, ötelenme miktarı yaklaşık 5 km olarak hesaplanmış ve bu doğrultu atımlı fayın Doğu Anadolu Fayı (DAF) ile kökensel ilişkili olduğu açıklanmıştır. Bu makale kapsamında yapılan arazi çalışmasında, Pertek Bindirme Fayı ve bindirme fayını atıma uğratan sağ yönlü bu doğrultu atımlı fayın, Pertek jeotermal alanında çok sayıda KB-GD ve KD-GB doğrultulu kırık ve çatlakların oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Özellikle, Keban Metamorfitlelerine ait kristalize kireçtaşı ve mermer biriminin, inceleme alanındaki bu kırıklı-çatlaklı yapısı ile akifer özelliği kazanmış olduğu görülmüştür. Söz konusu bu kristalize kireçtaşları ve mermer akiferi Pertek jeotermal alanındaki sıcak ve soğuk minerali su kaynaklarının hazne kayasıdır.

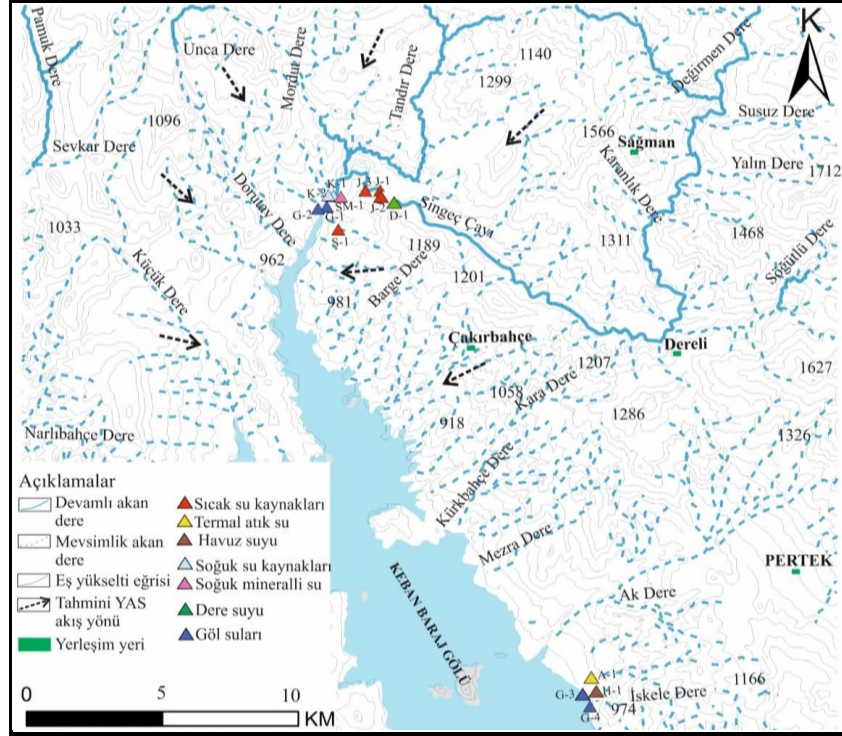
Singeç vadisini kesen doğrultu atımlı fay hattının güneyindeki vadi tabanında ve Keban baraj gölü kıyısında, bu hazne kayadan boşalan çok sayıda sıcak su kaynağı bulunmaktadır. Singeç çayının akaçlama alanına bakıldığında, yüzeysel beslenme

alanının kuzeydeki yükseltiler olduğu görülmektedir (Şekil 4). Drenaj ağının yapısı ise tamamen Keban Metamorfitleleri'ndeki kırık sistemlerinin denetiminde gelişmiştir. Bu kırık sistemlerinin doğrultu ve eğimleri, Pertek Jeotermal A.Ş. tarafından açılmış susuz sondaj kuyuları ve kaynak sularının yüzeye çıkış noktaları ile hazne kayanın yayılımı dikkate alındığında, tahmini yeraltısuyu akış yönünün de kuzeydeki yükseltilerden güneydeki Singeç vadisi ve Keban Baraj Gölü'ne doğru olduğu kabul edilebilir (Şekil 4). Şekil 4'deki drenaj ağı haritasında görüldüğü gibi inceleme alanının güney kesimlerinde, Pertek ve Çakırbağ civarında yayımlı olan Pertek Magmatitleri üzerindeki drenaj sıklığı fazladır. Bu durum söz konusu alanlarda yağışın yeraltına süzülmesinin az, sellenmesinin ise daha fazla olduğuna işaret etmektedir. Aksine, Singeç vadisinin kuzey kesimlerinde Keban Metamorfitlelerine ait kireçtaşı ve mermerler üzerinde drenaj sıklığının daha az olması, yeraltı suyunun yağıştan beslenmesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Çetindağ (1989), metamorfitlelerin birincil gözeneginin oldukça düşük, ancak tektonizma sonrası oluşan çatlaklı, kırıklı ve karstik yapı nedeniyle geçirimsizlik, ikincil porozite ve su depolama kapasitesinin çok artmış olduğuna dikkat çekmiştir. Hazne kayadaki doğrultu atımlı fay ve çok sayıda kırık sistemi jeotermal akışkanın yüzeye çıkmasını denetlemektedir. Okan (2004) tarafından düşük poroziteli olduğu belirlenen Kırkgeçit formasyonunun marnları (toplam porozite %13-19) ve Karabakır Formasyonu'nun tüfleri (toplam porozite %20-37) sadece Singeç vadisinin kuzeyinde sınırlı alanlarda sıcak su akiferinin örtü kayalarını oluşturmaktadır. Singeç vadisi ve yakın çevresinde, hazne kaya konumundaki kristalize kireçtaşı ve mermer birimlerinin üzerinde çoğu alanda örtü kayası bulunmadığı göz önüne alındığında, Pertek jeotermal alanı yağıştan beslenimi fazla (Çizelge 1) olan açık bir sistem olarak değerlendirilebilir. Alandaki kaynak çıkışlarındaki sıcaklık değerlerinin düşük oluşu da bunu desteklemektedir. Hidrojeolojik gözlemlerin yapıldığı sıcak ve soğuk su noktalarından alınan örneklerin numaraları, koordinatları ve akifer kayaçları Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgedeki K-1 ve K-2 kaynakları diğer sıcak su kaynaklarına göre iletkenlik, toplam çözünmüş madde miktarı, içerdikleri anyon ve kation konsantrasyonları ve sıcaklıklarının düşük (19-22°C arası) olmaları nedeniyle, makalede soğuk

Araştırma makalesi/Research article
DOI: 10.29132/ijpas.546499

yeraltı suyu kaynağı olarak tanımlanmıştır. Benzer şekilde, SM-1 kaynağının da diğer mineralli kaynaklara göre sıcaklığının düşük (19-22 °C arası)

ve ölçümün doğrudan kaynak ağzından değil, kaptajda biriken sudan yapılmış olması nedeniyle, soğuk mineralli su kaynağı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Çalışma alanının drenaj ağı haritası

Çizelge 2. Pertek jeotermal alanında, hidrojeolojik gözlemlerin yapıldığı su noktaları.

Örnek Numaraları (su kaynağı)	Koordinat (Enlem/Boylam)	Akifer (kayaç türü)
J-1 (sıcak su kaynağı)	38°54'48.82"K / 39°15'26.15"D	Keban Metamorfileri (kristalize kireçtaşı)
J-2 (sıcak su kaynağı)	38°54'45.41"K / 39°15'28.34"D	Keban Metamorfileri (kristalize kireçtaşı)
J-3 (sıcak su kaynağı)	38°54'48.84"K / 39°15'17.06"D	Keban Metamorfileri (kristalize kireçtaşı)
S-1 (sıcak su sondajı)	38°54'29.80"K / 39°15'0.46"D	Pertek Magmatitleri + Keban Metamorfileri (tonalit+kristalize kireçtaşı)
A-1 (termal havuz atık suyu)	38°50'43.59"K / 39°17'33.16"D	Keban Metamorfileri (kristalize kireçtaşı)
H-1 (termal havuz suyu)	38°50'43.09"K / 39°17'39.46"D	Keban Metamorfileri (kristalize kireçtaşı)
SM-1 (soğuk mineralli su kaynağı)	38°54'45.92"K / 39°15'2.10"D	Keban Metamorfileri (amfibolit şist)
D-1 (Singeç dere suyu)	38°54'43.65"K / 39°15'32.36"D	Jeotermal kaynak karışımı öncesi meteorik su
K-1 (soğuk su kaynağı)	38°54'46.32"K / 39°14'57.57"D	Keban Metamorfileri (kristalize kireçtaşı)
K-2 (soğuk su kaynağı)	38°54'46.56"K / 39°14'54.38"D	Keban Metamorfileri (kristalize kireçtaşı)
G-1 (Keban baraj gölü suyu)	38°54'40.95"K / 39°14'53.40"D	Jeotermal kaynakların karışım noktası
G-2 (Keban baraj gölü suyu)	38°54'40.05"K / 39°14'48.08"D	Jeotermal kaynakların karışım noktası uzağı
G-3 (Keban baraj gölü suyu)	38°50'42.01"K / 39°17'31.29"D	Termal havuz atık suyu karışım noktası
G-4 (Keban baraj gölü suyu)	38°50'35.58"K / 39°17'33.38"D	Termal havuz atık su karışım noktasından uzak

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

Suların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Pertek jeotermal alanındaki Singeç vadisi içerisinde ve Keban baraj gölü kıyısında, kurak dönemde çok sayıda sıcak su çıkış noktası belirlenmiştir. Yağışlı dönemde Singeç çayı debisi ve Keban baraj gölü su seviyesi yükseldiği için, bu sıcak su çıkış noktalarının çoğu göl alanı içerisinde kalmıştır.

Bu nedenle, 14 adet su noktasından, 2015 yılı Haziran ve Ekim aylarında (yağışlı ve kurak dönem sonunda) örnekleme yapılmıştır. Örneklenen sulara arazide yerinde yapılan ölçümler ile laboratuvar analiz sonuçlarına ait yağışlı ve kurak dönem ortalamaları Çizelge 3 ve 4’de verilmiştir.

Çizelge 3. Pertek jeotermal alanındaki suların Haziran dönemine ait bazı kimyasal analiz sonuçları (konsantrasyonlar mg/L olarak verilmiştir). Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) = $Na^+ / [(Ca^{++} + Mg^{++}) / 2]^{0.5}$.

Örnek No	J-1	J-2	J-3	S-1	A-1	H-1	SM-1	D-1	K-1	K-2	G-1	G-2	G-3	G-4
pH	6,18	7,55	6,25	6,27	7,38	6,42	6,34	8,03	7,66	8,31	7,12	8,2	7,72	8,62
T (°C)	33,9	25,5	33,9	38,2	31,3	36,7	21,8	20,01	19,5	21,4	23,5	25	29,2	22,6
Eh (mV)	50	-31	46	45	-20	36	39	-52	-39	-70	-5	-66	-33	-89
EC (µS/cm)	1992	816	2260	2300	2220	2330	1983	491	402	452	431	356	1873	342
TDS (mg/L)	600	200	700	700	600	1600	600	100	200	200	100	100	500	100
Na ⁺ (mg/L)	40,79	18,99	46,49	44,3	44,85	43,3	27,71	6,01	7,36	8,53	19,71	18,54	44,33	20,68
K ⁺ (mg/L)	12,74	4,77	14,18	13,3	12,61	12,99	11,23	1,61	6,52	8,42	2,65	2,54	12,88	3,11
Ca ⁺⁺ (mg/L)	386,5	106,97	409,57	402,8	390,6	408,3	297,2	83,3	58,06	53,49	46,46	46,2	368,89	47,05
Mg ⁺⁺ (mg/L)	64,88	44,59	70,27	83,49	80,53	82,38	130,5	14,35	16,66	24,23	14,02	14,19	80,7	14,8
Cl ⁻ (mg/L)	32	5	37	35	35	33	18	2	2	2	19	18	34	19
SO ₄ (mg/L)	65,24	74,26	74,26	75,9	63,61	74,26	58,69	50,49	43,93	52,95	56,23	49,7	72,62	57,05
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	1690	610	1770	1840	1205	1940	960	350	290	365	208	201	1093	209
B ³⁺	2,56	0,11	3,43	3,04	2,95	3,24	1,24	0,032	0,014	0,018	0,11	0,094	2,71	0,175
As	2,19	0,009	4,4	1,74	1,52	1,99	0,003	0,01	0,0014	0,0033	0,005	0,006	1,30	0,06
Al ³⁺	0,004	0,003	0,004	0,006	0,015	0,006	0,008	0,007	0,01	0,008	0,006	0,009	0,009	0,012
Li ⁺	0,19	0,016	0,26	0,25	0,22	0,25	0,09	0,006	0,006	0,009	0,011	0,009	0,21	0,018
NO ₃ (mg/L)	0,17	1,36	0,14	0,16	0,32	0,19	0,36	0,55	1,49	1,04	0,33	0,22	0,24	0,3
Ortofosfat (mg/L)	1,18	1,42	1,42	1,42	1,18	1,18	1,18	1,42	1,42	1,65	1,42	1,42	1,18	1,65
SiO ₂	64,19	25,67	74,88	66,32	66,32	68,46	49,21	10,70	29,95	27,81	2,14	2,14	66,32	2,14
TKM	1300	500	1400	1300	1400	1100	1300	300	100	100	300	200	1000	200
TUKM	200	200	200	200	200	200	300	100	100	100	100	100	100	100
SAR	0,50	0,39	0,56	0,53	0,54	0,51	0,34	0,16	0,22	0,24	0,64	0,61	0,55	0,67

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

Çizelge 4. Pertek jeotermal alanındaki suların Ekim dönemine ait bazı kimyasal analiz sonuçları (konsantrasyonlar mg/L olarak verilmiştir). Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) = $Na^+ / [(Ca^{++} + Mg^{++}) / 2]^{0.5}$.

Örnek No	J-1	J-2	J-3	S-1	A-1	H-1	SM-1	D-1	K-1	K-2	G-1	G-2	G-3	G-4
pH	6,27	7,47	6,19	6,92	7,24	6,43	6,5	7,65	7,52	8,22	6,79	7,99	7,88	8,35
T (°C)	30,7	19,6	34,2	36,5	32,3	36,5	19,9	17,8	20,8	22	21,7	21,8	23,6	23,3
Eh (mV)	47	-30	46	2	-17	32	26	-40	-32	-73	10	-59	-54	-81
EC (µS/cm)	2140	1261	2200	2360	2210	2400	2020	596	448	472	493	380	483	361
TDS (mg/L)	1300	600	1400	1100	900	1300	1100	400	300	400	300	300	300	300
Na ⁺ (mg/L)	40,69	20,25	47,34	42,69	45,3	43,11	24,98	4,86	6,73	7,53	18,52	17,53	21,36	18,35
K ⁺ (mg/L)	11,58	5,58	13,28	11,64	11,58	11,58	9,92	2,07	5,66	7,38	2,73	2,28	3,39	2,32
Ca ⁺² (mg/L)	389,7	182,2	419,64	400,61	366,2	397,91	295,39	103,2	57,04	52,19	56,96	38,29	42,73	32,71
Mg ⁺² (mg/L)	60,87	62,84	67,1	80,55	78,78	80,57	123,26	17,61	18,4	27,33	17,57	14,64	21,19	13,99
Cl ⁻ (mg/L)	25	8	31	28	29	30	14	< 1	< 1	< 1	16	16	20	16
SO ₄ (mg/L)	63,06	73,68	94,32	65,61	78,84	84,32	74,97	32,71	44,65	56,58	42,06	41,1	55,61	44,97
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	1210	620	1360	890	750	1180	1100	410	290	290	290	210	220	140
B ³⁺	2,29	0,483	2,82	2,35	2,29	2,25	1,15	0,055	0,013	0,014	0,242	0,144	0,418	0,150
As	3,55	0,01	5,26	1,18	1,70	1,67	0,002	0,029	0,0013	0,0030	0,05	0,008	0,05	0,008
Al ³⁺	0,009	0,005	0,005	0,007	0,005	0,008	0,001	0,005	0,004	0,014	0,004	0,006	0,005	0,006
Li ⁺	0,16	0,033	0,19	0,18	0,17	0,17	0,08	0,007	0,006	0,008	0,015	0,009	0,018	0,008
NO ₃ (mg/L)	0,22	1,12	0,15	0,17	0,27	0,12	0,46	1,11	2,05	0,81	0,21	0,23	0,38	11,54
Ortostat (mg/L)	0,57	0,01	0,01	0,43	0,99	0,43	0,01	0,85	0,99	0,99	0,29	0,29	0,57	0,15
SiO ₂	68,46	36,37	81,30	70,60	70,60	68,46	51,34	12,84	36,37	29,95	8,56	4,28	10,70	4,28
TKM	1000	500	1100	1300	1500	1700	1400	900	300	0	200	200	300	200
TUKM	100	100	200	200	300	200	300	100	100	100	100	100	100	200
SAR	0,51	0,33	0,57	0,51	0,56	0,51	0,31	0,12	0,20	0,21	0,55	0,61	0,66	0,68

Singeç dere suyu hariç, incelenen suların sıcaklıkları yaklaşık 20-38 °C arasında değişmekte olup “ılık sular” ve düşük entalpili alanlar sınıfına girmektedirler. Kurak ve yağışlı dönemde mineralli sular asidik ve nötre (pH=6,18-7,55 arasında) yakın, K-1 ve K-2 kaynakları ile Singeç dere suyu nötre yakın ve bazik (pH sırasıyla 7,52-8,31 ve 7,65-8,03 arasında), Keban baraj gölü nötr ve bazik (pH=6,79-8,62 arasında) dir. Bu değerlerden görüldüğü gibi, inceleme alanındaki suların çözücü-aşındırıcı özelliği yüksek değildir. Hem (1985) tarafından açıklandığı gibi sulardaki karbonat, hidroksit ve bikarbonat iyonlarının miktarı arttıkça suyun bazik özelliği artarken, serbest mineral asitleri ve karbonik asit miktarı arttıkça suyun asit özelliği artmaktadır. J-2 kaynağı hariç, mineralli suların pH değerleri TS-266, WHO ve EPA içme suyu standartlarında

değildir. İletkenlik (EC) değerleri kurak dönem sonunda bir miktar artış gösterse de, maksimum 2400 µS/cm (sıcak su sondajı S-1) değeri ile uygun sınırlar içerisinde kalmaktadır. Sıcak sularda toplam çözülmüş katı madde (TDS) miktarı yağışlı dönem sonunda 700 mg/l iken kurak dönem sonunda iki katına çıkmaktadır. Sondaj ve kaynak sularının sertlik değerleri, kurak dönem sonunda bir miktar artsa da çok fazla bir değişkenlik göstermez. Sadece Keban baraj göl suyuna göre Ca ve Mg içeriği daha yüksek olan termal havuz atık suyunun deşarj edildiği noktada (G-3 nolu örnek noktası), deşarj debisinin yüksek olduğu Haziran döneminde artış gözlenmiştir. Fransız sertlik derecesine göre mineralli sular çok sert, K-1 ve K-2 kaynakları ve dere suyu sert ve göl suyu az sert su sınıfına girmektedir. İncelenen suların, alkalinite ve toplam

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

sertlik parametreleriyle orantılı olarak kalsiyum (Ca) içerikleri de kısmen yüksek olup, kurak ve yağışlı dönemde bariz bir farklılık yoktur. Sadece yağışlı dönemde, dere suyu karışımının olduğu J-2 no'lu örneğin Ca^{+2} içeriğinde belirgin bir azalma görülmüştür. J-2 nolu kaynak hariç tüm mineralli suların Ca^{+2} içeriği, TS-266 ve WHO'nun içme suyu standartlarının üzerindedir. Bu sulardaki Ca'un kaynağı hazne kayacı olan Keban Metamorfite'ne ait kristalize kireçtaşı ve mermerlerdir. İncelenen mineralli sulardaki en düşük Mg değeri 44,59 mg/l olarak yağışlı dönemde sonunda J-2 no'lu kaynağa, en yüksek değer ise 130,5 mg/l ile SM-1 kaynağında ölçülmüştür. Ca'da olduğu gibi, J-2 no'lu örneğin yağışlı dönemdeki Mg içeriğinin belirgin olarak azalması, yağış sularının kısa sürede söz konusu kaynağı etkilediğini ve bu kaynağa dere suyu karışımının fazla olduğunu göstermektedir. TS-266 standartlarına göre, J-2 no'lu örnek hariç diğer mineralli sular, Mg içerikleri bakımından da içme suyuna uygun değildir. Pertek jeotermal alanının jeolojik yapısı düşünüldüğünde sulardaki Mg'un muhtemel kökeni, Keban Metamorfite'nin mermerleri ve Pertek Magmatitleri ile Karabakır Formasyonundaki altere olmuş mika ve amfibol mineralleri olabilir.

Mg'un aksine incelenen sıcak suların Na değeri çok yüksek değildir. Na gibi K değerleri de karbonatlı kayalardan gelen suların değerlerini temsil etmektedir. İncelenen sıcak suların klor (Cl) içeriği düşük olup, en yüksek klor konsantrasyonu 37 mg/l ile S-1 (sıcak su sondajı)'de ölçülmüştür. İncelenen tüm sıcak ve soğuk kaynak sularının Cl konsantrasyonları içme suyu için belirlenen sınırlar içerisinde. İnceleme alanındaki tüm suların kurak ve yağışlı dönem sonundaki SO_4^{-2} değerlerinde fazla bir değişiklik görülmez ve TS-266, WHO ve EPA'nın belirlediği içme suyu standartlarına uygundur. SO_4^{-2} iyonunun kaynağı, Keban Metamorfite'ne ait karbonatlar ile Pertek magmatitlerinin dokanaklarında gelişen skarn oluşumlu piritin (FeS_2)'in oksidasyonu ile oluşan demir sülfat ($FeSO_4$)'dir. HCO_3 değeri tüm sulardaki en yüksek anyonu oluşturmaktadır. En yüksek HCO_3 değeri J-3 nolu kaynağa, en düşük değerler ise, termal havuz suyunun deşarj edildiği G-3 nolu örnek noktası hariç, göl suyunda ölçülmüş olup, anyon sıralaması $HCO_3^{-} > SO_4^{2-} > Cl^{-}$ şeklindedir. Sıcak sulardaki HCO_3 değerinin yüksek olması, Pertek jeotermal alanının akifer kayacı olan Keban

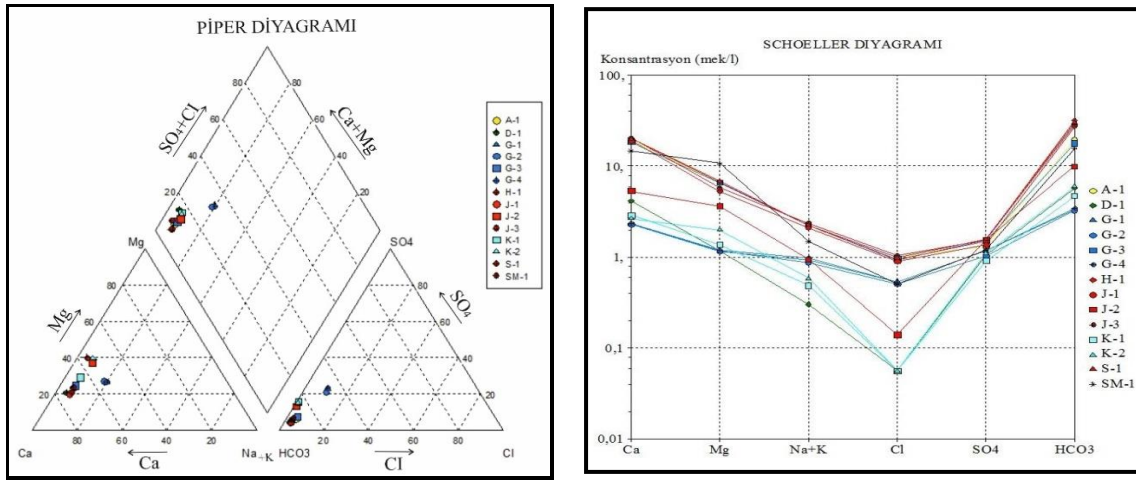
Metamorfite'nin karbonatlarıyla etkileşiminin belirtisidir. Dere suyu karışımının olduğu J-2 örneği dışındaki sıcak su örneklerinin kurak dönem sonundaki HCO_3^{-} değerinde azalma gözlenmektedir. Bu durum kurak dönemde, meteorik sudan daha az beslenme ve su-kayaç ilişkisini işaret etmektedir.

İnceleme alanındaki tüm suların Fe (yağışlı dönem SM-1 hariç), Al, Cu, Cr ve Pb değerlerinin her iki dönemde TS-266, WHO ve EPA'nın belirlediği içme suyu kullanımına uygun olduğu görülmektedir. Soğuk kaynak suları (K-1 ve K-2) ve soğuk mineralli su kaynağının (SM-1) arsenik (As) içeriği her iki dönemde TS-266, WHO ve EPA'nın içme suyu standartlarına uygundur. Aksine, dere suyu karışımının olduğu J-2 nolu örnek hariç, tüm sıcak sulara arsenik (As) ve bor (B) değerleri TS-266, WHO ve EPA'nın içme suyu standartlarının (As 0.01 ve B 1-2 mg/L üst limit) çok üzerindedir. Bu değerler termal atık su debisinin yüksek olduğu dönemde, özellikle deşarj noktasındaki göl suyunu (G-3 nolu nokta) olumsuz etkilemektedir.

As yaygın olarak skarn zonlarında oluşan sülfürlü minerallerin içinde, jeotermal alanlarda ise doğrudan akışkanın içinde bulunmaktadır. Pertek jeotermal alanındaki yüksek As konsantrasyonuna, muhtemelen Karabakır formasyonunun volkan gazlarındaki hidrojen sülfür (H_2S) ve Pertek magmatitleri ile Keban Metamorfite'nin karbonatları arasındaki skarn zonlarındaki pirit (FeS_2) gibi sülfürlü minerallerin varlığı neden olmuştur. Bor'un kaynağı da hazne kayacıdaki karbonatlar ve Karabakır Formasyonu'nun volkanitleridir. Pertek jeotermal alanının kuzey doğusunda yer alan Munzur vadisi dere sedimanlarında da As zenginleşmesi olduğu Çimen ve ark. (2015) tarafından belirlenmiştir. Söz konusu araştırmacılar, yüksek As konsantrasyonuna Tunceli'nin kuzey batısındaki, Karabakır formasyonunun eşleniği olan, üst Miyosen-Pliyosen volkanik kayalarla ilişkili Pb, Zn, Cu cevherleşmesinin neden olduğunu açıklamışlardır.

Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH), 1979 su sınıflandırma yöntemine göre çalışma alanındaki, J-1 nolu sıcak su kaynağı Ca- HCO_3 , G-4 nolu göl suyu Ca-Mg-Na- HCO_3 - SO_4 sınıfında, diğer tüm sular Ca-Mg- HCO_3 sınıfındadır. Pertek jeotermal alanındaki tüm suların kimyasal bileşimleri ile anyon-kasyon miktarlarının görsel olarak kolaylıkla değerlendirilebilmesi için Piper ve yarı logaritmik Schoeller diyagramı kullanılmıştır (Şekil 5).

Araştırma makalesi/Research article
DOI: 10.29132/ijpas.546499



Şekil 5. İnceleme alanındaki tüm suların Piper ve Schoeller diyagramlarındaki konumları.

Piper diyagramında, incelenen soğuk ve sıcak sular 1. ve 5. bölgede gruplanmışlardır. Bu bölge sularının karbonat sertliği %50'den fazla olup $Ca^{+2}+Mg^{+2}>Na^{+}+K^{+}$ dur. Aynı zamanda bu bölgede $CaCO_3$ ve $MgCO_3$ 'lü sular bulunmaktadır. Daha düşük sıcaklıklardaki J-2, K-1 ve K-2 kaynakları da, S-1 gibi sıcaklığı daha yüksek kaynaklarla aynı bölgede yer almıştır. Buradan hareketle Pertek jeotermal alanında, sıcaklığı değişken de olsa incelenen tüm kaynakların hazne kayasının aynı akifer olduğuna işaret etmektedir.

Schoeller diyagramında ise tüm sular $Ca^{+2}>Mg^{+2}>Na^{+}>K^{+}$ ve $HCO_3^{-}>SO_4^{2-}>Cl^{-}$ şeklinde anyon-kasyon dizilimi sergilemiştir. Bu dizilim karbonatlı kayalardan gelen suların dizilimlerine benzemektedir. Soğuk ve sıcak suların iyonlarını birleştiren doğruların birbirlerine paralel olması, aynı akiferden beslenimi göstermektedir. Sadece, sıcak sular daha yüksek iyon konsantrasyonuna sahiptir. Bu veri, akifer sisteminin arazi çalışmaları ile belirlenen aynı hazne kaya litolojisi (kristalize kireçtaşı ve mermer) tanımıyla da örtüşmektedir. Pertek jeotermal alanındaki sıcaklığı değişken kaynak suları ve Keban baraj gölü suyunun, Piper diyagramından elde edilen su sınıfları, yarı logaritmik Schoeller diyagramı ile birebir örtüşmüş ve suların kimyasal bileşimlerinde etken olan litolojinin karbonatlı kayalar olduğu doğrulanmıştır. Yeraltı sularındaki klorür, deniz suyundan, evaporitlerden, yağmur ve kar suyundan yada atmosferden gelebilir. Çalışma alanındaki sıcak suların klor konsantrasyonları (maksimum 37 mg/l)

düşüktür. Bu düşük klor içeriği sıcak suların meteorik orijinli olabileceklerine işaret etmektedir. İlaveten, $HCO_3^{-}>SO_4^{2-}>Cl^{-}$ şeklindeki anyon sıralaması da bu suların derin bir rezervuardan değil de yanal akışın yüksek olduğu sığ zonlardan (meteorik zon) beslendiğini desteklemektedir.

Suda başlıca çözülmüş maddeler olan K^{+} , Na^{+} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} ve SiO_2 arasındaki ilişkiler hidrojeokimyasal değerlendirmelerin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle, Pertek jeotermal alanındaki sulara, bazı kimyasal parametrelerin korelasyon katsayıları ve doğrusallık ilişkilerinin görülebilmesi için, korelasyon matrisi hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5'de verilmiştir. Hesaplama sonucunda, en yüksek pozitif korelasyonun ($r=0.99$) B, Sr ve Li arasında olduğu görülmüştür. Na^{+} iyonu HCO_3^{-} iyonuyla iyi bir doğrusal ilişki ve pozitif korelasyon ($r=0.88$) göstermektedir. Yine, K^{+} , Na^{+} , HCO_3^{-} ve SiO_2 arasında, korelasyon katsayısı 0.83-0.98 aralığında değişen, doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu durum, özellikle termal suların etkileşimde buldukları hazne (akifer) kayalardaki karbonat ve silikatlara bağlı çözünürlük tepkimelerinin etkisinde olduklarını göstermektedir. Mg^{+2} , Ca^{+2} ve SO_4^{2-} arasındaki pozitif korelasyon ($r=0.77-0.84$) termal suların çeşitli derinliklerde karışım tepkimelerinden (soğuk yeraltı suları ile olan etkileşim) de etkilenmiş olabileceklerini yansıtmaktadır. Cl^{-} ile K^{+} , Na^{+} ve HCO_3^{-} ile SiO_2 arasında görülen iyi pozitif ($r=0.67-0.96$) korelasyon ise sıcak suların uzun süre, hazne kayaç (karbonatlar) ile etkileşimde kalmış olduğuna işaret etmektedir.

Çizelge 5. Pertek jeotermal alanında incelenen 14 su örneğine ait, bazı kimyasal parametrelerin korelasyon katsayıları ve doğrusallık ilişkileri (derişimler mg.L⁻¹ dir)

	Ph	EC	Na	Ca	Mg	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Sr	Mn	Fe	Li	Cu	Ni
Ph	1	-0,83	-0,7	-0,82	-0,73	-0,74	-0,87	-0,61	-0,6	-0,75	-0,77	-0,77	-0,52	-0,31	-0,74	0,3	-0,5
EC		1	0,91	0,99	0,88	0,92	0,96	0,78	0,86	0,95	0,94	0,96	0,43	0,24	0,95	-0,35	0,32
Na			1	0,92	0,7	0,83	0,88	0,96	0,83	0,97	0,83	0,96	0,49	-0,04	0,96	0,36	0,18
Ca				1	0,83	0,93	0,97	0,80	0,84	0,97	0,95	0,98	0,40	0,16	0,97	-0,33	-0,29
Mg					1	0,80	0,79	0,55	0,77	0,71	0,78	0,75	0,22	0,60	0,72	-0,38	0,49
K						1	0,91	0,69	0,82	0,91	0,98	0,92	0,50	0,14	0,91	-0,24	0,27
HCO ₃							1	0,75	0,85	0,94	0,94	0,95	0,56	0,13	0,94	-0,34	0,32
Cl								1	0,69	0,89	0,67	0,87	0,45	-0,10	0,89	-0,33	0,15
SO ₄									1	0,83	0,83	0,82	0,51	0,04	0,82	-0,48	0,09
B										1	0,92	0,99	0,55	-0,02	0,99	-0,30	0,16
SiO ₂											1	0,94	0,52	0,09	0,93	-0,20	0,22
Sr												1	0,52	0,03	0,99	-0,30	0,20
Mn													1	-0,08	0,51	-0,23	0,16
Fe														1	-0,02	-0,20	-0,95
Li															1	-0,29	0,15
Cu																1	-0,23
Ni																	1

Kimyasal analiz sonuçlarından hesaplanan SAR ve suyun EC değeri dikkate alındığında; G-4, G-2, G-1, K-1, K-2, D-1 no'lu örnekler C2-S1 sınıfındadır. Dere suyu karışımının yüksek olduğu sıcak su kaynağı (J-2) ve J-1, SM-1, G-3, A-1 nolu örnekler C3-S1 sınıfında ve S-1, J-3, H-2 nolu örnekler C4-S1 sınıfında yer almaktadırlar. C2-S1 sınıfı sular orta tuzlu, az sodyumlu sular olduğundan, termal atık suyun deşarj edilmediği alanlardaki göl suyu, termal su karışımının olmadığı Singeç dere suyu ile K-1 ve K-2 kaynakları tuzluluk ve sodyum tehlikesi olmadan kullanılabilir. C3-S1 sınıfında yer alan termal kaynaklar ve termal atık suyu, tuzlu ve az sodyumlu olduğundan sulamada tuza dayanıklı bitkiler seçilerek kullanılabilir. C4-S1 sınıfında olan, J-3 nolu termal kaynak ve sıcak su sondajının suyu ise çok tuzlu ve az sodyumlu olduğundan sadece tuza çok dayanıklı bitkilerde kullanılabilir.

Jeotermometre Uygulamaları

Jeotermal sistemlerde akifer (hazne) sıcaklığının tahmin edilmesi termal suların uygun şekilde kullanılabilirliği açısından önemlidir. Jeotermal alanlarda hazne akışkan sıcaklıklarının doğrudan ölçülmesi oldukça masraflı ve zaman alıcıdır. Ancak, üretim esnasında haznenin üretime karşı verdiği tepkiyi izlemek ve takip etmek için, akışkan sıcaklığının bilinmesi de gereklidir. Bu amaçla, hazne akışkan sıcaklıklarının doğrudan ölçülemediği durumlarda, birçok kimyasal ve izotop jeotermometre uygulaması kullanarak hazne akışkan sıcaklıkları tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Pertek

jeotermal alanındaki sıcak suların bu çalışma kapsamında yapılan kimyasal analiz sonuçları kullanılarak birçok jeotermometre hesaplamaları yapılmıştır. Silis jeotermometrelerinden amorf silis ve β kristobalit jeotermometresi ile Na-K-Ca jeotermometre sıcaklıkları eksi değerler yani kaynak ve sondaj çıkış sıcaklığından daha düşük değerler vermiştir. Li/Mg jeotermometresi kaynak çıkış sıcaklıklarının ya altında ya da biraz üstünde (maksimum 42°C), Na/K jeotermometresinde ise muhtemelen çözelti içindeki Na'un azalması nedeniyle, oldukça yüksek sıcaklık (318-343°C arası) değerleri vermiştir. Na/Li ve silis jeotermometrelerinden kuvars, kalsedon ve kristobalit jeotermometreleri ile hesaplanan hazne akışkan sıcaklıkları birbiri ile daha uyumludur. Çizelge 6'da verildiği gibi; Kuvars jeotermometresi (buhar kaybı yok) ile 74-127°C arasında, kalsedon jeotermometresi ile 42-99°C arasında hazne kaya akışkan sıcaklıkları hesaplanmıştır. Bu durum, Pertek jeotermal alanındaki sıcak suların hazne kaya akışkan sıcaklıklarının tahmininde katyon jeotermometrelerinin (özellikle Na/K) güvenilir olmadığını göstermektedir.

İncelenen sıcak su örnekleri Şekil 6a'da verilen Na-K-Mg diyagramında, su ve kayaç arasındaki dengenin sağlanmadığı, yani anyon-katyon dengesinin tam oluşmadığı alana düşmüş olması da katyon jeotermometre hesaplarının güvenilir olmadığına işaret etmektedir. İlave, örneklerin çok dar bir alanda konumlanmış olduğu ve 100-125°C arasında bir hazne akışkan sıcaklığı olabileceği görülmektedir.

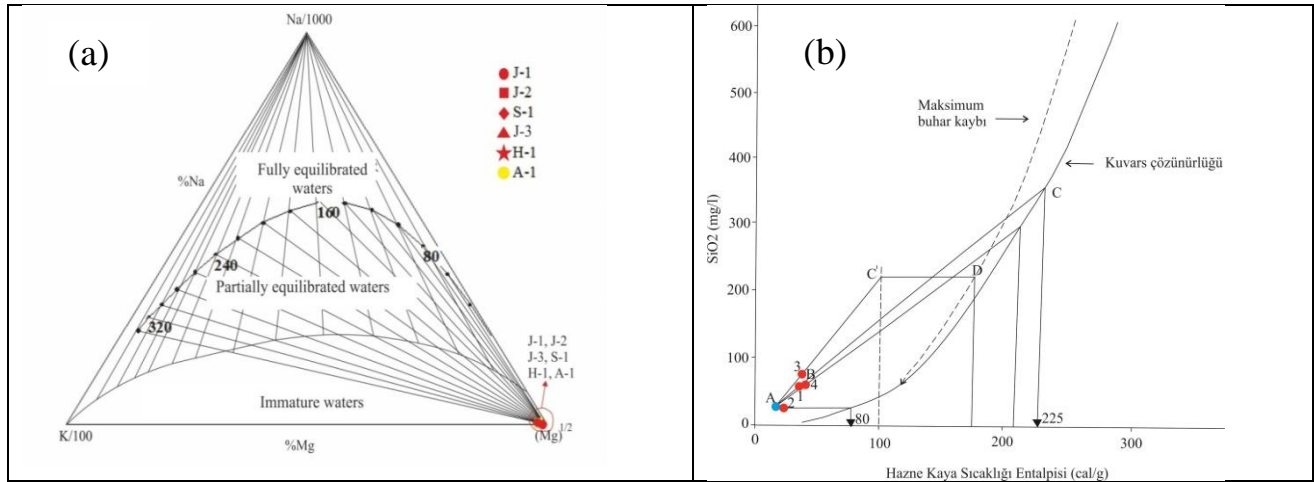
Araştırma makalesi/Research article
DOI: 10.29132/ijpas.546499

Çizelge 6. Bazı jeotermometre hesaplamalarından elde edilen hazne akışkan sıcaklıkları. ^a: buhar kaybı yok, ^b: 100°C’de maksimum buhar kaybı (Fournier, 1977), ^c: Khakara ve Mariner (1989), ^d: Fouillac ve Michard (1981), ^e: Giggenbach vd. (1983)

Örnek No	Sıcaklık (°C)	SiO ₂ (kuvars) ^a	SiO ₂ (kuvars) ^b	SiO ₂ (kalsedon)	SiO ₂ (α -ristobalit)	Li/Mg ^c	Na/Li ^d	Na/K ^e
J-1	25,5	115	114	86	64	37	95	343
J-1	19,6	118	90	90	68	-	85	332
J-2	33,9	74	78	42	24	40	18	318
J-2	30,7	87	90	56	37	42	42	329
J-3	33,9	122	118	94	71	34	105	341
J-3	34,2	127	124	99	76	-	86	331
S-1	35,6	116	115	87	66	40	105	339
S-1	33,2	119	117	91	68	40	88	328

Şekil 6a’da örneklerin konumlandığı bu sıcaklık aralığı, Çizelge 6’da verilen kuvars jeotermometresi sonuçları ile daha uyumludur. Karışım modelleri, keşfedilen yeni bir jeotermal sahanın rezervuar sıcaklığını belirlemek ya da bir jeotermal sahanın geliştirilmesinde kullanılabilen modellerdir. Jeotermal sular, yüzeye çıkışları sırasında soğuk sularla karışabilirler. Silika miktarının, jeotermal suyun kökeninde olduğu gibi korunduğunun varsayıldığı, Entalpi-Silika (Fournier, 1985) karışım

modeli ile sıcak sulara soğuk su karışım oranı ve maksimum hazne kaya sıcaklığı açıklanabilmektedir. Pertek jeotermal alanındaki sıcak sular için oluşturulan silis-entalpi diyagramında (Şekil 6b), sıcak sulara soğuk su karışım oranının (diyagramdaki AB/AC’ oranı) %60 ile %88 arasında (sıcak su oranı %40 ile %12 arasında) oldukça yüksek olduğu ve sistemin hazne kaya sıcaklığının 80-225 °C arasında olabileceği görülmüştür.



Şekil 6. (a): Sıcak suların ve termal atık suyun Giggenbach (1988) Na-K-Mg üçgen diyagramındaki konumları; **(b):** İnceleme alanındaki sıcak suların Entalpi-Silis diyagramı (Fournier,1977b)

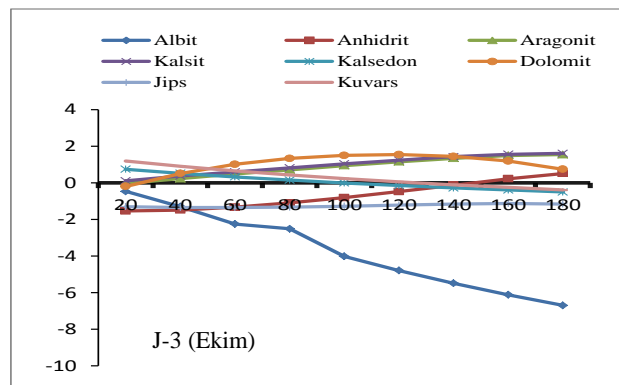
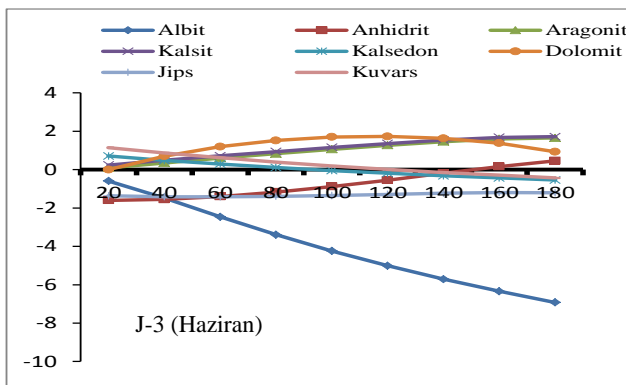
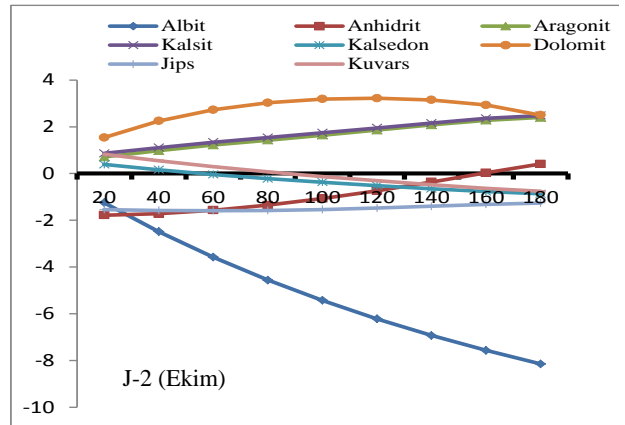
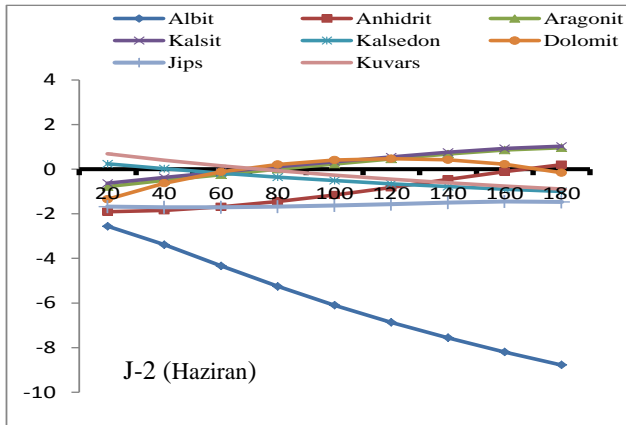
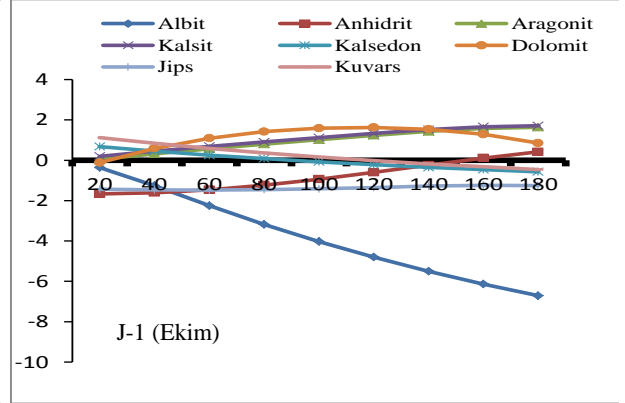
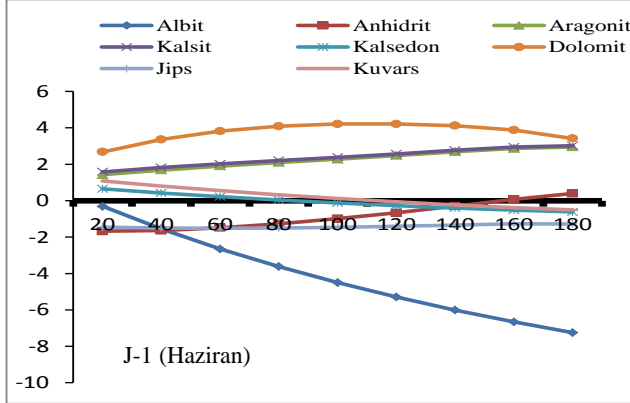
Bir grup mineral belli sıcaklıkta yaklaşık denge halinde ise, sıcak akışkanın bu minerallere doymun oldukları sıcaklık akifer sıcaklığı olduğu yaklaşımdan (Mutlu, 1998) hareketle, Pertek jeotermal alanındaki sıcak suların 100 °C’ye

yaklaşan rezervuar sıcaklığına sahip olabileceği söylenebilir. Kimyasal analiz sonuçlarından yararlanarak, jeotermal alandaki hazne sıcaklığının tahmin edilmesi için bir diğer yaklaşım yöntemi mineral doymunluk indekslerinin (Reed ve Spycher, 1984) kullanılmasıdır. Çünkü, suda çözülmüş halde bulunan bozmuş minerallerin çözünürlükleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Eğer bir grup

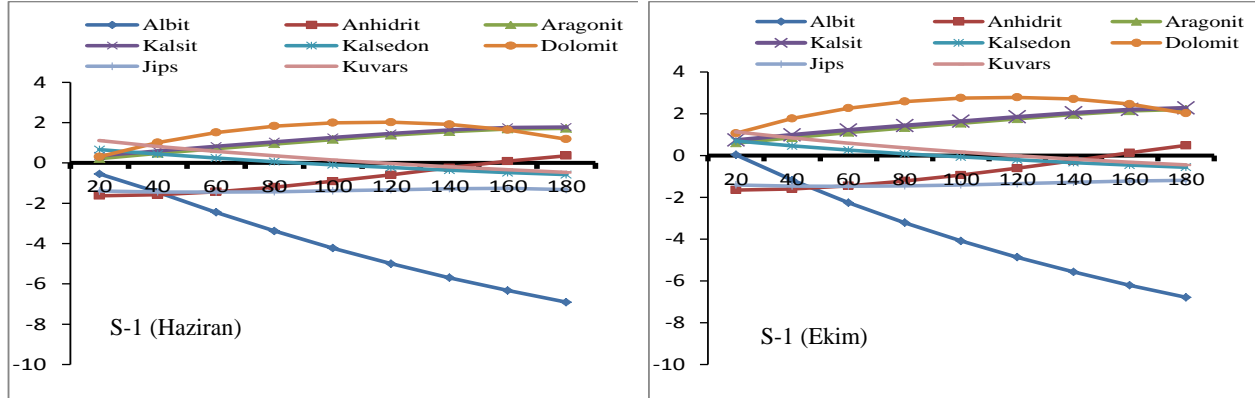
Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

mineral belli sıcaklıkla yaklaşık denge halinde ise sıcak akışkanın bu minerallere doymun oldukları ve bu sıcaklığın da akifer sıcaklığı olduğu sonucu çıkartılabilir (Mutlu, 1998). Bu amaçla, incelenen sıcak suların doymunluk indeksleri, farklı sıcaklık derecelerinde (20-180°C arası) anhidrit, albit, aragonit, kalsedon, kalsit, kuvars, dolomit ve jips mineralleri için hesaplanmıştır.

Ayrı ayrı hesaplanan doymunluk indeksi değerleri Excel programında bir araya getirilmiş ve doymunluk indeksi-sıcaklık diyagramları oluşturulmuştur (Şekil 7).



Araştırma makalesi/Research article
DOI: 10.29132/ijpas.546499



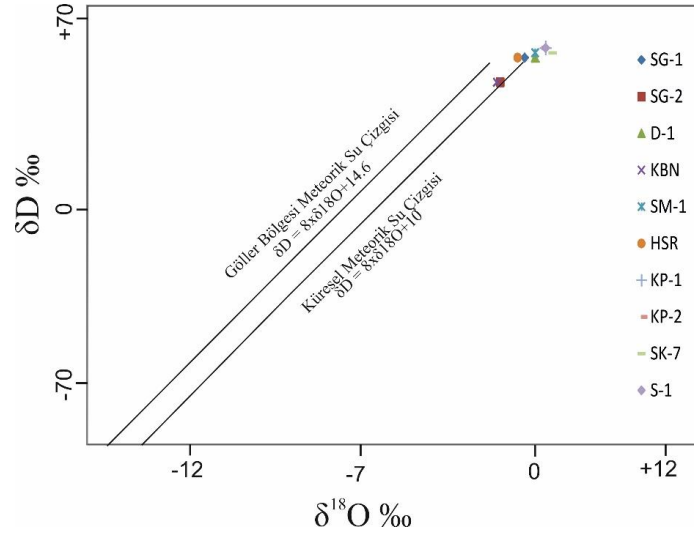
Şekil 7. Sıcak su örneklerinin Haziran ve Ekim dönemlerindeki doygunluk indeksi-sıcaklık grafikleri.

Keban Baraj gölünü besleyen Singeç çayının dere suyu D miktarının Keban Barajı göl suyuna göre daha yüksek olması, dere suyuna karışan jeotermal kaynaklardan etkilendiğini göstermektedir. T değerlerine göre bölgede bulunan sıcak sular derin dolaşım, soğuk suların ise sığ dolaşım, ^{18}O -D ilişkisine bakıldığında (Şekil 8), sıcak suların, soğuk sulara göre daha fazla kayaç etkileşimi altında kaldıkları görülmektedir. Şekil 8'deki Küresel Meteorik Su Çizgisi buharlaşma etkisi altında olmayan atmosferik suları temsil etmektedir (Craig, 1961).

İncelenen soğuk ve sıcak su örneklerinin tümü Göller Bölgesi Meteorik Su Çizgisinin altında, Küresel Meteorik Su Çizgisi ile uyumlu olduğu görülmektedir. D-T ilişkisine göre; Pertek jeotermal alanında incelenen sulardan S-1 sıcak su sondajı en derin dolaşım, SK-7 sıcak su noktası ise en fazla rezervuarda bekleyen suyu temsil etmektedir.

Çizelge 4. Su noktalarının izotop analiz sonuçları SG-1 ve 2: Sağman köyü yakını soğuk su kaynakları, D-1: Singeç çayı dere suyu, KBN: Keban baraj gölü suyu, SM-1: Singeç köprü yanı kaynak, HSR: Hasır maden suyu, KP-1 ve 2: Singeç vadisi içi sıcak su kaynağı kaptajları, SK-7 ve S-1: Singeç vadisi yanı sıcak su sondajları ($\delta^{18}\text{O}$, δD ve T değerleri Gerçek 2009'dan alınmıştır).

Örnek No	SG-1	SG-2	D-1	KBN	SM-1	HSR	KP-1	KP-2	SK-7	S-1
$\delta^{18}\text{O}$ ‰	-9,9	-9,2	-10,2	-9,1	-10,2	-9,7	-10,5	-10,4	-10,7	-10,5
δD ‰	-64	-59	-64	-59	-65	-64	-66	-66	-65	-66
T (TU)	9,97	7,33	6,17	6,91	2,48	1,40	2,06	1,61	1,48	0,22



Şekil 8. Pertek jeotermal alanındaki bazı yüzey ve soğuk-sıcak yeraltısularının Oksijen ($\delta^{18}\text{O}\%$) – Döteryum ($\delta\text{D}\%$) ilişkisi. İzotop analiz sonuçları Gerçek (2009)'den; Diyagram örneği Davraz. ve Balın (2015)'dan alınmıştır. Küresel Meteorik Su Çizgisi Craig (1961)'e; Göller Bölgesi Meteorik Su Çizgisi Dilsiz (2006)'e göre çizilmiştir.

ÇIKARIMLAR VE ÖNERİLER

Genel jeoloji amaçlı araştırmalarda açıklandığı gibi; Pertek jeotermal alanının yer aldığı bölgede, K-G doğrultulu sıkışma rejimi Geç Kretase sonrası dönemde de devam etmiş ve Keban Metamorfitle, yaklaşık D-B uzanımlı bindirme fayı ile Pertek Magmatitleri üzerine itilmiştir. Orta Miyosen sonrasında ise bu bindirme fayını öteleyen, yaklaşık KB-GD uzanımlı sağ yanal doğrultu atımlı Pertek Fayı (Aksoy, 1994) oluşmuştur.

Bu çalışma kapsamında yapılan arazi incelemeleri sonucunda; Singeç çayı vadisinde, Keban Metamorfitle'nin kristalize kireçtaşı ve mermerlerinde, Pertek Fayı'nın etkisiyle oluşmuş çok sayıda makaslama kırık ve çatlakları belirlenmiştir. Tektonizmanın etkisiyle çatlaklı-kırıklı ve karstik yapı kazanan bu kristalize kireçtaşları ve mermerler, Pertek jeotermal alanındaki soğuk ve sıcak suların en önemli hazne (akifer) kayacı durumuna gelmiştir. İlaveten, söz konusu makaslama kırıkları Pertek jeotermal alanındaki meteorik suların dolaşımı için gereken süreksizlikleri oluşturmuş ve aynı zamanda hazne kayacık içindeki soğuk ve sıcak suların farklı kotlardan yüzeye çıkmasını sağlamıştır.

Alandaki hazne kayacık karbonatlı olması nedeniyle, akiferden çıkan soğuk ve sıcak kaynaklar ve sıcak sondaj sularının karbonat sertlikleri yüksek (%50'nin üzerinde) ve $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$ ve $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$ şeklinde bir katyon-anyon dizilimi

sergilemektedir. Tüm sular da baskın katyonun Ca^{+2} , baskın anyonun ise HCO_3^{-} olması hazne kayacık litolojisiyle (kireçtaşı ve mermerler) uyumludur. Hidrojeokimyasal ve izotop kimyası verilerine göre, Pertek jeotermal alanındaki nispeten soğuk ve mineralce fakir kaynakların (K-1 ve K-2) sığ, sıcak ve mineralce daha zengin kaynak ve sondaj suları derin dolaşımıdır. Sıcak minerali sular da dahil olmak üzere tüm sular düşük klor içeriklidir. İzotop analizi sonuçlarına göre, tüm örneklerin $\delta^{18}\text{O}$ - δD diyagramı üzerindeki konumları meteorik kökene işaret etmektedir.

Pertek jeotermal alanının esas hazne kayacı olan Keban Metamorfitle üzerinde geçirimsiz örtü bulunmadığından, hazne kaya akışkan sıcaklığı yüksek değildir. Bu açık sistem içerisinde derin dolaşım ile ısınan sıcak sular yüzeye yaklaştıklarında aynı akiferin sığ dolaşımı daha soğuk suları ile karıştığı için sıcaklıkları önemli oranda azalmaktadır.

Na-K-Mg değerlerine göre sıcak sular “olgun olmayan sular” sınıfında olduğundan, hazne kaya sıcaklıklarının hesaplanmasında katyon jeotermometreleri güvenilir değildir. Sistemdeki sıcak ve soğuk su dengesinin korunması ve jeotermal sistemin sürdürülebilmesi için sıcak su sondajları açılmadan önce hazne kaya içindeki soğuk ve sıcak su seviyelerinin derinlikleri yapılacak ayrıntılı çalışmalarla ortaya çıkartılmalıdır. İlaveten, jeotermal sistemin zamana bağlı değişiklikleri

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

kimyasal analizlerle izlenmelidir. Saha gözlemleri ve jeokimyasal verilerle daha uyumlu olan kalsedon jeotermometre hesaplamaları, düşük entalpili olan Pertek jeotermal alanında, hazne kaya akışkan sıcaklığının yaklaşık 100°C'ye kadar çıkabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, Keban Metamorfileri'nin tabanına kadar incek ve soğuk su akiferinden korunmuş derin sondajlarla, mevcut kullanım sıcaklığının artırılması mümkün görünmektedir.

Tüm termal sular jipse doygun değildir. İlaveten, S-1 sondajı Ekim döneminde 40°C'nin altı sıcaklık hariç, albite de doygun değildir. Bu durum Na, Cl ve SO₄ iyonlarının rezervuarda çözünürlüğünün hala devam ettiğini göstermektedir. Buna karşın, aragonit, kalsit ve dolomite doygun olduğundan, taşıma sistemlerinde karbonat kabuklaşması ve 140-160 °C'nin altında anhidrite doygun olmadığı için sondaj borularında korozyon oluşacağı unutulmamalıdır.

Sıcaklığı 19-22 °C olan nispeten soğuk ve mineralce fakir kaynak sularının içilebilir özellikte olmasına karşın, sıcak ve mineralce zengin suların Ca, Mg, K, Mn, As ve B gibi birçok element derişimi TS-266, WHO ve EPA içme suyu standartlarının üzerinde olduğundan, içme suyu olarak tüketilmesi önlenmelidir. Balneolojik amaçlı kullanım sonrasındaki atık su Keban Baraj gölüne deşarj edilmemeli ve daha sığ derinlikteki soğuk yeraltısu akiferinin de korunması için, Pertek jeotermal alanındaki kristalize kireçtaşı ve mermerlerin beslenme alanının dışına re-enjekte edilmelidir. Sıcak su kaynaklarının yüzeye çıkış sıcaklıkları 40°C'nin altında olduğundan, günümüzdeki balneolojik kullanım amacına ilaveten seracılık, kültür balıkçılığı gibi farklı alanlarda kullanılması planlandığında, her bir kullanım alanı için çevresel etki değerlendirmesi ayrıntılı olarak incelenmelidir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (MÜNİBAP) tarafından YLTUB15-01 proje numarası ile desteklenmiştir. MÜNİBAP birimine ve arazi çalışmalarına destek veren Jeoloji Mühendisliği bölümü öğretim elemanlarından Taylan Sançar ile Ali Önal'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Akkuş, A.**, 2016. Pertek jeotermal alanının hidrojeokimyasal özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tunceli, 126s.
- Akkuş, İ.**, 2017. Neden jeotermal enerji? Türkiye için önemi, hedefler ve beklentiler. *Mavi Gezegen Dergisi*, 23:25-39.
- Aksoy, E.**, 1994. Pertek (Tunceli) Çevresinin Jeolojik Özellikleri ve Pertek Bindirme Fayı. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2): 1-18.
- Bingöl, A.F.**, 1984. Geology of the Elazığ area in the Eastern Taurus region. *Proceedings of the Int. Symp. on the Geology of the Taurus Belt*, Ankara, s.209-216.
- Bingöl, A.F.**, 1988. Petrographical and petrological features of intrusive rocks of Yüksekova Complex in the Elazığ region (Eastern Taurus). *The Journal of Fırat University*, 3 (2): 1-7.
- Bingöl, A.F., Beyarslan, M.**, 1996. Elazığ Magmatitleri'nin Jeokimyası ve Petrolojisi. *30. Yıl Sempozyumu Bildirileri*, Trabzon, s. 208-224.
- Calmbach, L.**, 1997. AquaChem Computer Code-Version 3.7.42, Waterloo hydrogeologic. *Waterloo*, Ontario, Canada N2L 3L3.
- Craig, H.**, 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133, 1833-1834.
- Çetindağ, B.**, 1985. Palu-Kovancılar (Elazığ) dolayının hidrojeoloji incelemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 110s.
- Çimen, O., Toksoy Köksal, F., Öztüfekçi Önal, A., Örgün Tutay Y.**, 2015. Environmental Contamination of Heavy Metals and Chrysotile Asbestos in The Munzur and Pulumur Streams (Tunceli, Turkey). *Ofioliti*, 40 (1), 27-36. doi: 10.4454/ofioliti.v40i1.4337.
- Davraz, A., Balın, D.**, 2015. Çöl (Haydarlı/Afyon) Ovasının Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 035801, 1-13.
- Dilsiz, C.**, 2006. Conceptual hydrodynamic model of the Pamukkale hydrothermal field, southwestern Turkey, based on hydrochemical and isotopic data. *Hydrogeology Journal*, 14, 562-572.
- Elmastaş, N.**, 2011. Bitlis ili jeotermal su kaynakları. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 19: 89-104.
- EPA** (U.S. Environmental Protection Agency), 2008. National Primary Drinking Water Regulations. *U.S. EPA, Office of Water*. <http://water.epa.gov/drink/contaminants/index.cfm>.
- Fouillac, C., Michard, G.**, 1981. Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10: 55-70.

Araştırma makalesi/Research article
 DOI: 10.29132/ijpas.546499

- Fournier, R.O.**, 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. In: *Proceedings of the Symposium on Geothermal Energy*. Centro Scientific Programme, Ankara, 199-210.
- Fournier, R.O.**, 1985. The behaviour of silica in hydrothermal solutions. Geology and geochemistry of epithermal systems. *Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, 2: 45-61.
- Gerçek, C.**, 2009. Tunceli Pertek Jeotermal Sahası Kaynak Koruma Alanları Etüt Raporu. *Pertek Termal, Sağlık, Turizm, Tarım İnşaat ve Tic. A.Ş.*, Tunceli, 56s.
- Gerçek, C.**, 2014. Şerefoğlu Ceviz Bahçesi Hidrojeolojik ve Jeofizik Etüt Raporu. Pertek, Tunceli. *Pertek Termal, Sağlık, Turizm, Tarım İnşaat ve Tic. A.Ş.*, Tunceli, 19s.
- Giggenbach, W.F.**, 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52 (12): 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., Gonfiantini R., Jangi, B.L., Truesdell, A.H.**, 1983. Isotopic and chemical composition of Partabi valley geothermal discharges, north-west Himalaya, India. *Geothermics*, 12: 199-222.
- Hem, J.D.**, 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *Geological Water Supply*, U.S., p.263.
- Herece, E.İ., Acar, Ş.**, 2016. Pertek (Tunceli) Dolayının Üst Kretase-Tersiyer Jeolojisi/Stratigrafisi. *MTA Dergisi*, 153:1-43.
- IAH.**, 1979. Map of Mineral and Thermal Water of Europe, Scale: 1:500.000, *IAH (International Association of Hydrogeologists)*, United Kingdom.
- Khakara, Y.K., Mariner, R.H.**, 1989. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In *Thermal History of Sedimentary Basins* (eds. N. D. Naeser and T. H. McCulloh). Springer, New York, pp. 99-117.
- Kürüm, S.**, 1994. Elazığ kuzeybatısındaki genç volkanitlerin petrolojik özellikleri. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 107s.
- Kürüm, S., Akgül, B., Öztüfekçi Önal, A., Boztuğ, D., Harlavan, Y., Ural, M.**, 2011. An Example for Arc-Type Granitoids along Collisional Zones: The Pertek Granitoid, Taurus Orogenic Belt, Turkey. *International Journal of Geosciences*, 2: 214-226.
- Mutlu, H.**, 1998. Chemical geothermometry and fluid-mineral equilibria for the Ömer-Gecek thermal waters, Afyon area, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 80: 303-321.
- Okan, Ö.**, 2004. Kolan (Karakoçan) sıcak su kaynaklarının hidrojeokimyasal incelemesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 114s.
- Öztüfekçi Önal, A., Boztuğ, D., Kürüm, S., Akgül, B.**, 2010. Pertek intrüzif kayaçlarında izotopik ve jeokimyasal veriler, Doğu Anadolu, Türkiye. *IV. Ulusal Jeokimya Sempozyumu*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 26-28 Mayıs, s49-50.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J.**, 1999. User's guide to PHREEQC (version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, inverse geochemical calculations, *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, USGS- 99-4259, Reston, Virginia.
- TS-266**, 2005. Sular-İnsani Tüketim Amaçlı Sular (Water intended for human consumption), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Turan, M., Aksoy, E., Bingöl, A.F.**, 1993. Doğu Toroslar'ın Jeodinamik Evriminin Elazığ Civarındaki Özellikleri. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7: 1-23.
- WHO**, 2011. Guidelines for drinking water quality. *World Health Organization*, Fourth Edition, Printed in Malta by Gutenberg, 564s.