



**DİKİLİ-KAYNARCA (İZMİR) JEOTERMAL SİSTEMLERİNİN HİDROJEOLOJİK
VE JEOKİMYASAL DEĞERLENDİRİLMESİ**

**(HYDROGEOLOGICAL AND HYDROGEOCHEMICAL ASSESSMENTS OF THE
DİKİLİ-KAYNARCA (İZMİR) GEOTHERMAL SYSTEMS)**

Tuğbanur ÖZEN*, Gültekin TARCAN*

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışma Dikili-Kaynarca jeotermal alanlarında yapılan hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal çalışmaların değerlendirilmesini kapsamaktadır. İnceleme alanı içerisinde temeli oluşturan Tersiyer yaşlı Yuntdağ volkaniti-I jeotermal sistemlerin akiferidir. Bu birimi örten Demirtaş piroklastikleri geçirimsiz olduklarından örtü kayaç özelliğindedir. İnceleme alanı içerisinde soğuk yeraltı suları açısından akifer olma özelliği taşıyan önemli bir birim de alüvyondur.

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmış olan hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop yapılan çalışmalarına göre jeotermal akiferin beslenme alanı Kozak Bölgesi'dir. Meteorik kökenli ve hemen hemen hiç trityum içermeyen termal sular en az 50 yıllık yeraltı dolaşımına sahiptir. İnceleme alanındaki sıcak sular iki ayrı hidrokimyasal fasiyeste olup, Dikili Ilıcaları Na-HCO₃-SO₄, Kaynarca sıcak suları Na-SO₄-HCO₃ tipi sulardır. Çeşitli kimyasal jeotermometrelerle hesaplanan jeotermal akifer sıcaklıkları Dikili için 120-150°C, Kaynarca için ise 160-200°C'dir.

This study contains hydrogeological and hydrogeochemical studies of the Dikili-Kaynarca (İzmir) fields. In the study area, the oldest Yuntdağ volcanic-I is the aquifer of the geothermal systems. It is covered by Demirtaş pyroclastics that play a role of cap rock because of their impermeabilities. From the point of view hydrogeology, alluvium is the other important unit, which is the aquifer of cold ground waters among the geological formations in the study area.

According to hydrogeological investigations, made by different researchers and isotopic data the recharge area of the geothermal aquifers is located in Kozak Region. The types of thermal waters are Na-HCO₃-SO₄ in Dikili Spa and Na-SO₄-HCO₃ in Kaynarca. Thermal waters are of meteoric origin and the low tritium activities of them indicate a minimum age of 50 years in subsurface. Aquifer temperatures of the geothermal systems obtained by the chemical geothermometers vary between 120 to 150°C in Dikili geothermal area and 160-200°C in Kaynarca.

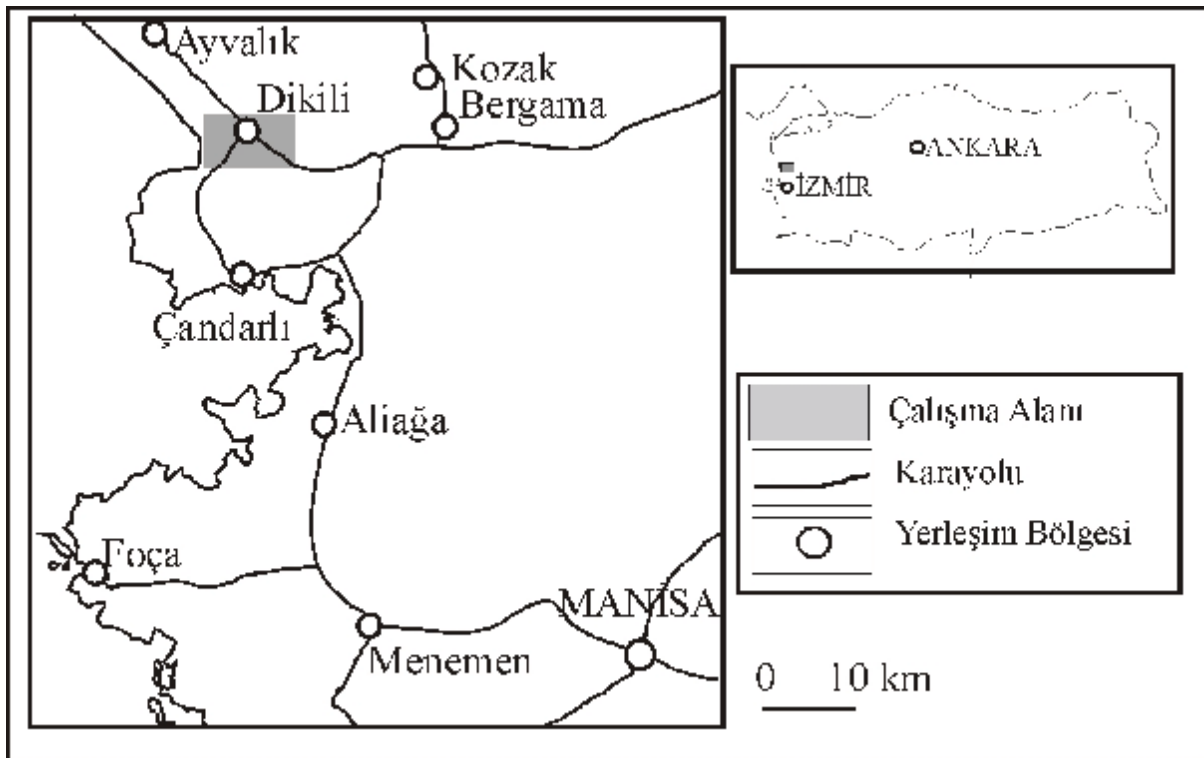
ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS

Jeotermal sistemler, Hidrojeoloji, Hidrojeokimya, Mineral doymunlukları, Dikili, İzmir
Geothermal systems, Hydrogeology, Hydrogeochemistry, Mineral saturations, Dikili, İzmir

* DEÜ, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İZMİR

1. GİRİŞ

İnceleme alanı, Batı Anadolu’da, İzmir İli’nin yaklaşık 100 km kuzeyindedir (Şekil 1). Volkanik kayaların yaygın olduğu alanda soğuk ve sıcak su kaynakları bulunmaktadır. Çalışma alanında bulunan sıcak su kaynakları bağıl olarak yüksek sıcaklıklı termal sular olup, tektonizma tarafından kontrol edilmektedir. Bu çalışmada, inceleme alanında bulunan sıcak suların geçmiş yıllarda yapılmış çalışmalara ait kimyasal analiz sonuçlarından yararlanılmıştır. Mevcut kimyasal analizlerin ışığında inceleme alanı içerisinde yer alan yeraltı suyu taşıyan birimlerin hidrojeolojik özellikleri incelenmiştir. Alandaki sıcak suların kökenleri saptanmış, hazne sıcaklıkları yapılan jeotermometre hesapları ile kalitatif ve kantitatif olarak değerlendirilmiştir. WATCH 2.1 kimyasal türleştirme programı kullanarak, sıcak suların akifer kimyası ve mineral doygunlukları incelenmiştir (Arnorsson vd., 1982; Bjarnason, 1994). Elde edilen veriler önceki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanının yeri

2. JEOLojİ

İnceleme alanında gözlenen volkanik kayalar Yuntdağ volkanitleri olarak adlandırılmış ve üçe ayrılmıştır (Ty_1 , Ty_2 , Ty_3). Bu volkanik kayaların yaşı Miyosen–Pliyosen olarak tahmin edilmiştir (Akyürek ve Sosyal, 1978). İnceleme alanı içerisinde en yaşlı birim Tersiyer yaşlı Yuntdağ volkaniti-I (Ty_1) Dikili İlıcaları ve ılıcaların kuzeybatı kısımlarında yüzeylenir. Bu kayalar genel olarak hornblend andezit ve biyotit hornblend andezit türündedir. Bazen aynı kökenli tuf breşi içerir. Çoğunlukla hidrotermal alterasyon etkisindedir ve açık griden koyu-yeşilimsi griye değişen renklerde alterasyon gözlenir (Şekil 2 ve Şekil 3). Bu kayalardaki bazı çatlaklar silis minerali, kalsit ve jips dolguludur. Ayrıca silisleşmiş ve killeşmiş alterasyon zonlarına da sıkça rastlanmaktadır. Bu birimi örten Tersiyer yaşlı Demirtaş piroklastikleri, Dikili İlıcası'nın güneybatısında çok dar bir alanda gözlenmektedir.

Kalınlıkları 100 m'den azdır. Kaynarca civarındaki depresyon zonunda çok ince çökeller halinde, Dikili Ilıcası'nın güneyinde de bir zayıf alterasyon zonu şeklinde bulunur. Demirtaş piroklastikleri altere olmamış felsik piroklastikler, dasitik lav, andezit, ignimbirit ve volkanik çakıllar içerir. Bu birim Yuntdağ volkanitlerinden kolayca ayırt edilebildiği için bölgenin jeolojik yapısını ve jeolojik gelişimini açıklayan bir anahtar tabakadır (Şekil 2 ve Şekil 3). Yuntdağ volkaniti-II Dikili'nin güneydoğusunda dar bir alanda gözlenir. Bunlar Demirtaş piroklastikleri üzerinde uzanır ve Yuntdağ volkaniti-III tarafından örtülürler. Bu kayalar koyu kompakt bazaltik ve piroksen andezitik lav içerirler. Çok ender hidrotermal damar gözlenebilir. Yuntdağ volkaniti-III, petrografi ve stratigrafik özelliklerine göre altı gruba ayrılmıştır. Bunlardan Dikili biotit-hornblend-andezit birimi, inceleme alanı içerisinde yaygın biçimde gözlenmektedir (MTA-JICA, 1986) (Şekil 2 ve Şekil 3). Bu birimin bulunduğu alan lav domu şeklinde bir topografya sunmaktadır. Bununla beraber sıkça gözlenen hidrotermal damarlar boyunca zayıf ve orta dereceli alterasyonlar görülmektedir. Belirli bir yönde uzanım göstermeyen kuvars ve kalsit dolgululu damarlar jeotermal aktivitenin Dikili lavı sonrası oluştuğunun bir göstergesidir (MTA-JICA, 1986). Alanının en geç birimi alüvyon, tüm birimlerin üzerine uyumsuz olarak üstler. Kum, çakıl, kil boyutunda kırıntılı malzemeler içerir. Alüvyon inceleme alanının ovalık kesiminde yer almaktadır (Şekil 2 ve Şekil 3).

ÜST SİSTEM	SİSTEM	STAJ	ÇAPUT	SİREKLİK	LİTOLOJİ	AÇIKLAMA	JEOTERMAL ETKİNLİK
SENOZOYİK	KUVVETLENEN	LAĞUN	Yuntdağ Volkanitleri - 3	T ₃ -3		Alüvyon Diskordans	Yuntdağ Volkanizması - 3 Felsik Volkanizma Demirtaş Volkanizması - 1
						Dikili Biotit - Hornblend Andezit	
	PLİYOSLEN	Yuntdağ Volkanitleri - 2	T ₂ -2		İslamlar Piroksen Andezit		
					Demirtaş Piroklastikler Felsik Piroklastik kayalar Dasitik lavları İgnimbirit		
MIYOSLEN	Yuntdağ Volkanitleri - 1	T ₁ -1		Sağancı Hornblend Andezitleri (Altere Andezit) Biotit Kırık Zon (Sıcak Su Rezervuarı)			

Ölçeksiz

Şekil 2. Dikili ve Kaynarca jeotermal alanlarının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (MTA-JICA, 1987)

Batı Anadolu plakasının güney batıya hareketiyle Miyosen ve Pliyosen dönemlerinde açılma ve gerilme hareketleri sonucu Batı Anadolu'da oluşan grabenler ile tektonik zonlarda önemli jeotermal sistemler oluşmuş olup, Dikili-Kaynarca jeotermal sistemleri de bu graben sistemleri içinde yer alan önemli jeotermal alanlardandır (Yılmaz, 1984; Doglioni vd., 2002). Yapılan araştırmalara göre bir graben üzerinde bulunan Kaynarca jeotermal kaynaklarının yüzeylenmesi faylanmalar boyunca olmaktadır. İnceleme alanında genel olarak KB-GD doğrultulu normal faylar gözlenmektedir (MTA-JICA, 1987) (Şekil 3).

3. HİDROJEOLOJİ

İnceleme alanı içerisinde yer alan Yuntdağ volkaniti-I, çalışma alanının yakın çevresini gösteren jeolojik haritada ve stratigrafik kesitte görülebileceği gibi inceleme alanının en yaşlı birimidir. Yaygın alterasyona uğramış bu kayaların çatlaklarında silis, kalsit ve jips dolguları bulunmaktadır. Tektonik zonlarda ikincil gözeneklilik ve geçirgenlik arttığı için bu kayalar akifer özelliği kazanmışlardır. İnceleme alanının güney doğusundaki Demirtaş yöresinde yaygın olarak gözlenen Demirtaş piroklastikleri altere olmamış dasit, ignimbirit, felsik piroklastik kayalardan oluşmaktadır. Geçirimsiz olmaları nedeniyle örtü kaya özelliğindedir. İnceleme alanı içerisinde çok fazla yaygınlık göstermeyen Yuntdağ volkaniti-II, tektonik hatlar boyunca akifer oluşturabilir. İnceleme alanı içerisinde yaygın olarak gözlenen Yuntdağ volkaniti-III akifer özelliği göstermez. Ancak, altere zonlar bu birimin etrafında bulunmaktadır. Alüvyon, çalışma alanı içerisinde soğuk yeraltı suları açısından akifer özelliği taşıyan en önemli birimdir. Yörede sulama sularının büyük bir bölümü alüvyondan temin edilmektedir.

İnceleme alanı içerisindeki jeotermal alanları Dikili ve Kaynarca jeotermal alanları olarak iki grupta incelemek mümkündür. Bu alandaki sıcak sular, Kozak bölgesinden yeraltına süzülen meteorik suların derinlerde ısınp, kırık ve faylar boyunca tekrar yüzeylemesi ile oluşan devirli sistem özelliğindeki sulardır. Sıcak sular bu yükselimleri sırasında belirli oranda soğuk yeraltı suları ile karıştıkları düşünülmektedir.

4. HİDROJEOKİMYA

Bu çalışmada, inceleme alanı içerisindeki sıcak ve soğuk suların geçmiş yıllarda yapılmış su analizlerinden bağlı kimyasal analiz sonuçları ve Hidrowin-95 programı ile belirlenen su tipleri Çizelge 1'de kaynakları ile birlikte verilmiştir (Calmbach, 1995). İnceleme alanındaki Dikili Ilıcaları sıcak suları Na-HCO₃-SO₄, Kaynarca sıcak suları ise Na-SO₄-HCO₃ su tipindedirler. DG-3 kuyusu sıcak suyu Na-Ca-Cl su tipinde olup hafif tuzlu su sınıfına girmektedir

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan, inceleme alanı içerisindeki su noktalarının mevcut su analizleri (Örnek numaraları Şekil 3 ile aynıdır)

No	Tarih	Sıcaklık (°C)		pH	İletkenlik (µS/cm)	Su Tipi	Kaynak
		Su	Hava				
1	1987	65	30	7.3	2900	Na-HCO ₃ -SO ₄	MTA-JICA, 1987
2	1987	40	30	7.3	2900	Na-HCO ₃ -SO ₄	MTA-JICA, 1987
18	1994	30	25	6.6	3030	Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄	Jeckelman, 1996
19	1993	32	25	7.9	3200	Na-HCO ₃ -SO ₄	Jeckelman, 1996
14	1987	100	27	8.6	2500	Na-SO ₄ -HCO ₃	MTA-JICA, 1987
15	1987	46	27	8.4	2600	Na-SO ₄ -HCO ₃	MTA-JICA, 1987
26	1993	41	25	7.8	2623	Na-SO ₄ -HCO ₃	Jeckelman, 1996
27	1993	70	25	7.1	2560	Na-SO ₄ -HCO ₃	Jeckelman, 1996
36	1987	98	25	9.0	1800	Na-SO ₄ -HCO ₃	MTA-JICA, 1987
37	1987	98	25	7.7	5500	Na-Ca-Cl	MTA-JICA, 1987

* Anyon ve katyonların derişimleri mg/l'dir. 1, 2, 18, 19 no'lu örnekler Dikili Ilıcaları sıcak suları; 14, 15, 26, 27 no'lu örnekler Kaynarca, 36 no'lu örnek DG-1 ve 37 no'lu örnek DG-3 kuyularına ait sıcak suları göstermektedir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan, inceleme alanı içerisindeki su noktalarının mevcut su analizleri (Örnek numaraları Şekil 3 ile aynıdır) (devam)

No	Cl	Br	F	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	Al	B	Ca	Fe	K	Mg	Na
1	98	0.2	5.8	564	1090	99	0.04	12.5	37	1.0	42.0	7.4	660
2	103	<0.2	5.5	481	1140	109	0.11	11.0	43	5.0	41.0	8.6	570
18	89	1.3	-	437	1489	141	0.05	7.6	142	6.8	41.4	0.8	568
19	112	0.6	-	580	1403	94.3	1.25	12.3	53	1.2	31.2	0.1	526
14	70	<0.1	6.8	744	610	203	0.08	5.3	33	0.1	33.0	0.5	540
15	3	<0.1	7.6	743	610	165	0.10	5.3	33	0.1	34.0	1.0	570
26	68	1.3	-	796	555	194	0.01	6.0	42	0.1	29.8	3.0	515
27	65	1.3	-	747	574	98	0.02	5.7	41	0.0	29.1	2.5	465
36	51	<0.3	4.2	553	282	363	0.53	1.7	11	6.9	32.1	2.3	363
37	1530	4.7	0.3	131	251	737	4.3	1.0	3.3	1.0	87.0	6.3	737

Dikili-Kaynarca jeotermal sistemleri içerisinde yapılan izotop analizleri Çizelge 2'de kaynakları ile birlikte gösterilmiştir. İnceleme alanındaki mineralli suların trityum değerleri TU, 5'den küçük olup suların en az 50 yıllık yeraltı suyu geçiş süresine sahip olduklarını göstermektedir. $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri sırasıyla -4.8 ‰ ile -6.4 ‰ ve -37.5 ‰ ile -44.4 ‰ arasında değişmektedir. Bu sulara yüksek ^{18}O zenginleşmesi gözlenmesi, akifer sıcaklıklarının dolayısıyla jeotermal potansiyellerinin yüksek olduğunu düşündürmektedir. Tüm örneklerin $\delta^{18}\text{O}$ - δD diyagramı üzerindeki dünya meteorik su doğrusu ile Akdeniz meteorik su doğrusuna göre konumları meteorik kökene işaret etmektedir (Şekil 4).

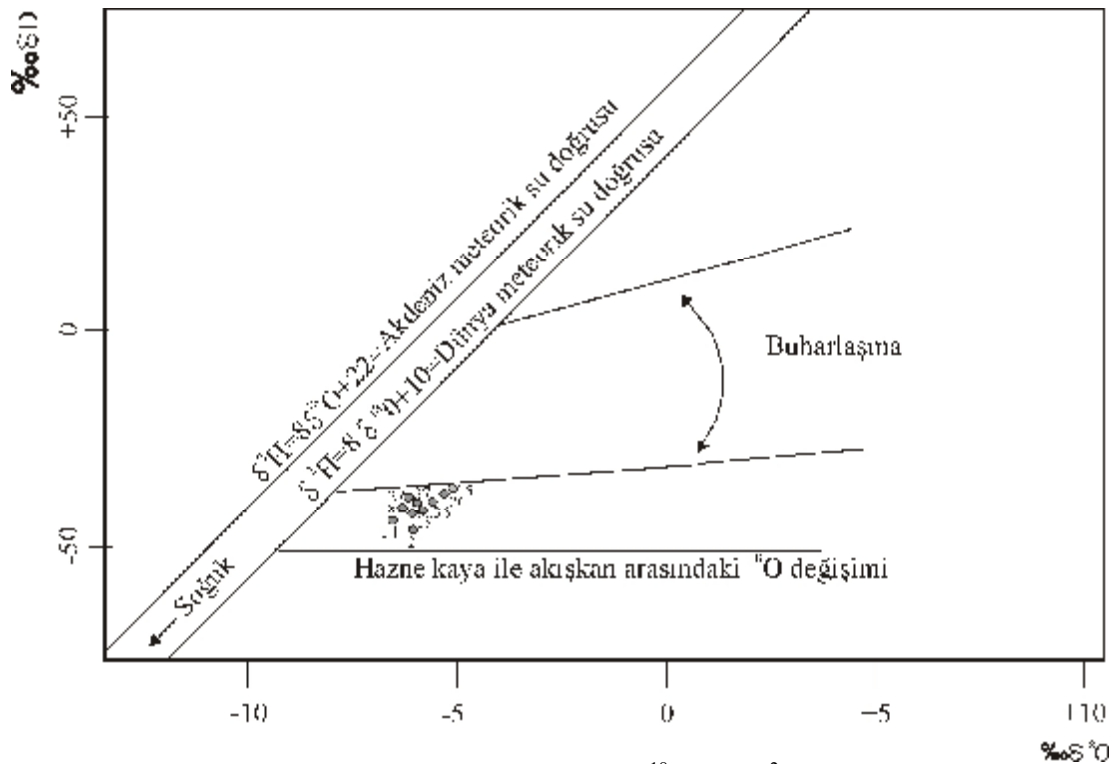
Çizelge 2. İnceleme alanı içerisindeki sıcak suların O^{18} , ^2H ve ^3H izotop analizleri (Örnek numaraları Şekil 3 ve Çizelge 1 ile aynıdır)

Örnek No	Örnekleme Yeri	‰ $\delta^{18}\text{O}$ $\delta(\text{SMOW})$	‰ δD $\delta(\text{SMOW})$	^3H TU	Kaynak
1	Dikili Ilıcaları	-6.3	-41.5	<0.3	MTA-JICA, 1987
2	Dikili Ilıcaları	-5.8	-44.4	<0.3	MTA-JICA, 1987
18	Dikili Ilıcaları	-6.4	-43.5	0.7	Jeckelman, 1996
19	Dikili Ilıcaları	-5.9	-41.5	1.1	Jeckelman, 1996
14	Kaynarca	-6.4	-43.0	<0.3	MTA-JICA, 1987
15	Kaynarca	-4.8	-37.5	-	MTA-JICA, 1987
26	Kaynarca	-4.8	-38.2	0.8	Jeckelman, 1996
27	Kaynarca, kuyu	-6.2	-36.8	<1.3	Jeckelman, 1996
36	DG-1 kuyusu	-5.9	-39.2	<0.8	MTA-JICA, 1987
37	DG-3 kuyusu	-5.4	-35.5	<0.8	MTA-JICA, 1987

4.1. Suların Mineral Doygunluk Özelliklerinin İncelenmesi

İnceleme alanına ait sıcak suların mineral doygunluk indeksleri Watch-2.1 bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır (Arnórsson vd., 1982; Bjarnason, 1994). Watch 2.1 bilgisayar programı, bir kimyasal denge ve türleştirme programı olup, özellikle yüksek sıcaklıklı alanlar için oldukça kullanışlıdır. Hem su hem buhar örneklerinin aynı anda girilebileceği seçenekler de mevcuttur. Bazı temel jeotermometre hesaplarını yaptığı gibi, kimyasal türleştirme, mineral dengeleri ve akifer kimyası hesaplamalarını akifer sıcaklığında ve aynı anda 10 değişik sıcaklıkta yapabilmekte ve ayrıca kaynama sıcaklığında buhar

ayrılma varsayımı ve konduktif soğuma varsayımlarına göre de ayrı ayrı yapılabilmektedir. Watch türleştirme programı bilgisayar DOS ortamında çalışan bir programdır. Bu çalışmada Watch 2.1 bilgisayar programıyla inceleme alanındaki sıcak suların 100°C'de kaynama sıcaklığı varsayımına göre her 25°C'de bir olmak üzere 8 ayrı sıcaklıktaki akifer kimyası hesaplamaları elde edilmiştir. Bu sıcaklık değerlerine karşılık gelen doygunluk indeksi değerleri en çok çökel ürünü olarak rastlanabilecek mineraller dikkate alınarak Excell 8.0 bilgisayar paket programına işlenmiş, her bir mineral ve sıcaklık için "Sıcaklık-Mineral Denge" diyagramları oluşturulmuştur (Şekil 5). Bu diyagramlara göre çalışma alanındaki sıcak kaynaklarda tüm mineraller belirli bir sıcaklık derecesine kadar doygunluk üstü (yani akiferdeki su bu mineralleri çöktürücü özellikte) değerler vermektedirler. Şekil 5'te görüleceği gibi inceleme alanındaki sıcak sular genel olarak florit ve amorf silis minerallerini çözdürücü, kalsit mineralini ise çöktürücü özelliktedirler.



Şekil 4. Meteorik su ve doğal sularda ^{18}O ve D (^2H) ilişkileri
 $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 22$ Akdeniz meteorik su doğrusu (IAEA, 1981)
 $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ Dünya meteorik su doğrusu (Craig, 1961)

4.2. Sıcak Suların Hazne Sıcaklıklarının Tahmini

Bu çalışmada inceleme alanındaki suların akifer sıcaklıklarını tahmin ederken çeşitli jeotermometre uygulamalarından yararlanılmıştır.

4.2.1. Mineral Denge-Sıcaklık Diyagramı Jeotermometresi

Reed ve Spycher, jeotermal alanlardaki akifer sıcaklığının tahmin edilmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir (Reed ve Spycher, 1984). Bu yöntem özetle suyun kimyasal analizi sonucunda çeşitli mineraller ile bu minerallerin her bir sıcaklık değerinde ayrı ayrı doygunluk indekslerinin hesaplanması ve bu sıcaklık değerleri ile doygunluk indeksi değerlerinin bire bir doğrularını içeren mineral denge diyagramlarının çizilerek yorumlanması ilişkisine dayanır.

Bu yorumlamada, minerallerin çözünürlük denge sabitleri sıcaklıkla yakın ilişkili olduğundan, bir grup mineral doğrusu denge doğrusunu ($SI=0$ doğrusunu) belirli bir sıcaklık değeri civarında kesiyorsa, bu doğruların kesişim yerine karşılık gelen sıcaklık değeri en iyi akifer sıcaklığını vermektedir. SI denge doğrusunun aşağısında (negatif kısımda) olabilecek kesişmeler ise farklı sıcaklıktaki akışkanların karışımını ve dolayısıyla bu akışkanların sıcaklıklarını belirtebilir (Tarcan, 2002). Şekil 5'te verilen sıcaklık-mineral denge diyagramlarına göre genel olarak Dikili Jeotermal Alanı sıcak sularının sıcaklık-mineral denge grafiklerinde eğrilerin yaklaşık denge durumunda kesiştikleri yer olan 100-125°C ve Kaynarca Jeotermal Alanı'ndaki sıcak sulara ait diyagramlardaki 125-150°C sıcaklık değerleri bu alanların akifer sıcaklıkları olarak yorumlanabilir.

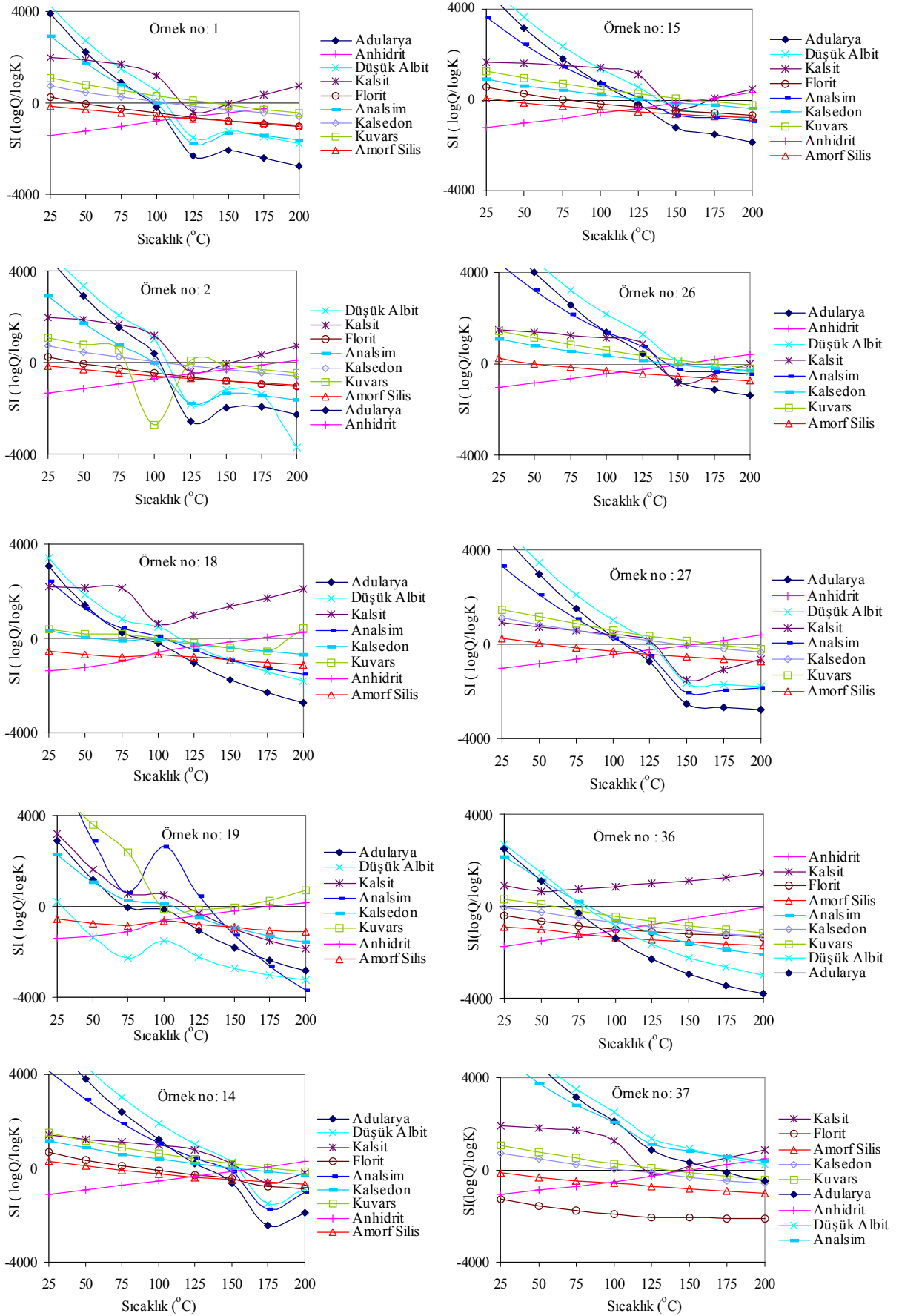
4.2.2. Kimyasal Jeotermometre Uygulamaları

İnceleme alanına ait seçilmiş sıcak su örneklerinin akifer sıcaklığını hesaplamada kolay ve kullanışlı olan bir diğer yöntem kimyasal jeotermometre uygulamalarıdır. İnceleme alanının çeşitli kimyasal jeotermometrelerle hesaplanan akifer sıcaklıkları Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelgelerden de görüleceği gibi sahadaki sıcak su kaynaklarının akifer sıcaklıklarının hesaplanmasında kuvars jeotermometreleri Dikili Jeotermal Alanı için 120-150°C, Kaynarca Jeotermal Alanı için 160-200°C arasında sıcaklık değerleri verirken katyon jeotermometreleri kuvars jeotermometrelerine oranla daha yüksek sıcaklıkları göstermektedir (Özen ve Tarcan, 2001; Özen, 2002).

Çizelge 3. Dikili-Kaynarca jeotermal alanlarına ait su örneklerinin jeotermometre sonuçları (Örnek numaraları Şekil 3 ve Çizelge 1'deki ile aynıdır)

Jeotermometre Adı	Örnek No									
	1	2	18	19	14	15	26	27	36	37
Na-K-Ca-Mg (Fournier ve Potter, 1979)	107	103	100	101	-	-	132	136	89	135
Na-K (Giggenbach vd., 1983)	199	207	205	206	196	203	192	198	246	223
Na-K	181	190	188	189	178	185	174	180	232	207
Na-K (Truesdell, 1976)	143	155	152	153	140	149	135	142	206	175
Na-K (Tonanni, 1980)	148	160	157	158	145	154	140	147	215	181
Mg-K (Nieva ve Nieva, 1987)	169	178	176	176	166	172	162	167	218	194
Na-K-Ca	172	163	149	150	160	178	147	145	140	194
Kuvars (Fournier ve Potter, 1982)	137	142	123	124	182	201	178	177	135	67
Kuvars (Arnorsson, 1985)	134	138	121	122	171	187	168	167	132	67
Kristobalit (Fournier, 1977)	86	91	72	73	131	151	128	127	84	18
Kalsedon (Fournier, 1977)	110	116	95	96	160	182	156	155	108	34
Kalsedon (Arnosson vd., 1983)	108	114	94	95	154	174	150	150	107	38

Dikili ve Kaynarca jeotermal sistemi içerisinde açılmış olan K-1 derin kuyusunda akifer sıcaklığı 120-130°C arasında ölçülmüştür. Bu ölçüm, inceleme alanındaki sıcak sular için kullanılan jeotermometre uygulamalarının geçerliliğinin tartışılması açısından da oldukça yararlıdır. Alandaki kimyasal jeotermometre sonuçları değerlendirildiğinde bazı silis jeotermometrelerinin gerçeğe en yakın sonuçlar verdiği söylenebilir.

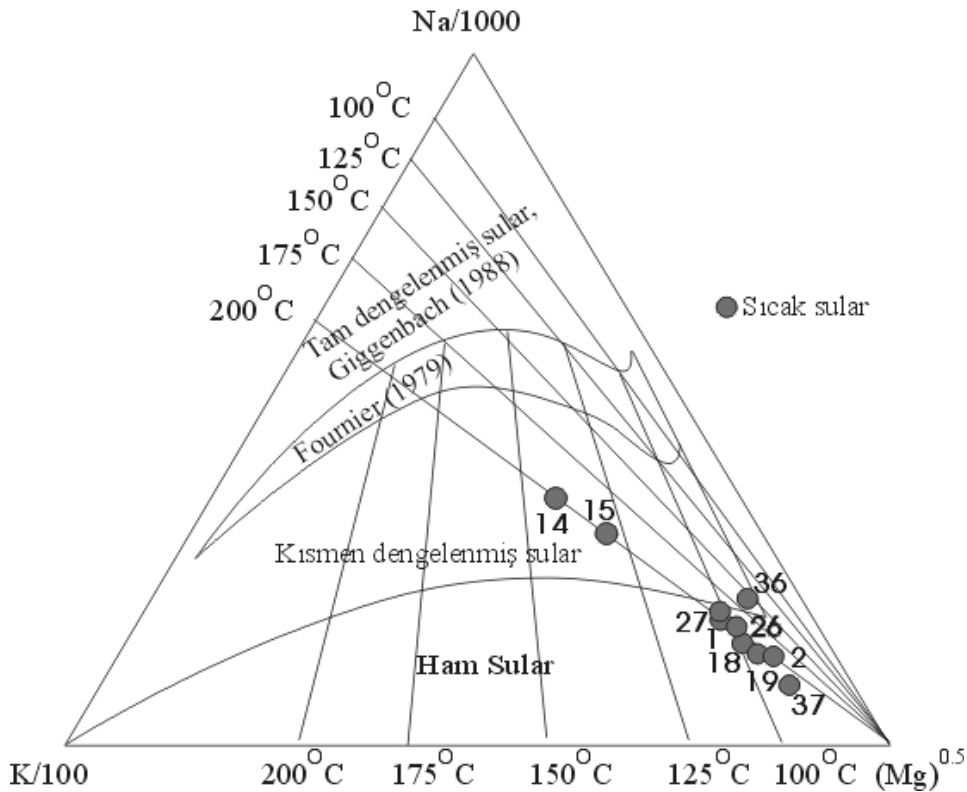


Şekil 5. İnceleme alanındaki suların sıcaklık-mineral denge diyagramları

4.2.3. Birleşik (Kombine) Jeotermometre Uygulamaları

Sıcak suların hazne kaya sıcaklıklarının saptanması ve suların ilişkide olduğu kayaçlarla olan denge durumlarının belirlenmesi için geliştirilmiş olan Na-K-Mg birleştirilmiş jeotermometresi ile hem sıcak suların hazne sıcaklığı hızlı olarak yorumlanabilmekte, hem de daha önce belirtilen katyon jeotermometre uygulamalarının geçerliliği sınanmaktadır (Giggenbach, 1988). Bu diyagram üzerinde bazı revizyonlar yapılarak, en güvenilir sonuçların bu üçgen diyagramdan oluşan jeotermometre uygulaması ile alınabileceği öne sürülmektedir (Fournier, 1990). Diyagram kısaca, su kayaç ilişkisinin dengede olduğu, su kayaç ilişkisinin dengede olmadığı (ham sular) ve su kayaç ilişkisinin kısmen dengede olduğu sular olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Diyagramda kısmen olgunlaşmış sularla, olgunlaşmamış suları birbirinden ayıran eğri olgunlaşma indeksinin (MI=maturity index), $MI=2,0$ olduğu eş kimyasal özellikteki noktaların bileşimiyle oluşmuştur (Tarcan, 2002).

Olgunlaşma indeksi, $MI=0,315 \text{ Log}(K^2/Mg)-\text{Log}(K/Na)$ bağıntısıyla tanımlanmıştır. Su kayaç ilişkisinin kısmen ve tamamen dengede olduğu (karışmış sular) alanlar ise eş kimyasal özellikteki noktalar ile K^+-Mg^{+2} ve K^+-Na^+ jeotermometre eşitlikleri ile elde edilen eş sıcaklık (izoterm) değerlerinin kesişim noktalarının oluşturduğu eğriyle ayrılmıştır. Dolayısıyla diyagram aynı anda hem su-kayaç ilişkisinin denge durumunu, hem de jeotermometre sonucunu gösterebilmektedir. Giggenbach, ham sular bölümüne düşen suların katyon jeotermometre sonuçlarına şüpheyle bakılması gerektiğini belirtmektedir (Giggenbach, 1988). Fournier ise benzer yorumlar yaparak, yaptığı revizyonla kısmen dengelenmiş alan ile tam dengelenmiş alan sınırını biraz daha aşağıya kaydırmıştır (Fournier 1990; Janik vd., 1992).



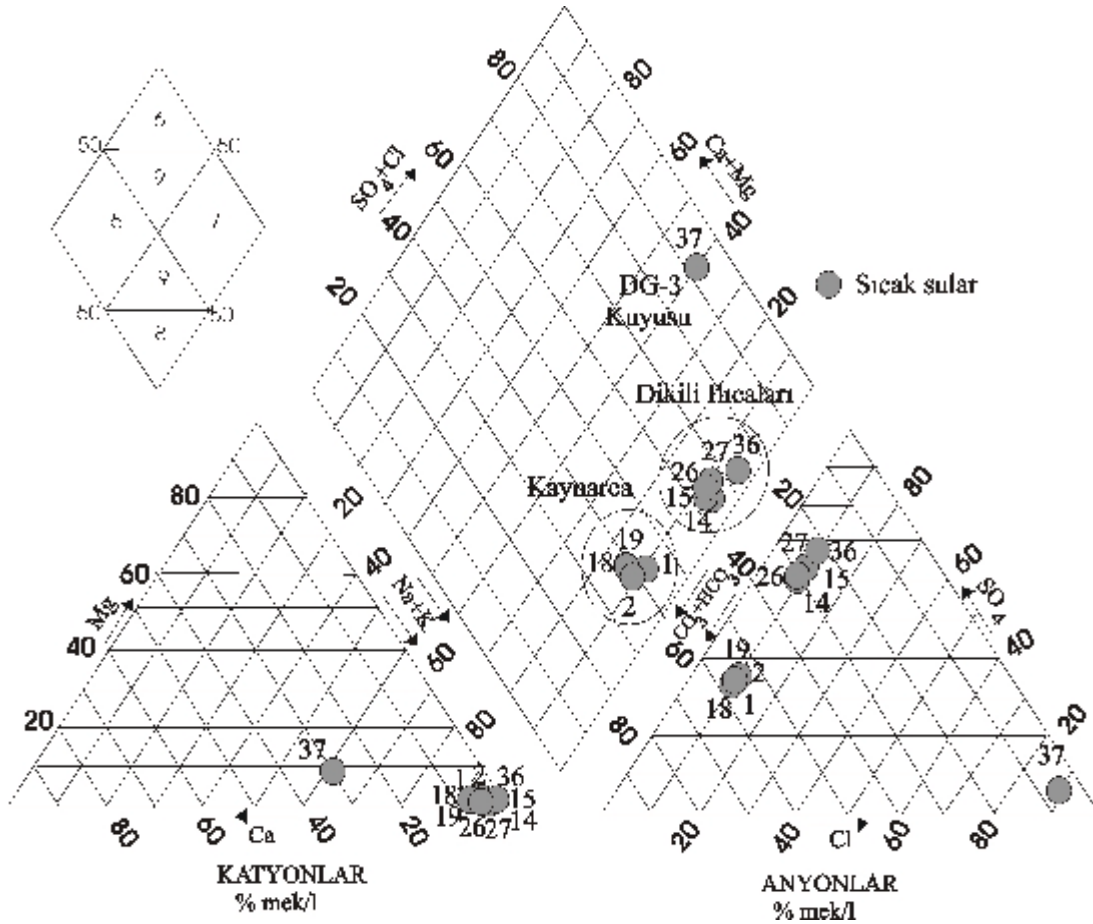
Şekil 6. İnceleme alanındaki suların Na-K-Mg üçgen diyagramındaki yeri (Giggenbach, 1988) (örnek numaraları Şekil 3 ve Çizelge 1 ile aynıdır)

İnceleme alanındaki suların Na-K-Mg üçgen diyagramındaki yerleri Şekil 6'da görülmektedir. Bu diyagrama göre inceleme alanındaki sular genel olarak 200°C'yi gösteren doğru üzerinde yoğunlaşmıştır ve sıcak sular çoğunlukla ham sular kısmına düşmektedirler. Kaynarca Jeotermal Alanı'na ait 14, 15 ve 36 (DG-1 kuyusu) no'lu sıcak sular diğer sıcak sulara göre kısmen dengelenmiş sular kısmında yer almaktadırlar.

Çalışma alanı içerisindeki K-1 (Kaynarca 1) derin sondajında ölçülmüş olan akifer sıcaklığı ile çeşitli jeotermometre yöntemleri ile hesaplanan akifer sıcaklıkları bir bütün olarak değerlendirildiğinde Dikili Jeotermal Alanı'nın 100-120°C, Kaynarca Jeotermal Alanı'nın 130-150°C akifer sıcaklığına sahip olabileceği tahmin edilmektedir.

4.3. Piper (Üçgen) Diyagramı İle Suların Sınıflandırılması

İyonların topluca tek bir diyagramda görüntüleme kolaylığı açısından hidrojeolojide oldukça sık kullanılan diyagramlardan biri Piper (üçgen) diyagramıdır. Piper diyagramı anyon ve katyonların (% mek/l cinsinden) ayrı ayrı gösterildiği iki ayrı üçgenden ve tüm iyonların ortaklaşa gösterildiği bir dörtgenden oluşmaktadır. Üçgen diyagramlar suların fasiyes tiplerinin görülmesinde, dörtgen ise suların sınıflamasında ve karşılaştırılmasında kolaylık sağlamaktadır. Piper (Üçgen) diyagramında, Dikili Ilıcaları sıcak suları genellikle 9 no'lu alana (iyonların hiçbirisi % 50'yi geçmeyen, karışık suların bulunduğu alana) düşmektedir (Şekil 7). Kaynarca sıcak suları ise çoğunlukla 7 no'lu (karbonat olmayan alkalinitesi %50'den fazla olan suların bulunduğu) alana düşmektedir. DG-3 kuyusuna ait sıcak su örneği ise denizden bir beslenme olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 7. İnceleme alanındaki sıcak suların Piper üçgen diyagramındaki görünümü (örnek numaraları Şekil 3 ve Çizelge 1 ile aynıdır)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İnceleme alanında gözlenen Miyosen-Pliyosen yaşlı Yuntdağ volkanitleri üçe ayrılmıştır. En yaşlı birim Tersiyer yaşlı Yuntdağ volkaniti-I'dir. Bunun üzerine sırasıyla Tersiyer yaşlı Demirtaş piroklastikleri, Yuntdağ volkaniti-II, Yuntdağ volkaniti-III ve Kuvaterner yaşlı alüvyon gelir.

İnceleme alanı içerisindeki sıcak sular tektonizma ve volkanizmanın etkisindedir. Batı Anadolu plakasının doğudan batıya hareketi sırasında bölgede Miyosen ve Pliyosen dönemlerinde açılma ve gerilme hareketleri sonucu oluşan grabenler ile tektonik zonlarda önemli jeotermal sistemler meydana gelmiştir. Dikili-Kaynarca jeotermal alanları da bu graben sistemi içinde yer almaktadır.

İnceleme alanında bulunan Yuntdağ volkaniti-I'de yaygın alterasyon gözlenir. Tektonik zonlarda ikincil gözeneklilik ve geçirgenlik arttığı için bu kayalar jeotermal sistemlerin akiferi ni oluşturmaktadırlar. Geçirimsiz olmaları nedeniyle ise Demirtaş piroklastikleri örtü kaya özelliğindedir. Soğuk yeraltı suları açısından akifer özelliği taşıyan alüvyondan yöredeki sulama sularının büyük bölümü temin edilmektedir.

Çalışma alanı içinde bulunan jeotermal alanlar, Kozak Bölgesi'nden yeraltına süzülen meteorik suların derinlerde ısınıp, kırık ve faylar boyunca tekrar yüzeylemesi ile oluşan devirli sistem özelliğindeki sulardır. Sıcak sular bu yükselimleri sırasında belirli oranda soğuk yeraltı suları ile karışabilmektedirler.

Dikili-Kaynarca jeotermal alanları içerisinde yapılan izotop analizleri değerlerine göre yöredeki sıcak suların tümü meteorik kökenli olup bu suların en az 50 yıllık yer altı geçiş süresine sahip olduğu hesaplanmıştır.

Her bir su noktası için kimyasal türleştirme, akifer kimyası ve mineral doygunlukları irdelenmiştir. Buna göre, Dikili Jeotermal Alanı içerisindeki sıcak sulara tüm mineraller belirli bir sıcaklık derecesine kadar doygunluk üstü (yani akiferdeki su bu mineralleri çöktürücü özellikte) değerler vermektedirler. Genel olarak Dikili Ilıcaları sıcak sularında, seçilen tüm sıcaklıklarda su, anhidrit, florit, amorf silis ve kalsedon minerallerini çözdürücü, kuvars mineralini ise çöktürücü özelliktedir Kaynarca Jeotermal Alanı'ndaki su örneklerinin mineral doygunluk özelliklerine baktığımızda ise genellikle su anhidrit, florit ve amorf silis minerallerini çözdürücü özelliktedir.

Çalışma alanı içerisindeki Dikili Ilıcaları sıcak suları genellikle Na-HCO₃-SO₄, Kaynarca sıcak suları ise Na-SO₄-HCO₃ sular sınıfındadır. DG-3 kuyusu sıcak suyu Na-Ca-Cl su tipinde olup hafif tuzlu su sınıfına girmektedir. Bu nedenle denizden beslenmenin olabileceğini düşündürmektedir.

Çalışma alanı içerisindeki K-1 (Kaynarca 1) derin sondajında ölçülmüş olan akifer sıcaklığı ile çeşitli jeotermometre yöntemleri ile hesaplanan akifer sıcaklıkları bir bütün olarak değerlendirildiğinde Dikili Jeotermal Alanı'nın 100-120°C, Kaynarca Jeotermal Alanı'nın 130-150°C akifer sıcaklığına sahip olabileceği tahmin edilmektedir.

İnceleme alanı içerisindeki jeotermal alanların özellikle konut ısıtmacılığı, sera ısıtmacılığı, endüstride, termal turizm ve balneolojik uygulamalarda kullanımı bölgenin ekonomisine ve çevreye olumlu yönde etki sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu makale Tuğbanur ÖZEN'in Gültekin Tarcan yönetiminde yapmış olduğu Yüksek Lisans tez çalışmalarının bir kısmını kapsamaktadır. Çalışmaya çeşitli kaynak sağlanmasında ve çeşitli önerileriyle yardımcı olan Dr. Servet Yılmaz (Jeo. Yük. Müh.) ve Dr. Tuncer

Eşder'e (Jeo. Yük. Müh.) teşekkür ederiz. Ayrıca, adı açıklanmayan iki hakemin ayrıntılı eleştirisi ve önerileri makalenin son halini almasında önemli katkılar sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- Akyürek B., Soysal Y. (1978): "Bergama İzmir Civarının Jeolojisi", İzmir, MTA, Rapor No: 6432.
- Arnorsson S., Sigurdsson S., Svavarsson H. (1982): "The Chemistry of Geothermal Waters in Iceland I. Calculation of Aqueous Speciation from 0°C to 370°C", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, p.1513-1532.
- Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. (1983): "The Chemistry of Geothermal Waters in Iceland. III. Chem. Geothermo. in Geot. Investigations", *Geochim. et Cosm. Acta*, 47, p.567-577.
- Arnorsson S. (1985): "The Use of Mixing Models and Chemical Geothermometers for Estimating Underground Temperatures in Geothermal Systems", *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, V.23, p.209-335.
- Bjarnason J.O. (1994): "The Speciation Program WATCH, version 2.1", *Orkustofnun, Reykjavik*, p.1-7.
- Calmbach L. (1995): "Hydrowin-95 Computer Programme, Version 3.0 Instute de Mineralogie", BFSH2 1015 Lausanne.
- Craig H. (1961): "Isotopic Variations in Meteoric Waters", *Science*, 133, p.1833-1834.
- Dogliani C., Agostini S., Crespi M., Innocenti F., Manetti P., Riguzzi F., Savaşın Y. (2002): "On the Extension in Western Anatolia and the Aegean Sea", *Journal Virtual Explorer*, 7, p.117-131.
- Fournier R.O. (1977): "A Review of Chemical and Isotopic Geothermometers for Geothermal Systems", Ankara, In: Proceeding of the Symp. on Geoth. Energy, Cento Scientific Programme, p.133-143.
- Fournier R.O. (1979): "A Revised Equation for the Na-K Geothermometer", *Geothermal Res. Council Trans.*, 3, p.221-224.
- Fournier R.O. (1990): "The Interpretation of Na-K-Mg Relations in Geothermal Waters", *Geoth. Res. Counc. Trans.*, 14, p.1421-1425.
- Fournier R.O., Potter R.W. (1979): "Magnesium Correction to The Na-K-Ca Chemical Geothermometer", *Geochim et Cosmochim Acta* 43, p.1543-1550.
- Fournier R.O., Potter R.W. (1982): "A Revised and Expanded Silice (Quartz) Geothermometer", *Geothermal Research Council Bull.*, 11, p.3-9.
- Giggenbach W.F. (1988): "Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, p.2749-2765.
- Giggenbach W.F., Gonfiantini R., Jangi B.L., Truesdell A.H. (1983): "Isotopic and Chemical Composition of Parbati Walley Geothermal Discharges", NW Himalaya, Indiano", *Geothermics* 5, p.51-62.
- Janik J.C., Goffy F., Fahlquist L., Adams A.I., Roldan M.A., Chipera J.S., Trujillo P.E., Counce D. (1992): "Hydrogeochemical Exploration of Geothermal Prospects in the Tecuamburro Volcano Region, Guatemala", *Geothermics*, 21/4, p.447-481.
- IAEA (1981): "Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in Water Cycle", Ed. J.R. Gat, R. Gonfiantini, International Atomic Energy Agency, Vienna, Technical Reports, No: 210, p.1-339.
- MTA-JICA (1986): "Pre-Feasibility Study on the Dikili Bergama Geothermal Development Project in The Republic of Turkey", Ankara, MTA, Progress Report I.
- MTA-JICA (1987): "Pre-Feasibility Study on The Dikili Bergama Geothermal Development Project in The Republic of Turkey", Ankara, MTA., Progress Report II, Final Report.

- Nieva D., Nieva R. (1987): "Development in Geothermal Energy in Mexico", Par 12-A Cationic Composition Geothermometer for Prospection of Geothermal Resources, Heat Recovery Systems and CHP, 7, p.243-258.
- Reed M., Spycher N. (1984): "Calculation of pH and Mineral Equilibria in Hydrothermal Waters with Application to Geothermometry and Studies of Boiling and Dilution" *Geochim-Cosmochim, Acta* 48, p.1479-1492
- Özen T. (2002): "Dikili Sıcak ve Soğuk Su Kaynaklarının Hidrojeolojik İncelenmesi", Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, s.1-111.
- Özen T., Tarcan G. (2001): "Dikili (İzmir) Ilıcaları Çevresinin Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Açından Değerlendirilmesi", İzmir, 1. Yeraltı Suları ve Çevre Sempozyumu Bildiri Kitabı, s.351-361.
- Tarcan G. (2002): "Jeotermal Su Kimyası", Jeotermal Enerji ve Araştırma ve Uygulama Merkezi (Jenarum) Yaz Okulu Ders Notları, İzmir, s. 230-272.
- Tonanni F. (1980): "Some Remarks of The Application of Geochemical Techniques in Geothermal Exploration", Strasbourg, Proceedings, Adv. Eur. Geoth. Res. Second Symp., p.428-443.
- Truesdell A.H. (1976): "Summary of Section III Geochemical Techniques in Geothermal Exploration", In: Proceedings, II United Nations Symposium on The Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, Vol.1, Washington DC, U.S. Government Printing Office, p.iii-ix.
- Yılmazer S. (1984): "Ege Bölgesindeki Bazı Sıcak Su Kaynaklarının Hidrokimyasal ve Hidrojeolojik İncelemeleri", Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, s.1-118.