



**Pertek (Tunceli) Jeotermal Alanının Antropojenik Kirliliğinin Değerlendirmesi**  
*Anthropogenic Pollution Assessment of Pertek (Tunceli) Geothermal Field*

**Tuğbanur Özen Balaban<sup>1</sup> , Özlem Öztekin Okan<sup>2</sup> , Taylan Sançar<sup>3</sup> ,**  
**Ayten Öztüfekçi Önal<sup>4</sup> **

<sup>1</sup>*İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarları  
Uygulama ve Araştırma Merkezi, İzmir*

<sup>2</sup>*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ*

<sup>3</sup>*Munzur Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Tunceli*

<sup>4</sup>*Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tunceli*

Geliş/Received : 19.07.2019

• Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received : 05.11.2019

• Kabul/Accepted : 15.11.2019

• Çevrimiçi Yayın/Available online : 15.01.2020

• Baskı/Printed : 31.01.2020

*Araştırma Makalesi/Research Article*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Çalışma alanı, Doğu Anadolu'daki Tunceli ilinin Pertek ilçesinde bulunmaktadır. İnceleme alanının jeolojisi, Doğu Toroslar'ın jeodinamik evrimi içinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma alanındaki jeolojik formasyonlar yaşlıdan gence doğru, Paleozoik Keban Metamorfikleri, Üst Kretase Harami Formasyonu, Orta-Üst Eosen Kırkgeçit Formasyonu, Üst Miyosen Karabakır Formasyonu, Kuvaterner yaşlı alüvyondur. Çalışma alanında yüzlek veren birimler, litolojik, yapısal ve hidrojeolojik özelliklerine göre üç ana başlık altında ele alınmıştır. Çalışma alanının temelini oluşturan Keban Metamorfikleri içinde yer alan kireçtaşı, mermer, dolomitik mermer seviyeleri oldukça kırılmalı ve karstlaşmış olmaları nedeniyle termal suların rezervuar kayaçlarıdır. Kırkgeçit ve Karabakır formasyonları geçirimsiz özellikleri ile jeotermal alanın örtü kayaları olarak ortaya çıkmaktadır. Keban metamorfikleri içerisindeki kireçtaşı birimlerinin bazı seviyeleri basınçlı/serbest soğuk su akifer özelliği gösterir. Bölgedeki Kuvaterner Alüvyon birim, soğuk yeraltı suyu üretimi için en önemli ve uygun birimdir. Keban Baraj Gölü, hidroelektrik enerji üretimi, taşkın kontrolü ve sulama açısından bölgede oldukça önemlidir.

Termal ve maden suları genellikle yüksek mineral içeriğine sahip olmaları nedeniyle, yüzey ve yeraltı suları ile boşaldıkları alanlardaki tortullarda kirlenmeye neden olabilmektedirler. Bölgenin su kaynaklarının içme ve sulama amaçlı kullanılması nedeniyle, bu çalışmanın özünde suların kalitesi değerlendirilmiştir. Bu sebeple, kirlenmenin ölçümünü göstermek için su ve sediment numuneleri bor, arsenik ve diğer kirlenme maddeleri (Pb, Fe, Sb, Sn ve Hg) için analiz edilmiştir. Su örneklerinin analizinden elde edilen sonuçlar, bazı örneklerde B, As ve Pb konsantrasyonlarının TSE içme suyu standartları sınır değerlerini aştığını göstermektedir. Sediment örneklerinde Fe konsantrasyonu 2,16 ppm, Hg ve Sb konsantrasyonları ise 0,05 ppm'dir. Ayrıca Singeç Çayı'nda bulunan kaplıcalara toplanan tortul örneklerinden bazıları, B, As, Sb, Hg ve Pb gibi jeotermal akışkanlardan kaynaklanan diğer kirlenme maddeleriyle kirlenmiştir. Bu çalışmada, Pertek Jeotermal Sahası'nda ve etrafındaki alanda bulunan sediment ve sularda, jeotermal faaliyetlerden kaynaklanan B, As ve diğer kirlenme maddelerinin (Pb, Fe, Sb, Sn ve Hg) mevcudiyetinin jeokimyasal değerlendirmeleri tartışılarak, bölgedeki antropojenik kirlilik değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Pertek, jeotermal, hidrojeokimya, antropojenik kirlilik

**Abstract:** The study area is located in Pertek town in Tunceli province in Eastern Anatolia. The geology of the study area is very important for the geodynamic evolution of the Eastern Taurus. Geological formations in the study area are Paleozoic Keban metamorphics, Upper Cretaceous Harami Formation, Middle-Upper Eocene Kırkgeçit

*Formation, Upper Miocene Karabakir Formation, and Quaternary alluvium, from the oldest to the youngest, respectively. Hydrogeological units were divided into three units in accordance with lithological, structural and hydrogeological properties. The basement of the study area of sandstone, marbles and dolomitic marbles in the Keban metamorphic rocks are highly fractured and karstified and act as the main reservoir in particular for thermal waters in the study area. Kırkgeçit and Karabakır Formations occur as barrier rocks in the geothermal area due to impermeable properties. Some levels of limestone units within the Keban metamorphics are aquifers for freshwater. Alluvium is the most important and suitable unit for cold groundwater production. In the study area, streams and rivers flow from southwest to northeast towards Keban Dam Lake. The lake is very important in the region from the point of view of hydroelectric power production, flood control, and irrigation.*

*The thermal and mineral waters generally have high mineral contents. When they are discharged onto the surface, they can cause contamination in surface water, ground water, and of soil. Because of the fact that the water resources in the region are used for drinking and irrigation purposes, the quality of the water is evaluated within the scope of this study. For this reason, water and sediment samples were analyzed for boron, arsenic and other contaminant (Pb, Fe, Sb, Sn and Hg) substances to measure the contamination. The results acquired from the analysis of water samples suggest that concentrations of B, As and Pb in some of the samples exceed the limits of the TSE drinking-water standards (>100 ppb). Fe concentration is 2.16 ppm, Hg and Sb concentrations are also 0.05 ppm. Moreover, some of the sediment samples collected from thermal springs in Singeç Creek are contaminated with B, As, Sb, Hg and Pb and other elements sourced from geothermal fluids. In this study, the geochemical evaluation of the presence of B, As, and other contaminants (Pb, Fe, Sb, Sn) derived from geothermal activities within sediment and water in the Pertek Geothermal Field and surrounding area were discussed.*

**Keywords:** Pertek, geothermal, hydrogeochemistry, anthropogenic pollution.

## GİRİŞ

Pertek Jeotermal Alanı Toros Orojenik Kuşağı içerisinde Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat Bölümü'nün, Aşağı Murat bölgesinde Tunceli il sınırları içerisinde yer almaktadır. Kuzeyinde Doğu Toroslar'ın uzantısı olan Sakaltutan dağları, güneyinde ise doğudan batıya doğru uzanan Keban Baraj Gölü yer alır. Çalışma alanı 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalardan Elazığ K42-a2, K42-a3, K42-b1 ve K42-b4 paftalarında yaklaşık 40 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsamaktadır (Şekil 1). Doğu Anadolu bölgesindeki jeotermal kaynaklar volkanik ve tektonik aktivitelere bağlı olarak genellikle Doğu ve Kuzey Anadolu fay hatlarının kesişim noktaları veya yakınında gelişmiştir. Pertek jeotermal alanı da Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı arasında, bu fayların etkileşimi ile oluşmuş fay kollarının denetiminde gelişmiştir. Bu yapıların en önemlisi Bingöl (1984) tarafından adlandırılan

Pertek bindirme fayıdır (Aksoy, 1994). Bu fay yaklaşık doğu-batı doğrultusunda uzanan ve 10° gibi düşük bir açıyla kuzeye eğimli bindirme fayıdır. Buna ek olarak, sıkışma gerilmesiyle ilişkili olarak gelişen makaslama kırıkları şeklinde gelişmiş faylarla atıma uğratılmıştır (Bingöl, 1984; Aksoy, 1993).

Bu fayın oluşumunun Geç Kretase sonrası Üst Paleosen öncesi olduğu belirtilmektedir (Bingöl, 1984; Hempton, 1984; Sağıroğlu, 1992; Aksoy, 1993; Turan vd., 1993). Mutlu ve Güleç (1998), Doğu Anadolu Bölgesi'nin maruz kaldığı sıkışma rejimine bağlı olarak genç volkanik etkinliğe ve ısı kaynağı olabilecek derindeki soğumuş magma odalarına rağmen, bu bölgedeki düşük sıcaklıklı jeotermal potansiyelin, termal akışkanı getiren iyi gelişmiş fay sistemlerinin eksikliğinden olabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 1. İnceleme alanının yeri ve örnekleme yerleri.

Figure 1. Location map of the study area and sampling points.

## MATERYAL VE METOT

İnceleme alanı içerisindeki Singeç Vadisi'nden 9 adet su ve 10 adet sediment ve çamur örneklemeleri yapılmıştır (Şekil 2). Suların majör analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarı'nda, ağır metal ve eser element analizleri ACME (Bureau Veritas) Analitik Laboratuvarı ve İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi (İKÇÜ-MERLAB) Kromatografi Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.

Sediment örnekleri laboratuvarda oda sıcaklığını geçmeyen bir ortamda kurutulmuştur. Kurutulan örnekler taş, cam ve diğer atıklardan temizlenmiş ve 2 mm'lik elekten geçirilmiştir. Bu işlem sonrasında örnekler titanyum halkalı öğütücüde öğütülmüştür. Örnekler daha sonra çeyreklemeye yöntemiyle 10 ve 30 gr'lık poşetlerde analize hazır hale getirilmiştir.





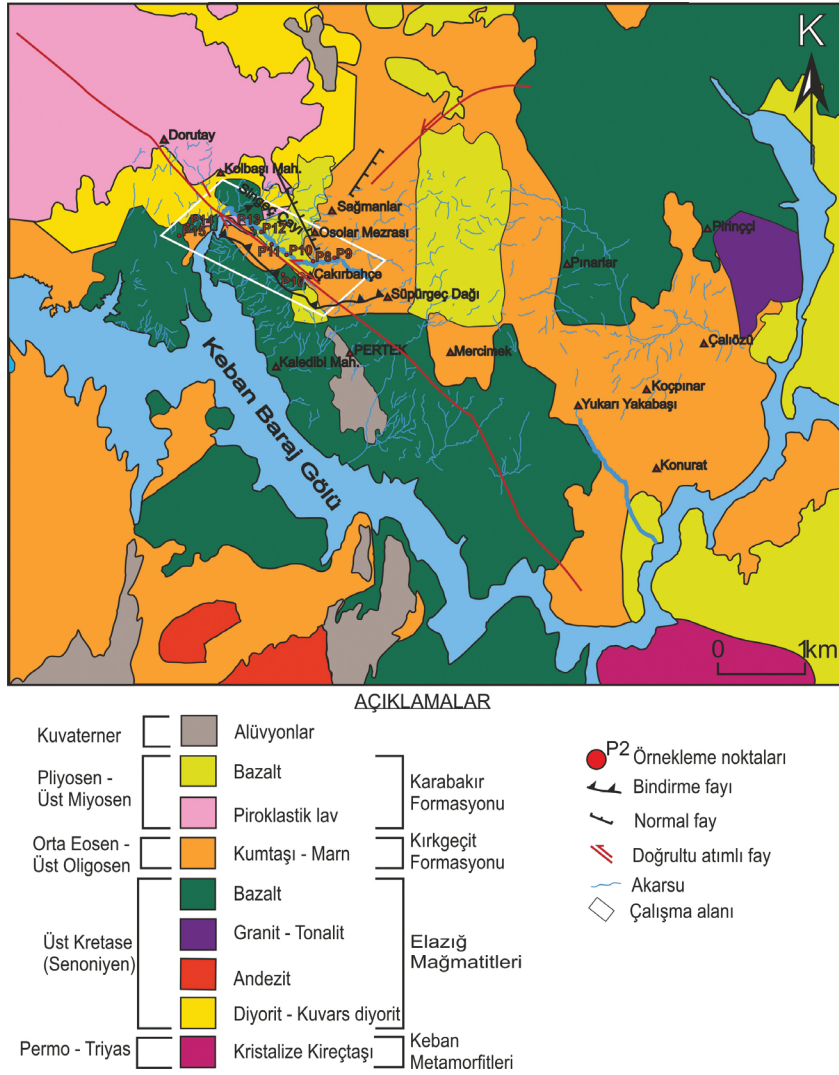
**Şekil 2.** Singeç Çayı'nın faya paralel olarak KB-GD akışa sahip olduğu yerde ortaya çıkan yeraltı suları ve örnekleme noktalarının yeri (taban görüntü, Google Earth'den alınmıştır).

**Figure 2.** Location of groundwater and sampling points where Singeç Creek flows NW-SE parallel to the fault (base image taken from Google Earth).

## GENEL JEOLojİ

Pertek ve çevresinde Paleozoyik'ten Senozoyik'e kadar uzanan yaş aralığında farklı özellikte olan metamorfik, magmatik ve sedimenter kayalar bulunmaktadır. Aksoy (1994) tarafından bu birimler yaşlıdan genç doğru Keban Metamorfikleri (Permiyen-Triyas), Elazığ Magmatikleri (Üst Kretase), Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Üst Oligosen), Karabakır Formasyonu (Üst Miyosen-Pliyosen) ve alüvyonlar (Kuvaterner) olarak

sıralanmıştır (Şekil 3). Çalışma alanında Keban Metamorfikleri'ne ait, amfibolit, kristalize kireçtaşı ve mermer birimleri, Kırkgeçit Formasyonu'na ait kireçtaşı, kumtaşı-marn ardalanmalı çakıltaşları ile Karabakır Formasyonuna ait andezitik/bazaltik lav, tüf ve volkanoklastitler yer almaktadır. Çalışma alanındaki en genç birimi ise Singeç Vadisi yamaçlarında gözlenen traverten, taraça ve Pertek ilçe merkezi ve Singeç Vadisi boyunca birikmiş Kuvaterner yaşlı alüvyonlar oluşturmaktadır.



Şekil 3. İnceleme alanı ve çevresinin jeolojisi (Bingöl, 1984 ve MTA, 2002'den değiştirilerek hazırlanmıştır).

Figure 3. Geology of the study area and surroundings (modified from Bingöl, 1984 and MTA, 2002).

### Jeolojik Birimlerin Hidrojeolojik Değerlendirmesi

Çalışma alanındaki sıcak su kaynaklarının hazne kayacı, Keban Metamorfittleri'nin kristalize kireçtaşları ve mermerleridir. Sular kristalize kireçtaşı ve mermerlerin kırıklı zonlarından, Singeç Çayı taban kotundan ve akarsu tabanındaki alüvyondan yüzeye çıkmaktadır. Kristalize kireçtaşlarının birincil gözenekliliği oldukça

düşüktür. Ancak bölgede meydana gelen etkin tektonizmaya bağlı olarak oldukça çatlaklı ve kırıklı bir yapı kazanmışlardır. Bu yoğun çatlaklı ve kırıklı yapı karstlaşmayı da geliştirmiştir. Bu nedenle bu kayalarda geçirimsizlik ve ikincil porozite oldukça yüksektir (Çetindağ, 1989). Singeç Vadisi çevresinde Keban Metamorfittleri, D-B uzanımlı bindirme fayı ile Pertek Magmatitleri üzerine itilmiştir. Metamorfittlerin en kalın yüzlekleri Singeç Vadisi boyunca gözlenmektedir.

Jeotermal sistemin örtü kayaçları Kırkgeçit ve Karabakır Formasyonları'nın geçirimsiz birimleridir. Singeç Vadisi boyunca Keban Metamorfitleri'nin üzerlerinde örtü birim bulunmaz. Bu nedenle Pertek jeotermal sistemi açık sistem özelliğindedir. Ancak birim, Singeç Vadisi'nin kuzeyinde gösel kireçtaşı seviyeleri içeren tuf, aglomera ve lav akıntılarında oluşan Karabakır Formasyonu tarafından örtülmektedir.

İnceleme alanı dışında, kuzeybatıda (Demürek kuzeyi), Karabakır Formasyonu'nun altında kumtaşı, marn, kireçtaşından oluşan Kırkgeçit Formasyonu yer almaktadır. Kırkgeçit Formasyonu'nun tavan birimlerini oluşturan kireçtaşları, çatlaklı ve karstik boşluklu olmaları nedeniyle soğuk suların akifer özelliğindedirler. Karabakır Formasyonu'nun bazaltları ile gösel kireçtaşları da çatlaklı ve kırıklı olmaları nedeniyle akifer niteliği taşımaktadır (Çetindağ, 1985, Öztekin Okan, 2004).

## HİDROJEOKİMYASAL DEĞERLENDİRME

Suda başlıca çözülmüş (en çok çözünen) maddeler ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SiO}_2$ ); ikincil çözülmüş maddeler ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{B}^{+3}$ ,  $\text{As}^{+3}$ ) ve az çözülmüş maddeler (örneğin,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ) arasındaki ilişkiler de hidrojeokimyasal değerlendirmelerin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Çalışma alanı içerisinde bulunan Singeç Vadisi içerisinde başta termal kaynak ve Singeç çayı olmak üzere 9 adet su noktasının majör ve minör kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir.

Çalışma alanındaki tüm suların su tipleri Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979) sınıflamasına göre belirlenmiştir. Soğuk ve sıcak su tipleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Çizelge 1). IAH sınıflamasına göre belirlenen hidrokimyasal fasiyes tipi, Ca-Mg- $\text{HCO}_3$ 'dir. Bu alandaki soğuk sular Ca-Mg- $\text{HCO}_3$  ve Ca- $\text{HCO}_3$  tipindedir. Termal ve mineralli suların iz element konsantrasyonları

soğuk sulara oranla daha yüksektir (Çizelge 2). Genel olarak incelenen termal sulara As, B, Li, Ba, Fe, Mn, Sr, Al, Cu, Zn, Cd ve Pb konsantrasyonları yüksektir. Sular ulusal ve uluslararası içme suyu standartlarına göre değerlendirildiğinde suların neredeyse tamamında As ve B konsantrasyonları içilebilir su standartlarına göre yüksektir. Bazı sulara da Fe, Al ve Pb konsantrasyonları diğer sulara oranla yüksektir (Çizelge 2). İnceleme alanındaki suların kimyasal bileşimlerinin litoloji ile ilişkisini ortaya koymak, anyon ve kation miktarlarının görsel olarak kolaylıkla değerlendirilebilmesi için yarı logaritmik Schoeller (1962) diyagramı kullanılmıştır (Şekil 3). Schoeller yarı logaritmik diyagramda benzer kökenli, aynı hazneye ve beslenme alanına sahip sular benzer pik verirler. Bu diyagramda soğuk ve termal sular değerlendirilmiştir. Bu diyagrama göre termal sular ve soğuk sular kendi aralarında benzer kökenlidir (Şekil 4). Kationlar arasındaki  $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  dizilimi ve anyonlar arasındaki  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^-$  dizilimi rezervuar kayacın Keban Metamorfitleri'nin kristalize kireçtaşı ve mermer birimleri olduğunu desteklemektedir. Suların grafiklerde gösterilmesi toplu halde bir arada görülebilmesi, sınıflandırılması, birbirleriyle ilişkilerinin araştırılması ve karşılaştırılması gibi amaçlar için kullanılan yöntemlerden biri de Piper (1944, 1979) üçgen diyagram yöntemidir (Tarcan, 2003; Özen, 2009; Şekil 5). Piper diyagramına göre inceleme alanındaki sular, karbonat sertliği %50'den fazla olan, alkali toprak elementler ( $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ ) > alkali elementler ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) ve zayıf asit kökleri ( $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$ ) > güçlü asit kökleri ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{-2}$ ) olan sularlardır (Şekil 5). Termal ve mineralli suların soğuk yeraltı suları ile aynı alanda olması, bu suların karışım tipini yansıttığını göstermektedir.

**Çizelge 1.** Majör iyon kimyasal analizleri ve su tipleri (IAH, 1979).

**Table 1.** Major ion chemical analyses of the sampled waters and water types (IAH, 1979).

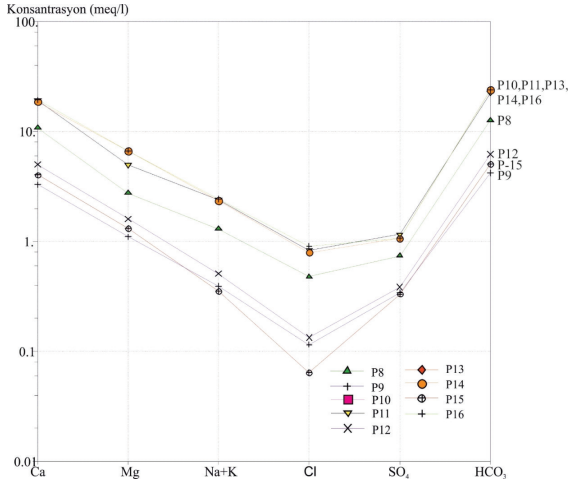
Örn. No	Örnekleme Yeri	T (°C)	pH	EC											Su Tipi	
				(µS/cm)	Na	K	Ca	Mg	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>	ΣAnyon	ΣKasyon		%Hata
P8	Termal su kaynağı	22,3	5,74	943	25,72	7,26	216,98	33,62	81,88	35,64	16,98	773,40	13965,00	14917,00	3,3	Ca-HCO <sub>3</sub>
P9	Mineral su kaynağı	15,6	7,46	353	7,94	1,82	65,94	13,42	71,75	16,38	4,091	255,98	4688,00	4803,00	1,21	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
P10	Soguk- termal karışım	15,8	7,4	377,1	6,73	4,93	94,09	15,49	76,89	17,81	2,73	348,57	6202,00	6388,00	1,47	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
P11	Termal su havuz	37,3	5,36	2707	47,30	12,63	387,07	60,62	72,18	55,70	29,71	1372,50	24579,00	26721,00	4,18	Ca-HCO <sub>3</sub>
P12	S.Ç.-termal kaynak	19,2	6,72	520	9,88	3,15	100,66	19,54	225,64	18,57	4,76	381,25	6827,00	7143,00	2,26	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
P13	S.Ç. termal kaynak	22,4	6,04	1105	22,23	4,17	172,74	50,49	38,79	35,67	7,86	718,931	12790,00	13859,00	4,01	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
P14	Keban göl. miner. su	30,5	6,03	2738	48,16	10,12	374,33	81,00	63,51	51,30	28,16	1459,65	25880,00	27744,00	3,48	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
P15	S.Ç.-Keban göl. kar.	23,4	6,39	1441	17,89	3,61	91,21	23,88	14,54	24,90	12,27	359,47	6780,00	7393,00	4,32	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
P16	Termal kuyu	36,7	5,93	2204	48,99	12,10	389,45	81,53	64,84	51,20	32,00	1459,65	25980,00	28594,00	4,79	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>

**Çizelge 2.** Suların eser element kimyasal analizleri ve içme suyu standartları TS266, 2005, WHO, 2004 ve Kaplıca Yönetmeliği 2001'e göre değerlendirilmesi.

**Table 2.** Trace element chemical analyses of the sampled waters and maximum admissible concentrations given in Turkish Drinking Water Standards (TS-266) 2005, Turkish Water Pollution Control Regulation 2005, WHO 2004 and Turkish Spa Standards 2001.

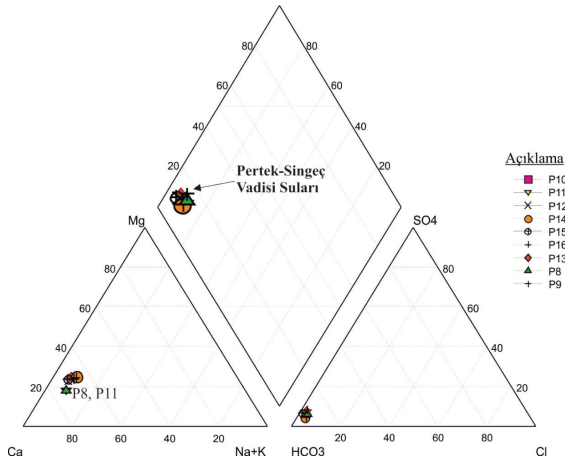
Örnek No	As	B	Li	Ba	Fe	Mn	Sr	F	Al	Cu	Zn	Cd	Sb	Hg	Pb
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
P8	1,66	1,43	0,127	0,23	10,52	0,46	3,18	0,964	7646	13,1	28,1	0,14	0,1	<0,1	4,2
P9	0,01	0,05	0,0026	0,09	13,37	0,47	1,10	0,13	10532	18,1	37,9	0,15	0,15	<0,1	6,3
P10	0,01	0,09	0,0051	0,31	20,61	1,15	2,87	0,12	17234	30,3	82,5	0,56	0,07	<0,1	20,3
P11	2,57	2,79	2,23	0,44	0,00	1,50	5,26	1,50	47	1,8	11,4	0,15	<0,05	<0,1	0,7
P12	0,18	0,34	0,1	0,29	48,89	1,54	2,48	0,27	45043	57,6	123,2	0,52	0,06	<0,1	19,4
P13	0,01	0,45	0,003	0,09	1,71	0,10	1,09	0,15	879	2,1	5,6	<0,05	<0,05	<0,1	1,7
P14	1,01	2,44	0,2	0,20	0,00	0,18	4,19	1,57	95	1,5	9,3	<0,05	<0,05	<0,1	2,1
P15	0,07	0,36	0,0025	0,06	0,24	0,051	0,88	0,26	6900	10,8	30,7	0,06	0,07	<0,1	4,4
P16	1,22	2,47	0,2	0,24	0,00	0,045	4,78	1,446	19	3,1	10,2	<0,05	<0,05	<0,1	2,4
TS-266, 2005	0,001	1	-	-	0,2	-	-	-	200	3000	5000	5	5	1	10
WHO, 2004	0,001	0,3	-	-	0,2	-	-	-	200	2000	-	3	5	0,1	10
Kap. Yön., 2001	-	1	-	-	0,5	-	-	-	200	-	-	3	5	1	10





Şekil 4. İnceleme alanındaki suların Schoeller sınıflaması.

Figure 4. Schoeller classification/diagram for waters in the study area.



Şekil 5. İnceleme alanındaki suların Piper sınıflaması.

Figure 5. Piper classification of the waters in the study area.

## JEOKİMYASAL DEĞERLENDİRME

İnceleme alanı içerisindeki kaynak çevresi çamur, akarsu sediment örneklerinin kimyasal analizleri Çizelge 3'te verilmiştir. Sediment ve çamur örneklerinin analizleri çeşitli sınıflandırmalar kullanılarak ağır metal içeriği bakımından değerlendirilmiştir. Bu sınıflamalardan biri jeo-akümülyasyon ( $I_{geo}$ ) indeksidir. Müller (1981) tarafından geliştirilen bu yöntemle özellikle sedimentlerin içerdikleri iz element yoğunlukları bağlı olarak geniş bir aralıkta belirlenebilmektedir. Jeo akümülyasyon indeksi:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n}$$

formülüyle hesaplanabilmektedir.  $C_n$ , elementin kimyasal analizler ile hesaplanan konsantrasyonu;  $B_n$ , elementin kıtasal kabuktaki konsantrasyonudur.  $B_n$  değeri (referans değeri) her element için ayrı olup bu çalışmada kullanılan kıtasal kabuk değerleri As (1,5), B (10), Cd (0,3), Sb (1,5), Hg (0,089), Li (13), Cu (25), Zn (95), Pb (20) olarak alınmıştır. Jeo-akümülyasyon indeksine göre sınıflandırma şu şekildedir (Müller, 1981, Yaşın vd., 2008).



**Çizelge 3.** İnceleme alanındaki sediment örneklerinin kimyasal analiz sonuçları (örnek numaraları Çizelge 1 ile aynıdır).  
**Table 3.** Chemical analysis results for sediment samples in the study area (sample numbers are the same as Table 1).

Örnek No	Örnekleme Yeri	Li	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
SN-1	Singeeç Çayı sediman	53,6	74,2	6246	16299,7	24484,4	9888,5	149100,1	35,1	56	16,4	2,8	48,2	210,6	2294,7	17,9
SN-2	Singeeç Çayı sediman	40,8	114,3	13335,4	9181,5	9980,1	10416,2	106970,2	29,7	40	19,2	2,8	41,9	271	1037,2	17,8
SN-3	Singeeç Çayı sediman	42,6	122,5	8281,4	11160	8434,8	9494,5	131120,4	30,5	48,2	43,8	2,7	31,5	213,2	809,2	17,5
SN-4	Singeeç Ç. ter. hav. çamur	34,4	122,1	9014,1	10149,5	7173,4	8845,4	125690,6	29,6	41,6	18,1	2,6	23,9	205	618,3	16,7
SN-5Y	Singeeç Çayı sediman	28,6	113	8411,8	8320,7	3716,5	5865,8	144010,8	25,4	53,2	253,8	2,6	20,5	167,6	530,4	14,6
SNY-6	Singeeç Çayı sediman	33,4	122,4	12201,9	13196,3	13265	7858,8	142730,4	31,8	53,5	81,4	3	19,9	199,9	491,5	25,6
SNÇ-6	Singeeç Çayı çamur	25	156,1	15750,7	8674,6	4563,2	7978,8	116830,2	27,9	49,1	25,5	3,3	19,7	200,5	412,3	24,7
SN-8	Ter. hav. Keban sediman	37,9	134,9	6822,2	10925,4	22317,2	8884,3	77620,9	27,1	52,3	15	2,6	7,9	298	218,9	26,8
SN-21	Ter. kay. sediman	24,6	92,7	13752,4	7872,7	3933,9	8824,8	121660,2	17,5	39,4	136,6	2,2	7,9	224,3	136,5	17,9
SNÇ-21	Ter. kay. çamur	39,6	138,3	10676,1	11212,3	7565,3	9798,6	121010,4	22,2	37,7	52,5	2,7	7,2	222,3	179	21,6

$I_{geo} < 0$  ise kirlenmemiş;  $0 < I_{geo} < 1$  ise az-orta kirli;  $1 < I_{geo} < 2$  ise orta kirli;  $2 < I_{geo} < 3$  ise orta-çok kirli;  $3 < I_{geo} < 4$  ise çok kirli;  $4 < I_{geo} < 5$  ise şiddetli-son derece kirli;  $I_{geo} > 5$  ise son derece kirli olduğunu göstermektedir.

Bu sınıflamaya göre Şekil 6'daki grafiklerde de görüleceği gibi inceleme alanında kurak ve yağışlı dönemlerde örnekleme yapılan noktalarda  $I_{geo}$  değerleri seçilen elementlere göre aşağıdaki şekilde değişmektedir:

As:  $3 < As-I_{geo} > 7$  çok kirli-son derece kirli

B:  $2 < B-I_{geo} > 4$  orta-çok kirli

Cd:  $5 < Cd-I_{geo} > 8$  şiddetli-son derece kirli

Sb:  $3 < Sb-I_{geo} > 6$  çok-son derece kirli

Hg:  $0 < Hg-I_{geo} > 4$  kirlenmemiş-az-orta-çok kirli

Li:  $0 < Li-I_{geo} > 2$  kirlenmemiş-az-orta kirli

Cu:  $0 < Cu-I_{geo} > 1$  kirlenmemiş-az-orta kirli

Zn:  $Zn-I_{geo} < 0$  kirlenmemiş

Pb:  $Pb-I_{geo} < 0$  kirlenmemiş

Kirlilik indeksine (PI=pollution index) göre sınıflama, Nishida vd. (1980) tarafından yapılmıştır.  $PI = C_{\text{örnek}} / C_{\text{ref}}$  ( $C_{\text{örnek}}$ : Kimyasal analiz değeri;  $C_{\text{ref}}$ : kıtasal kabuk bolluk değeri)

$$PI = (As/20 + Cd/3 + Cu/100 + Hg/2 + Pb/100 + Sb/5 + Zn/300) / 7$$

Bu sınıflamaya göre As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb ve Zn elementleri için hesaplanan değerler 1'in altında olmalıdır (Chon vd., 1996; Sponza ve Karaoğlu, 2002). Bu müsaade edilebilir değerin üzerindeki zenginleşme insan veya doğal jeolojik kaynaklara bağlıdır (Nimick ve Moore, 1991).

İnceleme alanından alınmış sediment örneklerinin ağır metal ve eser element değerleri PI kirlilik indeksine göre değerlendirilmiş (Çizelge 4) ve seçilen elementlerce SN-4, SNÇ-6, SN-8 ve SN-21 dışındaki örnekleme yerlerinde PI değerinin 1'in üstünde olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 4.** Sediment örneklerinin PI değerlendirmesi.**Table 4.** PI evaluation of sediment samples.

Örnekleme Yeri	PI	PI Değerlendirmesi
SN-1 Singeç Ç. sediment	1,47	Kirlenmiş
SN-2 Singeç Ç. sediment	1,40	Kirlenmiş
SN-3 Singeç Ç. sediment	1,16	Kirlenmiş
SN-4 Singeç Ç. ter. hav. çam.	0,83	Kirlenmemiş
SNY-5Y Singeç Ç. sediment	2,06	Kirlenmiş
SN-6 Singeç Ç. sediment	1,12	Kirlenmiş
SNÇ-6 Singeç Ç. çamur	0,80	Kirlenmemiş
SN-8 Term.Hav.Keban B.sedi.	0,44	Kirlenmemiş
SNÇ-21 Ter. kay. çamur	1,07	Kirlenmiş
SN-21 Ter. kay. sediment	0,62	Kirlenmemiş

**SONUÇLAR VE TARTIŞMA**

Bu çalışmada, Pertek Jeotermal Sistemi'nde termal kaynakların yoğun olarak gözlemlendiği Singeç Vadisi içerisindeki termal suların akarsuya ve çevreye olan etkisi incelenmiştir. Proje kapsamında, seçilen örnekleme noktalarından yapılan su, sediment ve çamur örneklerinin majör ve minör kimyasal analizleri jeokimyasal olarak değerlendirilmiştir.

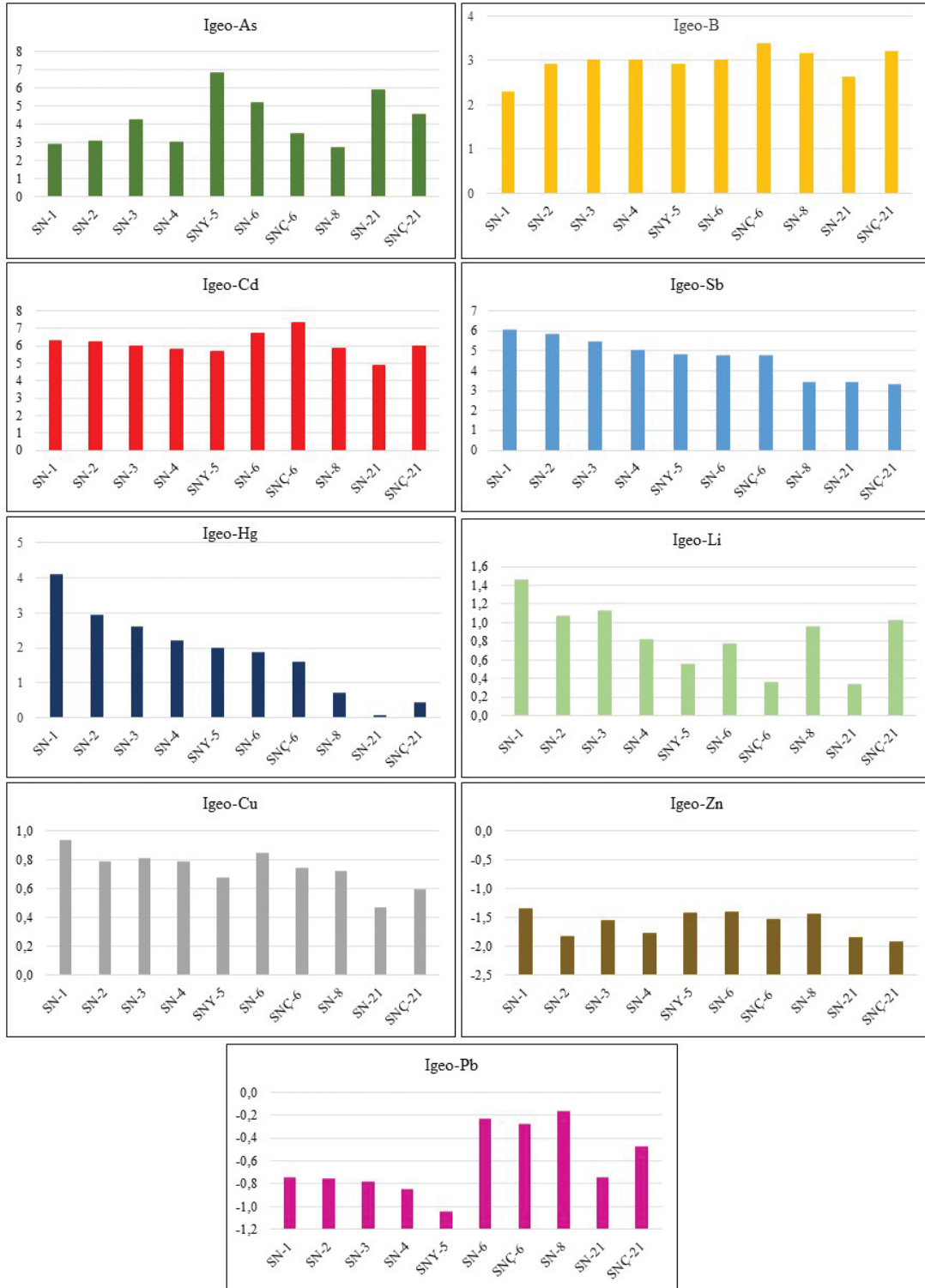
İnceleme alanındaki termal su kaynaklarının hazne kayacı, Keban Metamorfitleti'nin kristalize kireçtaşları ve mermerleridir. Sular kristalize kireçtaşı ve mermerlerin kırıklı zonlarından, Singeç Çayı taban kotundan ve akarsu tabanındaki alüvyondan yüzeye çıkmaktadır. Metamorfitletin en kalın yüzlekleri Singeç Vadisi boyunca gözlenmektedir. Jeotermal sistemin örtü kayaçları Kırkgeçit ve Karabakır Formasyonları'nın geçirimsiz birimleridir. Ancak, Singeç Vadisi boyunca Keban Metamorfitleti'nin üzerlerinde örtü birim bulunmaz. Bu nedenle Pertek jeotermal sistemi açık sistem özelliğindedir. Singeç Vadisi çevresinde Keban Metamorfitleti, D-B uzanımlı bindirme fayı ile Pertek Magmatitleri üzerine

itilmiştir. Singeç vadisi içerisindeki bindirme fayını öteleyen, KB-GD uzanımlı sağ yanal doğrultu atımlı bir fay (Pertek Fayı) ve bu faya bağlı çok sayıda makaslama kırık ve çatlakları oluşmuştur. Söz konusu makaslama yapıları Pertek jeotermal alanındaki soğuk ve sıcak su kaynaklarının yüzeye ulaşmasını denetlemektedir.

Singeç Vadisi içerisinde yüzeyleyen termal sular Ca-HCO<sub>3</sub> ve Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> su tipindedir. Soğuk sular ise Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> su tipindedirler. Ayrıca termal sular karışım su tipini yansıtmaktadırlar. Termal ve soğuk sular benzer kökenli sularlardır. Bu durum termal suların yüzey ve/veya yeraltı suları ile karıştığını göstermektedir. Sular ulusal ve uluslararası içme suyu standartlarına göre değerlendirildiğinde genel olarak As ve B konsantrasyonları sınır değerlerin üstündedir. Bazı sularda da Fe, Al ve Pb konsantrasyonları diğer sulara oranla yüksektir.

Sediment örneklerinin Singeç Çayı ve Keban gölüne birleşme noktalarından alınan örneklerde I<sub>geo</sub> sınıflamasına göre sular As elementince çok kirli-son derece kirli; B elementince orta-çok kirli; Cd ve Sb elementince son derece kirli; Hg, Li ve Cu elementlerince kirlenmemiş-az-orta kirli; Zn ve Pb elementlerince kirlenmemiş olarak sınıflandırılmıştır. Suların kirlilik indeksi (PI) değerleri de genel olarak 1'in üstündedir ve kirlenmiş sınıfındadır. Tüm bu sınıflamalar doğal (ayırışma, hidrotermal alterasyon vb.) ve hidrojeolojik (su-kayaç etkileşimi, yıkanma ve taşınma) süreçlerin etkili olduğu termal suların çevreyi olumsuz etkilediklerini göstermektedir.

Termal sular, kaplıca uygulamalarında içme kuru şeklinde tedavi amaçlı kullanılsa da bu suların zengin iyon içerikleri sebebiyle özellikle içerisinde bulunan As ve B konsantrasyonlarının yüksek olmasından dolayı insan sağlığına olumsuz etkilerinin olacağı düşünüldüğünden uzun süreli kullanılmaması önerilmektedir.



Şekil 6. İnceleme alanından alınan sediment örneklerinin seçilmiş ağır metal ve eser element  $I_{geo}$  grafikleri.

Figure 6.  $I_{geo}$  graphics for selected heavy metal and trace elements in the sediment samples taken from the study area.

## EXTENDED SUMMARY

The basement units in the study region are Paleozoic-Mesozoic Keban metamorphics and Upper Cretaceous Elazığ magmatics (Fig. 1). The Keban metamorphics are represented by marble and amphibolite in the study area. The younger (Coniacian–Campanian) Elazığ Magmatic Complex intruded into the Keban metamorphics. The Keban Metamorphic Formation was thrust over the Elazığ Magmatic Complex (Herece and Acar, 2016). In the study area, diorite is the most common magmatic rock, and granite and gabbro only outcrop locally. The other units are the Karabakır Formation (Upper Miocene–Pliocene) which comprises continental volcanics and volcanoclastics, and the Upper Cretaceous–Paleogene Harami and Karabakır Formations. The upper part of the Harami Formation comprises carbonate cemented sandstone with plenty of nummulites and ophiolitic fragments. The Kırkgeçit Formation, early Bartonian–early Chattian in age, comprises sandstone-siltstone-limestone intercalations. During the Maastrichtian, the Anatolian plate, which is bounded in the E-SE by the East Anatolian Fault, began moving westward. In the study area the Pertek fault started to move as a right-lateral strike-slip fault (Herece and Acar, 2016).

The most important reservoir rocks for thermal water in the study area are the Keban metamorphics because of high porosity and permeability. Impermeable layers (marl and clay) of the Middle Eocene–Upper Oligocene and Upper Miocene–Pliocene units are cap rocks for the thermal water aquifer. The heat source for the thermal waters is magma intrusions at depth related to Upper Miocene–Pliocene volcanism. Highly fractured and karstified metamorphic rocks, fractured limestones, basalts and alluvium are aquifers for cold ground waters in the study area.

Thermal waters are classified as Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> water type according to IAH (1979). Cold mineral water and stream water have Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> type. The high concentrations of Ca, Mg and HCO<sub>3</sub> in thermal waters are probably due to a combination of mixing cold groundwater and/or water-rock interaction and ion exchange reactions in the reservoir.

Generally, As, B, Li, Ba, Fe, Mn, Sr, Al, Cu, Zn, Cd and Pb concentrations are high in thermal waters. When the waters are evaluated according to national and international drinking water standards, As and B concentrations are high in almost all waters. Fe, Al and Pb concentrations are higher in some waters compared to others (Table 2).

The Schoeller diagram shows common trends and gives an overall idea of absolute cation (Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> and Mg<sup>2+</sup>) and anion (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) distribution in waters as a semi logarithmic function of the concentration (meq/L). The thermal waters and cold waters display similar trends and the waters have similar origin (Fig. 4).

Some of the sediment samples collected from thermal springs in Singeç Creek are contaminated with B, As, Sb, Hg and Pb and other elements sourced in geothermal fluids. In this study, the geochemical evaluations of the presence of B, As, and other contaminants (Pb, Fe, Sb, Sn) derived from geothermal activities within sediment and water in the Pertek geothermal field and surrounded area were discussed using the geoaccumulation index and pollution index.

The  $I_{geo}$  allows benchmarking of present and pre-industrial concentrations for contamination, though it is generally difficult to obtain preindustrial sediment deposits (Özen et al., 2017). In this study, the  $I_{geo}$  for selected soil samples was calculated using the formula shown below:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n}$$



where  $C_n$  is the measured concentration of the element in soil and  $B_n$  is the geochemical background value. The constant value of 1.5 allows detection of very small anthropogenic influences.  $I_{geo}$  was defined in seven grades or classes indicating almost hundred-fold enrichment above background values (Müller 1981; Yaşin et al. 2008). This classification is as follows: practically uncontaminated ( $I_{geo} \leq 0$ ), uncontaminated to moderately contaminated ( $0 < I_{geo} < 1$ ), moderately contaminated ( $1 < I_{geo} < 2$ ), moderately to strongly contaminated ( $2 < I_{geo} < 3$ ), strongly contaminated ( $3 < I_{geo} < 4$ ), strongly to extremely contaminated ( $4 < I_{geo} < 5$ ), and extremely contaminated ( $I_{geo} \geq 5$ ).

According to the  $I_{geo}$  classification, the waters were very polluted by the As element in the sediment samples taken from the junction points of Singeç Creek and Keban Lake (Fig. 6). The samples moderate-very polluted with B; extremely polluted by Cd and Sb; and uncontaminated-less-moderately polluted with Hg, Li and Cu elements. The samples are classified as not contaminated by Zn and Pb elements. Water pollution index (PI) values are generally above 1 and in the polluted class (Table 4).

Pollution indices are calculated using the following equation:

$$PI = C_i / C_{ref}$$

where,  $C_i$  is the measured value of element at each sampling point, and  $C_{ref}$  is the regional background value of the heavy metal. This empirical index provides a simple, comparative means for assessing the level of heavy metal pollution. When  $PI > 1$ , it means that pollution exists; otherwise, if  $PI < 1$ , there is no metal pollution. Water pollution index (PI) values are generally above 1 and in the polluted class in the study area.

All of these classifications show that thermal waters, which are affected by natural (weathering, hydrothermal alteration, etc.) and hydrogeological


(water-rock interaction, bathing and transport) processes, affect the environment negatively. In addition, the study area is affected by not only pollution sourced from thermal waters but also from geological formations.

In summary, although thermal waters are used for therapeutic purposes in spa treatments, it is recommended that these waters should not be used for a long period of time because of their high ionic content and high concentrations of As and B, which could have negative effects on human health.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK 105Y466 No'lu proje tarafından desteklenmiştir. Yazarlar arazi ve büro çalışmalarında destek veren bursiyerler Jeoloji Mühendisleri Gamze KARVAR ve Latif EREN'e, arazi çalışmaları sırasında yardımlarını esirgemeyen bölge halkına ve önerileriyle makalenin geliştirilmesine katkıda bulunan hakemlere teşekkür ederler.

## ORCID

Tuğbanur Özen Balaban  <https://orcid.org/0000-0002-2067-2774>  
Özlem Öztekin Okan  <https://orcid.org/0000-0003-2934-2170>  
Taylan Sançar  <https://orcid.org/0000-0002-2500-9787>  
Ayten Öztüfekçi Önal  <https://orcid.org/0000-0003-2185-4884>

## DEĞİNİLEN BELGELER / REFERENCES

- Aksoy, E., 1993. Elazığ batı ve güneyinin jeolojik özellikleri. TÜBİTAK Yerbilimleri Dergisi, 1, 113-123.
- Aksoy, E., 1994. Pertek (Tunceli) Çevresinin Jeolojik Özellikleri ve Pertek Bindirme Fayı. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6, 1-18.
- Bingöl, A.F., 1984. Geology of the Elazığ area in the Eastern Taurus region. Geology of the Taurus Belt. Proceedings of International Symposium, Ankara, 26-29 Eylül 1983, editörler: Tekeli O., Göncüoğlu, M.C., Ankara, 209-216.

- Chon, H.T., Cho, C.H, Kim, K.W., Moon, H.S., 1996. The occurrence and dispersion of 453 potentially toxic elements in areas covered with black shales and slates in Korea. *Applied Geochemistry*, 11, 69-76.
- Çetindağ, B., 1985. Palu-Kovancılar (Elazığ) dolayının hidrojeoloji incelemesi., Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elazığ, Yüksek Lisans Tezi, 110 s., (yayımlanmamış).
- Çetindağ, B., 1989. Elazığ-Ören Çayı çevresinin hidrojeoloji incelemesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elazığ, Doktora Tezi, 270 s., (yayımlanmamış).
- Hempton, R.M., 1984. Result of detailed mapping near Lake Hazar (Eastern Taurus Mountains). *Geology of the Taurus Belt. Proceedings of International Symposium, Ankara, 26-29 Eylül 1984*, editörler: Tekeli O., Göncüoğlu, M.C., Ankara, 223 -228.
- IAH., 1979. Map of mineral ve thermal water of Europe. Scale 1:500.000, International Association of Hydrogeologists, United Kingdom.
- Kaplıcalar Yönetmeliği, 2001. Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı, Resmi gazete sayısı: 24472.
- MTA, 2002. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü 1/500.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası Erzurum Paftası. Düzenleyen: Tarhan N., Editör: Şenel, M., Ankara.
- Mutlu, H., Güleç, N., 1998. Hydrogeochemical outline of thermal waters and geothermometry applications in Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 495-515.
- Müller G., 1981. Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme. *Chemiker-Zeitung*, 105: 157-164.
- Nimick, D.A., Moore, J.M., 1991. Prediction of water soluble metal concentrations in fluviially deposited tailings sediments, upper Clark ork Valley, Montana, USA, *Applied Geochemistry*, 6, 635-646.
- Nishida, H., Tada, F., Suzuki, S., 1980. Computation of the index of pollution caused by heavy metals of river sediment: Report of Research Nippon Institute of Technology, No: 10, 87-93.
- Özen, T., 2009. Salihli Jeotermal Alanlarının Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 239 s.,(yayımlanmamış).
- Öztekin Okan, Ö., 2004. Kolan (Karakoçan) Sıcak ve Mineralli Su Kaynağı'nın Hidrojeokimyasal İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Doktora Tezi 114s., (yayımlanmamış).
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Transactions. American Geophysical Union*, 25(6) 914-923.
- Piper, A.M., 1979. Interpretation of water analyses. U.S. Geological Survey Ground Water Notes, *Geochemistry*, no. 12, 14 s.
- Sağıroğlu, A., 1992. Pertek-Demürek (Tunceli) Skarn Tipi Manyetit ve İlişkili Bakır Cevherleşmeleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 35 (2), 63-70.
- Schoeller, H., 1962. Les eaux souterraines. Masson et Cie, Paris, 1, 642 s.
- Sponza, D., Karaoğlu, N., 2002. Environmental geochemistry and pollution studies of Aliğa metal industry district. *Environmental International*, 27, 541-553.
- Tarcan, G., 2003. Jeotermal Su Kimyası Ders Notları. Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir, yayımlanmamış.
- TS 266, 2005. Sular-insani tüketim amaçlı sular. 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, 2004. Guidelines For Drinking-water Quality, Third Edition, Volume 1. Recommendations. World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü), Cenevre. 515 s.
- Yaqin, Ji., Yinchang, F., Jianhi, WU., Tan, ZHU., Zhipeng, B.,Chiqing, D., 2008. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China. *Journal Environmental Sciences*, 20, 571-578.