

Polatlı ve Haymana (Ankara) sıcak sularının kökenine yönelik kimyasal ve izotopik sınırlamalar

Geochemical and isotopic constraints on the evolution of Polatlı and Haymana (Ankara) thermal waters

HAFİZE AKILLI^{1*} HALİM MUTLU²

¹ MTA Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Söğütözü, Ankara.

² Ankara Üniversitesi Jeoloji Müh. Bölümü Gölbaşı, Ankara.

Geliş (received) : 08 Kasım (November) 2017

Kabul (accepted) : 06 Nisan (April) 2018

ÖZ

Bu çalışmada Ankara'nın güneybatısında yer alan Polatlı ve Haymana jeotermal sahalarındaki termal ve soğuk su kaynaklarının hidrojeokimyasal özellikleri ile duraylı ve radyojenik izotop sistematiği incelenmiştir. 21.2 – 42.6 °C arasında değişen sıcaklıklara sahip olan sular çoğunlukla Ca-Na-HCO₃ fasiyesinde gelişmişlerdir.

$\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri sırasıyla -11.7 ile -8.1‰ ve -86.7‰ ile -61.9‰ (VSMOW) arasında olan sular küresel ve Ankara meteorik su doğrularından değişik miktarlarda sapma göstermektedir. 1.0‰'den 11.9‰'ye kadar geniş bir aralıkta değişen döteryum fazlalığı değerleri yüksek nemli koşulları yansıtmaktadır. Polatlı-Haymana sularının trityum değerleri 0.0 ile 5.37 TU arasındadır. Sıcak sular için kaydedilen düşük değerler, yüksek Cl içerikleri de göz önüne alındığında, yeraltında derin bir dolaşımı işaret etmektedir. Sularla çözülmüş sülfatta ölçülen $\delta^{34}\text{S}$ değerleri -9.2‰'den +19.5‰'e (VCDT) kadar geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. Sülfata ait $\delta^{18}\text{O}$ ise 3.66‰ ile 14.99‰ (VSMOW) arasındadır. $\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{18}\text{O}$ sistematiği ya doğrudan denizel evaporitlerden ya da denizel ve karasal evaporitlerin karışımı şeklinde bir katkı belirtmektedir. Polatlı ve Haymana sularındaki çözülmüş inorganik karbonun (DIC) (HCO₃) izotop ($\delta^{13}\text{C}$) değerleri -21.84‰'den -1.34‰'ye (VPDB) kadar değişmektedir. Bu değerler denizel kireçtaşlarının yanı sıra (-3 ile +3‰ arasında) ve organik kaynakların da sudaki karbon izotop bileşimini kontrol ettiğine işaret etmektedir. Kireçtaşlarında ölçülen $\delta^{13}\text{C}$ (2.66 ile 6.80‰ VPDB) değerleri travertenlerden elde edilen değerlere göre (-0.79 ile +3.24‰ VPDB) daha yüksektir. Sulardaki $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ değerleri 0.705883'den 0.707896'a kadar dar bir aralıkta değişmektedir. Bu bölgelerden toplanan granit, kireçtaşı, andezit ve travertenlerin Sr izotop bileşimleri ise 0.706119 ile 0.708831 arasındadır. Su örneklerinin Sr izotop bileşimleri kayalarınkilerle (özellikle kireçtaşları) büyük ölçüde örtüşmektedir.

Mineral doygunluk hesaplamaları Polatlı-Haymana sıcak sularının dolomit, kalsit, aragonit ve silika minerallerine göre doygun, jips ve anhidrite göre ise doygun olmadıklarını göstermiştir. Kuvars jeotermometresi ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları Polatlı örnekleri için 48-117°C, Haymana örnekleri için ise 72°C'dir. Her iki saha için düşük sıcaklıklar öngörmüş olsa da kalsedon jeotermometresi ile hesaplanan sıcaklıklar (40-88°C) daha gerçekçi bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Jeokimya, duraylı-radyojenik izotoplar, su-kayaç etkileşimi, Polatlı-Haymana sıcak sular.

ABSTRACT

In this study we investigate hydrogeochemical characteristics and stable and radiogenic isotope systematics of thermal and cold waters in the Polatlı and Haymana geothermal fields in southwest of Ankara. Studied waters with temperatures ranging from 21.2 to 42.6°C are mostly of Ca-Na-HCO₃ facies type.

Waters with $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of -11.7 to -8.1‰ and -86.7‰ to -61.9‰ (VSMOW), respectively, deviate with varying extent from global and Ankara meteoric water lines. Deuterium excess values changing in a wide range from 1.0 to 11.9‰ reflect high-moisture conditions. Tritium values of Polatlı-Haymana waters are in the range of 0.0 to 5.37 TU. Low values of thermal waters, coupled with their high Cl contents, indicate a deep circulation. $\delta^{34}\text{S}$ values of dissolved sulfate in waters vary from -9.2 to +19.5‰ (VCDT). $\delta^{18}\text{O}$ of sulfate is in the range of 3.66 to 14.99‰ (VSMOW). $\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{18}\text{O}$ systematics indicate either a direct contribution from marine evaporites or an input from mixing of marine and terrestrial evaporites. Isotope ($\delta^{13}\text{C}$) values of dissolved

*H. Akilli

e-posta: e-posta: hafizeakilli@gmail.com

inorganic carbon (HCO₃) in Polatlı and Haymana waters range from -21.84‰ to -1.34‰ (VPDB). These values reveal that carbon isotope composition in waters is controlled by marine limestones (from -3 to +3‰) and organic sources as well. δ¹³C measured in limestones (2.66 to 6.80‰; VPDB) are found greater than those of travertines (-0.79 to +3.24‰ VPDB). ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values in water vary in a narrow range from 0.705883 to 0.707896. Sr isotope compositions of granite, limestone, andesite and travertines sampled in the region are between 0.706119 and 0.708831. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values of waters are quite consistent with those rocks (particularly limestones).

Mineral saturation calculations showed that Polatlı-Haymana thermal waters are saturated with respect to dolomite, calcite, aragonite and silica minerals but undersaturated with respect to gypsum and anhydrite. Reservoir temperatures computed from quartz geothermometer are 48-117°C for Polatlı samples and 72°C for the Haymana samples. Although yielding low estimates for both fields, temperatures calculated by chalcedony geothermometer (55-88°C) are believed to be more realistic.

Keywords: Geochemistry, stable-radiogenic isotopes, water-rock interaction, Polatlı-Haymana thermal waters.

GİRİŞ

Alp-Himalaya dağ kuşağının bir parçası olan, Türkiye’de hüküm süren karmaşık tektono-magmatik süreçler sıcaklıkları 100°C’ye kadar varan çok sayıda sıcak su kaynağının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Söz konusu kaynaklar çoğunlukla Neojen-Kuvaterner volkanikleri ve aktif fay sistemleri boyunca dağılım göstermektedir. Açılma tektoniği ve bununla ilişkili derin kökenli ısı kaynakları ile derin akışkan dolaşımına olanak sağlayan graben sistemlerinin hüküm sürdüğü batı Anadolu bölgesi yüksek bir jeotermal potansiyele sahiptir. Buna karşın, genç volkanizmanın oldukça yaygın olduğu orta ve doğu Anadolu bölgelerinde iyi gelişmiş fay sistemlerinin bulunmaması bu bölgelerdeki jeotermal sahaların düşük entalpili olmalarına yol açmıştır (Mutlu ve Güleç, 1998).

Anadolu’daki jeotermal sistemlerin istisnasız şekilde meteorik sular tarafından beslendiği (Mutlu vd., 2014) ve akışkanlardaki çözünmüş katı ve gazların (helyum, CO₂ gibi) ise çeşitli yerküre rezervuarından (manto, kabuk, atmosfer gibi) türedikleri ortaya konmuştur (Güleç vd., 2014). Türkiye’deki (özellikle batı Anadolu bölgesi) sıcak sular, majör element ve duraylı izotop (δ¹⁸O, δD) bileşimleri esas alınarak jeotermometre hesaplamaları ve su-kayaç etkileşimi süreçlerine yönelik çok sayıda araştırmaya konu olmuştur (Güleç, 1994; Mutlu, 1998; Mutlu ve Güleç, 1998; Tarcan, 2005; Mutlu, 2007). Ancak güncel çalışmalarda sulardaki çözünmüş katıların kimyasal evrimlerinin ve kökenlerinin araştırılmasında duraylı izotopların yanı sıra radyojenik izotoplar da yaygın şekilde kullanılmaktadır (Vengosh vd., 2002; Dotsika vd., 2010; Marques vd., 2012). Stronsiyum gibi yüksek atom numaralı elementlerin izotopları (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) önemli ölçüde kütle ayrılaşmasına uğramadıkların-

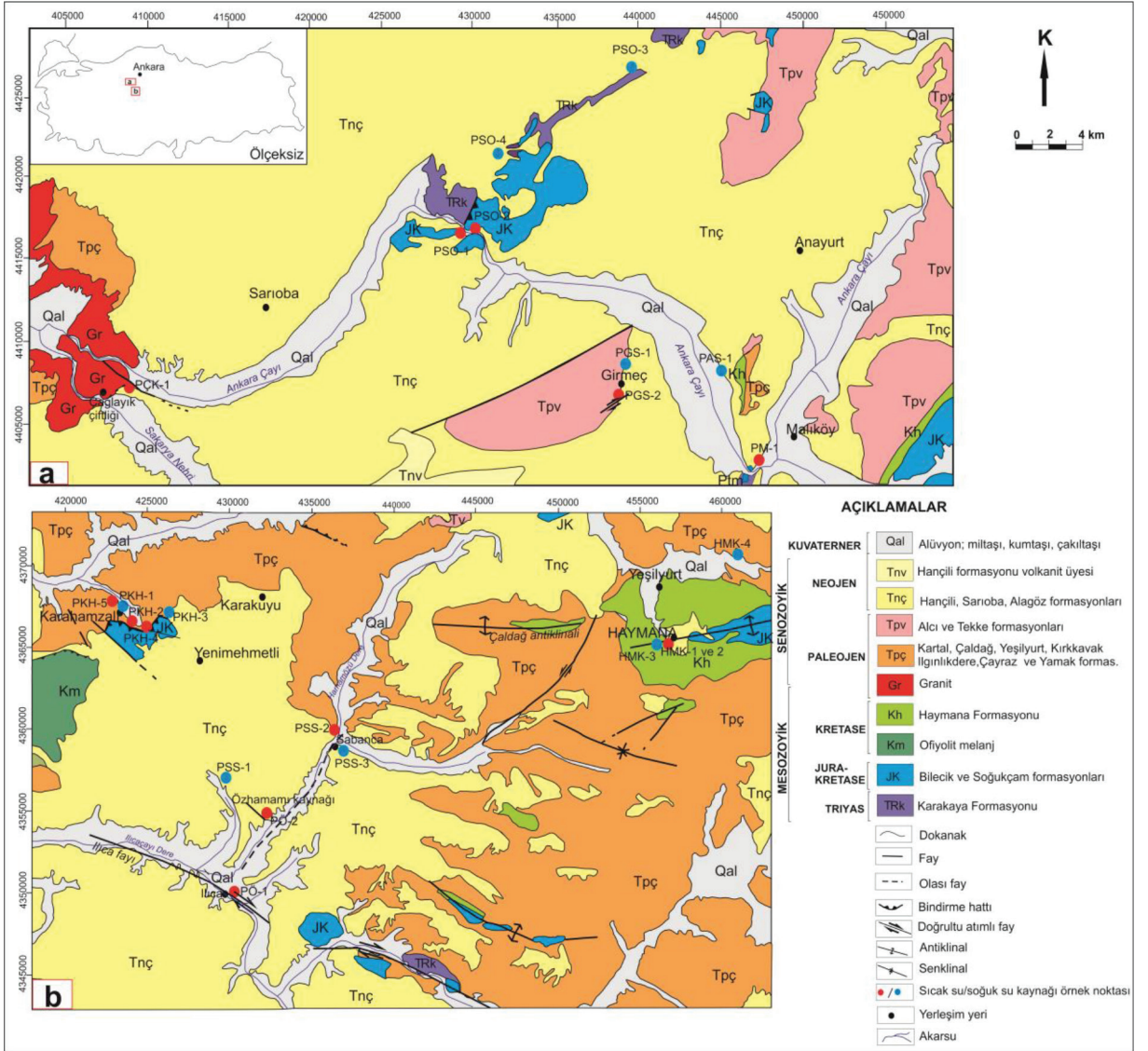
dan, suların dengede oldukları veya etkileşime girdikleri kayaçların izotop bileşimini belirlemede oldukça faydalıdır. Bu nedenle, su-kayaç etkileşiminin irdelemede, radyojenik izotoplar ikincil süreçlerden daha fazla etkilenen majör ve iz element bileşimlerine ve/veya duraylı izotoplara üstünlük sağlarlar.

Ankara bölgesinde çok sayıda düşük entalpili jeotermal saha mevcuttur. Ancak son yıllarda gerçekleştirilen sondaj çalışmaları ile kuyu dibi sıcaklıkları 129°C’ye varan yeni sahalara ile bölgenin jeotermal potansiyeli artırılmıştır (Bülbül, 2017). Bu çalışmada, Ankara ilinin yaklaşık 60 km güneybatısında yer alan Polatlı ve Haymana jeotermal sahalarındaki sıcak ve soğuk sular ile rezervuar kayaçları jeokimyasal (majör+iz element) ve duraylı-radyojenik izotop verileri bütünlük olarak kullanılarak incelenmiştir. Araştırmanın amacı söz konusu akışkanların hidrojeokimyasal fasiyeslerinin belirlenmesi, çeşitli kimyasal ve izotop jeotermometreleri ve mineral-akışkan denge modelleri ile akışkanların rezervuar sıcaklıklarının tahmin edilmesi ve ayrıca suların ve bölgedeki kayaçların duraylı (O, H, C ve S) ve radyojenik (Sr) izotop bileşimlerini değerlendirerek suda çözünmüş bileşiklerin kökenlerinin ortaya konulmasıdır.

MALZEME ve YÖNTEM

Polatlı ve Haymana jeotermal sahalarından Kasım 2014 ve Haziran 2015 dönemlerinde 13 sıcak ve 10 adet soğuk su örneği toplanmıştır. Haymana sıcak suları kuyulardan, diğer tüm sular (sıcak + soğuk) ise kaynak ve çeşmelerden örneklenmiştir. Polatlı bölgesinden 11’i sıcak ve 8’i soğuk olmak üzere toplam 19 adet, Haymana’dan ise 2 adet sıcak ve 2 adet soğuk su toplanmıştır (Şekil 1).

Polatlı bölgesindeki Malıköy, Özhamamı ve Sabanca kaynakları birkaç noktadan çıkmakta ve gölları



Şekil 1. İnceleme alanların yer bulduru ve jeoloji haritası. a) Çağlayık, Sarıoba, Gırmeç ve Malıköy alanları ve çevresi, b) Karahamzalı, Özhamamı, İlica, Sabanca ve Haymana alanları ve çevresi (Akyürek vd., 1996; Gönenç, 1978; Bilgin vd., 2009; Bilgin vd., 2010'dan değiştirilerek).

Figure 1. Location and geology maps of the studied areas. a) for the Çağlayık, Sarıoba, Gırmeç and Malıköy areas and surrounding, b) for the Karahamzalı, Özhamamı, İlica, Sabanca and Haymana areas and surrounding (modified from Akyürek et al., 1996; Gönenç, 1978; Bilgin et al., 2009; Bilgin et al., 2010).

oluşturmaktadır. Karahamzalı kaynakları da birkaç noktadan boşalım yapmaktadır. Kaynakların debileri sızıntıdan 1 l/sn debiye kadar ulaşmaktadır. Kireçtaşlarından yüzeye çıkan Sarıoba kaynakları Ankara çayına boşalmaktadır.

Haymana sıcak suları sırasıyla 2005 ve 2009 yıllarında ilçe merkezinde açılan Sondaj-5 (HMK-1) ve İHJ-1 (HMK-2) nolu kuyulardan toplanmıştır. Sondaj-5 kuyusu 230 m derinlikte olup 42.6°C sıcaklıkta 40 l/sn'lik debide su üretimi yapmaktadır. 204 m derinliğe

sahip İHJ-1 kuyusundan alınan akışkanın sıcaklık ve debisi ise 42.3°C ve 33 l/sn'dir. Söz konusu sondaj kuyularının üretime geçmesiyle, ilçenin hemen kuzeydoğusunda sıcaklığı 34°C olan (Başkan, 1972) Uyuz hamamı da dâhil olmak üzere çevredeki sıcak su kaynakları tamamen kurumuştur. Sıcak sular kaplıcalarda ve cami ısıtmasında kullanılmaktadır.

pH, elektriksel iletkenlik, çözülmüş oksijen ve sıcaklık değerleri HAQ-multiprob cihazı kullanılarak örnek noktalarında ölçülmüştür. Su örnekleri yüksek-

yoğunluklu polietilen kaplara toplanmış; katyon analizi için toplanan örneğe 0.2 ml HNO₃ ilave edilmiş ve gerekli olduğunda 0.45 µm filtre kâğıdı kullanılarak filtre edilmişlerdir.

Suların kimyasal analizleri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında Fishman ve Friedman (1989)'da tanımlanan standart yöntemler ile gerçekleştirilmiştir. HCO₃ analizinde titrasyon yöntemi kullanılmış, SO₄ ve SiO₂ konsantrasyonları ise spektrofotometri ile tayin edilmiştir. İz element analizleri ise ICP-OS yöntemi ile belirlenmiştir.

δ¹⁸O ve δD (VSMOW: Viyana-Standart Ortalama Okyanus Suyu) analizleri lazer spektrometresi ile trityum (³H) analizleri ise sıvı sayım sintilasyon sistemi ile Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında yapılmıştır. Su örneklerinin δ¹⁸O (SO₄) (VSMOW), δ¹³C (DIC) (VPDB: Viyana-Kanyon Diablo Troilit) ve δ³⁴S (VCDT: Viyana-Pee Dee Belemnite) analizleri ile karbonat kayaçlarının ve travertenlerin δ¹³C ve δ¹⁸O (VPDB) analizleri Waterloo Üniversitesi (Kanada) Çevre İzotop Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Sulardaki kükürt ve karbon izotop analizleri için örneklerin zenginleştirme işlemleri MTA laboratuvarlarında yapılmıştır. Karbon analizi için, öncelikle suların pH değerlerini 11'e düşürmek için önce 10 N NaOH ve daha sonra BaCl₂ eklenerek suyun bileşiminde bulunan karbonatın (inorganik karbon) BaCO₃ olarak çökmesi sağlanmıştır. Çökelen BaCO₃ tüplerde süzülme suretiyle ayrılarak kurumaya bırakılmıştır. Kükürt analizi için, suların pH değerlerini 4'e düşürmek için 10 N HCl eklenmiştir. Bunu takiben örneklere BaCl₂ ilave edilmiş ve suyun bileşimindeki sülfat BaSO₄ olarak çöktürülmüştür. Çökelen BaSO₄ tüplerde süzülerek sülfat çökeltisi ayrılmıştır. Çökelti kurutulduktan sonra toz haline getirilmiştir. Karbonat örneklerinin δ¹³C ve δ¹⁸O değerleri Micromass IsoPrime İzotop Oranı Kütle Spektrometresi (IRMS) ile belirlenmiştir. δ³⁴S, sudan çökeltilen BaSO₄ üzerinde Isochrom sürekli akış duraylı izotop kütle spektrometresi (Micromass) ve buna bütünlük Carlo Erba element analizörü (CHNS-O EA 1108) ile ölçülmüştür.

Su ve kayaç örneklerinin ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr bileşimleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarlarında Köksal ve Göncüoğlu (2008) tarafından belirtilen prosedürlere uygun olarak analiz edilmiştir. Stronsiyum 2.5 N HCl içindeki teflon kolonlarda ayrılmış ve daha sonra 6 N HCl kullanılarak Sr katyon değişim kolonlarından NTE bölüntüsü elde edilmiştir. Ta-aktivatör ve 0.005 N H₃PO₄ ile Re filamentine yüklenen stronsiyum statik durum altında analiz edilmiştir. Sr oranları

⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 ile normalleştirilmiştir. Sr izotop oranları, Thermo-Fisher Triton termal iyonlaştırıcı kütle spektrometresi ile standart hata değerleri 2-sigma düzeyinde ölçülmüştür. Analizlerde Sr bileşimi NBS 987 standardı 0.710251±8 (n=3) olarak ölçülmüştür.

BÖLGESEL JEOLJİ

Polatlı ve Haymana bölgelerinin temelini Triyas yaşlı düşük dereceli metamorfizma geçirmiş kayaçlar oluşturur (Bilgin vd., 2009; Bilgin vd., 2010; Şekil 1a ve b). Çalışma alanında yüzeyleyen metamorfitle killi şist, mikaşist, metaçakıltası, metakumtaşı, metakiltası ve metavolkanitlerden meydana gelmektedir. Bu kayaçların üzerinde uyumsuz olarak Üst Jura-Alt Kretase yaşlı Bilecik kireçtaşları görülür. Rezervuar özelliği taşıyan birim çok kaba tabakalı, masif görünümlü, bloklu, krem, kirlili beyaz, açık gri renkli, kristalize kireçtaşları ve çörtlü kireçtaşları ile temsil edilmektedir. Üst Kretase yaşlı ofiyolitler Paleojen yaşlı birimler üzerine bindirmeli olarak gelmiştir. Karahamzalı köyünün güneybatısında yüzeyleyen ofiyolitik melanj peridotit, gabro, serpantin, volkanit, radyolarit ve metamorfik kayaç parçalarından oluşmaktadır. Haymana dolayında yüzeyleyen Haymana formasyonu ise fliş fasiyesinde olup kumtaşı-şeyl aralanmasından oluşur (Ünal vd., 1976). Paleosen yaşlı Beypazarı granitoyiti holokristalin yapıda olup mafik magmatik anklavlar içermektedir (Helvacı ve Bozkurt, 1992; Zoroğlu ve Kadioğlu, 2004).

Polatlı ve Haymana bölgelerinde, Paleosen ve Eosen yaşlı formasyonlar uyumsuz olarak Neojen çökelleri ile örtülmüşlerdir (Ünal vd., 1976; Akyürek vd., 1996; Bilgin vd., 2009; Bilgin vd., 2010). Birbirleri ile yanall geçişli olarak izlenen Paleosen yaşlı Kartal, Çaldağ, Yeşilyurt ve Kırkkavak formasyonları çakıltası, kumtaşı, marn, bu birimlerin üzerine uyumlu olarak gelen şeyl ve kireçtaşından oluşmuştur. Bu formasyonların üzerine yine uyumlu olarak gelen Eosen yaşlı Iğnıklidere, Çayraz ve Yamak formasyonları çakıltası-kumtaşı-şeyl aralanması, kumlu kireçtaş, marn, kumtaşı ve çakıltasından oluşmuştur.

Paleojen birimlerini uyumsuz şekilde yüzeyleyen Neojen çökelleri (Alt-Orta Miyosen yaşlı Hançilli formasyonu, Üst Miyosen yaşlı Sarıoba ve Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı Alagöz formasyonu) çakıltası, kumtaşı ve kiltası gibi kırıntılı malzemelerin yanı sıra piroklastik ve jipsli seviyeler de içermektedir (Bilgin vd., 2010).

Kuvaterner ise alüvyon ve traverten ile temsil edilmektedir. Alüvyon, akarsular boyunca çökelmiş olup kum, silt, çakıl ve kil boyutunda malzemenin

meydana gelir. Sıcak su kaynakları boyunca çökelmiş olan travertenler Gırmeç, Malıköy, Çağlayık, Karahamzalı, Sabanca ve Haymana sıcak su kaynakları civarında yüzeyler.

Çağlayık jeotermal alanının batısında yüzeyleyen granitler (Beypazarı graniti) holokristalin yapıda olup iri ortoklaz kristalleri ile karakteristiktir. İnceleme alanının kuzeyinde Çobanhamamı civarında granitoyitler ile dokanak halde olan dasitler 69.1 ± 2.6 My, andezitler ise 68.6 ± 2.7 My olarak yaşlandırılmıştır (Açıkgöz vd., 2008). Gırmeç kaynağı dolayında gri, siyah renkli bol piroksenli tefrit, fonolit, lösit ve andezit bileşimli kayaçlar ile piroklastiklerden oluşan Gırmeç formasyonu yüzeyler (Dönmez vd., 2009). Birime ait lavların K/Ar yaşı 57.4 ± 2.3 My olarak bulunmuştur. Alcı formasyonunun volkanitleri ise Gırmeç köyünün batısındaki Çiledağ civarında yüzeylenmektedir. Eosen yaşlı Tekke Volkaniti bazalt ve andezitten meydana gelmiştir.

Çalışma bölgesinde K-G yönlü sıkışmanın etkisine bağlı olarak çeşitli ölçekte kıvrımlar ve faylar gelişmiştir. Karahamzalı köyünün güneydoğusundaki bir taş ocağında sağ yanal atımlı bir fayın izleri gözlenmektedir (Şekil 1b). Karahamzalı sıcak su örneğinde ölçülen oldukça yüksek radon konsantrasyonu (1399 pCi/l) söz konusu fayın sıcak suların yüzeye çıkmasında önemli bir rol üstlendiğine işaret eder. Esat vd. (2016)'ya göre, Yenimehmetli ve Karahamzalı köyleri arasındaki sağ yanal atımlı fay boyunca yüzeye çıkan sıcak su kaynakları söz konusu fayın aktif olduğuna işaret etmektedir. Esat vd. (2016), Ilıca köyü yakınlarındaki Neojen ve Kuvaterner birimleri arasında yaklaşık 5 km uzunluğundaki keskin sınıırın Ilıca fayı tarafından oluşturulduğunu ortaya koymuşlardır. Bülül vd. (2015) tarafından, Ilıca köyü civarında yapılan jeofizik çalışmalarda sağ yanal atımlı fayın etkisi ortaya konulmuştur. Bölgede KB-GD ve KD-GB yönlü normal faylar da mevcuttur (Şekil 1). Sabanca kaynağının kuzeyinde gözlenen kıvrımlar ile Üst Jura-Alt Kretase yaşlı Bilecik formasyonunun Paleosen yaşlı Kartal formasyonu üzerine bindirmesi bölgedeki K-G yönlü sıkışmanın etkisiyle gerçekleşmiştir.

BULGULAR

Su Kimyası

Polatlı ve Haymana sularının sıcaklık, elektriksel iletkenlik, çözülmüş oksijen, tuzluluk ve TDS değerleri ve ayrıca örneklerin koordinatları Çizelge 1'de

verilmiştir. Sıcak ve soğuk suların pH değerleri sırasıyla 6.50–8.70 ve 7.11–7.89 arasındadır. Termal suların sıcaklıkları $21.2\text{--}42.6^\circ\text{C}$ arasındayken soğuk suların sıcaklıkları ise 11.2°C 'den 17.1°C 'ye kadar değişmektedir. Suların elektriksel iletkenlik değerleri $324\text{--}17692 \mu\text{S}/\text{cm}$, toplam çözülmüş madde (TDS) içerikleri ise $212\text{--}9367 \text{ mg}/\text{l}$ arasında ölçülmüştür.

Polatlı-Haymana sularının kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur. Schoeller diyagramında (Şekil 2), Polatlı bölgesindeki Çağlayık sıcak suyunun (örnek PÇK-1) en yüksek Ca, Mg, Na+K, Cl and SO_4 konsantrasyonlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu suyun yüksek SO_4 içeriği muhtemelen evaporit birimler ile olan etkileşimi nedeniyledir. Kireçtaşlarından boşalım yapan Sarioba kaynakları (PSO-1, PSO-2, PSO-3 ve PSO-4) Ca-HCO_3 tipinde sular ile temsil edilmektedir. Malıköy sıcak suyndaki (PM-1) kayda değer derecede yüksek Na+K, Cl, HCO_3 ve SO_4 konsantrasyonları büyük olasılıkla evaporit kayaçların çözünmelerinden ortaya çıkmıştır.

Gırmeç sıcak su kaynağının (PGS-1) düşük toplam iyon içeriği yüzey sularıyla bir seyrelmenin olabileceğini gösterir. Kumtaşı ve kiltası gibi kırıntılı malzemelerin yoğun olduğu Hançili formasyonundan beslenen soğuk sular ise (PAS-1 ve PGS-1) sığ dolaşımlıdır. Marn, kireçtaşı ve volkanik birimlerden oluşan Kartal formasyonundan boşalan Karahamzalı suları Ca-Na-HCO_3 sınıfında olup benzer köken sergilerler. PKH-3 kaynağı Bilecik kireçtaşlarından boşalım yapmaktadır. Özhamamı ve Sabanca kaynaklarının iyon konsantrasyonları diğer kaynaklara göre biraz daha yüksektir. Özhamamı bölgesindeki Özhamamı (PÖ-2) ve Ilıca kaynağı (PÖ-1) sıcak suları benzer kökenlidir. Sabanca sıcak su kaynağı (PSS-2) ise yüksek Na ve HCO_3 değerleriyle diğer su kaynaklarından farklılık gösterir. Sabanca ve Özhamamı kaynaklarındaki yüksek Cl değerleri suların beslenme alanındaki evaporitik birimlerle etkileşim veya derin dolaşım ile açıklanabilir. Haymana bölgesindeki sıcak sular (HMK-1 ve HMK-2) aynı kökenli olup kireçtaşlarından beslenmektedirler. HMK-3 ve HMK-4 suları ise kırıntılı sedimanter kayaçlardan boşalmaktadır.

Piper diyagramında (Şekil 3), Çağlayık-Sarioba bölgesindeki sular üç ayrı alanda toplanmıştır. Çağlayık sıcak su örneği (PÇK-1) NaCl-NaSO_4 'lı sular alanına düşmekte olup bu durum derin dolaşımı ifade etmektedir. Sarioba sıcak su kaynakları (PSO-1 ve PSO-2) ise karışık sular sınıfına girmektedir. Bölgedeki soğuk su örnekleri ise CaCO_3 'lı sular sınıfındadırlar. Malıköy-Gırmeç bölgesindeki sıcak sular (PM-1 ve PGS-2)

Çizelge 1. Haymana ve Polatlı sıcak ve soğuk sularının fizikokimyasal özellikleri. Sıcak sular koyu ve italik yazı tipi ile gösterilmiştir.

Table 1. Physicochemical properties of Haymana and Polatlı thermal and cold waters. Thermal waters are shown in dark and italic.

Bölge	Örnek	Koordinatlar		Yükseklik	T	Q	EC	pH	Tuzluluk	Çözünmüş	TDS
	No	X	Y	(m)	(°C)	(l/sn)	(µS/cm)		(ppt)	O ₂ (mg/l)	(mg/l)
POLATLI	<i>PSO-1</i>	4416284	428186	694	32.4	15-20	1563	6.83	0.70	2.68	916
	<i>PSO-2</i>	4416380	428544	725	30.3	1	1281	6.86	0.57	2.65	750
	PSO-3	4423267	432108	965	15.0	0.8	324	7.61	0.10	8.49	212
	PSO-4	4420003	428537	888	17.1	1	465	7.42	0.10	7.16	303
	<i>PÇK-1</i>	4407964	408814	646	37.1	0.3	17692	6.83	8.20	-	9367
	PAS-1	4408395	443175	749	15.8	0.1	692	7.11	0.20	8.13	415
	<i>PM-1</i>	4403210	445659	735	24.5	-	6120	6.80	3.30	-	-
	PGS-1	4407113	437524	972	10.4	0.3	529	7.49	0.20	9.19	343
	<i>PGS-2</i>	4406976	438248	921	29.2	0.1	662	8.70	0.20	-	-
	PKH-1	4366885	424795	824	11.8	0.35	1222	7.22	0.50	1.08	794
	<i>PKH-2</i>	4366132	424677	872	25.9	0.3	1177	6.70	0.50	-	-
	PKH-3	4364511	425340	905	15.1	0.23	739	7.17	0.30	-	-
	<i>PKH-4</i>	4366106	424970	882	29.9	0.2	1177	6.70	0.50	-	-
	<i>PKH-5</i>	4367985	423902	796	28.6	0.3	1115	6.70	0.50	-	-
	<i>PÖ-1</i>	4350567	432575	797	21.2	1.5	1029	6.50	0.50	-	-
	<i>PÖ-2</i>	4354505	432405	814	31.0	-	2300	7.43	1.20	-	-
	PSS-1	4357109	432430	881	11.2	0.24	1446	7.89	0.70	8.45	940
	<i>PSS-2</i>	4359766	436651	846	24.0	-	2600	6.89	1.30	7.89	1693
	PSS-3	4357554	436665	883	15.0	1.3	1024	7.11	0.40	7.11	668
	HAYMANA	<i>HMK-1</i>	4365180	456722	1217	42.6	40	993	6.73	0.40	2.59
<i>HMK-2</i>		4365373	457154	1206	40.1	33	885	6.77	0.40	2.51	576
HMK-3		4364147	456499	1125	14.4	0.04	1176	7.86	0.60	8.66	933
HMK-4		4370697	461293	1154	14.9	0.2	813	6.91	0.80	5.19	528

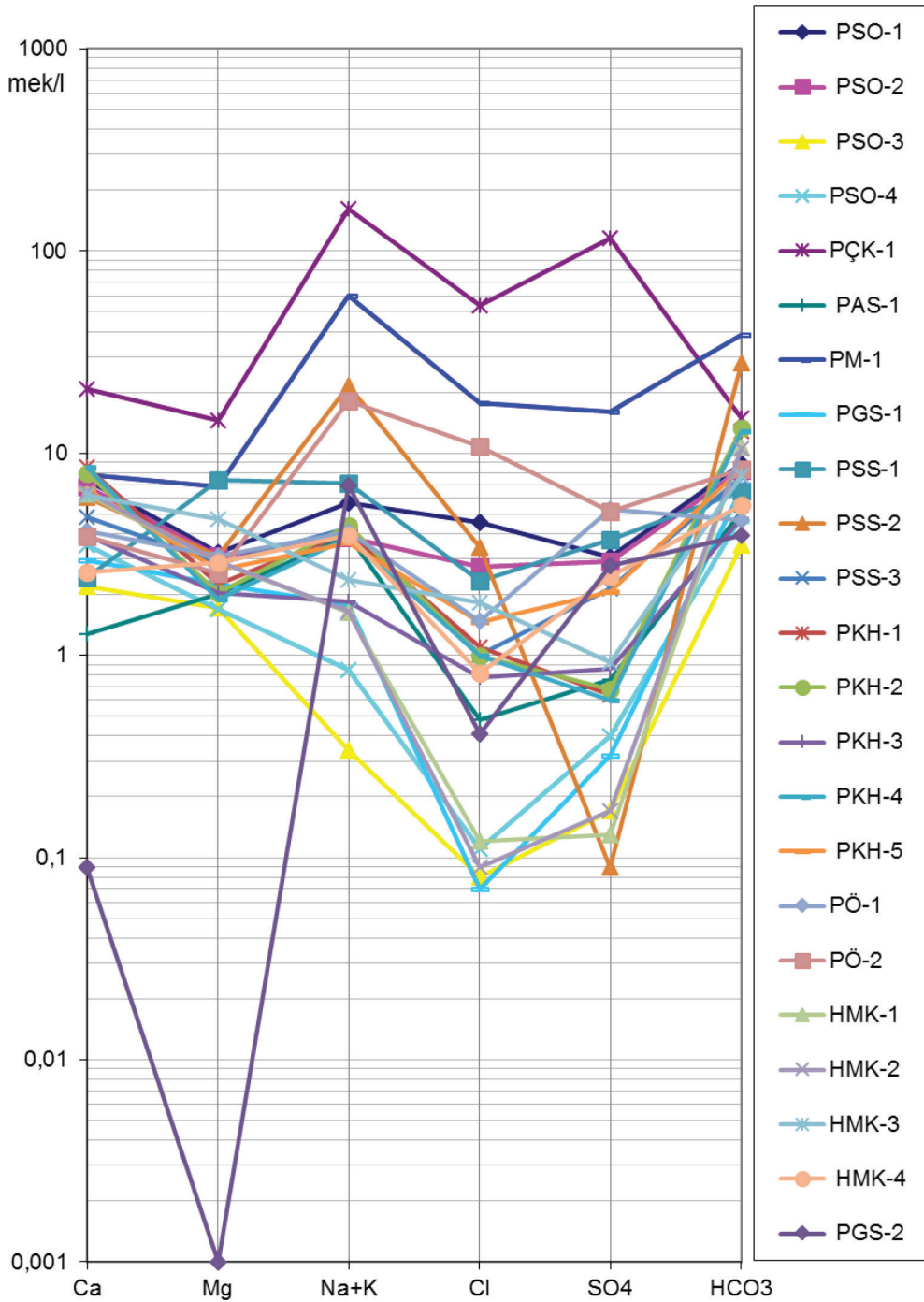
Na, Cl ve SO₄ bakımından zengin tuzlu sular sınıfına girerler. PGS-1 nolu soğuk su örneği CaCO₃'lü sular, Akören soğuk su kaynağı (PAS-1) ise karışık sular sınıfına dahildir. Karahamzalı bölgesindeki tüm sular Ca-Na-HCO₃ fasiyesinde olup (Çizelge 2) kireçtaşları

ile çakıllı ve kumlu seviyelerinden beslenmektedir. Diyagramda Özhamamı-Sabanca sularının tamamı farklı bölgelere düşmektedirler.

PSS-1 nolu örneğe ait yüksek Mg ve Na konsantrasyonları suyun derinlere kadar süzülmediğini ve Mg'un

Çizelge 2. İnceleme alanından alınan su örneklerin iyon konsantrasyonları (mg/l). Sıcak sular koyu ve italik yazı tipi ile gösterilmiştir.
Table 2. Ion concentrations of studied waters (mg/l). Thermal waters are shown in dark and italic.

BÖLGE- Su kaynağı	Örnek No	T (°C)	K	Na	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄	Cl	SiO ₂	Sr	B	Li	F	Br	Su tipi (IAH)
POLATLI- Sarıoba ve Çağlayık	<i>PSO-1</i>	32.4	12.8	124.0	148	39.2	544	147.0	162.0	15.0	1	0.9	<0.1	0.3	0.6	Ca-Na-HCO ₃ -Cl
	<i>PSO-2</i>	30.3	9.1	82.5	138	37.8	503	140.0	97.7	20.9	0.87	0.6	<0.1	0.3	0.4	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -Cl
	PSO-3	15.0	8.4	2.9	44	20.9	216	8.0	2.9	10.5	0.20	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	Ca-Mg-HCO ₃
	PSO-4	17.1	15.0	10.6	70.8	20.5	300	19.3	3.9	62.3	0.23	0.1	<0.1	0.4	<0.1	Ca-Mg-HCO ₃
POLATLI- Maliköy ve Girmeç	<i>PÇK-1</i>	37.1	80.1	3648.0	416	178.0	902	5577.0	1917.0	68.5	0.87	19	1.4	1.9	7.7	Na-SO ₄ -Cl
	PAS-1	15.8	2.3	89.3	25.4	24.4	314	36.6	16.9	39.4	0.53	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	Na-Mg- HCO ₃
	<i>PM-1</i>	24.5	47.9	1362.0	158	82.7	2341	768.0	626.0	30.0	3.73	12.2	0.7	3.2	1.9	Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄
	PGS-1	10.4	1.9	39.6	59.3	27.5	405	15.6	2.4	22.8	0.90	0.1	<0.1	0.2	<0.1	Ca-Mg-Na-HCO ₃
	<i>PGS-2</i>	29.2	1.0	159.0	1.8	<1.0	137	133.0	14.5	33.4	0.04	4.7	<0.1	3.5	<0.1	Na-HCO ₃ -SO ₄
POLATLI- Karahamzalı	PKH-1	11.8	7.3	89.8	172	27.4	785	30.6	39.0	18.6	1.48	1.3	<0.1	0.9	0.2	Ca-Na-HCO ₃
	<i>PKH-2</i>	25.9	9.3	84.4	159	24.7	816	32.7	35.5	17.5	1.40	1.2	<0.1	1	0.2	Ca-Na-HCO ₃
	PKH-3	15.1	6.0	38.8	78.7	24.9	293	41.4	27.8	20.0	1.20	0.7	<0.1	0.8	0.2	Ca-Mg-Na-HCO ₃
	<i>PKH-4</i>	29.9	9.5	82.3	171	23.0	783	29.0	35.2	17.0	1.47	1.2	<0.1	1	0.2	Ca-Na-HCO ₃
	<i>PKH-5</i>	28.6	6.7	79.1	134	32.2	514	99.3	51.9	15.0	1.59	1.1	<0.1	0.8	0.2	Ca-Na-Mg-HCO ₃
POLATLI- Özhamami- Sabanca	<i>PÖ-1</i>	21.2	6.4	90.3	82.6	37.7	285	254.0	52.3	13.3	1.60	0.7	<0.1	0.2	0.2	Na-Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃
	<i>PÖ-2</i>	31.0	15.1	408.0	77.9	31.1	508	248.0	384.0	20.0	0.86	3.6	0.1	0.7	0.9	Na -Cl-HCO ₃ -SO ₄
	PSS-1	11.2	1.3	161.0	48.5	89.0	399	180.0	83.0	22.0	3.40	0.7	0.1	1.5	0.7	Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄
	<i>PSS-2</i>	24.0	19.3	482.0	121	37.9	1698	4.2	122.0	35.7	3.94	10.9	0.2	4	0.3	Na-HCO ₃
	PSS-3	15.0	9.7	92.3	96.4	34.6	466	103.0	35.7	16.0	3.20	2.1	<0.1	0.8	0.2	Ca-Na-Mg-HCO ₃
HAYMANA	<i>HMK-1</i>	42.6	8.1	32.8	126	35.5	651	6.3	4.1	25.1	1.23	0.4	<0.1	1.1	<0.1	Ca-HCO ₃
	<i>HMK-2</i>	40.1	9.3	32.4	129	35.3	644	8.0	3.2	25.3	1.28	0.4	<0.1	1.1	<0.1	Ca-HCO ₃
	HMK-3	14.4	17.5	43.6	124	57.6	474	44.2	64.6	23.6	1.97	0.4	<0.1	1	<0.1	Ca-Mg-HCO ₃
	HMK-4	14.9	9.7	84.0	51.7	34.9	338	117.0	29.0	16.0	0.71	0.4	<0.1	0.7	0.2	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -SO ₄

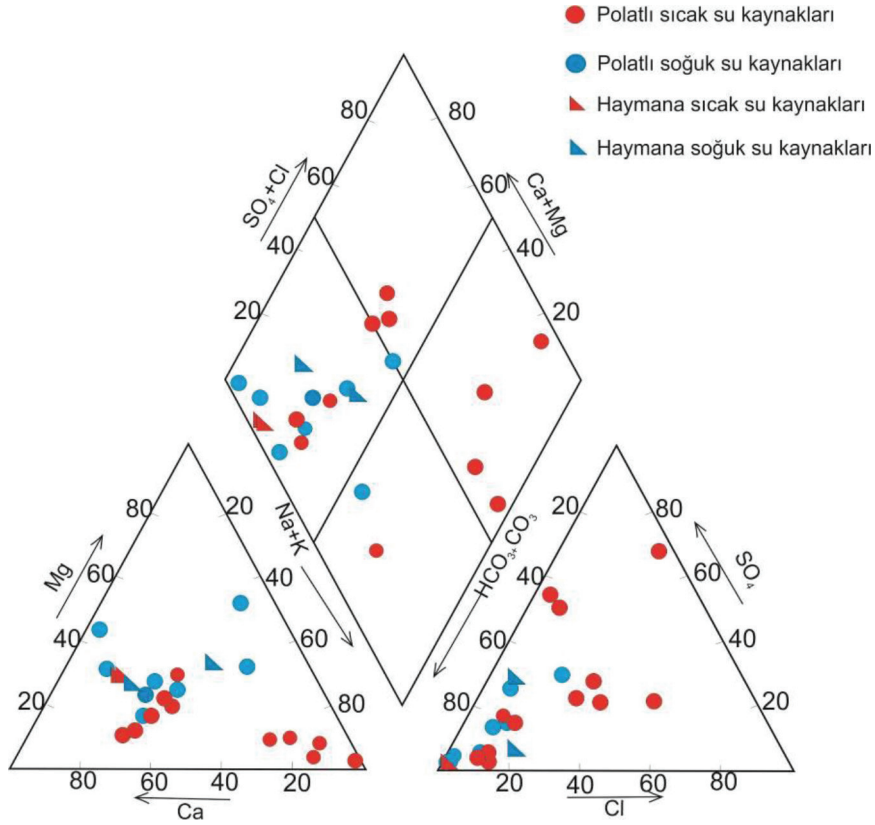


Şekil 2. İnceleme alanındaki sıcak ve soğuk su kaynaklarının yarı logaritmik Schoeller diyagramı.
Figure 2. Semi-logarithmic Schoeller diagram for thermal and cold waters in the study area.

yüzeysel yıkanma sonucu suda zenginleşmiş olabileceğini düşündürmektedir. PSS-3 örneği ise Ca-Na-Mg-HCO₃'lü sular sınıfına girmektedir. Özhamamı kaynağı (PÖ-2) NaCl-NaSO₄'lü suların olduğu bölgede yer almaktadır. Ilıca kaynağı ise (PÖ-1) karışık

sular sınıfına girmektedir. Haymana bölgesindeki suların tamamı CaCO₃'lü sular sınıfına girer.

Örneklerdeki SiO₂ konsantrasyonu soğuk sular için 15–23.6 mg/l arasında değişirken sıcak sular için 13.3–35.7 mg/l aralığındadır. Sıcak ve soğuk sularda



Şekil 3. İnceleme alanındaki sıcak ve soğuk su kaynakları için Piper diyagramı.
Figure 3. Piperdiagram for thermal and cold waters in the study area.

ölçülen SiO_2 değerlerinin birbirine yakın olması sıcak sulara soğuk suların karıştığına işaret etmektedir. Sularda ölçülen iz element konsantrasyonları Sr, B ve F için sırasıyla 0.04 – 3.94, 0.1 – 12.2 ve 0.1 – 3.5 mg/l arasında seyretmektedir.

İzotop Jeokimyası

$\delta^{18}\text{O}$ – δD bileşimleri

Oksijen ve hidrojen gerek hidrosferin büyük bir kısmını oluşturmaları gerekse minerallerin yapısında bol miktarda bulunmaları nedeniyle jeokimya çalışmalarında en sık kullanılan kararlı izotoplardır. Hidrojeoloji incelemelerinde oksijen ve hidrojen izotopları suyun kökeninin ve beslenme yüksekliğinin belirlenmesinde ve ayrıca su-kayaç etkileşiminin irdelenmesinde oldukça yararlıdır. Yüksek rakımlı alanlara düşen yağışlar hafif izotoplar (^{16}O ve ^1H) bakımından zengin olmaları nedeniyle bu yağışlardan beslenen sular negatif $\delta^{18}\text{O}$ değeri ile temsil edilirler. Meteorik suların $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri, pratikte 0‰ kabul edilen

SMOW referans noktasından itibaren, sırasıyla –20 ‰ ve –150 ‰'ye kadar uzanmaktadır (Craig, 1961).

Polatlı-Haymana sıcak sularının $\delta^{18}\text{O}$ değerleri –11.67 ‰ ile –9.06 ‰ arındayken soğuk suların $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ise –9.96 ‰'den –8.05 ‰'e kadar değişmektedir (Çizelge 3). δD değerleri sıcak ve soğuk sular için sırasıyla –86.71 ‰ ile –67.57 ‰ ve –70.65 ‰ ile –61.87 ‰ aralıklarındadır. Genel olarak sıcak suların $\delta^{18}\text{O}$ – δD değerleri soğuk sularinkinden biraz daha negatiftir. $\delta^{18}\text{O}$ – δD diyagramında (Şekil 4), örneklerin çoğunluğu küresel ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$; Craig, 1961) ve Ankara meteorik su çizgilerinin ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10.63$; Sayın ve Eyüpoğlu, 2005) altında yer almakta ve bunlardan değişik miktarlarda sapma göstermişlerdir. Yüksek rakımlı alanlardan toplanan PÇK-1, PGS-2 ve PKH-5 sularının $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri diğer örneklere göre daha negatiftir. Sıcak suların daha fazla hafif izotop içeriyor olması soğuk sulara göre daha yüksek rakımlardan beslendiklerine işaret etmektedir (Şekil 4).

Su örneklerinin bazıları Küresel Meteorik Su Doğrusundan sapma göstermektedir (Şekil 4). Söz konusu sapma buharlaşma, yoğunlaşma ve kayaç-su

Çizelge 3. Su ve karbonatlı kayaçların duraylı izotop (‰) ve trityum (³H) bileşimleri. Sıcak sular koyu ve italik yazı tipi ile gösterilmiştir.

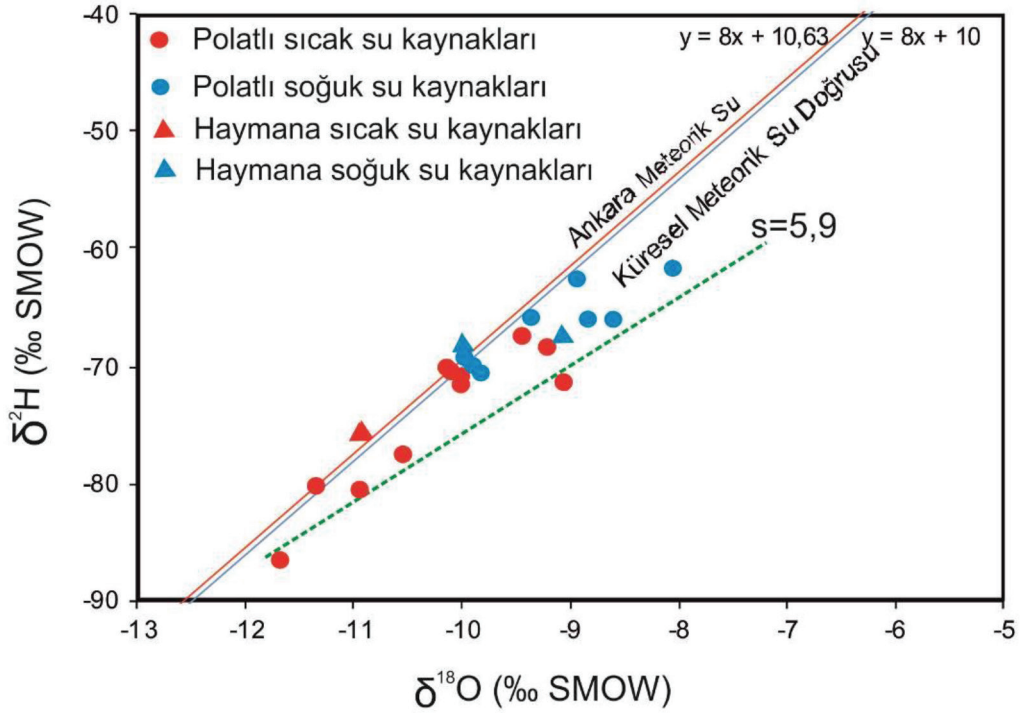
Table 3. Stable isotope (‰) and tritium (³H) compositions of waters and carbonate rocks. Thermal waters are shown in dark and italic.

Örnek No	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)	δD (VSMOW)	Döteryum fazlalığı	^3H (TU)	$\delta^{18}\text{O}$ (SO ₄) (VSMOW)	$\delta^{34}\text{S}$ (SO ₄) (VCDT)	$\delta^{13}\text{C}$ (DIC) (VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (Kar) (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (Kar) (VPDB)
<i>PSO-1 (Kçt)</i>	-10.10	-70.56	10.25	2.77±0.72	12.32	14.74	-14.39	3.43	-5.79
<i>PSO-2</i>	-10.11	-70.43	10.45	2.65±0.76					
PSO-3	-9.96	-69.27	10.41	3.98±0.66			-18.24		
PSO-4	-8.92	-62.71	8.65	1.79±0.66			-17.56		
<i>PÇK-1 (Trav)</i>	-11.67	-86.71	6.67	0.62±0.62	14.39	17.83	-3.83	1.47	-11.05
PAS-1	-8.05	-61.87	2.53	1.98±0.60			-18.43		
<i>PM-1 (Kçt)</i>	-9.06	-71.46	1.02	0.59±0.58	7.53	1.58	-1.34	6.80	-7.83
PGS-1	-9.35	-66.01	8.79	3.89±0.68					
<i>PGS-2 (Trav)</i>	-11.33	-80.33	10.31	0±0.54	14.99	19.51	-18.00	-0.79	-4.71
PKH-1	-9.89	-70.04	9.08	2.09±0.62			-4.81		
<i>PKH-2 (Trav)</i>	-9.99	-70.97	8.95	2.02±0.62	5.97	3.88	-11.12	1.80	-8.83
PKH-3	-8.82	-66.06	4.50	5.37±0.76					
<i>PKH-4 (Trav)</i>	-10.00	-71.63	8.37	1.73±0.62	3.66	3.38	-9.04	-1.20	-9.95
<i>PKH-5</i>	-10.52	-77.75	6.41	0.50±0.54			-11.37		
<i>PÖ-1</i>	-9.43	-67.57	7.87	3.04±0.66	3.76	-9.2	-13.38		
<i>PÖ-2</i>	-9.20	-68.43	5.17	1.55±0.62	9.31	4.88	-15.81		
PSS-1	-8.59	-66.04	2.68	3.78±0.66			-21.84		
<i>PSS-2 (Trav)</i>	-10.91	-80.77	6.58	0.71±0.62			-3.16	2.23	-7.97
PSS-3	-9.82	-70.65	7.91	2.10±0.60			-13.78		
<i>HMK-1</i>	-10.93	-75.50	11.94	0.72±0.58			-8.02		
<i>HMK-2</i>	-10.94	-75.63	11.89	0.29±0.56			-10.47		
HMK-3 (Trav)	-9.99	-67.94	11.98	4.91±0.68			-12.48	3.24	-9.87
HMK-4 (Kçt)	-9.08	-67.37	5.27	3.94±0.64			-19.04	2.66	-0.77

Kçt. ve Trav. ilgili lokasyondaki kireçtaşı ve traverten örneklerine karşılık gelmektedir.

etkileşimi gibi farklı süreçlerden kaynaklanabilir. Buharlaştırma etkisi altında olan suların eğimi Küresel Meteorik Su Doğrusundan (eğimi 8) daha düşük olup genellikle 3 ile 8 arasında değişen doğrular üzerinde

yer alırlar (Coplen vd., 2000). Buharlaştırma doğrusunun eğimi nemlilik, sıcaklık, iyon konsantrasyonu gibi etkenlere bağlıdır (Gat, 1981). Meteorik su doğrusunu kestiği nokta ise yüzey sularının buharlaşmadan



Şekil 4. İnceleme alanındaki sıcak ve soğuk sular için $\delta D-\delta^{18}O$ grafiği. Küresel ($\delta^2H=8\delta^{18}O+10$; Craig, 1961) ve Ankara meteorik su çizgileri ($\delta^2H=8\delta^{18}O+10.63$; Sayın ve Eyüpoğlu, 2005).

Figure 4. $\delta D-\delta^{18}O$ graphic for thermal and cold waters in the study area. Global and ($\delta^2H=8\delta^{18}O+10$; Craig, 1961) and Ankara meteoric water lines ($\delta^2H=8\delta^{18}O+10.63$; Sayın and Eyüpoğlu, 2005).

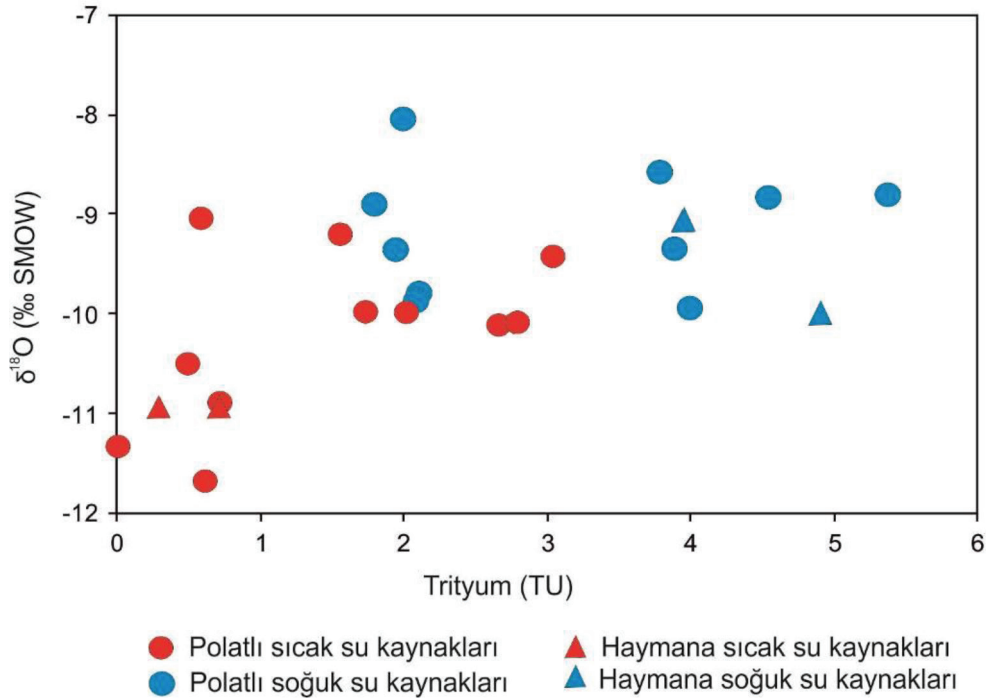
önceki izotopik kompozisyonunu gösterir (Kurttaş, 2002). Küresel Meteorik Su Doğrusundan sapma gösteren örnekler için bir buharlaşma doğrusu çizilmiştir. Buharlaşma sırasında öncelikle hafif izotoplar buhar fazına geçtikleri için sıvı faz ağır izotoplarca zenginleşir (Clark ve Fritz, 1997; Mook, 2001).

Özellikle Malıköy (PM-1), Özhamamı (PÖ-2) ve Sabanca (PSS-2) sıcak suları birkaç noktadan yeryüzüne çıkarak kaynak alanı oluşturmuşlardır. Örnekleme döneminin yaz aylarına denk gelmesi nedeniyle söz konusu kaynaklardan alınan örnekler aşırı derecede buharlaşmaya maruz kalmışlardır. Dansgaard (1964) eşitliğinden ($d = \delta D - 8\delta^{18}O$ ‰) hesaplanan döteryum fazlalığı değerleri 1.0 ‰'den 11.9 ‰'ye kadar geniş bir aralıkta değişmekte olup (Çizelge 3) yüksek nemli koşulları yansıtmaktadır (Clark ve Fritz, 1997). Bu bulgu buharlaşma çizgisi eğimi ile de desteklenmektedir (Şekil 4). Bir başka deyişle, yüksek rakımlı alanlardan boşalan sular (düşük $\delta^{18}O$ ve δD değerleri) buharlaşmadan daha az etkilenmişlerdir.

Trityum değerleri

Hidrojenin kısa yarılanma ömrüne sahip (12,43 yıl) radyoaktif izotopu olan trityum (3H) bozunarak 3He 'e dönüşür. Bu nedenle, trityum suların yeraltında kalış (konaklama) süresinin belirlenmesinde oldukça kullanışlıdır (Clark ve Fritz, 1997). Trityum birimi (TU) olarak ifade edilen trityum konsantrasyonu sığ dolaşımli sularda yüksek, derin dolaşımli sularda ise düşüktür (genellikle sıfıra yakın).

Polatlı-Haymana sularının trityum değerleri 0.0 ile 5.37 TU arasındadır (Çizelge 3). Sıcak sular için ölçülen değerler (0.0–3.0 TU) soğuk sulara (1.98–5.37 TU) göre daha düşüktür. $\delta^{18}O$ ve trityum değerleri arasındaki ilişki suların beslenme yüksekliği ve yeraltında konaklama sürelerinin irdelenmesinde faydalıdır (Şekil 5). Sıcak suların $\delta^{18}O$ değerlerinin genel olarak daha negatif ve trityum bileşimlerinin daha düşük olması soğuk sulara göre daha derin bir dolaşım sonucu yüzeye ulaştıklarına işaret etmektedir. Bu bulgu sıcak suların yüksek Cl içerikleri tarafından da desteklenmektedir (Çizelge 2). Ancak PSO-1, PSO-2 ve PÖ-1 nolu sıcak suların 3H konsantrasyonlarının



Şekil 5. İncelenen sular için $\delta^{18}\text{O}$ -3H grafiği.
Figure 5. $\delta^{18}\text{O}$ -3H graphic for studied waters.

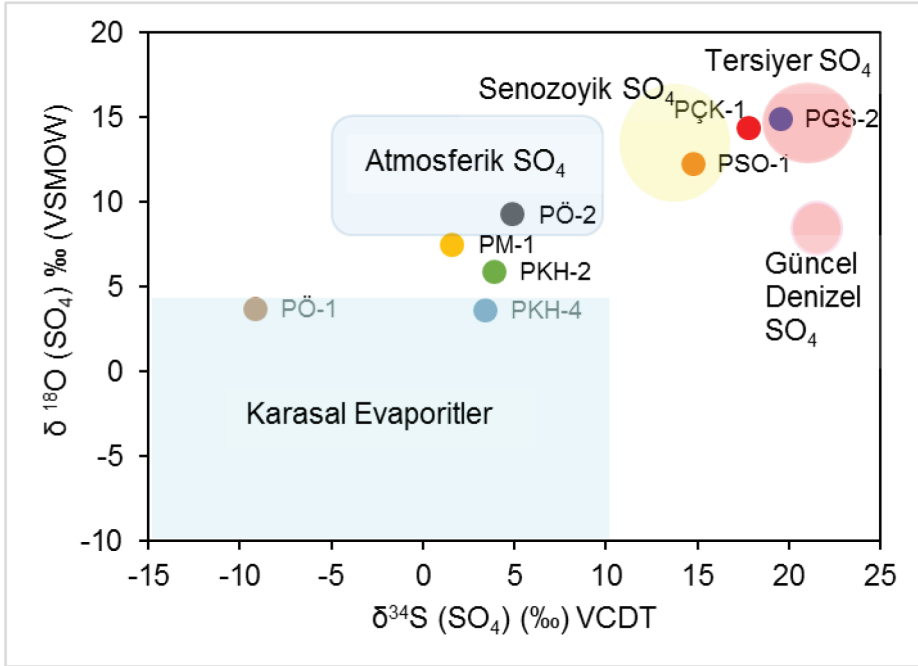
soğuk suların bazılarında daha yüksek olması söz konusu suların sıg bir dolaşım geçirmeleri veya yeraltı suyu ile karışmaları ile açıklanabilir.

$\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4) bileşimleri

Sulardaki kükürt değişik rezervuardan kaynaklanabilir. Kükürdün farklı oksitlenme derecesine sahip olması nedeniyle (-2 ile +6 arasında), $\delta^{34}\text{S}$ değerleri -50 ile +50 ‰ arasında değişen geniş bir aralıkta yer alır (Krouse ve Mayer 2000; Izbicki vd., 2005). Sulardaki sülfatın kaynağı da oldukça değişkendir. Çeşitli sülfat minerallerin çözünmesi, sülfid minerallerin oksitlenmesi ve organik aktivite en önemli sülfat girdileridir.

Sularda çözünmüş sülfatta ölçülen $\delta^{34}\text{S}$ değerleri (sadece Polatlı örnekleri için) -9.2 ‰'den +19.5 ‰'e (VCDT) kadar geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. Sülfata ait $\delta^{18}\text{O}$ oranları ise 3.66 ‰ ile 14.99 ‰ (VSMOW) arasındadır (Şekil 6; Çizelge 3). Sulardaki kükürt sülfat minerallerinin çözünmesi, sülfid minerallerinin oksitlenmesi ve biyolojik faaliyetler başta olmak üzere birçok kaynaktan türeyebilir. Bazı örneklerle ait yüksek $\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4) değerleri (PSO-1, PÇK-1 ve PGS-2) denizel evaporitlerden (10-35 ‰; Clark ve Fritz, 1997) katılımı vurgulamaktadır, ayrıca bu örneklerin 5.5 g/l'ye kadar ulaşan SO_4 konsantrasyonları da bunu destekler niteliktedir (Çizelge 2). Kükürt

izotop bileşimleri 5 ‰ civarında olan diğer örnekler denizel ve karasal evaporitlerin (-15 ile +10 ‰ arasında; Clark ve Fritz, 1997) karışımını işaret etmektedir. Ancak kükürt ve oksijen izotop değerleri nispeten düşük olan PÖ-1 ve PKH-4 nolu örnekler karasal evaporitlere karşılık gelmektedir (Şekil 6). PÖ-1 nolu örneğin oldukça düşük $\delta^{34}\text{S}$ değeri ise sülfat indirgenme işlevi sonucu ortaya çıkmış olmalıdır. Çelmen ve Çelik (2009), Beypazarı jeotermal sahasındaki suların birçoğundaki kükürdün Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal jipslerden türediğini belirtmiştir. Bir başka çalışmada da (Palmer vd., 2004), Anadolu'daki karasal evaporit çökellerinin $\delta^{34}\text{S}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ (sülfat) bileşimlerinin denizel evaporitler ile oldukça benzer olduğu ve denizel evaporitlerin ve karbonatların çözünmesinin karasal evaporit birimlerinin kimyasını büyük oranda etkilediği belirtilmiştir. Çalışılan bölgede denizel evaporitler bulunmadığından, sülfatın denizel karbonatların yapısına katılması (CAS: carbonate-associated sulfate) sularda kaydedilen denizel kükürt bileşimini açıklamak için en uygun mekanizma gibi görünmektedir (Kampschulte ve Strauss, 2004; Mutlu vd., 2012). Bundan dolayı, denizel evaporit alanına düşen PSO-1, PÇK-1 ve PGS-2 nolu örneklerin $\delta^{34}\text{S}$ değerleri bölgedeki termal suların birçoğu için rezervuar kayası olduğu düşünülen Üst Jura-Alt Kretase Bilecik kireçtaşının kükürt izotop bileşimini yansıtmaktadır.



Şekil 6. İnceleme alanındaki sıcak sular için $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4)$ - $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4)$ diyagramı.
Figure 6. $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4)$ - $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4)$ diagram for thermal waters in the study area.

$\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3)$ ve $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}(\text{CaCO}_3)$ bileşimleri

Topraktaki organik maddenin bozunmasından açığa çıkan CO_2 , karbonatlı kayaların çözünmesi ve ihmal edilebilir boyutta olsa da atmosferik CO_2 suda çözülmüş inorganik karbonun ana kaynaklarıdır. Bu farklı karbon girdilerinin karbon izotop bileşimleri de uç değerler alır. Örneğin, $\delta^{13}\text{C}$ değeri denizel kireçtaşları için -3 ile $+3$ ‰ arasında iken, atmosferik karbondioksit için daha negatiftir (-6 ile -7 ‰ arasında). Organizmaların karbonun hafif izotopunu (^{12}C) kullanmaları neticesinde, organik kaynaklı karbon -50 ‰'ye kadar varabilen aşırı negatif $\delta^{13}\text{C}$ değeri gösterebilir (Clark ve Fritz, 1997).

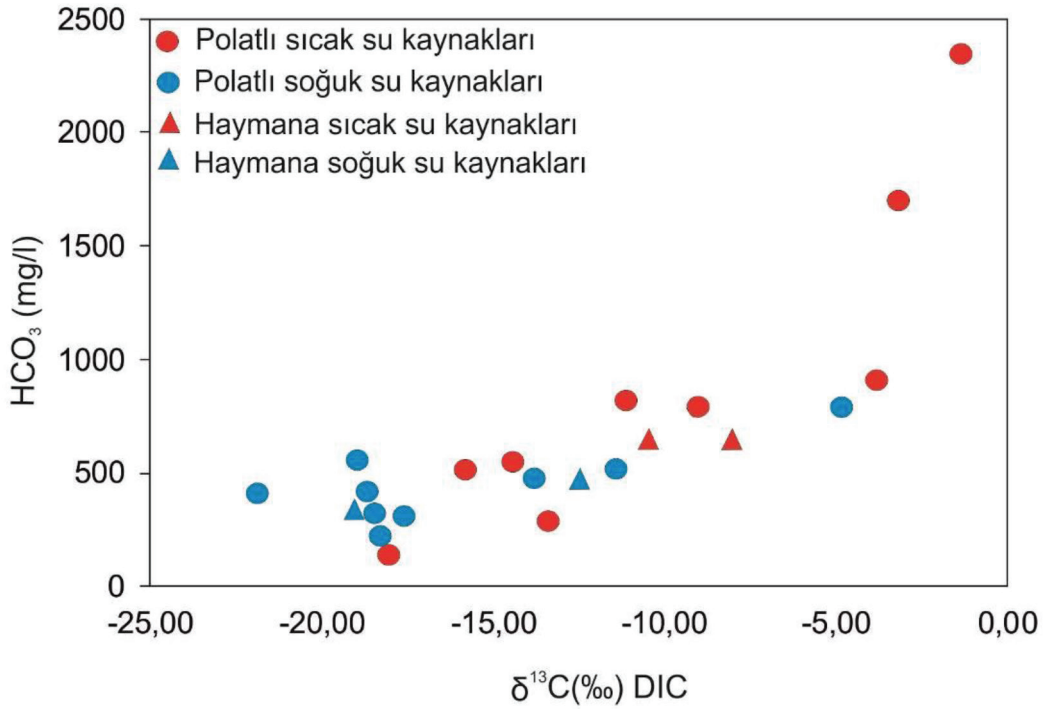
Polatlı ve Haymana sularındaki karbonun kaynağını belirlemek üzere çözülmüş inorganik karbonun (HCO_3) izotop bileşimi ve örnek lokasyonları civarında yüzeyleyen traverten ve kireçtaşlarının karbon ve oksijen izotop bileşimleri incelenmiştir (Çizelge 3). Suda çözülmüş bikarbonatın karbon izotop ($\delta^{13}\text{C}$) değerleri -21.84 ‰'den -1.34 ‰'ye (VPDB) kadar değişmektedir. $\delta^{13}\text{C}$ değerleri sıcaklıkta önemli derecede değişirse de, sıcak sular için ölçülen değerler soğuk sulara göre genellikle daha yüksektir.

Polatlı bölgesinden toplanan PÇK-1 (-3.83 ‰), PM-1 (-1.34 ‰), PKH-1 (-4.81 ‰) ve PSS-2 (-3.16 ‰) nolu

örneklerin karbon izotop değerleri denizel kireçtaşları (-3 ile $+3$ ‰ arasında) ile örtüşmektedir. Diğer soğuk ve sıcak su örneklerinin $\delta^{13}\text{C}$ değerleri -21.84 ‰ ile -8.02 ‰ arasında olup atmosferik değerden (-7 ‰) nispeten düşüktür. Oldukça negatif olan bu değerler, çözülmüş inorganik karbonun hafif izotop (^{12}C) bolluğunu yükselten biyolojik süreçlerle ilişkili olmalıdır.

Polatlı ve Haymana sularının karbon izotop ($\delta^{13}\text{C}$) değerleri ile HCO_3 konsantrasyonları arasında az da olsa belirgin pozitif bir ilişki söz konusudur (Şekil 7). Suların kireçtaşları ile etkileşimi sonucu karbonat çözülmüş ve sulardaki bikarbonat konsantrasyonu ve dolayısıyla $\delta^{13}\text{C}$ değeri artmıştır. Bölgedeki en önemli rezervuar kayacı olan Bilecik kireçtaşlarının karbon izotop değerleri de bu durumu destekler niteliktedir (Çizelge 3).

Kireçtaşlarında ölçülen $\delta^{13}\text{C}$ $+2.66$ ile $+6.80$ ‰ (VPDB) arasındadır. Buna karşın travertenlerden elde edilen $\delta^{13}\text{C}$ değerleri daha düşük bir aralıktadır (-0.79 ile $+3.24$ ‰ VPDB). Oksijen izotop değerleri, kireçtaşlarında -0.77 ile -7.83 ‰ (VPDB) ve travertenlerde ise -4.71 ile -11.05 ‰ (VPDB) arasında değişmektedir (Çizelge 3). Oksijen ve karbon izotop değerlerinin kireçtaşlarında daha yüksek olması, çökelmenin düşük sıcaklıkta gerçekleştiğini ve su ile karbonat minerali arasındaki izotop bölünmesinin



Şekil 7. Haymana-Polatlı suları için $\delta^{13}\text{C}$ (DIC)- HCO_3 (mg/l) grafiği.
Figure 7. $\delta^{13}\text{C}$ (DIC)- HCO_3 (mg/l) graphic for Haymana-Polatlı waters.

daha fazla olduğunu işaret etmektedir (Friedman ve O'Neil, 1977).

Sr izotop ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) bileşimleri

Sr gibi radyojenik izotoplar suların etkileşime girdikleri kayaçların izotop bileşimini belirlemede oldukça kullanışlıdır. Ayrıca, majör ve iz elementlerin aksine, radyojenik izotoplar ikincil süreçlerden daha az etkilermeleri dolayısıyla su-kayaç etkileşiminin irdelenmesinde duraylı izotoplara üstünlük sağlarlar. Sr'un radyojenik olan ^{87}Sr izotopu ^{87}Rb 'un bozunması sonucu ortaya çıkar ve jeolojik zaman içinde bolluğu artar (Faure, 1986). Sr izotop değeri $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranı şeklinde ifade edilir.

Polatlı ve Haymana sularındaki $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ değerleri 0.705883'den 0.707896'a kadar dar bir aralıkta değişmektedir. Bu bölgelerden toplanan granit, kireçtaşı, andezit ve travertenlerin Sr izotop bileşimleri ise 0.706119 ile 0.708831 arasındadır (Çizelge 4). PGS-2 nolu Girmeç sıcak su örneği (0.705883) ve bu kaynak çevresindeki kayaçlar (GA-1 nolu andezit ve GT-1 nolu traverten örnekleri) oldukça benzer $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ değerlerine (0.706119 ve 0.706157) sahip olup radyojenik Sr bakımından nispeten tüketilmiş

(düşük $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları). Buna karşın Çağlayık civarında yüzeyleyen Beypazarı graniti (GR-1 nolu örnek: 0.708831) ile sıcak su örneği (PÇK-1: 0.707896) ise radyojenik Sr'ca nispeten zengindirler (yüksek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları). Bu bulgular Çağlayık sularındaki Sr'un kaynağının Beypazarı graniti olduğunu göstermektedir.

TARTIŞMA

Jeotermometre Hesaplamaları

Polatlı ve Haymana sularının rezervuar sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla çeşitli jeotermometreler ve mineral-denge modelleri kullanılmıştır. Giggenbach (1988) tarafından önerilen Na-K-Mg üçgen diyagramında (Şekil 8), Haymana örneklerinin tamamen Mg köşesine yakın bir alanda yoğunlaştıkları ancak Polatlı örneklerinin bir kısmının Mg köşesinden uzak bulunmalarına rağmen "olgun olmayan sular" alanında yer aldıkları görülmektedir. Bu durum rezervuar sıcaklıklarının hesaplanması için katyon jeotermometrelerinin uygun olmadığına işaret etmektedir. Bu nedenle, örneklerin rezervuar sıcaklıklarının belirlenmesinde silika jeotermometreleri kullanılmıştır.

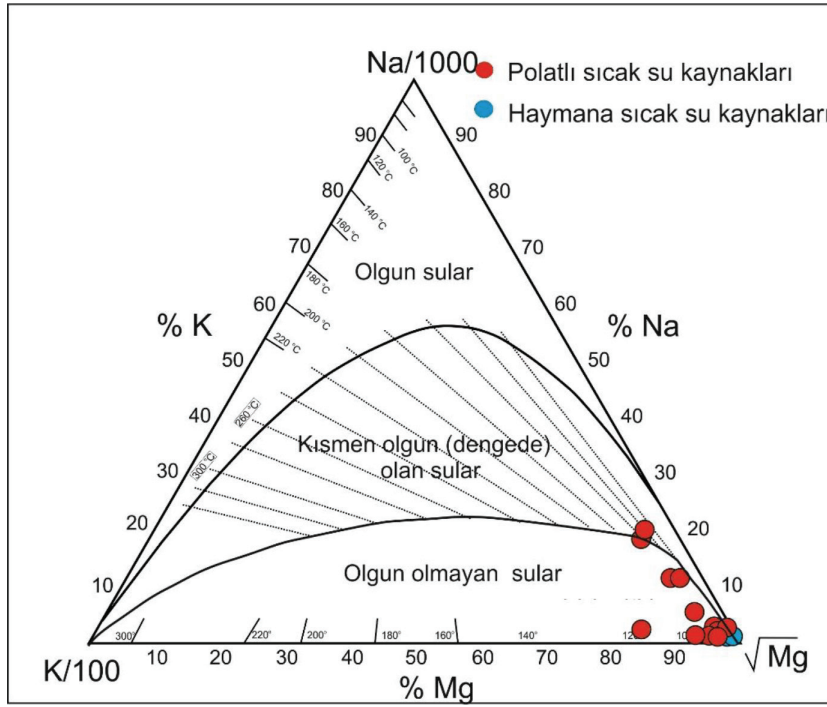
Çizelge 4. Çalışılan sular ve çeşitli kayaların $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları. Sıcak sular koyu ve italik yazıtı ile gösterilmiştir. Table 4. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of waters and various rocks. Thermal waters are shown in dark and italic.

Sular			Kayaçlar		
Örnek No	Sr (mg/l)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Örnek No	Alan / Kayaç türü	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
<i>PSO-1</i>	1.0	0.707133 ± 14	SK-1	Sarıoba / Kireçtaşı	0.707262 ± 14
<i>PSO-2</i>	0.87	0.707154 ± 08	E-1	Çağlayık / Jips	0.707984 ± 05
PSO-3	0.2	0.707622 ± 12	ÇT	Çağlayık / Traverten	0.707075 ± 18
<i>PÇK-1</i>	0.87	0.707896 ± 04	GR-1	Çağlayık / Granit	0.708831 ± 08
PAS-1	0.53	0.707109 ± 08	YK-1	Karahamzalı / Kireçtaşı	0.707712 ± 14
<i>PM-1</i>	3.73	0.707381 ± 05	PKH-2	Karahamzalı / Trav. (güncel)	0.707826 ± 19
PGS-1	0.9	0.707111 ± 04	KHT-1	Karahamzalı / Trav. (eski)	0.707608 ± 16
<i>PGS-2</i>	0.043	0.705883 ± 08	GA-1	Girmeç / Andezit	0.706119 ± 11
PKH-1	1.48	0.707642 ± 13	GT-1	Girmeç / Traverten	0.706157 ± 14
<i>PKH-2</i>	1.4	0.707681 ± 15	BK-1	Malıköy / Bilecik Kireçtaşı	0.707641 ± 07
PKH-3	1.2	0.707721 ± 07	KK-1	Malıköy / Kapıkaya Kireçtaşı	0.707517 ± 13
<i>PKH-4</i>	1.47	0.707729 ± 08	MA-L	Malıköy / Traverten	0.707406 ± 08
<i>PKH-5</i>	1.59	0.707689 ± 07	PSS-2	Sabanca / Traverten	0.707841 ± 04
<i>PÖ-1</i>	1.6	0.707608 ± 12	HK-1	Haymana / Kireçtaşı	0.707276 ± 14
<i>PÖ-2</i>	0.86	0.707893 ± 05	HT-1	Haymana / Traverten	0.707401 ± 20
PSS-1	3.4	0.707510 ± 09			
<i>PSS-2</i>	3.94	0.707843 ± 09			
PSS-3	3.2	0.707827 ± 08			
<i>HMK-1</i>	1.23	0.707279 ± 14			
<i>HMK-2</i>	1.28	0.707373 ± 08			
HMK-3	1.97	0.707392 ± 12			
HMK-4	0.71	0.707417 ± 06			

Fournier (1973)'e ait kuvars (buhar kayıpsız) jeotermometresi ile Polatlı örnekleri için 48-117°C, Haymana örnekleri için ise 72°C sıcaklık değeri hesaplanmıştır (Çizelge 5). Fournier ve Potter (1982) tarafından geliştirilen kuvars jeotermometresi de her iki sahaya ait örnekler için benzer sıcaklıklar öngörmüştür. Fournier (1977)'nin kalsedon jeotermometresi Polatlı (15-88 °C) ve Haymana (40°C) örnekleri için daha

düşük sıcaklıklar vermiştir. 180°C'nin altındaki sıcaklıklarda silika doygunluğunun kuvars yerine kalsedon tarafından kontrol edildiği göz önüne alındığında (Fournier, 1991), kalsedon jeotermometresi ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları daha gerçekçidir.

Llyod (1968) ve Mizutani ve Rafter (1969)'a ait $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ oksijen izotop jeotermometreleri (sadece Polatlı sahası için) ile bulunan sıcaklıklar (33-138°C; Çizelge



Şekil 8. Sıcak sular için Na-K-Mg üçgen diyagramı (Giggenbach, 1988).

Figure 8. Na-K-Mg triangular diagram for thermal waters (Giggenbach, 1988).

5), iki örnek dışında, silika jeotermometrelerinden elde edilen değerlerden yüksektir. Düşük sıcaklıklı jeotermal sistemlerde yaygın olarak rastlanılan bu durum, su ve sülfat arasındaki izotopik dengenin yavaş gerçekleşmesi veya jeotermal suların sülfat içeren sığ sularla karışması neticesinde $\delta^{18}\text{O}$ değerinin değişmesi ile açıklanmaktadır (Nutti, 1991; Clark ve Fritz, 1997; Grasby vd., 2000; Mutlu vd., 2012).

Sonuç olarak, kalsedon jeotermometresi ile örneklerin debi sıcaklıklarından daha yüksek olarak hesaplanan sıcaklıkların (40 °C ile 88 °C arasında) Polatlı ve Haymana sularının rezervuar sıcaklıklarını temsil ettikleri düşünülmektedir.

Mineral Doymunluk Hesaplamaları

Doymunluk indeksi hesaplamaları çeşitli sıcaklıktaki doğal sulardan çökmesi, muhtemel minerallerin belirlenmesine olanak tanır. Söz konusu modellemede, akışkan bileşimi kullanılarak çökebilecek minerallerin denge durumu incelenir (Mutlu, 1998; Tarcan, 2005). Herhangi bir mineral belirli bir sıcaklıkta denge durumuna yakınlık gösteriyorsa (doymunluk indeksi (DI) = 1), akışkanın bu mineral ile dengede olduğu

kabul edilir. Hesaplanan doymunluk indeksi <1 veya >1 ise akışkanın söz konusu minerale göre sırasıyla doymun olmadığı ve aşırı doymun olduğu ortaya çıkar.

Polatlı ve Haymana sıcak sularının sahada ölçülen sıcaklıkları esas alınarak doymunluk durumları incelenmiştir. Hesaplamalarda PhreeQC programı (Parkhurst ve Appelo, 2013) kullanılarak doymunluk indeksleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir. Örneklerin büyük bir kısmı, yüksek bikarbonat içerikleri nedeniyle, karbonat minerallerine (aragonit, kalsit ve dolomit) göre hafifçe doymunluk üstü bir yönelim gösterirler (Çizelge 6'daki koyu ve italik olarak verilen değerler). Bu bulgu Polatlı ve Haymana sularında karbonat kabuklaşmasına işaret etmektedir. Karbonatların aksine, PÖ-2 nolu örnek dışında, sular sülfat minerallerine (jips ve anhidrit) göre doymun değildir. Anhidritin çözünürlüğü jipse oranla daha yüksek olması nedeniyle örneklerin doymunluk indeksleri anhidrit için daha düşüktür.

PKH-2 ve PGS-2 kaynak suları dışında tüm sular kuvarsa doymundur. Buna karşın örneklerin ancak yarıya yakını kalsedon ile dengededir. Silikat minerallerini temsilen seçilen K-feldispat ise PKH-2 ve PGS-2 nolu örnekler dışındaki tüm sularda doymundur.

Çizelge 5. Kimyasal ve izotopik jeotermometre sonuçları (°C).
Table 5. Results of chemical and isotopic geothermometers (°C).

Örnek No	Çıkış sıcaklığı	Kuvars (Buhar Kayıpsız) ^a	Kuvars ^b	Kalsedon ^c	SO ₄ -H ₂ O ^d	SO ₄ -H ₂ O ^e
PSO-1	32.4	63	64	31	72	60
PSO-2	30.3	63	64	31	-	-
PÇK-1	37.1	117	117	88	50	38
PM-1	24.5	79	80	48	107	106
PGS-2	29.2	83	84	52	45	33
PKH-2	25.9	57	57	25	116	106
PKH-4	29.9	57	57	25	135	127
PKH-5	28.6	53	53	21	-	-
PÖ-1	21.2	48	47	15	146	138
PÖ-2	31.0	63	64	31	92	81
PSS-2	24.0	86	86	55	-	-
HMK-1	42.6	72	72	40	-	-
HMK-2	40.1	72	72	40	-	-

^aFournier (1973), ^bFournier ve Potter (1982), ^cFournier (1977), ^dLlyod (1968),
^eMizutani ve Rafter (1969).

Çizelge 6. Sıcak suların mineral doygunluk indisi (SI) değerleri.
Table 6. Mineral saturation indexes (SI) of thermal waters.

Örnek No	Aragonit	Kalsit	Dolomit	Jips	Anhidrit	Kalsedon	Kuvars	K-Feld.
PKH-2	0.37	0.51	0.58	-1.52	-2.15	0.01	-0.43	-0.35
PKH-4	0.10	0.24	0.02	-1.96	-2.16	-0.05	0.36	0.35
PKH-5	0.13	0.28	0.32	-1.52	-1.73	-0.09	0.33	0.42
PÖ-1	0.65	0.78	1.68	-1.31	-1.44	-	-	-
PÖ-2	2.69	2.82	5.49	0.69	-0.52	-1.91	2.32	9.49
PSS-2	1.12	1.27	2.34	-3.08	-3.30	0.34	0.77	2.38
HMK-1	0.09	0.23	0.40	-2.72	-2.84	-0.02	0.36	0.16
HMK-2	-0.02	0.11	0.15	-2.61	-2.75	0.01	0.40	0.30
PÇK-1	0.10	0.23	0.50	-0.11	-0.26	0.49	0.88	2.55
PGS-2	0.23	0.37	0.88	-3.17	-3.38	-0.75	-0.34	-2.30
PM-1	0.23	0.37	0.81	-0.98	-1.20	0.27	0.70	1.13
PSO-1	0.00	0.14	0.13	-1.35	-1.54	0.01	0.41	0.82
PSO-2	0.03	0.17	0.18	-1.37	-1.57	0.03	0.45	0.86

Koyu ve italik olarak gösterilen değerler aşırı doygunluğu göstermektedir.

Akışkan Kaynağı

Polatlı ve Haymana bölgelerinde çökelen travertenlerin $\delta^{13}\text{C}$ değerleri -0.79‰ ile $+3.24\text{‰}$ (VPDB) arasındadır. Oksijen izotop değerleri ise -4.71 'den -11.05‰ 'e (VPDB) kadar değişmektedir (Çizelge 3). Özellikle karbon izotop değerleri traverten örneklerinin çökmesinde organik katkının oldukça baskın olduğunu işaret etmektedir. Sularda ölçülen $\delta^{13}\text{C}$ oranları ise -21.84‰ ile -1.34‰ (VPDB) arasında olup travertenlere göre oldukça düşüktür. Traverten örneklerde belirgin şekilde pozitif olan $\delta^{13}\text{C}$ değerleri muhtemelen hızlı CO_2 gaz salınımının tercihli şekilde ^{12}C kaybına yol açtığı akışkanlardan çökme ile açıklanabilir (Liu vd., 2003; Uysal vd., 2007). Bu süreçte denge dışı izotop bölümlenmesi gerçekleşmiştir. Temel kayaçların termometamorfik dekarbonizasyona maruz kalması ile ortaya çıkan izotopik olarak ağır CO_2 gazı travertenlerdeki $\delta^{13}\text{C}$ değerlerinin yükselmesine neden olmuştur (Özkul vd., 2014).

Karbon izotoplarının aksine, oksijen izotop bileşimleri minerallerin çökeldikleri akışkanın kökeni ve sıcaklık değerlerinin belirlenmesine olanak tanır. Bu kapsamda, incelenen travertenlerin $\delta^{18}\text{O}$ değerleri paleosıcaklıkların hesaplanmasında ve yağmur suyu (meteorik su) izotop bileşiminin ortaya konmasında oldukça faydalıdır. Bölgeden alınan traverten örnekleri, uzun dönem su-kayaç etkileşiminin izlerini sunmaktadır.

Kalsit (traverten) $\delta^{18}\text{O}$ değerleri çökeldikleri akışkanın sıcaklık veya $\delta^{18}\text{O}$ bileşiminin (VSMOW) hesaplanmasında kullanılabilir. Friedman ve O'Neil (1977)'in önerdiği eşitlikten (1) sıcaklık (T, Kelvin olarak) veya $\delta^{18}\text{O}_{\text{akışkan}}$ hesaplanabilir. Ancak bu bilinmeyenlerden herhangi biri bulunurken diğeri için makul bir değer atamak gereklidir.

$$1000 \ln \alpha_{\text{Traverten-Akışkan}} = \frac{2.78 \times 10^6}{T^2} - 2.89 \quad (1)$$

$$1000 \ln \alpha_{\text{Traverten-Akışkan}} = \frac{2.78 \times 10^6}{T^2} - 2.89$$

Burada;

α = iki faz arasındaki izotop bölümlenme sabiti:

$$\alpha_{\text{Traverten-Akışkan}} = \frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{Traverten}} + 1000}{\delta^{18}\text{O}_{\text{Akışkan}} + 1000} \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{Traverten-Akışkan}} = \frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{Traverten}} + 1000}{\delta^{18}\text{O}_{\text{Akışkan}} + 1000}$$

$$1000 \ln \alpha_{\text{Traverten-Akışkan}} \approx \delta^{18}\text{O}_{\text{Traverten}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{Akışkan}} \quad (3)$$

$$1000 \ln \alpha_{\text{Traverten-Akışkan}} \approx \delta^{18}\text{O}_{\text{Traverten}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{Akışkan}}$$

Söz konusu model kullanılarak travertenleri çökeltten akışkanların $\delta^{18}\text{O}$ değerleri tahmin edilmiştir (Çizelge 7). Hesaplamalarda akışkan sıcaklığı olarak travertenlerin çökeldikleri noktadaki termal suların sıcaklığı esas alınmıştır. Çizelge 7'den görüldüğü üzere, travertenleri çökeltten paleoakışkanların (meteorik suların) $\delta^{18}\text{O}$ bileşimleri -1.50 ile -6.76‰ (VSMOW) arasında bulunmuştur. Bu değerler güncel suların oksijen izotop oranlarından 4.9 – 10.1‰ kadar yüksektir. Her ne kadar travertenlerin oluşum tarihleri bilinmese de, elde edilen sonuçlar, travertenlerin çökeldikleri dönem(ler)de soğuk iklim koşullarının hüküm sürdüğüne işaret etmektedir. Ayrıca, ^{18}O 'ce zengin temel kayaçlarla etkileşime giren meteorik suların katkısı da göz ardı edilemez.

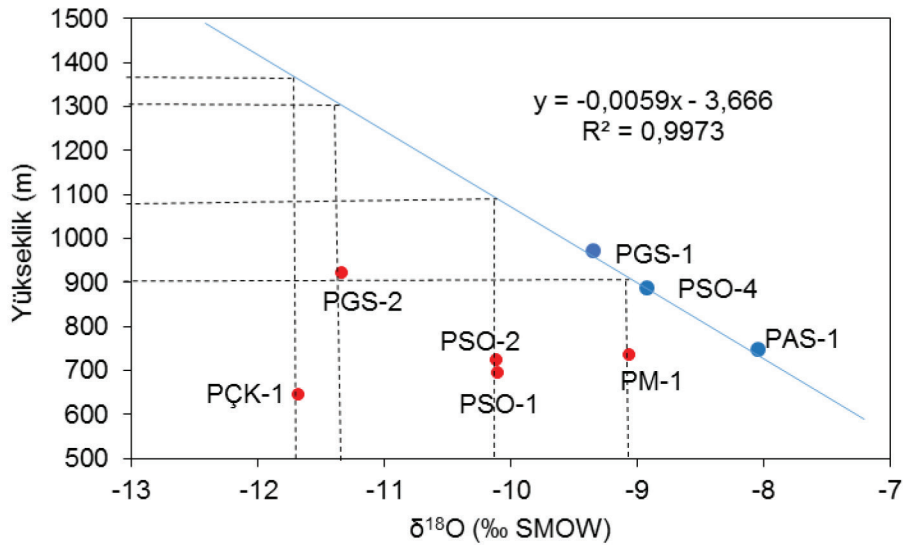
Beslenme Yüksekliği ve Dolaşım Derinliğine Yönelik Tahminler

Polatlı bölgesindeki sıcak ve soğuk suların $\delta^{18}\text{O}$ bileşimleri ve örnekleme noktasının rakımı kullanılarak beslenme yükseklikleri tahmin edilmiştir. Sarıoba, Çağlayık ve Malıköy soğuk sularını (PSO-3, PSO-4, PAS-1 ve PGS-1) kesen karışım doğrusuna sıcak suların (PSO-1, PSO-2, PGS-2, PM-1 ve PÇK-1) $\delta^{18}\text{O}$ değerleri karşılaştırılarak okunan yükseklikler 900 – 1400 m arasına karşılık gelmektedir (Şekil 9). Bu alanlarda metamorfik kayaçlar, Bilecik kireçtaşı, Hançili formasyonunun kiltası, kireçtaşı ve killi kireçtaşı seviyeleri yüzeylenir.

Suların sığ veya derin dolaşımını olduğunu gösteren belirteçlerden biri de trityum içerikleridir. Diğer iyonlara göre nispeten korunumlu davranan Cl iyonu ile ^3H konsantrasyonlarının karşılaştırıldığı Şekil 10'da, sıcak ve soğuk suların iki ayrı alanda yoğunlaştıkları görülmektedir. Yüksek trityum (2 – 5 TU) ve düşük Cl bileşimleri (ortalama 31 mg/l) ile soğuk sular diyagramın sol üst bölümünde yer alırken, düşük trityum (0 – 3 TU) ve nispeten yüksek Cl konsantrasyonları (ortalama 270 mg/l) ile sıcak sular diyagramın sol ve sağ alt bölümlerinde öbekleşmiştir. Evaporit birimlerini yıkayarak yüzeye ulaşan ve oldukça yüksek TDS içeriğine sahip (Çizelge 1) PÇK-1 nolu örnek hariç tutulursa, PM-1 nolu örnek muhtemelen bölgedeki derin su dolaşımını temsil etmektedir. Her ne kadar Cl içerikleri göreceli yüksek olsa da, Sarıoba kaynaklarının

Çizelge 7. Travertenleri çökelten akışkanların $\delta^{18}\text{O}$ bileşimleri.Table 7. $\delta^{18}\text{O}$ composition of fluids which precipitate travertines.

Örnek no.	T (°C)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Trav}}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Trav}}$ (VSMOW)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Akış}}$ (VSMOW)
PÇK-1	37.1	-11.05	19.52	-6.50
PGS-2	29.2	-4.71	26.05	-1.50
PKH-2	25.9	-8.83	21.81	-6.42
PKH-4	29.9	-9.95	20.65	-6.76
PSS-2	24.0	-7.97	22.69	-5.94
HMK-3	42.6	-9.87	20.73	-4.29

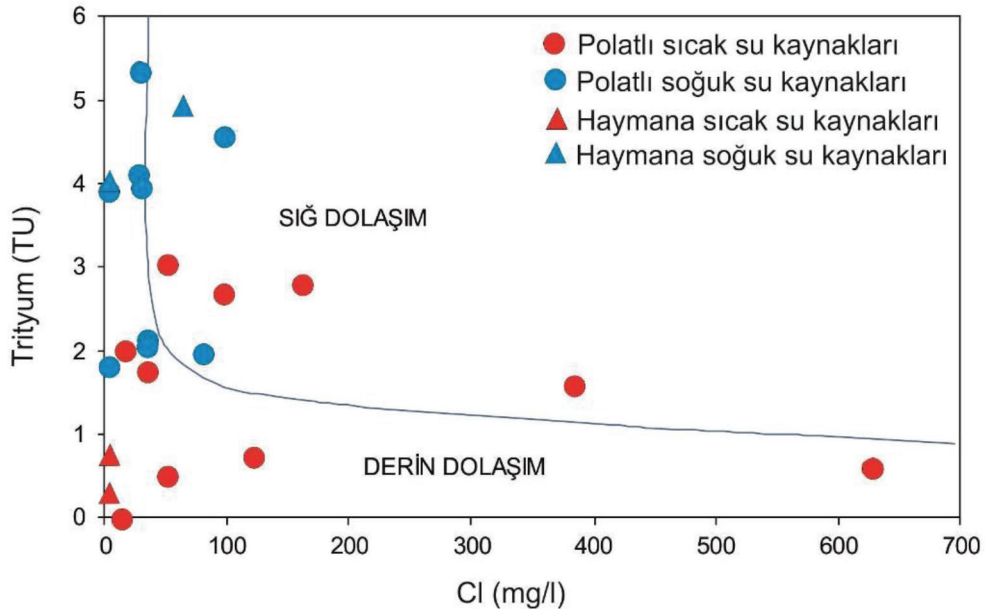
Şekil 9. Sarıoba-Çağlayık-Malıköy sahaları için $\delta^{18}\text{O}$ -yükseklik ilişkisi.Figure 9. $\delta^{18}\text{O}$ -elevation relation for Sarıoba-Çağlayık-Malıköy fields.

(PSO-1 ve PSO-2) soğuk su karışımı nedeniyle siğ dolaşımı oldukları söylenebilir.

Sr'un Kaynağı

Sr'un yük ve iyonik yarıçap açısından Ca'a yakınlık göstermesi nedeniyle, Sr konsantrasyonu Ca-içeren minerallerde (kalsit, jips ve plajiyoklaz gibi) yüksektir. Beklendiği üzere su örneklerindeki Sr ve Ca konsantrasyonları arasında mükemmel olmasa da pozitif bir ilişki mevcuttur. Benzer bir birliktelik 1/Sr (mg/l) – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diyagramında da söz konusudur (Şekil 11). Sıcak sulara ait Sr konsantrasyonları arttıkça

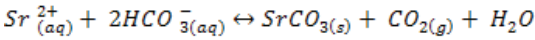
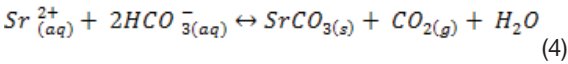
radyojenik Sr bolluğu da artmaktadır. Çoğu Polatlı örneğinde kaydedilen yüksek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları bu suların nispeten yaşlı kayalarla etkileşime girdiklerine işaret etmektedir. Çağlayık alanından toplanan granit örneği (GR-1: 0.708831) ve su kaynağının (PÇK-1: 0.707896) Sr izotop bileşimleri oldukça benzerdir. Bununla birlikte, Girmeç sahasından alınan andezit (GA-1: 0.706119) ve sıcak su (PGS-2: 0.705883) örneklerinin $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları tüm veri seti içindeki en düşük değerlerdir. Haymana bölgesindeki kireçtaşı ve travertenler (0.707276-0.707401) ile sıcak su örneklerinin (0.707279-0.707417) Sr izotop değerleri örtüşmektedir (Çizelge 4).



Şekil 10. İnceleme alanındaki sulara ait ^3H -Cl grafiği.
Figure 10. ^3H -Cl graphic for studied waters.

PM-1 ve PSS-2 dışındaki diğer örneklerin HCO_3^- ve $\text{Ca}+\text{Mg}$ konsantrasyonları arasında pozitif bir ilişkinin gözlenmesi ($R^2 = 0.73$) sulardaki HCO_3^- ve $\text{Ca}+\text{Mg}$ iyonlarının ortak bir kaynaktan (büyük olasılıkla kireçtaşlarından) türediklerini göstermektedir.

Kaynama sırasında korunumlu elementlerin konsantrasyonları artmasına karşın (Goff vd., 1991; Marques vd., 2012), CO_2 kaybı nedeniyle Sr konsantrasyonu azalabilir:



Böylece PGS-2 örneğine ait Sr ve HCO_3^- konsantrasyonları yeraltında gerçekleşen muhtemel bir kaynama süreci ile açıklanabilir (Çizelge 2).

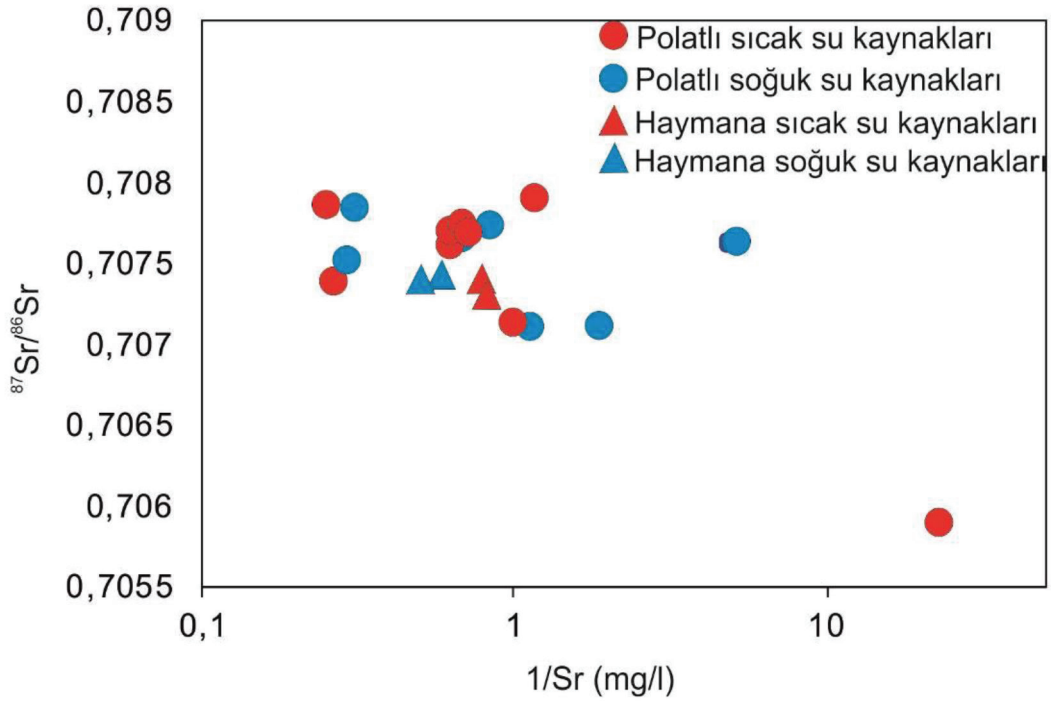
SONUÇLAR

Polatlı ve Haymana su kaynakları düşük sıcaklıklı olup (21 – 43°C) genellikle Ca-Na-HCO_3 , $\text{Na-SO}_4\text{-Cl}$ ve Na-Mg-HCO_3 su tipleri sergiler. Tümü meteorik kökenli olan sular geniş bir aralıkta değişen döteryum fazlalığı değerleri ile yüksek nemli koşulları yansıtmaktadır. Sıcak sular için ölçülen trityum değerlerinin soğuk sulara göre nispeten düşük olması yeraltında derin bir dolaşımı vurgulamaktadır. Çözünmüş sülfatta ölçülen

$\delta^{34}\text{S}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ değerleri kükürdün denizel veya karasal evaporitlerden çözünmesine işaret eder. İnorganik karbonata (HCO_3^-) ait izotop değerleri ($\delta^{13}\text{C}$) Polatlı ve Haymana sularındaki karbonun denizel kireçtaşlarının yanı sıra organik işlevlerden de kaynaklanabileceğini göstermiştir. Sıcak suların ve bölgedeki olası rezervuar kayalardan (granit, kireçtaşı, andezit ve traverten gibi) elde edilen Sr izotop oranları ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) sırasıyla 0.705883–0.707896 ve 0.706119–0.708831 arasında değişmektedir. Bu değerlerdeki örtüşme, Sr'un basit çözünme yoluyla kayalardan sulara geçtiğini belirtmektedir. Mineral doygunluk modelleri Polatlı-Haymana sıcak sularının karbonat ve silika minerallerine göre doymuş ancak sülfat minerallerine göre ise doymuş olmadıklarını göstermiştir. Kuvars ve kalsedon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları 48–117°C ve 15–88°C arasında değerler vermiştir. $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ oksijen izotop jeotermometresi ise silika jeotermometrelerinden elde edilen değerlerden daha yüksek sıcaklık öngörmüştür (138°C). Bu durum, su ve sülfat arasındaki oksijen izotopik dengesinin yavaş sürmesi veya jeotermal suların sülfat içeren sığ sularla karışması ile açıklanmıştır.

Katkı Belirtme

Bu çalışma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeler Koordinatörlüğü (proje no. 15L0443008)



Şekil 11. İnceleme alanındaki sıcak ve soğuk sular için $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -1/Sr diyagramı.
Figure 11. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -1/Sr diagram for thermal and cold waters.

tarafından desteklenmiştir. Çalışma aynı zamanda MTA Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen “Ankara Civarı Jeotermal Enerji Aramaları” adlı projenin bir parçasını oluşturmaktadır. Yazarlar makaleye katkılarından dolayı Prof. Dr. Gültekin Tarcan ve Prof. Dr. Fatma Gültekin’e teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Açıkgöz, S., Akıllı, H., Kurtuluş, O., ve Hökelekli, E., 2008. Çağlayık (Polatlı/Ankara) Civarının Jeolojisi, Jeofizik Etütleri ve Jeotermal Enerji Olanakları. MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No. 11198, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Akyürek, B., Duru, M., Sütçü, Y.F., Papak, İ., Şaroğlu, F., Pehlivan, N., Gönenç, O., Granit, S., ve Yaşar, T., 1996. Ankara ilinin çevre jeolojisi ve doğal kaynaklar projesi. MTA Genel Müdürlüğü Rapor No. 9961, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Başkan, E., 1972. Haymana (Ankara) kaplıcası hidrojeoloji etüdü. MTA Genel Müdürlüğü Rapor No. 4844, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Bilgin, A.Z., Uğuz, M. F., Sevin, M., Parlak, O., Pekgöz, M., Elibol, H., Erdem, Y., ve Özden, U. A., 2009. Ayaş-Temelli-Polatlı (Ankara) dolayının jeolojisi (Ankara İ28 paftası). MTA Genel Müdürlüğü Rapor No: 11215, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Bilgin, A. Z., Uğuz, M. F., Sevin, M., ve Erdem, Y., 2010. Haymana ve Yenimehmetli (Ankara) güneyinin jeolojisi (Ankara-J29 Paftası-Kışmen). MTA Genel Müdürlüğü Rapor No. 11318, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Bülbül, E., Lezgi, A., Çam, D., ve İldeş, L., 2015. Ankara Polatlı Belediyesi’ne Ait Ankara-Polatlı 06/2011/151 No.lu Karacaahmet-Çağlayık ve 06/2011/160 No.lu Karahamzalı jeotermal kaynak arama ruhsat sahaları jeoloji ve jeofizik etüt raporu. MTA Genel Müdürlüğü Rapor No. 11829, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Bülbül, E., 2017. Kişisel görüşme. MTA Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Clark, I., and Fritz, P., 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New York, 328 s.
- Coplen, T.B., Herczeg, A.L. and C Barnes, 2000. Isotope Engineering, Using Stable Isotopes

- of the Water Molecule to Solve Practical Problems, Environmental Tracers in Sub-surface Hydrology (editors. P.G. Cook and A. L. Herczeg), Kluwer Academic Publishers, Australia, 529p.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1833-1834.
- Çelmen, O., and Çelik, M., 2009. Hydrochemistry and environmental isotope study of the geothermal water around Beypazarı granitoids, Ankara, Turkey. *Environmental Geology*, 58, 1689-1701.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- Dotsika, E., Poutoukis, D., Kloppmann, W., Guerrot, C., Voutsas, D., and Kouimtzis, T.H., 2010. The use of O, H, B, Sr and S isotopes for tracing the origin of dissolved boron in groundwater in Central Macedonia, Greece. *Applied Geochemistry*, 25, 1783-1796.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Türkecan, A., Evcimen, Ö., Atakay, E., ve Görmüş, T., 2009. Ankara ve yakın çevresinin Tersiyer volkanitleri. MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No. 11164, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Esat, K., Kaypak, B., Işık, V., Ecevitöğlü, B., and Seyitoğlu, G., 2016. The Ilica Branch of the Southeastern Eskişehir Fault Zone: An Active Right lateral Strike-Slip Structure in Central Anatolia, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 152, 25-37.
- Faure, G., 1986. *Principles of Isotope Geology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Singapore, 589 s.
- Fishman, M.J., and Friedman, L.C., 1989. *Methods for Determination of Inorganic Substances in Water and Fluvial Sediments, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, 5, 545 s.
- Fournier, R.O., 1973. Silica in Thermal Waters: Laboratory and Field Investigations. *Proceedings of the International Symposium on Hydrogeochemistry and Biochemistry*, Tokyo, Vol. 1, Clark Co., Washington D.C., 122-139.
- Fournier, R.O., 1977. Chemical Geothermometers and Mixing Models for Geothermal Systems. *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier, R.O., and Potter, R.W., 1982. A Revised and Expanded Silica (Quartz) Geothermometer. *Geoth. Res. Council Bull.*, 11-10, 3-12.
- Fournier, R.O., 1991. Water geothermometers applied to geothermal energy. In: D'Amore, F. (coordinator), *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. UNITAR/UNDP publication, Rome, 37-69.
- Friedmann, I., and O'Neil, J.R., 1977. *Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest*, USGS Numbered Series (report), 440-KK, 11 p.
- Gat, J.R. 1981. Isotopic Fractination, In *Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in Water Cycle*, Technical Report Series 210, IAEA, Vienna, pp.21-34 Comments on the Stable Isotope Method in Regional Groundwater Investigations, , *Water Resources Research*, v.7, pp.980- 993,
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal Solute Equilibria, Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Goff, F., Wollenberg, H.A., Brookins, D.C., Kristler, R.W., 1991. A Sr-isotopic comparison between thermal waters, rocks, and hydrothermal calcites, Long Valley caldera, California *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 48, 265-281.
- Gönenç, O., 1978. Haymana-Polatlı Havzasının Batı Bölgesinin Jeolojisi ve Petrol Olanakları, MTA Genel Müdürlüğü Rapor No. 6396, Ankara (yayınlanmamış, Türkçe).
- Grasby, S.E., Hutcheon, I., and Krouse, H.R., 2000. The influence of water-rock interaction on the chemistry of thermal springs in western Canada. *Applied Geochemistry*, 15, 439-454.
- Güleç, N., 1994. Geochemistry of thermal waters and its relation to the volcanism in the Kızılcahamam (Ankara) area, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 295-312.
- Güleç, N., Mutlu, H., and Hilton, D.R., 2014. Gas geochemistry of Turkish geothermal fluids: HCO₂ systematics in relation to active tectonics and volcanism, *Geothermal Systems and Energy Resources: Turkey and Greece* (Editors: A. Baba, J. Bundschuh and D. Chandrasekharam), *Sustainable Energy Development Series*, CRC Press, Taylor & Francis Group (ISBN 9781138001091) p. 13-23.

- Helvacı, C., ve Bozkurt, S., 1992. Beypazarı (Ankara) granitinin jeolojisi, mineralojisi ve petrojenezi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 37, (2), 31-42.
- Izbicki, J.A., Christensen, A.H., Newhouse, M.W. and Aiken, G.R. 2005. Inorganic, isotopic, and organic composition of high-chloride water from wells in a coastal southern California aquifer. *Applied Geochemistry*, 20, 1496-1517.
- Kampschulte, A., and Strauss, H., 2004. The sulfur isotopic evolution of Phanerozoic seawater based on the analysis of structurally substituted sulfate in carbonates, *Chemical Geology*, 204, 255-286.
- Köksal, S., and Göncüoğlu, M. C., 2008. Sr and Nd isotopic characteristics of some S, I, and A-type granitoids from Central Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 111-127.
- Krouse, H.R. and Mayer, B. 2000. Sulphur and oxygen isotopes in sulphate. In: COOK, P. and HERCZEG, A.L. (eds), *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 95-231.
- Kurttaş, T., 2002, Karışım Sularında Kökensele Katkıların Belirlenmesi, Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu, DSİ Genel Müdürlüğü, Adana.
- Liu, L., Suto, Y., Bignall, G.N., and Hashida, T., 2003. CO₂ injection to granite and sandstone in experimental rock/hot water systems. *Energy Conversion and Management*. 44, (9), 1399-1410.
- Lloyd, R.M., 1968. Oxygen isotope behavior in the sulfate-water system. *Journal of Geophysical Research*, 73 (18), 6099-6110.
- Marques, J.M., Carreira, P.M., Goff, F., Eggenkamp, H.G.M., and Antunes da Silva, M., 2012. Input of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios and Sr geochemical signatures to update knowledge on thermal and mineral waters flow paths in fractured rocks (N-Portugal), *Applied Geochemistry* 27, 1471-1481.
- Mizutani, Y., and Rafter, T.A., 1969. Oxygen isotopic composition of sulfates-3. Oxygen isotopic fractionation in the bisulfate ion-water system. *New Zealand Journal of Science*, 12, 54-59.
- Mook, W.,G. 2001. Environmental isotopes in the hydrological principles and applications, VIENNA.
- 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.
- Mutlu, H., 2007. Constraints on the origin of the Balıkesir thermal waters (Turkey) from stable isotope (d18O, dD, d13C, d34S) and major-trace element compositions, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 13-32.
- Mutlu, H., and Güleç, N., 1998. Hydrogeochemical outline of thermal waters and geothermometry applications in Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 495-515.
- Mutlu, H., Güleç, N., Hilton, D.R., Aydın, H., and Halldórsson, S.A., 2012. Spatial variations in gas and stable isotope compositions of thermal fluids around Lake Van: Implications for crust-mantle dynamics in eastern Turkey. *Chemical Geology*, 300-301, 165-176.
- Mutlu, H., Güleç, N., and Hilton, D.R., 2014. Chemical and isotopic constraints on the origin of thermal waters in Anatolia, Turkey: Fluid-mineral equilibria approach, *Geothermal Systems and Energy Resources: Turkey and Greece* (Editors: A. Baba, J. Bundschuh and D. Chandrasekharam), Sustainable Energy Development Series, CRC Press, Taylor & Francis Group (ISBN 9781138001091) p. 1-11.
- Nuti, S., 1991. Isotope techniques in geothermal studies in "Applications of geochemistry in geothermal reservoir development" Franco D'amore (Ed). 215-251.
- Özkul, M., Gökgöz, A., Kele, S., Baykara, M.O., Shen, C.-C., Chang, Y.-W., Kaya, A., Hançer, M., Aratman, C., Akin, T., and Örü, Z., 2014. Sedimentological and geochemical characteristics of a fluvial travertine: a case from the eastern Mediterranean region. *Sedimentology*, 61, 291-318.
- Palmer, M.R., Helvacı, C., and Fallick, A.E., 2004. Sulphur, sulphate oxygen and strontium isotope composition of Cenozoic Turkish evaporates. *Chemical Geology*, 209, 341-356.
- Parkhurst, D. L., and Appelo, C.A.J., 2013. Description of input and examples for PHREEQC

version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p.

- Sayın, M., ve Eyüpoğlu, S. Ö., (2005). Türkiye'deki Yağışların Kararlı İzotop İçeriklerini Kullanarak Yerel Meteorik Doğruların Belirlenmesi. II. Ulusal Hidrojeolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, İzmir, 323-345.
- Tarcan, G., 2005. Mineral saturation and scaling tendencies of waters discharged from wells (> 150 degrees C) in geothermal areas of Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 142, 263-283.
- Uysal, I.T., Feng, Y., Zhao, J.-X., Altunel, E., Weatherley, D., Karabacak, V., Cengiz, O., Golding, S.D., Lawrance, M.G., and Collerson, K.D., 2007. U-series dating and geochemical tracing of late Quaternary travertine in coseismic fissures. *Earth and Planetary Science Letters*, 257, 450-462.

Ünalın, G., Yüksel, V., Tekeli, T., Gönenç, O., Şimşek, Z., ve Hüseyin, S., 1976. Haymana-Polatlı Yöresinin (Güneybatı Ankara) Üst Kretase-Alt Tersiyer Stratigrafisi ve Paleocoğrafik Evrimi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, c. 19, 159-176.

Vengosh, A., Helvacı, C., and Karamanderesi, İ.H., 2002. Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey. *Applied Geochemistry*, 17, 163-183.

Zoroğlu, O. ve Kadioğlu, Y.K., 2004. Oymaağaç (Beypazarı - Ankara) granitoidinin jeolojisi ve petrografisi. *Gazi Üniv., F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 299-308.