



## Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Hidrojeokimyası ve Jeotermometre Uygulamaları

Selma DEMER\*<sup>1</sup>, Ümit MEMİŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi, 32200, İsparta

(Alınış Tarihi: 17.04.2015 Kabul Tarihi: 03.07.2015)

### Anahtar Kelimeler

Afyonkarahisar  
Ömer-Gecek  
Gazlıgöl  
Sandıklı  
Heybeli  
Hidrojeokimya  
Jeotermometre.

**Özet:** Afyonkarahisar bölgesindeki jeotermal sahaların sıcaklıkları ve kimyasal bileşimleri birbirinden farklıdır. Ömer-Gecek sahasındaki jeotermal sular Na-Cl-HCO<sub>3</sub> tipli sular, Gazlıgöl sahasındaki jeotermal sular Na-HCO<sub>3</sub> tipli sular, Heybeli sahasındaki jeotermal sular Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> tipli sular, Sandıklı sahasındaki jeotermal sular ise Na-Ca-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> tipli sular olarak sınıflandırılmaktadır. Tüm sahalarda As (Gazlıgöl hariç), B ve F konsantrasyonları önerilen standart değerlerin üzerindedir. Ömer-Gecek jeotermal sularında Na ve Cl değerleri, diğer bölgeler ile kıyaslandığında en yüksektir. Gazlıgöl bölgesinde ise diğer bölgelere göre yüksek HCO<sub>3</sub> ve düşük SO<sub>4</sub> değerleri dikkat çekmektedir. Genel olarak Ömer-Gecek jeotermal sularının derin kökenli, Gazlıgöl, Sandıklı ve Heybeli jeotermal sularının sığ kökenli ve yeraltısuyu ile karışmış sular olduğu söylenebilir. Ömer-Gecek bölgesindeki jeotermal sular, kısmi denge bölgesine yakındır. Gazlıgöl, Sandıklı ve Heybeli bölgesindeki jeotermal sular ise denge durumundan oldukça uzak, olgun olmayan sular grubuna girmektedir. Afyonkarahisar bölgesi jeotermal sularına uygulanan kimyasal jeotermometreler arasında kuvars jeotermometreleri daha uygun sonuçlar vermiştir. Bu hesaplamalara göre Ömer-Gecek jeotermal suları 130-147 °C, Gazlıgöl jeotermal suları 104-119 °C, Sandıklı jeotermal suları 100-120 °C ve Heybeli jeotermal suları 74-91 °C arasında değişen rezervuar sıcaklıkları vermiştir.

## Hydrogeochemistry and Geothermometer Applications to Afyonkarahisar Geothermal Fields

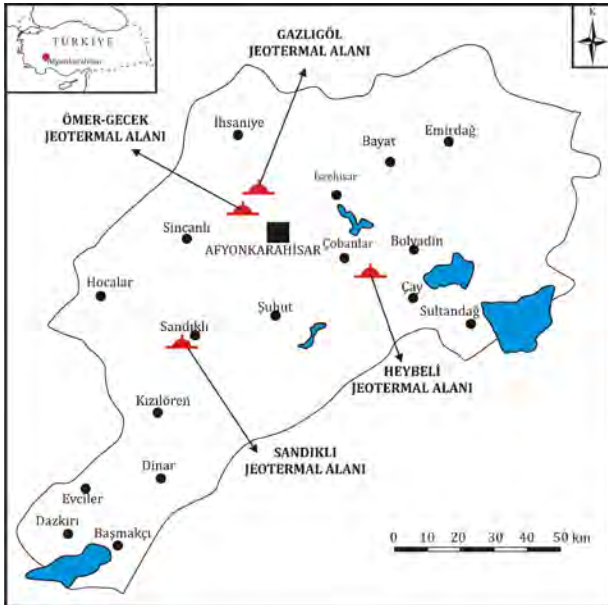
### Keywords

Afyonkarahisar  
Ömer-Gecek  
Gazlıgöl  
Sandıklı  
Heybeli  
Hydrogeochemistry  
Geothermometer.

**Abstract:** The geothermal fields of Afyonkarahisar differ from each other with respect to their temperature and the chemical composition. Ömer-Gecek, Gazlıgöl, Heybeli and Sandıklı geothermal fields are classified as Na-Cl-HCO<sub>3</sub>, Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> and Na-Ca-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> type waters, respectively. The concentrations of As (except Gazlıgöl), B and F in all fields are above the recommended standard values. The Na and Cl concentrations in Ömer-Gecek geothermal waters are the highest compared to other regions. In Comparison with other regions, Gazlıgöl field has high HCO<sub>3</sub> and low SO<sub>4</sub> concentrations. Generally, geothermal waters of Ömer-Gecek are of deep origin, while that of Gazlıgöl, Sandıklı and Heybeli are of shallow origin and mixed with groundwater. The geothermal waters of Ömer-Gecek are close to the partial equilibrium region. Geothermal waters of Gazlıgöl, Sandıklı and Heybeli region plotted in the immature waters field. Among the chemical geothermometers applied to Afyonkarahisar geothermal fields, quartz geothermometers gave the most appropriate result. According to these calculations, Ömer-Gecek, Gazlıgöl, Sandıklı and Heybeli waters have reservoir temperatures ranging between 130-147 °C, 104-119 °C, 100-120 °C and 74-91 °C, respectively.

## 1. Giriş

Ülkelerin kalkınma ve büyüme hızına bağlı olarak enerji ihtiyaçları da sürekli olarak artmaktadır. Dünyadaki enerji tüketiminin yaklaşık %90'ı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükenmesi, yeni rezervlerin üretiminin oldukça pahalı olması, çevre kirliliği yaratması nedeniyle, alternatif enerji kaynaklarının devreye girmesi zorunlu hale gelmiştir. Jeotermal enerji, düşük karbondioksit emisyon oranı ile hava kirliliği yaratmaması, yenilenebilir olması ve yerli olması nedeniyle önemli bir alternatif enerji kaynağıdır. Jeotermal kaynaklarının bolluğu sebebiyle Afyonkarahisar ili Türkiye'nin en önemli sahalardan biridir. Akkuş vd. (2005)'e göre Afyonkarahisar jeotermal sahalarda (Şekil 1), (i) Ömer-Gecek yöresinde 23 adet, (ii) Gazlıgöl yöresinde 4 adet, (iii) Heybeli yöresinde 8 adet ve (iv) Sandıklı yöresinde 10 adet olmak üzere 45 adet jeotermal amaçlı resmi kuyu açıldığı bilinmektedir. Özel şirketler tarafından sıcak ve soğuk su kuyusu olarak açılan kuyu adedi ise bilinmemektedir (Karamanderesi, 2008). Afyonkarahisar termal turizm, konut ve sera ısıtımında jeotermal enerjiyi verimli kullanan önemli sahalardan biridir. Bu çalışmada Afyonkarahisar ilinde bulunan birbirinden farklı 4 ayrı jeotermal saha bölgenin jeolojisi ile birlikte ele alınmış, güncel analiz verileri yardımıyla hidrojeokimyasal özellikleri belirlenmiştir. Analiz verileri ulusal ve uluslararası standartlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca her sahaya ait çeşitli jeotermometre uygulamaları ile rezervuar sıcaklıkları belirlenmiştir.



Şekil 1. Afyonkarahisar jeotermal sahalarna ait yerburdur haritası

## 2. Materyal ve Metot

Jeotermal araştırmaların da önemli bir kısmını oluşturan hidrojeokimyasal çalışmalar, yeraltısularının kimyasal özelliklerinin ve kalitelerinin

belirlenmesi, kökenlerinin araştırılması, yüzey ve yağış suları ile olası ilişkilerinin incelenmesi vb. araştırmalarda kullanılır. Bu amaçla Ömer-Gecek jeotermal sahasından 3 adet, Gazlıgöl jeotermal sahasından 2 adet, Heybeli jeotermal sahasından 2 adet ve Sandıklı jeotermal sahasından 5 adet olmak üzere toplam 12 adet jeotermal su örneği alınmıştır. Örnek noktaları seçilirken suların fiziksel ve kimyasal özelliklerini yansıtabilecek lokasyonlar seçilmiştir. Örnekler 0,45µm geçirgenliğindeki filtre ile süzülmüştür. Anyon ve katyon analizleri için polipropilen örnek şişeleri kullanılmıştır. Örnek şişelerinden biri katyon örneklerinin korunması amacıyla derişik HNO<sub>3</sub> ilave edilerek asitlendirilmiş, anyon analizi için alınan diğer örnek şişesine ise asit eklenmemiştir. Örnekler şişelendikten ve etiketlendikten sonra +4°C'de muhafaza edilerek laboratuvara getirilmiştir. Arazi çalışmalarında sıcaklık (T), hidrojen iyonu aktivitesi (pH), elektriksel iletkenlik (EC) gibi in-situ ölçümleri taşınabilir cihazlarla ölçülmüş, alkalinite titrimetrik yöntemle belirlenmiştir. Alınan örneklerin hidrojeokimyasal analizleri standart metotlar (APHA-AWWA-WEF, 2005) kullanılarak Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezinde İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ve İyon Kromatografisi (IC) cihazlarında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları için herhangi bir doğruluk ve kesinlik deneyleri yapılmamış olmakla beraber analiz edilen sulara ait yük-denge oranlarının genellikle %5'den az oluşu nedeniyle, sonuçlar güvenilir olarak kabul edilmiştir. Hidrojeokimyasal analiz sonuçları ise AquaChem v.3.7 (Calmbach, 1999) ve SOLMINEQ.88 PC/SHELL (Kharaka vd., 1988) bilgisayar programları kullanılarak değerlendirilmiştir.

## 3. Bulgular

### 3.1. Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Jeolojisi

#### 3.1.1. Ömer-Gecek Jeotermal Alanının Jeolojisi

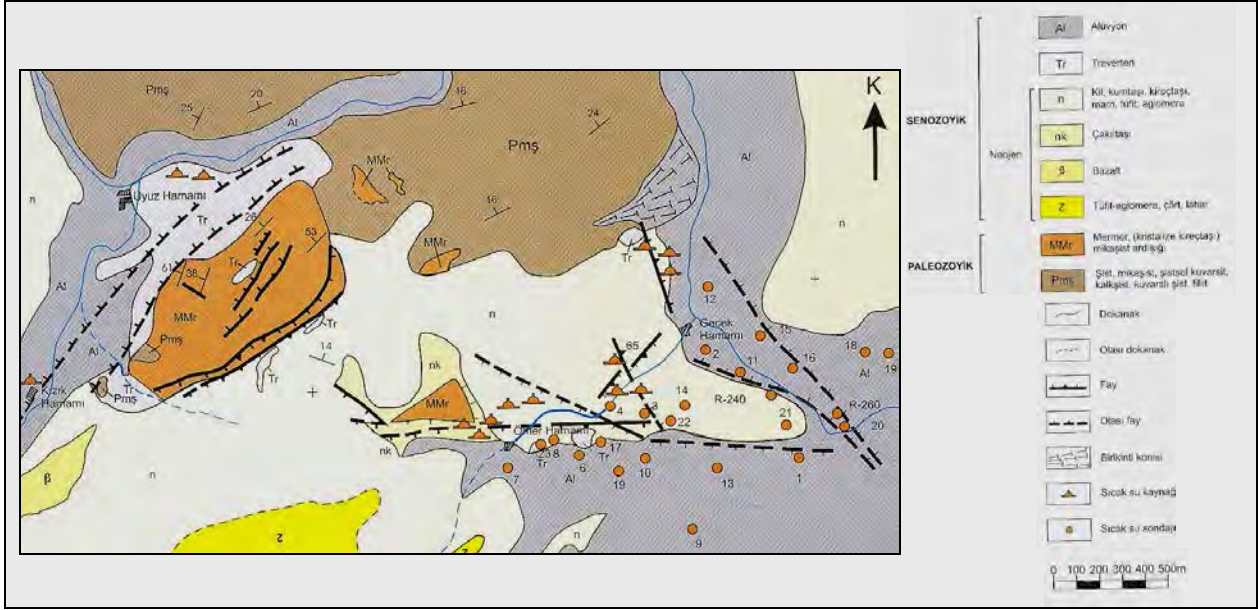
Ömer-Gecek jeotermal sahası Afyon'un kuzeybatısında yer alır. Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfikleri temeli oluşturmaktadır. Bu metamorfik temelde mikasist, şistisel kuvarsit, kuvarslı şist ve fillit egemendir. Şistlerin üzerine geçişli olarak kristalize kireçtaşları (mermer) gelir. Yaklaşık 300 m. kalınlığa sahip Neojen çökelleri, Paleozoyik temel üzerine açısız uyumsuzlukla gelmektedir. Tabanda çakıltaşları ile başlayıp kumtaşı, killi kireçtaşı ve marn seviyeleri ile devam eder. Aynı volkanizmanın ürünü olan tüf, aglomera ve çörtler üst kesimlerde gözlenir. Kum, çakıl, silt ve kil boyutundaki tutturulmamış malzemelerden oluşan alüvyon ve jeotermal suların içindeki çözünmüş maddelerin çökmesiyle oluşan travertenler en genç oluşuklardır (Karamanderesi, 1972; Erişen, 1976; Metin vd., 1987; Öktü vd., 1997; Akkuş vd., 2005; Şekil 2). Ömer-Gecek jeotermal

sahasının ısı kaynağını plütonik sokulumlar oluştururken, rezervuar kayacı Paleozoyik metamorfikler içindeki kalkışt ve kuvarsit şistlerin çatlak ve kırıklı seviyeleri ile mermerlerin karstik boşlukları oluşturur (Ulutürk, 2009).

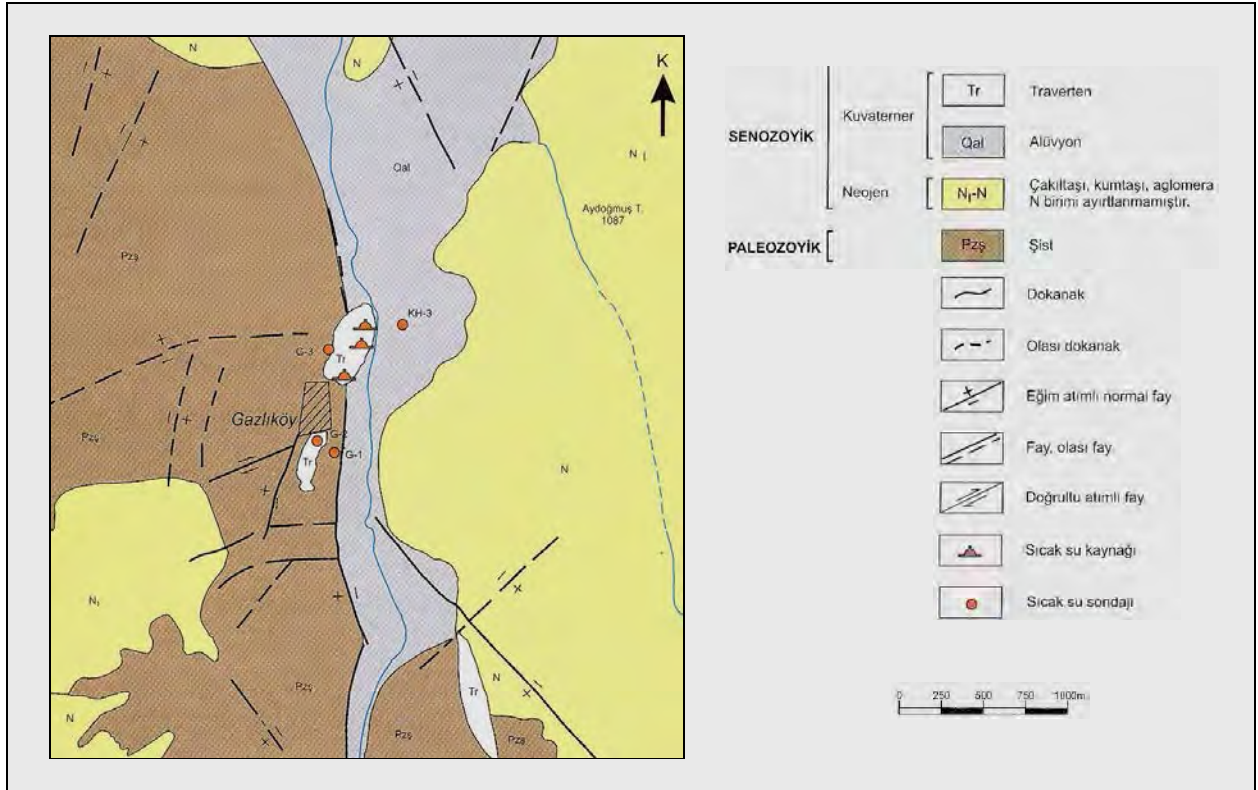
### 3.1.2. Gazlıgöl Jeotermal Alanının Jeolojisi

Gazlıgöl jeotermal sahası, Afyonkarahisar şehir merkezinin 20 km. kuzeyindedir. Temelde şist ve kuvarsitten oluşan Paleozoyik yaşlı metamorfikler bulunur. Metamorfiklerin üzerine uyumsuz olarak

Neojen yaşlı kil, kumtaşı, çakıltaşı ardalanmalı çökeller gelir. En genç oluşuklar ise Kuvaterner yaşlı traverten ve alüvyonlardır (Gökalp, 1970; Metin vd., 1987; Mutlu, 1996; Öktü vd., 1997; Şekil 3). Gazlıgöl jeotermal sahasının ısı kaynağını bölgedeki volkanizma oluştururken, Paleozoyik yaşlı metamorfikler içindeki çatlak ve kırıklı şistler ve kuvarsitler rezervuar kayacı oluşturur (Göçmez ve Kara, 2005). Bu birimler üzerine gelen Neojenin kiltası, marnlı seviyeleri örtü kayayı oluşturur (Ulutürk vd., 2008).



Şekil 2. Ömer-Gecek jeotermal sahasının jeoloji haritası (Erişen, 1976)



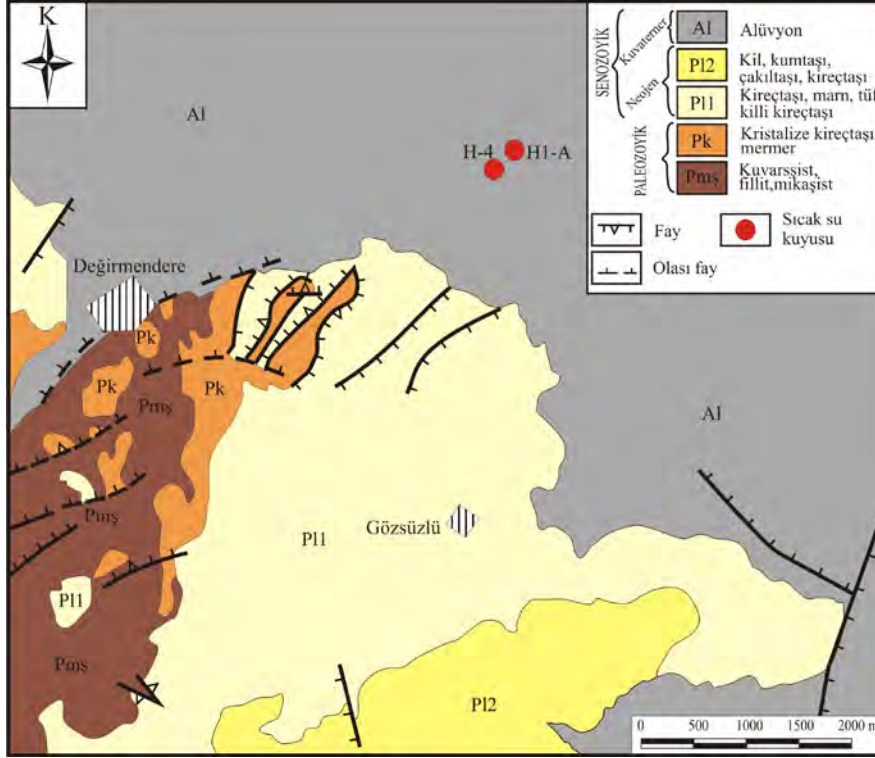
Şekil 3. Gazlıgöl jeotermal sahasının jeoloji haritası (Öktü vd., 1997)



### 3.1.3. Heybeli Jeotermal Alanının Jeolojisi

Heybeli jeotermal sahası Afyonkarahisar ilinin güneydoğusunda yer alan Bolvadin İlçe sınırları içerisinde bulunmaktadır. Heybeli bölgesinde temelde Paleozoyik yaşlı şistler bulunmaktadır. Bu metamorfik temeli killi şist, mikaşist, kalkışist, fillit, kuvarsit, kuvarşlı şist ve kuvarsit şistler oluşturur. Şistlerin üzerine geçişli olarak mermer ve kalkışistler yer alır. Bunların üzerine açılal uyumsuzlukla Neojen çökelleri gelir. Gözenekli gölsel kireçtaşı, killi kireçtaşı, marn, tüfit, çakıltaşı, kumtaşı, silt ile temsil edilen Neojen çökellerin maksimum kalınlığı 300 m. dir. Traverten

ve alüvyon ise en genç birimlerdir. Genç volkanik etkinliğe bağlı kayalar Neojen çökelleri arasındaki tüfitler ile Neojen sonu ve/veya sonrası yaşlı bazaltlardır. Alanda gözlenen genel kırık hatları KD-GB ve KB-GD yönlü eğim atımlı normal faylarla temsil edilir ve bu kırık çizgileri Neojen sonu ve/veya sonrası yaşlıdır. Paleozoyik yaşlı kuvarsit, kristalize kireçtaşı (mermer) ve kalkışistler ile Neojene ait çakıltaşı, kumtaşı, kireçtaşı kaya birimleri bölgedeki termal sular için muhtemel rezervuar kayacı oluşturur (Şekil 4; Erişen, 1972; Mutlu, 1996; Akkuş vd., 2005; Gemici ve Tarcan, 2004).

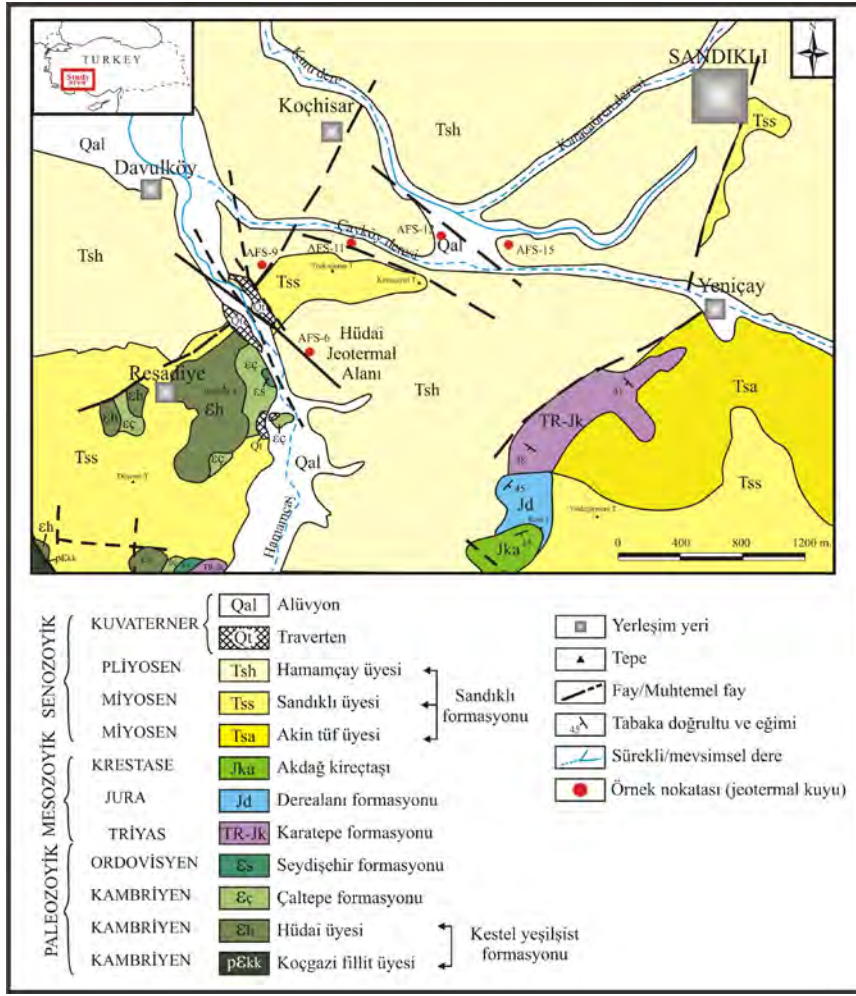


Şekil 4. Heybeli jeotermal sahasının jeoloji haritası (Erişen, 1972'den basitleştirilerek)

### 3.1.4. Sandıklı Jeotermal Alanının Jeolojisi

Hüdaı jeotermal sahası, Sandıklı ilçe sınırı içerisinde Afyon ilinin yaklaşık 40 km güneybatısında yer alır. Bölgede Hamamçay kaynakları olarak çok sayıda sıcak su kaynağı mevcuttur. Ayrıca 10 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Tabanda Koçgazi fillit üyesi çok düşük metamorfizmalı bej, kahvemsı bej renkli ince taneli kumtaşı, siyah ve kahve-mor renkli silttaşı ve bunlarla yer yer arakatlı metabazik sillerinden oluşur. Alt Cambriyen yaşlı Hüdaı formasyonu çoğunlukla kuvarsitlerden meydana gelmekte ve yer yer şistlerle ardalanmalı bulunmaktadır. Jeotermal sistemin örtü kayacını oluşturan Seydişehir formasyonu miltaşı, şeyl ve kuvarş kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. İstifin alt düzeylerinde ince, alacalı renkli ve yumru kireçtaşı bantları izlenmektedir (Afşin 1991; Özgül vd., 1991; Günay vd., 1995; Gürsu ve Göncüoğlu, 2005). Üst Triyas-Alt Jura yaşlı Karatepe formasyonu çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşlarından oluşur. Derealanı

formasyonu Alt Jura yaşlı olup, marnlı kumtaşı ile başlayıp, üste doğru kumlu, siltli ve killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ardalanması şeklinde devam etmektedir. Üst Jura-Alt Kratese yaşlı olan Akdağ formasyonu ise masife yakın breşik kireçtaşları ile başlar, yukarı doğru arasında çört bantları bulunan kireçtaşları ve daha üstte çört oranı artarak dolomitik özellikte kireçtaşları ile devam eder (Afşin, 1991; Özpınar, 2008). Sandıklı Formasyonu, Üst Miyosen yaşlı Akin tuf üyesi, Üst Miyosen yaşlı Sandıklı üyesi ve Pliyosen yaşlı Hamamçayı üyesinden oluşmaktadır. Kuvaterner yaşlı traverten ve alüvyon en genç çökellerdir (Afşin,1991; Özgül vd., 1991; Dean ve Özgül, 1994; Kozlu ve Göncüoğlu, 1995; 1997; Erdoğan vd., 2004; Gürsu ve Göncüoğlu, 2005; Özpınar, 2008; Şekil 5). Sandıklı jeotermal sahasının ısı kaynağını bölgedeki volkanikler oluştururken, Paleozoik yaşlı metamorfikler içindeki çatlak ve kırıklı şistler ve kuvarsitler rezervuar kayacı oluşturur (Demer vd., 2013).

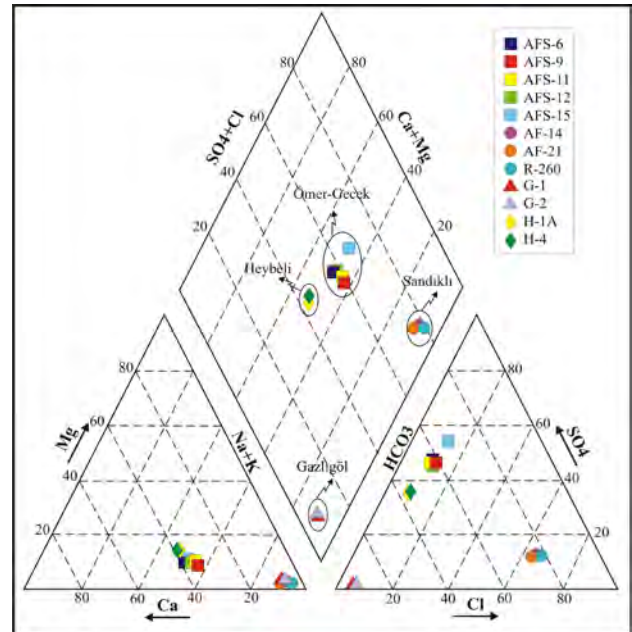


Şekil 5. Sandıklı jeotermal sahasının jeoloji haritası (Demer vd., 2013)

### 3.2. Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Hidrojeokimyasal Özellikleri

Ömer-Gecek jeotermal sahasındaki jeotermal suların sıcaklıkları 95-100 °C arasında, EC değerleri ise 7520-7560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pH değerleri 7,53-7,79 arasındadır. Gazlıgöl jeotermal sahasındaki jeotermal suların sıcaklıkları 59 ile 64 °C, EC değerleri ise 3970 ile 4070  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'dir. Jeotermal suyun pH değerleri 7,57 ile 8,10 olup genel olarak hafif bazik bir karakter sergiler. Heybeli jeotermal sahasındaki jeotermal suların sıcaklıkları 56 °C, EC değerleri 3440 ile 3490  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pH değerleri 6,53 ile 6,56 olup hafif asidik bir karakterdedir. Sandıklı jeotermal sularının sıcaklıkları 69-75°C arasında, EC değerleri ise 1943-2300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  arasındadır. Jeotermal suların pH değerleri 6,45 ile 7,26 arasında değişmekte olup genel olarak asidik bir karakter sergilerler (Tablo 1).

Çalışma alanındaki suların hidrojeokimyasal fasiyesini belirlemek amacıyla kimyasal analiz sonuçları, Piper diyagramı üzerine yerleştirilmiştir. Ömer-Gecek sahasındaki jeotermal sular Na-Cl-HCO<sub>3</sub> tipli sular, Gazlıgöl sahasındaki jeotermal sular Na-HCO<sub>3</sub> tipli sular, Heybeli sahasındaki jeotermal sular Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> tipli sular, Sandıklı sahasındaki jeotermal sular ise Na-Ca-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> tipli sular fasiyesine girmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Afyonkarahisar sahasları jeotermal sularına ait Piper diyagramı

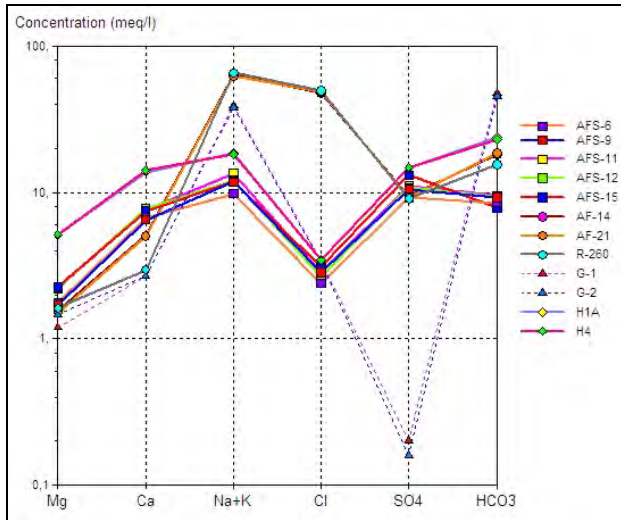
**Tablo 1.** Afyonkarahisar jeotermal sahalarına ait jeotermal sularının in-situ ve hidrojeokimyasal analiz sonuçları (değerler mg/l cinsinden belirtilmiştir)

| Lokasyon    | Örnek no     | T (°C) | pH      | EC (µS/cm) | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | SiO <sub>2</sub> | Pb <sup>2+</sup> | Li <sup>+</sup> | Zn <sup>2+</sup> | Cu <sup>2+</sup> | Al <sup>3+</sup> |
|-------------|--------------|--------|---------|------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Ömer-Gecek  | AF-14        | 95,0   | 7,79    | 7550       | 1404,00         | 111,90         | 18,72            | 101,80           | 118,62           | <0,01            | 3,97            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
|             | AF-21        | 98,0   | 7,53    | 7560       | 1369,00         | 109,90         | 18,27            | 100,50           | 117,85           | <0,01            | 3,98            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
|             | R-260        | 100,0  | 7,59    | 7520       | 1440,00         | 115,00         | 19,73            | 59,43            | 115,02           | <0,01            | 4,07            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
| Gazlıgöl    | G-1          | 64,0   | 8,10    | 3970       | 855,50          | 72,81          | 18,48            | 54,20            | 71,00            | <0,01            | 4,29            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
|             | G-2          | 59,0   | 7,57    | 4070       | 826,40          | 72,46          | 17,90            | 54,19            | 69,63            | <0,01            | 4,19            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
| Heybeli     | H-1A         | 56,0   | 6,53    | 3490       | 401,40          | 40,96          | 61,99            | 276,50           | 37,78            | <0,01            | 1,06            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
|             | H-4          | 56,0   | 6,56    | 3440       | 395,50          | 40,57          | 62,68            | 284,10           | 37,50            | <0,01            | 1,03            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
| Sandıklı    | AFS-6        | 69,0   | 6,45    | 1943       | 208,30          | 30,14          | 21,26            | 135,20           | 63,32            | <0,01            | 0,23            | <0,01            | <0,01            | <0,01            |
|             | AFS-9        | 69,0   | 6,52    | 1982       | 205,90          | 34,89          | 20,56            | 130,30           | 64,77            | <0,01            | 0,19            | <0,01            | 0,06             | <0,01            |
|             | AFS-11       | 73,6   | 6,48    | 2300       | 276,00          | 57,92          | 26,82            | 150,82           | 68,62            | 0,05             | 0,30            | 0,05             | 0,04             | <0,01            |
|             | AFS-12       | 73,5   | 6,47    | 2250       | 249,80          | 46,36          | 26,92            | 155,48           | 68,32            | 0,05             | 0,28            | 0,06             | 0,04             | <0,01            |
|             | AFS-15       | 75,0   | 7,26    | 2020       | 245,40          | 47,97          | 27,45            | 150,10           | 76,80            | <0,01            | 0,30            | <0,01            | 0,06             | 0,44             |
| Standartlar | WHO, 2006    | -      | 6,5-8,5 | -          | 200             | -              | -                | -                | -                | 0,01             | -               | -                | 2                | 0,2              |
|             | EPA, 2002    | -      | 6,5-8,5 | -          | -               | -              | -                | -                | -                | -                | -               | 5                | 1,3              | 0,2              |
|             | TS 266, 2005 | -      | 6,5-9,5 | -          | 200             | -              | -                | -                | -                | 0,01             | -               | -                | 2                | 0,2              |
|             | İTASHY, 2005 | -      | 6,5-9,5 | 2500       | 200             | -              | -                | -                | -                | 0,01             | -               | -                | 2                | 0,2              |
|             | DMSHY,2004   | -      | -       | -          | -               | -              | -                | -                | -                | 0,01             | -               | -                | 1                | 0,2              |

**Tablo 1. (devam)** (değerler mg/l cinsinden belirtilmiştir)

| Örnek no     | Mn <sup>2+</sup> | Fe <sup>2+</sup> | Sb    | As    | B     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | PO <sub>4</sub> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | F <sup>-</sup> |
|--------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|----------------|
| AF-14        | <0,01            | 0,20             | <0,01 | 3,00  | 7,89  | 7,72                         | <0,01                        | 1110,2                        | <0,05           | 1700,27         | 455,8                         | 7,53           |
| AF-21        | <0,01            | 0,14             | <0,01 | 2,70  | 7,91  | 3,34                         | <0,01                        | 1134,6                        | <0,05           | 1731,64         | 440,4                         | 5,51           |
| R-260        | <0,01            | 0,19             | <0,01 | 2,35  | 7,97  | 4,28                         | <0,01                        | 945,5                         | <0,05           | 1757,55         | 438,0                         | 6,85           |
| G-1          | <0,01            | 0,05             | <0,01 | <0,01 | 11,49 | 1,42                         | <0,01                        | 2897,5                        | <0,05           | 121,00          | 9,67                          | 3,04           |
| G-2          | <0,01            | 0,17             | <0,01 | <0,01 | 11,20 | 1,07                         | <0,01                        | 2775,5                        | <0,05           | 119,35          | 7,71                          | 3,07           |
| H-1A         | <0,01            | 0,92             | <0,01 | 0,80  | 1,31  | <0,01                        | <0,01                        | 1464,0                        | <0,05           | 122,42          | 709,98                        | 2,53           |
| H-4          | <0,01            | 0,33             | <0,01 | 0,88  | 1,24  | <0,01                        | <0,01                        | 1403,0                        | <0,05           | 121,67          | 712,98                        | 2,67           |
| AFS-6        | 0,15             | 0,34             | <0,01 | 0,45  | 0,42  | 23,08                        | <0,01                        | 518,5                         | <0,05           | 84,83           | 441,86                        | 3,83           |
| AFS-9        | 0,16             | 0,14             | <0,01 | 0,24  | 1,25  | 1,11                         | <0,01                        | 561,2                         | <0,05           | 101,15          | 506,53                        | 3,91           |
| AFS-11       | 0,06             | 0,22             | <0,01 | 0,58  | 0,72  | 11,30                        | <0,01                        | 579,5                         | <0,05           | 100,88          | 533,88                        | 3,77           |
| AFS-12       | 0,19             | 0,35             | <0,01 | 0,54  | 0,60  | 1,23                         | <0,01                        | 573,4                         | <0,05           | 93,60           | 517,88                        | 3,35           |
| AFS-15       | 0,14             | 0,62             | <0,01 | 0,60  | 0,72  | 0,98                         | <0,01                        | 481,9                         | <0,05           | 109,51          | 629,49                        | 4,85           |
| WHO, 2006    | 0,4              | 0,3              | 0,005 | 0,01  | 0,5   | 50                           | 0,2                          | -                             | -               | 250             | 250                           | 1,5            |
| EPA, 2002    | 0,05             | 0,3              | -     | 0,01  | 1     | -                            | -                            | -                             | -               | 250             | 250                           | 2              |
| TS 266, 2005 | 0,05             | 0,2              | 0,005 | 0,01  | 1     | 50                           | 0,5                          | -                             | -               | 250             | 250                           | 1,5            |
| İTASHY, 2005 | 0,05             | 0,2              | 0,005 | 0,01  | 1     | 50                           | 0,5                          | -                             | -               | 250             | 250                           | 1,5            |
| DMSHY,2004   | 0,5              | -                | 0,005 | 0,1   | -     | 50                           | 0,1                          | -                             | -               | -               | -                             | 5              |

Schoeller diyagramına göre Ömer-Gecek jeotermal sularında katyonlar için Na+K>Ca>Mg, anyonlar için Cl>HCO<sub>3</sub>>SO<sub>4</sub>; Gazlıgöl jeotermal sularında katyonlar için Na+K>Ca>Mg, anyonlar için HCO<sub>3</sub>>Cl>SO<sub>4</sub>; Heybeli jeotermal sularında katyonlar için Na+K>Ca>Mg, anyonlar için HCO<sub>3</sub>>SO<sub>4</sub>>Cl; Sandıklı jeotermal sularında ise katyonlar için Na+K>Ca>Mg, anyonlar için SO<sub>4</sub>>HCO<sub>3</sub>>Cl olarak hakim iyon dağılımı sunmaktadır (Şekil 7).

**Şekil 7.** Afyonkarahisar sahaları jeotermal sularına ait yarı logaritmik Schoeller diyagramı

Analiz sonuçlarına göre diğer sahalara oranla Ömer-Gecek sahasındaki yüksek Na değerleri plajiklasların ayrışmasının ve yüksek Cl değerleri ise jeotermal suların derin dolaşım sular olması işaret etmektedir. Gazlıgöl sahasında ise diğer sahalara göre yüksek HCO<sub>3</sub> ve düşük SO<sub>4</sub> değerleri dikkat çekmektedir. Bu bölgedeki jeotermal sulardaki baskın HCO<sub>3</sub> derişimlerinin kökeninin CO<sub>2</sub>'ce zengin sularla olan karışım olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, sularda bakteriyel sülfat indirgenmesi düşük SO<sub>4</sub> ve yüksek HCO<sub>3</sub> derişimlerine sebep olabilmektedir (Mutlu, 1996).

Jeotermal sularda ana potansiyel kirleticiler hidrojen sülfid (H<sub>2</sub>S), arsenik (As), bor (B), civa (Hg) ve diğer iz metaller (örneğin; kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), demir (Fe), çinko (Zn) ve mangan (Mn)) dir (Kristmannsdottir ve Armannsson, 2003; Baba, 2004; Baba ve Armannsson, 2006). As, 0,01 mg/l gibi düşük bir düzeyde insan sağlığını olumsuz etkileyen bir bileşendir (WHO, 1993; Bhattacharya vd., 2002). Deri ve cilt kanserleri, kardiyovasküler ve nörolojik etkileri gibi olumsuz sağlık etkilerinin çoğu, öncelikli olarak içme suyundan kronik As açığa çıkmasına katkıda bulunmaktadır (NRC, 1999). Ömer-Gecek, Heybeli ve Sandıklı jeotermal sahalarında As konsantrasyonları insanların tüketimi için önerilen 0,01 mg/l (WHO, 2006; EPA, 2002; TS266, 2005; İTASHY, 2005) ve 0,1 mg/l (DMSHY, 2004) sınırını aşmaktadır. Bor,

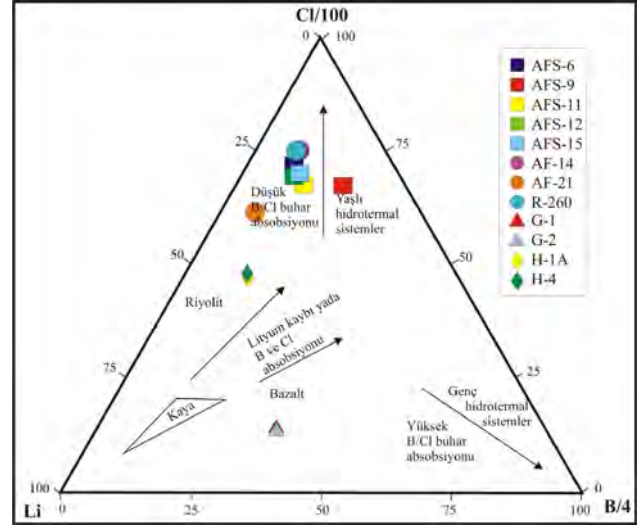


bitkilerin normal gelişimi için çok küçük miktarda gereklidir, ancak yüksek konsantrasyonlarda toksik özelliktedir. Genel bir sınıflama olarak, yeraltısuyu B konsantrasyonunun 1 mg/l'yi aşması bitkiler için zararlıdır (Richards, 1954). En yüksek B konsantrasyonu Gazlıgöl jeotermal sahasında bulunmaktadır. Bu durumun, Gazlıgöl sahasındaki sedimanter kayalar ile yoğun su-kayaç etkileşimi ile ilgili olabileceği ifade edilmiştir (Mutlu, 1996). Afyonkarahisar jeotermal sahaslarında B konsantrasyonu genel olarak içme ve sulama için standart değerlerin üzerindedir (WHO, 2006; EPA, 2002; TS266, 2005; İTASHY, 2005; DMSHY, 2004). F konsantrasyonu bakımından Ömer-Gecek jeotermal suları DMSHY (2004) tarafından önerilen standart değeri (5 mg/l) aşmakta iken, tüm jeotermal sahasların F konsantrasyonu diğer standartlar bakımından (WHO, 2006; EPA, 2002; TS266, 2005; İTASHY, 2005) önerilen standart değerleri (1,5-2 mg/l) aşmaktadır (Tablo 1).

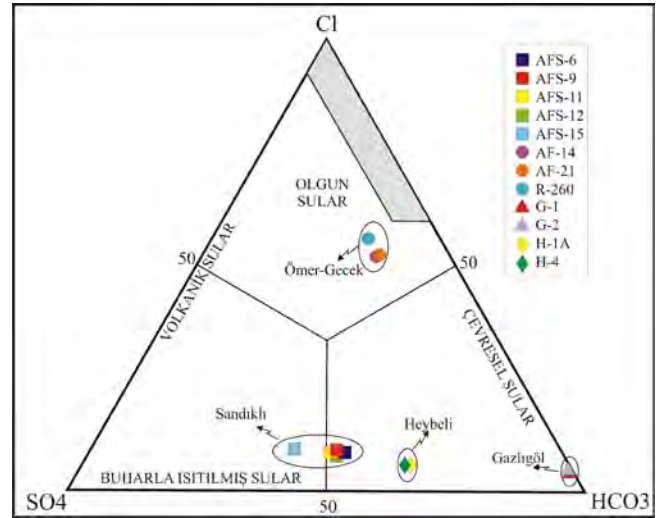
Cl-Li-B üçgen diyagramı, ikincil süreçlerden belki de en az etkilenen alkali metal olan Li, sıcak sulara korunumlu diğer iki bileşenin (Cl ve B) muhtemel kökeninin göreceli tahmininde kullanılmaktadır. Li çözeltiliye bir kez ilave olduğunda büyük oranda çözeltide kalır. Li içeren bir akışkana B ve Cl eklendiğinde, akışkandaki oranları kabuksal kayacinkine benzer. Uçucu özelliği nedeniyle B, ısınma sürecinin ilk evrelerinde atıldığından, termal akışkanın B miktarı jeotermal sistemin olgunluğunu bir ölçüde yansıtır (Giggenbach, 1991). Çalışma alanındaki sıcak suların Cl-Li-B diyagramındaki yerleri Şekil 8'de verilmiştir. Sandıklı sahasında daha düşük element konsantrasyonu olmasına rağmen, Ömer-Gecek ve Sandıklı jeotermal suları Cl-B-Li değerlerine göre benzer oranlara sahip oldukları için diyagramda aynı bölgeye düşmüşlerdir (Mutlu, 1996). Bu durum, Sandıklı jeotermal alanında olası su karışımını düşündürmektedir. Ömer-Gecek jeotermal sularındaki yüksek Cl konsantrasyonu, diğer bölgeler ile kıyaslandığında akışkanın daha derinden gelmesi ve rezervuarda daha uzun süre kalması nedeniyledir. Gazlıgöl jeotermal sahasındaki yüksek B konsantrasyonunun, sedimanter kayalar ile yoğun su-kayaç etkileşimi ile olabileceği ifade edilmiştir. Heybeli jeotermal suları ise düşük Li ve düşük B içeriği nedeniyle derin dolaşımli suları temsil etmemektedir (Mutlu, 1996).

Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> üçgen diyagramı suları bir ölçüde kökensel bazda sınıflandırmaya yarayan bir grafikdir (Nicholson, 1993). Bu üçgen diyagram da diğer üçgen diyagramlar gibi örnekler arasında göreceli ilişkiyi hızlı bir şekilde görmeyi sağlayan bir ön değerlendirme verir. Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> üçgen diyagramına göre (Şekil 9) Ömer-Gecek jeotermal suları olgun sular ile çevresel sular arasında bir dağılım vermektedir. Bu jeotermal akışkanların olgun sular çizgisine yakın olması, akışkanların yüksek Cl değeri ile uyumludur. Gazlıgöl jeotermal sularının HCO<sub>3</sub> köşesinin yakınına

düşmesi bu suların çevresel ya da sığ kökenli olabileceğini göstermektedir. Sandıklı ve Heybeli jeotermal suları ise HCO<sub>3</sub> ve SO<sub>4</sub> köşeleri arasında dizilim göstermektedir. Bu suların nispeten yüksek SO<sub>4</sub> konsantrasyonu diyagramda buharla ısınmış sular alanına yakın olması ile sonuçlanmıştır.



Şekil 8. Afyonkarahisar sahasları jeotermal sularına ait Cl-Li-B üçgen diyagramı



Şekil 9. Afyonkarahisar sahasları jeotermal sularına ait Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> üçgen diyagramı

### 3.3. Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Jeotermometre Uygulamaları

#### 3.3.1. Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Jeokimyasal Termometreler ile Rezervuar Sıcaklığının Hesaplanması

Jeotermal suların kullanım alanlarının saptanabilmesi için yapılacak derin sondajlardan önce uygulanacak çeşitli jeotermometre yöntemleri ile rezervuar sıcaklıklarının tahmin edilmesi yapılan jeotermal araştırmaların önemli bir parçasını oluşturur. Ömer-Gecek sahasındaki jeotermal suların silika jeotermometreleri ve katyon jeotermometreleri ile rezervuar sıcaklıkları hesaplanmıştır. Kuvars

jeotermometrelerinin 130-147°C civarında bir rezervuar sıcaklığı yansıttığı söylenebilir. Kalsedon jeotermometreleri ile de 117-121°C civarında bir rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır (Tablo 2). Katyon

jeotermometreleri genel olarak silika jeotermometrelerinden daha yüksek rezervuar sıcaklıkları vermiştir (Tablo 3).

**Tablo 2.** Afyonkarahisar jeotermal sahalarındaki jeotermal suların silika jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları

| Örnek no | Sıcaklık (°C) | Kuvars adyabatik <sup>a</sup> | Kuvars max buharlaşma <sup>a</sup> | Kuvars 25-330°C <sup>b</sup> | Kuvars, adyabatik <sup>b</sup> | Kuvars 0-350°C <sup>c</sup> | Kuvars 0-350°C-adyabatik <sup>c</sup> | Kalsedon <sup>a</sup> | Kalsedon <sup>d</sup> |
|----------|---------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| AF-14    | 95,0          | 146,95                        | 140,90                             | 147,14                       | 142,40                         | 135,66                      | 130,95                                | 121,36                | 118,96                |
| AF-21    | 98,0          | 146,56                        | 140,57                             | 146,74                       | 142,06                         | 135,23                      | 130,59                                | 120,92                | 118,56                |
| R-260    | 100,0         | 145,15                        | 139,39                             | 145,33                       | 140,86                         | 133,72                      | 129,32                                | 119,35                | 117,12                |
| G-1      | 64,0          | 118,91                        | 117,23                             | 119,15                       | 117,84                         | 105,82                      | 105,25                                | 90,39                 | 90,40                 |
| G-2      | 59,0          | 117,92                        | 116,39                             | 118,16                       | 116,94                         | 104,78                      | 104,33                                | 89,31                 | 89,40                 |
| AFS-6    | 69,0          | 113,16                        | 112,32                             | 113,45                       | 112,63                         | 99,81                       | 99,88                                 | 84,13                 | 84,58                 |
| AFS-9    | 69,0          | 114,29                        | 113,28                             | 114,56                       | 113,66                         | 100,98                      | 100,93                                | 85,35                 | 85,72                 |
| AFS-11   | 73,6          | 117,18                        | 115,76                             | 117,43                       | 116,28                         | 104,00                      | 103,64                                | 88,50                 | 88,65                 |
| AFS-12   | 73,5          | 116,96                        | 115,57                             | 117,21                       | 116,08                         | 103,77                      | 103,43                                | 88,26                 | 88,42                 |
| AFS-15   | 75,0          | 122,96                        | 120,68                             | 123,16                       | 121,46                         | 110,06                      | 109,01                                | 94,81                 | 94,50                 |
| H-1A     | 56,0          | 89,18                         | 91,60                              | 89,69                        | 90,08                          | 75,07                       | 76,78                                 | 58,39                 | 60,51                 |
| H-4      | 56,0          | 88,86                         | 91,32                              | 89,37                        | 89,76                          | 74,74                       | 76,46                                 | 58,05                 | 60,19                 |

a: Fournier, 1977; b: Fournier ve Potter, 1982; c: Arnorsson, 2000; d: Arnorsson vd., 1983a

**Tablo 3.** Afyonkarahisar jeotermal sahalarındaki jeotermal akışkanların katyon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları

| Örnek no | Sıcaklık (°C) | Na-K <sup>a</sup> | Na-K <sup>b</sup> | Na-K <sup>c</sup> | Na-K <sup>d</sup> | Na-K <sup>e</sup> | Na-K <sup>f</sup> | Na-K <sup>g</sup> | Na-K-Ca <sup>h</sup> | K-Mg <sup>i</sup> | Li-Mg <sup>j</sup> |
|----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| AF-14    | 95,0          | 164,73            | 197,05            | 173,08            | 198,49            | 198,42            | 185,63            | 214,97            | 203,25               | 123,42            | 131,96             |
| AF-21    | 98,0          | 165,43            | 197,83            | 173,75            | 199,01            | 199,00            | 186,19            | 215,51            | 202,18               | 123,24            | 131,49             |
| R-260    | 100,0         | 164,93            | 197,27            | 173,27            | 198,63            | 198,58            | 185,78            | 215,12            | 228,09               | 123,45            | 132,01             |
| G-1      | 64,0          | 171,21            | 204,29            | 179,25            | 203,34            | 203,69            | 190,77            | 219,90            | 193,02               | 110,73            | 129,26             |
| G-2      | 59,0          | 174,21            | 207,65            | 182,10            | 205,58            | 206,12            | 193,15            | 222,17            | 192,04               | 111,06            | 129,50             |
| AFS-6    | 69,0          | 231,55            | 272,21            | 236,13            | 246,59            | 250,99            | 237,06            | 263,77            | 102,42               | 84,98             | 254,84             |
| AFS-9    | 69,0          | 252,81            | 296,33            | 255,92            | 261,02            | 266,94            | 252,67            | 278,38            | 108,74               | 89,14             | 264,60             |
| AFS-11   | 73,6          | 284,63            | 332,59            | 285,32            | 281,88            | 290,14            | 275,40            | 299,47            | 129,29               | 99,06             | 246,21             |
| AFS-12   | 73,5          | 265,89            | 311,21            | 268,04            | 269,70            | 276,57            | 262,10            | 287,16            | 117,83               | 93,04             | 250,55             |
| AFS-15   | 75,0          | 273,65            | 320,05            | 275,21            | 274,78            | 282,22            | 267,64            | 292,29            | 119,93               | 93,69             | 247,36             |
| H-1A     | 56,0          | 190,15            | 225,53            | 197,21            | 217,29            | 218,87            | 205,62            | 234,07            | 104,23               | 79,30             | 205,35             |
| H-4      | 56,0          | 190,72            | 226,17            | 197,75            | 217,71            | 219,33            | 206,07            | 234,50            | 103,02               | 78,94             | 206,90             |

a: Truesdell, 1976; b: Tonani, 1980; c: Arnorsson vd, 1983a; d: Arnorsson vd, 1983b; e: Fournier, 1979; f: Nivea ve Nivea, 1987; g: Giggenbach, 1988; h: Fournier ve Truesdell, 1973; i: Giggenbach, 1983; j: Kharaka ve Mariner, 1989.

Gazlıgöl jeotermal sahasındaki jeotermal suların kuvars jeotermometreleri ile 104-119 °C civarında, kalsedon jeotermometreleri ile de 89-90 °C civarında bir rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır (Tablo 2). Katyon jeotermometreleri genel olarak silika jeotermometrelerinden daha yüksek rezervuar sıcaklıkları vermiştir (Tablo 3).

Sandıklı jeotermal sahasındaki jeotermal suların kuvars jeotermometreleri ile 100-120 °C civarında, kalsedon jeotermometreleri ile de 85-95 °C civarında bir rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır (Tablo 2). Na-K-Ca jeotermometresi hariç diğer katyon jeotermometreleri silika jeotermometrelerinden daha yüksek rezervuar sıcaklıkları vermiştir. Bunun nedeni ise silika jeotermometreleri kaynağın rezervuar sıcaklıklarını belirtirken, özellikle Na-K jeotermometrelerinin ise daha derin ve sıcak sistemlere işaret etmesindedir (Memiş vd, 2010).

Heybeli jeotermal sahasındaki jeotermal suların kuvars jeotermometreleri ile 74-91 °C civarında,

kalsedon jeotermometreleri ile de 58-60 °C civarında bir rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır (Tablo 2). Yine katyon jeotermometreleri genel olarak silika jeotermometrelerinden daha yüksek rezervuar sıcaklıkları vermiştir (Tablo 3).

### 3.3.2. Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Karışım Modelleri ve Mineral Denge-Sıcaklık Diyagramı ile Rezervuar Sıcaklığının Hesaplanması

Silika ve klorür miktarının jeotermal suyun kökeninde olduğu gibi korunduğu varsayıldığında, maksimum hazne kaya sıcaklığı, buharlaşma ve kondüktif soğuma, Entalpi-Silika (Fournier, 1977) ve Entalpi-Klorür (Truesdell ve Fournier, 1975) değişimi ile karışım oranları kullanılarak açıklanabilir.

Afyonkarahisar jeotermal sahalarındaki jeotermal suların entalpi-silika karışım modeli kalsedon ve kuvarsa göre hesaplanmış, Ömer-Gecek sahasında kalsedon ve kuvarsa göre sırasıyla yaklaşık 122 ve 143



°C, Gazlıgöl sahasında yaklaşık 103 ve 132 °C, Sandıklı sahasında 108 ve 134 °C ve Heybeli sahasında 82 ve 106 °C bir rezervuar sıcaklıkları önermektedirler. Ömer-Gecek sahasında entalpi-klorür karışım modeli ise kalsedon ve kuvarsa göre, sırasıyla yaklaşık 118 ve 143 °C, Gazlıgöl sahasında yaklaşık 96 ve 120 °C, Sandıklı sahasında 98 ve 120 °C ve Heybeli sahasında 63 ve 84 °C bir rezervuar sıcaklıkları önermektedirler (Tablo 4).

Mineral denge-sıcaklık diyagramı yönteminde Solmineq.88 (Kharaka vd., 1988) bilgisayar programı kullanılarak, her bir mineral için çeşitli sıcaklıklarda (1 atm basınç koşulunda) doygunluk indeksleri ( $SI = \log Q/K = \log AP/Kt$ ) ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu sıcaklık değerlerine karşılık gelen doygunluk indeksi değerleri, her bir mineral ve sıcaklık için en iyi doğrusal ilişki verecek şekilde doğruları çizilerek "Mineral Denge-Sıcaklık" diyagramları oluşturulmuştur. Elde edilen verilere göre Ömer-Gecek jeotermal sularının 100-125°C, Gazlıgöl jeotermal sularının 75-100°C, Sandıklı jeotermal sularının 100-125°C ve Heybeli jeotermal sularının 75-100°C rezervuar sıcaklıkları olduğu şeklinde yorumlanabilir (Tablo 4).

**Tablo 4.** Afyonkarahisar jeotermal sahalarındaki jeotermal suların Entalpi-Cl, Entalpi-SiO<sub>2</sub> ve mineral denge-sıcaklık diyagramları ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları

|  | Ömer-Gecek | Gazlıgöl  | Sandıklı   | Heybeli   |
|--|------------|-----------|------------|-----------|
| Yüzey sıcaklığı (ortalama)                           | 97 °C      | 62 °C     | 72 °C      | 56 °C     |
| Entalpi-Cl (Kalsedon) (Truesdell ve Fournier, 1975)  | 118 °C     | 96 °C     | 98 °C      | 63 °C     |
| Entalpi-Cl (Kuvars) (Truesdell ve Fournier, 1975)    | 143 °C     | 120 °C    | 120 °C     | 84 °C     |
| Entalpi-SiO <sub>2</sub> (Kalsedon) (Fournier, 1977) | 122 °C     | 103 °C    | 108 °C     | 82 °C     |
| Entalpi-SiO <sub>2</sub> (Kuvars) (Fournier, 1977)   | 143 °C     | 132 °C    | 134 °C     | 106 °C    |
| Log SI-Sıcaklık                                      | 100-125 °C | 75-100 °C | 100-125 °C | 75-100 °C |

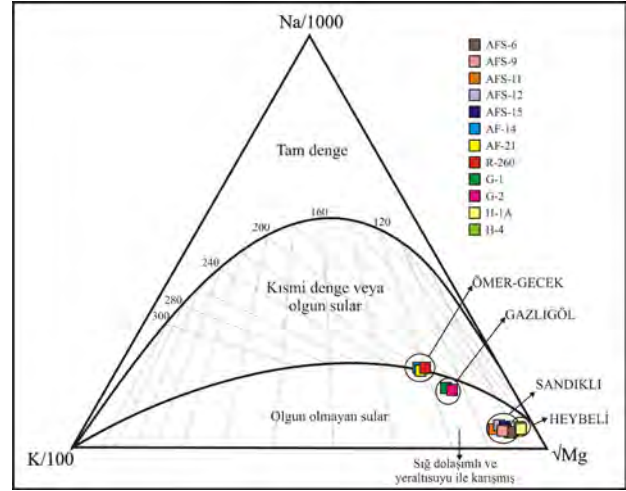
### 3.3.3. Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Birleşik (Kombine) Jeotermometre ile Rezervuar Sıcaklığının Hesaplanması

Na-K-Mg üçgen diyagramı jeotermal suların kökenini, dengeye ulaşıp ulaşmadıklarının kontrolünü ve uygun jeotermometrelerin seçiminde kullanılır (Giggenbach, 1988). Na-K-Mg üçgen diyagramına göre Ömer-Gecek sahasındaki jeotermal sular, olgun olmayan sular ile kısmi denge veya olgun sular arasındaki hat üzerindedir. Gazlıgöl, Sandıklı ve Heybeli sahasındaki jeotermal sular ise denge durumundan oldukça uzak, olgun olmayan sular grubuna girmektedir (Şekil 10). Bu sular, sıg dolaşım, yeraltısuyu ile karışmış sular olarak tanımlanmaktadır.

## 4. Tartışma ve Sonuç

Afyonkarahisar bölgesi jeotermal sahalarından Ömer-Gecek sahasındaki jeotermal sular Na-Cl-HCO<sub>3</sub> tipli sular, Gazlıgöl sahasındaki jeotermal sular Na-HCO<sub>3</sub> tipli sular, Heybeli sahasındaki jeotermal sular Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> tipli sular, Sandıklı sahasındaki jeotermal sular ise Na-Ca-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> tipli sular fasiyesine

girmektedir. Ömer-Gecek, Heybeli ve Sandıklı jeotermal sahalarında As konsantrasyonları insanların tüketimi için önerilen 0,01 mg/l (WHO, 2006; EPA, 2002; TS266, 2005; İTASHY, 2005) ve 0,1 mg/l (DMSHY, 2004) sınırını aşmaktadır.



**Şekil 10.** Afyonkarahisar sahalarındaki jeotermal sularının Na-K-Mg üçgen diyagramı (Giggenbach, 1988) üzerindeki dağılımları

Afyonkarahisar jeotermal sahalarında B konsantrasyonu genel olarak içme ve sulama için standart değerlerin üzerindedir (WHO, 2006; EPA, 2002; TS266, 2005; İTASHY, 2005; DMSHY, 2004). F konsantrasyonu bakımından Ömer-Gecek jeotermal suları DMSHY (2004) tarafından önerilen standart değeri (5 mg/l) aşmakta iken, tüm jeotermal sahaların F konsantrasyonu diğer standartlar bakımından (WHO, 2006; EPA, 2002; TS266, 2005; İTASHY, 2005) önerilen standart değerleri (1,5-2 mg/l) aşmaktadır. Ömer-Gecek jeotermal sularında Na ve Cl değerleri, diğer bölgeler ile kıyaslandığında en yüksektir. Bu durum bu suların daha derinden gelmesi ve rezervuarda daha uzun süre kalması nedeniyle. Gazlıgöl sahasında ise diğer bölgelere göre yüksek HCO<sub>3</sub> ve düşük SO<sub>4</sub> değerleri dikkat çekmektedir. Yüksek HCO<sub>3</sub> değerlerinin CO<sub>2</sub>'çe zengin sularla olan karışım olduğu belirtilmiştir. Düşük SO<sub>4</sub> değerleri de bakteriyel sülfat indirgenmesi sebebi ile olabilmektedir. Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> üçgen diyagramına göre Ömer-Gecek jeotermal suları olgun sular ile çevresel sular arasında bir dağılım vermektedir. Gazlıgöl jeotermal sularının HCO<sub>3</sub> köşesinin yakınına düşmesi bu suların çevresel ya da sıg kökenli olabileceğini göstermektedir. Sandıklı ve Heybeli jeotermal suları ise HCO<sub>3</sub> ve SO<sub>4</sub> köşeleri arasında dizilim göstermesi, bu suların nispeten yüksek SO<sub>4</sub> konsantrasyonu diyagramda buharla ısınmış sular alanına yakın olması ile sonuçlanmıştır.

Afyonkarahisar bölgesi jeotermal sahalarının jeotermometre hesaplamalarına göre en uygun yöntemin kuvars jeotermometre hesaplamaları olduğu söylenebilir. Bu hesaplamalara göre Ömer-Gecek jeotermal suları 130-147 °C, Gazlıgöl jeotermal suları 104-119 °C, Sandıklı jeotermal suları 100-120 °C ve

Heybeli jeotermal suları 74-91 °C rezervuar sıcaklıkları vermiştir. Na-K-Mg üçgen diyagramına göre Ömer-Gecek sahasındaki jeotermal sular, olgun olmayan sular ile kısmi denge veya olgun sular arasındaki hat üzerindedir. Gazlıgöl, Sandıklı ve Heybeli bölgesindeki jeotermal sular ise denge durumundan oldukça uzak, olgun olmayan sular grubuna girmektedir.

## 5. Teşekkür

Yazarlar, arazi çalışmalarındaki destek ve yardımlarından dolayı Dr. Yusuf ULUTÜRK'e (AFJET) teşekkür ederler.

## 6. Kaynaklar

Afşin, M., 1991. Afyon-Sandıklı Kuruçay Ovası ve Hüdai Kaplıcalarının Hidrojeoloji İncelemesi. AÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yayınlanmamış), 330 s., Ankara.

Akkuş, İ., Akıllı, H., Ceyhan, S., Dilemre, A., Tekin, Z., 2005. MTA Genel Müdürlüğü, Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri, Envanter serisi 201, 849s., Ankara.

APHA-AWWA-WEF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition, In: Eaton AD, Clesceri LS, Rice EW, Greenberg AE (eds); American Public Health Association, Washington, D.C.

Arnorsson, S., 2000. Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Development and Use, Vienna: International Atomic Energy Agency.

Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983a. The Chemistry of Geothermal Waters in Iceland-III. Chemical Geothermometry in Geothermal Investigations. Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 567-577.

Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983b. The Chemistry of Geothermal Waters in Iceland-II. Mineral Equilibria and Independent Variables Controlling Water Compositions, Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 547-566.

Baba, A., 2004. Environmental impact of the utilization of a geothermal area. Journal of İstanbul Kültür University, 1, 33-38.

Baba, A., Armannsson, H., 2006. Environmental impact of the utilization of geothermal areas. Energy Source Part B 1, 267-278, DOI: 10.1080/15567240500397943.

Bhattacharya, P., Jacks, G., Ahmed, K. M., Routh, J., Khan, A.A., 2002. Arsenic in groundwater of the Bengal

Delta Plain Aquifers in Bangladesh. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 69, 538-545.

Calmbach, L., 1999. AquaChem Computer Code-Version 3.7: Aqueous geochemical analyses, plotting and modelling. Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Ontario, Canada, 184 p.

Dean, W.T., Özgül, N., 1994. Cambrian rocks and faunas, Hüdai area, Taurus Mountains, southwestern Turkey. Bull. Instit. R. Sci. Naturelle de Belgique-Science de la Terre, 64, 5-20.

Demer, S., Memiş, Ü., Özgür, N., 2013. Investigation of hydrogeochemical properties of the Hüdai (Afyon-Sandıklı) geothermal systems, SW Turkey. J. Earth Syst. Sci., 122, 4, 1081-1089.

DMSHY, 2004. Sağlık Bakanlığı Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik. 5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu ile ilgili diğer mevzuat. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, yayın no: 101, 133 s.

EPA, 2002. U.S. EPA, Standart methods for the examination of water and wastewater American Publish Health Assoc.

Erdoğan, B., Uchmann, A., Güngör, T. ve Özgül, N., 2004. Lithostratigraphy of the Lower Cambrian metaclastics and their age based on trace fossils in the Sandıklı region, southwestern Turkey. Geobios, 38, 346-360.

Erişen, B., 1972, Afyon-Heybeli (Kızılkilise) araştırma sahasının jeolojisi ve jeotermal olanakları. MTA Rapor No. 5490, 74s., (yayınlanmamış), Ankara.

Erişen, B., 1976. Afyon bölgesi Ömer-Gecek jeotermal alanında yapılan AF-1 ve AF-3 sondajlarına ilişkin kuyu bitirme raporu, MTA Der. Rap. No:5623, 96s., (yayınlanmamış), Ankara.

Fournier, R. O., 1977. Chemical Geothermometers and Mixing Models for Geothermal Systems. Geothermics, 5, 41-50.

Fournier, R.O., 1979. A Revised Equation for the Na/K Geothermometer. GRC Transac., 3.

Fournier, R. O. ve Potter, R. W., II, 1982. An Equation Correlating the Solubility of Quartz in Water from 25° to 900 °C at Pressures up to 10.000 bars. Geochim. Cosmochim. Acta, 46, 1969-1974.

Fournier, R.O. ve Truesdell, A.H., 1973. An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters. Geochim. Cosmochim. Acta, 37, 515-525.

Gemici, Ü., Tarcan, G., 2004. Hydrogeological and hydrogeochemical features of the Heybeli Spa, Afyon,

- Turkey: Arsenic and other contaminants in the thermal waters. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 72, 1107-1114.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. Geochim Cosmochim Acta, 52, 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., 1983. Gonfiantini, R., Jangi, B.L., Truesdell, A.H., Isotopic and chemical composition of Parbati Valley geothermal discharges, NW Himalaya, Indiana. Geothermics, 5, 51-62.
- Giggenbach, W.F., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. In: D'Amore, F., coordinator), Application of geochemistry in geothermal reservoir development. UNITAR/UNDP publications, Rome, 119-143.
- Göçmez, G., ve Kara, İ., 2005. Geological and hydrogeological study of Afyon-Gazlıgöl geothermal field. World Geothermal Congress, Proceedings, 24-29 April 2005, Antalya, 1-5.
- Gökalp, E., 1970. Gazlıgöl (Afyon) sıcak suları etüt raporu. MTA Rapor No:4366, (yayınlanmamış), Ankara.
- Günay, Y., Derman, A.S., Kozlu, H., Göncüoğlu, C.M. ve Gül, M.A., 1995. Stratigraphy of Lower Paleozoic in Southern Turkey, IGCP Project 351-Early Paleozoic Evolution in NW Gondwana Excursion Guide Book, 3-9.
- Gürsu, S. ve Göncüoğlu, M. C., 2005. Early Cambrian back-arc volcanism in the Western Taurides, Turkey: implications for the rifting along northern Gondwanan margin. Geol Mag. 142(5).
- İTSHY, 2005. Sağlık Bakanlığı: İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 17.02.2005 tarih ve 25730 sayılı Resmi Gazete.
- Karamandere, İ. H., 1972. Afyon K24-b paftası detay jeoloji etüdü ve jeotermal alan olanakları hakkında rapor. MTA Rapor No:5733, (yayınlanmamış), Ankara.
- Karamandere, İ. H., 2008. Afyonkarahisar jeotermal sahalarının jeolojik ve mineralojik evrimi. Termal ve Maden Suları Konferansı. A. E. Türker, A. Yıldız (editörler), Bildiriler kitabı. 24-25 Nisan 2008, 55-69, Afyonkarahisar.
- Kharaka, Y. K. ve Mariner, R. H., 1989. Chemical Geothermometers and Their Application to Formation Waters from Sedimentary Basins. In Naeser, N. D. and McCollin, T. H., editors, Thermal History of Sedimentary Basins, Springer-Verlag, 99-117.
- Kharaka, Y.K., Gunter, W.D., Aggarwal, P.K., Perkins, E.H., ve Debraal, J.D., 1988. SOLMINEQ.88: A computer program for geochemical modeling of water-rock interactions. U.S. Geol. Surv. Water Res. Inv. Rep. 88-4227, 420 p.
- Kozlu, H., Göncüoğlu, M.C., 1995. Infracambrian units in Sandıklı area. (eds: Göncüoğlu M.C. and Derman A.S.) Guide Book to Early Palaeozoic in NW Gondwana. Turkish Association Petroleum Geologists Special Publication, 2, 11-13.
- Kozlu, H., Göncüoğlu, M.C., 1997. Stratigraphy of the Infracambrian rock-units in the western Taurides and their correlation with similar units in Southern Turkey. (eds: Göncüoğlu M.C. and Derman A.S.) Early Palaeozoic in NW Gondwana. Turkish Association Petroleum Geologists Special Publication, 3, 50-61.
- Kristmannsdottir, H., Armannsson, H., 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. Geothermics, 32, 451-461.
- Memiş, Ü., Demer, S., Özgür, N., 2010. Afyon-Sandıklı Hüdai jeotermal sisteminin rezervuar sıcaklığının araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(3), 293-299.
- Metin, S., Genç, I., Bulut, V., 1987. Afyon ve dolayının jeolojisi, MTA Rapor No:8103, (yayınlanmamış), Ankara.
- Mutlu, H., 1996, Geochemical assesment of thermal waters from the Afyon geothermal area: Geothermometry applications and fluid-mineral equilibria., Ph. D. Thesis,, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 169p (yayınlanmamış), Ankara.
- Nicholson, K., 1993. Geothermal fluids, chemistry and exploration techniques. Springer-Verlag, Berlin, 263p.
- Nivea, D. ve Nivea R., 1987. Developments in Geothermal Energy in Mexico. Part 12, A Cationic Geothermometer for Prospecting of Geothermal Resources. Heat Recovery Systems and CHP, 7, 243-258.
- NRC, 1999. Arsenic in Drinking Waters. Subcommittee on Arsenic in Drinking Water, National Research Council. National Academy Press, 330 p.
- Öktü, G., Kara, I . ve Önder, I ., 1997. Afyon ilinde yeralan Ömer-Gecek-Uyuz Hamamı Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl jeotermal sahalarının detay etüdü, MTA Rapor No:10027, 41s., (yayınlanmamış ), Ankara.
- Özgül, N., Bölükbaşı, S., Alkan, H., ve Öztaş, Y., 1991. Göller bölgesi ve Ispartanın Jeolojisi ve Stratigrafisi. TPAO arama grubu rapor no: 3028, 321 s., Ankara (yayınlanmamış).
- Özpinar, Y., 2008. Sandıklı (Afyon) Yöresinde Şabazit ve Fillipsit Mineralleri İçeren Tüflerin Minerolojik



Petrografik ve İyon Değişirme Özellikleri ve Tarımda Kullanılması, GB Anadolu, Türkiye, MTA Dergisi, 137, 27-47.

Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture, Handbook 60, 160p.

Tonani, F., 1980. Some Remarks on the Application of Geochemical Techniques in Geothermal Exploration. Proceedings, Adv. Eur. Geoth. Res. Second Symp., 428-443.

Truesdell, A. H., 1976. Summary of Section III Geochemical Techniques in Exploration. In Proceedings, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, CA, U. S. Government Printing Office, 1, 13-39, Washington, D. C.

Truesdell, A.H. ve Fournier, R.O., 1975. Calculation of Deep Temperatures in Geothermal Systems form the Chemistry of Boiling Spring Waters of Mixed Origin. Proc. Second UN Symposiumon Geothermal Resources, San Fransisco, CA, 837-844.

TS266, 2005. Sular - İnsani tüketim amaçlı sular, TS-266, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Ulutürk, Y., 2009. Ömer-Gecek (Afyonkarahisar) Dolayının Jeolojisi ve Suların Kökenselel Yorumu. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yayınlanmamış), 178s.

Ulutürk, Y., yıldız, A., Bağcı, M. ve Özdeğirmenci, N., 2008. Kızılay (Gazlıgöl-Afyonkarahisar) Maden Suyunun Koruma Alanlarının Belirlenmesi. Termal ve Maden Suları Konferansı. A. E. Türker, A. Yıldız (editörler), Bildiriler kitabı. 24-25 Nisan 2008, 381-393, Afyonkarahisar.

WHO, 1993. WHO (World Health Organization) Guidelines for Drinking Water Quality. Health Criteria and Other Supporting Information, vol. 2. WHO, Geneva.

WHO, 2006. WHO (World Health Organization) Guidelines for Drinking Water Quality. Guidelines for drinking water quality. First addendum to third edition, vol. 1, Rec., WHO Publ., Geneva, 494 p.