

Afyon-Sandıklı Hüdai Jeotermal Sisteminin Rezervuar Sıcaklığının Araştırılması

Ümit MEMİŞ*, Selma DEMER, Nevzat ÖZGÜR

Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama
Merkezi/ISPARTA

Alınış tarihi:29.07.2010, Kabul tarihi:19.10.2010

Özet: Sandıklı-Hüdai jeotermal alanı Afyon ilinin yaklaşık 40 km güneybatısında yer alır. Çalışma alanı volkanik, sedimanter ve metamorfik kayalardan oluşur. Hüdai jeotermal alanının rezervuar kayacı kuvarsitlerdir. Jeotermal akışkanın kullanım alanları sıcaklığına bağlı olarak değiştiğinden, çalışma alanındaki jeotermal sistemin rezervuar sıcaklığı araştırılmıştır. Afyon-Sandıklı jeotermal sahasındaki jeotermal akışkanlar Na-K-Mg üçgen diyagramına göre olgun olmayan sular grubuna girmektedir. Jeotermal akışkanların rezervuar sıcaklıkları silika jeotermometreleri ile 85-120 °C arasında hesaplanmıştır. Entalpi-silika ve entalpi-klorür karışım modelleri sırasıyla 108-134 °C ve 98-120 °C rezervuar sıcaklıkları önermektedirler. Hüdai jeotermal sahası için elde edilen ortalama rezervuar sıcaklığı 110 °C'dir.

Anahtar Kelimeler: Afyon-Sandıklı-Hüdai, Jeotermal Akışkan, Jeotermometre, Karışım Modelleri

Investigation of Reservoir Temperature of the Afyon-Sandıklı Hüdai Geothermal System

Abstract: Sandıklı-Hüdai geothermal field is located approximately 40 km southwest of the province capital of Afyon. The study area consists of volcanic, sedimentary and metamorphic rocks. Reservoir rocks of Hüdai geothermal field are quartzites. The use of geothermal fluids depend on temperature. Therefore, reservoir temperature of geothermal systems in Hüdai area has been investigated. According to the Na-K-Mg triangular diagram geothermal fluids in Afyon-Sandıklı geothermal area belongs to immature waters group. In this study area, geochemical silica thermometers show reservoir temperatures of geothermal waters ranging from 85 to 120 °C. Enthalpy-silica and enthalpy-chloride mixing models suggest reservoir temperatures between 108 and 134 °C and 98 and 120 °C, respectively for the geothermal fluids. The average reservoir temperature obtained for the Hüdai geothermal field is 110 °C.

Keyword: Afyon-Sandıklı-Hüdai, Geothermal Fluid, Geothermometer, Mixing Models

Giriş

Dünyada ve ülkemizdeki sanayileşme, nüfus artışı enerji alanındaki bilimsel ve teknolojik çalışmaları zorunlu hale getirmiştir. Dünyadaki enerji tüketiminin yaklaşık %90'ı fosil yakıtlar olarak bilinen kömür, petrol ve doğal gazdan karşılanmaktadır. Bu fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükenerek olması, yeni rezervlerin üretiminin oldukça pahalı olması ve çevresel kirlilik yaratması, alternatif enerji kaynaklarının devreye girmesini zorunlu hale getirmiştir. Alternatif enerji kaynaklarından olan jeotermal enerji tükenen enerji kaynakları ile yarışacak potansiyelde olmamasına rağmen yenilenebilir, uygun teknolojilerin kullanılması halinde ise kirlilik etkisi olmayan, yerli bir enerji türüdür. Jeotermal akışkanın kullanım alanı sıcaklığına bağlı olarak değişir. Ölçülen kuyu başı sıcaklığı rezervuar sıcaklığını yansıtmayıp daha düşük sıcaklık değerleri verdiği için rezervuar sıcaklığı doğru hesaplanarak jeotermal akışkanın kullanım potansiyeli artırılmaktadır. Kuyu başı sıcaklığının düşmesindeki en büyük etki yeraltısuyunun jeotermal akışkana karışmasından kaynaklanmaktadır. Afyon Sandıklı Hüdai jeotermal sistemi hem sağlık turizmde hem de konut ısıtması olarak kullanılan bir sistemdir. Çalışma alanında kaplıca için açılmış 3 adet jeotermal sondaj kuyusu ile Sandıklı'da 5100 konutu ısıtmak için açılmış 6 adet

jeotermal sondaj kuyusu bulunmaktadır. Konutlara verilen suyun sıcaklığı 62°C'dir. Jeotermal sistemin rezervuar sıcaklığı ve potansiyeline bağlı olarak yeni açılacak kuyular ile de Sandıklı'da 2500 konutun daha ısıtılması planlanmaktadır. Bu çalışmada Afyon Sandıklı Hüdai jeotermal sisteminin jeotermometre ve karışım modelleri kullanılarak rezervuar sıcaklığı belirlenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Çalışma alanının jeoloji haritası önceki çalışmalardan yararlanarak hazırlanmıştır. Arazi çalışmalarında 4 adet jeotermal sondaj kuyusundan örnek alınmıştır. Araziye örnek alımı, örneğin laboratuvara getirilmesi ve korunması standartlara uygun olarak yapılmıştır. Hidrojeokimyasal analizler için örnek alanında polipropilen örnek şişeleri kullanılmıştır. Örnek alınan şişeler en az 3 kez örnek suyu ile çalkalanmış daha sonra içinde hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilerek kapakları kapatılmıştır. Laboratuvar ortamına getirilinceye kadar geçen sürede katyon örneklerinin korunması amacıyla derişik HNO₃ ilave edilerek pH<2 olması sağlanmıştır. Örnekler şişelendikten ve etiketlendikten sonra +4°C'de muhafaza edilerek laboratuvara getirilmiştir. Alınan örneklerin

hidrojeokimyasal analizleri ise 2-3 gün içerisinde tamamlanmıştır. Çalışma kapsamında alınan tüm örneklerin hidrojeokimyasal analizleri Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan cihazlar kullanılarak yapılmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Çalışmalarda kullanılan in-situ ve hidrojeokimyasal analiz cihazları ve özellikleri

Analiz parametresi	Cihazın adı ve markası
Sıcaklık	Termometre-Testo-95-1
pH	pH metre-WTW 330i
Elektriksel iletkenlik (EC)	Elektriksel iletkenlik ölçer-WTW cond 340i
Alkalinite	Alkalinite test kiti-Merck Aquamerck 11109
Asidite	Asidite test kiti-Merck Aquamerck 11109
Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Si ⁴⁺ , Li ⁺	Perkin Elmer ICP-OES 2100 DV
F ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Dionex ICS-3000 İyon Kromatografisi

Na-K-Mg üçgen diyagramı jeotermal suların kökenini, dengeye ulaşmış olup olmadıklarının kontrolünü ve uygun jeotermometrelerin seçiminde kullanılır. Giggenbach (1988) tarafından geliştirilen Na-K-Mg üçgen diyagramı Na-K ve K-Mg jeotermometrelerinin üçgen diyagrama aktarılması ile oluşturulmuştur. Jeotermometreler, özellikle henüz üretime geçilmeyen yeni sahalar hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılan ve rezervuar akışkanının sıcaklığını tahmin etmek için rezervuardaki akışkan içerisindeki mineral çözünürlüğü ve katyon değişimi tepkimeleri baz alınarak geliştirilen faydalı ve değerli araçlardır. Jeotermal akışkanın kullanım alanlarının saptanabilmesi için yapılacak derin sondajlardan önce uygulanacak çeşitli jeotermometre yöntemleri ile haznedeki sıcaklıklarının tahmin edilmesi yapılan jeotermal araştırmaların önemli bir parçasını oluşturur (Ellis, 1979; Fournier, 1977; Fournier vd., 1974; Truesdell, 1976; White, 1970; Tarcan, 2002). Karışım modelleri, keşfedilen yeni bir jeotermal sahanın rezervuar sıcaklığını belirlemek ya da bir jeotermal sahanın gelişim sürecinde ve sahanın geliştirilmesinde kullanılabilen modellerdir. Jeotermal sular, yüzeye çıkış sırasında diğer sularla karışabilir. Silika ve klorür miktarının jeotermal suyun kökeninde olduğu gibi korunduğu varsayılarak, Entalpi-Silika (Fournier, 1977) ve Entalpi-Klorür (Truesdell ve Fournier, 1975) değişimi ile karışım oranları, maksimum hazne kaya sıcaklığı açıklanabilir.

Bu çalışmada Giggenbach (1988) diyagramı ile jeotermal akışkana yeraltısuyunun etkisi, jeotermometreler ve Entalpi-Silika ve Entalpi-Klorür karışım modelleri ile rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır.

Araştırma Bulguları

Çalışma Alanının Jeotektonik Konumu ve Jeolojisi

Anadolu'nun içinde yer aldığı Alp-Himalaya dağ oluşum kuşağı, Afrika/Arabistan ve Hindistan Levhaları'nın

kuzeye doğru hareket etmeleri ve Avrasya Levhası ile çarpışmaları sonucunda oluşmaktadır. Bu kompleks jeolojik sürecin Doğu Akdeniz bölümünde Anadolu-Ege bloğu saatin tersine rotasyonel bir hareketle Helenik yayına doğru kaçmaktadır. Bu yanıl kaçış hareketinin kuzey sınırını Kuzey Anadolu Fay Zonu belirlemekte, güney sınırını ise doğuda Doğu Anadolu Fay Zonu, güney Anadolu'da ise Kıbrıs ve Helenik yayları oluşturmaktadır. Türkiye'deki Geç Miyosen'de Arap Levhası ile Anadolu Levhası arasında yer alan Neo-Tetis Okyanusu'nun güney kolunun Bitlis-Zagros kuşağının kapanmasıyla başlayan neotektonik dönemde Arap Yarımadası, Anadolu Levhası ile çarpışmasından sonra kuzeye doğru hareket ettirerek bölgenin yükselmesine neden olmuştur. Bu yükselme ile Doğu Anadolu'daki kıta kabuğu kalınlaşmıştır. Anadolu Bloğu Pliyosen'den başlayarak Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca batı yönünde harekete geçmiştir. Yunanistan güneyinden Ege Denizi güneyine ulaşan Hellenik Yayı'nın da etkisiyle bu levha genişlemiş ve Batı Anadolu'daki horst-graben yapıları oluşmuştur. Doğu Anadolu'daki sıkışmanın etkisiyle oluşan yükselme nedeniyle bölgede jeotermal alanlar bulunmamakta iken Batı Anadolu'nun genişlemesi nedeniyle kabuk incelmeye ve pek çok sıcaklıkta jeotermal alanlar oluşmuştur. Çalışma alanında ısıtıcı görevini üstlenen Afyon volkanizması bu tektonik hareketlerin sonucu olarak meydana gelmiştir (Blumenthal, 1962; Brunn vd., 1971; Poisson, 1984, 1990, Poisson vd., 1984; Marcoux, 1987; Şaroğlu ve Yılmaz, 1987; Kissel vd., 1990; Frizon vd., 1995; Çelik ve Sabah, 2002; Ateş, 2007).

Çalışma alanında tabanda Paleozoyik yaşlı Kestel Yeşilist formasyonuna ait Koçgazi fillit üyesi, Hüdai üyesi, Çaltepe formasyonu ve Seydişehir formasyonu bulunur. Bu birimler üzerine Mesozoyik'te Karatepe formasyonu, Derealanı formasyonu ve Akdağ formasyonu gelir. Senozoyik yaşlı birim ise Sandıklı formasyonudur. Kuvaterner yaşlı alüvyon ve travertenler en genç birimleri oluşturmaktadır (Şekil 1).

Koçgazi fillit üyesi (pEkk). Afyon-Sandıklı jeotermal sisteminin geçirimsiz taban kayacını oluşturan birim çok düşük metamorfizmalı bej, kahvemsiz bej renkli, ince taneli kumtaşı, siyah ve kahve-mor renkli silttaşı ve bunlarla yer yer arakatlı metabazik sillerinden oluşur (Afşin, 1991; Gürsu ve Göncüoğlu, 2005).

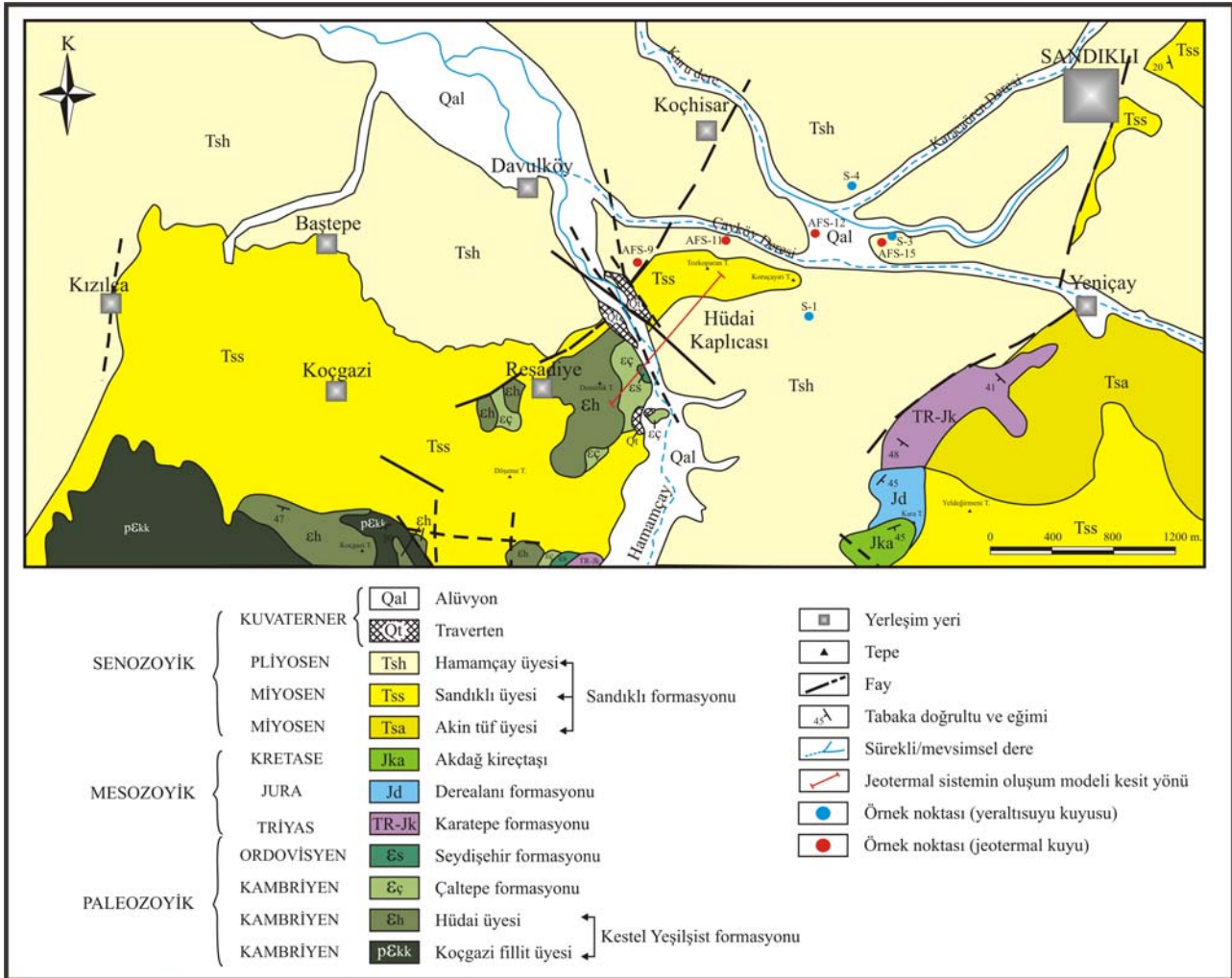
Hüdai üyesi (Eh). Hüdai formasyonu çoğunlukla kuvarsitlerden meydana gelmekte ve yer yer şistlerle aralanmalı bulunmaktadır. Kuvarsitler orta kalın katmanlı yer yer düzlemsel çapraz katmanlı, katman içi laminalı, açık gri, demirpası ve pembe renklidir (Afşin, 1991). Birimin kalınlığı 400-600 m dolayındadır (Afşin 1991; Özgül vd., 1991; Günay vd., 1995). Afyon Sandıklı jeotermal sistemi için Hüdai kuvarsitler rezervuar kayacı oluşturmaktadır.

Çaltepe formasyonu (Eç). Birim başlıca dolomit, siyah renkli neritik kireçtaşı ve en üst düzeylerinde alacalı renkli yumru kireçtaşlarından oluşmaktadır (Dean ve Özgül, 1994).

Seydişehir formasyonu (Es). Jeotermal sistemin örtü kayacını oluşturan birim miltaşı, şeyl ve kuvars kumtaşı aralanmasından oluşmaktadır. İstifin alt düzeylerinde

ince, alacalı renkli ve yumru kireçtaşı bantları izlenmektedir (Gürsu ve Güncüoğlu, 2005). Karatepe formasyonu (Tr-Jk), Birim en altta, bordo renkli

yer yer açık kahve, demirpası ve kirli sarı renklere çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşlarından oluşur (Afşin, 1991; Özpınar, 2008).



Şekil 1. Afyon-Sandıklı Hüdai jeotermal alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Memiş, 2010 tarafından Öngür, 1973 ve Afşin, 1991'den değiştirilerek)

Derealanı formasyonu (Jd), Bordo, kirli sarı renkli marnlı kumtaşı ile başlayan birim, üste doğru gri, mor, kirli sarı, yeşilimsi, kahve renklere kalın katmanlı kumlu, siltli ve killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ardalanması şeklinde devam eder (Afşin, 1991; Özpınar, 2008).

Akdağ formasyonu (Jka), Altta masife yakın belirgin olmayan şekilde tabakalı açık gri renkli, hafif kristalize, kalker kumu ve breşik kireçtaşları ile başlar, yukarı doğru ince tabakalı ve arasında çört bantları bulunan kireçtaşları ve daha üstte çört oranı artarak dolomitik özellikte kireçtaşları yer alır (Afşin, 1991).

Sandıklı formasyonu (Ts), Çalışma alanında geniş bir yayılım sunan ve jeotermal sistem için ısıtıcı görevi üstlenen Miyosen volkanizmasının ürünü olan Sandıklı formasyonu Üst Miyosen yaşlı Akin tuf üyesi, Üst Miyosen yaşlı Sandıklı üyesi ve Pliyosen yaşlı Hamamçayı üyesinden oluşmaktadır (Afşin, 1991).

Akin tuf üyesi (Tsa), Akin tuf üyesi ignimbiritik tuf breşi, lapilli, kum tufü, süngertaşı ve volkanik çakıltaşlarından oluşmuştur. Birim kireçtaşı, süngertaşı parçaları ile kum kil boyutunda piroklastik malzeme içeren tuf breşi ile

başlar. Sonra süngertaşı ve kum tufü ile devam eden istif, tuf breşi ile sona erer (Afşin, 1991).

Sandıklı üyesi (Tss), Sandıklı üyesi, tabanda çakıltaşı ve kumtaşları ile başlayan birim, yukarı doğru kalın tabakalı marnlarla yer yer ardalanmalı olarak kimi yerde kömür ara seviyeli şeklinde bulunarak killi kireçtaşları ve çamurtaşları ile sona erer (Afşin 1991).

Hamamçay üyesi (Tsh), Birim gevşek dokulu volkanik çakıltaşı, çakıltaşı, kireçtaşı katkılı çakıltaşı ve ince çakıl, kum ve siltten meydana gelir (Afşin, 1991).

Traverten (Qt), Hüdai kaplıcası çevresinde yaklaşık 20 m kalınlığında ve 800 m uzunluğunda iki çizgi halinde KB-GD yönünde uzanım sunar. Travertenler, iki paralel fay boyunca oluşmuş olup, bu faylar tamamen travertenlere örtülmüştür (Mutlu, 1996).

Alüvyon (Qal), Sandıklı ovasındaki alüvyon Hamamçayı ve Kuru derenin bıraktığı sıkılaşmamış çakıl, kum, silt ve kil gibi çökellerden oluşmuştur (Afşin, 1991).

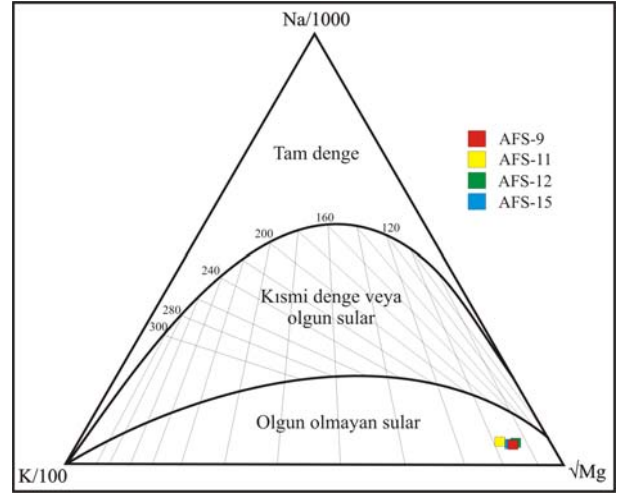
Jeotermometre ve karışım modelleri uygulamalarının değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında Sandıklı jeotermal sahasından 4 adet jeotermal akışkandan örnek alınmış ve bu örneklerde in-situ ölçümleri ve hidrojeokimyasal analizler yapılmıştır (Çizelge 2). Jeotermal akışkan örneklerindeki sıcaklık ölçümleri 69-75°C arasında, EC değerleri ise 1982-2300 µS/cm arasındadır. Jeotermal akışkanların pH değerleri 6,47 ile 7,26 arasında değişmekte olup genel olarak asidik bir karakter sergilerler. AFS-15 nolu jeotermal akışkan örneğinin pH değeri (7,26) diğer jeotermal akışkan örneklerinde göre daha yüksek ölçülmesinin nedeni örnek alınımının kuyunun yeni açıldığı zamanda yapılmasından kaynaklanmaktadır. Çalışma alanındaki jeotermal akışkan Na-SO₄-HCO₃ tipli sular fasiyesine girmektedir (Memiş, 2010).

Çizelge 2. Jeotermal akışkanların in-situ ve hidrojeokimyasal analiz sonuçları (Memiş, 2010)

Örnek no	AFS-9	AFS-11	AFS-12	AFS-15
T (°C)	69,00	73,60	73,50	75,00
pH	6,52	6,48	6,47	7,26
EC (µS/cm)	1982	2300	2250	2020
Na ⁺ (mg/l)	205,90	276,00	249,80	245,40
K ⁺ (mg/l)	34,89	57,92	46,36	47,97
Mg ⁺⁺ (mg/l)	20,56	26,82	26,92	27,45
Ca ⁺⁺ (mg/l)	130,30	150,82	155,48	150,10
SiO ₂ (mg/l)	64,77	68,62	68,32	76,80
Li (mg/l)	0,19	0,30	0,28	0,30
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	561,20	579,50	573,40	481,90
Cl (mg/l)	101,15	100,88	93,60	109,51
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	506,53	533,88	517,88	629,49
F ⁻ (mg/l)	3,91	3,77	3,35	4,85

Na-K-Mg üçgen diyagramına (Giggenbach, 1988) göre Sandıklı bölgesindeki jeotermal sular denge durumundan oldukça uzak, olgun olmayan sular grubuna girmektedir. Dolayısıyla bu suların rezervuar sıcaklığının belirlenmesinde katyon jeotermometrelerinin kullanılması hatalı sonuçlar verebilir (Şekil 2). Çalışma alanındaki jeotermal suların silika jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları Çizelge 3'te verilmiştir. Kuvars jeotermometrelerinin Sandıklı bölgesi için ölçülen kuyu başı sıcaklıkları da dikkate alınarak 110-120°C civarında bir rezervuar sıcaklığı yansıttığı söylenebilir. Kalsedon jeotermometreleri ile de 85-100 °C civarında bir rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır. Kalsedon jeotermometreleri kuvars jeotermometrelerine göre daha düşük sıcaklıklar vermiştir. Bu durum kuvarsın kalsodona kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda çözünmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Fournier (1977)'in α-kristobalit β-kristobalit ve amorf silika jeotermometreleriyle de rezervuarın sıcaklık hesaplamaları yapılmıştır. Ancak bu jeotermometreler ile hesaplanan sıcaklıklar Sandıklı bölgesi için beklenen rezervuar sıcaklığın çok altında değerler verdiği için bu sıcaklıklar dikkate alınmamış ve Çizelge 3'te gösterilmemiştir.



Şekil 2. İncelenen jeotermal akışkanların Na-K-Mg üçgen diyagramı (Giggenbach, 1988) üzerindeki dağılımları

Çizelge 3. Çalışma alanındaki jeotermal akışkanın silika jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (Memiş, 2010)

Örnek no	AFS-9	AFS-11	AFS-12	AFS-15
Sıcaklık (°C)	69,00	73,60	73,50	75,00
Kuvars adyabatik ^a	114,29	117,18	116,96	122,96
Kuvars max. buh. ^a	113,28	115,76	115,57	120,68
Kuvars 25-330°C ^b	114,56	117,43	117,21	123,16
Kuvars, adyabatik ^b	113,66	116,28	116,08	121,46
Kuvars 0-350°C ^c	100,98	104,00	103,77	110,06
Kuvars 0-350°C-adyabatik ^c	100,93	103,64	103,43	109,01
Kalsedon ^a	85,35	88,50	88,26	94,81
Kalsedon ^d	85,72	88,65	88,42	94,50

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

Katyon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları da Çizelge 4'te verilmiştir. Na-K-Ca jeotermometresi hariç diğer katyon jeotermometreleri silika jeotermometrelerinden daha yüksek rezervuar sıcaklıkları vermiştir. Bunun nedeni, silika jeotermometreleri kaynağın rezervuar sıcaklıklarını belirtirken, özellikle Na-K jeotermometrelerinin daha derin ve sıcak sistemlere işaret etmesindedir (Memiş, 2010).

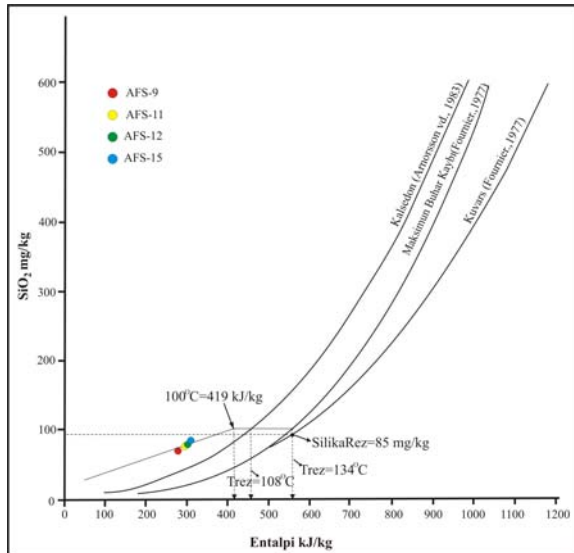
Çizelge 4. Çalışma alanındaki jeotermal akışkanların katyon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (Memiş, 2010)

Örnek no	AFS-9	AFS-11	AFS-12	AFS-15
Sıcaklık (°C)	69,00	73,60	73,50	75,00
Na-K ^a	252,81	284,63	265,89	273,65
Na-K ^b	296,33	332,59	311,21	320,05
Na-K ^c	255,92	285,32	268,04	275,21
Na-K ^d	261,02	281,88	269,70	274,78
Na-K ^e	266,94	290,14	276,57	282,22
Na-K ^f	252,67	275,40	262,10	267,64
Na-K ^g	278,38	299,47	287,16	292,29
Na-K-Ca ^h	108,74	129,29	117,83	119,93
Li-Mg ⁱ	264,60	246,21	250,55	247,36

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

Truesdell ve Fournier (1977) tarafından geliştirilen Entalpi-silika karışım modelinde kalsedona ait termodinamik veriler Arnorsson vd. (1983a,b)'den, kuvarsa ait termodinamik veriler ise Fournier (1977)'den alınmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi kalsedon çözünürlük eğrisini kestiği nokta 108 °C değerinde bir rezervuar sıcaklığı önermektedir. Bu da kalsedon jeotermometresi ile hesaplanan (85-100°C) rezervuar sıcaklığı ile uyumludur. Kuvars çözünürlük eğrisini kestiği noktada ise 134°C değerinde bir rezervuar sıcaklığı göstermektedir (Şekil 3). Bu da kuvars jeotermometresi ile hesaplanan (110-120°C) rezervuar sıcaklığı ile örtüşmektedir.

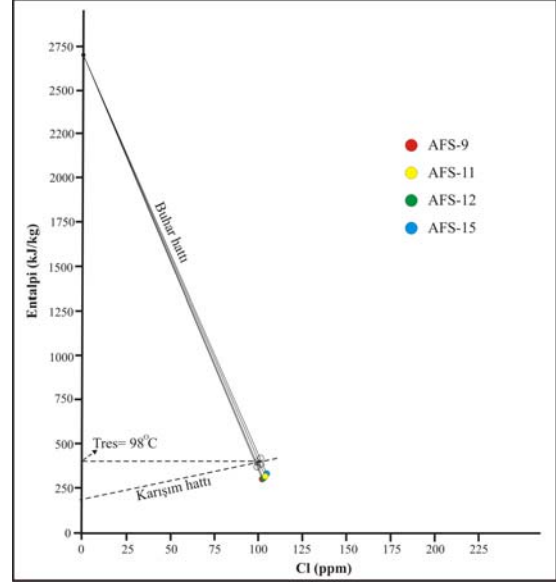
Doğrunun maksimum buhar kaybının olduğu kuvars çözünürlük eğrisini kestiği noktadan buhar kaybının olmadığı kuvars çözünürlük eğrisine düşey bir doğruyla inildiğinde, eğriyi kesen nokta Sandıklı jeotermal suları için 85 mg/kg'lık bir rezervuar silika derişimi önermektedir (Şekil 3).



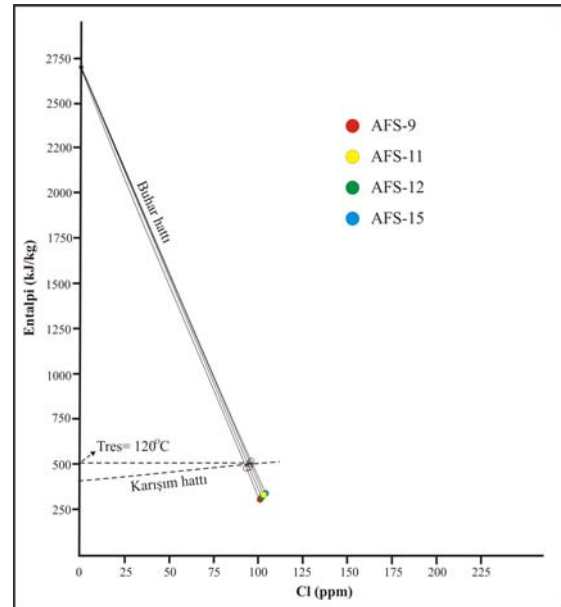
Şekil 3. Çalışma alanındaki jeotermal akışkanlara ait Entalpi-Silika diyagramı (Memiş, 2010)

Entalpi-klorür diyagramının oluşturulmasında, genellikle silika jeotermometreleriyle hesaplanan sıcaklıklar kullanılır. Çalışma alanı jeotermal akışkanları için oluşturulan iki ayrı diyagramda (Şekil 4 ve 5), kalsedon ve kuvars (adyabatik soğuma) jeotermometrelerinden

yararlanılmıştır. Kalsedon jeotermometresi (Arnorsson vd.,1983a,b) kullanılarak hazırlanan diyagram 98 °C'lik bir rezervuar sıcaklığını işaret eder. Bu değer de kalsedon jeotermometresi ile hesaplanan (85-100°C) rezervuar sıcaklığı ile uyumludur. Kuvars (adyabatik soğuma) jeotermometresi (Fournier, 1977) kullanılarak hazırlanan diyagram ise 120 °C'lik bir rezervuar sıcaklığı göstermektedir. Bu değer de kuvars jeotermometresi ile hesaplanan (110-120°C) rezervuar sıcaklığı ile örtüşmektedir (Şekil 4 ve 5; Memiş, 2010).



Şekil 4. Çalışma alanındaki jeotermal akışkanlara ait Entalpi-Klor diyagramı (Memiş, 2010)



Şekil 5. Çalışma alanındaki jeotermal akışkanlara ait Entalpi-Klor diyagramı (Memiş, 2010)

Sonuçlar

Çalışma alanındaki jeotermal suların silika jeotermometreleri ve katyon jeotermometreleri ile rezervuar sıcaklıkları hesaplanmıştır. Kuvars jeotermometrelerinin 110-120°C civarında bir rezervuar sıcaklığı yansıttığı söylenebilir. Kalsedon

jeotermometreleri ile de 85-100 °C civarında bir rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır. 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. Karışım modellerinden, entalpi-silika karışım modeli kalsedon ve kuvarsa göre, sırasıyla yaklaşık 108 ve 134 °C, entalpi-klorür karışım modeli ise kalsedon ve kuvarsa göre, sırasıyla yaklaşık 98 ve 120 °C bir rezervuar sıcaklıkları önermektedirler. Bunlar kuvarsa ve kalsedon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları ile uyumludurlar. Hüdai jeotermal sahası için elde edilen rezervuar sıcaklığı 110 °C civarındadır. Çalışma alanındaki rezervuar sıcaklığı ve kuyu başı sıcaklıkları arasındaki farkın jeotermal akışkana

yeraltısuyunun karışması sonucunda olduğu düşünülmektedir. Çalışma alanında açılan sondaj kuyularının miktarının her geçen gün artması ve reenjeksiyon kuyularının devreye sokulmaması nedeniyle rezervuardaki jeotermal akışkanın sıcaklığında ilerleyen yıllarda düşmeler olması muhtemeldir.

Teşekkür

Bu çalışma SDÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi tarafından desteklenen projenin (proje no: 1894-YL-09) bir ürünüdür. Yazarlar, maddi desteklerinden dolayı, SDÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimine teşekkür ederler.

Kaynaklar

- Afşin, M., 1991. Afyon-Sandıklı Kuruçay Ovası ve Hüdai Kaplıcalarının Hidrojeoloji İncelemesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yayınlanmamış), 330s.
- Arnorsson, S., 2000. Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Development and Use, Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E. ve 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. ve 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.
- Ateş, Ö., 2007, Hıdırlar (Çanakkale-Yenice) Jeotermal Sahasının Hidrojeokimyasal Özellikleri ve Tektonizmaya İlişkisi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), 130s.
- Blumenthal, M., 1962. Das Taurishce Hochgebirge des Aladağ, neure Forschungen zu zeiner Geographie, Stratigraphie ond Tektonik, MTA Enstitüsü yayını, Seri D, 6, 1-136.
- Brunn, J.H., Dumont, J.F., De Graciansky, P.C., Gutnic, M., Juteau, T., Marcoux, J., Poisson, A., 1971. Outline of the Geology of the Western Taurides. In *Geology and History of Turkey* (ed A.S. Campwell), Petroleum Exploration Society of Libya, Tripoli, 225-257.
- Çelik, M.Y. ve Sabah, E., 2002. The Geological and Technical Characterization of Ömer-Gecek Geothermal Area and the Environmental Impact Assessment of Geothermal Heating System in Afyon, Turkey. *Environmental Geology*, 41, 942-953.
- Dean, W.T. ve Özgül, N., 1994. Cambrian Rocks and Faunas, Hüdai area, Taurus Mountains, Southwestern Turkey. *Bull. Institut. R. Sci. Naturelle de Belgique-Science de la Terre*, 64, 5-20.
- Ellis, A. J., 1979. Chemical Geothermometry in Geothermal Systems, *Geothermics*, 25, 219-226.
- 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 Truesdell, A.H. 1973. An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 515-525.
- 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., White, D. E. ve Truesdell, A. H., 1974. Geochemical Indicators of Subsurface Temperature – Part 1, Basic Assumptions. *J. Res. USGS*, 2, 259-261.
- Frizon de Lamotte, D., Poisson, A., Aubourg, C., ve Temiz, H., 1995. Post-Tortonian Westward and Southward Thrusting in the Core of the Isparta Re-entrant (Taurus, Turkey). *Geodynamic Implications. Bull. Soc. Geol. France*, 166, 59-67.

- Giggenbach, W.F, 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. *Geochim Cosmochim Acta*, 52, 2749-2765.
- 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. Batı Torosların (Sandıklı GB'sı, Afyon) Geç Neoproterozoyik ve Erken Paleozoyik Yaşlı Birimlerinin Jeolojisi ve Petrografisi. *MTA Dergisi*, 130, 29-55.
- Kharaka, Y. K. ve Mariner, R. H., 1988. 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.
- Kissel, C., Averbuch, O., Frizon De Lamotte, D., Monod, O. ve Allerton, S., 1990. First Paleomagnetic Evidence of a Post-Eocene Clockwise Rotation of the Western Taurus Thrust Belt, East of the Isparta Re-entrant (Southwestern Turkey). *Earth and Planetary Science Letters*, 117, 1-14.
- Marcoux, J., 1987. Histoire et Topologie de la Neotethys. These de Doctorat Detat. L'Universite Pierre et Marie Curie, Paris, 569p.
- Memiş, Ü., 2010. Afyon-Sandıklı Hüdai Jeotermal Alanının Hidrojeokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi ve İz Element Kirliliğinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), 64 s.
- 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, 169 p (yayımlanmamış), Ankara.
- 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.
- Öngür, T., 1973. Sandıklı (Afyon) Jeotermal Araştırma Bölgesine İlişkin Jeolojik Durum ve Jeotermal Enerji Olanakları. MTA Rapor No: 5520, Ankara (yayımlanmamış).
- Özgül, N., Bölükbaşı, S., Alkan, H., ve Öztaş, Y., 1991. Göller Bölgesi ve Isparta'nın Jeolojisi ve Stratigrafisi. TPAO arama grubu rapor no:3028, 321 s., Ankara (yayımlanmamış).
- Özpinar, Y., 2008. Sandıklı (Afyon) Yöresinde Şabazit ve Fillipsit Mineralleri İçeren Tüflerin Minerolojik Petrografik ve İyon Değiştirme Özellikleri ve Tarımda Kullanılması, *GB Anadolu, Türkiye. MTA Dergisi*, 137, 27-47.
- Poisson, A., 1984, The Extension of the Ionian Trough into Southwestern Turkey. In *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*. (eds: Dixon, J.F. and Robertson A.H.F.). Special Publication 17, Geological Society, London, 241-250.
- Poisson, A., 1990. Neogene Thrust Belt in Western Taurides. The Imbricate Systems of Thrust Sheets Along a NNW-SSE Transect. *IIESCA-1990*, 224-235.
- Poisson, A., Akay, E., Dumont, J.F. ve Uysal, Ş., 1984. The Isparta Angle: A Mesozoic Paleorift in the Western Taurides. *Geology of the Taurus Belt* (eds., Tekeli, O., and Göncüoğlu, M.C.). International Symposium. 11-26, Ankara/Turkey.
- Şaroğlu, F., ve Yılmaz, Y., 1987. Geological Evolution and Basin Models During Neotectonic Episodein the Episodein the Eastern Anatolia. *Bull. Min. Res. Exp.*, 107, 74-94.
- Tarcan, G., 2002. Jeotermal Su Kimyası. Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi (Jenarum) Yaz Okulu Ders Notları, 230-272, İzmir.
- 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 Franscisco, CA, 837-844.
- Truesdell, A.H. ve Fournier, R.O., 1977. Procedure for Estimating the Temperature of a Component in Mixed Water by Using a Plot of Dissolved Silica vs. Enthalpy, *J. Res. USGS*, 5.
- White, D. E., 1970. Geochemistry Applied to the Discovery, Evaluation and Exploitation of Geothermal Energy Resources. *Geothermics, Special Issue*, 2 (1), 58-80.