

**Hisaralan (Sındırgı, Balıkesir) Jeotermal Alanındaki  
Traverten Oluşumları ve Sıcak Sular Üzerinde  
Sedimentolojik, Petrografik ve Jeokimyasal İncelemeler**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 115Y141**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Mehmet ÖZKUL**

Araştırmacı(lar):

Yrd. Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ  
Yrd. Doç. Dr. Ali Kamil YÜKSEL

Danışman(lar):

-

Bursiyer(ler):

Atahan ATLI  
Gamzenur ÇAĞDAŞ  
Özgün DEMİREL

ŞUBAT 2018  
DENİZLİ

## ÖNSÖZ

Bu proje, Sındırgı (Balıkesir) ilçesinde yer alan Hisaralan ve Emendere sahalarındaki termal kaynakların hidrojeolojisi, hidrokimyası ve kaynak önlerinde oluşmuş traverten ve tufa gibi karbonatlı kaynak çökellerinin depolanma morfolojileri, mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve jeokronolojik özelliklerinin belirlenmesini amaçlar.

Bu amaç doğrultusunda Hisaralan ve Emendere kaynak suları ve üzerinde hidrojeolojik, hidrokimyasal ve izotopik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Traverten ve tufa çökellerinde ise arazide depolanma şekilleri belirlenmiş, traverten kulelerinin boyutları ölçülmüş ve dağılım haritaları hazırlanmıştır. Bu çökellerde litotip tanımlamaları yapılmış, alınan temsili örnekler üzerinde ince kesit çalışmaları, XRD ve SEM analizleri, jeokimyasal analizler (element kimyası ve izotop analizleri) ve U-Th yaşlandırma çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan bu proje ile Hisaralan ve Emendere'deki jeotermal sistemlerin kantitatif veriler ışığında daha objektif olarak değerlendirildiği kanaatindeyiz.

Bu proje, finansal olarak TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir (Proje No. 115Y141). Çalışmalar sırasında 357.511 TL'lik bir bütçe kullanılmıştır. Proje çalışmaları 15 Aralık 2015 tarihinde başlamış, 15 Aralık 2017'de normal süresi içinde tamamlanmıştır. Bu süresi içinde 2 adet gelişme raporu verilmiştir. Projenin gerçekleşmesinde verilen destek için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TÜBİTAK'a ara raporlar ve sonuç raporundaki görüş ve önerileriyle katkıda bulunan ve adı açıklanmayan hakem(ler)e teşekkür ederiz.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışma Alanı.....	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	2
1.3 Literatür Özeti.....	3
1.4 Materyal ve Metod.....	7
1.4.1 Hidrojeokimya Çalışmaları.....	7
1.4.2 Travertenlerde Çalışma Yöntemleri .....	8
2. JEOLojİ.....	12
2.1 Bölgesel Jeoloji.....	12
2.2 Stratigrafi.....	12
2.2.1 Hisaralan Sahası.....	12
2.2.2 Emendere Sahası.....	18
2.3 Yapısal Jeoloji.....	19
3 HİDROJEOLojİ.....	23
3.1 Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri.....	23
3.2 Su Noktaları.....	24
3.2.1 Jeotermal Sondaj.....	24
3.2.2 Termal Kaynaklar.....	28
3.2.3 Soğuk Su Kaynakları.....	33
3.2.4 Akarsular.....	34
3.3 Sıcak Suların Oluşumu.....	34
4. HİDROKİMYA.....	38
4.1. Suların Kimyasal Kompozisyonu.....	38
4.2. Suların Toplam Alfa ve Beta Aktivite Değerleri.....	49
4.3. Suların İzotop Kompozisyonu.....	49
4.4. Suların Mineral Doygunlukları.....	55

<b>5. JEOTERMOMETRİ</b> .....	65
<b>5.1 Kimyasal Jeotermometreler</b> .....	65
<b>5.1.1 Çözünürlüğe Bağlı Jeotermometreler</b> .....	66
<b>5.2 Birleşik (Kombine) Jeotermometre Uygulamaları</b> .....	67
<b>5.3 Silis-Entalpi Karışım Modeli</b> .....	70
<b>5.4 Mineral Denge-Sıcaklık Diyagramı Jeotermometresi</b> .....	72
<b>5.5 Sülfat-Su Oksijen İzotop Jeotermometresi</b> .....	72
<b>6. TRAVERTEN ÇALIŞMALARI</b> .....	74
<b>6.1. Traverten Litotipleri</b> .....	74
<b>6.1.1. Nilüfer Yapağı (Lilypad) Traverten</b> .....	74
<b>6.1.2. Rafsı (Ledge) Traverten</b> .....	74
<b>6.1.3. Kristalin Kabuk</b> .....	76
<b>6.1.4. Zarflı Taneler</b> .....	77
<b>6.1.5. Bantlı traverten</b> .....	79
<b>6.1.6. Mikrobiyal Traverten</b> .....	80
<b>6.2. Traverten Depolanma Morfolojileri</b> .....	82
<b>6.2.1. Kaynak Ağızı – Boşalım Kanalı</b> .....	82
<b>6.2.2. Yamaç-Şelale Depolanma Morfolojisi</b> .....	84
<b>6.2.3. Kaynak Tümseği</b> .....	84
<b>6.2.4. Traverten Kuleleri (Konileri)</b> .....	85
<b>6.2.5. Traverten Sırtı</b> .....	88
<b>6.3. XRD Analizleri</b> .....	91
<b>6.4. Jeokimyasal Çalışmalar</b> .....	92
<b>6.4.1. Travertenlerin İzotop Bileşimleri</b> .....	92
<b>6.4.2. Element Konsantrasyonları</b> .....	93
<b>6.5. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr İzotop Analizleri</b> .....	93
<b>6.6. U-Th Tarihlendirme Analizleri</b> .....	96
<b>7. EMENDERE TUFA ÇALIŞMALARI</b> .....	98
<b>7.1. Tufa Litotipleri</b> .....	98
<b>7.1.1. Laminallı Tufa (=Stromatolitik Tufa)</b> .....	98
<b>7.1.2. Onkolitik Tufa Litotipi</b> .....	99
<b>7.1.3. Bryofit tufa</b> .....	100
<b>7.1.4. Fitoklastik Tufa</b> .....	100
<b>7.1.5. Çakıltaşı Litotipi</b> .....	101

7.1.6 Çamurtaşı.....	103
7.2 Şelale Depolanma Morfolojisi.....	104
7.3. Yamaç Depolanma Morfolojisi.....	105
7.4. Element Kimyası.....	106
7.5 Duraylı Karbon ve Oksijen İzotopları.....	107
7.6. U-Th Yaşları .....	108
8. TARTIŞMA.....	110
8.1. Suların Kimyasal ve İzotopik Kompozisyonu.....	110
8.2. Rezervuar Sıcaklığı.....	112
8.3 Kabuklaşma.....	114
8.4 Traverten Litotipleri.....	116
8.5 Ender Bir Depolanma Morfolojisi Olarak Traverten Kuleleri.....	116
8.6 Traverten Kulelerinin Sr İzotop Kayıtları.....	117
8.7 Duraylı Karbon Ve Oksijen İzotop Bileşimleri.....	118
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	120
KAYNAKLAR.....	123

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1 Türkiye'deki jeotermal alanların ve sıcak suların dağılımı (Şimşek, 2009). Şekil üzerindeki dikdörtgen alan çalışma alanının lokasyonunu göstermektedir.....	1
Şekil 2.1 İnceleme alanının a)Türkiye'nin tektonik birlikleri içindeki konumu (Emre ve Sözbilir, 2007; Sözbilir, 2005'den değiştirilerek) ve b) yer bulduru haritası.....	13
Şekil 2.2 İnceleme alanının jeoloji haritası.....	14
Şekil 2.3 Serindere içerisinde gözlenen ve faylanmalar sonucu yüzeyleyen Bornova Fliş Zonu'na ait serpantinize ultramafik kayalar (Koordinat: 39.28770°, 28.32909°; batıya bakış).....	15
Şekil 2.4 Hisaralan deresi içinde gözlenen Bornova Fliş Zonu'na ait radyolaritler (Koordinat: 39.27728°, 28.33422°; doğuya bakış).....	15
Şekil 2.5 Sındırgı volkanitlerinin en alt seviyesini oluşturan mor dasitler (Koordinat: 39.26696°, 28.31396°; doğuya bakış).....	16
Şekil 2.6 Sındırgı volkanitlerinin aglomeratik kayalarının yakından görünümü (Koordinat: 39.28054°, 28.33578°; kuzeye bakış).....	16
Şekil 2.7 Hisaralan kaplıcaları ile Simav yolu yol yarmasında gözlenen tuf seviyesi (Koordinat: 39.25477°, 28.33283°; kuzeye bakış).....	17
Şekil 2.8 Riyolitleri kesen silis damarı (Kepez-Çoturtepe yolu) (Koordinat: 39.28361°, 28.32000°; kuzeye bakış).....	17
Şekil 2.9 İnceleme alanında gözlenen travertenler ve diğer birimler ile olan dokanak ilişkisi (Koordinat: 39.27025°, 28.31922°; kuzeye bakış).....	18
Şekil 2.10 Emendere sahasının jeoloji haritası(Erkül vd., 2005'ten değiştirilerek).....	19
Şekil 2.11 Hisaralan jeotermal alanında belirlenen fay düzlemleri ve ilgili kayma çiziklerinin stereografik izdüşümleri.....	21
Şekil 2.12 Serin Dere içinde gelişen a) oblik atımlı fay (K26°D/37°GD, Sapma açısı:55°) ve b) fay düzleminin yakından görünümü (Koordinat:39.27551°, 28.32027°; KB'ya bakış).....	21
Şekil 2.13 Hisaralan jeotermal alanı içerisinde dasitlerde gözlenen çatlaklara ait gül diyagramı.....	22
Şekil 3.1 Hisaralan sahası termal kaynak alanı civarının hidrojeoloji haritası.....	24
Şekil 3.2 İnceleme alanındaki su noktalarının topoğrafik harita üzerindeki dağılımı...	25
Şekil 3.3 İnceleme alanındaki su noktalarının jeolojik harita üzerindeki dağılımı. ....	26
Şekil 3.4 İnceleme alanında TPAO tarafından açılan Hisaralan-2 (HSW) jeotermal kuyusu (Koordinat: 39.27237°, 28.31980°; soldaki fotoğraf KD'ya, sağdaki fotoğraf GB'ya bakış).....	28
Şekil 3.5 İnceleme alanı termal suları (kırmızı noktalar) ve traverten kulelerinin (sarı noktalar) lokasyon haritası.....	30
Şekil 3.6 Hisaralan termal kaynak alanındaki aktif ve fosil termal kaynakların lokasyon haritası.....	30
Şekil 3.7 Hisaralan jeotermal sahasındaki bazı termal kaynaklardan görünümler (Kaynak koordinatları için Tablo 3.1'e bakınız).....	31
Şekil 3.8 Emendere sahasındaki EM-2 kaynağının görünümü (Koordinat: 39.19349°, 28.22692°; B'ya bakış).....	33

Şekil 3.9	Kocaiskan volkanitlerinden boşalan Ilıcak Pınarı (Koordinat: 39.22574°, 28.27395°, KB'ya bakış).....	33
Şekil 3.10	Bornova Fliş Zonu içindeki neritik kireçtaşı bloklarından görünüm (Sındırgı doğusu, koordinat: 39.23392°, 28.18096°, KD'ya bakış).....	35
Şekil 3.11	Hisaralan sahası akışkan yükselim modeli ve HSW kuyusu statik sıcaklık ölçüsü (Aksoy vd., 2009).....	36
Şekil 3.12	Hisaralan sahasının kavramsal hidrojeolojik modeli.....	37
Şekil 4.1	Piper diyagramı (Nisan-2016).....	47
Şekil 4.2	Piper diyagramı (Ekim-2016).....	47
Şekil 4.3	Termal suların yarı logaritmik diyagramı, (a) Nisan-2016, (b) Ekim-2016 (Emendere suları Ekim-2017).....	48
Şekil 4.4	Soğuk suların yarı logaritmik diyagramı, (a) Nisan-2016, (b) Ekim-2016 (Beşçeşme kaynağı Ekim-2017).....	48
Şekil 4.5	İnceleme alanı suları için klorürün sıcaklık, EC, SiO <sub>2</sub> ve diğer iyon ve elementlerle ikili diyagramları.....	51
Şekil 4.6	İnceleme alanı suları için B-F, B-Li ve F-Li diyagramları.....	52
Şekil 4.7	İnceleme alanı sularının <sup>18</sup> O-D diyagramı (Nisan-2016).....	53
Şekil 4.8	İnceleme alanı sularının <sup>18</sup> O-D diyagramı (Ekim-2016).....	53
Şekil 4.9	Çeşitli doğal ortamlar için δ <sup>34</sup> S değerleri (Clark ve Fritz, 1997) ve termal suların dağılımı.....	54
Şekil 4.10	Çeşitli doğal ortamlar için δ <sup>13</sup> C değerleri (Clark ve Fritz, 1997) ve termal suların dağılımı.....	54
Şekil 4.11	Jeotermal su iletim borusunda gözlenen kabuklaşma.....	56
Şekil 5.1	Nisan-2016 dönemi sularının Giggenbach diyagramı (Giggenbach, 1988)'ndeki dağılımı.....	69
Şekil 5.2	Ekim-2016 dönemi sularının Giggenbach diyagramı (Giggenbach, 1988)'ndeki dağılımı.....	70
Şekil 5.3	İnceleme alanı sularının buhar kaybı olmadığı varsayımına bağlı silis-entalpi diyagramı (kırmızı daireler termal suları göstermektedir).....	71
Şekil 5.4	İnceleme alanı sularının maksimum buhar kaybı kabulüne göre silis-entalpi diyagramı (kırmızı daireler termal suları göstermektedir).....	71
Şekil 5.5	Hisaralan jeotermal sondaj kuyusunun sıcaklık-mineral denge diyagramı...	73
Şekil 6.1	HS-61 kaynağı (T=96.4°C) önündeki boşalım kanalında oluşmuş nilüfer yaprağı traverten (nyp tr) ve rafı traverten (rfs tr) litotipleri. Kanal içinde su akışı sağdan sola doğrudur (Ölçek: kalem=13.8 cm). (Koordinat: 39.26925°, 28.31817°).....	74
Şekil 6.2	Kaynak (HS-61 kaynağı) kenarlarına tutunmuş rafı (ledge) traverten litotipinin arazi görünümü (Koordinat: 39.26925°, 28.31817°).....	75
Şekil 6.3	HS-61 kaynağı önündeki kanalda oluşmuş rafı travertenlerin SEM görüntüleri (a-d). Yüksek büyütmelede aynı örnekte romboedral kalsit (k) ve sütunsal aragonit (a) kristalleri ayırt edilmiştir (c, d).....	75
Şekil 6.4	Kristalin kabuk litotipi. (a) Pembe renkli kristalin kabuki kabuk (HSW kuyusundan aşağı inen patika üzerindeki kaynağın, yaklaşık 45 m doğusu). (b) Pembe renkli kristalin kabuk örneğinin mikroskop görüntüsü (tek nikol). (c) Açık renkli-beyaz kristalin kabuk litotipi, üstte depolanma yüzeyinde	

	mikroteras yapıları gelişmiştir. d) Açık renkli-beyaz kristalin kabuk litotipinin yandan görünümü. (c) ve (d) de ölçek: madeni para (1TL) 26 mm çapında..	76
Şekil 6.5	Yarı güncel kristalin kabuk tipi bir traverten örneğinden (HİS-84) alınan SEM görüntüleri. (a) Büyük çapta aragonit kristallerinden oluşmuş kristalin kabuk tipi traverten (b) Az da olsa rombohedral kalsit kristalleri (okla işaretli) içeren aragonitçe zengin kristalin kabuk görüntüsü. ....	77
Şekil 6.6	Pizolit traverten litotipinin arazi görünümleri (a-d). ....	78
Şekil 6.7	Zarflı tanelerin mikroskop görüntüleri (a-d). (a) İç içe tekrarlanan sparit ve mikrit düzeylerinden oluşmuş zarflı taneler. (b, c) Çoğunlukla mikrit (koyu renkli), az miktarda sparit (açık renkli) düzeylerden kurulu bir zarflı tane. (d) Zarflı taneler arasında açık renkli, ışınal sparit çimento.....	78
Şekil 6.8	Bir zarflı tanenin (pizolit) taramalı elektron mikroskobundaki görünümü. Birbiri üzerinde gelişmiş konsantrik halkalar kaba sparit (s) ve ince mikrit (m) düzeylerinden oluşmuştur. ....	79
Şekil 6.9	Hisaralan jeotermal alanında yer alan KB gidişli traverten sırtının merkezi açılma çatlağında düşey bantlı traverten. Kalınlık: ~20cm. ....	79
Şekil 6.10	Hisaralan jeotermal alanında yer alan KB gidişli traverten sırtının kuzey kesiminden alınmış düşey bantlı traverten örneği.....	80
Şekil 6.11	Traverten kulesinin dış yüzeyinde gözlenen mikrobiyal traverten litotipi. Kulenin tabanından ~50-55cm yukarıda, BKB'ya bakan bir yüzey (285°) krem renkli, mikro boşluklu örnek (HİS-74 nolu örnek). (b) Mikrobiyal traverten örneğinde taramalı elektron mikroskobunda gözlenen diyatome kavkıları. (c) Diyatome kavkısının yakından görünümü. (d) Mikrobiyal filamentler. ....	81
Şekil 6.12	Çalışma alanının batısında Serin Dere'deki bir aktif bacanın dış yüzeyinde gelişmiş mikrobiyal yaygılar. Kulenin tepesinden çıkan sıcak su yanlardan aşağı doğru süzülürken mikrobiyal yaygılar beyazdan yeşile ve kahverengiye dönüşür. Kaynak ağzının çapı: ~10 cm. (Koordinat: 39.27470°, 28.31894°).....	81
Şekil 6.13	Kaynak ve boşalım kanalından arazi görünümleri. Kaynağın kenarlarına tutunmuş açık renkli rafı traverten oluşumları dikkati çeker. Kaynak, akış aşağı yönde boşalım kanalına geçer. Boşalım kanalı içinde ve kenarlara tutunmuş nilüfer yapıları (n) ve rafı travertenler (r) gelişmiştir. (Koordinat: 39.26925°, 28.31817°).....	83
Şekil 6.14	HS-61 kaynağının akış güzergahı boyunca şematik bir boyuna kesit. Şekil üzerinde akış aşağı yönde sıcaklık (T°C), pH ve traverten örneklerinin mineral bileşimi gibi özelliklerin değişimleri de gösterilmiştir. Kaynak ile yakınsak yamaç arasında kanal uzunluğu: ~11m'dir. ....	83
Şekil 6.15	Aktif ve fosil yamaç-şelale tipi depolanma morfolojilerinin arazi görünümü. (a) HS-61 kaynağının akış aşağısında aktif bir yamaçın yakınsak kesiminin önden (cepheden) görünümü (GD'ya bakış), (b) Aktif olmayan bir yamaç-şelale morfolojisinin cepheden görünümü. (Küçük Pansiyonun 40 m KD'su, GD'ya bakış).....	84
Şekil 6.16	Hisaralan jeotermal sahasında travertenlerde gözlenen kaynak tümseği depolanma morfolojisinin arazi görünümleri. (a) Kaynak tümseği, çevresine göre pozitif bir rölyef oluşturur (kuzeye bakış), (b) Çalışma alanının batısında aktif olmayan bir kaynak tümseğinin yakından görünümü (Koordinat: 39.27222°, 28.31905°). Tümseğin altındaki boşluk, ayrılmış volkanik malzemenin uzaklaşması sonucu ortaya çıkmıştır. (c) Çalışma alanının doğusunda fosil bir kaynak tümseği (Koordinat: 39.26936°, 28.31837°), (d) Çalışma alanının batısında, bir kaynak tümseği üzerinde	



	farklı yönlerde gelişmiş açılma çatlakları, yer yer zarflı tane (pisoid) cepleri ve volkanik kayaç parçaları gözlenir.....	85
Şekil 6.17	Traverten kulelerinin (A-D) ve konilerinin (E, F) arazi görünüşleri. A) Çalışma alanının batısında 3.5 m yüksekliğinde bir kule (Koordinat: 39.27208°, 28.31844°, KB'ya bakış, arka planda jeotermal sondaj kuyusundan yamaç aşağı güneye inen jeotermal akışkan iletim hattı). B) KB gidişli traverten sırtının ekseninde gelişmiş, 2.67 m yüksekliğinde bir kule. C) Çetin Pansiyon ile Küçük Pansiyon arasında, yolun 12 m kuzeyinde, 1.97 m yüksekliğinde bir traverten kulesi. D) 2m yüksekliğinde, üst kısmı koni şeklinde bir traverten kulesi. E) Alt kısmı aşınmış 1.8 m yüksekliği olan bir traverten konisi. F) Çetin Pansiyon ile Küçük Pansiyon arasında, yola bitişik bir traverten konisi. Yükseklik: 2.5 m, taban genişliği: 1.75 m (Koordinat: 39.26928°, 28.31627°).....	86
Şekil 6.18	Hisaralan jeotermal alanındaki traverten kulelerinin dağılımı (kırmızı üçgen aktif, beyaz üçgen pasif kule ve konileri simgelemektedir).....	87
Şekil 6.19	Traverten kulelerinin uzunluk (=yükseklik) dağılımı (57 ölçü).....	88
Şekil 6.20	Pasif bir kulenin üstten görünümü. Ortadaki baca duvarları kristalin bir tabaka ile kaplanmıştır. Çizimde (1): Baca duvarlarını kaplayan ışınal kristalin kabuk, (2): Baca deliği, (3): Kulenin dış kısmı.....	88
Şekil 6.21	(A) Aktif ve pasif traverten kulelerinin bir arada görünümü, (B) Aktif bir kulenin üstten görünüşü. (C, D) Sıcak suyun boşaldığı baca delikleri merceksi ve oval şekillidir. Çalışma alanının batısında, Serin Dere vadisinde üst kottaki baca grubu.....	89
Şekil 6.22	Hisaralan jeotermal alanında KKB doğrultulu traverten sırtı. Sırt ekseninde yer yer traverten kuleleri gelişmiştir.....	90
Şekil 6.23	Hisaralan jeotermal alanından alınan traverten örneklerinin duraylı karbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ve oksijen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) değerlerinin dağılımı.....	93
Şekil 7.1	Laminalı (stromatolitik) tufa el örneği (EM-14 nolu örnek). Emendere, Saklıkent Nejdet Birtek Tesis alanı (Koordinat: 39.11527°, 28.13419°).....	98
Şekil 7.2	Laminalı tufa litotipinin mikroskop görünüşleri (EM-14 nolu örnek).....	99
Şekil 7.3	Onkolitik tufa litotipi arazi görünümü.....	99
Şekil 7.4	Onkolitik tufa litotipinin mikroskop görünümü. Onkolit tanesinin merkezinde tufa kırıntısı yer alır (a), Ardalanan açık ve koyu renkli laminaların yakından görünümü (b).....	100
Şekil 7.5	Bryofitik tufa litotipinin arazi görünümü. Aşağı doğru sarkmış, uçları yuvarlak, sütun şekilli bryofitik tufalar. Sütun yapısının ucunun kırılmasıyla ortaya çıkmış dairesel ve taze enine kesitte ışınal yapı (okla işaretli) görülmektedir. Emendere Otel Tesisleri güney sınırı (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°).....	101
Şekil 7.6	Ucu kırılmış sütunsu bryofit tufa sarkıtı. Ortada boşluklu bir yapı sergileyen bryofitik tufa (bt) dıştan sıkı, boşluksuz ve kalınlığı 1-1.5 cm arasında değişen mikritik bir kabuk (mk) ile kaplanmıştır. Emendere Otel Tesisleri güney sınırı (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°).....	102
Şekil 7.7	Kırıntılı tufa litotipinin arazi görünümü. Eman Otel Tesisleri batısı, yol kenarı.....	103
Şekil 7.8	Çakıltaşı litotipi. Çoğunlukla volkanik kayalardan türemiş kaba taneli, köşeli-yarı köşeli ve kötü boylanmış çakıllar, kum hamur ile tutturulmuştur. Çakıllar arasında seyrek tufa parçaları (Ör., sütunsal bryofit tufa parçası, okla işaretli) da görülür. (Eman Otel Tesisleri'nin kuzeyinde, Emendere	

	vadi tabanı).....	103
Şekil 7.9	Çamurtaşı litotipi (resmin alt yarısı). Çamurtaşı, değişik seviyelerde düzensiz dağılmış köşeli volkanik kayalar içerir (Eman Otel Tesisleri'nin kuzeyinde, Emendere vadi tabanı).....	104
Şekil 7.10	Eman Otel Tesisleri'nin güney sınırında yer alan fosil şelale depolanma morfolojisi. (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°).....	105
Şekil 7.11	Mağara boşluğunda aşağı doğru sarkmış düşey konumlu tufa perdeleri ve önde bir dikiç oluşumu (üzerinde çekiç olan). (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°).....	105
Şekil 7.12	Sağa doğru düşük eğimli (10-15°) yamaç tufaları. Üstte, mağara boyutunda boşluklar içeren şelale tufaları (Eman Otel Tesisleri'nin kuzeyinde, Emendere vadisi sol sahil, batıya bakış).....	106
Şekil 7.13	Emendere sahası'ndan alınan tufa örneklerinin duraylı karbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ve oksijen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) değerlerinin dağılımı.....	108
Şekil 8.1	Suların Cl-B diyagramı.....	111
Şekil 8.2	Suların yarı logaritmik diyagramı (a) Hisaralan termal suları, (b) Emendere termal suları.....	112
Şekil 8.3	Hisaralan termal sularının değişik jeotermometrelere göre rezervuar sıcaklıkları.....	113
Şekil 8.4	Hisaralan termal sularının pH- kalsit doyuma indisi diyagramı.....	115

## TABLolar LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 Hisaralan jeotermal alanında belirlenen fay düzlemleri ve ilgili kayma çiziklerinin dağılımı.....	20
Tablo 3.1 İnceleme alanındaki su noktalarının koordinatları.....	27
Tablo 3.2 İnceleme alanındaki su noktalarının Mayıs-2017'de ölçülen debi değerleri (*Ekim 2017'de ölçülmüştür).....	32
Tablo 4.1 İnceleme alanındaki termal suların sıcaklık, EC ve pH değerleri. Yılı belirtilmeyen aylar 2016'ya aittir.....	39
Tablo 4.2 Suların Nisan-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları (mg/l).....	42
Tablo 4.3 Suların Nisan-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları (µg/l).....	42
Tablo 4.4 Suların Ekim-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları (mg/l).....	43
Tablo 4.5 Suların Ekim-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları (µg/l).....	44
Tablo 4.6 İnceleme alanı sularında anyon-katyon sıralanımı ve su tipleri (Nisan-2016).....	45
Tablo 4.7 İnceleme alanı sularında anyon-katyon sıralanımı ve su tipleri (Ekim-2016).....	46
Tablo 4.8 Hisaralan termal sularının toplam alfa/toplam beta analiz sonuçları ve sınır değerler.....	49
Tablo 4.9 Suların duraylı ve radyoizotop içerikleri.....	52
Tablo 4.10 Termal suların bazı minerallere göre doygunluk durumları.....	56
Tablo 4.11 Soğuk suların bazı minerallere göre doygunluk durumları.....	57
Tablo 4.12 Termal suların 25-250°C arasındaki sıcaklıklarda bazı minerallere göre doygunluk durumları (Nisan 2016).....	58
Tablo 4.13 Termal suların 25-250°C arasındaki sıcaklıklarda bazı minerallere göre doygunluk durumları (Ekim 2016).....	61
Tablo 5.1 Rezervuar sıcaklığı hesaplamalarında kullanılan jeotermometre bağıntıları	67
Tablo 5.2 Jeotermometre bağıntılarından hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (°C) .....	68
Tablo 5.3 Oksijen izotop jeotermometresi ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları.....	73
Tablo 6.1 Traverten örneklerinin XRD analiz sonuçlarına göre mineralojik bileşimleri..	91
Tablo 6.2 Hisaralan travertenlerinin duraylı karbon ve oksijen izotop bileşimleri.....	92
Tablo 6.3 Hisaralan traverten örneklerinin element analiz sonuçları (ppm).....	94
Tablo 6.4 Hisaralan jeotermal sahasından alınan traverten örneklerinin <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr izotop analiz sonuçları.....	95
Tablo 6.5 Traverten örneklerinden elde edilen U/Th yaşları.....	97
Tablo 7.1 Emendere sahası tufa örneklerinin element konsantrasyonları (ppm).....	107
Tablo 7.2 Emendere tufalarının duraylı karbon ve oksijen izotop bileşimleri.....	108
Tablo 7.3 Emendere tufa örneklerinin U–Th izotop yaşları.....	109

## ÖZET

Çalışma alanının temelini Bornova Fliş Zonu oluşturur. Bu temel üzerinde Erken Miyosen volkanitleri yer alır. En üstte Kuvaterner yaşlı traverten ve tufa çökelleri bulunmaktadır. Volkanik kayalarda gözlenen eklemeler üç farklı yönde yoğunlaşmıştır. Benzer şekilde, üç farklı yönde gelişmiş olan faylar da düşey, yatay ve verrev atımlı faylardır. Hisaralan jeotermal sistemi devirli bir sistemdir. Rezervuar kayaçlar Bornova Fliş Zonu içindeki Mesozoyik kireçtaşları ve kısmen asidik volkanitlerdir. Tüfler ve Fliş Zonu içindeki geçirimsiz birimler örtü kayayı oluşturur. Hisaralan sahasında toplam 118,6 l/s debi ile boşalan termal suların sıcaklık, elektriksel iletkenlik ve pH değerleri sırasıyla 54,1-97,0°C, 1193-1659 µS/cm ve 6,10-8,78 arasındadır. Emendere sahasında bu değerler sırasıyla 25,2-32,0°C, 266-436 µS/cm ve 6,82-8,44'dür. Hisaralan sahası termal suları Na-HCO<sub>3</sub> tipindedir. Termal suların kimyasal bileşimini şekillendiren başlıca süreçler su-kaya etkileşimi, soğuk yeraltısuyu karışımı ve iyon değişimidir. Hisaralan termal kaynaklarının tamamına yakını kalsit, aragonit ve kuvars minerallerine doygundur. İnceleme alanı suları meteorik kökenlidir. Termal sulardaki karbonun kaynağı manto CO<sub>2</sub>'i, denizel kireçtaşı veya yeraltısuyu DIC'ı ya da bunların bir kombinasyonudur. Kükürdün kaynağı ise kireçtaşı, şeyl ve/veya volkanik sülfürdür. Termal sulara çeşitli jeotermometre teknikleri uygulandığında, Hisaralan için 125-190°C, Emendere için 40-90°C rezervuar sıcaklığı öngörülmüştür. Hisaralan travertenlerinde ve Emendere tufalarında toplam 12 litotip tanımlanmıştır. Hisaralan'da kule, kaynak tümseği, sırt, şelale ve yamaç depolanma morfolojileri gelişmiştir. Bunlar arasında traverten kuleleri dikkat çekmektedir. Traverten sırtı KB-GD doğrultusunda uzanır ve fay ve eklem düzlemleri ile uyumludur. Emendere'de ise şelale ve yamaç depolanma morfolojileri gelişmiştir. Travertenlerin δ<sup>13</sup>C değerleri -0,5 ile -4,2‰ (V-PDB) arasında, δ<sup>18</sup>O değerleri -22,19 ile -9,99‰ (V-PDB) arasındadır. Negatif δ<sup>13</sup>C değerleri, mağmatik kökenli CO<sub>2</sub> katılımını işaret etmektedir. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr izotop değerleri 0,710024-0,710396'dır. Bu sonuçlar, Hisaralan'da termal suların radyojenik temel kayalarla etkileşimine bağlı olarak Sr izotop değerlerinin yükselmiş olduğunu gösterir. Buna karşılık, Emendere tufalarının δ<sup>13</sup>C değerleri -3,60 ile -6,81‰(V-PDB) arasında, δ<sup>18</sup>O değerleri ise -11,45 ile -7,52‰(V-PDB) arasındadır. Bu negatif değerlere göre, tufalar sıg dolaşimli kaynak sularından çökelmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hisaralan, Emendere, traverten kulesi, tufa, termal sular, hidrokimya, izotop

## ABSTRACT

Basement of the study area consists of the Bornova Flysch Zone. The Early Miocene volcanics take place on this basement. The Quaternary travertine and tufa deposits are the youngest that are located at the uppermost. At the Hisaralan Geothermal Field, joint strikes observed on the volcanic rocks concentrated in three directions. Similarly, the faults also developed in three different directions are those of normal, strike-slip and oblique. In the Hisaralan geothermal system, reservoir rocks are the Mesozoic limestones in the Bornova Flysch Zone and partly Miocene acidic volcanics. The Early Miocene volcanic tuffs and impermeable lithologies of the Bornova flysch zone represent the caprocks. Temperature, electrical conductivity and pH values of the thermal waters, discharging with a total flow of 118.6 l/s, are 54.1-97°C, 1193-1659  $\mu\text{S} / \text{cm}$  and 6.10-8.78, respectively. At Emendere, these values are in the order of 25.2-32.0°C, 266-436  $\mu\text{S} / \text{cm}$  and 6.82-8.44. All of the thermal waters of Hisaralan are of the Na-HCO<sub>3</sub> type. The main processes that control the chemical composition of thermal waters are water-rock interaction, cold groundwater mixture and ion exchange. Almost all of the Hisaralan thermal waters are saturated with respect to calcite, aragonite and quartz minerals. The waters of the study area are meteoric in origin. The source of carbon in thermal waters is mantle CO<sub>2</sub>, marine limestone or groundwater DIC, or a combination of these. The source of sulfur is limestone, shale and/or volcanic sulfur. Various geothermometry techniques applied to the thermal waters gave reservoir temperatures of 125-190°C for Hisaralan and 40-90°C for Emendere. Totally 12 lithotypes were described from the Hisaralan travertines and Emendere tufas. At Hisaralan, depositional morphologies such as travertine tower, spring mound, fissure ridge and waterfall were developed. Among them, the travertine towers, which are rare occurrences, are remarkable. The fissure ridge is in the NW direction and compatible with the joint and fault planes. On the other hand, the waterfall and slope depositional morphologies emerged in Emendere. The  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of the travertines are -0.5 to -4.2‰ (V-PDB) and -22.19 to -9.99‰ (V-PDB), respectively. The negative  $\delta^{13}\text{C}$  values indicate a CO<sub>2</sub> contribution of magmatic origin. The Sr isotope values range from 0.710024 to 0.710396. These results indicate that the Sr isotope values were increased due to the interaction of the hot water with the radiogenic source rocks. On the other hand, the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of the Emendere tufas are -3.60 to -6.81‰ (V-PDB) and -11.45 to -7.52‰ (V-PDB), respectively. Considering these negative  $\delta^{13}\text{C}$  values, tufas were precipitated by shallow circulating springs.

**Key Words:** Hisaralan, Emendere, travertine tower, tufa, thermal waters, hydrochemistry, isotope

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Çalışma Alanı

İnceleme alanındaki sıcak su kaynakları Hisaralan ve Ilıca Köyü civarında (Emendere sahası) yer almaktadır. Hisaralan jeotermal sahası Balıkesir il merkezinin kuş uçuşu 55 km GD'sunda, Sındırgı ilçe merkezinin 13 km doğusunda, Balıkesir J20-b3 ve J20-b4 paftalarında yer alır ve Batı Anadolu'nun önemli jeotermal potansiyele sahip sahalarından biridir (Şekil 1.1). Emendere sahası ise Sındırgı ilçe merkezinin 7 km güneydoğusunda, Balıkesir J20-b4 paftasında bulunur.



Şekil 1.1. Türkiye'deki jeotermal alanların ve sıcak suların dağılımı (Şimşek, 2009). Şekil üzerindeki dikdörtgen alan çalışma alanının konumunu göstermektedir.

Çalışma alanı oldukça sarp bir topoğrafyaya sahiptir. En düşük kot, Simav Çayı ve Çaygören Baraj gölü civarında olup 274 m'dir. Bu noktadan 3 km kuzeyde ise kot Kepez Tepe'de 942 m'ye yükselmektedir. Bir kısım soğuk su örneklemesinin yapıldığı Ulus Dağı (1769 m) ve etekleri çalışma alanının en yüksek kotlarını oluşturmaktadır. Sındırgı ilçesinde uzun dönem meteorolojik verilerin elde edilebileceği bir istasyon yoktur. Yöre, Balıkesir il merkezi ile benzer iklim koşullarına sahip olduğundan il merkezine ait verilerle uzun dönem (1950-2015) ortalamalarına bir yaklaşım sağlanabilir. Buna göre yörenin yıllık toplam yağış ortalaması 576,8 mm, yıllık ortalama hava sıcaklığı 14,6 °C olarak kabul edilebilir.

İnceleme alanındaki sıcak su kaynakları Hisaralan ve Ilıca Köyü civarında (Emendere sahası) yer almaktadır. Hisaralan sahası yüksek sıcaklıktaki termal kaynakları ve bu kaynak sularının oluşturduğu, Dünyada ender görülen traverten konileri ile jeolojik miras özelliği taşıyan özel bir alandır. Biri sondaj yoluyla olmak üzere çok sayıdaki kaynaktan boşalan termal sular, başlıca pansiyon ve otellerde banyo, konut ısıtması (alandaki oteller ve

Sındırgı) ve sera ısıtmasında kullanılmaktadır. Emendere sahasında sıcaklığı yaklaşık 30°C civarında olan sıcak su kaynakları kaplıca amaçlı kullanılmaktadır.

## 1.2 Amaç ve Kapsam

Bu projeye, Hisaralan (Balıkesir) Jeotermal Sahası'ndaki travertenlerin ve traverten depolanma morfolojilerinin oluşumunda rol oynayan tektonik, sedimantolojik, mineralojik, petrografik, jeokimyasal ve hidrojeolojik faktörlerin ortaya konulması, koni ve kule gibi ender traverten morfolojilerinin jeolojik miras olarak korunabilmesi için proje çıktılarının yerel ve ulusal düzeydeki ilgili kurum ve kuruluşların dikkatlerine sunulması ve paylaşılması amaçlanmıştır.

Hisaralan sahasında sıcaklıkları 55 ile 99°C arasında değişen çok sayıda termal kaynak vardır. Bu kaynakların kimyasal kompozisyonu hemen hemen benzerdir. Hisaralan sahasının 6 ila 11 km güneybatısında bulunan ve MTA (2005) envanterinde Emendere sahası olarak adlandırılan alanda düşük sıcaklıklı (25-30°C) termal kaynaklar bulunur. Bu sahanın jeolojisi Hisaralan sahası ile büyük benzerlik taşımaktadır. Her iki sahada da traverten ve tufa gibi karbonatlı kaynak çökelleri gözlenir. Bu açıdan Emendere ve Hisaralan sahası termal sularının ve kaynak çökellerinin kimyasal ve izotopik kompozisyonları arasında benzerlik olup olmadığı ve Emendere sahasının Hisaralan sahasını oluşturan jeotermal sistemin bir parçası olup olmadığı sorularının yanıtlanması için Emendere termal sularından ve bunlara eşlik eden traverten-tufalardan da örnekleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Hisaralan sıcak su kaynakları ve traverten alanı civarının jeoloji haritasının yapılması,
- 2- Hisaralan ve Emendere sahalarında traverten çökeltten termal suların hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi,
- 3- Traverten oluşumlarının jeolojik-tektonik konumunun saptanması,
- 4- Traverten çökellerinde farklı depolanma morfolojilerinin belirlenmesi (litotip ve fasiyes tanımlamaları), özellikle traverten kulelerinin (konilerinin) dağılımı, haritalanması ve boyutlarının sayısal olarak ortaya konulması,
- 5- Traverten çökellerinin mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve jeokronolojik özelliklerinin aydınlatılması ve
- 6- Traverten konilerinin jeolojik miras olarak korunabilmesi için bilimsel ve idari yönden neler yapılabileceğinin değerlendirilmesidir.

### 1.3 Literatür Özeti

Hisaralan Jeotermal Sahası, Türkiye'nin KB'sında Sındırgı (Balıkesir) İlçesi'nin 25 km KD'sunda, deniz seviyesinden 300-450 m yukarıda GB'ya bakan bir yamaçta yer alır. Çalışma alanının temelinde Bornova Fliş Zonu yer alır. Bornova Fliş Zonu, kuzeybatıda İzmir-Ankara Tetis sütür kuşağı ile güneydoğuda Menderes Masifi arasında uzanan bölgesel bir olistostrom-melanj kuşağıdır (Okay vd., 2012). Bornova Fliş Zonu çoğunlukla tektonize olmuş yerçekimsel kütle akma ürünlerinden kuruludur.

Bornova Fliş Zonu'nda, yer yer boyutları 20 km'ye varan neritik-pelajik kireçtaşı blokları (olistolit) ve ofiyolitik kayalar bulunur. Olistolit blokları fliş fasiyesinin ince taneli silisiklastikleriyle kuşatılmıştır (Okay ve Altiner, 2007; Erdoğan ve Güngör, 1992). Bornova Fliş Zonu içindeki kireçtaşı bloklarının yaşları geç Triyas ile Kretase arasında değişir (Erdoğan ve Güngör, 1992; Okay vd., 2012). İnceleme alanının batısında yer alan Kızıltepe bölgesinde, temelde Kretase yaşlı ofiyolitik kayalar ve kireçtaşları, bunların üzerinde ise bileşimsel olarak dasitik ile riyolitik arasında değişen lav, breş ve ignimbiritler bulunmaktadır; Hisaralan kaplıcaları ve daha doğusunda temel kayaların yüzeylenmesi KKD-GGB doğrultulu faylar boyunca gerçekleşmiştir (Yılmaz vd., 2013).

Çalışma alanı ve çevresinde erken Miyosen volkanizması 23 milyon yıl önce başlamış ve 17.8 milyon yıl öncesine kadar devam etmiştir (Erkül vd., 2005). Bölgedeki bimodal volkanik kayaların oluşumunda, kabuksal ve manto kökenli iki farklı mağma kaynağı etkin olmuştur (Erkül vd., 2010). Sındırgı ve Bigadiç ilçeleri arasında erken Miyosen lavları ve volkanosedimanter istif, Bornova Fliş Zonu üzerine uyumsuz olarak gelir. Çalışma alanı ve çevresinde yaygın olan volkanik kayalar çoğunlukla dasit ve yer yer riyolitlerden oluşur (Erkül vd., 2005). Hisaralan dışında, göl ortamlarında çökelmiş ve tabanda kireçtaşları ile başlayan, tüflerle ardalanan ve bazı seviyelerde borat oluşumları da gözlenen volkanosedimanter istif volkanik kayalar üzerine oturur (Helvacı ve Alaca, 1991; Helvacı, 1995). Çalışma alanında, volkanosedimanter istifin sadece volkanik tuf düzeyleri yüzeylenmiştir. Tüfler üzerinde sıcak kaynak sularından çökelmiş travertenler ve alüvyonlar yer alır. Alüvyonlar Simav Çayı ve diğer küçük dere yatakları boyunca izlenir. Hisaralan travertenlerinin oluştuğu jeotermal sistem, horst-graben yapılarının ortaya çıkmasına yol açan düşey faylanmalar sonucu meydana gelmiştir.

Hisaralan jeotermal sahasında bugüne kadar yapılan çalışmalar hidrojeokimya ağırlıklıdır. Önceki çalışmalarda, inceleme alanındaki termal kaynakların sayısı, sıcaklıkları ve debileri konusunda farklı bilgiler verilmiştir. Hafeli (1966), Hisaralan jeotermal sahasında 1965



yılında, sıcaklıkları 48-98°C arasında değişen, toplam debisi 57 l/s olan ve yüzeye çıkış noktaları çatlak sistemleri ile kontrol edilen 206 adet termal kaynak olduğunu belirlemiştir. MTA (2005)'de sıcaklıkları 27 ile 98,5°C arasında değişen ve toplam debisi 176 l/s olan 130 adet sıcak su kaynağı rapor edilmiştir. Aksoy vd. (2009)'da ise sıcaklıkları 55,5-96,6°C arasında ve toplam debileri 150 l/s olan çok sayıda termal kaynaktan söz edilir. Yöredeki termal kaynak sayısı, sıcaklık alt değeri ve toplam debi üzerine verilen bilgilerdeki bu farklılık çalışmaların 1966'dan 2009'a kadar 44 yıllık bir aralığı içermesi, çalışma mevsimi, sıcak-soğuk su karışımları ve rezervuar basıncındaki olası değişimler de göz önüne alındığında normaldir. Proje çalışmaları sırasında 97 adet termal kaynak tespit edilmiş, bu kaynakların güncel fizikokimyasal özellikleri ve debileri belirlenmiştir.

Termal kaynakların büyük bölümü yaklaşık 2 km<sup>2</sup>'lik bir alanda yer almaktadır. Yukarıda değinilen araştırmalarda termal suların Na-HCO<sub>3</sub> tipinde olduğu belirtilmiştir. Hisaralan termal sularının kökeninin meteorik, içerdiği kükürdün kaynağının sülfatın indirgenmesi ve karbonun kökeninin denizel karbonatların yüksek sıcaklıkta çözünmesi olduğunu ifade eden Mutlu (2007), Hisaralan sahası termal sularının Balıkesir ilindeki diğer sulara oranla nispeten yüksek B, As ve Sb içerdiğini ve yeni travertenlerdeki Ca/Sr oranının termal sudaki orana benzerliğini vurgular. Önceki çalışmalarda Hisaralan sahası termal sularının meteorik kökenli olduğu belirlenmiştir (Mutlu, 2007; Aksoy vd., 2009; Kocabaş vd., 2016). Bu proje kapsamında sulardan iki dönem (Nisan ve Ekim 2016) örnek alınarak kimyasal analiz yanında izotop analizleriyle su kimyasındaki mevsimsel değişimler, su kimyasını etkileyen faktörler, suların ve sulardaki karbon ve kükürdün kökeni, suların radyoaktivitesi ve suların yaşı üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Sulardan radyoaktivite, trityum ve <sup>14</sup>C analizleri bu çalışmada ilk kez yapılmıştır.

MTA (2005), termal suların hazne kayasının Üst Kretase yaşlı kireçtaşları olduğuna değinir. Aksoy vd. (2009) ise jeotermal sistemde, biri Pliyosen yaşlı tuf ve dasitlerden oluşan, diğeri de daha derindeki ofiyolit seri içerisinde yer alan rekristalize kireçtaşları olmak üzere iki farklı rezervuar kaya bulunduğunu ifade ederler. Jeotermal araştırmalardaki en önemli çalışmalardan biri rezervuar sıcaklığına yaklaşım sağlanmasıdır. Hisaralan sahasına uygulanan jeotermometreler 110-150°C (Mutlu, 2007), 150°C (Aksoy vd., 2009), 120°C (Mutlu ve Kılıç, 2009) civarında rezervuar sıcaklıkları vermiştir. Aksoy vd. (2009), Hisaralan sahasında TPAO tarafından açılan 987 m derinliğindeki HS-2 kuyusunun 106°C sıcaklık ve 30 l/s debide üretim yapabileceğini, statik sıcaklık testleri ile belirlenen iki üretim zonundan daha derinde (500-700 m) olan zonda maksimum 107°C sıcaklık ölçüldüğünü vurgulamışlardır. Hisaralan sahasının olası jeotermal potansiyeli, 103°C su sıcaklığı, 90°C kullanım sıcaklığı, 3 km<sup>2</sup> yüzey alanı ve 400 m rezervuar kalınlığı dikkate alındığında 53,7

MWt olarak belirlenmiştir (Yılmaz vd., 2010). Bu proje ile yukarıdaki çalışmalara ilaveten daha çok sayıda termal kaynağa silis ve katyon jeotermometreleri uygulanmış, silis karışım ve <sup>18</sup>O izotop jeotermometresi ilk kez uygulanarak gerçekçi rezervuar sıcaklığına yaklaşım sağlanmaya çalışılmıştır.

Çalışma alanının kuş uçuşu 25 km kadar kuzeyinde bulunan Hisarköy jeotermal sahasına (Bigadiç) odaklanan çalışmalar da vardır. Gemici ve Tarcan (2007), Hisarköy jeotermal alanındaki sıcak suların trakiandezit rezervuardan K-KD doğrultulu fay boyunca yükselerek yüzelediğini, suların sıcaklıklarının 40-98°C arasında değiştiğini, elektriksel iletkenlik değerlerinin ise 3070 µS/cm'ye eriştiğini belirtirler. Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> tipindeki soğuk suların hazne kayadaki plajioloklasların çözünmesi ve iyon değişim reaksiyonları sonucunda Na-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> tipine dönüştüğünü, ayrıca, sıcak sulardaki arsenik miktarının dikkate değer (1,36 mg/l) olduğunu ifade ederler. Yazarlar, sıcak suların aragonit, kalsit, kalseduan, kuvars ve barite göre doygun olduğunu ve bu nedenle sahada açılacak derin kuyularda kalsit kabuklaşması görülebileceğini vurgulamışlardır. Göçmez ve Ölmez (2008), Hisarköy jeotermal alanındaki faylardan çıkan sıcak ve mineralli su kaynaklarının toplam debisi 10 l/s iken, alanda açılan jeotermal sondajların toplam 103 l/s debide ve 24-98°C arasında değişen sıcaklıklarda jeotermal su ürettiğini belirtmişlerdir.

Traverten, tufa, mağara çökelleri (sarkıt, dikit, akmataş v.b.) ve kalkrit gibi karasal karbonatlar, oluştukları dönemlerle ilgili (özellikle Kuvaterner'de) birçok veriyi bünyelerinde barındırırlar (Andrews, 2006; Pentecost, 2005; Pedley, 2009). Bunlar arasında özellikle kaynak karbonatları (traverten ve tufa) öne çıkmaktadır. Bazı araştırmacılar (Örn., Pentecost, 2005; Crossey vd., 2006) karbonatlı kaynak çökellerinin tümü için 'traverten' terimini kullanırken, bazıları da, derin dolaşimli hidrotermal sulardan oluşan çökeller için, 'traverten', düşük sıcaklıklı, sık dolaşimli karstik sulardan oluşan çökeller için 'tufa' terimini kullanmayı tercih ederler (Ford ve Pedley, 1996; Pedley, 2009; Andrews, 2006; Jones ve Renaut, 2010). Bu çalışmada traverten ve tufa terimlerinin ayrı ayrı kullanılması tercih edilmiştir.

Traverten oluşumları ile bölgesel-yerel tektonik ve deprensellik arasında yakın bir ilişki vardır (Hancock vd., 2000; Piper vd., 2007; Gradziński vd., 2014). Batı Anadolu'da olduğu gibi, çoğu traverten oluşumları, genişleme tektoniğinin etkisi altındaki bölgelerde gelişmiştir (Altunel ve Karabacak, 2005; Temiz ve Eikenberg, 2011; Brogi vd., 2012; De Filippis vd., 2012; Özkul vd., 2013, 2014; Van Noten vd., 2013). Ancak, verev ve doğrultu atımlı fay kuşaklarında da traverten oluşumları rapor edilmiştir (Mesci vd., 2008; Mesci, 2013; Temiz vd., 2013; Çolak Erol, 2015). Traverten çökeltin suların daha önceden derinde yaşlı karbonat kayaçlarla etkileşimde olması beklenir (Kele vd., 2011). Ayrıca bir ısı kaynağına

ihtiyaç vardır. Termal akışkanın yeryüzüne ulaşması için fay ve kırık gibi süreksizlikler doğal yollardır.

Travertenlerin, tektonik-depremsellik ile ilişkisi dışında, oluştukları yöre ve döneme ilişkin ortamsal (Guo ve Riding, 1998; Özkul vd., 2013) ve iklimsel (Andrews, 2006; Bertini vd., 2014; Toker vd., 2015), kayıtları da içlerinde barındırdıklarından, bilimsel birer arşiv niteliği taşırlar.

Traverten, tarihi dönemlerden bu yana en yaygın kullanılan yapıtaşlarından birisidir. İtalya'nın başkenti Roma'da bulunan Colasseum'un yapımında kullanılan yapıtaşları, kentin 25 km doğusundaki Tivoli traverten ocaklarından getirilmiştir (Minissale vd., 2002; Pedley, 2009; Facenna vd., 2008; De Filippis vd., 2012; Claes vd., 2015). Bunun yanında Batı Anadolu'da, Denizli Havzası'ndaki Hierapolis, Tripolis, Laodikya ve Colosae gibi antik kentlerde ana yapı taşı traverten olmuştur (Özkul, 2005). Günümüzde de gerek Tivoli ocakları, gerekse Denizli'deki ocaklarda (Çobanoğlu ve Çelik, 2012) blok üretim faaliyetleri devam etmektedir.

Son yıllarda Batı Afrika ve Brezilya açıklarında yapılan deniz tabanı hidrokarbon araştırmaları sırasında tuz çökelleri altında hazne kaya özelliği taşıyan traverten-tufa benzeri karasal karbonat çökelleri kesilmiştir. Ancak bu bulgular sismik veriler ve sondaj karotları ile sınırlı olduğundan, Dünya'nın farklı bölgelerinde iyi yüzeylemiş benzer çökellerin incelenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu gelişmeler üzerine, traverten-tufa v.b. çökellerin iyi yüzeyletiği ülkelerde yapılan çok yönlü rezervuar analog çalışmalarında belirgin bir artış gözlenmektedir (El Desouky vd., 2015; Soete vd., 2015; Claes vd., 2015).

Termal kaynakların arazideki konumuna göre traverten sahalarında değişik depolanma morfolojileri gelişir. Teras tipi, sırt tipi, şelale ve koni/kule tipleri en dikkat çekenlerdir (Chafetz ve Folk, 1984; Altunel ve Hancock, 1993). Bu depolanma morfolojilerinin yer aldığı bazı sahalar, yüksek görseelliği ve yok olma tehdidi altında olduklarından, ulusal ve/veya uluslararası ölçekte 'ulusal park, 'jeopark' ve/veya 'jeosit' ilan edilmiştir. Örneğin Pamukkale (Ekmekçi vd., 1995; Şimşek vd., 2000; Kele vd., 2011; Özkul vd., 2013) ve Mammoth Hot Springs, Yellowstone, A.B.D. (Fouke vd., 2000; Fouke, 2011) Dünya çapında tanınan yerler olup, her yıl binlerce kişi tarafından ziyaret edilmektedir. Bu tür yerler aynı zamanda doğal laboratuvar gibidir. Traverten-tufa konileri/kuleleri, daha önceki bazı yayınlarda da belirtildiği gibi, ilginç ve ender oluşumlardır (Fouke, 2011; Linares vd., 2010; Keppel vd., 2011; Liu vd., 2012; Jones ve Peng, 2017). Bu proje kapsamında traverten kule (koni) oluşumları başta olmak üzere sırt tipi, şelale, yamaç gibi depolanma şekilleri tespit edilmiştir. Sahada kule oluşumları çok dikkat çekicidir. Bu oluşumların yerel ve merkezi yönetimlerin dikkatine sunulması ve tanıtılması amacıyla 5-6 Mayıs 2017 tarihlerinde bir çalıştay düzenlenmiştir.

Ayrıca traverten oluşumları üzerinde ilk defa ayrıntılı fasiyes analizleri, tektonik çalışmalar, XRD ve SEM analizleri, element ve izotop jeokimyası ve yaşlandırma çalışmaları yapılmıştır.

Aksoy vd. (2009), Hisaralan'daki traverten bacalarının fışkıran kaynaklar tarafından meydana getirildiğini belirtmiştir. Çin'in Tibet–Yunnan jeotermal bölgesinde yapılan bir çalışmada, yükseklikleri 1 m ile 7.1 m arasında değişen traverten kuleleri, doygunluğu yüksek olan termal sulara atfedilmiştir (Liu vd., 2012). Bu çalışmada 60'a yakın kulenin dağılım haritası yapılmış, yükseklik ve genişlikleri ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda traverten kule oluşumlarının çoğunun pasif olduğu, çok azının aktif olduğu anlaşılmıştır.

## 1.4 Materyal ve Metod

### 1.4.1 Hidrojeokimya Çalışmaları

Öncelikle inceleme alanındaki tüm sıcak su noktaları ile örnekleme için seçilen soğuk su kaynakları ve Simav Çayı örnekleme lokasyonlarının koordinatları GPS ile ölçülerek 1/25000 ölçekli haritaya işlenmiştir. Sıcak ve soğuk su kaynaklarının debileri zaman-belirli hacim yöntemi ile ölçülmüştür. Sızıntı halinde akan kaynaklarda, akış elde edilinceye kadar kazma kullanılarak oluk açılmış ve bu kaynakların debileri de aynı yöntemle ölçülmüştür.

İnceleme alanındaki jeotermal sondaj, sıcak/soğuk kaynak suları ve yüzey sularının sıcaklıkları, elektriksel iletkenlik (EC), pH ve Eh değerleri HACH-LANGE HQ40D model multimetre ile ölçülmüştür. Ölçümlerden önce, her parametre için cihaz standart çözeltilerle kalibre edilmiştir. Suların  $\text{CO}_3$  ve  $\text{HCO}_3$  miktarları  $\text{H}_2\text{SO}_4$  titrasyonu ile (mikrotitratör, HACH-LANGE kimyasalları ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$  şırıngalarının kullanımıyla) belirlenmiştir.

İyon ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  ve  $\text{NO}_3^-$ ) analizleri için örnekler 250 ml.lik çift tıpalı HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) şişelere filtre edilerek ( $0.45 \mu\text{m}$ ) alınmış ve laboratuvara ulaştırılincaya kadar soğuk ortamda saklanmıştır ( $<+4^\circ\text{C}$ ). Element analizleri için örnekler 100 ml.lik HDPE şişelere filtre edilerek ve daha sonra ultra saf  $\text{HNO}_3$  ilavesiyle örnek pH'ı 2 veya altına indirilerek alınmıştır. Örnekler, örnekleme işlemi tamamlandıktan sonra birkaç gün içinde laboratuvara ulaştırılmıştır.  $\text{SiO}_2$  analizi için örnekler 100 ml. lik HDPE şişelere ultra saf su ile seyreltilerek alınmıştır.

Örnekler  $^{18}\text{O}$  ve  $^2\text{H}$  analizi için 50 ml, trityum analizi için ise 500 ml. lik çift tıpalı HDPE şişelere, hava kabarcığı bırakmadan alınmıştır.  $^{13}\text{C}$  ve  $^{14}\text{C}$  (DIC) analizleri için örnekler 100 ( $^{13}\text{C}$ ) ve 1000 ( $^{14}\text{C}$ ) ml.lik çift tıpalı kahverengi cam şişelere filtre edilerek alınmış, analizi yapacak laboratuvarın isteği üzerine suya  $\text{HgCl}_2$  ilave edilmemiş, ancak, laboratuvara ulaştırılincaya kadar soğuk ortamda saklanmıştır ( $<+4^\circ\text{C}$ ). Suda çözülmüş sülfatın  $^{34}\text{S}$  ve

$^{18}\text{O}$  analizi için örnekler, örneğin sülfat içeriğine göre değişen hacimlerde (100 ml-2000 ml) filtre edilerek alınmış ve seyreltik ultra saf HCl ilavesiyle örnek pH'ı 4-5'e getirilmiştir. Ardından, örnek hacmi ve sülfat derişimine göre değişen miktarlarda (100-150 mg)  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  suya ilave edilerek 3-6 saat beklemeyle  $\text{BaSO}_4$  çöktürülmüştür.

Radyoaktivite ( $\alpha$  ve  $\beta$  aktivitesi) analizi için örnekler 1000 ml.lik HDPE şişelere alınmış ve ultra saf 1 N  $\text{HNO}_3$  ilavesiyle örnek pH'ı 2 veya altına indirilmiştir.

Örnekleme tamamlanmasında yeni şişeler kullanılmış, örnekleme öncesi, örneklenecek suyla, filtreleme gerektiren örnekleme filtrelenmiş suyla 3 kez çalkalanmıştır.

Suların majör iyon ve trityum ( $^3\text{H}$ ) analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası ve Çevresel Trityum Laboratuvarı'na, element analizleri AcmeLab (Kanada)'a yaptırılmıştır.  $\text{SiO}_2$  analizleri Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Jeokimya Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.  $^{18}\text{O}$  ve D izotop analizleri Utah Üniversitesi SIRFER Lab.'a (ABD),  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ , suda çözülmüş sülfattan  $^{34}\text{S}$  ve  $^{18}\text{O}$  analizleri Waterloo Üniversitesi, Environmental Isotope Laboratory'a (Kanada) ve radyoaktivite analizleri ( $\alpha$  ve  $\beta$  aktivitesi) DSİ Genel Müdürlüğü'nde yaptırılmıştır.

## 1.4.2 Travertenlerde Çalışma Yöntemleri

### Saha çalışmaları

Çalışma alanındaki travertenlerden alınan örneklerin farklı traverten tiplerini temsil etmesine özen gösterilmiştir. Ayrıca HS-61 nolu kaynaktan itibaren akış aşağı yönde değişimleri izlemek için su örneklerinin yanısıra sistematik traverten örnekleri alınmıştır. Yerde ölçümler, farklı traverten depolanma morfolojilerinin (traverten kuleleri, çatlak sırtları, kaynak tümsekleri, şelale v.b.) GPS konumları ile yükseklik, genişlik, tabaka ve eksen duruşlarını kapsamaktadır.

### SEM çalışmaları

SEM çalışmaları Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan ZeissEvo Is 10 model elektron mikroskobunda yapılmıştır. Taze kırılmış küçük traverten parçalarından elde edilen SEM görüntüleri yardımıyla mineral şekilleri, inorganik ve organik kökenli doku özellikleri incelenmiştir. SEM görüntüleri çalışılırken gerekli görülen noktalarda enerji dispersive spectrometer (EDS) analizleri ile element bileşimleri tayin edilmiştir. 1 cm lik alüminyum örnek diskleri üzerine yerleştirilen numuneler Crossington 108 Auto sputtercoater ile 5nm altın ile kaplanmıştır. Altın kaplanmış örnekler cihazın numune

odasına yerleştirilmiştir. 4.10 üzeri 7 mbar vakumda LaB6 (Lantanyumheksoborat) filament ile SE elektron dedektörü ile yüksek vakumda farklı magnifikasyonlarda görüntü alınmıştır.

### **XRD analizleri**

34 adet traverten örneğinin mineralojik bileşimleri, Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde bulunan GNR APD 2000 PRO marka XRD (X-ray powder diffraction) cihazıyla yapılmıştır. Örnekler önce halkalı değirmende öğütülmüş ve çekim gerçekleştirilmiştir. Toz örneklerin XRD ölçümleri 40 kV ve 30 mA koşullarında (Kağıt aralığı=2 teta=5-45°; step aralıkları = 0.05, integration zamanı =2 saniye) ve CuK $\alpha$  ışıklı XRD cihazı ile yapılmıştır.

### **Duraylı karbon ve oksijen izotop analizleri**

23 adet tufa ve 41 adet traverten örneğinin karbon ve oksijen duraylı izotop analizleri, Arizona Üniversitesi (A.B.D.) Yerbilimleri Bölümü Duraylı İzotop Karbonat Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Örneklerin duraylı izotop analizler sürekli akış tekniği (Spötl ve Vennemann, 2003) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ve <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O oranları, Finnigan delta plus XP kütle spektrometresi (ThermoFisherScientific, Bath, UK) kullanılarak, fosforik asitle serbest hale getirilmiş karbondioksit gazından ölçülmüştür.

### **Sr izotop analizleri**

Sr izotop analizleri, ODTÜ Merkez Laboratuvarı (Ar-Ge Eğitim ve Ölçme Merkezi, Radyojenik İzotop Laboratuvarı) ve Madrid Complutense Üniversitesi (İspanya) Geochronology and Isotope Geochemistry Service'te yapılmıştır. Analizi yapılan örnek sayısı 26'dır. Sonuçların doğruluğunu test etmek için bazı örnekler her iki laboratuvarında analiz edilmiştir.

ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda TLM-ARG-RİL-01 (Sr İzotop Oranı Analizi Deney Talimatı) talimatı uygulanarak yapılmıştır. Tartım, kimyasal çözme ve kromatografi işlemleri 100 temizlik standardında temiz laboratuvar koşullarında, ultrasaf su ve kimyasallar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerden yaklaşık 80 mg tartılarak PFA şişelere aktarılmıştır. Numuneler, 4 mL 52% HF içinde 4 gün süreyle >100°C'lik ısıtıcı tabla üzerinde bekletilerek tamamen çözülmüştür. Isıtıcı tabla üzerinde buharlaşmaya yakın kurutulan örnekler önce 4 mL 6 N HCl içinde bir gün süreyle çözülmüştür. Numune daha sonra tekrar ısıtıcı table üzerinde buharlaştırmaya yakın kurutularak 1 mL 2,5 N HCl içine alınmış ve kromatografiye hazır duruma getirilmiştir. Stronsiyum elementi, 2,5 N HCl ile 2 mL hacimde Bio Rad AG50 W-X8, 100-200 mesh reçine kullanılarak teflon kolonlarda ayrılmıştır. Stronsiyumun

toplanmasından sonra 6 N HCl ile nadir toprak elementleri fraksiyonu toplanmıştır. Stronsiyum, tek Re-filamenti üzerine Ta-aktivatör ve 0,005 N H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak yüklenmiş ve statik modda ölçülmüştür. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr verileri <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0,1194'e normalize edilmiştir. Ölçümler sırasında Sr NBS 987 standardı 0,710246±8 (n=3) olarak ölçülmüştür. Stronsiyum izotop oranı ölçüm sonuçları üzerinde herhangi bir bias düzeltmesi yapılmamıştır. Ölçümler, Triton Termal İyonizasyon Kütle Spektrometresi (Thermo-Fisher) kullanılarak çoklu-toplama ile yapılmıştır. Analitik belirsizlikler 2 sigma düzeyindedir.

Madrid Complutense Üniversitesi Jeokronoloji ve İzotop Jeokimyası Servisi'nde traverten örneklerinin Sr izotop analizleri için uygulanan yöntemde öncelikle teflon kaplarda tartılan traverten örnekleri (≈30 mgr) 5 mL ultra saf %10'luk asetik asitte (Merck-SuprapurTM) çözülmüştür. Çözülmüş örnekler 15 dakika ultrasonic banyoda bekletilmiştir. Ardından 10 dakika süre ile 4000 rpm'de santrifüj edilmiştir. Bu aşamadan sonra yüzer madde 120°C'de ısıtılarak kurutulmuştur. Örnekler kurutulduktan sonra 1mL HNO<sub>3</sub> (Merck-SuprapurTM) ilave edilip ve 120°C'de bir ısıtma levhası üzerinde buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma adımından sonra, teflon kaplara 3mL 3M'lik HNO<sub>3</sub> ilave edilerek, örnekler kromatografik ayrıma hazır hale getirilmiştir. Kromatografi işlemi Sr-Spec Resin (Triskem International®) (crown-ether (4,4'(5')-di-t-butylcyclohexano-18-crown-6) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sr fraksiyonu, yıkama çözeltisi 0.05M HNO<sub>3</sub> ile geri kazanılmış ve Termal İyonizasyon Kütle Spektrometresi'ne (TIMS) yüklemmeden önce tamamen kurutulmuştur. Sr örnekleri 1µl 1M fosforik asitte çözülmüş ve Re'nin tek filamentinde 2µl Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ile birlikte yüklenmiştir. Sr analizleri, kütle <sup>88</sup>Sr'de 3V'luk kararlı yoğunlukta 160 döngü için dinamik çoklu toplama yöntemi izlenerek IsotopX-Phoenix (TIMS) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

### **Yaşlandırma analizleri**

Hisaralan ve Emendere sahalarındaki traverten ve tufaların oluştuğu zaman dilimlerini, iklim değişimleri ile olan ilişkilerini ortaya koymak için açık renkli, sıkı, gözeneksiz ve ikincil olaylardan etkilenmediği düşünülen toplam 30 adet (20 traverten, 10 tufa örneği) örnek U-Th yaş tayinleri için Quebec Üniversitesi GEOTOP Araştırma Merkezi'ne (Montreal, Kanada) gönderilmiştir.

Traverten ve tufa örnekleri, detritik fraksiyonları uzaklaştırmak için DeremeITD cihazına bağlı elmas başlıklı mekanik aşındırıcılarla tamamen temizlenmiştir. Daha sonra, hazırlanan 1–5 gramlık daha küçük örnekler tartıldıktan sonra, içinde ağırlığı bilinen bir <sup>233</sup>U-<sup>236</sup>U-<sup>229</sup>Th karışık "spike" in olduğu 250 ml'lik teflon beherlere aktarılmış ve ardından izotop seyreltme tekniği ile U ve Th izotoplarını tayin etmek için buharlaştırılmıştır. Örnek ve spike suya

konduktan sonra, yavaş yavaş örnek tamamen eriyene kadar 14M nitric asit ( $\text{HNO}_3$ ) ilave edilmiştir. Çözülen örneğe yaklaşık 7 mg demir taşıyıcı ( $\text{FeCl}_3$ ) eklenmiş ve çözeltinin dengeye ulaşması için gece boyunca sallantı masası üzerinde bırakılmıştır. pH'ın 8-9' a yükseltilmesi ve  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  in çöktürülmesiyle Uranyum ve Toryumun çözüldükten ayrılması sağlanmıştır. Bu pH'ta demir,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  olarak çökecek, Uranyum ve Toryum izotopları rezidüden ayrılmış olacaktır. Rezidüler santrifüjlenmiş ve "supernatant" uzaklaştırılmıştır. Daha sonra rezidü MilliQ® su ile yıkanarak en son 6 N HCl'de çözülmüştür. U-Th ayrımı, AG1X8 anionic resin banyosu kullanılarak yapılmıştır. Th ve U-Fe fraksiyonları sırasıyla 6 N HCl ve H<sub>2</sub>O "elution" ile geri kazanılmıştır. U fraksiyonunun saflaştırılması 0.2 ml U-Teva (Eichrom) resin volume kullanılarak gerçekleştirilmiştir. U-Fe ayrımı 3N HNO<sub>3</sub> (Fe fraksiyonu) ve 0.02 N HNO<sub>3</sub> (U fraksiyonu) kullanılarak "elution" yoluyla/ile yapılmıştır. Toryumun saflaştırılması, 7N HNO<sub>3</sub> de 2 ml AG1X8 resin kullanarak ve 6 N HCl ile "elution" yoluyla yapılmıştır. Toryumun en son saflaştırma işlemi ise, 7N HNO<sub>3</sub> te 0.2 ml AG1X8 resin üzerinde yapılmış ve Toryum 6 N HCl ile geri kazanılmıştır. Tüm kimyasal işlemler temiz oda laboratuvarında (klas 100) yürütülmüştür. U ve Th fraksiyonları, iki grafit katmanı arasındaki rafine edilmiş Re filament zonunda biriktirilmiş ve 10 cm electrostatic filtre ve Daly iyon sayıcının bağlı olduğu VG sektör kütle spektrometresi (TIMS) ile ölçülmüştür. U ve Th izotopları Daly iyon sayıcısı üzerinde pik sıçrama modunda ölçülmüştür. Uranyumun kütle fraksiyonlaşması için çift spike  $^{236}\text{U}/^{233}\text{U}$  (1.1322) ile düzeltme yapılmış, buna karşılık toryumun kütle fraksiyonlaşması analitik hata açısından ihmal edilebilir olarak kabul edilmiştir. Tüm analitik tekrarlanabilirlikler, standartların belirli aralıklarla ölçülmesi sonucu tahmin edildiğinden, U concentration ve  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  oranları için genellikle %0.5'den daha düşük,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  oranları için 0.5% ile 1% arasında değişen hata sınırları içindedir. Veri düzenleme çalışmalarında, içersine "spike" ların izotop bileşimleri ve izotop seyreltme yöntemlerinde kullanılan eşitliklerin de dâhil edildiği, Excel dağılım sayfası kullanılmıştır.



## 2. JEOLJİ

### 2.1 Bölgesel Jeoloji

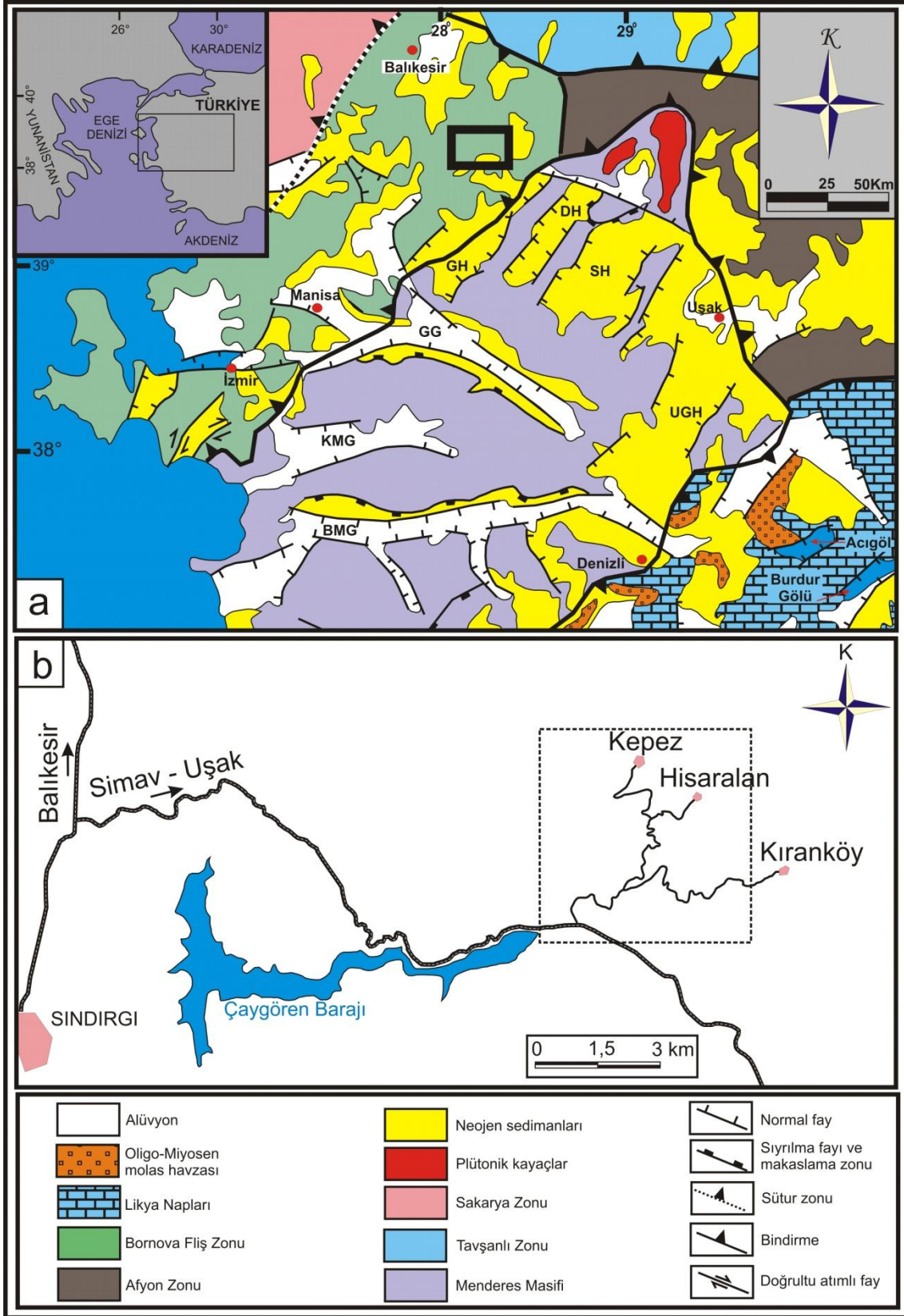
Batı Anadolu, Geç Oligosen'den itibaren Menderes Masifi, Sakarya Zonu ve Bornova Fliş Zonu'ndan oluşan temel üzerinde KD doğrultulu havzaların oluşumuna neden olan bir deformasyona uğramıştır (Yılmaz vd., 2000) (Şekil 2.1). Kuzeydoğu doğrultulu havzaların oluşumu sırasında volkanik aktivite yaygın olarak gelişmiş ve inceleme alanını da içine alan çok geniş bir bölgede volkanik kayalar üretilmiştir (Erkül vd., 2010). Hisaralan ve Sındırgı arasında yayılım sunan bu kayalar Bigadiç volkanosedimenter serisine ait Sındırgı volkanitleri olarak adlandırılmıştır (Helvacı, 1995; Erkül vd., 2005). Miyosen yaşlı bu volkanik birimler ile inceleme alanının temelini oluşturan Bornova Fliş Zonu kayaları intrüzif dokanak ilişkisine sahiptir.

Batı Anadolu, Geç Senozoyik kıtasal genişlemesine ait metamorfik çekirdek kompleksleri barındırmaktadır (Seyitoğlu ve Işık, 2006). Çok sayıda metamorfik çekirdek kompleksleri barındıran Ege gerilme/genişleme bölgesinde başlıca; Rodop, Kazdağ, Kikladik, Girit ve Menderes çekirdek kompleksleri yer almaktadır (Işık vd., 2004). İnceleme alanının güneyinde yer alan Menderes Masifi'nin yüzeylemesini, masifin kuzeyindeki Simav sıyrılma fayı denetlemektedir (Seyitoğlu vd., 2004) (Şekil 2.1). 56 km uzunluğundaki Simav Fayı, Soma ile Afyon arasında uzanan sağ yönlü doğrultu atımlı Sındırgı-Sincanlı Fay zonunun bir segmenti olup inceleme alanındaki en önemli yapısal unsurlardan biridir (Doğan ve Emre, 2006). Hisaralan jeotermal alanı, Simav grabeninin KB kanadında bulunmaktadır. Simav grabeni boyunca pek çok jeotermal alan (Eynal, Çitgöl, Naşa, Şaphane ve Gediz) yer almaktadır.

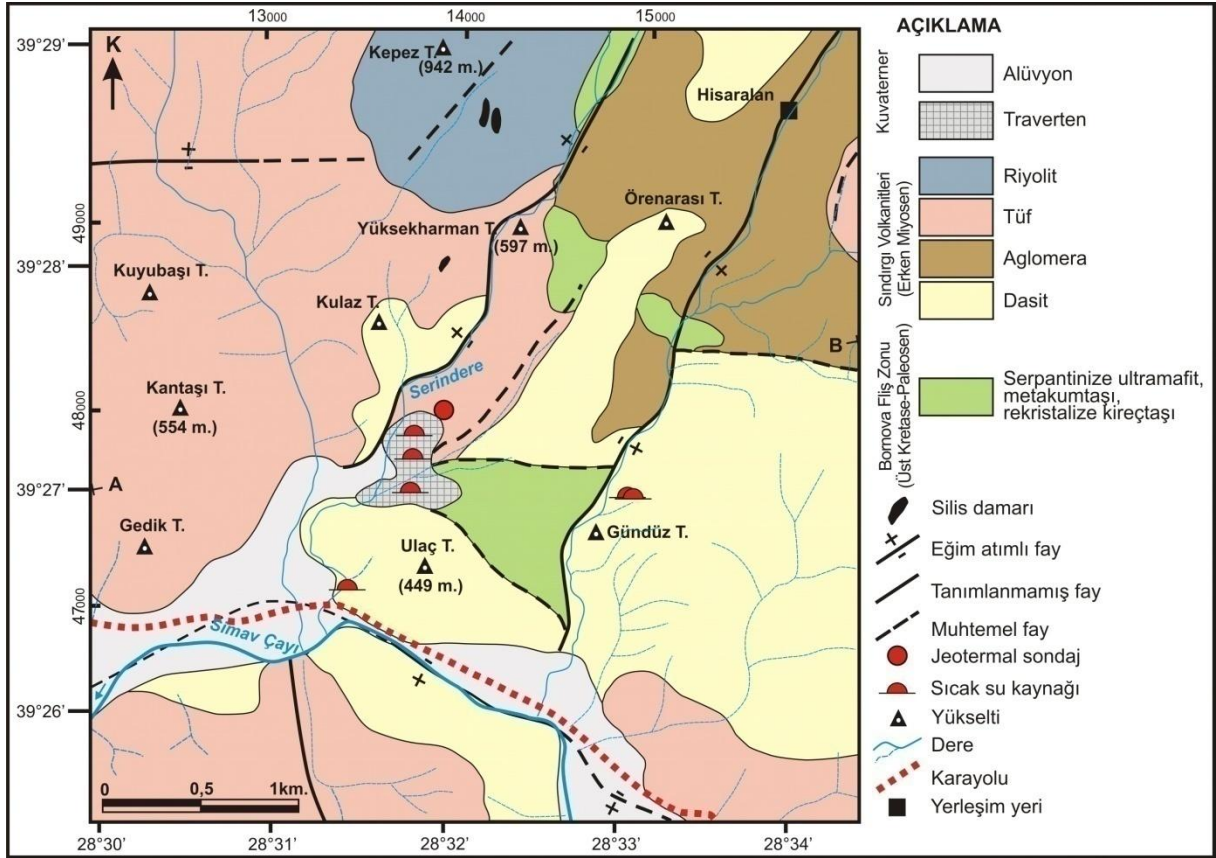
### 2.2 Stratigrafi

#### 2.2.1 Hisaralan Sahası

Hisaralan Köyü kaplıcaları (Sındırgı/Balıkesir) ve çevresini kapsayan inceleme alanının temelini rekristalize kireçtaşı, radyolarit, metakumtaşı ve ofiyolitik kayalardan oluşan Bornova Fliş Zonu oluşturmaktadır (Şekil 2.2). İlk kez Brinkmann (1971) tarafından tanımlanmış olan bu zon İzmir-Ankara Sütur Zonu ile Menderes Masifi arasında yer alan karmaşık kayalardan oluşmaktadır (Brinkmann, 1971). Erdoğan (1990), İzmir-Bornova civarında yaptığı incelemelerde bu birime Bornova Karmaşığı adını vermiştir (Erdoğan, 1990). Bornova Fliş Zonu Mastrohiyen-Daniyen yaşında bir matriks ve bu matriks içerisinde yer alan boyları 20 km'yi geçen neritik kireçtaşı bloklarından oluşmaktadır (Okay ve Altınar, 2007; Erdoğan ve Güngör, 1992; Okay vd., 2012). Erdoğan ve Güngör (1992) matriks ile



Şekil 2.1. İnceleme alanının a) Türkiye'nin tektonik birimleri içindeki konumu (Emre ve Sözbilir, 2007; Sözbilir, 2005'den değiştirilerek) ve b) yer bulduru haritası.



Şekil 2.2. İnceleme alanının jeoloji haritası.

sarılmış bu kireçtaşı bloklarının Triyas'tan Kampaniyen'e kadar değişik yaşlar verdiğiine değinmişlerdir (Erdoğan ve Güngör, 1992). İnceleme alanında bu birime ait mostralara çoğunlukla faylı vadiler/dere yatakları içerisinde yer almakta ve genelde serpantinize ultramafik kayalar ve daha az olarak radyolaritler bu alanlarda gözlenmektedir (Şekil 2.3 ve 2.4). Birimin rekristalize kireçtaşlarına ait haritalanabilir ölçekteki mostralara ise inceleme alanında rastlanmamış olup çoğunlukla döküntüler şeklinde gözlenmektedir.

Bigadiç–Sındırgı-Hisaralan kaplıcaları arasında yer alan bölgede, temel kayalar üzerinde Erken Miyosen yaşlı volkanik ve piroklastik kayalar yayılım sunmaktadır. Erkül vd. (2005) tarafından bu kayalar Bigadiç volkanosedimanter serisine ait Sındırgı volkanitleri olarak adlandırılmıştır. İnceleme alanında çok geniş yayılım sunan bu volkanik ürünler dasitler, aglomeralar, tüfler ve riyolitik kayalar olarak dört farklı gruba ayrılmıştır (Şekil 2.2). Dasitler, mor-gri renkli, bol eklemli ve asidik karakterli volkanik kayalar olup, Yılmaz vd. (2013) tarafından alt ignimbirit birimi olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.5). İnceleme alanında en iyi gözlemlendiği yerler Ulaç Tepe, Gündüz Tepe-Kıran Köyü arası ve Kulaz Tepe-Serindere arasındaki vadidir. Dasitik kayalar üst seviyelerine doğru orta-kaba tane boyutunda yarı yuvarlak-yarı köşeli volkanik-radyolarit ve ultramafik kayaç çakılları içeren, bordo ve yeşil kül matriks rengine sahip aglomeratik seviyeye geçiş gösterir (Şekil 2.6). Bu kayalara ait

mostralar ise en iyi Hisaralan Köyü ve çevresinde gözlenmektedir. Yılmaz vd. (2013) yaptığı çalışmada bu kayaların plato yaşını  $19.82 \pm 0.14$  My olarak belirtmiştir.



Şekil 2.3. Serindere içerisinde gözlenen ve faylanmalar sonucu yüzeyleyen Bornova Fliş Zonu'na ait serpantinize ultramafik kayalar (Koordinat:  $39.28770^\circ$ ,  $28.32909^\circ$ ; batıya bakış).



Şekil 2.4. Hisaralan deresi içinde gözlenen Bornova Fliş Zonu'na ait radyolaritler (Koordinat:  $39.27728^\circ$ ,  $28.33422^\circ$ ; doğuya bakış).



Şekil 2.5. Sındırgı volkanitlerinin en alt seviyesini oluşturan mor dasitler (Koordinat: 39.26696°, 28.31396°; doğuya bakış).



Şekil 2.6. Sındırgı volkanitlerinin aglomeratik kayaçlarının yakından görünümü (Koordinat: 39.28054°, 28.33578°; kuzeye bakış).

İnceleme alanındaki aglomeratik seviyenin üstüne ise açık renkli (beyaz-sarımsı-açık mavimsi) tuf seviyeleri gelmekte olup bu birimler en iyi Hisaralan kaplıcaları ile Simav yolu yol yarmalarında ve Kulaz Tepe batısında gözlenmektedir. Birim volkanik ve fliş kökenli her boyuttan çakıl parçaları içermektedir. Hisaralan kaplıcaları ile Simav yolu üzerinde ise tane boyu ardalanmalı olarak artıp azalmaktadır (Şekil 2.7). Yüksekharman Tepe BKB'sında ise riyolitik kayaçlar tarafından kesilmektedir. Yılmaz vd. (2013), üst ignimbirit seviyesi olarak adlandırdığı bu seviyenin plato yaşını  $18.96 \pm 0.11$  My olarak belirtmiştir. İnceleme alanında yayılım gösteren tüm volkanik birimler beyaz-gri renkli silis damarları tarafından kesilmektedir (Şekil 2.8). Bu silis damarlarının en iyi gözleendiği yerler Kepez Köyü-Çoturtepe Köyü arası yol yarmalarıdır.

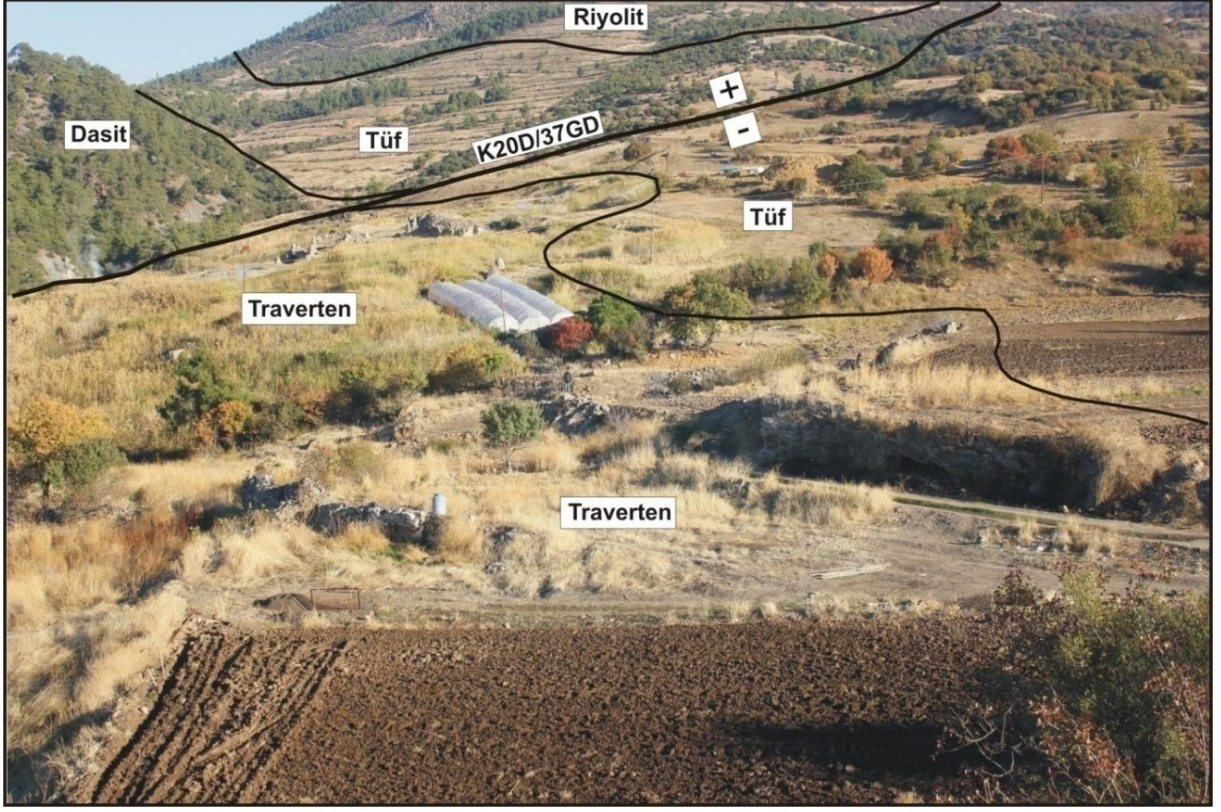
İnceleme alanının stratigrafik olarak en üst seviyesini faylanmalar sonucu yüzeye çıkan sıcak suların oluşturduğu Kuvaterner yaşlı travertenler ve bölgedeki kayalardan ayrılmış malzemelerin oluşturduğu alüvyonlar oluşturmaktadır (Şekil 2.9). Hisaralan travertenlerini oluşturan jeotermal sistem, Neotektonik dönemde, özellikle Batı Anadolu'da etkin olan Simav fayı gibi düşey faylanmalar ile gelişen horst ve grabenleşme ve ayrıca KD-GB doğrultulu oblik atımlı faylanmalara bağlı olarak gelişmiştir (Şekil 2.9). Alüvyonlar ise genelde bölgedeki en büyük akarsu olan Simav Çayı ve çevresinde ve yer yer daha küçük akarsular boyunca gözlenmektedir.



Şekil 2.7. Hisaralan kaplıcaları ile Simav yolu yol yarmasında gözlenen tuf seviyesi (Koordinat: 39.25477°, 28.33283°; kuzeye bakış).



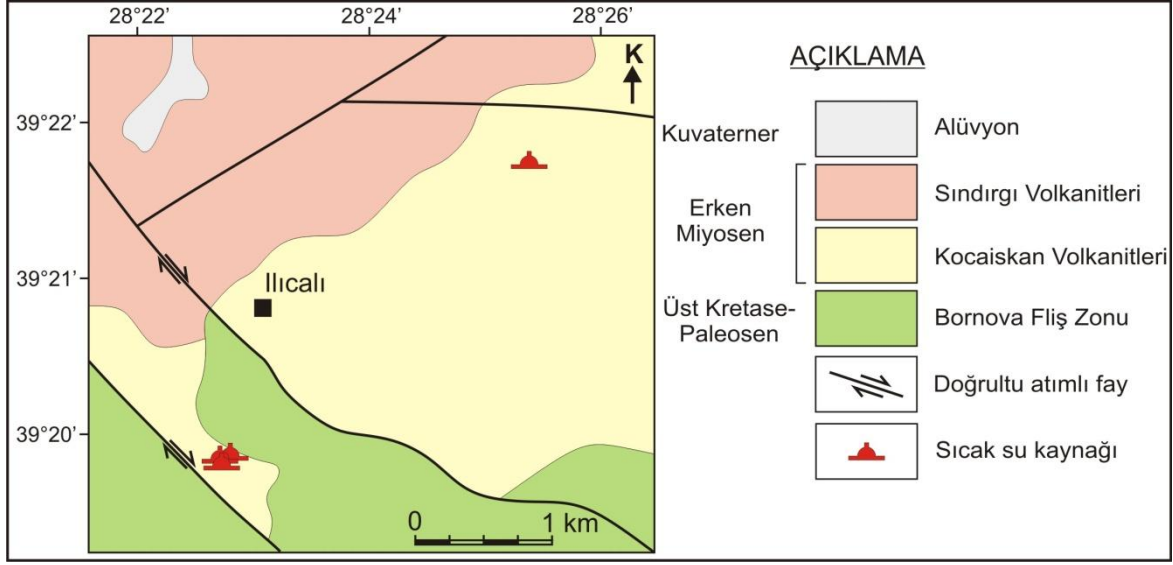
Şekil 2.8. Riyolitleri kesen silis damarı (Kepez-Çoturtepe yolu) (Koordinat: 39.28361°, 28.32000°; kuzeye bakış).



Şekil 2.9. İnceleme alanında gözlenen travertenler ve diğer birimler ile olan dokanak ilişkisi (Koordinat: 39.27025°, 28.31922°; kuzeye bakış).

### 2.2.2 Emendere Sahası

Emendere sahasının jeolojisi Hisaralan sahası ile hemen hemen aynıdır. Emendere sıcak su kaynaklarının içinde bulunduğu sahada, temeli Bornova Fliş Zonu oluşturmaktadır. Bu temel üzerinde, farklı zamanlarda yüzeyleyen Kocaiskan volkanitleri ve Sındırgı volkanitleri bulunmaktadır. Miyosen yaşlı bu volkanik birimler ile inceleme alanının temelini oluşturan Bornova Fliş Zonu kayaları intrüzif dokanak ilişkisine sahiptir. Genelde andezit bileşiminde olan Kocaiskan volkanitleri (Hisaralan sahasında gözlenmemektedir) çalışma alanındaki ilk volkanik evredir. Andezitik kayalar, piroklastik malzemeler ve volkano-sedimanter ürünler içeren birimin K/Ar yaşı  $23,2 \pm 2,8$  my olarak belirlenmiştir (Erkül vd., 2005). Kocaiskan volkanitleri üzerinde uyumsuz Sındırgı volkanitleri gelir. İnceleme alanının stratigrafik olarak en üst seviyesinde faylanmalar sonucu yüzeye çıkan sıcak suların oluşturduğu Kuvaterner yaşlı travertenler ve bölgedeki kayalardan ayrıışmış malzemelerin oluşturduğu alüvyonlar yer almaktadır (Şekil 2.10). Bu sahadaki travertenlerin boyutları harita ölçeğinde gösterilemeyecek ölçüde küçüktür.



Şekil 2.10. Emendere sahasının jeoloji haritası (Erkül vd., 2005'ten değiştirilerek).

### 2.3 Yapısal Jeoloji

İnceleme alanının temelini oluşturan Bornova Fliş Zonu kayaları ve Miyosen yaşlı Sındırgı volkanitleri içinde Erken Miyosen-Kuvaterner döneminde değişik tür ve doğrultuda fay ve eklem takımları gelişmiştir. Eğim atımlı, doğrultu atımlı ve verrev atımlı faylar Miyosen yaşlı volkanik kayaları kesmiş ve bu faylanma ile ilişkili travertenler çökelmiştir. Bölgedeki traverten oluşumlarını kontrol eden bu faylar genel olarak D-B, KD-GB ve KB-GD doğrultusunda uzanmaktadır (Tablo 2.1, Şekil 2.11 ve 2.12). Balıkesir-Uşak arasında yer alan Demirci, Gördes ve Selendi gibi Miyosen yaşlı KD uzanımlı havzaların oluşumunda KD doğrultulu fay sistemleri etkin rol oynamıştır (Seyitoğlu ve Scott, 1994; Yılmaz vd., 2000). Hisaralan jeotermal alanını doğu ve batıdan sınırlayan KD doğrultulu fayların fay düzlemleri üzerindeki kinematik veriler, bu fayların eğim atımlı normal fay olduğunu ve önemli derecede sağ ve sol yanıl atım bileşeni içerdiğini göstermektedir. Serin Dere ve Hisaralan Köyünden geçen dere yataklarında gözlenen bu faylara ait sapma açıları (rake) 35°-75° arasında değişmektedir (Şekil 2.12). İnceleme alanında gözlenen KD doğrultulu faylar ayrıca Bornova Fliş Zonu kayaları ile Miyosen yaşlı volkanik kayalar arasındaki tektonik dokanağı oluşturmakta ve temel kayaların yüzeylemesini sağlamaktadır. 56 km uzunluğundaki Simav Fayı, Soma ile Afyon arasında uzanan sağ yönlü doğrultu atımlı Sındırgı-Sincanlı Fay zonunun bir segmenti olup inceleme alanındaki en önemli ve yaklaşık D-B doğrultulu yapısal unsurlardandır (Doğan ve Emre, 2006).

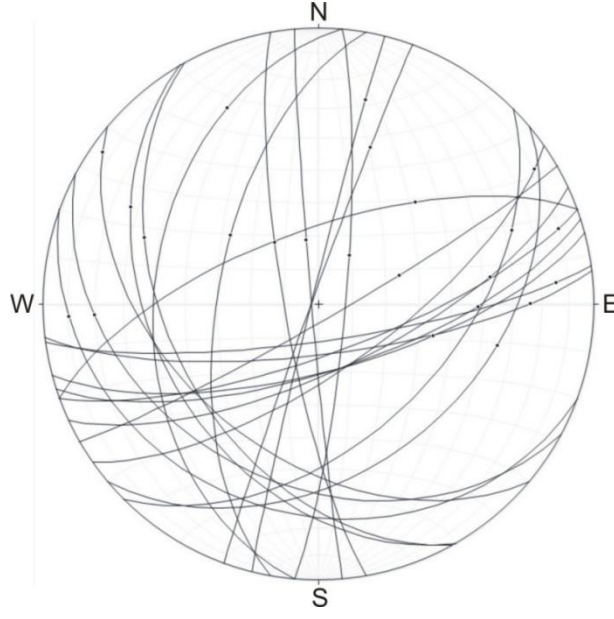
İnceleme alanının güneyinde Simav çayı içerisinde gözlenen Simav fayı, Hisaralan jeotermal alanını güneyden sınırlamaktadır. Batı Anadolu genişlemeli tektonik rejimi ile, Kuzeybatı Anadolu geçiş tektonik rejimi arasında yapısal sınır olarak değerlendirilen Sındırgı-Sincanlı



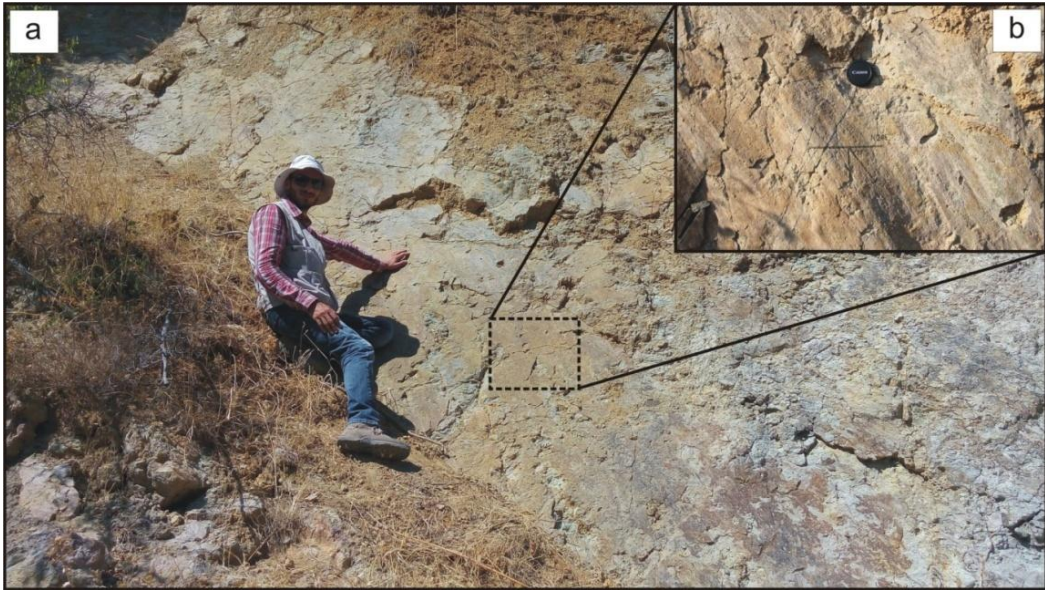
Fay Zonu; Sındırgı (Balıkesir)–Sincanlı (Afyon) arasında, BKB-DGD doğrultulu ve sağ yönlü doğrultu atımlı aktif bir fay sistemidir (Doğan ve Emre, 2006; Emre ve Duman, 2011; Emre vd., 2011a, 2011b, 2011c, 2011d). Özden vd. (2012), 60 km uzunluğundaki Simav fayını, Simav havzasını güneyden sınırlayan, kuzeye eğimli bir normal fay olarak tanımlamıştır.

Tablo 2.1. Hisaralan jeotermal alanında belirlenen fay düzlemleri ve ilgili kayma çiziklerinin dağılımı.

No	Koordinat		Fay Düzlemi (Doğrultu/Eğim Miktarı ve Yönü)	Sapma Açısı (Rake) ve Yönü
	Kuzey	Doğu		
1	39.26659	028.32059	K70D/68KB	53°GB
2	39.27498	028.33344	K72D/70GD	45°GB
3	39.28388	028.33607	K5D/40KB	37°KB
4	39.26693	028.31212	K14D/88KB	25°GB
5	39.27165	028.31623	K55D/70GD	9°B
6	39.27222	028.31664	K70D/75GD	10°GB
7	39.27550	028.32030	K45D/50GD	35°KD
8	39.28769	028.32276	K82D/79GD	15°GB
9	39.28807	028.32276	K60D/85GD	65°KB
10	39.26749	028.31757	K60D/56KB	65°KB
11	39.28846	028.32640	K83D/75GD	25°KD
12	39.28852	028.32676	K10D/60KB	75°KD
13	39.26983	028.33970	K5D/82GD	75°GB
14	39.27042	028.34577	K65D/70GD	40°GB
15	39.27744	028.33488	K20D/88KB	40°KB
16	39.27608	028.33347	K70B/25GB	85°KB
17	39.27616	028.33359	K10B/80GB	70°KB
18	39.27631	028.33350	K30B/40GB	40°KB
19	39.28347	028.33570	K62B/35GB	36°KB
20	39.28795	028.32306	K50B/45GB	7°GB
21	39.27618	028.33358	K5B/88GB	71°KB
22	39.27623	028.33331	K29B/45GB	50°KB



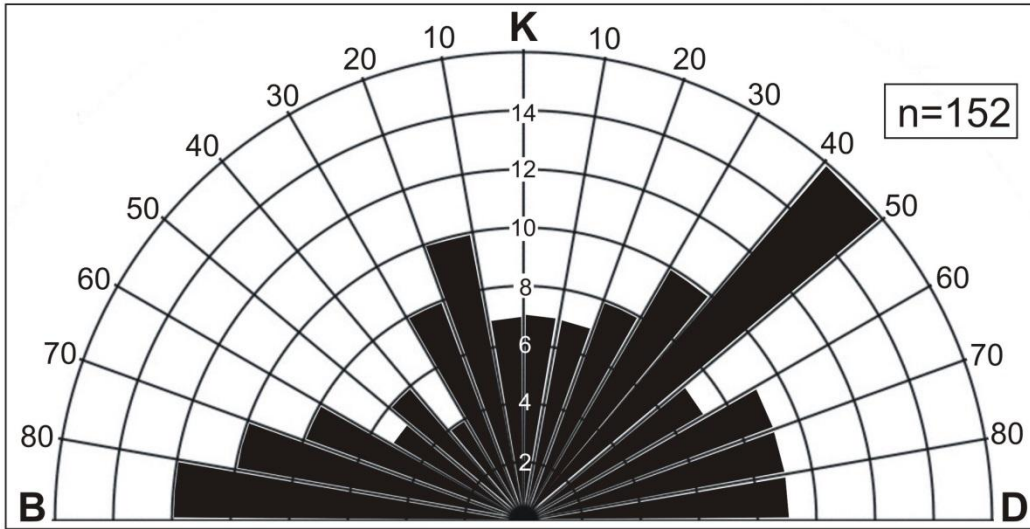
Şekil 2.11. Hisaralan jeotermal alanında belirlenen fay düzlemleri ve ilgili kayma çiziklerinin stereografik izdüşümleri.



Şekil 2.12. Serin Dere içinde gelişen a) oblik atımlı fay ( $K26^{\circ}D/37^{\circ}GD$ , Sapma açısı:  $55^{\circ}$ ) ve b) fay düzleminin yakından görünümü (Koordinat: $39.27551^{\circ}$ ,  $28.32027^{\circ}$ ; KB'ya bakış).

Ayrıca günümüzde normal fay karakterinde olan Simav Fayı'nın, geçmişte doğrultu atımlı karakter sergilediği fay düzlemi üzerindeki kinematik verilerle ortaya konulmuştur (Gündoğdu vd., 2015). İnceleme alanında belirlenen yaklaşık D-B doğrultulu yüksek açılı normal faylar bölgede etkin olan genişleme rejiminin ürünleridir. Arazi çalışmalarında belirlenen yedi adet KB doğrultulu fay ise inceleme alanının değişik kesimlerinde küçük fay düzlemleri şeklinde gözlenmektedir. KB doğrultulu fayların eğim yönleri güneybatı, sapma açıları (rake) ise  $7^{\circ}$  ile  $85^{\circ}$  arasında değişmektedir.

Asal gerilmeler etkisinde karakteristik özellikler sunan çatlaklar, bölgesel gerilme yönlerinin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Hisaralan jeotermal alanı ve çevresinde yaygın olarak yüzeyleyen volkanik kayalarda, özellikle dasitlerde gözlenen yanal ve düşey yer değiştirme göstermeyen tüm açıklıklar bu çalışma kapsamında çatlak olarak tanımlanmış ve ölçümleri yapılmıştır. Şekil 2.13, inceleme alanındaki çatlak sistemlerinin dağılımını göstermektedir. Hisaralan jeotermal alanında sırt tipi traverten oluşumları gözlenmiştir. Çatlaklar boyunca yüzeye çıkan sıcak sular uygun koşullar altında çatlak doğrultusunda sırt tipi traverten oluşturmaktadır. İnceleme alanında belirlenen sırt tipi travertenler iki farklı doğrultuda uzanım sunmaktadır. Sırt tipi travertenlerden uzun kol K10-30°B arasında, kısa kol ise K55-70°B doğrultusunda uzanır. Hisaralan Jeotermal Alanı içerisinde gözlenen sırt tipi travertenlerin çevresinde geniş yayılım sunan dasitlerde yapılan çatlaklara ait gül diyagramı (Şekil 2.13), sırt tipi travertenlerin doğrultuları ile uyumluluk göstermektedir. Ancak, sırt tipi travertenlerin gidiş doğrultusundan farklı yönde gelişen çatlak hattı da (K40-50°D) gül diyagramında ortaya çıkmıştır. Bu farklı doğrultudaki çatlak yönelimi gerek arazi ve gerek morfolojik olarak aynı gerilme alanı içinde olmayıp, farklı gerilme alanları etkisinde gelişmiştir. İnceleme alanında belirlenen üç farklı doğrultuya sahip fay sistemi de bunun göstergesidir.



Şekil 2.13. Hisaralan jeotermal alanı içerisinde dasitlerde gözlenen çatlaklara ait gül diyagramı.

### 3. HİDROJEOLJİ

#### 3.1 Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri

İnceleme alanındaki kayaçlar önemli bir akifer oluşturmazlar (Şekil 3.1). Alüvyon ve travertenler, gözeneklik ve geçirgenlikleri yüksek olmasına karşın yayılımları ve kalınlıklarının az olması nedeniyle yeraltısuyu depolama özelliğine sahip değildir. Bu birimlerde, süzülen yağış sularını kısa sürede boşaltan düşük debili ve kurak dönemde kuruyan birkaç kaynak gözlenmiştir.

Hisaralan sahasında geniş yayılım sunan volkanik kayalardan tüfler geçirimsiz-az geçirimlidir. Sızıntı şeklinde ve kurak dönemde kuruyan düşük debili az sayıda kaynak belirlenmiştir.

Dasit ve riyolitler oldukça çatlaklıdır. Çatlakların temiz, ayrışmanın az olduğu kesimlerde yağış sularının yeraltına süzülmesine olanak verir. Dasit ve riyolitlerden gelen tüm soğuk su kaynaklarında, kaynak debileri kurak dönemde önemli oranda azalır. Bu durum, özellikle kurak dönemde yöredeki köylerin içme suyu ihtiyacının karşılanmasında önemli bir sorun yaratır. Bu birimler içinde olası olarak silikatların ayrışması nedeniyle oluşan çukurlarda yağmur suyu ve çatlaklardan boşalan sular birikerek maksimum 100 m çapında su birikintileri meydana getirir. Bu duruma Hisaralan Köyü'nün 3-4 km kuzeyindeki kesimde ve bazı dere yataklarında rastlanır. Riyolit ve dasitler yoğun çatlaklı ve faylı kesimlerde geçirimlidir. Ancak saha çalışmaları (kaynak sayısı, dağılımı, debi değerleri ve mevsimsel değişimleri, ayrışma zonlarının derine inmemesi, çoğu çatlakların ince ve dolgulu olması gibi) bu birimin genel anlamda kısmen geçirimli ve küçük çapta su ihtiyaçlarını karşılayabilecek derecede yeraltısuyu içerdiğini göstermiştir.

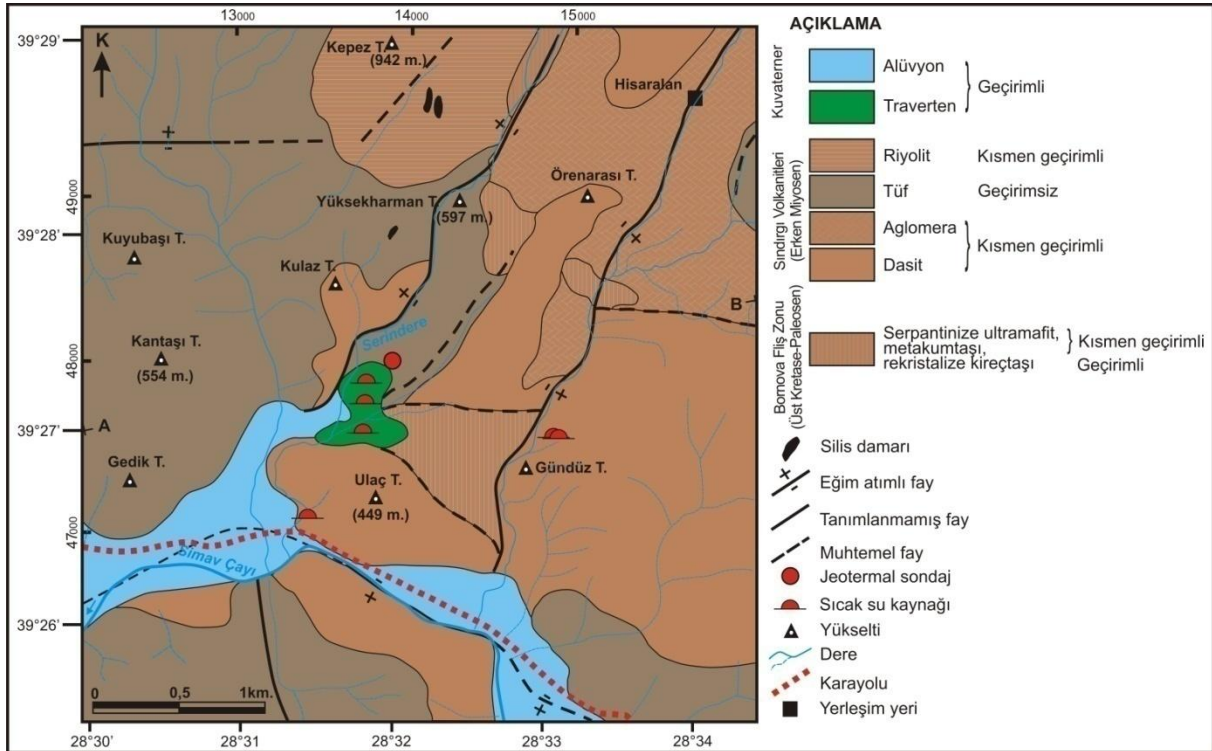
Bornova Fliş Zonu'na ait birimler inceleme alanında yaygın değildir. Serpantinleşmiş ultramafik kayalar ve metakumtaşlarında yüzeysel ayrışma yaygındır. Geçirgenlikleri düşüktür. İnceleme alanında Bornova Fliş Zonu'na ait kireçtaşları mostra vermemiştir. Ancak Sındırgı ilçe merkezi civarında kireçtaşı blokları gözlenmiştir. Bornova Fliş Zonu'ndaki kireçtaşlarının oldukça kalın ve yanal devamlılığının fazla olduğu, raporun "jeoloji" bölümünde verilen literatürden bilinmektedir. Bu çatlaklı, faylı ve karstik kireçtaşlarının gözenek ve geçirgenliğinin yüksek ve iyi bir akifer özelliğinde olduğu değerlendirilmektedir. Sındırgı ilçe merkezi civarında ofiyolitler içerisinde gözlenen kireçtaşları, büyük bir olasılıkla inceleme alanındaki volkanitlerin altında yer alan ofiyolitler içerisinde de mevcuttur. Hisaralan sahasında bu birimden boşalan bir kaynağa rastlanmamıştır. Ancak Emendere sahası civarındaki bazı kaynaklardan arazide çeşme olarak yararlanılmaktadır.

### 3.2 Su Noktaları

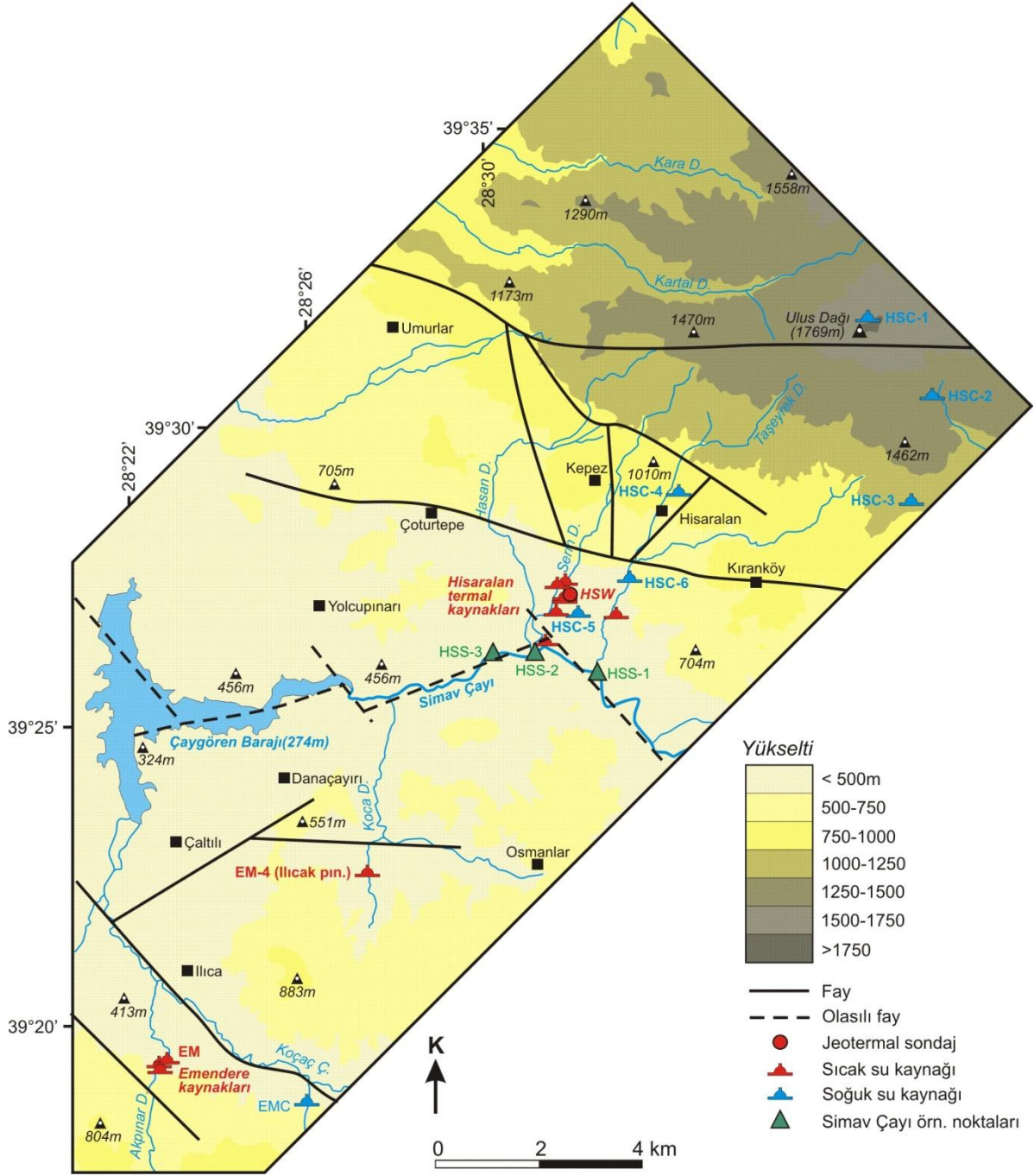
Hisaralan ve Emendere jeotermal sahalarında mevcut bir adet jeotermal sondaj, çok sayıda termal kaynak, soğuk su kaynakları ve Simav Çayı üzerindeki örnekleme ve ölçüm noktalarının lokasyonları Şekil 3.2 ve 3.3'de, tüm suların koordinatları ise Tablo 3.1'de verilmiştir. Su noktalarına ilişkin ayrıntılara aşağıda değinilmiştir.

#### 3.2.1 Jeotermal Sondaj

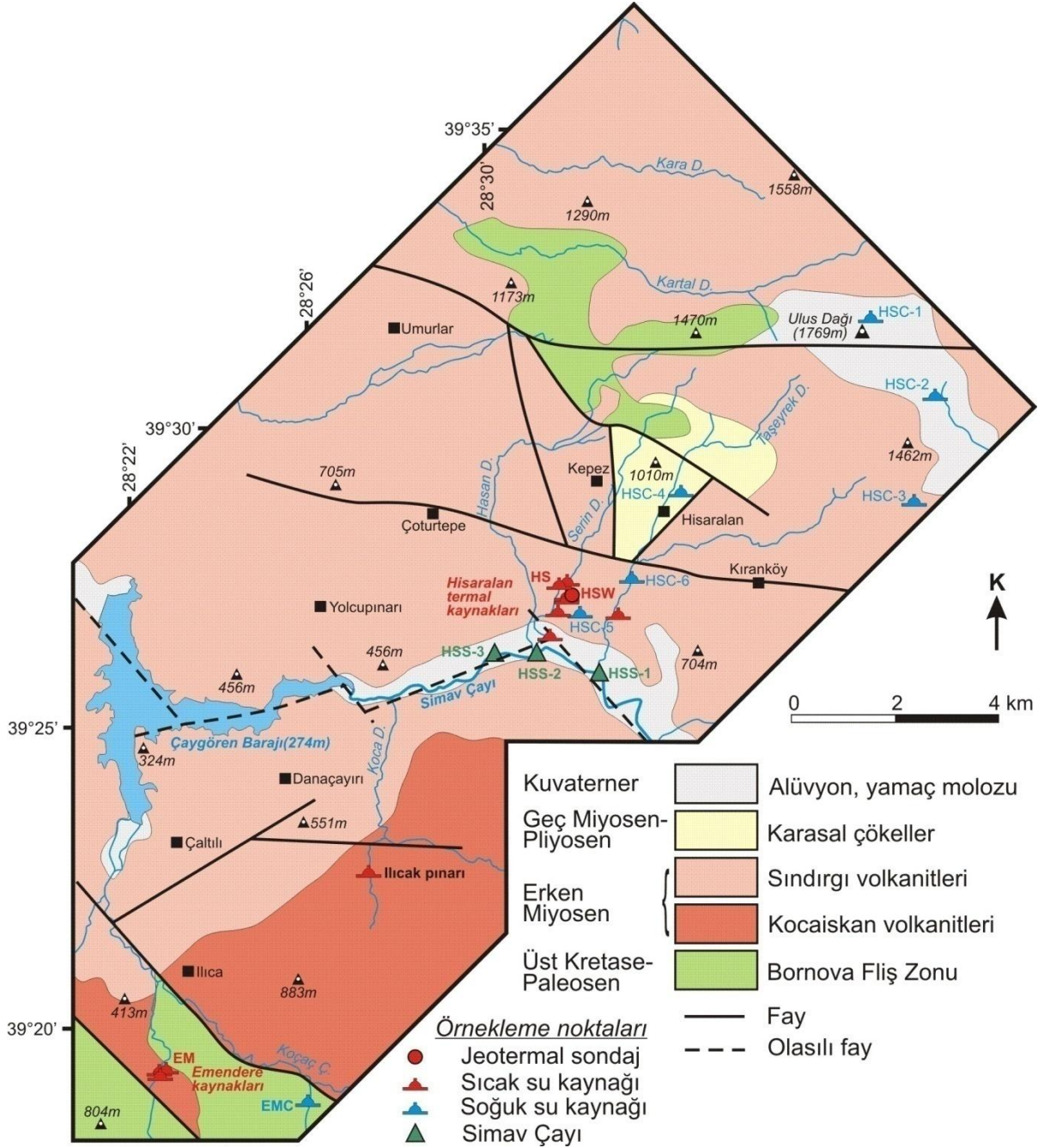
Hisaralan jeotermal sahasında TPAO tarafından 1989 yılında enerji üretim amaçlı bir sondaj açılmıştır (Şekil 3.4). Hisaralan-2 olarak adlandırılan (bu çalışmada HSW kodu verilmiştir) bu sondajın derinliği 881 metredir. Sondaj kuyusu yüzeyden 464 m'ye kadar Miyosen yaşlı volkanitleri, 464-881 m arasında Üst Kretase yaşlı Bornova Fliş Zonu'na ait birimleri (serpantin, radyolarit, kireçtaşı) kesmiştir (Çolak ve Kocabaş, 2011). Kuyudan 30 l/s debi ve 106°C sıcaklıkta jeotermal akışkan elde edilmiştir. Günümüzde, HSW kuyusundan elde edilen 32 l/s jeotermal akışkan Sındırgı ilçe merkezinde 1300 konutun ısıtılmasında kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 Hisaralan sahası termal kaynak alanı civarının hidrojeoloji haritası.



Şekil 3.2. İnceleme alanındaki su noktalarının topoğrafik harita üzerindeki dağılımı.



Şekil 3.3. İnceleme alanındaki su noktalarının jeolojik harita üzerindeki dağılımı (Jeoloji haritası Erkül vd. 2010'dan modifiye edilmiştir).

Tablo 3.1. İnceleme alanındaki su noktalarının koordinatları (HSW: jeotermal sondajı, HS: Hisaralan termal kaynaklarını, EM: Emendere kaynaklarını, HSC: Hisaralan soğuk su kaynaklarını, EMC: Beşçeşme soğuk su kaynağını, HSS: Simav Çayı örnekleme noktalarını temsil etmektedir; EM-4: Ilıcak termal kaynağı, HSC-1: Ulus, HSC-2: Gözören, HSC-3: Kozoluk, HSC-4: Ilıca, HSC-5: Kaplıca ve HSC-6: Ceviz soğuk su kaynaklarını simgeler).

No	Kod	Kuzey	Doğu	Kot (m)	No	Kod	Kuzey	Doğu	Kot (m)
1	HSW	39.27237	028.31980	404	43	HS-42	39.27123	028.31843	372
2	HS-1	39.27470	028.31894	403	44	HS-43	39.27121	028.31804	368
3	HS-2	39.27435	028.31778	385	45	HS-44	39.27116	028.31830	372
4	HS-3	39.27472	028.31908	411	46	HS-45	39.27110	028.31842	370
5	HS-4	39.27466	028.31913	410	47	HS-46	39.27114	028.31918	375
6	HS-5	39.27466	028.31862	392	48	HS-47	39.27107	028.31917	372
7	HS-6	39.27464	028.31861	396	49	HS-48	39.26977	028.31635	329
8	HS-7	39.27437	028.31800	385	50	HS-49	39.26973	028.31645	327
9	HS-8	39.27441	028.31789	382	51	HS-50	39.26874	028.31707	329
10	HS-9	39.27422	028.31777	384	52	HS-51	39.26973	028.31709	331
11	HS-10	39.27399	028.31811	387	53	HS-52	39.26960	028.31744	334
12	HS-11	39.27376	028.31867	395	54	HS-53	39.26959	028.31754	334
13	HS-12	39.27260	028.31835	382	55	HS-54	39.26960	028.31750	334
14	HS-13	39.27253	028.31839	381	56	HS-55	39.26946	028.31758	325
15	HS-14	39.27245	028.31837	381	57	HS-56	39.26950	028.31777	345
16	HS-15	39.27236	028.31830	376	58	HS-57	39.26963	028.31800	345
17	HS-16	39.27213	028.31811	366	59	HS-58	39.26945	028.31691	332
18	HS-17	39.27214	028.31810	369	60	HS-59	39.26932	028.31717	335
19	HS-18	39.27201	028.31746	357	61	HS-60	39.26898	028.31735	348
20	HS-19	39.27199	028.31831	372	62	HS-61	39.26925	028.31817	357
21	HS-20	39.27197	028.31838	369	63	HS-62	39.26912	028.31882	359
22	HS-21	39.27198	028.31837	373	64	HS-63	39.26934	028.31625	316
23	HS-22	39.27217	028.31845	387	65	HS-64	39.26923	028.31630	319
24	HS-23	39.27217	028.31883	381	66	HS-65	39.26903	028.31607	321
25	HS-24	39.27227	028.31902	390	67	HS-66	39.26883	028.31601	321
26	HS-25	39.27206	028.31902	382	68	HS-67	39.26500	028.31367	282
27	HS-26	39.27207	028.31909	387	69	HS-68	39.26828	028.33033	408
28	HS-27	39.27201	028.31874	382	70	HS-69	39.26815	028.33068	417
29	HS-28	39.27191	028.31868	377	71	EM-1	39.19432	028.22644	435
30	HS-29	39.27187	028.31892	375	72	EM-2	39.19349	028.22692	450
31	HS-30	39.27180	028.31897	388	73	EM-3	39.19480	028.22916	398
32	HS-31	39.27182	028.31804	371	74	EM-4	39.22574	028.27395	382
33	HS-32	39.27178	028.31798	365	75	HSC-1	39.31862	028.38811	1730
34	HS-33	39.27172	028.31762	356	76	HSC-2	39.30509	028.40155	1432
35	HS-34	39.27166	028.31805	369	77	HSC-3	39.28736	028.39728	1136
36	HS-35	39.27165	028.31882	379	78	HSC-4	39.28714	028.34148	758
37	HS-36	39.27152	028.31900	386	79	HSC-5	39.26911	028.32202	399
38	HS-37	39.27151	028.31924	380	80	HSC-6	39.27477	028.33309	475
39	HS-38	39.27141	028.31926	384	81	EMC	39.18703	028.26032	440
40	HS-39	39.27148	028.31790	362	82	HSS-1	39.25826	028.32643	282
41	HS-40	39.27135	028.31824	370	83	HSS-2	39.26178	028.30949	272
42	HS-41	39.27126	028.31838	372	84	HSS-3	39.25913	028.29315	271





Şekil 3.4. İnceleme alanında TPAO tarafından açılan Hisaralan-2 (HSW) jeotermal kuyusu (Koordinat: 39.27237°, 28.31980°; soldaki fotoğraf KD'ya, sağdaki fotoğraf GB'ya bakış).

### 3.2.2 Termal Kaynaklar

İnceleme alanındaki termal kaynaklar Hisaralan ve Emendere sahalarında dağılım göstermektedir.

Hisaralan sahasında sıcaklıkları yaklaşık 55 ile 99°C arasında değişen çok sayıda termal kaynak vardır. Termal suların dağılımı Şekil 3.5 ve 3.6'da, bazı termal kaynaklardan görünümü Şekil 3.7'de sunulmuştur. Her arazi çıkış periyodunda, bazı kaynakların kurduğu, bunun yanında yeni termal kaynakların ortaya çıktığı gözlenmiştir. Termal kaynak sularından çökelen karbonatların (başlıca kalsit ve aragonit) kaynak çıkış noktalarını tıkaması (kaynak kuruması), termal suyun kendine yeni bir çıkış noktası bulması (yeni kaynak oluşumu), deprem aktivitesi ile kaynak sayılarının ve yerlerinin değişimi, sahaya ve kaynaklara yoğun insan müdahalesi, sahanın iletim boru ağıyla kaplı olması (termal kaynaktan otel ve pansiyonlara termal su iletimi, genelde plastik boru), önemli sayıda kaynağın dere yatağından boşalması ve bu suyun dere suyuna karışması, otel ve pansiyon sularının da bu derelere deşarj edilmesi nedenleriyle bu saha için kesin bir termal kaynak sayısı ve toplam debi değeri vermek zordur.

Literatürde toplam kaynak sayısına ilişkin farklı değerler verilmiştir. Hafeli (1966), 1965 yılı itibariyle, sıcaklıkları 48-98°C arasında değişen 206 adet termal kaynak, MTA (2005), sıcaklıkları 27 ile 98,5°C arasında değişen 130 adet termal kaynak ve Aksoy vd. (2009), sıcaklıkları 55,5-96,6°C arasında değişen çok sayıda termal kaynaktan bahsetmişlerdir. Yöredeki termal kaynak sayısı üzerine verilen bilgilerdeki bu farklılık çalışmaların 1965'den 2009'a kadar 45 yıllık bir aralığı içermesi, çalışma mevsimi, rezervuar basıncındaki olası değişimler ve ölçülemeyen debiler (dere yataklarından çıkararak dere suyuna karışan termal kaynaklar gibi) göz önüne alındığında normaldir. Hafeli (1966) tarafından verilen kaynak

sayısının yüksek olması, çalışmanın, HSW sondajının açılma tarihinden önce yapıldığı göz önüne alındığında olağandır.

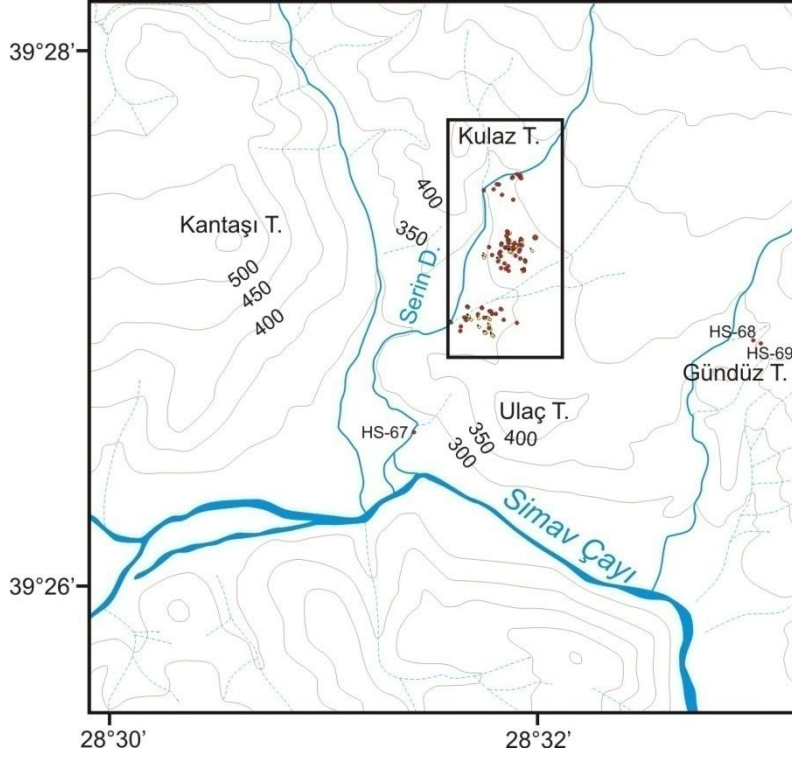
Bu çalışmada, Hisaralan sahasında, sürekli akışlı olan dere yatakları içinden çıkan ve içine girilmesi mümkün olmayan 2-3 m. yükseklikteki sıkı kamışlık alanlarda mevcut olabilecek kaynaklar dışında 69 termal kaynak (birbirine çok yakın ya da bitişik olan kaynaklar da dahil edilirse 97 kaynak) belirlenmiştir (Tablo 3.1).

Sındırgı Belediyesi ve Hisaralan beldesi sakinlerinden alınan bilgiler, HSW sondajı açılmadan önce mevcut termal kaynak debilerinin ve aktif traverten kulesi sayısının daha fazla olduğu, ayrıca aktif traverten kulelerinde termal suların birkaç m yükseğe fıskırdığı şeklindedir. Buradan, HSW kuyusundan boşalan 32 l/s debili (artezyen) termal suyun rezervuar basıncını düşürdüğü söylenebilir. Sayıları 60'ın üzerinde olan pasif traverten kulelerinin yüksekliği (maksimum 4,75 m) ve günümüzde aktif olan birkaç traverten kulesinin yüksekliği (5 m) dikkate alındığında termal suların çıkış noktalarındaki basınç yüzeylelerinin en az +5 metreye ulaştığı anlaşılmaktadır.

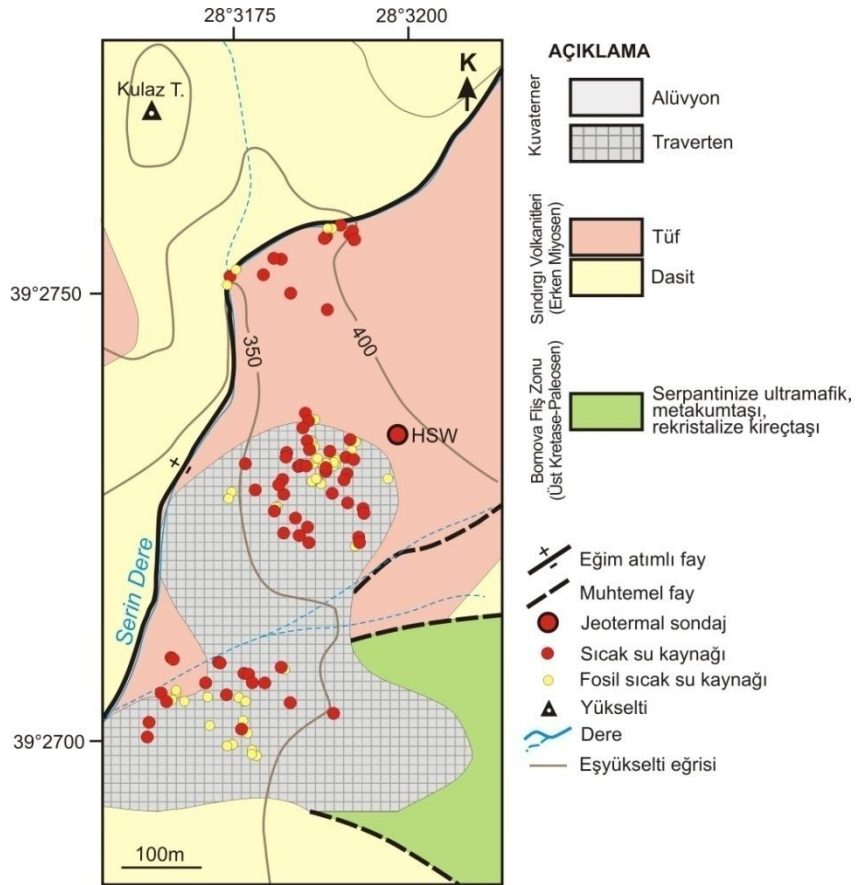
Termal suların literatürdeki toplam debi değerleri 57 l/s (Hafeli,1966), 176 l/s (MTA, 2005) ve 150 l/s (Aksoy vd., 2009) olarak verilmiştir. Hisaralan sahası termal sularının toplam debisini belirlemek amacıyla kaynakların debileri, hacmi belirli kapla doğrudan ya da kazma-kürek yardımıyla kaynak çıkışında debi ölçümüne olanak sağlayacak bir akış sağlanarak belirlenmiştir. Termal kaynakların debileri 10,1 l/s ile 0,033 l/s arasında değişmektedir. Toplam debi 86,6 l/sn olarak tespit edilmiştir. Jeotermal sondaj kuyusundan (HSW) boşalan suyun debisi (32 l/s) kaynak debilerine eklendiğinde Hisaralan sahasındaki termal suların toplam debisi 118,6 l/s (3.740.170 m<sup>3</sup>/yıl) olarak verilebilir. Toplam debi değerinin, mevsimsel olarak değişim göstermekle birlikte dere yatağında ya da sazlıklar içindeki olası kaynaklar da dikkate alındığında 118,6 l/s'den daha fazla olabileceği öngörülmektedir. Termal kaynakların debi değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Hisaralan termal sularından aşağıdaki alanlarda yararlanılmaktadır.

- Konut ısıtması (Sındırgı ilçe merkezinde 1300 konut-sadece HSW kuyusundan- ile termal kaynak alanı ve civarında otel ve pansiyon ısıtması),
- Sera ısıtması (toplam 4943 m<sup>2</sup> sera alanında domates, salatalık, biber ve marul yetiştirilmektedir),
- Süs balıkçılığı (1440 m<sup>2</sup>) ve
- Kaplıca (Termal kaynak alanında 1 adet 5 yıldızlı otel ve pansiyonlar)
- Sındırgı'daki tesislerde ve satışı devam eden devremülk otel.



Şekil 3.5. İnceleme alanı termal suları (kırmızı noktalar) ve traverten kulelerinin (sarı noktalar) lokasyon haritası.



Şekil 3.6. Hisaralan termal kaynak alanındaki aktif ve fosil termal kaynakların lokasyon haritası.



Şekil 3.7. Hisaralan jeotermal sahasındaki bazı termal kaynaklardan görünümler (Kaynak koordinatları için Tablo 3.1'e bakınız).

Tablo 3.2. İnceleme alanındaki su noktalarının Mayıs-2017’de ölçülen debi değerleri (\*Ekim 2017’de ölçülmüştür).

No	Kod	Debi (l/s)	No	Kod	Debi (l/s)	No	Kod	Debi (l/s)	No	Kod	Debi (l/s)
1	HSW	32	22	HS-21	1	43	HS-42	3,5	64	HS-63	0,1
2	HS-1	1,5	23	HS-22	0,15	44	HS-43	0,04	65	HS-64	1,5
3	HS-2	1,0	24	HS-23	0,5	45	HS-44	0,85	66	HS-65	2,54
4	HS-3	0,1	25	HS-24	1,2	46	HS-45	0,4	67	HS-66	0,1
5	HS-4	0,35	26	HS-25	0,4	47	HS-46	0,15	68	HS-67	1,5
6	HS-5	0,5	27	HS-26	0,1	48	HS-47	0,15	69	HS-68	2
7	HS-6	0,1	28	HS-27	0,8	49	HS-48	0,033	70	HS-69	1
8	HS-7	1,0	29	HS-28	0,15	50	HS-49	0,1	71	EM-1	-
9	HS-8	0,15	30	HS-29	0,65	51	HS-50	1,0	72	EM-2	10
10	HS-9	1,0	31	HS-30	0,25	52	HS-51	7,0	73	EM-3	-
11	HS-10	0,5	32	HS-31	0,4	53	HS-52	2,5	74	EM-4	0,6
12	HS-11	2,5	33	HS-32	5,0	54	HS-53	10,1	75	HSC-1	0,09
13	HS-12	0,3	34	HS-33	0,25	55	HS-54	3,5	76	HSC-2	-
14	HS-13	0,7	35	HS-34	0,21	56	HS-55	3	77	HSC-3	0,105
15	HS-14	0,2	36	HS-35	1,0	57	HS-56	1	78	HSC-4	1,56
16	HS-15	0,7	37	HS-36	0,2	58	HS-57	0,3	79	HSC-5	0,11
17	HS-16	1,63	38	HS-37	0,1	59	HS-58	5,5	80	HSC-6	0,016
18	HS-17	0,5	39	HS-38	0,2	60	HS-59	2,7	81*	EMC	1,187
19	HS-18	0,7	40	HS-39	0,2	61	HS-60	0,1			
20	HS-19	0,25	41	HS-40	4,0	62	HS-61	3			
21	HS-20	1,4	42	HS-41	0,7	63	HS-62	0,4			

Emendere sahasında düşük sıcaklıklı (25-32°C) 4 adet termal kaynak vardır (Şekil 3.2 ve 3.3). Kocaiskan volkanitlerinden gelen EM-1, EM-2 ve EM-3 termal kaynakları Ilıca Köyü'nün 3 km kadar güneyinde, Akpınar dere yatağı kenarında, KB-GD doğrultulu fayların kontrolünde yüzeyleşmişlerdir. Bu üç kaynak birbirine 100-250 m mesafelerdedir. EM-1 termal kaynağı düşük debili olup volkanitlerin çatlaklarından boşalmaktadır. EM-2 kaynağı çıkışı düzenlenerek bir havuz oluşturulmuştur (Şekil 3.8). EM-3 termal kaynağı bir otel alanında, tufa oluşumları içindeki bir mağaradan çıkmaktadır. Kaynak kaptaja alınmıştır ve otelde termal banyo olarak kullanılmaktadır. Ilıcak Pınarı (EM-4) Ilıca Köyü'nün 4 km KD'sunda, Kocadere yatağı kenarında bulunur. Sıcaklığı 25,2°C ve debisi 0,6 l/s olan bu kaynaktan çeşme olarak yararlanılmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.8. Emendere sahasındaki EM-2 kaynağının görünümü (Koordinat: 39.19349°, 28.22692°; B'ya bakış).



Şekil 3.9. Kocaiskan volkanitlerinden boşalan Ilıcak Pınarı (Koordinat: 39.22574°, 28.27395°, KB'ya bakış).

### 3.2.3 Soğuk Su Kaynakları

İnceleme alanı ve civarındaki soğuk su kaynaklarının büyük çoğunluğu düşük debili kaynaklardır. Hisaralan sahasında örneklenen soğuk su kaynaklarından Ulus (HSC-1), Gözören (HSC-2), Kozoluk (HSC-3), Kaplıca (HSC-5) ve Cevizpınarı kaynakları Sındırgı volkanitlerinin dasitlerinden gelmektedir. Ilıcapınar kaynağı ise (HSC-4) Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı kumtaşı-çakıltaşı biriminden boşalmaktadır. Yukarıda değinildiği gibi bu kaynak sularının debileri kurak dönemde oldukça azalmaktadır. Ekim 2016 ve Mayıs 2017 (Tablo 3.2) dönemlerinde yapılan ölçümlerde debi değerlerinin sırasıyla Ulus kaynağında 0,005 l/s'den 0,09 l/s'ye, Kozoluk kaynağında 0,042 l/s'den 0,105 l/s'ye, Ilıcapınar kaynağında 0,75 l/s'den 1,56 l/s'ye, Kaplıca kaynağında 0,06 l/s'den 0,11 l/s'ye,

Cevizpınarında 0,016 l/s'den 0,58 l/s'ye yükseldiği belirlenmiştir. Bu değerler, soğuk kaynak debilerinin kurak dönemde yaklaşık 2 kat azaldığını göstermektedir (Cevizpınarında 36 kat).

Emendere sahasında bir mesire alanında bulunan Beşçeşme kaynağı Bornova Fliş Zonu'ndan boşalmaktadır. Ekim 2017'de ölçülen kaynak debisi 1,187 l/s'dir.

### 3.2.4 Akarsular

İnceleme alanındaki en önemli yüzey suyu Hisaralan termal kaynak alanının güneyinden geçen Simav Çayı'dır. Termal kaynak alanının güney kesiminde Simav Çayı, üzerinde yapılan kil çekirdekli kaya dolgu tipindeki Çaygören Barajı'nın membasını oluşturmaktadır (Şekil 3.2 ve 3.3). Taşkın kontrolü ve sulama suyu amaçlı barajın göl alanı 8,5 km<sup>2</sup> olup ([http://bolge25.dsi.gov.tr/isletmedekitesisler/ baraj-golet](http://bolge25.dsi.gov.tr/isletmedekitesisler/baraj-golet)) yağışlı dönemde Şekil 3.2'deki HSS-3 simgeli noktaya kadar genişlemektedir. Simav Çayı üzerinde, akarsuyun inceleme alanına giriş ve çıkış noktaları (sırasıyla HSS-1 ve HSS-2) ve Çaygören Barajı'na döküldüğü nokta ((HSS-3) örnekleme noktası olarak seçilmiştir. İnceleme alanı ve civarındaki derelerin büyük çoğunluğu devamlı akışlı derelerdir. Özellikle Ulus Dağı gibi yüksek noktaların ve hatta Hisaralan termal kaynak alanı civarının kış döneminde kar tutması bahar ve yaz aylarında derelerin beslenmesini sağlar.

### 3.3 Sıcak Suların Oluşumu

Hisaralan jeotermal suları devirli bir hidrotermal sistemin ürünüdür. Beslenme alanına düşen yağış suları (yağmur, kar) beslenme alanı kayaçlarındaki çatlaklar vasıtasıyla derinlere süzülür, burada yüksek jeotermal gradyanla ısınır, basınç altındaki jeotermal akışkan fay zonlarını izleyerek yüzeye çıkar ve termal kaynakları oluşturur.

**Rezervuar:** Hisaralan sahasında tüfler dışındaki volkanitlerin geçirgenliklerinin sınırlı olması nedeniyle bir jeotermal rezervuar oluşturması olasılığı düşüktür. Bornova Fliş Zonu'nun Kretase kireçtaşları inceleme alanında mostra vermemektedir. Ancak, inceleme alanının 10 km kadar güneyindeki yol yarmasında bu kireçtaşına ait bloklar gözlenmiştir (Şekil 3.10). Ayrıca literatürde Bornova Fliş Zonu içerisinde yer alan boyları 20 km'yi geçen neritik kireçtaşı bloklarından söz edilmektedir (Okay ve Altınar, 2007; Erdoğan ve Güngör, 1992; Okay vd., 2012). Ünal (1972), Hisaralan sahasında, Üst Kretase yaşlı serpantin, radyolarit ve rekristalize kireçtaşlarının oluşturduğu karmaşık içerisinde bulunan rekristalize kireçtaşlarının kalınlığının 50-100 m arasında olduğunu belirtmiştir. Kastelli (1974) Sındırgı-Hisaralan sahası ve civarı için bölgedeki en eski kayaların glokofan şistlerden oluştuğunu, bunun üzerine serpantinit-rekristalize kalker ve radyolarit geldiğini ifade etmiştir. Bunun dışında HSW sondajında 464 metreden kuyu tabanı olan 881 metreye kadar Bornova



Şekil 3.10. Bornova Fliş Zonu içindeki neritik kireçtaşı bloklarından görünüm (Sındırgı doğusu, koordinat: 39.23392°, 28.18096°, KD'ya bakış).

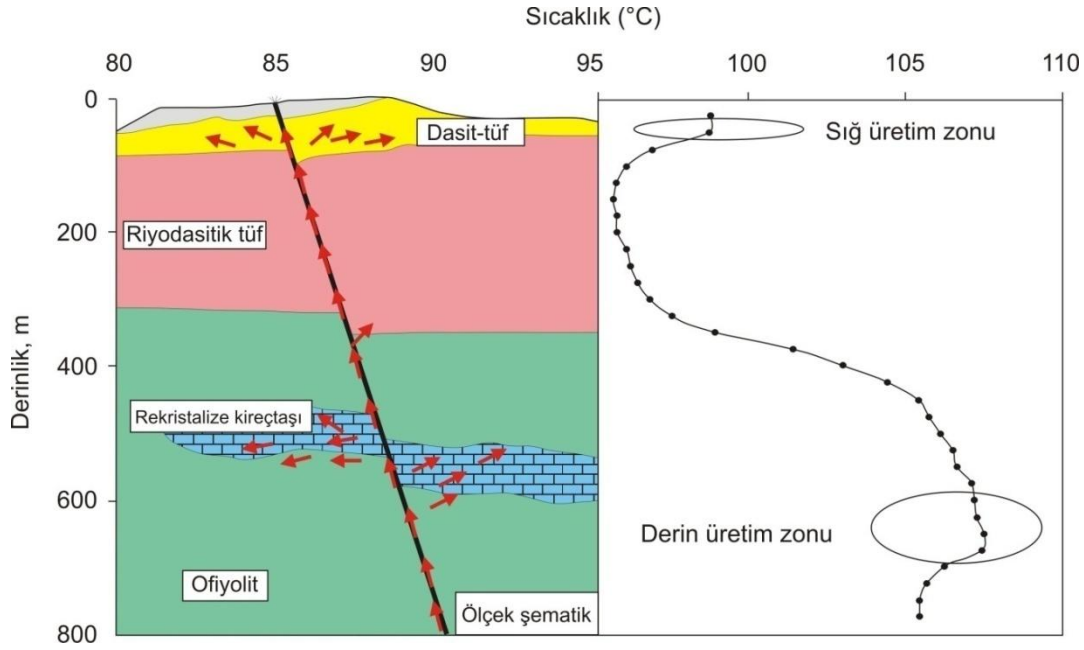
Fliş Zonu kayaları (kayaç türleri ayırtlanmamıştır) kesilmiştir. Bu durumda Hisaralan sahasındaki rezervuar kayacın başlıca Bornova Fliş Zonu içindeki neritik kireçtaşları olduğu, volkanitler içindeki yüzeye yakın yoğun çatlaklı zonların ikincil rezervuar olabileceği söylenebilir.

Aksoy vd. (2009) HSW kuyusunda İller Bankası tarafından yapılan statik sıcaklık testini yorumlayarak iki farklı üretim zonu öngörmüşlerdir (Şekil 3.11):

1. Sığ üretim zonu: 0-50 m aralığında yer alan bu zonda sıcaklık 98°C'ye kadar yükselmektedir. Sıcaklık 200 m ye kadar azalmakta daha sonra yeniden artmaktadır.
2. Derin üretim zonu: 550-675 m arasındaki bu zonda ölçülen maksimum sıcaklık 107°C'dir. Araştırmacılar, daha derinden yükselen jeotermal akışkanın biri yüzeye yakın diğeri 500-700 m arasında yer alan birimler içerisine boşaldığını belirtmişlerdir.

**Örtü kaya:** Hisaralan sahasında yeterince kalın, geçirimsiz, rezervuardaki akışkanın sıcaklığını koruyan ve akışkan kaybını önleyen gerçek bir örtü kaya yoktur. Ancak, geçirgenliği düşük olan tüfler ve ayrışma zonlarında killeşmiş ultramafik kayalar ve volkanitler kısmen örtü kaya niteliği taşırlar. Rekristalize kireçtaşları üzerindeki ofiyolitik kayaların geçirimsiz litolojileri de örtü kaya özelliğindedir.



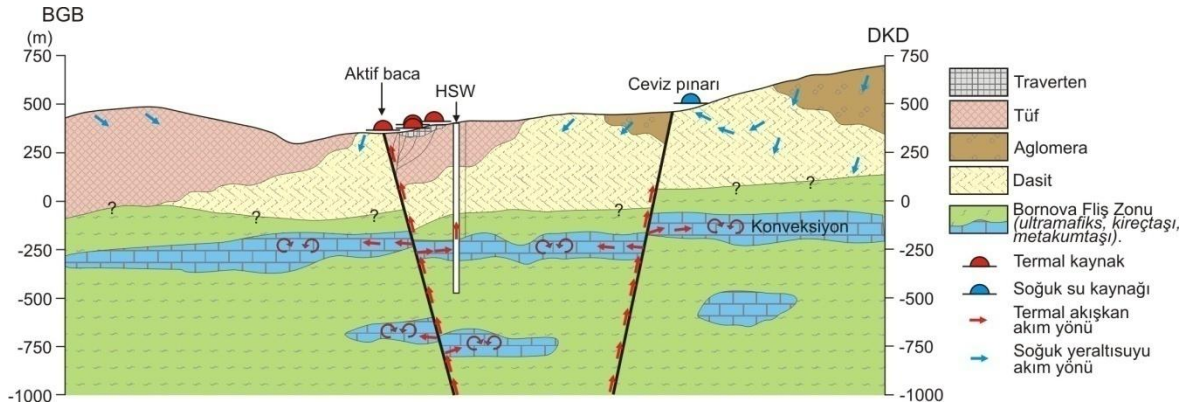


Şekil 3.11. Hisaralan sahası akışkan yükselim modeli ve HSW kuyusu statik sıcaklık ölçüsü (Aksoy vd., 2009).

#### **Isı kaynağı:**

Türkiye'nin tektonik olarak aktif bir bölgesinde yer alan inceleme alanında biri Çaygören baraj gölü güneyinden geçen doğrultu atımlı Simav Fayı, diğeri Hisaralan termal kaynak alanı kuzeyinden geçen Düvertepe normal fay zonu olmak üzere yaklaşık D-B ve KB-GD gidişli iki önemli diri fay gözlenmektedir (Emre vd., 2011b). Yöre aynı zamanda Türkiye'nin birinci derece deprem kuşağında yer almaktadır. İnceleme alanı ve yakın çevresinde geçmişte meydana gelen birçok deprem sismik aktivitenin bir göstergesidir. Bu depremlerden en önemlisi 15.10.1942 tarihinde meydana gelen 6,2 büyüklüğündeki Bigadiç depremidir (Atabey, 2000). 07-25 Haziran 2003 tarihleri arasında Sındırgı-Bigadiç yöresinde büyüklükleri 2.0 ile 5,5 arasında değişen 70 deprem olmuştur (Demirtaş vd., 2003). Proje kapsamındaki arazi çalışmaları süresince de inceleme alanı ve civarında meydana gelen küçük depremler sonrası termal kaynakların bazılarının gözden kaybolduğu, bazı yeni çıkışlar olduğu, bazı kaynakların yerlerinin değiştiği gözlenmiştir. Bilim vd. (2016) tarafından Curie noktası derinlikleri baz alarak hazırlanan jeotermal gradyan haritasında inceleme alanı için yaklaşık 70°C/km'lik bir değer öngörülmektedir. İnceleme alanı ve civarındaki diri faylar, yoğun sismisite ve jeotermal sahalar bölgedeki tektonik aktivitenin devam ettiğini göstermektedir. Bu aktiviteye bağlı olarak gelişen yüksek jeotermal gradyan Hisaralan sahasının ısı kaynağını oluşturmaktadır.

Hisaralan sahasının kavramsal hidrojeolojik modeli Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Hisaralan sahasının kavramsal hidrojeolojik modeli.

## 4. HİDROKİMYA

Suların kimyasal kompozisyonunu belirlemek, sınıflamak, hidrokimyasal evrimini anlamak, suda çözülmüş maddelerin arasındaki ilişkileri araştırmak, mineral doymunluklarını belirlemek, rezervuar sıcaklığına yaklaşım sağlamak gibi konularda değerlendirmelerde bulunmak için suların kimyasal ve izotop analizleri yapılmıştır. Bu amaçla Nisan-2016 döneminde 26, Ekim-2016 döneminde 38 ve Ekim-2017'de 5 adet termal ve soğuk su örneği toplanmıştır. Bu sayılara HS-61 nolu termal kaynaktan itibaren eğim aşağı akan suyun akımı sırasında fizikokimyasal özelliklerinde meydana gelecek değişimleri gözlemek için, akım yolunda Nisan-2016, Temmuz-2016 ve Ekim-2016'da toplam 11 noktadan alınan örnekler de dahildir. Ancak eğim aşağı akım kanalında yapılan örnekleme ve analizlerde sağlıklı sonuç alınamamıştır. Bunun nedeni, akım kanalına sürekli insan müdahalesi, kanal boyunun sürekli değişimi ve kanala doğal olarak ya da insan eliyle diğer termal kaynak sularının karışımıdır. Bu izlemenin amacı eğim aşağı akan termal suların kimyasal ve izotopik özelliklerindeki mevsimsel değişimlerin incelenmesiydi. Ancak, akım kanalına yapılan müdahaleler nedeniyle suyun doğal akışında örnekleme yapılamayacağı anlaşıldığı için bu çalışmaya son verilmiştir. İnceleme alanındaki suların değişik dönemlerde ölçülen sıcaklık, EC ve pH değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 4.1'de verilmiştir.

### 4.1. Suların Kimyasal Kompozisyonu

Hisaralan sahası termal suların sıcaklıkları Nisan-2016 döneminde 54,1 ile 97,0°C, Ekim 2016 döneminde 54,7 ile 98,9°C arasında, elektriksel iletkenlik değerleri Nisan döneminde 1175 ile 1493  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Ekim döneminde 1193 ile 1659  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ve pH değerleri Nisan döneminde 6,82 ile 8,44 ve Ekim döneminde 6,10 ile 8,78 arasında bir yayılım göstermiştir. Genellikle 90°C'nin üzerindeki suların sıcaklık, EC ve pH değerlerinde mevsimsel bir değişim gözlenmezken, daha düşük sıcaklığa sahip sulardaki bu değerler Ekim döneminde artmıştır. Örneğin kaynak sularının sıcaklıkları HS-2'de 77,6°C'den 86,1°C'ye, HS-4'de 79,6°C'den 93,1°C'ye, HS-13'de 74,0°C'den 86,2°C'ye, HS-24'de 75,1°C'den 88,1°C'ye yükselmiştir. Bu durum, kurak dönemde, termal rezervuar basıncının arttığını ve termal suya soğuk yeraltısuyu karışım oranının azaldığını gösterir. Ekim döneminde artan EC değerleri de bu tespiti desteklemektedir.

Ekim 2017'de, Emendere sahası termal suların sıcaklıkları 25,2 ile 32,0°C, EC değerleri 266 ile 436  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ve pH'ları 6,82 ile 8,44 arasında ölçülmüştür. EM-1, EM-2 ve EM-3 kodlu suların EC değerleri birbirine yakın iken EM-4 kodlu Ilıcak pınarı düşük EC değeri ile (266  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) diğer sularından ayrılır.

Tablo 4.1. İnceleme alanındaki termal suların sıcaklık, EC ve pH değerleri. Yılı belirtilmeyen aylar 2016'ya aittir. (TS: Jeotermal sondaj, TK: Termal kaynak, SSK: Soğuk su kaynağı, \*örneklenen sular).

Su Noktası			T (°C)			EC (µS/cm)		pH	
No	Kod	Türü	Nisan	Ekim	Mayıs-2017	Nisan	Ekim	Nisan	Ekim
1	HSW*	TS	97,0	98,9	98,8	1493	1643	7,62	7,60
2	HS-1*	TK	93,2	94,0	-	1422	1463	7,07	7,28
3	HS-2	TK	ÖLÇÜM ALINAMADI						
4	HS-3	TK	-	-	76,5	-	-	-	-
5	HS-4	TK	-	64,6	60,5	-	1410	-	7,56
6	HS-5	TK	-	71,4	69,0	-	1430	-	6,96
7	HS-6	TK	-	75,8	78,1	-	1443	-	7,72
8	HS-7	TK	-	72,7	76,3	-	1443	-	7,49
9	HS-8	TK	-	87,1	85,2	-	1438	-	7,06
10	HS-9	TK	-	90,1	85,3	-	1444	-	7,08
11	HS-10	TK	-	61,6	67,4	-	1432	-	7,45
12	HS-11	TK	-	73,0	64,0	-	1455	-	7,57
13	HS-12	TK	-	-	84,5	-	-	-	-
14	HS-13	TK	-	80,6	79,7	-	1442	-	7,75
15	HS-14	TK	-	-	78,6	-	-	-	-
16	HS-15	TK	-	64,3	67,6	-	1441	-	7,68
17	HS-16	TK	-	77,9	77,8	-	1465	-	7,40
18	HS-17	TK	-	84,3	83,2	-	1468	-	7,37
19	HS-18	TK	-	-	74,1	-	-	-	-
20	HS-19	TK	-	-	85,7	-	-	-	-
21	HS-20	TK	-	84,4	85,3	-	1445	-	7,15
22	HS-21*	TK	85,6	85,8	82,8	1433	1455	7,24	7,34
23	HS-22	TK	-	-	88,3-71,1	-	-	-	-
24	HS-23	TK	-	67,9	76,5	-	1454	-	7,24
25	HS-24	TK	92,5	89,3	90,2	1372	1458	7,36	7,42
26	HS-25	TK	-	76,7	79,9	-	1430	-	7,59
27	HS-26*	TK	97,0	96,4	95,3	1380	1379	8,44	8,08
28	HS-27*	TK	74,0	80,2	80,4	1397	1430	7,12	7,21
29	HS-28	TK	-	-	91,4	-	-	-	-
30	HS-29	TK	-	76,0	73,5	-	1488	-	7,16
31	HS-30	TK	-	-	66,0	-	-	-	-
32	HS-31	TK	-	-	95,5	-	-	-	-
33	HS-32	TK	-	95,4	95,0	-	1468	-	7,90
34	HS-33	TK	-	83,5	82,6	-	1659	-	8,78
35	HS-34	TK	-	-	81,7	-	-	-	-
36	HS-35	TK	-	-	81,3	-	-	-	-
37	HS-36	TK	74,0	86,2	84,2	1382	1460	7,37	7,27
38	HS-37	TK	-	72,6	74,5	-	1440	-	7,01
39	HS-38	TK	74,1	78,4	73,3	1401	1450	7,57	7,93
40	HS-39	TK	-	67,0	61,2	-	1475	-	7,71
41	HS-40*	TK	73,6	74,9	74,4	1403	1448	7,17	7,49
42	HS-41	TK	Kuru	87,9	97,7	Kuru	1468	Kuru	7,96

Tablo 4.1. Devam (\*örneklenen sular, \*\*2017 yılına ait ölçümler).

Su Noktası			T (°C)				EC (µS/cm)			pH		
No	Kod	Türü	Nis.	Ekim	Mayıs*	Ek.**	Nis.	Ekim	Ekim**	Nis.	Ekim	Ek.**
43	HS-42	TK	84,0	98,2	98,4	-	1356	1423	-	7,59	8,05	-
44	HS-43	TK	-	-	98,7	-	-	-	-	-	-	-
45	HS-44*	TK	95,1	96,3	95,5	-	1427	1428	-	7,74	7,40	-
46	HS-45	TK	-	67,0	68,2	-	-	1508	-	-	7,35	-
47	HS-46*	TK	93,0	93,1	90,4	-	1422	1448	-	7,26	7,21	-
48	HS-47	TK	-	88,2	77,6	-	-	1576	-	-	8,20	-
49	HS-48	TK	-	-	77,5	-	-	-	-	-	-	-
50	HS-49	TK	-	-	87,4	-	-	-	-	-	-	-
51	HS-50	TK	-	96,7	96,0	-	-	1446	-	-	7,87	-
52	HS-51*	TK	95,7	96,4	94,2	-	1429	1443	-	7,17	7,27	-
53	HS-52	TK	69,6	80,2	76,2	-	1272	1385	-	7,26	7,53	-
54	HS-53	TK	71,4	82,2	76,9	-	1290	1394	-	7,11	7,42	-
55	HS-54*	TK	75,1	88,1	80,5	-	1283	1412	-	6,91	7,11	-
56	HS-55*	TK	-	85,0	80,3	-	-	1413	-	-	7,33	-
57	HS-56	TK	79,6	93,1	72,9	-	1396	1419	-	7,97	7,91	-
58	HS-57*	TK	87,9	85,1	87,9	-	1442	1444	-	6,97	7,35	-
59	HS-58*	TK	78,0	84,1	81,7	-	1418	1427	-	7,14	6,39	-
60	HS-59	TK	96,0	96,2	96,7	-	1425	1452	-	7,09	8,11	-
61	HS-60*	TK	77,6	86,1	70,3	-	1432	1454	-	7,19	7,45	-
62	HS-61*	TK	96,4	95,7	95,7	-	1466	1444	-	7,19	7,40	-
63	HS-62	TK	-	75,3	79,5	-	-	1439	-	-	7,33	-
64	HS-63	TK	80,4	-	84,7	-	1337	-	-	6,82	-	-
65	HS-64	TK	-	86,3	82,8	-	-	1454	-	-	6,10	-
66	HS-65	TK	-	-	83,5- 89,1	-	-	-	-	-	-	-
67	HS-66	TK	-	-	94,1	-	-	-	-	-	-	-
68	HS-67*	TK	54,1	54,7	56,1	-	1445	1450	-	6,87	6,82	-
69	HS-68*	TK	69,8	70,4	73,6	-	1273	1272	-	7,01	7,16	-
70	HS-69*	TK	54,5	59,3	56,0	-	1175	1193	-	6,93	7,59	-
71	EM-1*	TK	-	-	-	30,5	-	-	436	-	-	7,08
72	EM-2*	TK	-	-	-	28,5	-	-	435	-	-	8,16
73	EM-3*	TK	31,0	-	-	32,0	407	-	428	7,33	-	7,73
74	EM-4*	TK	-	-	-	25,2	-	-	266	-	-	8,89
75	HSC-1*	TK	4,6	6,1	5,9	-	53,8	85,5	-	8,35	7,49	-
76	HSC-2*	SSK	5,3	6,3	-	-	62,1	95,6	-	8,08	6,52	-
77	HSC-3*	SSK	11,7	12,8	-	-	80,0	81,8	-	8,79	7,84	-
78	HSC-4*	SSK	18,2	18,9	18,1	-	360	379	-	7,61	7,96	-
79	HSC-5*	SSK	23,4	20,6	22,6	-	724	752	-	7,45	7,33	-
80	HSC-6*	SSK	-	16,7	18,7	-	-	478	-	-	7,17	-
81	EMC*	SSK	-	-	-	13,0	-	-	436	-	-	7,64
82	HSS-1*	Akarsu	18,5	14,9	-	-	536	703	-	9,02	8,71	-
83	HSS-2*	Akarsu	20,3	-	-	-	618	751	-	8,77	8,73	-
84	HSS-3*	Akarsu	24,1	-	-	-	978	1451	-	8,78	9,13	-

Soğuk sulardan Hisaralan jeotermal sisteminin olası beslenme alanını oluşturan Ulus Dağı ve eteklerindeki yüksek kottardan boşalan soğuk suların (HSC-1, 2 ve 3) sıcaklık ve EC değerleri çok düşük olup Ekim-2016 döneminde nispeten artış göstermiştir. Bu durum, bu suların Nisan-2016 döneminde eriyen kar suları ile beslendiğini ve yeraltında dolaşım sürelerinin az olduğunu gösterir. Jeotermal sahayı güneyinden sınırlayan Simav Çayı'nın inceleme alanına giriş ve çıkış noktalarından (HSS-1 ve 2) ve çay suyunun Çaygören Barajı'na döküldüğü noktadan (HSS-3) yapılan dönemsel ölçümlerde her üç noktada sıcaklığın Ekim döneminde bir miktar azaldığı, EC değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir. EC değeri göl suyunda Nisan'da 978  $\mu\text{S}/\text{cm}$  iken Ekim döneminde 1451  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ile sahadaki termal suların iletkenlik değerlerine erişmiştir. Jeotermal sahayı doğu ve batıdan kateden ve Simav Çayı'na boşalan derelerin gerek vadi tabanından çıkan kaynaklar, gerek otel ve pansiyonlarda kullanılan termal suların kullanımdan sonra bu derelere deşarj edilmesi nedeniyle, özellikle kurak dönemi temsil eden Ekim ayında termal suların kimyasına yakın bir kompozisyon kazanması olağandır. Emendere sahasından örnek alınan tek soğuk su kaynağı olan Beşçeşme kaynağı (EMC) 13,0°C sıcaklığa, 436  $\mu\text{S}/\text{cm}$  EC değerine ve 7,64 pH değerine sahiptir.

Suların kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'de verilmiştir. Analiz hatası (% e) anyon-katyon dengesinden,

$$e = ((\Sigma\text{Katyon} - \Sigma\text{Anyon}) / (\Sigma\text{Katyon} + \Sigma\text{Anyon})) \times 100 \text{ (mek/l) bağıntısıyla hesaplanmıştır.}$$

Bu bağıntıyla hesaplanan pozitif değerler katyon, negatif değerler ise anyon fazlalığını gösterir. Genellikle, %5'e kadar olan hata yüzdesi kabul edilebilir sınırlar içindedir. Hisaralan analizlerinde hata yüzdesi genel olarak %5'den azdır.

Suları adlandırmak, birbiri ile karşılaştırmak, kaya su etkileşimlerini araştırmak ve kökenlerine ilişkin değerlendirme yapabilmek amacıyla suların sınıflanmasına yönelik çeşitli yöntemler önerilmiştir. Tablo 4.6 ve 4.7'de inceleme alanındaki suların katyon-anyon dağılımları (mek/l) ve Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH) sınıflamasına göre belirlenen sınıfları verilmiştir. Bu sınıflamada suda çözülmüş başlıca anyon ve katyon değerleri ayrı ayrı olmak üzere mek/l olarak hesaplanır ve miktarı %20'yi aşan iyonlar, önce katyonlar sonra anyonlar sırasıyla yazılarak su sınıfı belirlenir (IAH, 1979).

Hisaralan termal sularının hemen hemen tamamında katyon sıralanımı  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$  ve anyon sıralanımı  $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$  şeklindedir ve sular  $\text{Na-HCO}_3$  tipindedir. Soğuk sularda başlıca katyon Ca, başlıca anyon  $\text{HCO}_3$ 'tür. Bu iyonlara, suların yeraltı akım yollarında bir miktar Na, Mg ve  $\text{SO}_4$  katılmıştır.

Tablo 4.2. Suların Nisan-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları (mg/l).

Kodu	Na	K	Ca	Mg	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	F	Br	SiO <sub>2</sub>
HSW	285,5	18,4	24,4	3,5	36	524,6	86,6	96,0	0,04	0,16	0,16	9,23	0,187	117,09
HS-1	271,3	17,4	23,5	3,0	54	469,7	84,4	94,5	0,00	0,17	0,00	8,79	0,270	108,48
HS-21	272,7	17,2	22,1	2,9	12	524,6	86,7	98,9	0,00	0,30	0,00	9,55	0,316	114,68
HS-26	293,5	18,2	12,4	2,2	36	475,8	87,8	97,3	0,06	0,22	0,00	9,52	0,327	121,55
HS-27	278,6	17,6	25,8	3,4	12	555,1	80,5	95,9	0,00	0,07	0,00	9,28	0,184	114,66
HS-40	268,6	17,1	24,5	3,3	12	524,6	80,7	95,5	0,24	0,17	0,00	9,13	0,245	109,70
HS-44	275,7	17,5	18,2	2,6	15	512,4	85,2	94,6	0,11	0,30	0,00	9,10	0,333	117,21
HS-46	285,6	18,1	19,2	2,6	12	542,9	84,1	98,5	0,02	0,52	0,00	9,80	0,321	113,64
HS-51	273,7	17,6	21,2	3,6	0	573,4	80,2	94,2	0,00	0,10	0,30	8,85	0,209	113,44
HS-54	239,9	15,9	34,7	4,1	0	549,0	74,0	91,2	0,26	0,78	0,00	7,75	0,265	101,59
HS-57	275,3	17,7	20,6	3,2	0	567,3	82,4	114,4	0,11	0,09	0,11	8,89	0,210	112,19
HS-58	273,8	17,5	22,1	3,9	0	567,3	81,7	97,3	0,12	0,19	0,00	8,66	0,345	110,81
HS-60	288,7	18,4	18,4	3,4	0	585,6	84,4	108,2	0,00	0,14	0,00	9,20	0,240	116,74
HS-61	269,0	18,1	25,3	4,5	0	573,4	79,7	92,7	0,06	0,16	0,03	8,75	0,172	120,32
HS-67	266,6	14,8	50,5	4,8	18	640,5	78,1	95,2	0,12	0,21	0,00	6,19	0,276	94,26
HS-68	241,2	10,6	34,3	3,1	0	567,3	64,2	76,1	0,17	0,20	0,00	6,24	0,221	100,77
HS-69	229,5	9,2	32,5	1,9	0	555,1	61,2	72,4	0,00	0,47	0,00	5,83	0,240	91,65
EM-3	4,02	1,05	51,4	21,5	24	219,6	4,5	17,8	0	0,4	0	0,25	0,048	14,27
HSC-1	2,6	0,7	9,0	0,8	0	24,4	2,0	6,6	0,00	0,00	0,00	0,02	0,014	4,68
HSC-2	2,4	0,7	6,1	4,8	0	36,6	2,6	4,2	0,00	0,00	0,00	0,01	0,011	9,00
HSC-3	5,5	2,7	9,3	2,6	0	30,5	6,1	11,0	0,00	0,47	0,00	0,02	0,026	12,04
HSC-4	12,9	1,4	49,7	9,3	12	176,9	5,1	20,8	0,06	4,58	0,00	0,04	0,029	17,27
HSC-5	40,4	6,0	70,1	28,3	24	311,1	16,4	34,4	0,03	28,18	0,00	0,04	0,053	35,16
HSS-1	24,9	6,2	67,3	20,5	30	176,9	10,5	108,0	0,00	0,27	0,00	0,35	0,076	16,80
HSS-2	54,2	7,2	60,7	19,1	18	237,9	19,1	98,1	0,00	0,23	0,00	1,34	0,099	29,77
HSS-3	186,7	14,0	49,8	13,5	36	353,8	64,0	109,6	0,22	0,51	0,45	5,00	0,154	60,82

Tablo 4.3. Suların Nisan-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları (µg/l).

Kodu	Al	As	B	Ba	Cs	Cu	Fe	Li	Mn	Rb	Sb	Sr	W	Zn
HSW	28	123,4	5072	153,8	185,4	2,8	124	1039	50,0	143,8	6,6	459,3	188,6	10,6
HS-1	10	97,4	4660	145,6	176,9	5,4	<10	977	104,8	134,5	6,1	428,0	187,7	4,4
HS-21	8	97,6	4934	132,9	173,2	1,4	<10	979	56,7	132,2	6,1	481,0	192,4	2,0
HS-26	12	117,4	5082	111,2	179,1	1,8	<10	1044	7,4	137,4	8,1	401,3	200,0	1,8
HS-27	8	84,6	4886	144,5	175,6	1,8	24	1004	75,7	135,4	4,2	541,0	180,3	1,8
HS-40	12	93,6	4738	138,7	165,9	1,4	<10	946	71,0	130,1	5,5	513,5	180,9	2,2
HS-44	12	103,2	4940	124,9	177,5	1,4	32	1019	27,1	139,1	7,8	467,3	196,6	1,4
HS-46	50	98,2	4918	129,1	177,4	2,0	64	1018	30,0	136,7	7,3	467,3	202,7	2,4
HS-51	8	115,0	4812	126,8	174,0	2,0	<10	988	21,7	133,6	7,1	505,5	184,3	3,2
HS-54	12	89,0	4316	149,1	149,7	3,2	<10	854	46,8	116,8	6,0	585,5	140,8	4,8
HS-57	16	111,4	4926	140,6	176,4	2,2	<10	988	34,6	134,2	7,0	500,3	180,9	5,2
HS-58	6	105,2	4604	150,8	173,2	1,6	<10	968	35,4	132,6	6,4	553,0	167,7	3,0
HS-60	16	117,6	4902	144,5	182,7	2	<10	1035	33,7	140,3	7,6	512,9	191,0	3,0
HS-61	16	115,6	5046	138,0	182,3	3	<10	1017	56,7	140,1	7,4	482,1	195,3	4,8
HS-67	6	37,6	4520	125,3	140,2	2,2	42	899	170,2	104,2	1,4	820,7	122,3	3,6
HS-68	6	47,6	3744	173,9	106,7	2,8	<10	765	73,2	69,2	1,8	656,4	100,6	3,2
HS-69	8	34,2	3402	182,1	82,6	2,6	<10	693	116,3	54,0	1,0	715,4	84,2	2,8
EM-3	2	19,7	27	127,2	0,45	1,5	<10	3,8	22,9	1,99	2,13	236,2	0,19	7,7
HSC-1	135	<0,5	7	23,2	0,07	1,8	136	0,8	24,5	1,1	<0,05	11,7	<0,02	5,6
HSC-2	169	<0,5	10	17,2	0,19	7,8	302	0,7	4,2	0,9	<0,05	18,1	0,02	6,4
HSC-3	252	0,7	11	28,9	0,15	1,9	356	0,3	3,7	2,9	<0,05	63,3	<0,02	3,1
HSC-4	<1	3,8	10	13,3	0,49	0,4	<10	12,6	<0,05	1,3	0,07	698,3	<0,02	1,0
HSC-5	2	4,8	28	45,8	1,27	3,4	<10	6,5	0,6	2,1	0,15	1058,7	0,06	2,1
HSS-1	30	18,7	140	68,2	1,47	3,4	59	40	12,8	8	1,0	289,7	1,22	2,7
HSS-2	25	28,8	825	64,1	18,9	2,7	19	169	12,6	22,3	2,0	341,6	23,1	1,7
HSS-3	111	59,6	2565	74,3	72,1	2,2	244	511	24,3	64,1	3,6	429,7	91,2	2,8

Tablo 4.4. Suların Ekim-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları (mg/l).

Kodu	Na	K	Ca	Mg	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	F	Br	SiO <sub>2</sub>
HSW	336,2	21,62	24,36	3,16	54	555,1	84,8	104,4	0	0,071	0	8,24	0,172	154,74
HS-1	285,6	18,38	25,76	3,46	12	555,1	75,9	97,4	0	0,116	0	6,84	0,166	131,14
HS-21	289,5	18,15	23,42	2,96	0	585,6	77,3	101,2	0	0,069	0	7,02	0,172	135,74
HS-26	303,5	19,36	11,56	2,40	48	451,4	79,3	104,7	0	0,081	0	7,21	0,172	144,92
HS-27	295,6	18,62	24,26	3,42	24	549,0	79,6	105,8	0	0,079	0	7,31	0,166	134,28
HS-40	289,3	18,02	23,82	3,18	12	591,7	79,4	102,6	0	0	0	7,14	0,170	132,09
HS-44	287,5	18,51	20,44	2,62	30	512,4	76,2	95,7	0	0,076	0	6,95	0,162	136,87
HS-46	300,6	19,07	25,16	3,10	24	542,9	77,1	103,2	0	0	0	6,93	0,170	139,80
HS-51	295,8	18,60	21,02	3,24	0	579,5	76,2	101,4	0	0,085	0	6,87	0,172	137,00
HS-54	274,0	17,45	20,02	4,00	24	506,3	75,6	102,2	0	0,069	0	6,82	0,166	131,51
HS-55	285,3	18,51	21,12	2,32	24	561,2	59,5	87,3	0	0,045	0	7,08	0,172	131,02
HS-56	300,3	18,60	13,60	3,20	24	518,5	78,1	102,6	0	0,086	0	7,00	0,170	139,18
HS-57	291,3	18,17	32,22	3,32	0	573,4	80,1	137,4	0	0,083	0	6,84	0,176	137,95
HS-58	288,9	18,45	19,36	3,90	0	567,3	77,6	104,8	0	0,088	0	6,94	0,172	141,45
HS-61	300,1	18,22	22,26	3,34	12	555,1	80,7	102	0	0,074	0	6,81	0,178	137,61
HS-67	275,0	14,96	54,48	5,08	0	664,9	74,0	96,0	0	0,069	0	4,91	0,156	106,99
HS-68	259,7	11,79	35,60	1,68	0	567,3	62,1	78,8	0	0,022	0	4,92	0,148	121,94
HS-69	242,7	9,66	33,86	1,50	30	481,9	53,2	70,5	0	0,25	0	4,37	0,126	108,34
EM-1	3,84	0,74	59,01	20,75	0	256,2	3,34	15,31	0	0,50	0	0,26	0,053	13,32
EM-2	3,48	0,75	58,57	23,54	0	262,3	2,94	18,23	0	0,33	0	0,20	0,033	13,94
EM-3	4,03	0,80	63,71	21,28	0	274,5	3,19	15,62	0	0,31	0	0,25	0,020	14,79
EM-4	53,78	0,31	15,25	0,64	18	122	5,92	6,93	0	0,05	0	0,15	0,035	30,17
HSC-1	3,04	0,70	16,11	0,76	0	48,8	2,30	7,05	0	0,006	0	0,02	0,023	7,82
HSC-2	3,10	0,94	7,12	6,83	0	48,8	3,41	12,08	0	0,131	0	0,01	0,032	10,02
HSC-3	5,21	3,10	7,84	1,83	0	30,5	7,33	6,64	0	0,704	0	0,01	0,052	15,13
HSC-4	14,45	1,42	54,79	10,35	0	213,5	4,20	20,23	0	3,117	0	0,07	0,018	20,68
HSC-5	35,50	5,46	84,50	29,43	24	359,9	12,27	31,41	0	24,14	0	0,09	0,044	39,13
HSC-6	18,87	2,40	76,65	12,85	18	256,2	6,81	21,99	0	8,69	0	0,07	0,023	17,04
EMC	5,57	0,58	87	9,83	0	286,7	3,43	11,81	0	1,46	0	0,09	0,017	10,94
HSS-1	52,88	13,39	74,60	25,25	48	250,1	16,21	76,79	0	3,76	0	0,92	0,053	21,49
HSS-2	89,57	15,14	62,84	21,49	60	250,1	21,57	78,55	0	3,40	0	1,53	0,066	30,69
HSS-3	332,50	19,38	23,92	3,84	120	372,1	86,4	108,5	0	0,07	0	7,21	0,170	118,2

Emendere sahasında EM-1, EM-2 ve EM-3 termal kaynaklarında katyon sıralanımı Ca>Mg>Na>K ve anyon sıralanımı HCO<sub>3</sub>>SO<sub>4</sub>>Cl şeklindedir ve sular Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> tipindedir. EM-4 kaynağında ise anyon ve katyon dağılımı bu sulardan farklı olarak Na>Ca>Mg>K ve HCO<sub>3</sub>>CO<sub>3</sub>>Cl>SO<sub>4</sub> şeklindedir. Su tipi Na-Ca-HCO<sub>3</sub>'tür.

İnceleme alanı soğuk suları başlıca katyon Ca (HSC-2'de Mg) ve başlıca anyon HCO<sub>3</sub> olmak üzere değişik su tiplerine sahiptirler (Tablo 4.6 ve 4.7).

Suların Piper diyagramındaki konumları Şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Bu diyagramda Hisaralan termal suları ve Emendere sahasındaki EM-4 termal kaynağı Na-HCO<sub>3</sub>, EM-1, EM-2, EM-3 termal suları ile soğuk kaynak suları ise Ca-HCO<sub>3</sub> köşesinde kümelenmiştir. Buna göre, Hisaralan termal suları ile EM-4 termal kaynağı sular Na+K>Ca+Mg (tuzlu ve sodalı sular) ve HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>>Cl+SO<sub>4</sub> (zayıf asit kökleri>güçlü asit kökleri), ayrıca karbonat alkaliliği, karbonat olmayan alkaliniteden yüksek olan sulardır. İnceleme alanı soğuk suları ile EM-4 dışındaki Emendere termal kaynakları ise Ca+Mg>Na+K (karbonatlı ve sülfatlı sular) ve



$\text{HCO}_3+\text{CO}_3>\text{Cl}+\text{SO}_4$  (zayıf asit kökleri>güçlü asit kökleri), ayrıca karbonat sertliği, karbonat olmayan sertliğinden yüksek olan sulardır ( $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{MgCO}_3$ 'lu sular, karbonat sertliği %50'den fazla olan sular).

Yüzey sularından, Simav Çayı'nın inceleme alanına giriş noktasını temsil eden Simav Çayı-1 örneği kimyasal kompozisyon olarak soğuk kaynak sularına yakındır. Simav Çayı'nın inceleme alanından çıkış noktasını temsil eden Simav Çayı-2 örneğinde, yöredeki termal tesislerden boşalan atık suların etkisi (Na ve Cl artışı) Piper diyagramından görülebilmektedir. Simav Çayı'nın Çaygören Barajı'na döküldüğü son noktada ise kimyasal kompozisyon, termal su karışımı nedeniyle, termal suların kompozisyonuna oldukça yakındır. Ekim döneminde ise hemen hemen aynıdır.

Suların yarı logaritmik diyagramında Hisaralan termal sularının paralel ve birbiri üzerine binen doğrularla temsil edildiği görülmektedir (Şekil 4.3). Buradan, termal suların aynı

Tablo 4.5. Suların Ekim-2016 dönemi kimyasal analiz sonuçları ( $\mu\text{g/l}$ ). (EM ve EMC kodlu sular Ekim-2017'de toplanmıştır)

Kodu	Al	As	B	Ba	Cs	Cu	Fe	Li	Mn	Rb	Sb	Sr	W	Zn
HSW	30	153,8	6618	188,0	222,8	4,2	98	1353	68,5	174,9	9,1	574,3	235,1	11,4
HS-1	34	115,8	5886	167,8	190,2	7,4	<10	1153	121,1	147,2	7,0	512,6	217,3	8,0
HS-21	16	110,0	5730	144,7	182,4	9,8	<10	1158	73,1	144,1	6,8	536,4	215,2	5,0
HS-26	32	130,2	6122	133,0	193,9	8,0	24	1200	4,7	153,0	8,6	477,8	225,2	3,8
HS-27	12	105,8	5744	159,5	184,2	3,6	<10	1149	84,9	148,0	5,3	584,4	206,3	4,6
HS-40	16	103,8	5944	145,7	178,0	4,8	<10	1153	76,8	139,8	6,6	551,9	203,1	5,2
HS-44	58	106,6	5730	146,4	190,0	10,6	34	1142	44,4	147,4	7,5	509,7	223,6	13,4
HS-46	40	107,8	5918	170,5	186,3	2,6	<10	1213	80,2	151,8	9,5	565,2	218,0	5,8
HS-51	20	129,8	5754	143,7	192,0	4,0	<10	1183	10,6	152,1	7,7	548,5	210,1	3,0
HS-54	12	127,2	5712	133,3	180,1	5,4	<10	1084	36,6	137,5	8,0	490,9	219,4	4,2
HS-55	28	121,2	5852	158,4	185,7	33,0	50	1143	9,4	146,9	7,78	448,4	212,4	27,8
HS-56	42	130,8	5706	122,6	188,5	70,2	<10	1146	6,6	147,4	8,1	393,1	204,0	5,8
HS-57	26	131,0	5756	139,3	186,4	12,6	<10	1141	48,3	145,1	8,3	560,9	203,8	4,8
HS-58	24	135,2	5916	146,8	189,4	17,8	<10	1179	30,3	152,0	8,0	543,2	221,0	12,6
HS-61	20	121,6	5776	140,9	185,7	10,8	<10	1125	35,6	148,5	7,9	530,7	202,6	6,6
HS-67	6	37,0	5106	114,1	149,2	6,4	22	994	211,1	106,0	1,3	866,8	132,8	6,4
HS-68	18	58,4	4700	198,4	131,9	7,0	<10	939	98,2	84,0	2,3	815,6	122,1	6,6
HS-69	10	40,2	3914	192,3	98,9	7,6	<10	793	50,7	60,4	0,9	843,4	89,0	5,2
EM-1	5	15,3	24	110,1	0,4	1,4	<10	3,3	0,6	1,76	2,93	215,6	0,06	11,6
EM-2	3	17,8	22	112,3	0,42	1	<10	3,9	0,32	1,82	2,93	236,1	0,04	6,3
EM-3	5	20,3	26	132,4	0,53	3,3	<10	4,6	3,16	2,45	2,93	236,9	0,08	8,8
EM-4	10	21,5	348	14,2	0,5	2,8	15	22,5	3,42	1,52	<0,05	18,2	0,62	2,6
HSC-1	63	<0,5	<5	20,5	0,01	2,8	60	1,1	14,8	1,3	0,1	21,1	0,06	4,1
HSC-2	135	<0,5	<5	21,9	<0,01	0,8	107	0,8	1,3	1,0	<0,05	27,7	<0,02	46,4
HSC-3	132	0,5	5	36,3	0,02	0,4	76	0,5	0,8	4,7	<0,05	35,8	<0,02	1,7
HSC-4	38	3,9	9	14,8	0,58	1,9	<10	14,2	0,1	1,4	0,1	799,4	0,03	1,5
HSC-5	15	5,2	23	50,7	1,27	1,2	<10	7,2	0,37	2,18	0,17	1132,7	0,04	1,1
HSC-6	12	3,6	13	50,1	0,37	7,7	<10	14,7	1,13	0,97	0,1	695,5	0,18	8,3
EMC	3	3,5	33	66,7	0,34	1,6	<10	5,7	3,07	0,84	0,14	192,7	0,05	2
HSS-1	39	49,4	453	83,6	1,45	7,0	<10	153,4	12,5	21,0	1,1	384,2	4,21	5,2
HSS-2	41	53,7	930	84,2	19,7	12,3	16	248,2	10,7	32,5	1,6	408,4	23,9	15,1
HSS-3	90	124,4	5822	88,4	129,2	7,2	430	1220	14,8	125,3	7,6	736,1	202,8	13,6

rezervuardan geldiği (veya aynı jeokimyasal süreçten geçtiği) söylenebilir. Emendere termal kaynakları iki örnekleme döneminde de kendi içinde bir grup oluşturarak Hisaralan sularından ayrılır. Bu sular köken olarak ofiyolitik karmaşığı yansıtırlar. EM-4 termal kaynağının kimyasal kompozisyonu daha düşük derişimde olarak Hisaralan termal sularına benzerdir ve yarı logaritmik diyagramda Hisaralan sularına paralel bir konumdadır (Şekil 4.3b). Buradan, 25,2°C sıcaklık ve 266 µS/cm EC değerine sahip EM-4 kaynağının, coğrafi olarak Emendere sahasına dahil edilmesine karşın, Hisaralan jeotermal sisteminin düşük sıcaklıklı bir akışkanı olduğu öngörülmektedir.

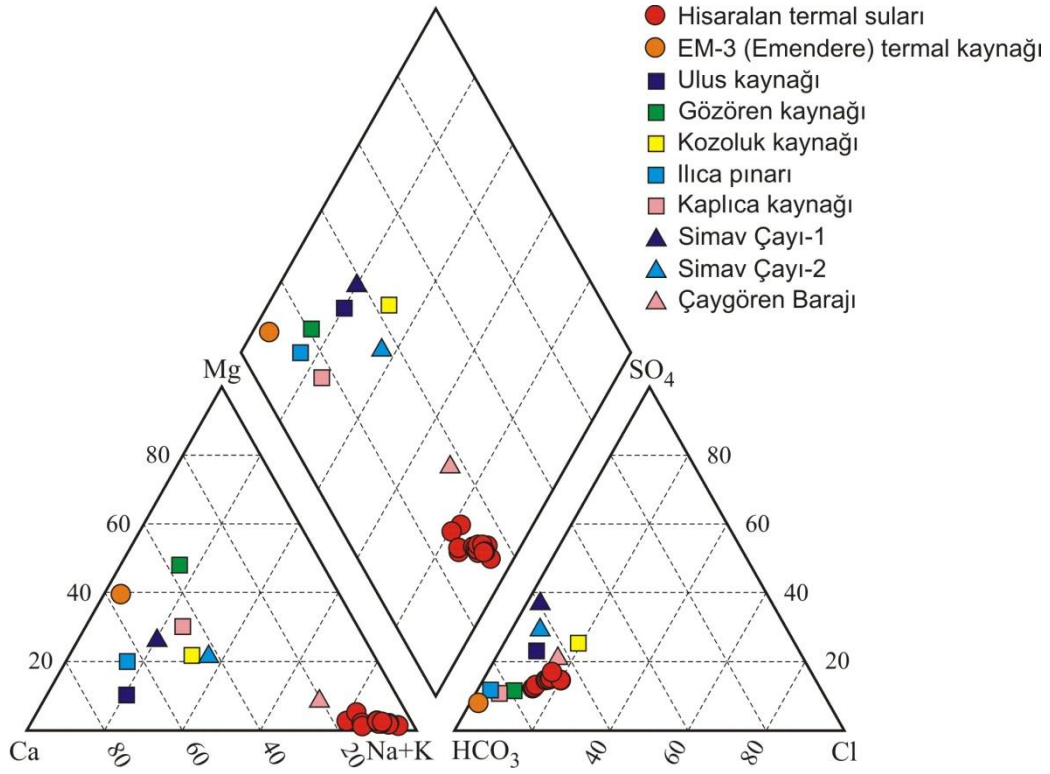
Soğuk kaynak sularında, sudaki iyon miktarının Ulus kaynağından Kaplıca kaynağına doğru arttığı gözlenmektedir (Şekil 4.4).

Tablo 4.6. İnceleme alanı sularında anyon-katyon sıralanımı ve su tipleri (Nisan-2016).

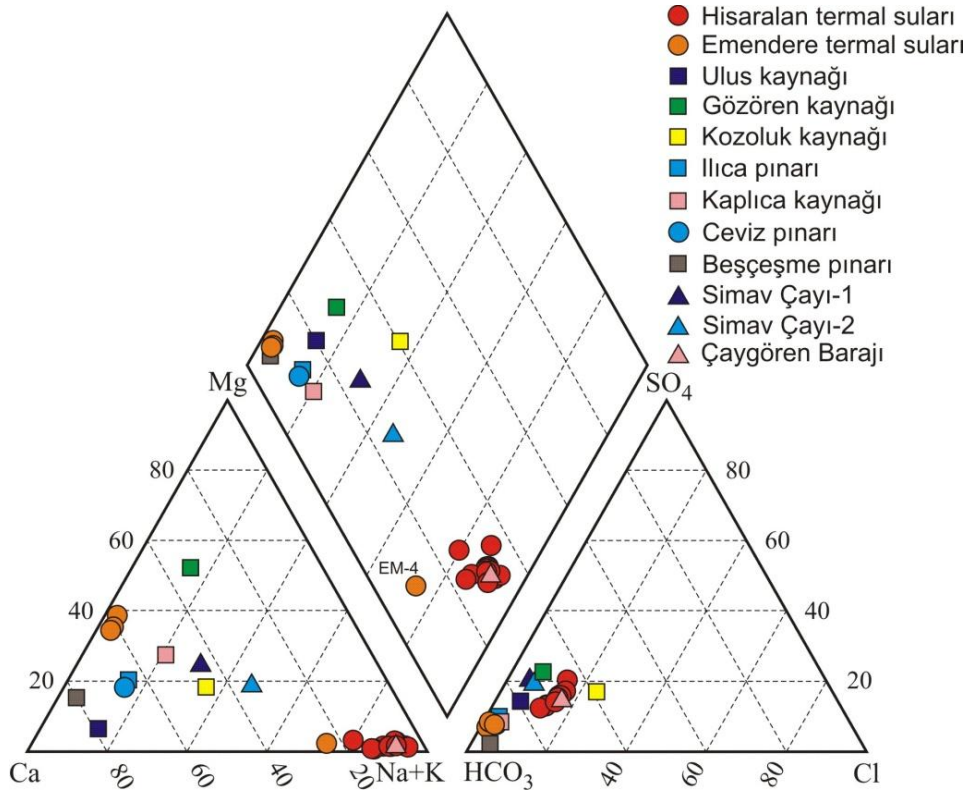
Kodu	Katyon dağılımı	Anyon dağılımı	Su Tipi
HSW	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-1	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-21	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-26	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-27	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-40	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-44	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-46	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-51	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-54	Na>Ca>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-57	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-58	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-60	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-61	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-67	Na>Ca>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-68	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-69	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
EM-1	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
HSC-1	Ca>Na>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
HSC-2	Mg>Na>Ca>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>
HSC-3	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Na-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
HSC-4	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub> >Cl	Ca-HCO <sub>3</sub>
HSC-5	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
HSS-1	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
HSS-2	Ca>Na>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Na-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
HSS-3	Na>Ca>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Na-Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>

Tablo 4.7. İnceleme alanı sularında anyon-kasyon sıralanımı ve su tipleri (Ekim-2016).

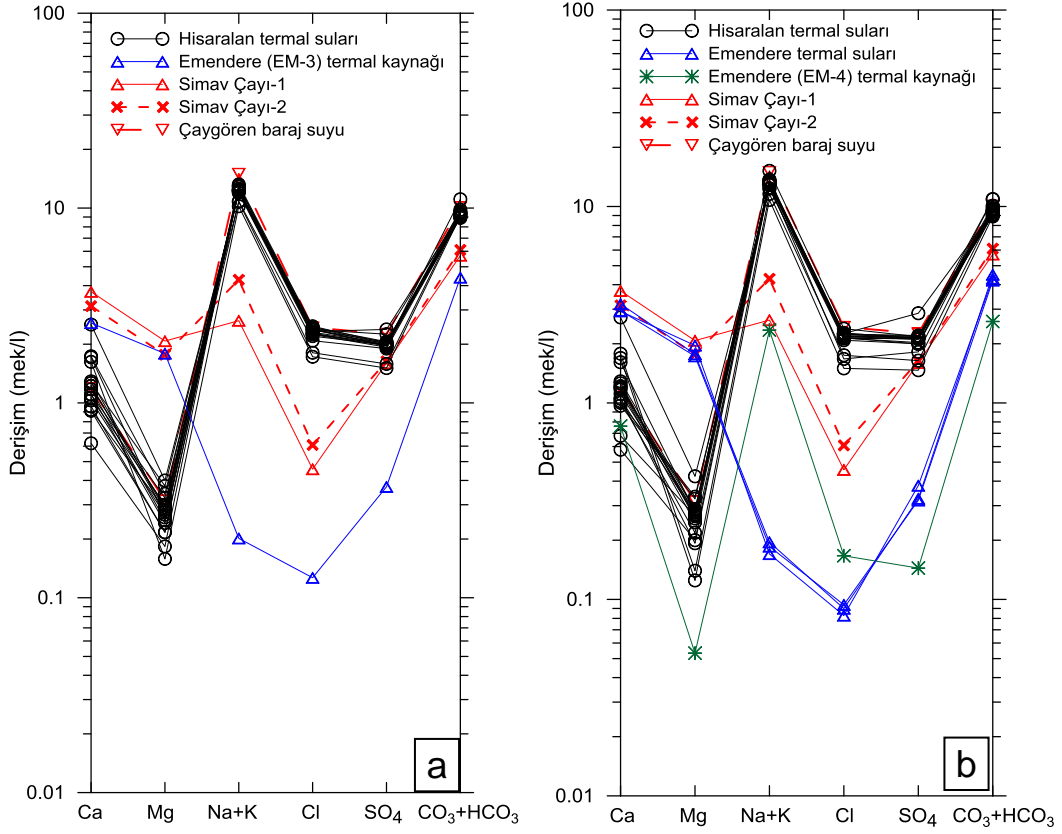
Kodu	Kasyon dağılımı	Anyon dağılımı	Su Tipi
HSW	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-1	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-21	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-26	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-27	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-40	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-44	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-46	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-51	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-54	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-56	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-57	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-58	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-61	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-67	Na>Ca>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-68	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
HS-69	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub> >CO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>
EM-1	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
EM-2	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
EM-3	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
EM-4	Na>Ca>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-Ca-HCO <sub>3</sub>
HSC-1	Ca>Na>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-HCO <sub>3</sub>
HSC-2	Mg>Ca>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
HSC-3	Ca>Na>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl
HSC-4	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
HSC-5	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Mg-Na-HCO <sub>3</sub>
HSC-6	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-HCO <sub>3</sub>
EMC	Ca>Mg>Na>K	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-HCO <sub>3</sub>
HSS-1	Ca>Na>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Ca-Na-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
HSS-2	Na>Ca>Mg>K	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl	Na-Ca-HCO <sub>3</sub>
HSS-3	Na>Ca>K>Mg	HCO <sub>3</sub> >CO <sub>3</sub> >Cl>SO <sub>4</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>



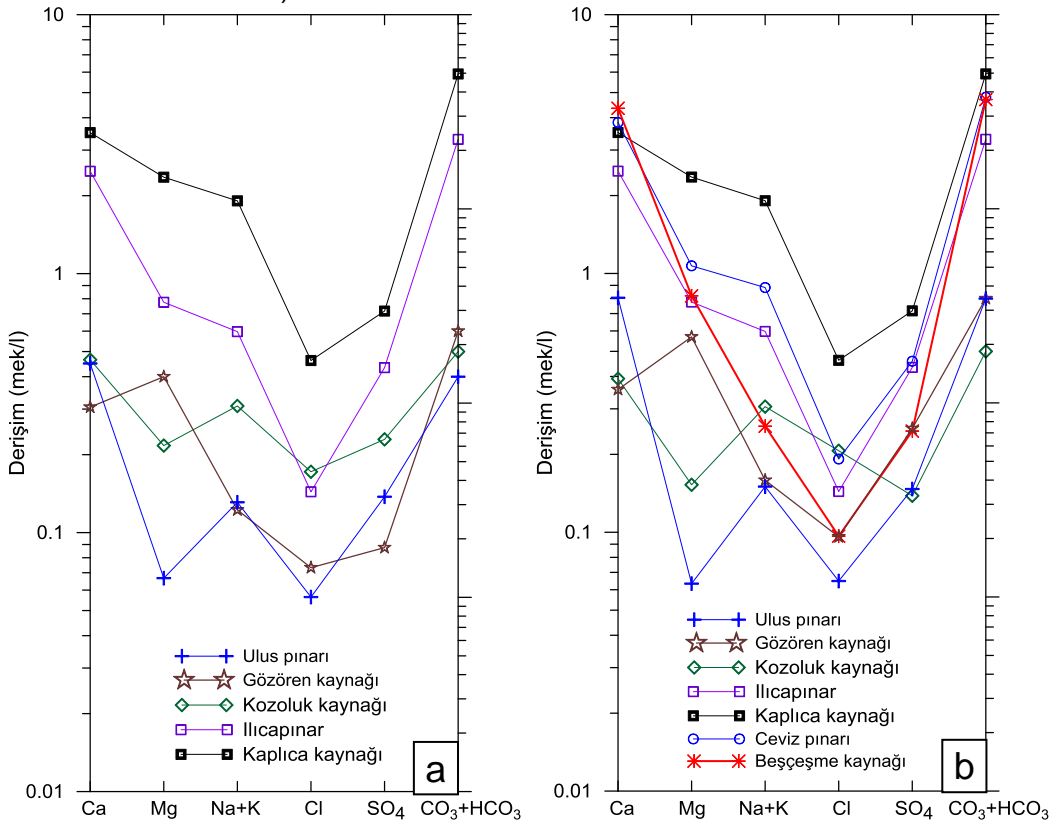
Şekil 4.1. Piper diyagramı (Nisan-2016).



Şekil 4.2. Piper diyagramı (Ekim-2016).



Şekil 4.3. Termal suların yarı logaritmik diyagramı, (a) Nisan-2016, (b) Ekim-2016 (Emendere suları Ekim-2017).



Şekil 4.4. Soğuk suların yarı logaritmik diyagramı, (a) Nisan-2016, (b) Ekim-2016 (Beşçeşme kaynağı Ekim-2017).

Şekil 4.5'de inceleme alanı suları için klorürün sıcaklık, EC, SiO<sub>2</sub> ve diğer iyon ve elementlerle olan ikili diyagramları görülmektedir. Bu diyagramlarda klorürün Ca ve Mg dışındaki tüm iyon ve elementlerle, ayrıca sıcaklık, EC ve SiO<sub>2</sub> ile pozitif bir doğrusal ilişki sunduğu görülmektedir (r = 0,888-979 arasında). Bu diyagramlarda HSC-1 nolu Ulus kaynağı ile HSW kuyusu termal suyu son üyelerdir. B-F, B-Li ve F-Li diyagramlarında da gözlenen pozitif ilişkide korelasyon katsayıları 1'e çok yakındır (Şekil 4.6).

#### 4.2. Suların Toplam Alfa ve Beta Aktivite Değerleri

Hisaralan sahasındaki 3 termal suyun toplam alfa ve beta aktivite değerleri ile İTASHY ve DMSHY'de yer alan sınır değerler Tablo 4.8'de verilmiştir. En yüksek toplam alfa ve beta aktivite değerleri HSW kuyu suyunda elde edilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre kimyasal kompozisyon ve radyoaktivite yönünden Hisaralan termal suları soluma ve içme dışında her türlü yardımcı tedavi amacıyla kullanılabilirler.

Tablo 4.8. Hisaralan termal sularının toplam alfa/toplam beta analiz sonuçları ve sınır değerler.

Parametre	İTASHY*	DMSHY**	HSW	HS-58	HS-68
Toplam α aktivitesi (Bq/L)	0,1	1,0	0,122±0,019	0,056±0,011	0,101±0,014
Toplam β aktivitesi (Bq/L)	1,5	2,0	0,66±0,11	0,34±0,04	0,22±0,03

\* İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (17.02.2005 tarih ve 25730 sayılı, 31.07.2009 tarih ve 27305 sayılı değişiklik).

\*\* Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik (01.12.2004 tarih 25657 sayılı, 31.07.2009 tarih ve 27305 sayılı değişiklik).

#### 4.3. Suların İzotop Kompozisyonu

İnceleme alanı sularının δ<sup>2</sup>H (döteryum), δ<sup>18</sup>O, <sup>3</sup>H (trityum), δ<sup>13</sup>C (DIC), <sup>14</sup>C, δ<sup>18</sup>O-δ<sup>34</sup>S (çözünmüş sülfattan) izotop değerleri Tablo 4.9'da verilmiştir.

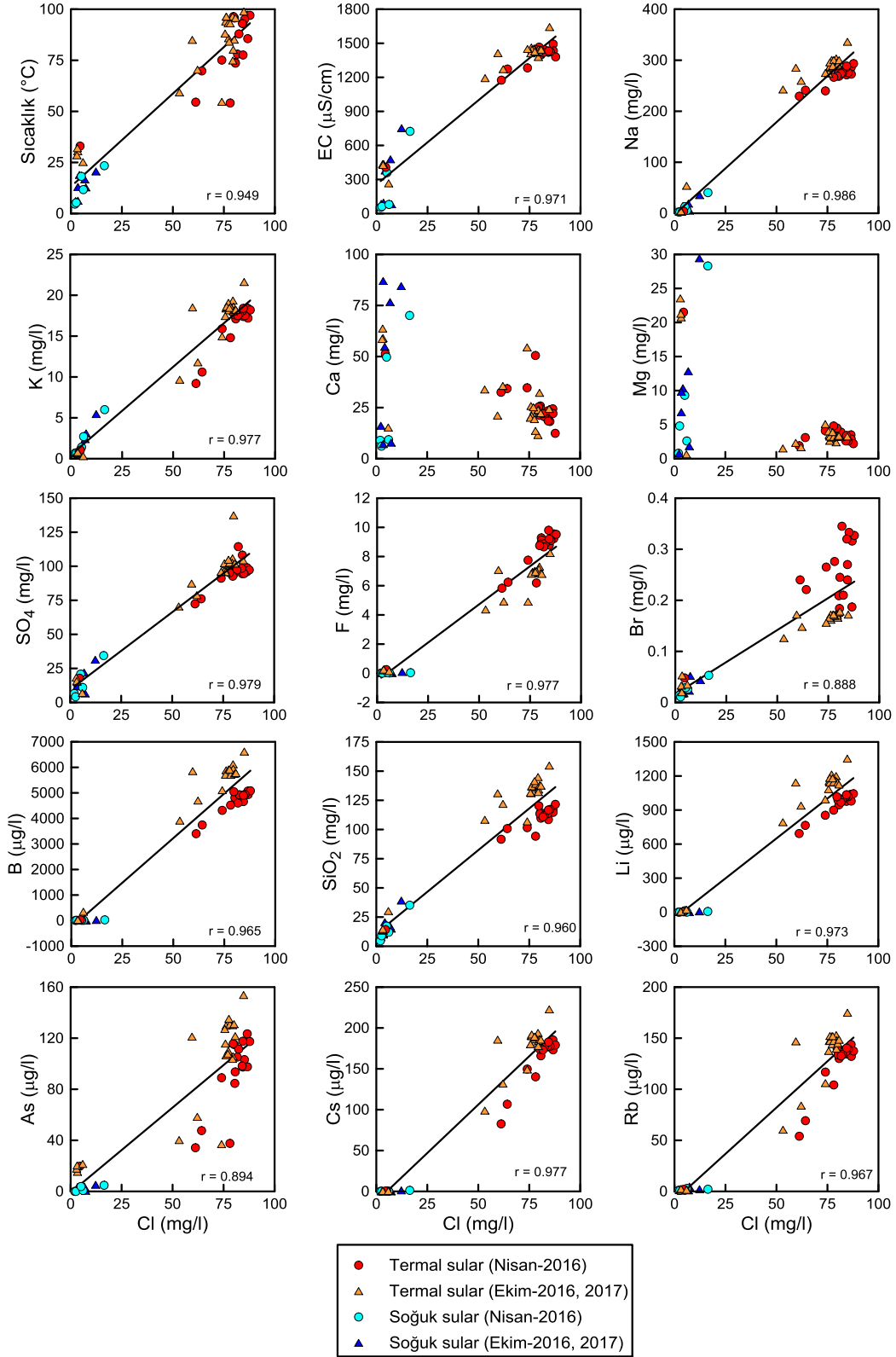
<sup>18</sup>O ve <sup>2</sup>H, suyun en önemli doğal izotoplarıdır. Suların <sup>18</sup>O ve <sup>2</sup>H analizleri, suların kökenlerini belirlemede yardımcı olur. <sup>2</sup>H, jeotermal rezervuarın beslenme alanının lokasyonunu belirlemede ve bölgesel yeraltısu akım yollarının araştırılmasında doğal izleyici olarak kullanılır. Jeotermal sulardaki <sup>18</sup>O sapması ise derinlerdeki su-kaya etkileşimi (nitel rezervuar sıcaklığı, jeotermal sistemdeki hidrotermal alterasyon derecesi, rezervuarın gözenekliliği ve hidrolik iletkenlik katsayısı, termal akışkanın sirkülasyon süresi ve dolayısıyla rezervuar-termal akışkan dokanak yüzeyi ve süresi) hakkında yaklaşımlarda bulunulmasını sağlar. Yağış sularından yapılacak analizler, sisteme giren izotop değerleri hakkında bilgi verir.

Dünya meteorik su doğrusu Craig (1961) tarafından  $\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} \cdot 8 + 10$  olarak verilmiştir. Marmara meteorik su doğrusunun denklemi ise  $\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} \cdot 8 + 15$  (Eisenlohr, 1997) şeklindedir. Bunun dışında yerel meteorik su doğrusu denklemleri Yalçın (1997) tarafından  $\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} \cdot 7,3 + 16$  ve Mutlu (2007) tarafından  $\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} \cdot 7,28 + 16,9$  olarak önerilmiştir. İnceleme alanı soğuk sularının  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri ‰-8,30 ile -9,50 ve  $\delta^2\text{H}$  değerleri ‰-52,80 ile -58,18 arasındadır (Tablo 4.8). Soğuk suların  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  diyagramındaki konumu Marmara meteorik su doğrusu (MMWL) ( $\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} \cdot 8 + 15$ ; Eisenlohr, 1997) ile uyumludur (Şekil 4.7 ve 4.8). Hisaralan termal sularının  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri ‰-8,78 ile -9,32 (Ekim dönemi için ‰-8,9 ile -9,2) ve  $\delta^2\text{H}$  değerleri ‰-62,00 ile -65,02 (Ekim dönemi için ‰-62,0 ile -63,3) arasında değişmektedir (Tablo 4.9). Şekil 4.7 ve 4.8'deki grafiklerden, bu duraylı izotop değerlerinde önemli bir mevsimsel değişim olmadığı ve termal suların meteorik kökenli olduğu anlaşılmaktadır  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  diyagramında, termal suların  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri yerel meteorik su çizgisinden (MMWL;  $\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} \cdot 8 + 15$ ) ‰0,5 ile 1 arasında bir zenginleşme göstermektedir. Bu zenginleşme, derinlerde yüksek sıcaklıkta (rezervuar sıcaklığı) gerçekleşen su-kaya etkileşiminin bir sonucudur.

Termal suların **trityum** değerleri -0,34 ile 2,47 TU arasında olup (eksi değerler sıfır olarak kabul edilir) iki termal kaynak dışında 1 TU'nun altındadır. Emendere termal sularının trityum değerleri de 1,32 ve 1,33 TU'dur. Bu değerler termal suların yeraltında sirkülasyon zamanının 50 yıldan daha fazla olduğunu göstermektedir. Her iki sahadaki soğuk suların trityum değerleri 2,64 ile 4,62 TU arasındadır. Değişik dönemlerde alınan kar ve yağmur sularında 3,72 ile 8,21 TU arasında trityum değerleri elde edilmiştir. Bu, soğuk sularda daha genç yağış sularının katkısı olduğunun bir göstergesidir.

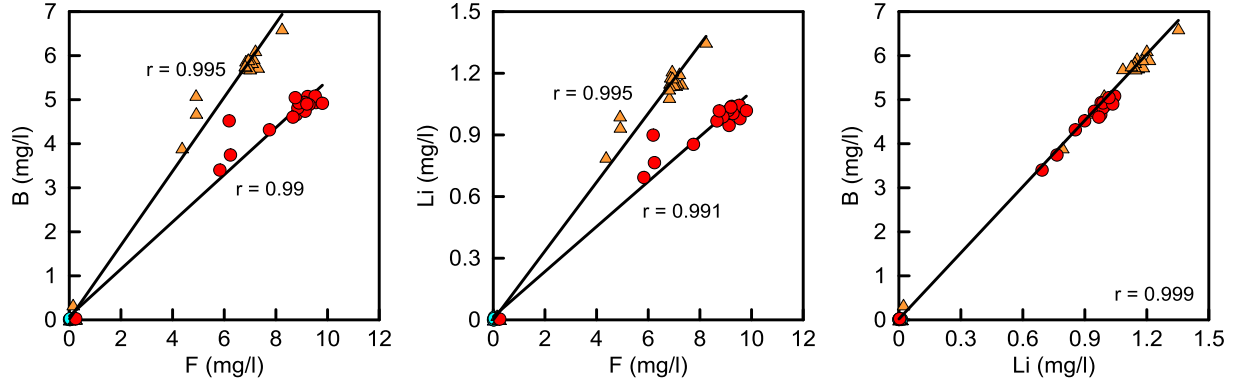
Termal suların  $\delta^{34}\text{S}$  (çözünmüş sülfattan) değerleri ‰13,17 (HS-57) ile 15,97 (HSW) arasında değişmektedir. Bu değerler, sulardaki kükürdün kaynağının kireçtaşı, şeyl ve/veya volkanik sülfür olabileceğini göstermektedir (Şekil 4.9).

Termal suların  $\delta^{13}\text{C}$  (DIC-Suda çözünmüş inorganik karbon) değerleri ‰-2,77 ile -4,33 arasındadır. Bu değerler için, sulardaki karbonun kaynağının manto  $\text{CO}_2$ 'i, denizel kireçtaşı veya yeraltısuyu DIC'ı olabileceği veya sudaki  $\delta^{13}\text{C}$  değerinin bunların bir kombinasyonunu yansıttığı söylenebilir. Soğuk sulardaki ‰-13 mertebesinde olan  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri toprak  $\text{CO}_2$ 'ini ve yeraltısuyu DIC'ını yansıtır (Şekil 4.10).



Şekil 4.5. İnceleme alanı suları için klorürün sıcaklık, EC, SiO<sub>2</sub> ve diğer iyon ve elementlerle ikili diyagramları.

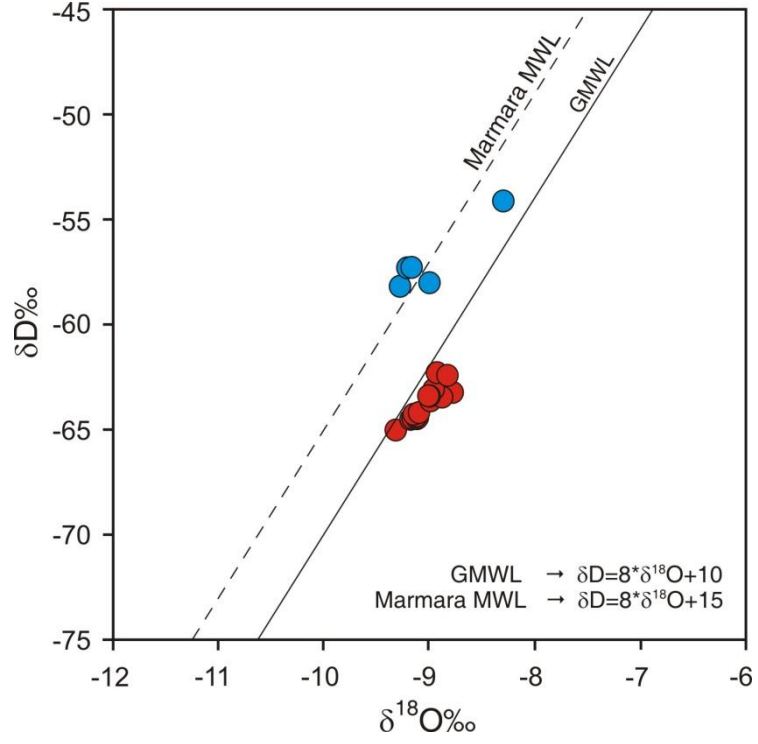




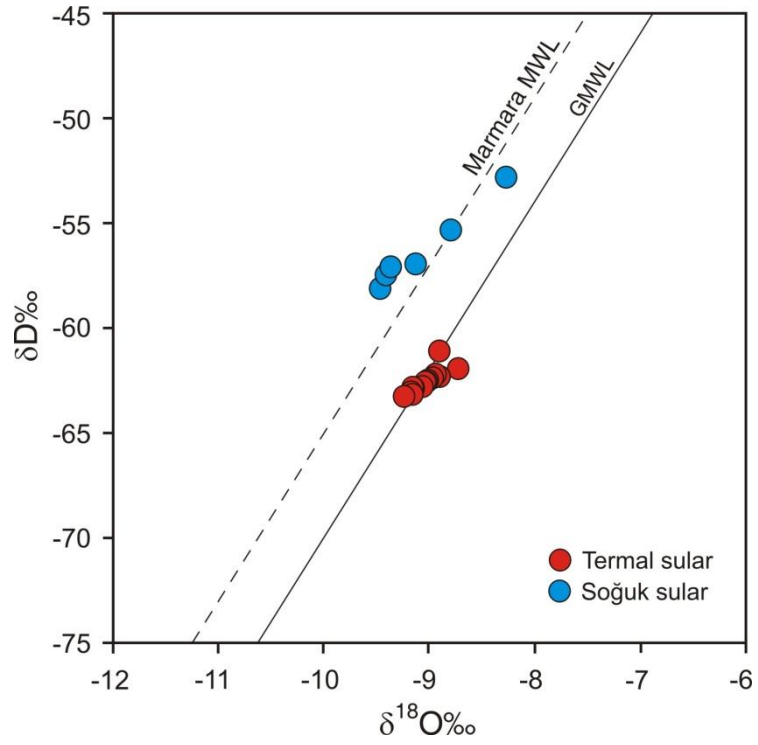
Şekil 4.6. İnceleme alanı suları için B-F, B-Li ve F-Li diyagramları.

Tablo 4.9. Suların duraylı ve radyoizotop içerikleri.

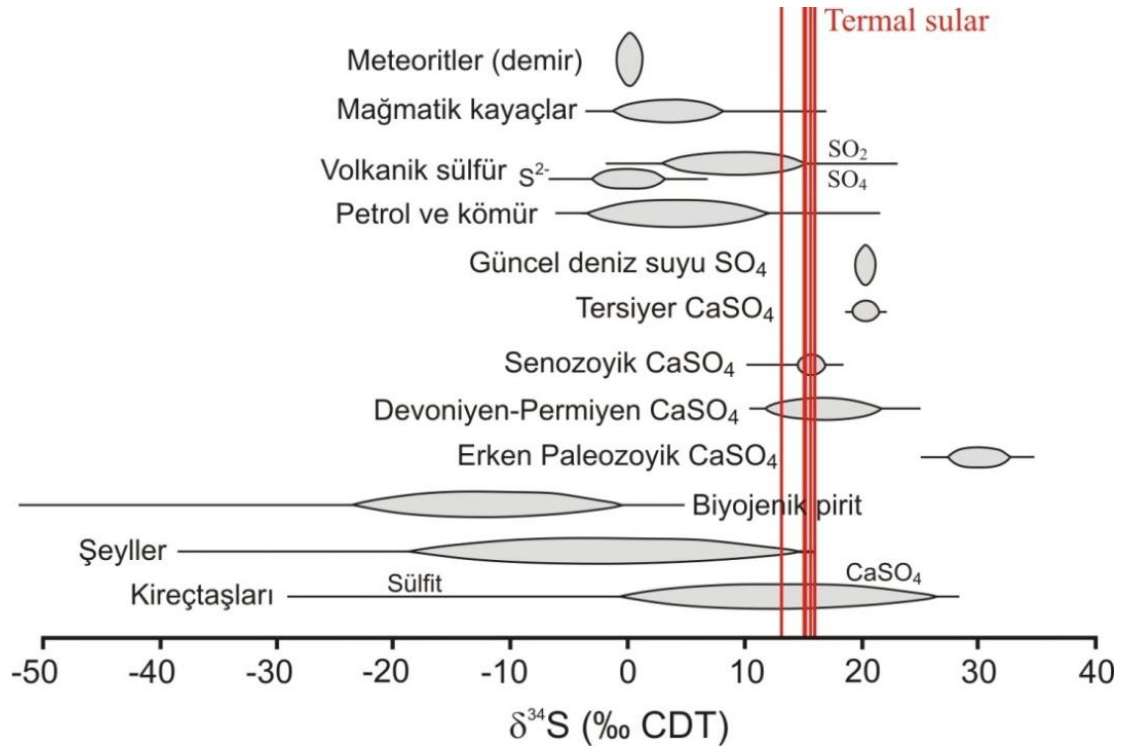
Kod	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$\delta D$	$\delta^{18}O$	Tritium				$^{13}C$ (DIC)	$^{18}O$ (SO <sub>4</sub> )	$^{34}S$ (SO <sub>4</sub> )	$^{14}C$
	(VSMOW)				(TU)				(VPDB)	(VSMOW)	(VCDT)	(pmC)
	Nisan 2016		Ekim 2016		Nis. 2016	Ekim 2016	Nisan 2017	Kasım 2017	Ekim 2016	Ekim 2016	Ekim 2016	Ekim 2016
HSW	-63,63	-8,99	-62,2	-8,9	-0,25	0,54	-	-	-4,33	0,05	15,97	5,40
HS-1	-65,02	-9,32	-63,3	-9,2	0,72	0,01	-	-	-2,77	-	-	-
HS-21	-64,35	-9,12	-62,6	-9,0	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-26	-63,23	-8,78	-62,0	-8,7	-0,34	0,12	-	-	-3,71	-0,03	15,77	-
HS-27	-64,19	-9,10	-62,6	-9,0	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-40	-63,41	-9,00	-62,0	-8,9	0,48	0,45	-	-	-	-	-	-
HS-44	-64,42	-9,11	-	-	-0,05	0,41	-	-	-	-0,15	15,09	-
HS-46	-64,48	-9,12	-62,8	-9,1	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-51	-64,47	-9,16	-62,9	-9,2	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-54	-62,29	-8,93	-62,9	-9,2	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-56	-	-	-62,3	-8,9	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-57	-64,51	-9,18	-63,1	-9,2	0,16	0,85	-	-	-3,04	-1,58	13,17	-
HS-58	-63,39	-9,00	-62,4	-9,0	-0,11	1,80	-	-	-3,64	-1,17	15,12	-
HS-60	-63,46	-8,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-61	-64,27	-9,15	-63,1	-9,2	0,70	-	-	-	-3,13	-1,15	15,09	-
HS-67	-63,08	-8,96	-61,7	-9,0	0,08	0,91	-	-	-	1,33	15,21	-
HS-68	-63,39	-9,01	-62,2	-9,1	0,09	2,47	-	-	-3,10	-0,05	15,15	3,30
HS-69	-62,42	-8,83	-61,1	-8,9	-	-	-	-	-	-	-	-
EM-1	-	-	-	-	-	-	-	1,32	-	-	-	-
EM-3	-	-	-	-	-	-	-	1,33	-	-	-	-
EM-4	-	-	-	-	-	-	-	-0,03	-	-	-	-
HSC-1	-58,18	-9,28	-57,5	-9,4	2,77	4,03	-	-	-	-	-	-
HSC-2	-57,30	-9,21	-58,1	-9,5	-	-	-	-	-	-	-	-
HSC-3	-57,28	-9,17	-57,1	-9,4	2,81	3,64	-	-	-	-	-	-
HSC-4	-58,01	-9,00	-57,0	-9,1	2,64	4,62	-	-	-12,51	-	-	-
HSC-5	-54,12	-8,30	-52,8	-8,3	2,82	3,38	-	-	-13,84	-	-	-
HSC-6	-	-	-55,3	-8,8	-	2,82	-	-	-	-	-	-
EMC	-	-	-	-	-	-	-	3,44	-	-	-	-
Yağmur	-	-	-	-	4,74	8,21	6,11	3,72	-	-	-	-
Kar	-	-	-	-	-	-	-	7,34	-	-	-	-



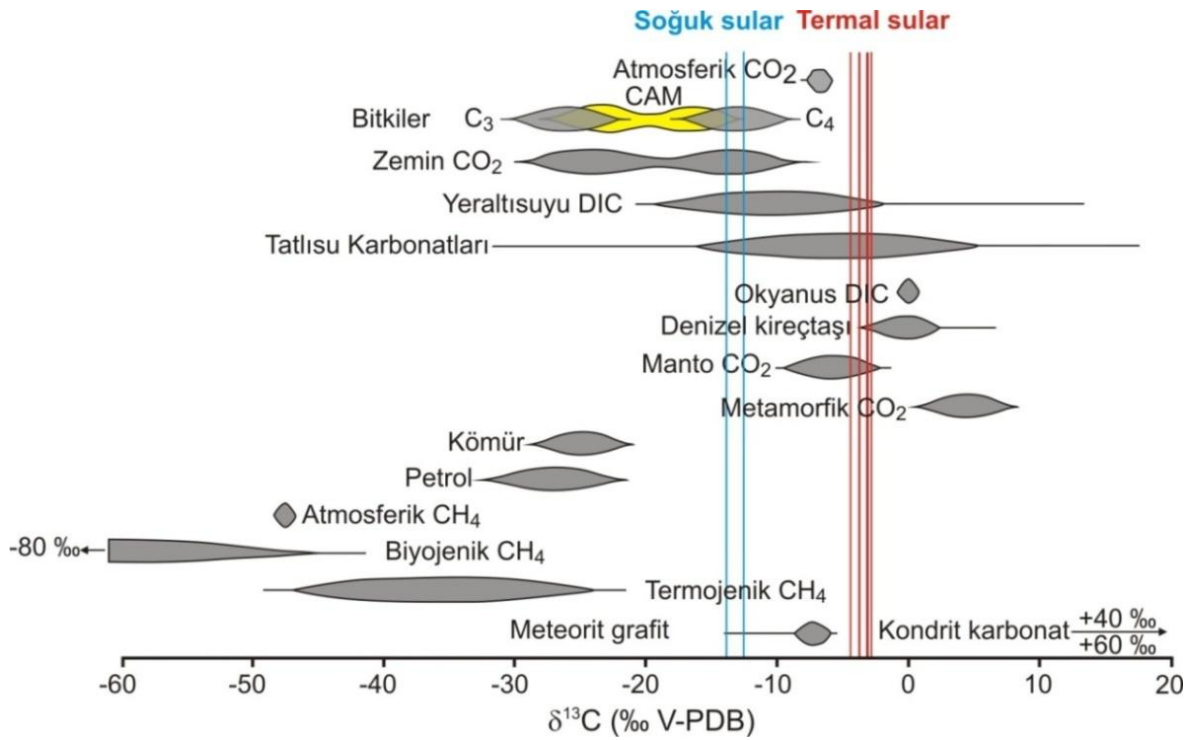
Şekil 4.7. İnceleme alanı sularının  $^{18}O$ -D diyagramı (Nisan-2016).



Şekil 4.8. İnceleme alanı sularının  $^{18}O$ -D diyagramı (Ekim-2016).



Şekil 4.9. Çeşitli doğal ortamlar için  $\delta^{34}\text{S}$  değerleri (Clark ve Fritz, 1997) ve termal suların dağılımı.



Şekil 4.10. Çeşitli doğal ortamlar için  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri (Clark ve Fritz, 1997) ve termal suların dağılımı.

#### 4.4. Suların Mineral Doymunlukları

Suların mineral doymunluklarının bilinmesi, suların sondaj yoluyla çıkarılması ve iletimi veya kaynak sularının işletme ve iletimi sırasında ortaya çıkabilecek kabuklaşma sorunları hakkında bilgi vermesi nedeniyle önemlidir. Sondaj ve iletim borularında meydana gelecek kabuklaşma probleminin giderilmesi işletme giderlerine ek bir maliyet getirir. Bu nedenle, sularda kabuk oluşturabilecek minerallerin denge durumlarının incelenmesi önem taşımaktadır. Türkiye jeotermal sularında en yaygın görülen kabuk türü kalsit ve aragonittir.

Bu bölümde Hisaralan ve Emendere termal suları ile inceleme alanı soğuk sularında kalsit, aragonit, dolomit, kalsedon ve kuvars hidrotermal minerallerinin doymunlukları, örnekleme sıcaklığında, PhreeqCi bilgisayar programı (Parkhurst ve Appelo, 1999) kullanılarak hesaplanmış ve değerler Tablo 4.10'da verilmiştir. Bu tablodaki negatif değerler doymunluk altı değerinde olup minerali çözücü özellikte, pozitif değerler ise doymunluk üstü yani o minerali çökeltmeye eğilimli olarak değerlendirilmektedir. Buna göre Hisaralan termal kaynaklarının hemen hemen tümü kalsit, aragonit ve kuvars minerallerine göre doymundur ve bu minerallerin, suyun çıkarılması, akımı veya iletimi sırasında çökmesi beklenir. Hisaralan sahasında suların, kaynak çıkışlarında dahi bu minerallerce doymun olması, kaynak ağzından itibaren karbonat ve silis (kuvars) çökeline neden olmaktadır. Başlıca kabuk türü kalsit ve aragonittir. İnceleme alanı termal sularının hemen hemen tamamı kalsedon çözübilir özelliktedir. Dolomit, Nisan döneminde 4, Ekim döneminde 2 termal kaynakta doymunluk altı değerlerdedir. Araziden alınan traverten örneklerinin XRD analizinde kalsit, aragonit ve kuvarsa rastlanması, yapılan doymunluk hesaplamaları ile örtüşmektedir. Emendere termal suları genellikle kalsit, aragonit ve dolomitçe doymunken kalsedon ve kuvars mineralleri doymunluk altı değerler vermiştir.

İnceleme alanında kabuklaşmanın en güzel örneği HSW jeotermal kuyusundan konut ısıtması için Sındırgı ilçe merkezine giden termal su iletim borularında görülebilir (Şekil 4.11). Mevcut durumda kuyuda inhibitör uygulaması yapıldığı için kabuklaşma problemi minimuma indirilmiştir.

Soğuk sulardan Kaplıca kaynağı (HSC-5) her iki örnekleme döneminde de aragonit, kalsit, kalsedon, dolomit ve kuvarşa doymundur. Diğer suların bu minerallere göre doymunluk durumları dönemsel olarak değişmektedir (Tablo 4.11).

Hisaralan termal sularının, PhreeqC yazılımı kullanımıyla, 25-250°C sıcaklık aralığında, 25°C'lik adımlarla aragonit, kalsit, dolomit, kalsedon ve kuvars minerallerine göre doymunluk durumları incelenmiştir. Buna göre, genel olarak HSW sondaj suyu, her sıcaklık için aragonit

ve kalsitçe doymun, 75°C'den daha düşük sıcaklıklarda kalsedonca doymun, 200-225°C'nin altındaki sıcaklıklarda dolomitçe doymun ve 100°C'den daha düşük sıcaklıklarda kuvarşça doymundur. Diğer tüm sıcaklıklarda bu minerallerin tümü için doymunluk altı değerlere sahiptir (Tablo 4.12 ve 4.13).

Tablo 4.10. Termal suların bazı minerallere göre doymunluk durumları (Kalsed: kalsedon).

Kodu	Nisan-2016					Ekim-2016				
	Aragonit	Kalsit	Dolomit	Kalsed.	Kuvars	Aragonit	Kalsit	Dolomit	Kalsed.	Kuvars
HSW	0,90	1,00	1,32	-0,18	0,07	0,92	1,02	1,30	-0,07	0,07
HS-1	0,34	0,44	0,18	-0,17	0,09	0,58	0,68	0,68	-0,10	0,09
HS-21	0,36	0,47	0,35	-0,09	0,18	0,50	0,61	0,62	-0,02	0,25
HS-26	1,12	1,22	1,97	-0,24	0,01	0,88	0,98	1,51	-0,11	0,14
HS-27	0,20	0,32	0,16	0,01	0,31	0,34	0,45	0,40	0,03	0,31
HS-40	0,21	0,32	0,18	-0,01	0,29	0,55	0,66	0,85	0,06	0,36
HS-44	0,82	0,92	1,20	-0,17	0,09	0,61	0,71	0,69	-0,10	0,15
HS-46	0,42	0,52	0,36	-0,15	0,11	0,50	0,60	0,49	-0,06	0,20
HS-51	0,41	0,51	0,42	-0,17	0,08	0,51	0,61	0,56	-0,10	0,15
HS-54	0,13	0,24	0,25	-0,05	0,25	0,23	0,34	0,23	-0,05	0,22
HS-55	-	-	-	-	-	0,46	0,57	0,50	-0,03	0,25
HS-56	-	-	-	-	-	0,82	0,92	1,46	-0,09	0,17
HS-57	0,11	0,22	-0,13	-0,11	0,15	0,62	0,73	0,76	-0,00	0,27
HS-58	0,20	0,31	0,23	-0,04	0,25	-0,53	-0,42	-1,24	0,02	0,30
HS-60	0,16	0,28	0,19	-0,01	0,28	KURU				
HS-61	0,51	0,62	0,63	-0,15	0,10	0,64	0,74	0,83	-0,09	0,16
HS-67	0,07	0,19	-0,14	0,11	0,46	0,05	0,17	-0,19	0,16	0,50
HS-68	0,18	0,29	-0,01	-0,01	0,30	0,34	0,46	0,03	0,07	0,37
HS-69	-0,11	0,01	-0,71	0,09	0,44	0,59	0,71	0,58	0,11	0,45
EM-1	-	-	-	-	-	-0,26	-0,12	-0,29	-0,50	-0,08
EM-2	-	-	-	-	-	0,76	0,90	1,81	-0,46	-0,05
EM-3	-0,05	0,09	0,22	-0,47	-0,06	0,46	0,59	1,14	-0,47	-0,06
EM-4	-	-	-	-	-	0,65	0,79	0,57	-0,13	0,30



Şekil 4.11. Jeotermal su iletim borusunda gözlenen kabuklaşma

Tablo 4.11. Soğuk suların bazı minerallere göre doygunluk durumları (Kalsed: kalsedon).

Kodu	Nisan-2016					Ekim-2016				
	Arag.	Kalsit	Kalsed.	Dolomit	Kuvars	Arag.	Kalsit	Kalsed.	Dolomit	Kuvars
HSC1	1.98	1.82	-0.63	-4.69	-0.14	-1.41	-1.25	-0.43	-3.78	0.06
HSC2	-1.39	-1.23	-0.36	-2.53	-0.13	-2.73	-2.58	-0.33	-5.12	0.17
HSC3	-0.52	-0.37	-0.34	-1.14	0.13	-1.47	-1.31	-0.23	-3.09	0.24
HSC4	-0.07	0.07	-0.24	-0.32	0.21	0.34	0.49	-0.17	0.52	0.27
HSC5	0.17	0.32	0.01	0.58	0.44	0.14	0.29	0.09	0.42	0.53
HSC6	-	-	-	-	-	-0.22	-0.07	-0.23	-0.68	0.23
EMC	-	-	-	-	-	0.24	0.40	-0.38	0.02	0.09

Hisaralan termal kaynakları 50-75°C'den daha yüksek sıcaklıklar için aragonit ve kalsitçe doygun, bu sıcaklık aralığından daha düşük sıcaklıklarda kalsedonca doygun, 75-200°C aralığında dolomitçe doygun ve HSW kuyusunda olduğu gibi 100°C'den daha düşük sıcaklıklarda kuvarsça doygundur. Termal sular, diğer tüm sıcaklıklarda bu minerallerin tümü için doygunluk altı değerlere sahiptir.

Emendere suları genellikle her sıcaklıkta aragonit ve kalsitçe, 175-200°C'den düşük sıcaklıklarda ise dolomitçe doygundur. Bu sular genellikle kuvars ve kalsedonca her sıcaklıkta doygunluk altı değerlere sahiptir.

Tablo 4.12. Termal suların 25-250°C arasındaki sıcaklıklarda bazı minerallere göre doygunluk durumları (Nisan 2016).

Kodu	Sıcaklık (°C)	Aragonit	Kalsit	Kalsedon	Dolomit	Kuvars
HSW	25	0.29	0.43	0.51	0.36	0.94
	50	0.47	0.60	0.24	0.86	0.59
	75	0.69	0.80	0.00	1.17	0.30
	100	0.93	1.03	-0.20	1.33	0.04
	125	1.21	1.30	-0.38	1.37	-0.18
	150	1.53	1.61	-0.54	1.29	-0.39
	175	1.83	1.90	-0.69	1.00	-0.57
	200	1.92	1.99	-0.82	0.31	-0.74
	225	1.74	1.80	-0.95	-0.84	-0.89
250	1.35	1.40	-1.07	-2.35	-1.04	
HS-1	25	-0.51	-0.36	0.48	-1.28	0.91
	50	-0.25	-0.12	0.21	-0.65	0.57
	75	0.07	0.19	-0.02	-0.12	0.27
	100	0.44	0.54	-0.22	0.27	0.02
	125	0.83	0.92	-0.40	0.53	-0.20
	150	1.23	1.31	-0.56	0.64	-0.40
	175	1.57	1.64	-0.70	0.51	-0.59
	200	1.71	1.77	-0.84	-0.05	-0.75
	225	1.57	1.63	-0.96	-1.10	-0.91
250	1.21	1.26	-1.08	-2.55	-1.05	
HS-21	25	-0.34	-0.20	0.50	-0.93	0.93
	50	-0.09	0.04	0.23	-0.31	0.59
	75	0.22	0.33	0.00	0.18	0.30
	100	0.56	0.66	-0.20	0.54	0.04
	125	0.93	1.02	-0.38	0.74	-0.18
	150	1.30	1.38	-0.54	0.79	-0.39
	175	1.63	1.70	-0.69	0.60	-0.57
	200	1.76	1.82	-0.82	-0.01	-0.74
	225	1.60	1.66	-0.95	-1.10	-0.89
250	1.23	1.28	-1.07	-2.58	-1.04	
HS-26	25	1.05	1.19	0.43	2.02	0.86
	50	1.06	1.18	0.16	2.20	0.51
	75	1.07	1.18	-0.07	2.14	0.22
	100	1.13	1.23	-0.26	1.94	-0.02
	125	1.29	1.38	-0.43	1.67	-0.23
	150	1.54	1.62	-0.58	1.34	-0.42
	175	1.79	1.86	-0.72	0.86	-0.60
	200	1.86	1.92	-0.85	0.05	-0.76
	225	1.64	1.69	-0.97	-1.20	-0.91
250	1.20	1.25	-1.08	-2.77	-1.05	
HS-27	25	-0.35	-0.21	0.50	-0.96	0.93
	50	-0.10	0.03	0.23	-0.33	0.59
	75	0.22	0.33	0.00	0.18	0.30
	100	0.57	0.67	-0.20	0.55	0.04
	125	0.95	1.04	-0.38	0.78	-0.18
	150	1.33	1.41	-0.54	0.86	-0.38
	175	1.66	1.73	-0.68	0.69	-0.57
	200	1.79	1.86	-0.82	0.10	-0.73
	225	1.64	1.70	-0.94	-0.97	-0.89
250	1.28	1.33	-1.06	-2.44	-1.03	
HS-40	25	-0.34	-0.19	0.48	-0.92	0.91
	50	-0.08	0.04	0.21	-0.29	0.57
	75	0.23	0.34	-0.02	0.21	0.28
	100	0.58	0.68	-0.22	0.57	0.02
	125	0.95	1.04	-0.40	0.79	-0.20
	150	1.33	1.41	-0.56	0.85	-0.40
	175	1.66	1.73	-0.70	0.67	-0.59
	200	1.79	1.85	-0.84	0.08	-0.75
	225	1.64	1.69	-0.96	-1.01	-0.91
250	1.26	1.32	-1.08	-2.49	-1.05	

Tablo 4.12. Devam.

Kodu	Sıcaklık (°C)	Aragonit	Kalsit	Kalsedon	Dolomit	Kuvars
HS-44	25	0.37	0.51	0.50	0.52	0.93
	50	0.50	0.63	0.23	0.92	0.59
	75	0.67	0.78	-0.00	1.14	0.29
	100	0.87	0.97	-0.20	1.21	0.04
	125	1.12	1.21	-0.38	1.19	-0.19
	150	1.43	1.51	-0.55	1.07	-0.39
	175	1.72	1.79	-0.69	0.75	-0.57
	200	1.82	1.88	-0.83	0.05	-0.74
	225	1.63	1.69	-0.95	-1.11	-0.90
250	1.24	1.29	-1.07	-2.63	-1.04	
HS-46	25	-0.39	-0.24	0.50	-1.02	0.93
	50	-0.14	-0.01	0.23	-0.40	0.59
	75	0.17	0.28	-0.00	0.10	0.29
	100	0.51	0.61	-0.20	0.45	0.04
	125	0.88	0.97	-0.38	0.65	-0.19
	150	1.25	1.33	-0.54	0.70	-0.39
	175	1.58	1.65	-0.69	0.51	-0.57
	200	1.70	1.77	-0.83	-0.10	-0.74
	225	1.55	1.60	-0.95	-1.19	-0.89
250	1.17	1.22	-1.07	-2.67	-1.04	
HS-51	25	-0.46	-0.31	0.50	-1.06	0.93
	50	-0.20	-0.07	0.23	-0.43	0.59
	75	0.12	0.23	-0.00	0.09	0.29
	100	0.47	0.58	-0.20	0.47	0.04
	125	0.85	0.94	-0.38	0.71	-0.19
	150	1.24	1.32	-0.54	0.79	-0.39
	175	1.57	1.65	-0.69	0.63	-0.57
	200	1.71	1.77	-0.82	0.04	-0.74
	225	1.56	1.61	-0.95	-1.03	-0.89
250	1.19	1.24	-1.07	-2.50	-1.04	
HS-54	25	-0.46	-0.32	0.45	-1.22	0.88
	50	-0.20	-0.07	0.18	-0.58	0.54
	75	0.13	0.24	-0.05	-0.05	0.25
	100	0.50	0.60	-0.25	0.36	-0.01
	125	0.90	0.99	-0.43	0.64	-0.23
	150	1.31	1.39	-0.58	0.78	-0.43
	175	1.66	1.74	-0.73	0.67	-0.61
	200	1.82	1.88	-0.86	0.14	-0.78
	225	1.68	1.74	-0.99	-0.89	-0.93
250	1.33	1.38	-1.11	-2.32	-1.08	
HS-57	25	-0.67	-0.52	0.49	-1.51	0.92
	50	-0.41	-0.28	0.22	-0.88	0.58
	75	-0.08	0.03	-0.01	-0.35	0.29
	100	0.29	0.39	-0.21	0.05	0.04
	125	0.69	0.78	-0.38	0.33	-0.19
	150	1.10	1.18	-0.54	0.46	-0.39
	175	1.45	1.53	-0.69	0.35	-0.57
	200	1.60	1.67	-0.82	-0.17	-0.73
	225	1.47	1.53	-0.95	-1.20	-0.89
250	1.12	1.17	-1.06	-2.63	-1.04	
HS-58	25	-0.42	-0.27	0.49	-0.96	0.92
	50	-0.16	-0.03	0.22	-0.33	0.58
	75	0.16	0.27	-0.01	0.18	0.28
	100	0.51	0.61	-0.21	0.56	0.03
	125	0.88	0.97	-0.39	0.78	-0.20
	150	1.27	1.35	-0.55	0.86	-0.40
	175	1.60	1.67	-0.70	0.69	-0.58
	200	1.73	1.80	-0.83	0.10	-0.75
	225	1.58	1.64	-0.96	-0.98	-0.90
250	1.21	1.26	-1.08	-2.45	-1.05	



Tablo 4.12. Devam.

Kodu	Sıcaklık (°C)	Aragonit	Kalsit	Kalsedon	Dolomit	Kuvars
HS-60	25	-0.44	-0.29	0.51	-0.98	0.94
	50	-0.18	-0.06	0.24	-0.36	0.60
	75	0.13	0.24	0.01	0.15	0.31
	100	0.48	0.58	-0.19	0.51	0.05
	125	0.84	0.93	-0.37	0.72	-0.18
	150	1.22	1.30	-0.53	0.77	-0.38
	175	1.55	1.62	-0.68	0.59	-0.56
	200	1.67	1.74	-0.81	-0.01	-0.73
	225	1.52	1.57	-0.94	-1.09	-0.88
250	1.15	1.20	-1.06	-2.56	-1.03	
HS-61	25	-0.36	-0.21	0.52	-0.83	0.95
	50	-0.10	0.02	0.25	-0.21	0.91
	75	0.21	0.33	0.02	0.30	0.32
	100	0.57	0.67	-0.18	0.68	0.06
	125	0.94	1.03	-0.36	0.91	-0.16
	150	1.33	1.41	-0.52	0.98	-0.36
	175	1.66	1.73	-0.66	0.81	-0.54
	200	1.79	1.85	-0.80	0.22	-0.71
	225	1.63	1.69	-0.92	-0.87	-0.87
250	1.27	1.32	-1.04	-2.33	-1.01	
HS-67	25	-0.24	-0.10	0.42	-0.87	0.85
	50	0.02	0.14	0.15	-0.24	0.51
	75	0.34	0.46	-0.08	0.29	0.21
	100	0.71	0.81	-0.28	0.70	-0.04
	125	1.11	1.20	-0.46	0.97	-0.26
	150	1.51	1.59	-0.62	1.10	-0.46
	175	1.85	1.92	-0.76	0.98	-0.64
	200	1.98	2.05	-0.89	0.44	-0.81
	225	1.85	1.90	-1.02	-0.59	-0.96
250	1.50	1.55	-1.14	-2.01	-1.11	
HS-68	25	-0.33	-0.19	0.45	-1.08	0.87
	50	-0.07	0.05	0.18	-0.44	0.53
	75	0.25	0.36	-0.05	0.09	0.24
	100	0.61	0.71	-0.25	0.49	-0.01
	125	1.00	1.09	-0.43	0.75	-0.24
	150	1.40	1.48	-0.59	0.86	-0.44
	175	1.75	1.82	-0.74	0.72	-0.62
	200	1.88	1.95	-0.87	0.15	-0.79
	225	1.74	1.80	-1.00	-0.91	-0.94
250	1.38	1.43	-1.12	-2.37	-1.09	
HS-69	25	-0.43	-0.28	0.40	-1.46	0.83
	50	-0.17	-0.04	0.14	-0.81	0.49
	75	0.16	0.27	-0.09	-0.28	0.20
	100	0.53	0.63	-0.29	0.13	-0.05
	125	0.93	1.02	-0.47	0.41	-0.28
	150	1.34	1.42	-0.63	0.54	-0.48
	175	1.69	1.76	-0.78	0.43	-0.66
	200	1.84	1.90	-0.91	-0.12	-0.82
	225	1.70	1.76	-1.04	-1.17	-0.98
250	1.35	1.40	-1.16	-2.62	-1.13	
Emen dere	25	-0.10	0.04	-0.40	0.06	0.02
	50	0.15	0.28	-0.67	0.70	-0.32
	75	0.46	0.57	-0.91	1.21	-0.61
	100	0.79	0.89	-1.11	1.55	-0.86
	125	1.14	1.23	-1.29	1.75	-1.09
	150	1.49	1.57	-1.44	1.75	-1.29
	175	1.79	1.86	-1.59	1.45	-1.47
	200	1.90	1.96	-1.71	0.72	-1.63
	225	1.74	1.80	-1.83	-0.47	-1.77
250	1.38	1.43	-1.94	-1.99	-1.91	

Tablo 4.13. Termal suların 25-250°C arasındaki sıcaklıklarda bazı minerallere göre doygunluk durumları (Ekim 2016).

Kodu	Sıcaklık (°C)	Aragonit	Kalsit	Kalsedon	Dolomit	Kuvars
HSW	25	0.29	0.44	0.63	0.33	0.94
	50	0.48	0.61	0.36	0.83	0.59
	75	0.69	0.81	0.13	1.14	0.30
	100	0.93	1.03	-0.08	1.30	0.04
	125	1.21	1.30	-0.26	1.34	-0.18
	150	1.53	1.62	-0.42	1.26	-0.39
	175	1.82	1.89	-0.57	0.97	-0.57
	200	1.91	1.98	-0.70	0.28	-0.74
	225	1.73	1.79	-0.83	-0.87	-0.89
250	1.34	1.39	-0.95	-2.38	-1.04	
HS-1	25	-0.23	-0.08	0.56	-0.70	0.91
	50	0.02	0.15	0.29	-0.08	0.57
	75	0.33	0.44	0.06	0.41	0.27
	100	0.66	0.76	-0.14	0.75	0.02
	125	1.02	1.11	-0.32	0.94	-0.20
	150	1.39	1.47	-0.48	0.98	-0.40
	175	1.71	1.78	-0.63	0.78	-0.59
	200	1.83	1.89	-0.76	0.16	-0.75
	225	1.67	1.73	-0.89	-0.94	-0.91
250	1.29	1.34	-1.01	-2.42	-1.05	
HS-21	25	-0.17	-0.03	0.57	-0.61	1.00
	50	0.07	0.20	0.31	-0.00	0.66
	75	0.37	0.48	0.07	0.47	0.37
	100	0.69	0.79	-0.13	0.78	0.11
	125	1.03	1.12	-0.31	0.94	-0.11
	150	1.39	1.47	-0.47	0.95	-0.31
	175	1.70	1.77	-0.62	0.73	-0.50
	200	1.82	1.88	-0.75	0.10	-0.67
	225	1.65	1.71	-0.88	-1.02	-0.82
250	1.27	1.33	-1.00	-2.50	-0.97	
HS-26	25	0.71	0.85	0.57	1.39	1.00
	50	0.75	0.88	0.30	1.61	0.65
	75	0.80	0.91	0.06	1.61	0.36
	100	0.90	1.00	-0.13	1.49	0.11
	125	1.09	1.18	-0.31	1.30	-0.11
	150	1.35	1.43	-0.47	1.06	-0.31
	175	1.61	1.68	-0.61	0.66	-0.49
	200	1.69	1.76	-0.75	-0.10	-0.66
	225	1.49	1.55	-0.87	-1.30	-0.81
250	1.08	1.13	-0.99	-2.84	-0.96	
HS-27	25	-0.29	-0.15	0.57	-0.80	-0.32
	50	-0.04	0.09	0.30	-0.18	0.66
	75	0.27	0.38	0.07	0.31	0.37
	100	0.61	0.71	-0.13	0.67	0.11
	125	0.97	1.06	-0.31	0.87	-0.11
	150	1.35	1.43	-0.47	0.92	-0.32
	175	1.67	1.74	-0.62	0.73	-0.50
	200	1.79	1.86	-0.75	0.12	-0.67
	225	1.63	1.69	-0.88	-0.97	-0.82
250	1.26	1.31	-1.00	-2.44	-0.97	
HS40	25	0.06	0.21	0.56	-0.12	0.99
	50	0.29	0.41	0.29	0.45	0.65
	75	0.55	0.66	0.06	0.86	0.35
	100	0.83	0.93	-0.14	1.09	0.10
	125	1.14	1.23	-0.32	1.19	-0.13
	150	1.48	1.56	-0.49	1.15	-0.33
	175	1.78	1.85	-0.63	0.89	-0.51
	200	1.88	1.94	-0.77	0.22	-0.68
	225	1.70	1.76	-0.89	-0.91	-0.84
250	1.32	1.37	-1.01	-2.41	-0.98	

Tablo 4.13. Devam.

Kodu	Sıcaklık (°C)	Araçonit	Kalsit	Kalsedon	Dolomit	Kuvars
HS-44	25	-0.18	-0.04	0.58	-0.63	1.01
	50	0.06	0.18	0.31	-0.03	0.67
	75	0.35	0.46	0.08	0.43	0.37
	100	0.66	0.76	-0.13	0.73	0.12
	125	0.99	1.08	-0.31	0.88	-0.11
	150	1.35	1.43	-0.47	0.88	-0.31
	175	1.66	1.73	-0.61	0.64	-0.50
	200	1.77	1.84	-0.75	-0.00	-0.66
	225	1.61	1.66	-0.87	-1.12	-0.82
250	1.22	1.27	-0.99	-2.61	-0.96	
HS-46	25	-0.32	-0.17	0.59	-0.91	1.02
	50	-0.06	0.06	0.32	-0.29	0.68
	75	0.25	0.36	0.09	0.21	0.38
	100	0.59	0.69	-0.11	0.57	0.13
	125	0.96	1.05	-0.29	0.79	-0.10
	150	1.34	1.42	-0.45	0.84	-0.30
	175	1.67	1.74	-0.60	0.66	-0.48
	200	1.79	1.86	-0.73	0.07	-0.65
	225	1.64	1.69	-0.86	-1.02	-0.80
250	1.27	1.32	-0.98	-2.49	-0.95	
HS-51	25	-0.34	-0.20	0.58	-0.87	1.01
	50	-0.09	0.03	0.31	-0.25	0.67
	75	0.22	0.33	0.08	0.25	0.37
	100	0.56	0.66	-0.12	0.60	0.12
	125	0.92	1.01	-0.30	0.80	-0.11
	150	1.29	1.37	-0.46	0.84	-0.31
	175	1.61	1.68	-0.61	0.64	-0.49
	200	1.73	1.80	-0.74	0.03	-0.66
	225	1.58	1.63	-0.87	-1.06	-0.81
250	1.20	1.25	-0.99	-2.54	-0.96	
HS-54	25	-0.53	-0.39	0.56	-1.14	0.99
	50	-0.28	-0.15	0.29	-0.51	0.65
	75	0.05	0.16	0.06	0.01	0.36
	100	0.41	0.51	-0.14	0.40	0.10
	125	0.79	0.88	-0.32	0.64	-0.12
	150	1.18	1.26	-0.48	0.73	-0.32
	175	1.52	1.59	-0.62	0.58	-0.50
	200	1.65	1.72	-0.76	0.01	-0.67
	225	1.51	1.56	-0.88	-1.06	-0.82
250	1.14	1.19	-1.00	-2.52	-0.97	
HS-55	25	-0.20	-0.06	0.56	-0.74	0.99
	50	0.04	0.17	0.29	-0.13	0.65
	75	0.34	0.45	0.06	0.35	0.35
	100	0.66	0.76	-0.14	0.67	0.10
	125	1.00	1.09	-0.32	0.84	-0.13
	150	1.36	1.44	-0.48	0.86	-0.33
	175	1.68	1.75	-0.63	0.63	-0.51
	200	1.79	1.85	-0.77	-0.01	-0.68
	225	1.62	1.68	-0.89	-1.12	-0.84
250	1.24	1.29	-1.01	-2.61	-0.98	
HS-56	25	0.55	0.70	0.57	1.12	1.00
	50	0.62	0.75	0.30	1.39	0.65
	75	0.72	0.83	0.06	1.48	0.36
	100	0.86	0.96	-0.14	1.44	0.10
	125	1.08	1.17	-0.32	1.33	-0.12
	150	1.36	1.44	-0.48	1.15	-0.32
	175	1.63	1.71	-0.62	0.79	-0.50
	200	1.72	1.79	-0.76	0.06	-0.67
	225	1.53	1.59	-0.88	-1.12	-0.83
250	1.13	1.18	-1.00	-2.64	-0.97	

Tablo 4.13. Devam.

Kodu	Sıcaklık (°C)	Aragonit	Kalsit	Kalsedon	Dolomit	Kuvars
HS-57	25	-0.03	0.11	0.58	-0.42	1.01
	50	0.21	0.33	0.31	0.17	0.67
	75	0.50	0.61	0.08	0.62	0.38
	100	0.81	0.91	-0.12	0.91	0.12
	125	1.15	1.24	-0.30	1.06	-0.11
	150	1.51	1.59	-0.46	1.07	-0.31
	175	1.82	1.89	-0.61	0.85	-0.49
	200	1.94	2.01	-0.74	0.23	-0.66
	225	1.78	1.84	-0.87	-0.88	-0.81
250	1.40	1.45	-0.99	-2.36	-0.96	
HS-58	25	-1.27	-1.12	0.59	-2.60	1.02
	50	-1.00	-0.88	0.33	-1.96	0.68
	75	-0.67	-0.55	0.10	-1.41	0.39
	100	-0.27	-0.17	-0.10	-0.97	0.14
	125	0.15	0.24	-0.28	-0.64	-0.08
	150	0.59	0.67	-0.43	-0.43	-0.28
	175	0.97	1.04	-0.57	-0.43	-0.45
	200	1.15	1.22	-0.70	-0.79	-0.62
	225	1.07	1.12	-0.82	-1.63	-0.76
250	0.76	0.81	-0.93	-2.91	-0.90	
HS-61	25	-0.14	0.00	0.58	-0.48	1.01
	50	0.10	0.22	0.31	0.12	0.67
	75	0.38	0.50	0.08	0.57	0.37
	100	0.69	0.79	-0.12	0.87	0.12
	125	1.03	1.12	-0.30	1.01	-0.11
	150	1.38	1.46	-0.46	1.01	-0.31
	175	1.69	1.76	-0.61	0.77	-0.49
	200	1.80	1.87	-0.75	0.13	-0.66
	225	1.64	1.69	-0.87	-0.99	-0.82
250	1.25	1.30	-0.99	-2.48	-0.96	
HS-67	25	-0.27	-0.12	0.47	-0.93	0.90
	50	-0.01	0.12	0.20	-0.30	0.56
	75	0.32	0.43	-0.03	0.24	0.27
	100	0.69	0.79	-0.23	0.64	0.02
	125	1.09	1.18	-0.40	0.92	-0.21
	150	1.49	1.57	-0.56	1.06	-0.41
	175	1.84	1.91	-0.70	0.95	-0.59
	200	1.98	2.04	-0.84	0.43	-0.75
	225	1.84	1.90	-0.96	-0.59	-0.90
250	1.50	1.55	-1.08	-2.00	-1.05	
HS-68	25	-0.16	-0.02	0.53	-1.02	0.96
	50	0.09	0.22	0.26	-0.39	0.62
	75	0.40	0.52	0.03	0.12	0.32
	100	0.75	0.85	-0.17	0.48	0.07
	125	1.11	1.20	-0.35	0.69	-0.16
	150	1.50	1.58	-0.51	0.76	-0.36
	175	1.83	1.90	-0.66	0.59	-0.54
	200	1.96	2.02	-0.79	-0.02	-0.71
	225	1.81	1.86	-0.92	-1.12	-0.86
250	1.44	1.49	-1.04	-2.60	-1.01	
HS-69	25	0.30	0.44	0.47	-0.12	0.90
	50	0.51	0.63	0.20	0.42	0.56
	75	0.74	0.86	-0.03	0.79	0.27
	100	1.00	1.11	-0.23	0.99	0.01
	125	1.31	1.40	-0.41	1.07	-0.22
	150	1.65	1.73	-0.57	1.03	-0.42
	175	1.95	2.03	-0.72	0.76	-0.60
	200	2.07	2.13	-0.86	0.07	-0.77
	225	1.89	1.95	-0.98	-1.09	-0.93
250	1.50	1.55	-1.10	-2.60	-1.07	

Tablo 4.13. Devam.

Kodu	Sıcaklık (°C)	Aragonit	Kalsit	Kalsedon	Dolomit	Kuvars
EM-1	25	-0.31	-0.17	-0.43	-0.44	-0.00
	50	-0.05	0.08	-0.70	0.22	-0.35
	75	0.28	0.39	-0.93	0.77	-0.64
	100	0.64	0.74	-1.13	1.18	-0.89
	125	1.02	1.11	-1.31	1.45	-1.12
	150	1.41	1.49	-1.47	1.52	-1.31
	175	1.73	1.80	-1.61	1.29	-1.49
	200	1.85	1.92	-1.74	0.59	-1.65
	225	1.70	1.76	-1.85	-0.60	-1.80
250	1.33	1.39	-1.96	-2.11	-1.93	
EM-2	25	0.75	0.90	-0.42	1.75	0.00
	50	0.84	0.97	-0.69	2.07	-0.34
	75	0.97	1.08	-0.93	2.23	-0.63
	100	1.15	1.25	-1.13	2.27	-0.88
	125	1.39	1.48	-1.30	2.24	-1.11
	150	1.68	1.76	-1.46	2.08	-1.31
	175	1.93	2.00	-1.60	1.67	-1.48
	200	2.01	2.08	-1.73	0.85	-1.64
	225	1.83	1.89	-1.84	-0.41	-1.78
250	1.44	1.49	-1.95	-1.97	-1.92	
EM-3	25	0.41	0.55	-0.39	0.97	0.04
	50	0.60	0.72	-0.66	1.49	-0.30
	75	0.82	0.93	-0.89	1.84	-0.60
	100	1.07	1.17	-1.10	2.02	-0.85
	125	1.36	1.45	-1.27	2.09	-1.08
	150	1.68	1.76	-1.43	2.01	-1.28
	175	1.95	2.03	-1.57	1.65	-1.46
	200	2.05	2.11	-1.70	0.86	-1.61
	225	1.87	1.93	-1.81	-0.38	-1.76
250	1.49	1.54	-1.92	-1.93	-1.89	
EM-4	25	0.64	0.79	-0.13	0.56	0.30
	50	0.68	0.81	-0.40	0.79	-0.04
	75	0.72	0.83	-0.63	0.77	-0.33
	100	0.80	0.90	-0.82	0.61	-0.58
	125	0.97	1.06	-0.99	0.40	-0.80
	150	1.22	1.30	-1.15	0.11	-0.99
	175	1.50	1.57	-1.29	-0.34	-1.17
	200	1.64	1.71	-1.41	-1.11	-1.33
	225	1.51	1.56	-1.53	-2.32	-1.47
250	1.10	1.15	-1.64	-3.90	-1.61	

## 5. JEOTERMOMETRİ

Jeotermometrelerin genel amacı yeraltındaki jeotermal akışkanın sıcaklığının tahmin edilmesidir. Suların yeraltında katettikleri yol, ne denli kısa ve debisi ne denli yüksekse, sıcaklıkları o oranda hazne kaya sıcaklığına yakındır. Derinlerde rezervuarda bulunan sıcak sular yüzeye erişinceye kadar değişik ölçüde soğuyarak ve/veya soğuk yeraltı sularıyla değişik oranlarda karışarak yüzeylerler. Bu nedenle derinlerde bulunan jeotermal akışkanın sıcaklığı yüzeydeki boşalım sıcaklığına göre daha yüksektir. Rezervuardaki jeotermal suların gerçek sıcaklığı, verimleri ve diğer gerçek bilgiler, hazne kayaya değin inen kuyuların incelenmesi ile elde edilebilir. Ancak, derin jeotermal sondajlar oldukça yüksek maliyete ve zamana gereksinim göstermektedir. Bundan dolayı, jeotermal akışkanın kullanım alanlarının (elektrik üretimi, konut ve sera ısıtması, kaplıca gibi) saptanabilmesi için, açılacak sondajlardan önce, çeşitli jeotermometre yöntemleri ile rezervuar sıcaklıklarının tahmin edilmesi büyük önem taşır.

Rezervuar sıcaklığının saptanmasında çok değişik yöntemler (su, gaz, izotop) önerilmiştir. Bunlardan bazıları çevresel izotoplarla kalitatif değerlendirme, sığ ve derin kuyularda ölçülen sıcaklıklardan yararlanarak rezervuar sıcaklığının tahmini, jeotermal alanlarda izlenen hidrotermal alterasyon sonucu oluşan kil minerallerinin incelenmesi ve kimyasal jeotermometreler gibi yöntemlerdir. Bu bölümde, Hisaralan jeotermal sularına uygulanan jeotermometre teknikleri, elde edilen sonuçlar ve rezervuar sıcaklığına ilişkin değerlendirmeler verilmiştir.

### 5.1 Kimyasal Jeotermometreler

Kimyasal jeotermometrelerin kullanılmasında bazı varsayımlar göz önünde bulundurulur. Bunlardan bazıları şunlardır (Şahinci, 1991);

- Sıcak sulardaki kimyasal maddelerin oluşması için gerekli kimyasal tepkimeler, akifer– su arasında gerçekleşmektedir.
- Sıcaklık saptanmasında gerekli maddelerin ortaya çıkması için oluşan kimyasal tepkimeler devamlıdır ve tepkimelerin hammaddesi hazne kayada boldur.
- Akifer sıcaklığında kaya–su arasında kimyasal denge gerçekleşmiştir.
- Akiferden yüzeye erişen sıcak suyun, soğuma sonucunda kimyasal yapısı değişmez veya yeni bir kimyasal denge gerçekleşmez.
- Akiferden gelen sıcak suların, soğuk yeraltı ve yüzey suları ile bir karışımı söz konusu değildir.

Bu varsayımların ilk üçü SiO<sub>2</sub> ve Na-K-Ca jeotermometreleri için kullanılır. Son iki varsayım tam olarak gerçeği yansıtmaz. Çünkü akiferden yüzeye doğru gelen sıcak suyun soğuması veya soğuk suların karışımı ile kimyasal yapısı değişebilir. Kimyasal jeotermometreler çözünürlüğe, iyon değişimine ve iyon etkinliğine bağlı olmak üzere üçe ayrılır.

### 5.1.1 Çözünürlüğe Bağlı Jeotermometreler

**Silis jeotermometreleri:** Kuvars çözünürlüğüne bağlı jeotermometreler, akifer (hazne) sıcaklığının saptanmasında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu jeotermometreler 150–225°C sıcaklıklar arasında iyi sonuç vermektedirler. Daha yüksek sıcaklıklarda akiferden yüzeye doğru hareket eden sıcak akışkanda hızlı silis çökelimi gözlenir. Bu nedenle sıcaklığı 225°C nin üzerindeki hazne kayalardan gelen sularda gerçek sıcaklığı yansıtmaz. Silis jeotermometreleri, kimyasal tepkimeyi etkileyen akifer sıcaklığına veya sıcak suyun yükselirken soğumasına dayanılarak hazırlanmıştır. Silisyumun sıcaklıkla çözünürlüğü artmaktadır. Silisin bu özelliğinden yola çıkılarak çeşitli sıcaklıklar için jeotermometre bağıntıları geliştirilmiştir.

**İyon değişimine bağlı jeotermometreler:** İyon değişim denge sabitleri sıcaklığın etkisindedir. Suda iyon değişimine uğrayan birçok mineral bulunur ve bunlardan yararlanılarak bir çok ampirik jeotermometre geliştirilmiştir (Na-K, Na-Li, Mg-Li, K-Mg, K-Ca, Na-Ca, Na-K-Ca jeotermometreleri gibi). Bu jeotermometreler suda fazla miktarda Ca<sup>++</sup> iyonu bulunuyorsa, akifer (hazne) sıcaklığı hesaplamalarında yüksek değerler verir. Na-K jeotermometrelerinin uygulanacağı sıcak suların pH değeri nötre yakın veya hafif alkali, karbonat çökelmelerinin oluşmaması,  $\log(\sqrt{Ca}/Na)$  değerinin 0,5'ten az olması koşulları aranmalıdır. Na/K jeotermometreleri, nötr ve alkali, alkali klorürlü, 180-350°C sıcaklıktaki bir rezervuardan gelen sularda daha iyi sonuçlar vermektedir (Şahinci, 1991).

**İyon etkinliğine bağlı jeotermometreler:** Bu tür jeotermometrelerde sıcak akışkanların kimyasal analizlerinde bulunan iyon değerleri yerine bu iyonların hesaplanan iyon etkinlikleri kullanılır.

Hisaralan jeotermal sularına uygulanan kimyasal jeotermometrelerden bazıları Tablo 5.1'de, bu bağıntılardan hesaplanan rezervuar sıcaklıkları Tablo 5.2'de verilmiştir.

Hisaralan sahasında, Nisan-2016 dönemi analizlerine göre, rezervuar sıcaklıkları, kalsedon jeotermometreleri ile 104-123°C, kuvars jeotermometreleri ile 128-148°C ve Ekim-2016 dönemi için bu değerler sırasıyla 113-140°C 135-163°C arasında hesaplanmıştır. Na-K jeotermometresi ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları Nisan-2016 dönemi için 105-203°C, Ekim-2016 dönemi için 106-200°C arasındadır. Her iki dönem için Li, Mg-Li ve Na-K-Ca

jeotermometreleri sırasıyla 142-161°C, 102-125°C ve 86-172°C arasında rezervuar sıcaklığı değerleri vermiştir. Na-K-Ca jeotermometresi ile hesaplanan sıcaklıklarda, HSW kuyu dibi sıcaklığından daha düşük sıcaklığa sahip kaynaklar dikkate alınmazsa rezervuar sıcaklığı 137-172°C arasında olarak kabul edilebilir. Bu jeotermometrede bazı sularda Mg düzeltmesi (Fournier ve Potter, 1979) yapılmıştır. K-Mg sıcaklıkları termal kaynakların boşalım sıcaklıklarına yakın, HSW kuyusunda ise daha düşük sıcaklıklar vermiştir ve bu saha için uygulanamaz. K/Mg oranının son dengelenme koşullarını yansıttığı düşünülmektedir.

Tablo 5.1. Rezervuar sıcaklığı hesaplamalarında kullanılan jeotermometre bağıntıları.

No	Jeotermometre	Bağıntı	Referans
1	SiO <sub>2</sub> (Kalsedon)	$t^{\circ}C = \left( \frac{1032}{4,69 - \log SiO_2} \right) - 273,15$	Fournier (1977)
2	SiO <sub>2</sub> (Kalsedon) 25-180°C	$t^{\circ}C = \left( \frac{1101}{0,11 - \log SiO_2} \right) - 273,15$	Arnorsson vd. (1983)
3	SiO <sub>2</sub> (Kuvars- buhar kaybı)	$t^{\circ}C = \left( \frac{1498}{5,7 - \log SiO_2} \right) - 273,15$	Arnorsson vd. (1983)
4	SiO <sub>2</sub> (Kuvars)	$t^{\circ}C = \left( \frac{1309}{5,19 - \log SiO_2} \right) - 273,15$	Fournier (1977)
5	Na/K	$t^{\circ}C = \left( \frac{777}{0,7 + \log(Na/K)} \right) - 273,15$	Fournier ve Truesdell (1973)
6	Na-K (100-275°C)	$t^{\circ}C = \left( \frac{855,6}{0,8573 + \log(Na/K)} \right) - 273,15$	Truesdell (1976)
7	Na-K (25-250°C)	$t^{\circ}C = \left( \frac{933}{0,993 + \log(Na/K)} \right) - 273,15$	Arnorsson vd. (1983)
8	Na-K	$t^{\circ}C = \left( \frac{1178}{1,47 + \log(Na/K)} \right) - 273,15$	Nieva ve Nieva (1987)
9	Na-K	$t^{\circ}C = \left( \frac{1390}{1,75 + \log(Na/K)} \right) - 273,15$	Giggenbach (1988)
10	Li (mol/l)	$t^{\circ}C = \left( \frac{2258}{1,44 - \log(Li)} \right) - 273,15$	Fouillac ve Michard (1981)
11	Mg-Li	$t^{\circ}C = \left( \frac{2200}{5,47 - \log(Li/\sqrt{Mg})} \right) - 273,15$	Kharaka ve Mariner (1989)
12	K-Mg	$t^{\circ}C = \left( \frac{4410}{14 - \log(K^2/Mg)} \right) - 273,15$	Giggenbach (1988)
13	Na-K-Ca	$t^{\circ}C = \left( \frac{1647}{\log(Na/K) + \beta[\log(\sqrt{Ca}/Na) + 2,061] + 2,47} \right) - 273,15$	Fournier ve Truesdell (1973)

## 5.2 Birleşik (Kombine) Jeotermometre Uygulamaları

Giggenbach (1988) tarafından sıcak suların rezervuar sıcaklıklarının saptanması ve suların ilişkide olduğu kayaçlarla olan denge durumlarının belirlenmesi için geliştirilmiş olan Na-K-Mg birleşik jeotermometresi ile hem sıcak suların rezervuar sıcaklığı hızlı olarak yorumlanabilmekte, hem de katyon jeotermometre uygulamalarının geçerliliği sınanmaktadır (Şekil 5.1 ve 5.2).



Tablo 5.2. Jeotermometre bağıntılarından hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (°C) (\*Mg düzeltmesi uygulanan suları gösterir).

NİSAN-2016													
Kodu	SiO <sub>2</sub>				Na/K					Li	Mg-Li	K-Mg	Na-K-Ca
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
HSW	121	118	139	146	138	145	154	170	200	156	111	94	165
HS-1	116	114	136	142	137	144	154	169	199	154	112	94	160*
HS-21	119	117	138	145	136	143	152	168	198	154	112	95	161*
HS-26	123	120	141	148	134	141	151	167	197	156	118	100	169
HS-27	119	117	138	145	136	143	152	168	198	155	111	93	163
HS-40	116	114	136	142	137	144	153	169	199	152	109	93	163
HS-44	121	118	139	146	136	144	153	168	198	155	115	97	164*
HS-46	119	116	138	144	136	143	153	168	198	155	115	97	159*
HS-51	118	116	138	144	138	145	154	169	199	154	109	92	165
HS-54	111	110	132	138	140	147	156	172	201	149	103	88	160
HS-57	118	116	137	144	138	145	154	169	199	154	111	94	166
HS-58	117	115	137	143	137	144	153	169	199	153	107	91	165
HS-60	120	118	139	146	137	144	153	169	199	156	111	94	167
HS-61	122	120	141	148	142	149	158	173	203	155	107	90	166
HS-67	107	106	129	134	124	132	142	159	189	151	102	84	145*
HS-68	111	109	132	138	105	113	124	144	174	145	104	81	137*
HS-69	105	104	128	132	-	107	117	138	169	142	108	84	57
EM-3	-	-	56	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EKİM-2016													
HSW	140	135	154	163	138	145	154	169	199	165	125	99	160*
HS-1	128	124	145	153	138	145	154	169	199	159	114	94	164
HS-21	130	126	147	155	135	142	152	168	198	160	117	96	158*
HS-26	135	131	150	159	137	144	153	169	199	161	121	100	172
HS-27	130	126	146	154	136	143	152	168	198	159	114	95	164
HS-40	129	125	145	153	135	142	151	167	197	159	116	95	164*
HS-44	131	127	147	156	138	145	154	170	199	159	118	98	155*
HS-46	132	128	148	157	136	143	153	168	198	161	117	96	156*
HS-51	131	127	147	156	135	143	152	168	198	160	116	95	165
HS-54	128	124	145	153	137	144	153	169	199	157	110	91	165*
HS-55	128	124	145	153	138	145	155	170	200	159	120	100	142
HS-56	132	128	148	157	134	141	151	167	197	159	115	95	169*
HS-57	132	127	148	156	135	142	151	167	197	159	115	94	145
HS-58	133	129	149	158	137	144	153	169	199	160	113	93	167
HS-61	131	127	147	156	132	140	149	165	195	159	114	94	163*
HS-67	115	112	135	141	122	130	140	158	188	154	104	84	144*
HS-68	123	120	141	149	107	116	126	146	176	152	119	92	86*
HS-69	116	113	136	142	-	106	117	137	168	146	116	88	80*
EM-1	-	-	54	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EM-2	-	-	56	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EM-3	-	-	58	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EM-4	48	50	82	80	-	-	-	44	75	53	40	-	52

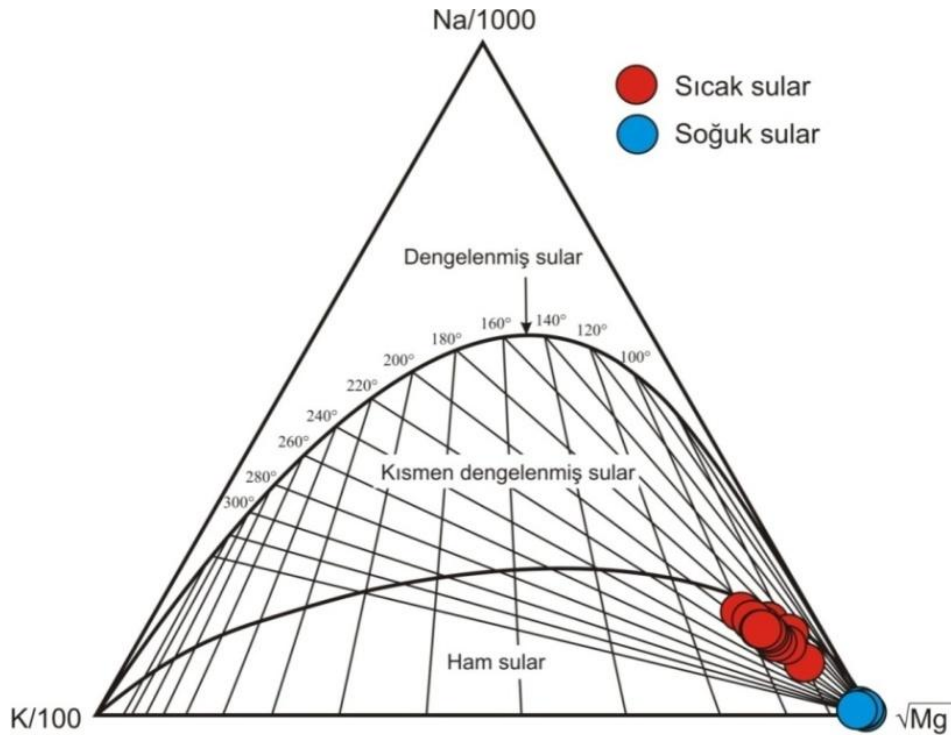
Diyagram kısaca, su-kayaç ilişkisinin dengede olmadığı (ham sular), su-kayaç ilişkisinin kısmen dengede olduğu (karışmış sular) ve su-kayaç ilişkisinin tam dengede olduğu sular olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Diyagramda kısmen olgunlaşmış sularla, olgunlaşmamış suları birbirinden ayıran eğri olgunlaşma indeksinin (MI=maturity index) MI=2.0 olduğu eş kimyasal özellikteki noktaların birleşimiyle oluşmuştur.

Olgunlaşma indeksi;

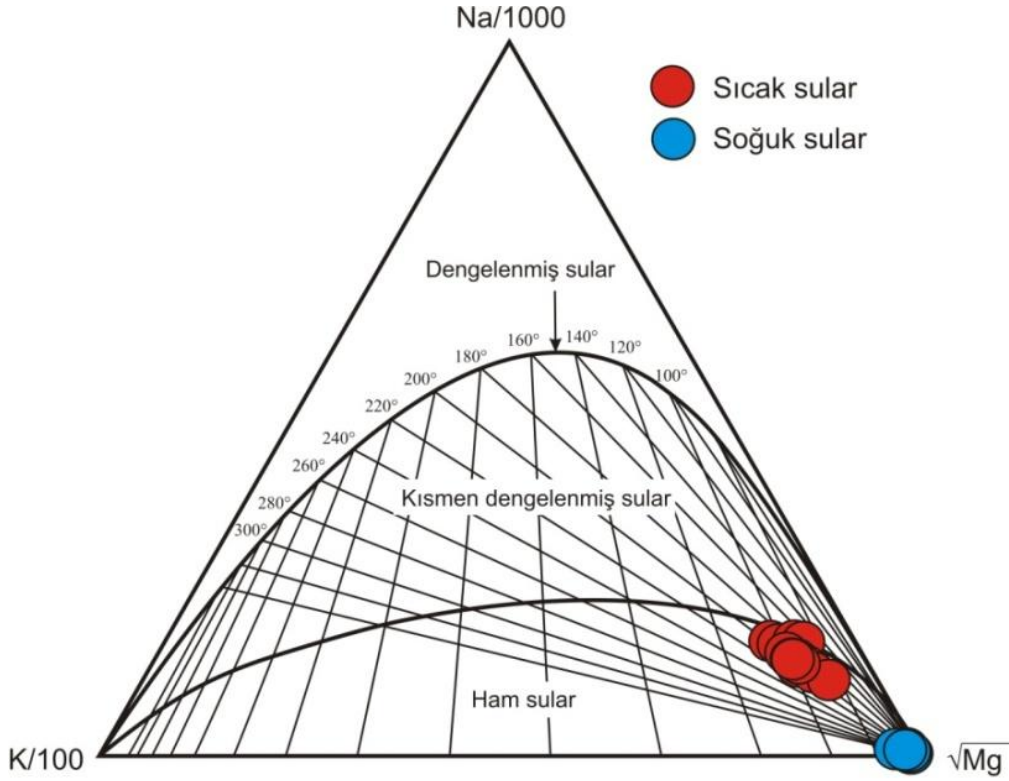
$$MI = 0.315 \text{ Log } ((K^2/Mg) - \text{Log } (K/Na))$$

bağıntısıyla tanımlanmıştır. Diyagram aynı anda hem su-kayaç ilişkisinin denge durumunu, hem de jeotermometre sonucunu gösterebilmektedir. Her iki örnekleme dönemi için suların Giggenbach diyagramındaki dağılımına bakıldığında rezervuar sıcaklığı 200°C olarak öngörülebilir (Şekil 5.1 ve 5.2).

Giggenbach (1988) ham sular bölümüne düşen suların katyon jeotermometre sonuçlarına şüpheyle bakılması gerektiğini belirtmektedir. Hisaralan jeotermal suları Na-K-Mg diyagramında “ham sular” alanına düşmektedir. Yani bu sular rezervuar kaya ile kimyasal dengeye erişmemiştir. Bu nedenle katyon jeotermometreleri ile elde edilen rezervuar sıcaklığı değerlerini yorumlarken dikkatli olmak gerekmektedir.



Şekil 5.1. Nisan-2016 dönemi sularının Giggenbach diyagramı (Giggenbach, 1988)'ndeki dağılımı.

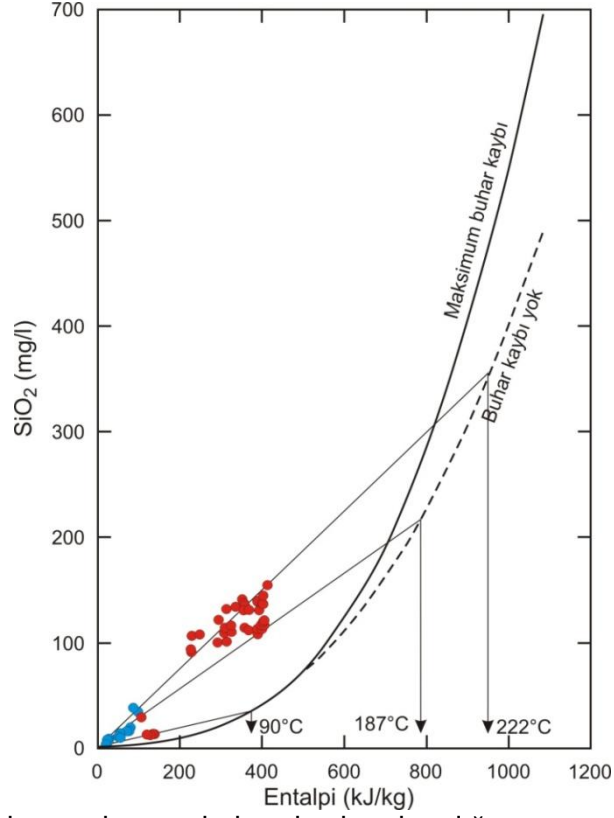


Şekil 5.2. Ekim-2016 dönemi sularının Giggenbach diyagramı (Giggenbach, 1988)'ndeki dağılımı.

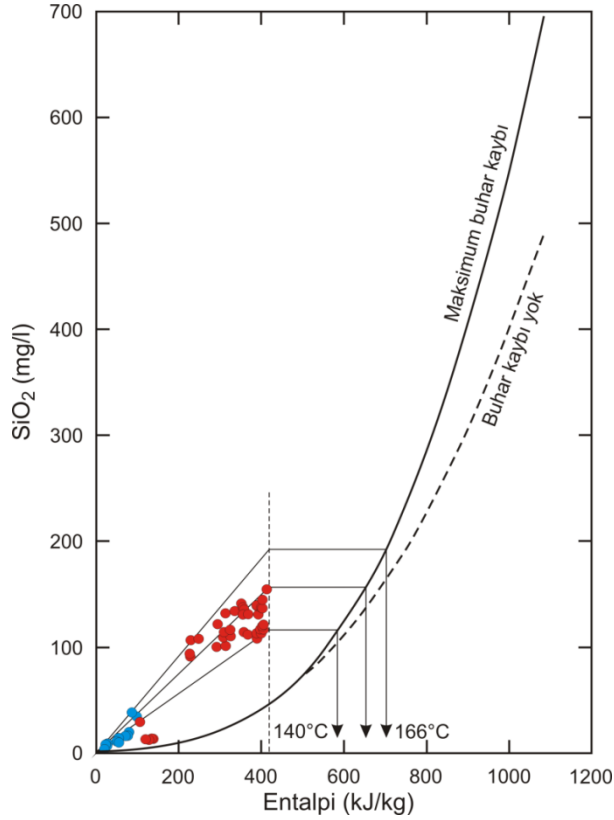
### 5.3 Silis-Entalpi Karışım Modeli

Sıcaklık ve silis dengesine dayalı olarak geliştirilmiş olan silis-entalpi karışım modeli (entalpi-silis diyagramı) kullanılarak karışım öncesi sıcaklık-buhar kaybının olduğu ve olmadığı her iki durum için de uygulanabilir (Fournier, 1977). İnceleme alanı sularının silis-entalpi diyagramında soğuk ve sıcak su noktalarını birleştiren doğruların “buhar kaybı yok” eğrisini kestiği noktadan yatay eksene inilen dikmeler ile rezervuar sıcaklığı 177-222°C arasında olarak belirlenmiştir (Şekil 5.3).

Buhar kaybı varsayımına dayalı silis-entalpi diyagramında soğuk suları ile termal suları birleştiren doğruların buharlaşma çizgisini kestiği noktadan çizilen yatay çizginin maksimum buhar kaybı eğrisini kestiği nokta rezervuar sıcaklığına karşılık gelir. Bu modele göre elde edilen rezervuar sıcaklığı 140-166°C arasındadır (Şekil 5.4).



Şekil 5.3. İnceleme alanı sularının buhar kaybı olmadığı varsayımına bağlı silis-entalpi diyagramı (kırmızı daireler termal suları göstermektedir).



Şekil 5.4. İnceleme alanı sularının maksimum buhar kaybı kabulüne göre silis-entalpi diyagramı (kırmızı daireler termal suları göstermektedir)..

Hisaralan kaynaklarının çoğunluğu kaynayan kaynaklardır ve debileri 5-10 l/s olan üç kaynağın dışında genellikle 0,5 l/s'den daha düşük debiye sahip sulardır. Bu kaynaklar için adyabatik kaynamadan çok kondüktif soğumanın egemen olduğu öngörülmektedir.

#### **5.4 Mineral Denge-Sıcaklık Diyagramı Jeotermometresi**

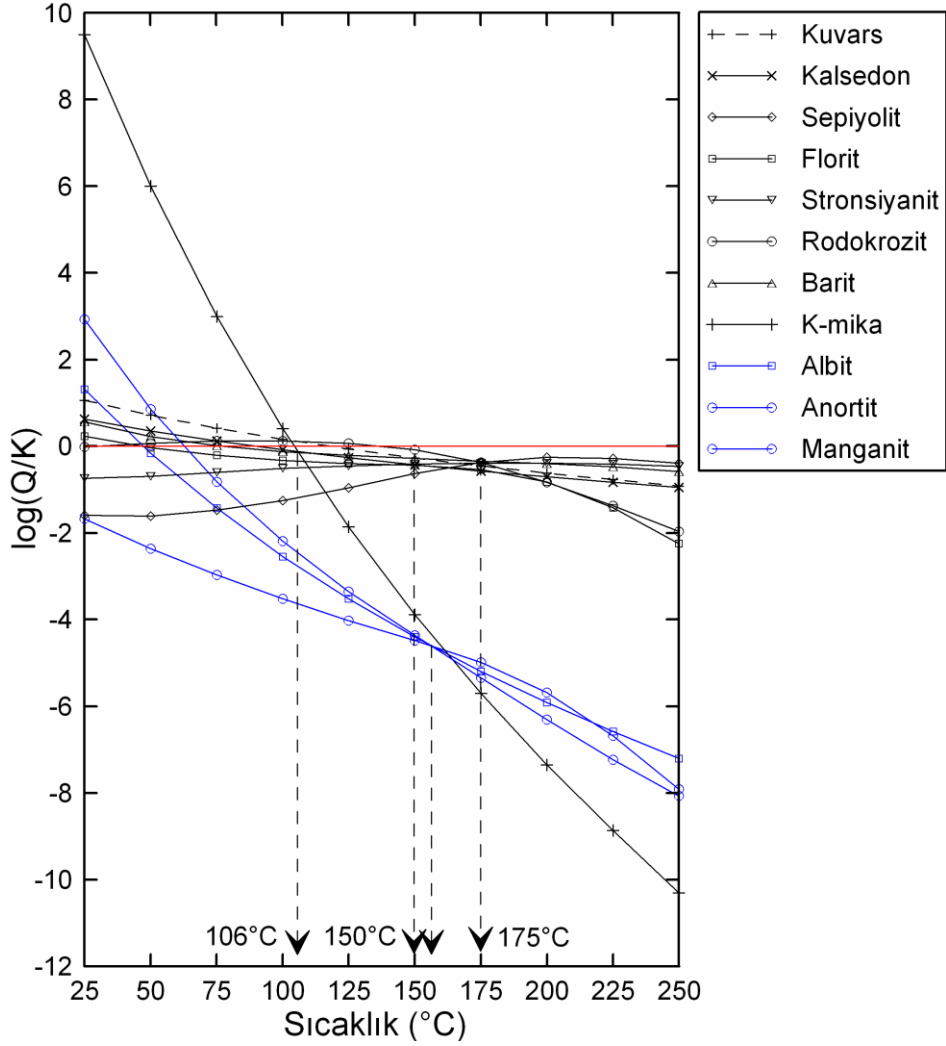
Reed ve Spycher (1984) jeotermal sistemlerde yeraltı sıcaklığının tahmin edilmesi için sıcaklıkla mineral doygunluklarının değişmesi esasına dayanan bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde alterasyon minerallerinin denge sabitlerinin değişiminde basıncın etkisinin (0-200 bar arası) oldukça sınırlı olması (Arnorsson vd., 1982) nedeniyle basınç etkisi ihmal edilmiş ve her jeotermal su için sıcaklığın bir fonksiyonu olan birçok hidrotermal mineral ile denge durumları arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesiyle oluşturulan sıcaklık – mineral denge diyagramı geliştirilmiştir.

Bu yöntem kısaca suyun kimyasal analizi sonucunda yukarıda belirtildiği gibi çeşitli mineraller ile bu minerallerin her bir sıcaklık değerinde ayrı ayrı doygunluk indekslerinin ( $SI = \log Q/K$ ) 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 rezervuar sıcaklığını vermektedir.

Hisaralan sahasındaki jeotermal sondaj kuyusundan (HSW) boşalan termal suyun (Ekim-2016) PhreeqC programı (Parkhurst ve Appelo, 1999) ile 25-250°C'ler arasında 25°C'lik sıcaklık aralıklarıyla hesaplanan doygunluk indekslerine ilişkin sıcaklık-mineral denge diyagramı Şekil 5.5'de verilmiştir. Bu diyagramdan elde edilen rezervuar sıcaklığı 106-175°C arasındadır.

#### **5.5 Sülfat-Su Oksijen İzotop Jeotermometresi**

Bu jeotermometre sıcaklığın bir fonksiyonu olarak  $SO_4$  ve  $H_2O$  arasındaki oksijen izotop değişimini baz alır ve 100-350°C sıcaklık aralığındaki birçok su egemen jeotermal sistemde başarıyla uygulanmıştır (Mizutani ve Rafter, 1969; Mizutani, 1972; Cortecci, 1974; Cortecci ve Dowgiallo, 1975; McKenzie ve Truesdell, 1977; Fouillac vd., 1990). Boschetti (2013)  $SO_4$ - $H_2O$  oksijen izotop jeotermometre uygulamasının özellikle düşük entalpili sahalarda kimyasal jeotermometre sonuçlarını onaylamak için kullanışlı olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5.5. Hisaralan jeotermal sondaj kuyusunun sıcaklık-mineral denge diyagramı.

Hisaralan termal sularının rezervuar sıcaklığı Lloyd (1968) tarafından önerilen aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır (T: Kelvin):

$$1000 \ln \alpha_{SO_4-H_2O} = 3.25 \left( \frac{10^6}{T^2} \right) - 5.6$$

İnceleme alanında, oksijen izotop jeotermometresi uygulanan 8 termal sudan, 179 ile 224°C arasında değişen rezervuar sıcaklıkları hesaplanmıştır (Tablo 5.3).

Tablo 5.3. Oksijen izotop jeotermometresi ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları.

Su Kodu	HSW	HS-1	HS-3	HS-7	HS-11	HS-17	HS-20	HS-21
Rezervuar sıcaklığı	198	216	224	219	203	199	179	199

## 6. TRAVERTEN ÇALIŞMALARI

### 6.1. Traverten Litotipleri

#### 6.1.1. Nilüfer Yapağı (Lilypad) Traverten

Nilüfer yapağı (lilypad) görünümlü bu traverten litotipi, çalışma alanında yüksek sıcaklıklı kaynak ağızlarında ve kaynaktan sonra akış aşağı, boşalım kanalı içinde, ilk 10 metrede, hava-su ara yüzeyinde ya da hemen altında oluşmuşlardır (Şekil 6.1). Bir çekirdekten itibaren dışa doğru büyümüş bu yapıların çapları birkaç cm'den 10 cm'ye kadar değişmektedir. Üstleri düz, dairesel-oval şekilli ve alttan kanal tabanına tutunmuşlardır. Dış kenarları beyaz, orta kısımları ise yeşil-kahverengi mikrobiyal yaygılarla kaplıdır (Şekil 6.1).



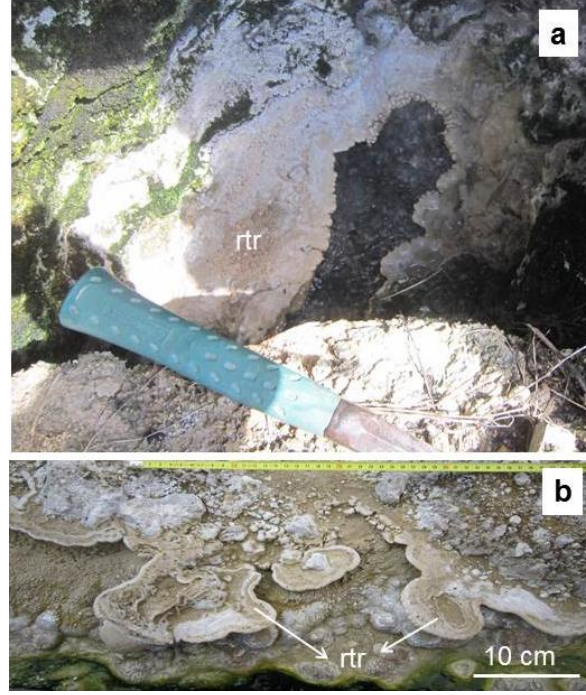
Şekil 6.1. HS-61 kaynağı (T=96.4°C) önündeki boşalım kanalında oluşmuş nilüfer yapağı traverten (nyp tr) ve rafı traverten (rfs tr) litotipleri. Kanal içinde su akışı sağdan sola doğrudur (Ölçek: kalem=13.8 cm). (Koordinat: 39.26925°, 28.31817°).

#### 6.1.2. Rafsı (Ledge) Traverten

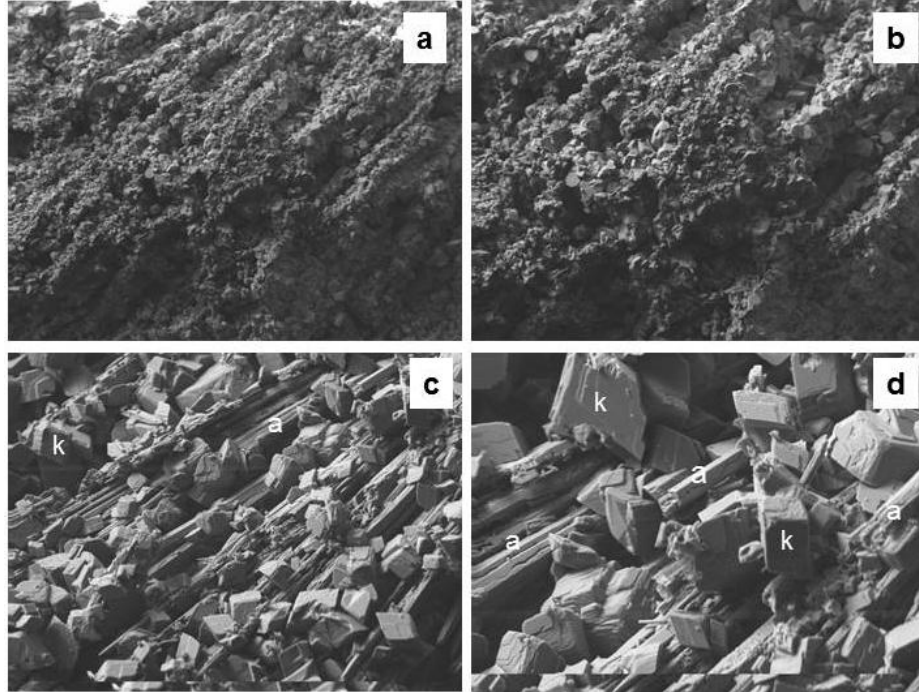
Rafsı (ledge) traverten litotipi, nilüfer yapağı traverten litotipi ile benzer özellikler taşırlar. Sıcak su kaynağı çevresinde ve boşalım kanallarının kenarlarına tutunmuş olarak gözlenen büyüme yapılarıdır (Şekil 6.2a, b). HS-61 kaynağına yakın alınmış bir örneğin (H.S-61. Tr-1), XRD analizlerine göre mineralojik olarak %12.7'si aragonit, % 67.3'ü kalsittir. Bu mineralojik bileşim, taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile uyumludur (Şekil 6.3).

Nilüfer yapağı ve rafı traverten litotipleri Doğu Afrika'da Kenya Rift Vadisi'nde yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Jones ve Renaut, 1998; Renaut, vd., 1999). Bu çalışmalarda,

nilüfer yaprağı ve rafı traverten tiplerinin oluşumunda hızlı CO<sub>2</sub> salınımı ve yüksek su sıcaklığının (>75°C) en önemli faktörler olduğu vurgulanmıştır. Yazarlar, benzer oluşumların, su-hava ara yüzeyinde mağara tabanlarındaki havuzlarda, buharlaşma tavalarında ve donma sırasında da meydana geldiklerini belirtmişlerdir.



Şekil 6.2. Kaynak (HS-61 kaynağı) kenarlarına tutunmuş rafı (ledge) traverten litotipinin arazi görünümü. (Koordinat: 39.26925°, 28.31817°).



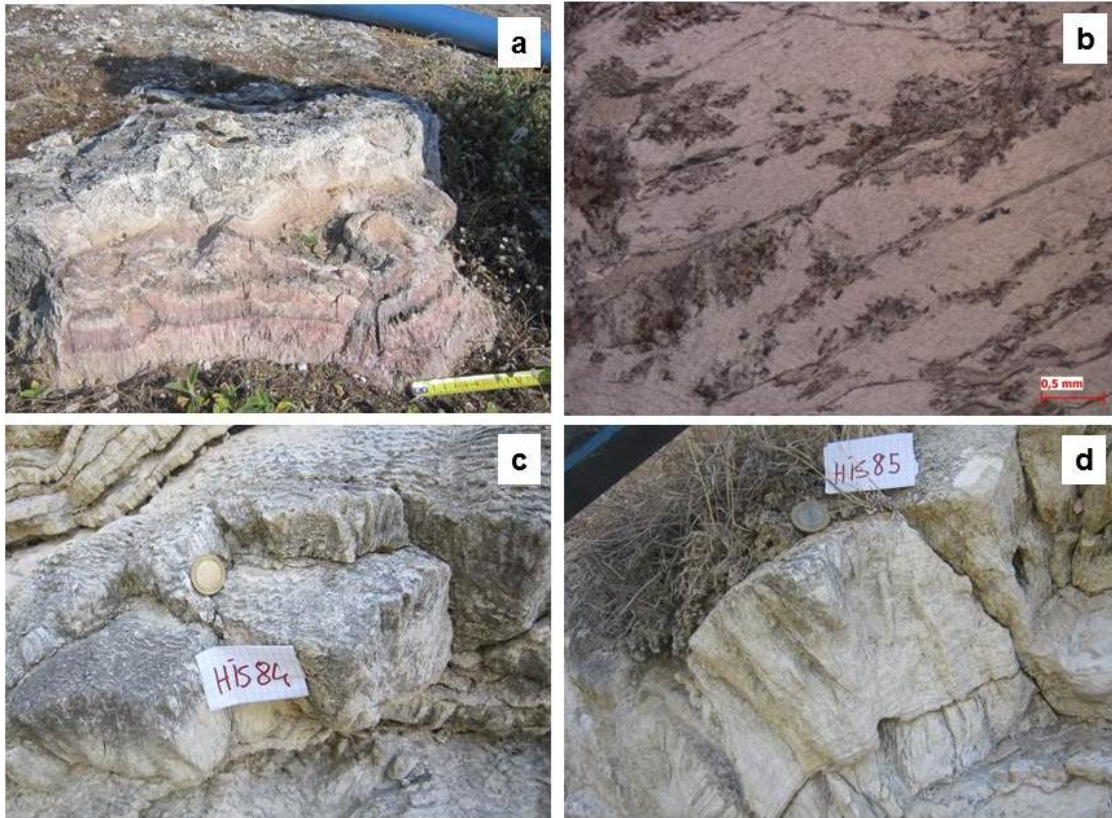
Şekil 6.3. HS-61 kaynağı önündeki kanalda oluşmuş rafı travertenlerin SEM görüntüleri (a-d). Yüksek büyütmelerde aynı örnekte romboedral kalsit (k) ve sütunsal aragonit (a) kristalleri ayırt edilmiştir (c, d).



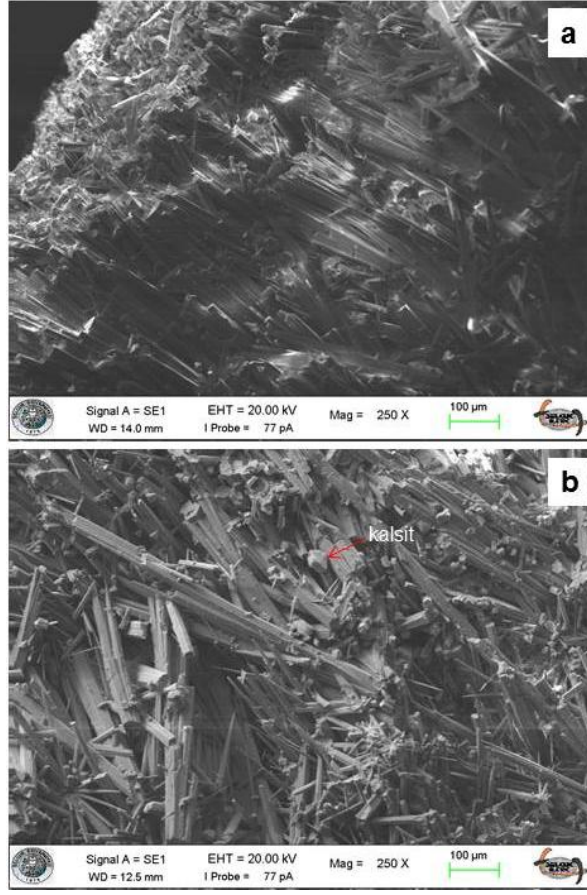
### 6.1.3. Kristalin Kabuk

Kristalin kabuk, çalışma alanında en yaygın traverten litotiplerinden birisidir (Şekil 6.4). Bireysel kristalin kabuk seviyeleri kalınlık olarak birkaç mm'den birkaç cm'ye kadar değişir. Doğrudan ayrılmış volkanik malzeme üzerinde çökelmiş kristalin kabuk traverten tabakaları mor-pembe rengi ile dikkat çeker (Şekil 6.4a). Kalsit (veya aragonit) kristalleri depolanma yüzeyine dik konumda gelişmiştir. Mineralojik olarak kabuklar, kalsit ve/veya aragonit bileşimlidir (Şekil 6.4c ve Şekil 6.5a-b).

Kristalin kabuk tipi travertenin yamaç ve şelale fasiyeslerinin önde gelen litotiplerinden birisi olduğu birçok çalışmada vurgulanmıştır (Chafetz ve Folk,1984; Guo ve Riding, 1998; Jones ve Renaut, 2008; Özkul vd., 2013, 2014). Çalışma alanında, kristalin kabuk litotipi yamaç, şelale, kaynak tümsekleri ve traverten kulelerinin başlıca bileşenidir. Bu tip travertenler, hızlı CO<sub>2</sub> kaçıışı ile birlikte CaCO<sub>3</sub> bakımından doymun ve hızlı akan sular tarafından eğimli depolanma yüzeylerinde çökeltmiştir.



Şekil 6.4. Kristalin kabuk litotipi. (a) Pembe renkli kristalin kabuk (HSW kuyusundan aşağı inen patika üzerindeki kaynağın, yaklaşık 45 m doğusu). (b) Pembe renkli kristalin kabuk örneğinin mikroskop görüntüsü (tek nikol). (c) Açık renkli-beyaz kristalin kabuk litotipi, üstte depolanma yüzeyinde mikroteras yapıları gelişmiştir. (d) Açık renkli-beyaz kristalin kabuk litotipinin yandan görünümü. (c) ve (d) de ölçek: madeni para (1TL) 26 mm çapında.

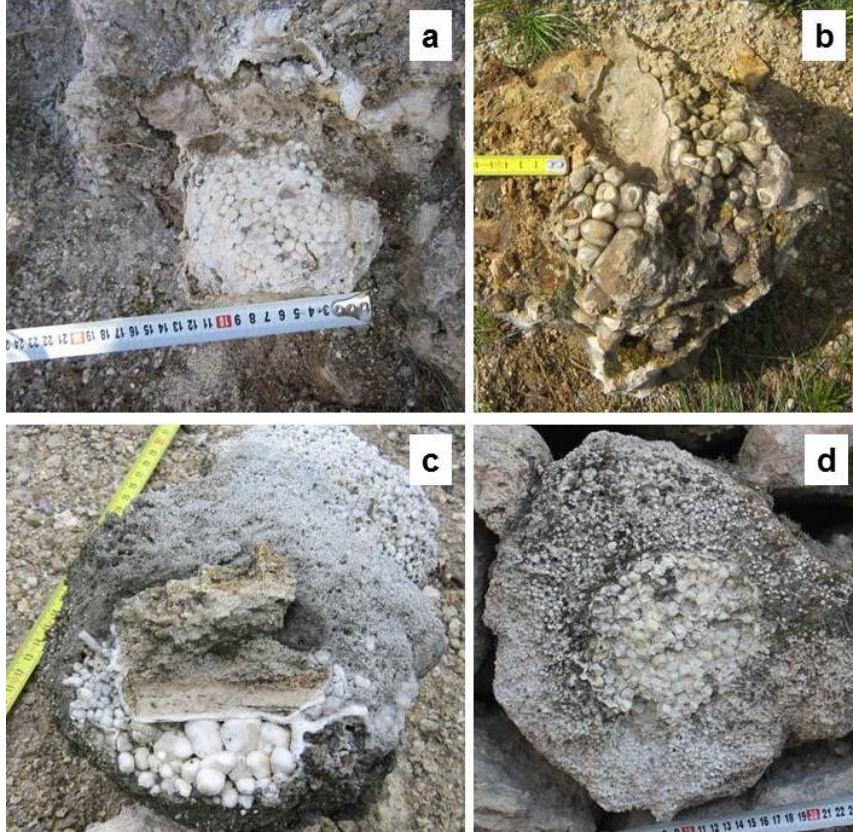


Şekil 6.5. Yarı güncel kristalin kabuk tipi bir traverten örneğinden (HİS-84) alınan SEM görüntüleri. (a) Büyük çapta aragonit kristallerinden oluşmuş kristalin kabuk tipi traverten (b) Az da olsa rombohedral kalsit kristalleri (okla işaretli) içeren aragonitçe zengin kristalin kabuk görüntüsü.

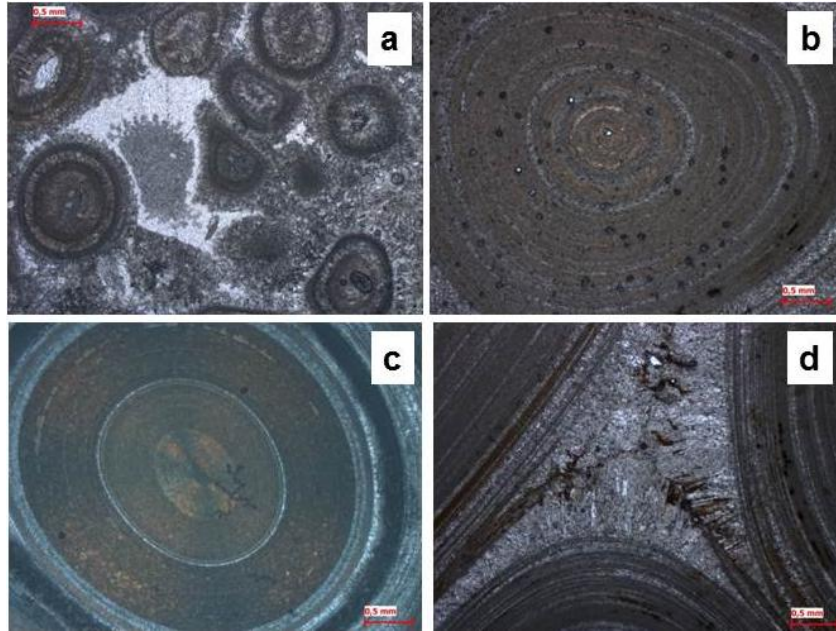
#### 6.1.4. Zarflı Taneler

Zarflı taneler (Ör., oolit, pizolit), kaynak ağızlarında oluşmuş taneli bir traverten litotipidir. Torba ya da tıkaç şeklinde bulunur (Şekil 6.6). Zarflı taneler, tane boyu açısından farklılıklar gösterir. Tane çapları mm ile cm arasında değişir. (Şekil 6.6a-d). Bazı zarflı taneler silis bileşimlidir (Şekil 6.6b). İnce kesitlerde taneler iç içe, mikrit ve sparit-mikrosparit düzeylerinden meydana gelmiştir (Şekil 6.7a-c). Mikritik düzeyler koyu renkli, buna karşılık sparitik düzeyler açık renklidir (Şekil 6.7c). SEM görüntülerinde de mikrit ve sparit düzeyleri belirgin bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 6.8).

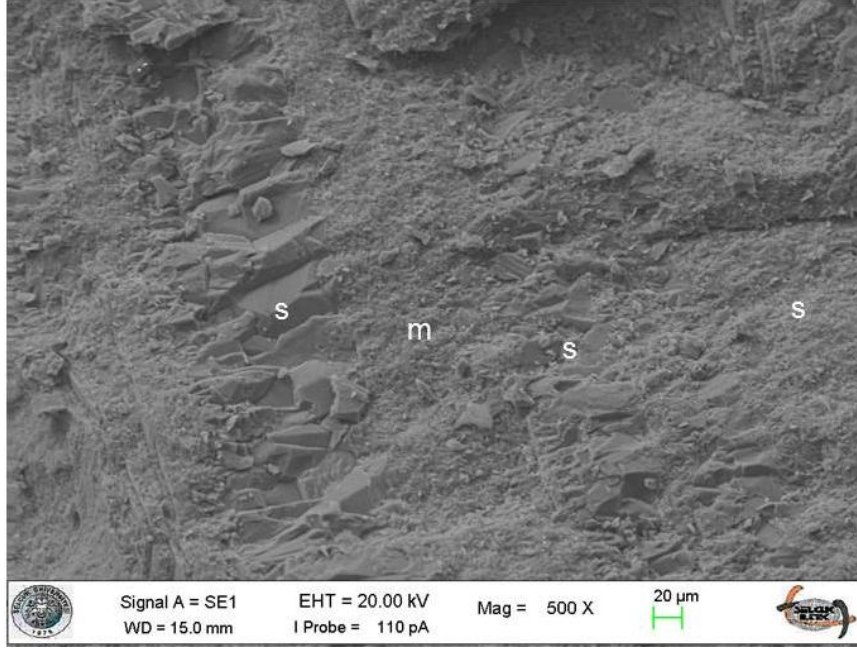
Pizolit taneleri fokurdayan-kaynayan ve dolayısı ile çalkantılı, yüksek enerji şartlarında kaynak ağızlarında meydana gelmiş zarflı tanelerdir. Bu tür traverten oluşumları önceki bazı çalışmalardan rapor edilmiştir (Richter ve Besenecker, 1983; Guo ve Riding, 1998; Özkul vd., 2013, 2014).



Şekil 6.6. Pizolit traverten litotipinin arazi görünüşleri (a-d).



Şekil 6.7. Zarflı tanelerin mikroskop görüntüleri (a-d). (a) İç içe tekrarlanan sparit ve mikrit düzeylerinden oluşmuş zarflı taneler. (b, c) Çoğunlukla mikrit (koyu renkli), az miktarda sparit (açık renkli) düzeylerden kurulu bir zarflı tane. (d) Zarflı taneler arasında açık renkli, ışınal sparit çimento.



Şekil 6.8. Bir zarflı tanenin (pizolit) taramalı elektron mikroskopundaki görünümü. Birbiri üzerinde gelişmiş konsantrik halkalar kaba sparit (s) ve ince mikrit (m) düzeylerinden oluşmuştur.

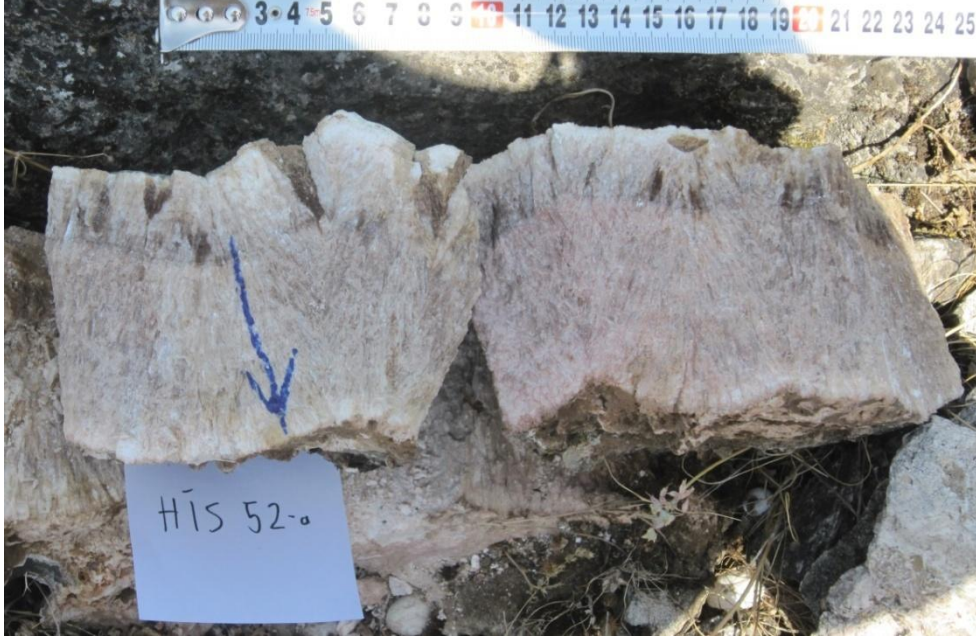
#### 6.1.5. Bantlı traverten

##### *Tanım*

Bantlı traverten, açılma çatlaklarının duvarlarına yapışık, düşey-düşeye yakın konumlu, iri kristalli sıkı bir traverten litotipidir (Şekil 6.9). Tekçe bantlar genellikle gri-kahve-mor renkli olup, kalınlıkları 20 cm'ye kadar çıkmaktadır (Şekil 6.10).



Şekil 6.9. Hisaralan jeotermal alanında yer alan KB gidişli traverten sırtının merkezi açılma çatlığında düşey bantlı traverten. Kalınlık: ~20cm.



Şekil 6.10. Hisaralan jeotermal alanında yer alan KB gidişli traverten sırtının kuzey kesiminden alınmış düşey bantlı traverten örneği.

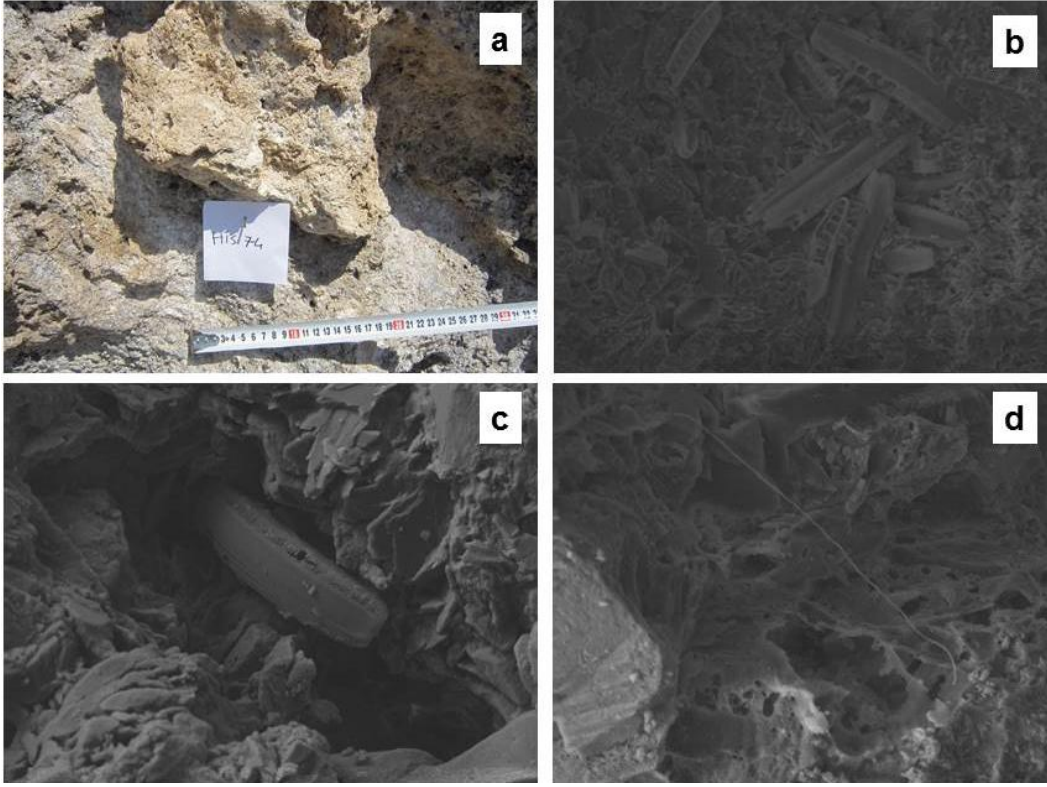
### **Yorum**

Bantlı traverten, açılma çatlakları ve/veya fay düzlemleri boyunca boşalan termal suların çatlak duvarlarında gelişmiş iri kristalli bir traverten litotipidir (Şekil 25). Bantlı travertenler çatlak duvarlarından çatlak boşluğuna doğru gençleşirler (Altunel ve Hancock, 1993). Bantlı travertenler açılma çatlığının genişlemesine paralel olarak kalınlaşırlar.

### **6.1.6. Mikrobiyal Traverten**

#### **Tanım**

Traverten kulelerinin dış yüzeylerinde görülen, genellikle açık renkli, boşluklu, kaba lamine/ince tabakalı bir traverten tipidir (Şekil 6.11). SEM görüntülerinde bol miktarda diatom ve mikrobiyal filamentlere rastlanmıştır (Şekil 26b,c,d). Çalışma alanının batısında, Serin Dere'deki aktif bacaların tepe noktalarından aşağı doğru beyazdan yeşile-kahverengiye değişen mikrobiyal yaygılar gelişmiştir (Şekil 6.12). Beyaz renkli yaygılar kulelerin tepe noktasına yakın konumda, daha yüksek sıcaklık koşullarında ortaya çıkmışlardır.



Şekil 6.11. Traverten kulesinin dış yüzeyinde gözlenen mikrobiyal traverten litotipi. Kulenin tabanından ~50-55cm yukarıda, BKB'ya bakan bir yüzey ( $285^\circ$ ) krem renkli, mikro boşluklu örnek (HİS-74 nolu örnek). (b) Mikrobiyal traverten örneğinde taramalı elektron mikroskopunda gözlenen diyatome kavkıları. (c) Diyatome kavkısının yakından görünümü. (d) Mikrobiyal filamentler.



Şekil 6.12. Çalışma alanının batısında Serin Dere'deki bir aktif bacanın dış yüzeyinde gelişmiş mikrobiyal yaygılar. Kulenin tepesinden çıkan sıcak su yanlardan aşağı doğru süzülürken mikrobiyal yaygılar beyazdan yeşile ve kahverengiye dönüşür. Kaynak ağzının çapı: ~10 cm. (Koordinat:  $39.27470^\circ$ ,  $28.31894^\circ$ )

## **Yorum**

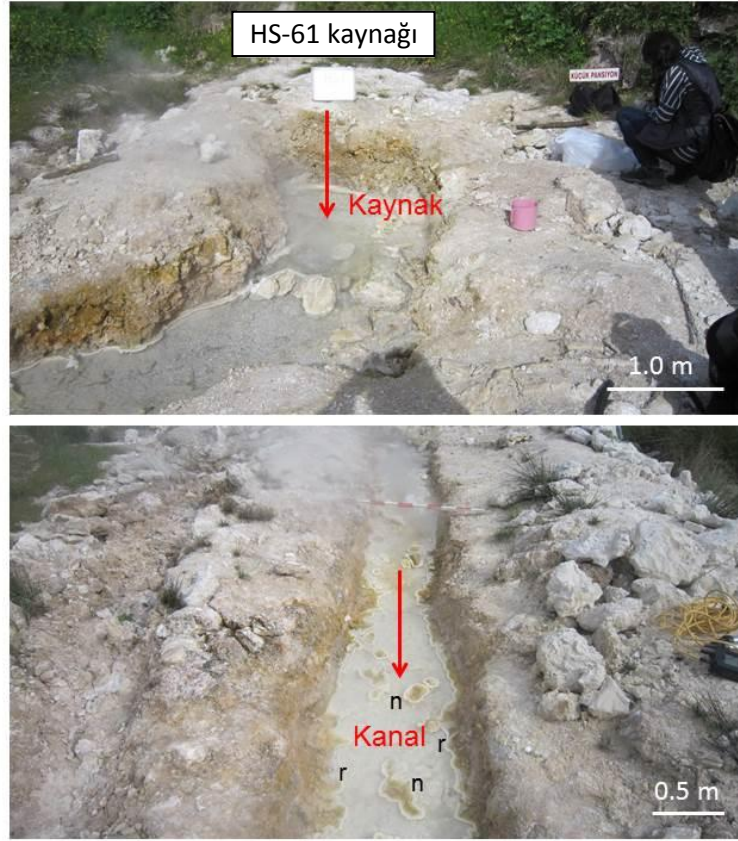
İnceleme alanında mikrobiyal travertenler, kulelerinin dış yüzeylerinde tepedeki kule deliğinden çıkan sıcak suların aşağı doğru yavaş ve ince bir film şeklinde süzülürken ortaya çıkan mikrobiyal yaygıların  $\text{CaCO}_3$  ile kaplanması sonucu oluştukları düşünülmektedir. Aktif durumda mikrobiyal yaygılar su sıcaklığındaki azalmaya bağlı olarak aşağı doğru beyazdan yeşile ve daha sonra kahverengine dönüşmektedir.

## **6.2. Traverten Depolanma Morfolojileri**

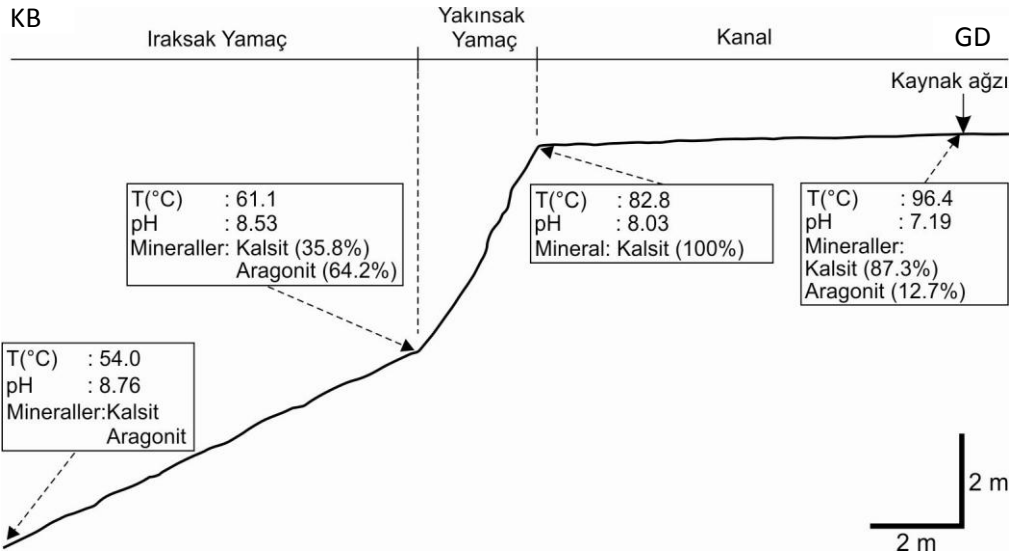
Hisaralan Jeotermal Alanı'nda gözlenen başlıca depolanma morfolojileri kaynak ağzı-boşalım kanalı, yamaç-şelale, kaynak tümseği, traverten kuleleri (konileri) ve traverten sırtı gelişmiştir. Bunlar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

### **6.2.1. Kaynak Ağzı – Boşalım Kanalı**

Aktif kaynak ağzları 1.0-1.5 m çapında bir alanla temsil edilir (Şekil 6.13). Akış yönünde kaynak ağzı boşalım kanalına geçer. Kanal boyları ve genişlikleri farklıdır. Örneğin çalışma alanının doğusunda HS-61 kaynağı ( $T=93^\circ\text{C}$ ) akış yönünde kanalın uzunluğu 11 m, genişliği 40-125 cm ve derinliği 5-10 cm olan bir boşalım kanalına geçer (Şekil 6.13). Kaynak alanının merkezinde fokurdayan ve gaz çıkışlarının da olduğu kaynak yer alır. Akış yönünde sıcaklık azalırken, pH değerleri artar. Kaynakta  $\text{pH}=7.19$  iken, akış aşağıda, ıraksak yamaç eteğinde 8.76'a yükselmektedir (Şekil 6.14). Kaynak ağzlarını en iyi temsil eden oluşumların başında zarflı tane toplulukları gelir (Şekil 6.6). Bu zarflı tane topluluklarına pasif kaynak ağzlarında sıkça rastlanır. Zarflı taneler dışında, aktif boşalım kanalı içine ve kanal kenarına tutunmuş nilüfer yaprağı (lilypad) ve rafı (ledge) traverten litotipleri dikkat çeker.



Şekil 6.13. Kaynak ve boşalım kanalından arazi görünümüleri. Kaynağın kenarlarına tutunmuş açık renkli rafı traverten oluşumları dikkati çeker. Kaynak, akış aşağı yönde boşalım kanalına geçer. Boşalım kanalı içinde ve kenarlara tutunmuş nilüfer yapıları (n) ve rafı travertenler (r) gelişmiştir. (Koordinat: 39.26925°, 28.31817°).



Şekil 6.14. HS-61 kaynağının akış güzergahı boyunca şematik bir boyuna kesit. Şekil üzerinde akış aşağı yönde sıcaklık (T°C), pH ve traverten örneklerinin mineral bileşimi gibi özelliklerin değişimleri de gösterilmiştir. Kaynak ile yakınsak yamaç arasında kanal uzunluğu: ~11m'dir.



### 6.2.2. Yamaç-Şelale Depolanma Morfolojisi

Hisaralan Jeotermal Alanı'nda bazı aktif ve aktif olmayan kaynak önlerinde yamaç-şelale tipi depolanma morfolojileri gelişmiştir (Şekil 6.15a, b). Bu depolanma şeklinin yüksekliği 8 m, yanal genişliği 70 m'ye kadar ulaşmaktadır. Bu depolanma morfolojisinde baskın traverten litotipi kristalin kabuktur.



Şekil 6.15. Aktif ve fosil yamaç-şelale tipi depolanma morfolojilerinin arazi görünümü. (a) HS-61 kaynağının akış aşağısında aktif bir yamacın yakınsak kesiminin önden (cepheden) görünümü (GD'ya bakış), (b) Aktif olmayan bir yamaç-şelale morfolojisinin cepheden görünümü. (Küçük Pansiyonun 40 m KD'su, GD'ya bakış)

Aktif yamaçlarda suyun bol ve hızlı aktığı orta kesim beyaz, yanlar mikrobiyal faaliyetler nedeniyle renkli (yeşil, kahve v.b.) görünmektedir (Şekil 6.15a). Eğimli depolanma yüzeyleri genellikle mikroteras havuzları ile kaplıdır.

### 6.2.3. Kaynak Tümseği

Hisaralan Jeotermal Sahası'nda diğer bir traverten depolanma morfolojisi de kaynak tümseğidir (Şekil 6.16a-d). Kaynak tümsekleri çevrelerine göre pozitif rölyef oluştururlar. Tümseklerin yükseklikleri 0.5-1.0 m, genişlikleri 6-7 m arasında değişir. Tümseğin zirvesinden itibaren farklı yönlerde açılma çatlakları gelişmiştir (Şekil 6.16b-d). Genişlikleri

10-40 cm arasında değişen bu çatlakların duvarları düşey bantlı traverten ile kaplanmıştır (Şekil 6.16c, d). Tümsek yüzeyi üzerinde yer yer zarflı tanelerden (oolit, pizolit) oluşmuş cepler ya da yamalar bulunmaktadır. Bu zarflı tane cepleri, tümsek üzerindeki kaynak çıkışlarının birer kanıtıdır.



Şekil 6.16. Hisaralan jeotermal sahasında travertenlerde gözlenen kaynak tümseği depolanma morfolojisinin arazi görünümleri. (a) Kaynak tümseği, çevresine göre pozitif bir rölyef oluşturur (kuzeye bakış), (b) Çalışma alanının batısında aktif olmayan bir kaynak tümseğinin yakından görünümü (Koordinat: 39.27222°, 28.31905°). Tümseğin altındaki boşluk, ayrışmış volkanik malzemenin uzaklaşması sonucu ortaya çıkmıştır. (c) Çalışma alanının doğusunda fosil bir kaynak tümseği (Koordinat: 39.26936°, 28.31837°), (d) Çalışma alanının batısında, bir kaynak tümseği üzerinde farklı yönlerde gelişmiş açılma çatlakları, yer yer zarflı tane (pisoid) cepleri ve volkanik kayaç parçaları gözlenir.

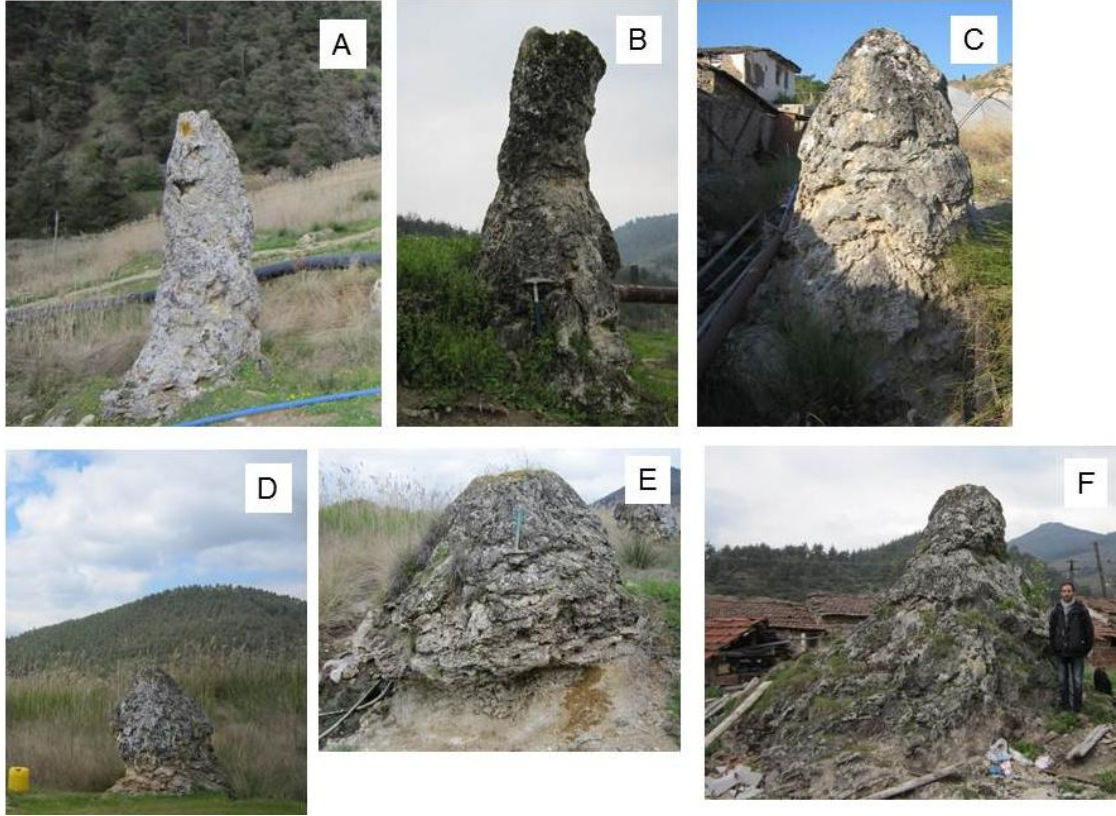
Kaynak tümseklerinin oluşumunda, sıcak suların kaynak ağızlarında kalsit ve aragonit gibi karbonat mineralleri bakımından doygun hale gelmesi, artezyen özelliğe sahip olması önemli rol oynamış olmalıdır. Tümsek üzerinde farklı yönlerde açılma çatlaklarının ortaya çıkmasında, yukarı doğru basınç uygulayan sıcak akışkanın rolü olmuş olmalıdır.

#### 6.2.4. Traverten Kuleleri (Konileri)

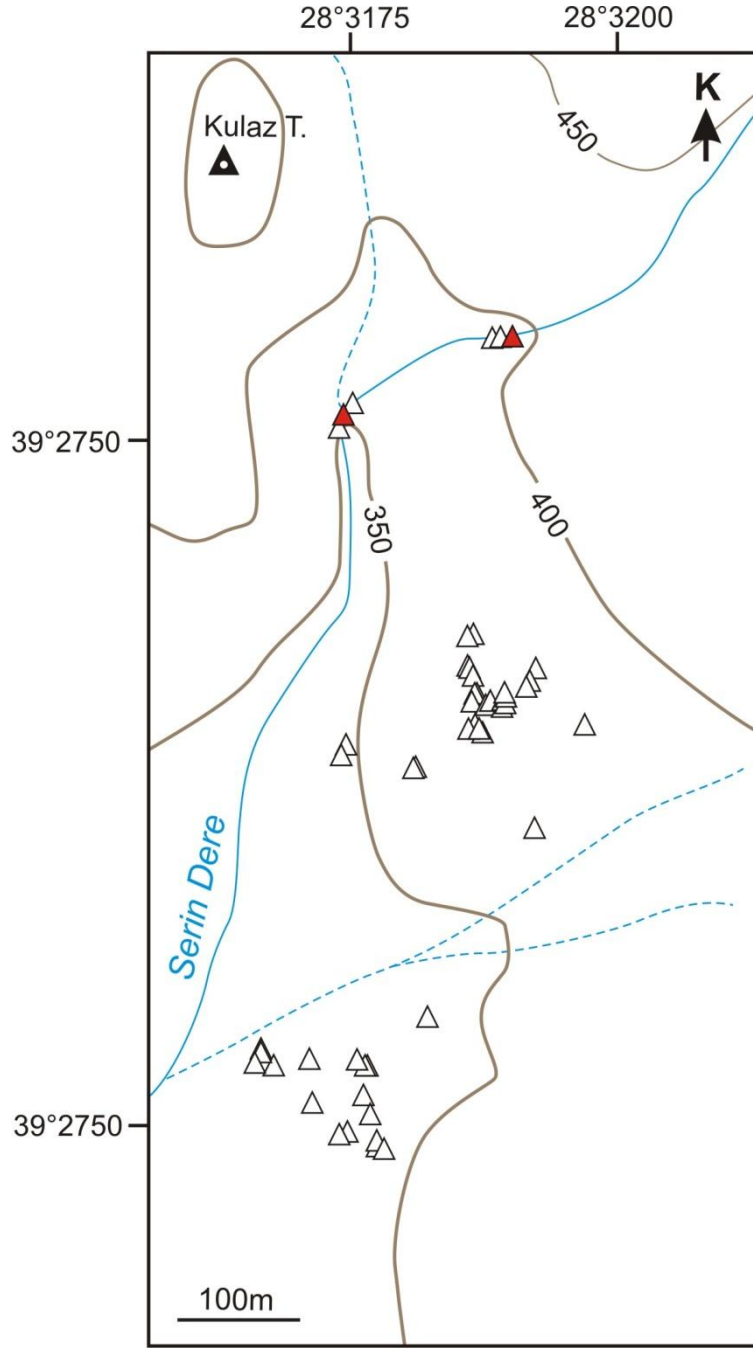
Traverten kuleleri (konileri), Hisaralan Jeotermal Sahası'nın en tipik traverten depolanma morfolojisidir (Şekil 6.17). Arazi çalışmaları sırasında, deniz seviyesine göre 320 m ile 403 m arasında, irili ufaklı 57 kadar traverten kulesi ya da konisi tespit edilmiştir (Şekil 6.18).

Kulelerin boyları (yükseklikleri) en fazla 4.8 m (Şekil 6.17a-c), taban genişlikleri 4.6 m'dir. Kule boylarının %44'ü 1 ile 2 m arasında değişir. Kulelerin tepelerinde dairesel, oval veya merceksi şekilli, genişlikleri birkaç cm ile 70 cm arasında değişen delikler/bacalar yer alır. Baca boşluğunun duvarları kahverengi-gri renkli, iri kristalli bir tabaka ile kaplıdır Kristalin tabakanın kalınlığı 1 cm ile 5 cm arasında değişir. Kristaller baca duvarından boşluğa doğru gelişmiştir (Şekil 6.20). Kulelerin dış kısımları ise kristalin kabuk, mikrobiyal traverten gibi değişik traverten litotiplerinden meydana gelmiştir.

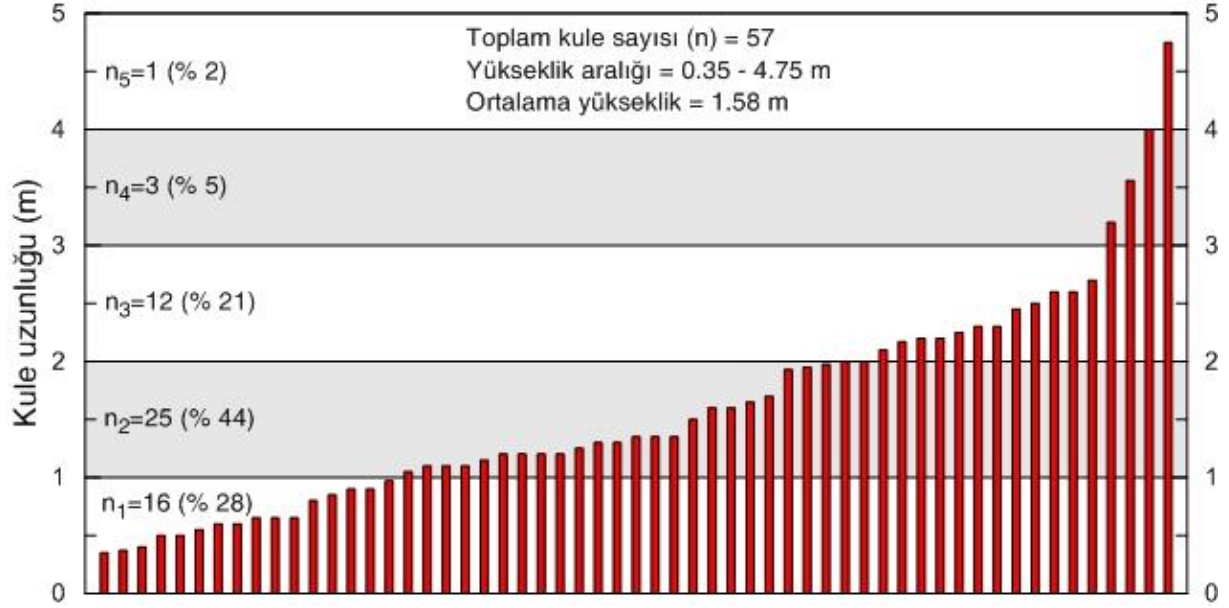
Günümüzde birkaçı dışında traverten kulelerinin oluşumu durmuştur. Az sayıdaki aktif kule oluşumları, çalışma alanının batısında Serin Dere yatağı içinde yer almaktadır (Şekil 6.21). Kuleler tek başına veya gruplar halinde bulunur. Bazı kuleler, belirli bir hat üzerinde dizilirken, bazıları da gelişi güzel dağılmış durumdadır. Bacaların üst kısmındaki beyazlık aşağı doğru yerini yeşil-kahverengi bir mikrobiyal örtüye bırakmıştır (Şekil 6.21b,c).



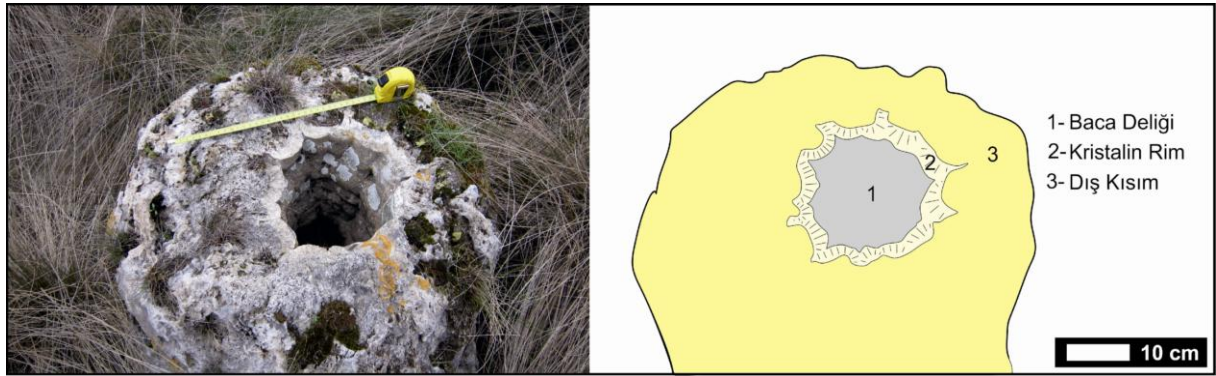
Şekil 6.17. Traverten kulelerinin (A-D) ve konilerinin (E, F) arazi görünüşleri. A) Çalışma alanının batısında 3.5 m yüksekliğinde bir kule (Koordinat: 39.27208°, 28.31844°, KB'ya bakış, arka planda jeotermal sondaj kuyusundan yamaç aşağı güneye inen jeotermal akışkan iletim hattı). B) KB gidişli traverten sırtının ekseninde gelişmiş, 2.67 m yüksekliğinde bir kule. C) Çetin Pansiyon ile Küçük Pansiyon arasında, yolun 12 m kuzeyinde, 1.97 m yüksekliğinde bir traverten kulesi. D) 2m yüksekliğinde, üst kısmı koni şeklinde bir traverten kulesi. E) Alt kısmı aşınmış 1.8 m yüksekliği olan bir traverten konisi. F) Çetin Pansiyon ile Küçük Pansiyon arasında, yola bitişik bir traverten konisi. Yükseklik: 2.5 m, taban genişliği: 1.75 m (Koordinat: 39.26928°, 28.31627°).



Şekil 6.18. Hisaralan jeotermal alanındaki traverten kulelerinin dağılımı (kırmızı üçgen aktif, beyaz üçgen pasif kule ve konileri simgelemektedir).



Şekil 6.19. Traverten kulelerinin uzunluk (=yükseklik) dağılımı (57 ölçü).

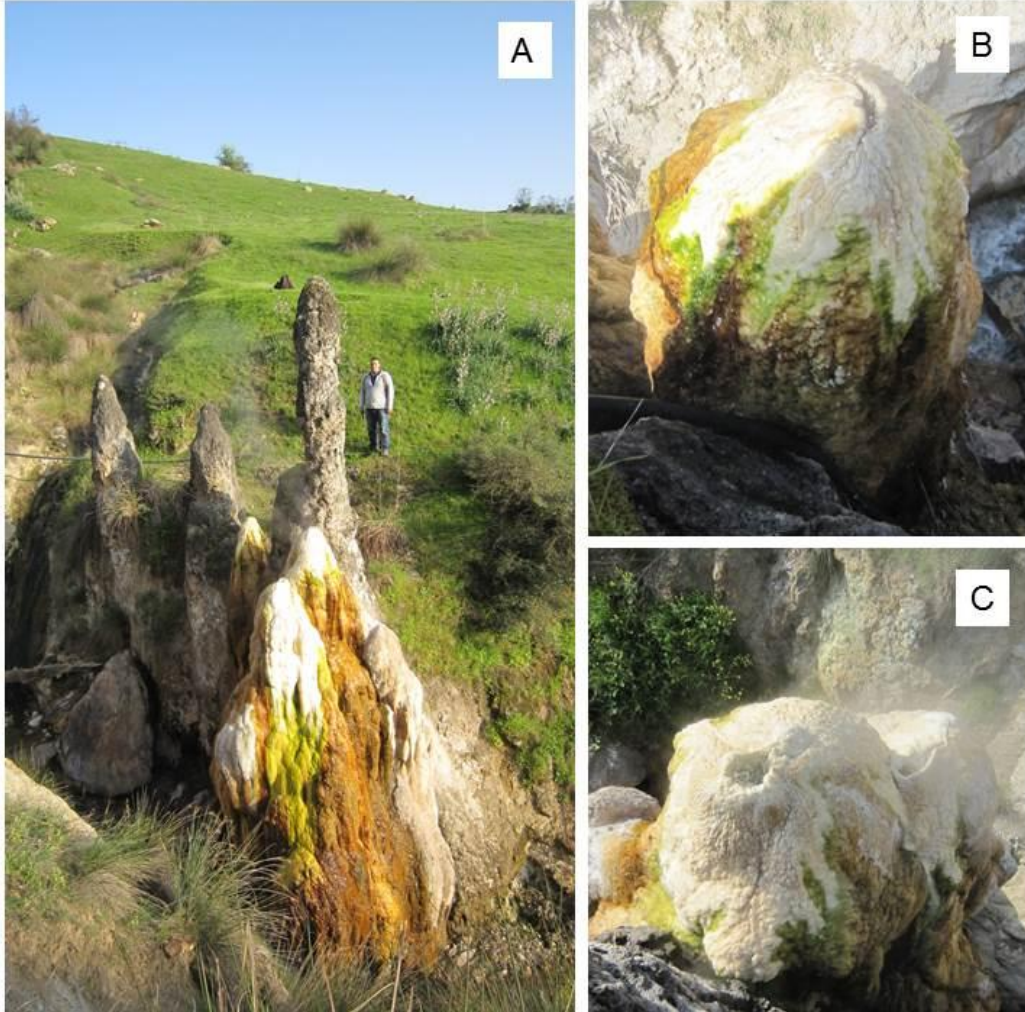


Şekil 6.20. Pasif bir kulenin üstten görünümü. Ortadaki baca duvarları kristalin bir tabaka ile kaplanmıştır. Çizimde (1): Baca duvarlarını kaplayan ışınal kristalin kabuk, (2): Baca deliği, (3): Kulenin dış kısmı.

### 6.2.5. Traverten Sırtı

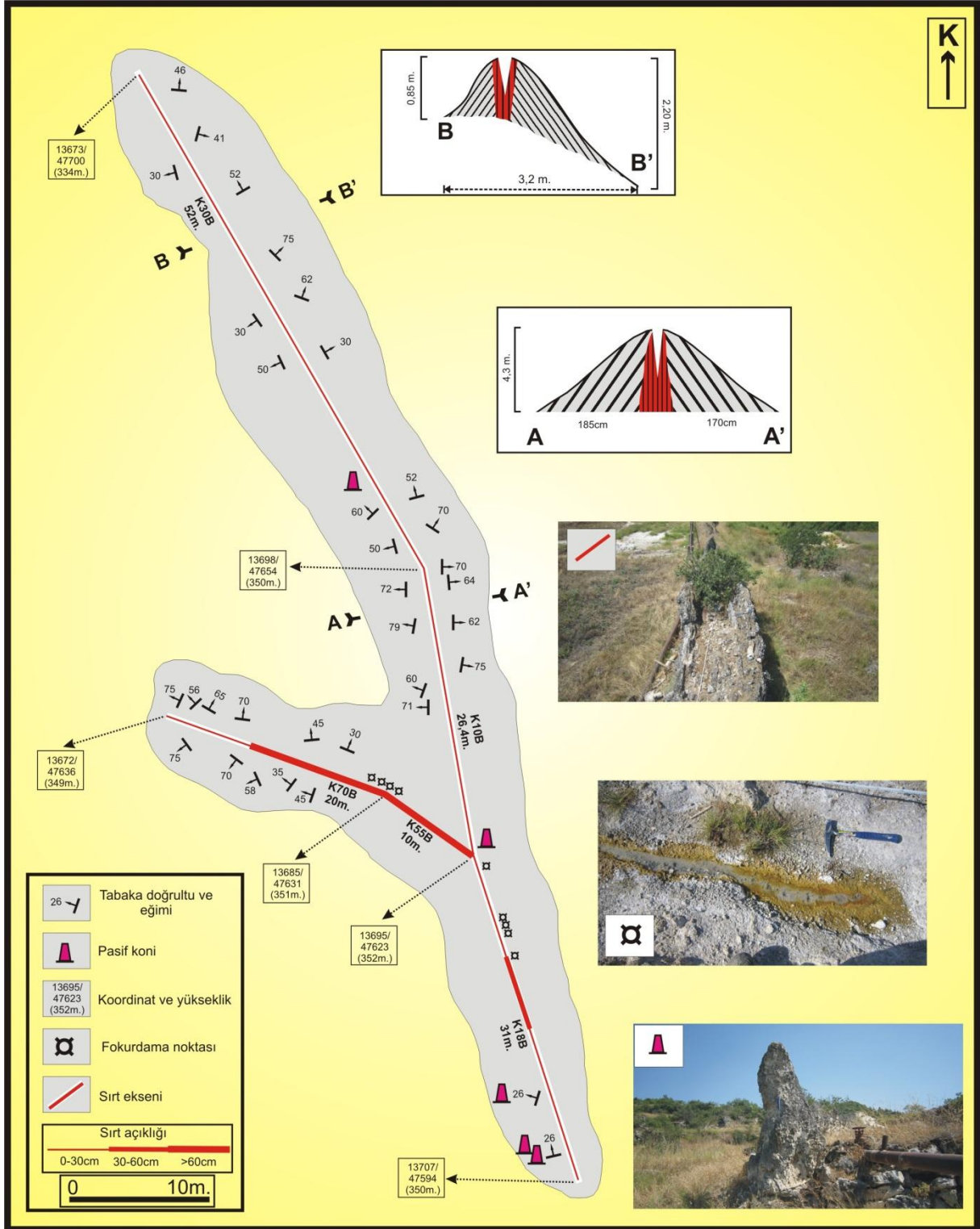
Hisaralan jeotermal sahasında KB-GD doğrultusunda uzanan sırt eksenini, güney ucundan itibaren 31. metrede iki kola ayrılmakta ve yer yer doğrultuda sapmalar görülmektedir (Şekil 6.22). Eksenin uzun kol uzunluğu 109 metre, kısa kol uzunluğu ise 30 metredir. Sırt ekseninin uzun kolunun doğrultusu  $K18^{\circ}B$ ,  $K10^{\circ}B$  ve  $K30^{\circ}B$  arasında, kısa kolu ise  $K55^{\circ}B$  ve  $K70^{\circ}B$  arasında değişmektedir. Sırt eksenini üzerindeki açılma çatlaklarının genişliği 10 -173 cm arasında değişmektedir. Çatlak duvarları gri kahve renkli, iri kalsit kristalli düşey bantlı travertenle kaplıdır. Bantlı travertenin kalınlığı 3 cm ile 16 cm arasında değişir. Sırtın kanatlarında kristalin kabuk tipi tabakalı travertenlerin eğimleri oldukça yüksek olup,  $25-80^{\circ}$ 'dir Sırtın diğer önemli bir özelliği, gerek kanatlarda ve gerekse eksen üzerinde traverten

kuleleri (konileri) gelişmiş olmasıdır. Ayrıca, kısa kolun ekseninde birkaç noktada fokurdama delikleri görülmüştür.



Şekil 6.21. (A) Aktif ve pasif traverten kulelerinin bir arada görünümü, (B) Aktif bir kulenin üstten görünüşü. (C, D) Sıcak suyun boşaldığı baca delikleri merceksi ve oval şekillidir. Çalışma alanının batısında, Serin Dere vadisinde üst kottaki baca grubu.

Hisaralan Jeotermal Sahası'nda ve çevresinde Miyosen yaşlı volkanik kayalarda ölçülen çatlaklar  $K0-30^{\circ}B$ ,  $K50-90^{\circ}B$  ve  $K30-50^{\circ}D$  arasında üç farklı doğrultuda yoğunlaşmaktadır. Yine sahada kayma çizgileri ile tanımlanan ve eğim atımlı bileşene sahip olan faylar da bu çatlakların doğrultusuna paralel-yarı paralel olarak üç farklı yönde doğrultuya sahiptir. Bu durumda, traverten sırt ekseninde ölçülen doğrultu değerleri ile çalışma alanının farklı kesimlerinde ölçülen çatlak ve fay düzlemleri arasında bir uyum söz konusudur. Sonuç olarak Hisaralan sırt tipi traverteni KD-GB yönlü bir açılmaya bağlı hidrotermal aktivite sonucu meydana gelmiştir.



Şekil 6.22. Hisaralan jeotermal alanında KKB doğrultulu traverten sırtı. Sırt ekseninde yer yer traverten kuleleri gelişmiştir.

### 6.3. XRD Analizleri

Travertenlerin mineralojik bileşimini kantitatif-yarı kantitatif olarak belirlemek için 34 adet traverten örneğinin XRD analizi yapılmıştır. XRD analiz sonuçlarına göre, Hisaralan Jeotermal Alanı'ndaki travertenlerde en yaygın mineral kalsittir (Tablo 6.1). Ancak bazı örneklerde % 1 ile %64 (HS.61-Tr6 nolu örnek) arasında değişen oranlarda aragonite rastlanmıştır. Ayrıca eser miktarda kuvars, feldispat ve jipse rastlanmıştır.

Tablo 6.1. Traverten örneklerinin XRD analiz sonuçlarına göre mineralojik bileşimleri.

Örnek No	Kalsit	Aragonit	Kuvars	Feldispat	Jips
HİS-1	X				
HİS-3	X		X	X	
HİS-4	X		X	X	
HİS-7	X		X		
HİS-15	X	X			X
HİS-16	X				
HİS-18	X				
HİS-30	X				
HİS-34	X				
HİS-39	X				
HİS-40	X				
HİS-41	X				
HİS-42	X				
HİS-43	X				
HİS-45	X				
HİS-46	X				
HİS-49	X				
HİS-50	X				
HİS-52a	X				
HİS-59	X				
HİS-63	X				
HİS-65	X				
HİS-67	X				
HİS-76	X	X			
HİS-83	X	X			
HİS-86	X				
HİS-88	X				
HS-61.Tr.1	X	X			
HS-61.Tr.2	X	X			
HS-61.Tr.3	X	X			
HS-61.Tr.4	X				
HS-61.Tr.5	X	X			
HS-61.Tr.6	X	X			
HS-61.Tr.7	X	X			



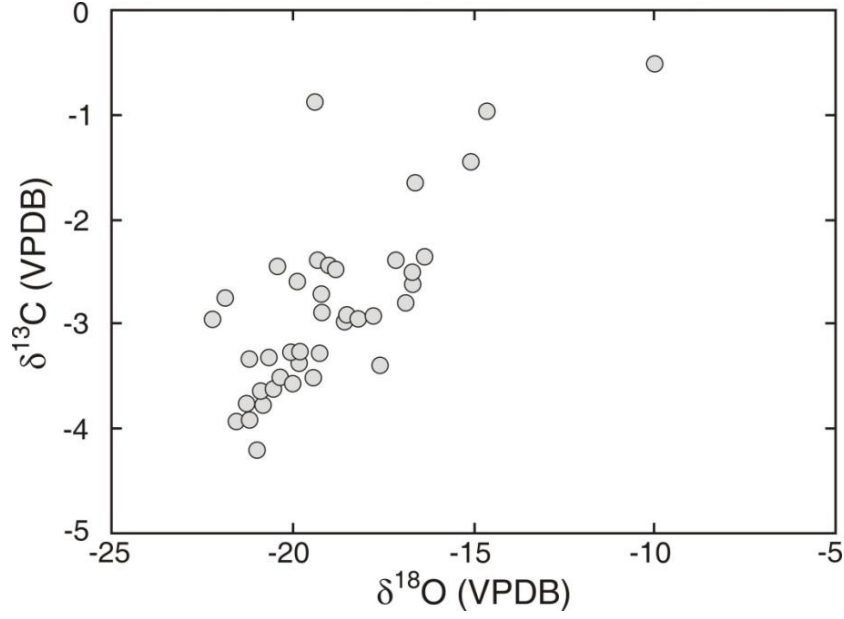
## 6.4. Jeokimyasal Çalışmalar

### 6.4.1. Travertenlerin İzotop Bileşimleri

Traverten çökellerinden alınan 41 adet örneğin duraylı karbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) değerleri  $-0,5$  ile  $-4,2\text{‰}$  (V-PDB) arasında, oksijen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) değerleri ise  $-22,19$  to ile  $-9,99\text{‰}$  (V-PDB) arasında değişir (Tablo 6.2, Şekil 6.23).

Tablo 6.2. Hisaralan travertenlerinin duraylı karbon ve oksijen izotop bileşimleri.

Örnek No	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)	Örnek No	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)
HS-61 TR1	-3,36	-21,15	HIS-39	-2,40	-19,27
HS-61 TR2	-2,46	-20,39	HIS-41	-3,40	-19,80
HS-61 TR3	-3,29	-20,03	HIS-42	-2,41	-17,11
HS-61 TR4	-3,79	-20,78	HIS-43	-2,97	-18,19
HS-61 TR5	-3,59	-19,96	HIS-45	-2,54	-16,66
HS-61 TR6	-2,73	-19,19	HIS-46	-2,93	-18,44
HS-61 TR7	-2,99	-18,55	HIS-49	-3,30	-19,25
HIS-1	-2,78	-21,86	HIS-50	-0,98	-14,61
HIS-1A	-3,64	-20,52	HIS-52A	-3,54	-19,42
HIS-2	-2,77	-21,79	HIS-52B	-3,66	-20,82
HIS-3	-1,67	-16,58	HIS-55	-3,53	-20,28
HIS-04	-3,96	-21,50	HIS-59	-3,94	-21,16
HIS-6	-2,97	-22,19	HIS-63	-0,90	-19,36
HIS-7	-4,23	-20,94	HIS-65	-3,41	-17,58
HIS-13	-2,81	-16,86	HIS-67	-0,53	-9,99
HIS-15	-3,33	-20,62	HIS-76	-3,28	-19,78
HIS-16	-2,94	-17,77	HIS-83	-2,47	-18,96
HIS-18	-3,79	-21,23	HIS-84	-2,61	-19,84
HIS-30	-2,38	-16,33	HIS-86	-2,90	-19,15
HIS-34	-2,65	-16,65	HIS-88	-1,47	-15,06
HIS-38	-2,49	-18,82			



Şekil 6.23. Hisaralan jeotermal alanından alınan traverten örneklerinin duraylı karbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ve oksijen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) değerlerinin dağılımı.

Negatif  $\delta^{13}\text{C}$  izotop değerleri, traverten oluşumunda magmatik kökenli  $\text{CO}_2$  katılımını işaret etmektedir. Element ve duraylı izotop verilerine göre incelenen traverten oluşumları derin dolaşımli hidrotermal sulardan çökelmiştir.

#### 6.4.2. Element Konsantrasyonları

Hisaralan Jeotermal Alanı'ndan alınan traverten örneklerinin element konsantrasyonları Tablo 6.3'de verilmiştir. Buna göre Ca değerleri 260643 ppm ile 394857 ppm değişir. Sr konsantrasyonları ise 11636 ppm ile - 515.8 ppm arasındadır. En yüksek Sr değerleri, 9930 ppm'e kadar, güncel ve yarı güncel örneklerden elde edilmiştir. Yüksek Sr değerlerine sahip örneklerler mineralojik olarak değişik oranlarda aragonit içerir. Bazı örneklerde  $\text{SiO}_2$  değerleri yüksektir. Ba 63 ppm'den 3434 ppm'e değişir.

#### 6.5. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ İzotop Analizleri

Toplam 26 adet traverten örneğinin  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop analiz sonuçları Tablo 6.4'de verilmiştir.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  değerleri 0.710024 ile 0.710396 arasında olup, ortalama 0.7101604'tür. Analiz sonuçları traverten litotiplerinden bağımsız olarak oldukça üniform bir dağılım gösterir.

Tablo 6.3. Hisaralan traverten örneklerinin element analiz sonuçları (ppm).

Sample No	Ca	Si	Fe	Mg	Mn	Sr	U	Th	Ba
HSK-2	3786	306600	34760	240	310	261	3.3	11.3	972
HSK-3	26143	285180	34061	540	697	272	3.3	10.4	1144
HSK-4	33643	277247	34550	480	620	357	2.9	11.7	570
HİS-1	382000	4107	1818	480	620	9525	<0.1	<0.2	1692
HİS-1a	381214	3127	2308	2220	2866	823	<0.1	<0.2	63
HİS-3	274571	96973	2028	1320	1704	3991	<0.1	0.4	1100
HİS-4	344071	33787	5455	1320	1704	1967	0.2	1.2	365
HİS-7	260643	111673	18814	2340	3021	516	1.1	3.8	239
HİS-15	376786	1680	1609	540	697	1530	<0.1	<0.2	151
HİS-16	349786	41813	4336	4440	5731	891	<0.1	<0.2	3434
HİS-18	380357	1400	3637	2400	3098	1310	<0.1	<0.2	161
HİS-30	299000	87967	1049	1620	2091	1276	<0.1	<0.2	1308
HİS-34	368286	17967	1259	1080	1394	3536	<0.1	<0.2	1354
HS.1-Tr.1	384000	140	350	780	1007	8698	<0.1	<0.2	946
HS.1-Tr.2	372786	4713	2937	1980	2556	4074	<0.1	<0.2	586
HS.1-Tr.3	378357	1820	3497	960	1239	5996	<0.1	<0.2	654
HS.1-Tr.4	379429	140	1888	2580	3330	2110	<0.1	<0.2	331
HS.1-Tr.5	373500	1680	2518	1200	1549	2776	<0.1	<0.2	459
HS.1-Tr.6	380000	793	2098	720	929	9336	<0.1	<0.2	1817
HS.1-Tr.7	345500	22493	1259	600	775	8450	<0.1	<0.2	2095
HİS-39	378357	140	1749	2940	3795	1373	<0.1	<0.2	141
HİS-41	385071	2520	3287	3780	4879	873	<0.1	<0.2	219
HİS-42	379643	280	1259	1680	2169	1287	<0.1	<0.2	136
HİS-43	383643	2333	629	420	542	2301	<0.1	<0.2	515
HİS-46	374214	5973	-	420	542	2486	<0.1	<0.2	115
HİS-49	386571	326	1958	2160	2788	738	<0.1	<0.2	78
HİS-50	384857	4853	909	300	387	5092	<0.1	<0.2	971
HİS-52a	381286	-	2028	3360	4337	1052	<0.1	<0.2	104
HİS-55	378786	5320	909	540	697	2425	<0.1	<0.2	343
HİS-59	385286	-	2728	1440	1859	1536	<0.1	<0.2	220
HİS-63	394857	793	1469	1380	1781	704	<0.1	<0.2	326
HİS-65	382143	420	2168	5160	6661	1085	<0.1	<0.2	192
HİS-67	382786	1353	3497	4320	5576	843	<0.1	<0.2	220
HİS-76	377714	2147	1958	1920	2478	2570	<0.1	<0.2	504
HİS-83	376071	6067	490	300	387	11636	<0.1	<0.2	2078
HİS-86	380929	467	2378	1080	1394	1637	<0.1	<0.2	152
HİS-88	382071	1493	1818	960	1239	2258	<0.1	<0.2	242

Tablo 6.4. Hisaralan jeotermal sahasından alınan traverten örneklerinin  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop analiz sonuçları.

Örnek No	ODTÚ		İSPANYA	
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm\text{Std Hata (x10}^{-6}\text{)}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm\text{Std Hata (x10}^{-6}\text{)}$
HS-61-Tr 1	0,710044	17	0,710068	3
HS-61-Tr 2	0,710050	14	0,710049	4
HS-61-Tr 3	0,710117	5	0,710052	3
HS-61-Tr 4	0,710029	15	0,710072	3
HS-61-Tr 5	0,710068	6	0,710070	3
HS-61-Tr 6	0,710024	9	0,710053	3
HS-61-Tr 7	0,710049	14	0,710044	3
HIS-1			0,710060	3
HIS-1A	0,710223	15	0,710174	3
HIS-4	0,710113	18		
HIS-6	0,710333	13		
HIS-7	0,710299	7		
HIS-15			0,710050	3
HIS-16			0,710137	3
HIS-18			0,710209	3
HIS-30			0,710188	4
HIS-34	0,710274	16	0,710175	3
HIS-39			0,710069	4
HIS-42	0,710148	18	0,710056	3
HIS-43			0,710069	3
HIS-46			0,710047	4
HIS-50			0,710131	3
HIS-52A			0,710137	3
HIS-65	0,710396	19		
HIS-84	0,710145	5		
HIS-88	0,710260	12		

### Yorum

Denizel karbonatlarda  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop değerlerinin jeolojik zamanlar boyunca farklılaştığı bilinmektedir. Travertenler ile aynı  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop değerlerine sahip denizel karbonatların traverten çökelişi için kaynak kaya olabileceği düşünülür. Denizli Havzası'nda Ballık Yöresindeki 2 traverten ocağında yapılan bir çalışmada,  $0.70785 \pm 0.00010$  ile  $0.70792 \pm 0.00010$  arasında değişen  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere göre, traverten oluşumuna kaynaklık yapan kayaçların Likya naplarının karbonat kayaları olduğu ileri sürülmüştür (Claes vd., 2015).

Hisaralan Jeotermal Sahası'nda çökelmiş travertenlerde  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop değerleri  $0.710024 \pm 0.000009$  ile  $0.710399 \pm 0.000019$  arasında değişir. Bu örneklerin Sr element konsantrasyonları 516 ile 9336 ppm arasındadır. Hisaralan Sr izotop değerleri, Ballık

(Denizli) travertenlerinden elde edilen Sr izotop değerleri Claes vd. (2015)'e kıyasla daha yüksektir. Bunun nedeni olarak, Hisaralan'da traverten kelten sıcak suların alttaki dasitik-riyolitik volkanik kayalarla olan etkileşimine bağlı olarak Sr izotop değerleri yükselmiş olmalıdır. Dolayısı ile Claes vd. (2015)'deki gibi kaynak kayacı belirlemeye yönelik yorum yapmak mümkün görünmemektedir.

## **6.6. U-Th Tarihlendirme Analizleri**

U-Th tarihlendirme analizleri için seçilmiş 20 adet traverten rneği nden bazılarında uranyum içeriğinin çok düşük (ppb düzeyinde) olması nedeniyle sadece 9 adedi üzerinde işlem yapılabilmiş ve 5 adedinden yaş verisi elde edilebilmiştir.

Elde edilen U-Th tarihlendirme sonuçları Tablo 6.5'de verilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi, U içeriğinin düşük olması nedeniyle yaş verilerinin hata payları yüksektir. Hatta bazı örneklerden hiçbir yaş verisi elde edilememiştir. Bu yüzden güvenilir yaş verileri oldukça sınırlı kalmıştır. Buna göre hata payı düşük verilere göre travertenlerin yaş konakları  $12.006 \pm 0.752$  (bin yıl), ile  $32.543 \pm 4,605$  (bin yıl) arasında değişmektedir.

Tablo 6.5. Traverten örneklerinden elde edilen U/Th yaşları (n.d.: tespit edilmedi).

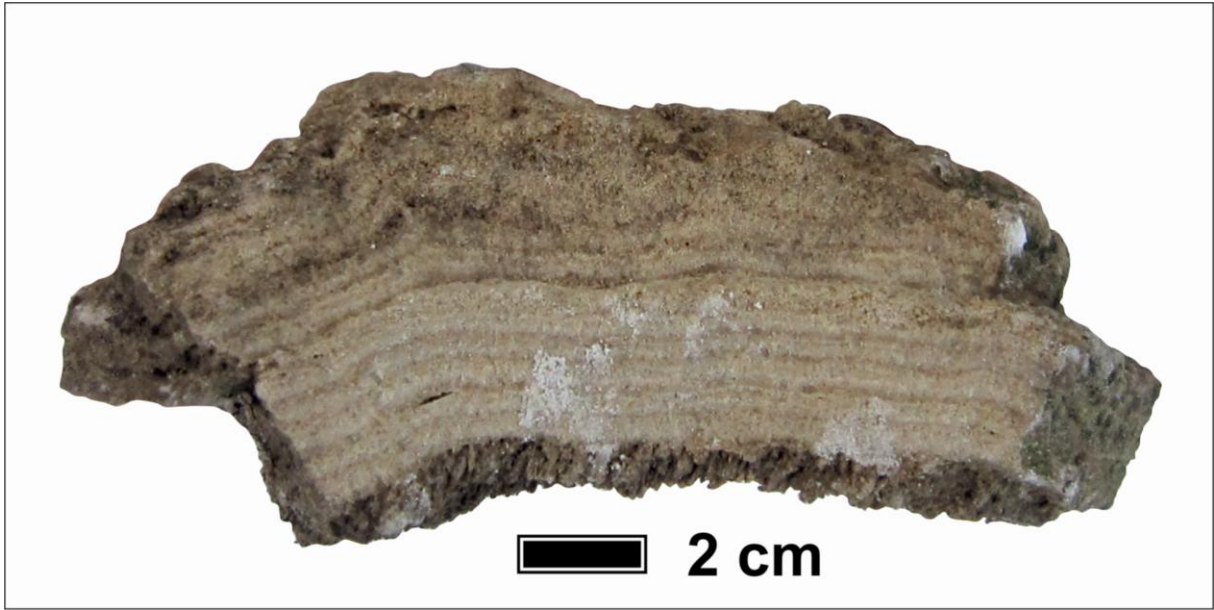
Örnek No	<sup>238</sup> U ppb	±	<sup>232</sup> Th ppb	±	<sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U	±	<sup>230</sup> Th/ <sup>234</sup> U	±	<sup>230</sup> Th/ <sup>238</sup> U	±	<sup>230</sup> Th/ <sup>232</sup> Th	±	Hesaplanan yaş (yıl)	Hata	Hesaplanan yaş (yıl)	Hata
HIS-1a	1,917	0,009	0,648	0,002	1,378	0,016	0,310	0,018	0,428	0,025	3,864	0,225	39,816	2,809	32,543	4,605
HIS-17	2,135	0,008	6,550	0,027	2,592	0,025	0,634	0,013	1,642	0,032	1,636	0,033	n.d	n.d	n.d.	n.d.
HIS-18	4,304	0,016	17,133	0,077	1,221	0,011	1,141	0,021	1,394	0,023	1,070	0,018	n.d	n.d	n.d.	n.d.
HIS-52a	8,146	0,034	0,484	0,002	1,568	0,013	0,114	0,004	0,179	0,006	9,195	0,317	13,115	0,488	12,006	0,752
HIS-86	5,026	0,021	5,443	0,026	1,340	0,012	0,291	0,006	0,390	0,008	1,101	0,023	37,017	0,974	10,593	15,855
HIS-23	1,129	0,006	14,218	0,061	2,575	0,029	2,137	0,032	5,503	0,066	1,336	0,016	n.d	n.d	n.d.	n.d.
HIS-39	4,177	0,017	0,280	0,001	1,548	0,012	0,139	0,006	0,216	0,009	9,842	0,396	16,242	0,712	14,977	0,961
HIS-50	2,503	0,009	6,482	0,026	1,309	0,011	0,813	0,019	1,064	0,024	1,256	0,028	163,405	8,484	90,542	97,322
HIS-90	3,936	0,018	19,264	0,097	1,180	0,010	1,225	0,017	1,446	0,019	0,903	0,012	n.d	n.d	n.d.	n.d.

## 7. EMENDERE TUFA ÇALIŞMALARI

### 7.1. Tufa Litotipleri

#### 7.1.1. Laminalı Tufa (=Stromatolitik Tufa)

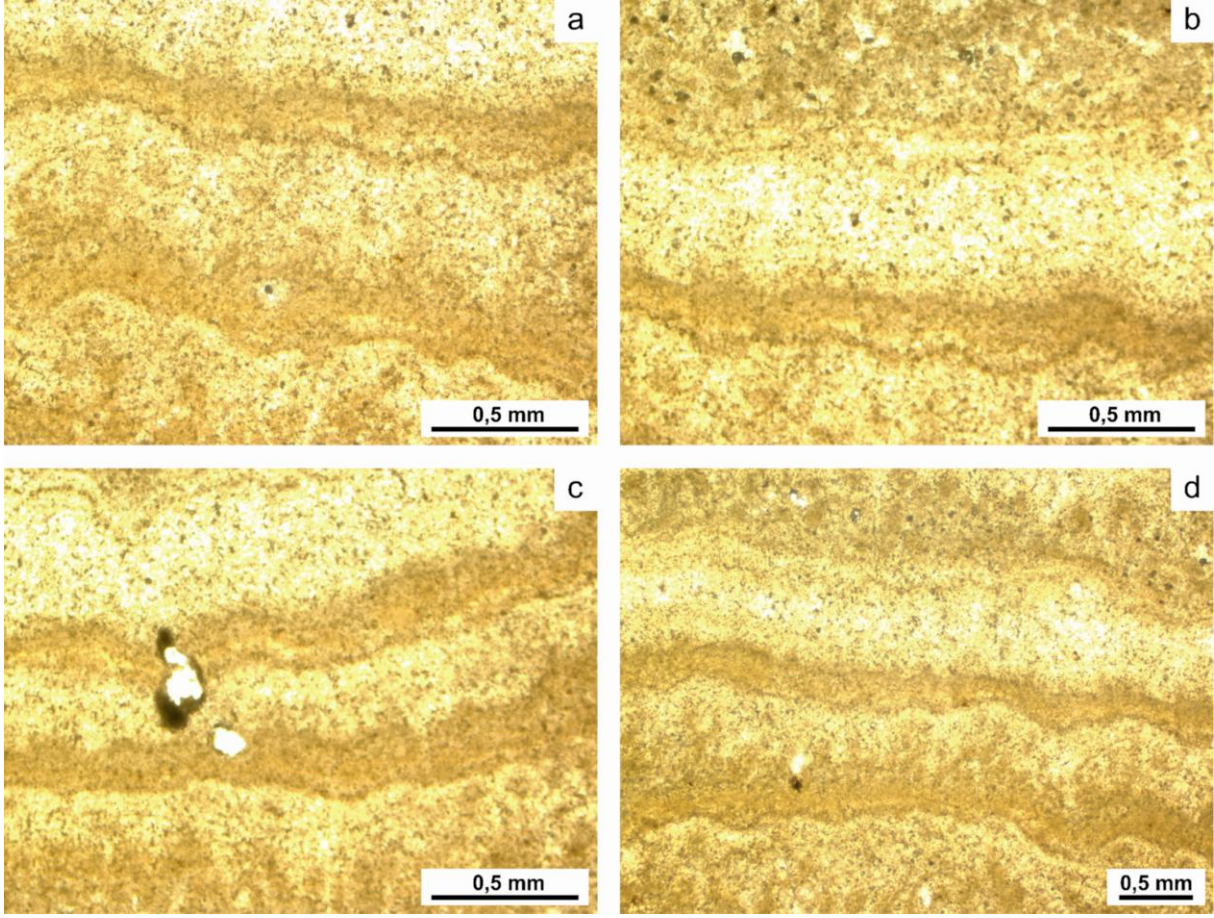
Emendere tufalarında gözlenen yaygın litotiplerinden birisidir. Laminalı iç yapıları vardır. Laminalar düzensiz olup, koyu renkli mikritik ve açık renkli sparitik düzeylerin araldanmasından oluşur (Şekil 7.1 ve 7.2). Kalınlık ve yanal yöndeki uzanımları değişkendir. Onkolitik, kırıntılı ve fitoklastik tufa litotipleri ile yanal ve düşey ilişkilidir.



Şekil 7.1. Laminalı (stromatolitik) tufa el örneği (EM-14 nolu örnek). Emendere, Saklıkent Nejdet Birtek Tesis alanı (Koordinat: 39.11527°, 28.13419°).

İnce kesit incelemelerine göre, düzensiz laminaların kalınlıkları en az 0.3 mm, en fazla 1.6 mm, ortalama 0.45 mm'dir. Düzensiz mikritik laminaların büyüme yönlerinde mikro çalı formları gelişmiştir (Şekil 7.2). Ayrıca açık renkli sparitik düzeyler mikroboşlukludur.

Suyun göreceli hızlı aktığı yüzeylerde (düşük eğimli yamaçlar ve katkatlarda) cyanobakteri, bakteri ve alglerin birbiriyle yerinde bağlanmasıyla oluşmuşlardır (Arenas-Abad vd., 2010; Özkul vd., 2010).



Şekil 7.2. Laminalı tufa litotipinin mikroskop görüntüleri (EM-14 nolu örnek).

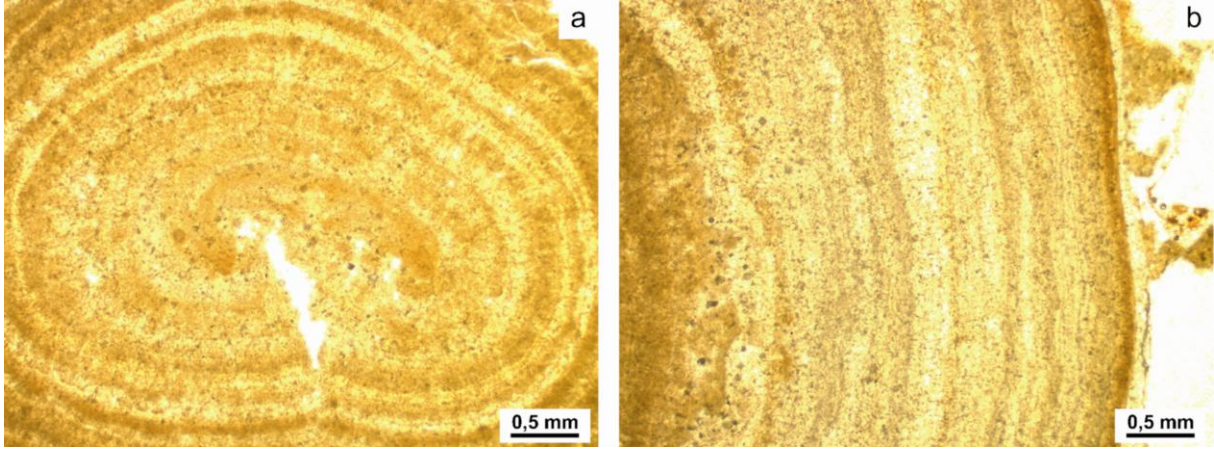
### 7.1.2. Onkolitik Tufa Litotipi

Onkolitik tufa litotipi silindirik, elipsoidal ve küresel şekilli tanelerin bir araya gelmesiyle oluşmuştur (Şekil 7.3). Tane boyları minimum 0.4 cm, maksimum 1.6 cm, ortalama 1.0 cm'dir.



Şekil 7.3. Onkolitik tufa litotipi arazi görünümü.





Şekil 7.4. Onkolitik tufa litotipinin mikroskop görünümü. Onkolit tanesinin merkezinde tufa kırıntısı yer alır (a), Ardalanan açık ve koyu renkli laminaların yakından görünümü (b).

Onkolit taneleri, açık renkli sparit-mikrosporit ve koyu renkli mikritik laminaların ardalanmasından oluşmuştur (Şekil 7.4). Tanelerin merkezinde tufa kırıntıları (Şekil 7.4), bitki kırıntıları ya da volkanik kayaç kırıntıları yer almaktadır.

Onkolitik tufa akarsu vadisinde kanal dolgusu, enine ve boyuna barlar şeklinde gözlenir. Onkolit taneleri düşük hızlı akışlar sırasında oluşur (Arenas-Abad vd., 2010).

### 7.1.3. Bryofit tufa

Aşağı doğru sarkmış bryofitlerin  $\text{CaCO}_3$  ile kaplanması sonucu oluşmuş bir tufa litotipidir. Asılı bryofit tufa perdelerinin bazıları aşağı doğru sarkmış silindir ya da sütun şeklindedir (Şekil 7.5). Sütunları uçları yuvarlak olup çapları 10-35 cm arasında değişir. Boşluklu bryofit tufa sarkıtları dıştan sıkı, boşluksuz ve kalınlığı 1-1.5 cm'yi bulan bir mikrit ve/veya sparit kabukla kaplanmıştır (Şekil 7.6). Enine dairesel kesitlerinde dairenin merkezinden dışa doğru ışınal bir yapı gözlenir (Şekil 7.5, 7.6). Asılı tufa perdelerinin altında birkaç metre genişliğinde mağara yer alır. Mağara tabanında dikit oluşumları gözlenir.

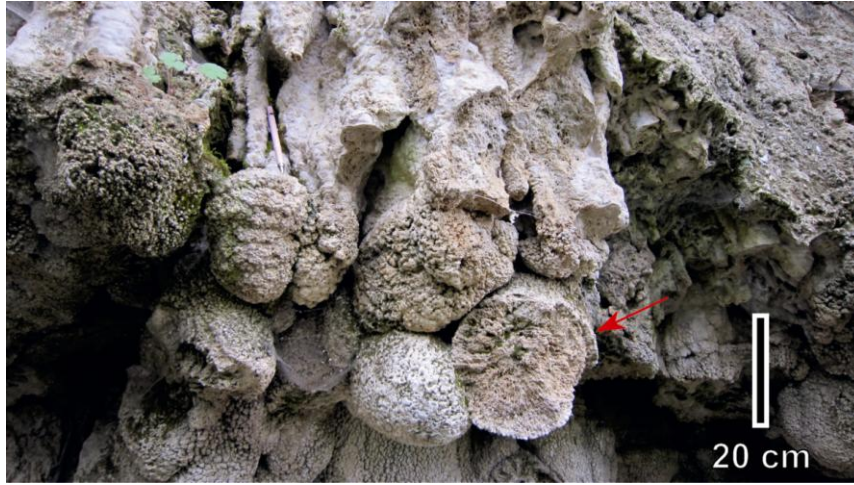
Şelale veya katkat (cascade) ortamlarının ön cephelerinde aşağı doğru gelişen makro ve mikro sucul bitkilerin, (Ör., bryofit) yerli yerinde  $\text{CaCO}_3$  ile birbirine bağlanması sonucu meydana gelirler (Arenas vd., 2010; Özkul vd., 2010; Vázquez-Urbez vd., 2012).

### 7.1.4. Fitoklastik Tufa

Yassı ve merceksi geometrili, tabaka kalınlıkları 10 cm'den metreye kadar değişen, bitki kırıntılarından oluşan bir tufa litotipidir (Şekil 7.7). Tabakalarda herhangi bir iç yapı gelişmemiştir. Bileşenler dal parçaları ve yaprak kalıpları (baskıları) ile temsil olunur. Bazı

yerlerde bu litotip bünyesine değişik oranlarda onkolit taneleri de katılmıştır. Gerek bitki kırıntıları, gerekse kırıntılar arasında yer alan boşluklar kısmen veya tamamen mikrit ve sparikalsit ile kaplanmıştır. Dal parçalarının uzun eksenleri az çok tabakalanmaya ya da eski akış yönüne paraleldir.

Bu litotip, parçalanmış / ufalanmış bitki kırıntılarının fluvyal tufa sistemi içinde kısa mesafede taşınıp tekrar depolanması ve  $\text{CaCO}_3$  ile kaplanması ve tutturulması sonucu oluşmuştur (Arenas vd., 2010). Yanal ve düşey yönde onkolit ve silisiklastik çakıltaşları ile dokanaktadır.

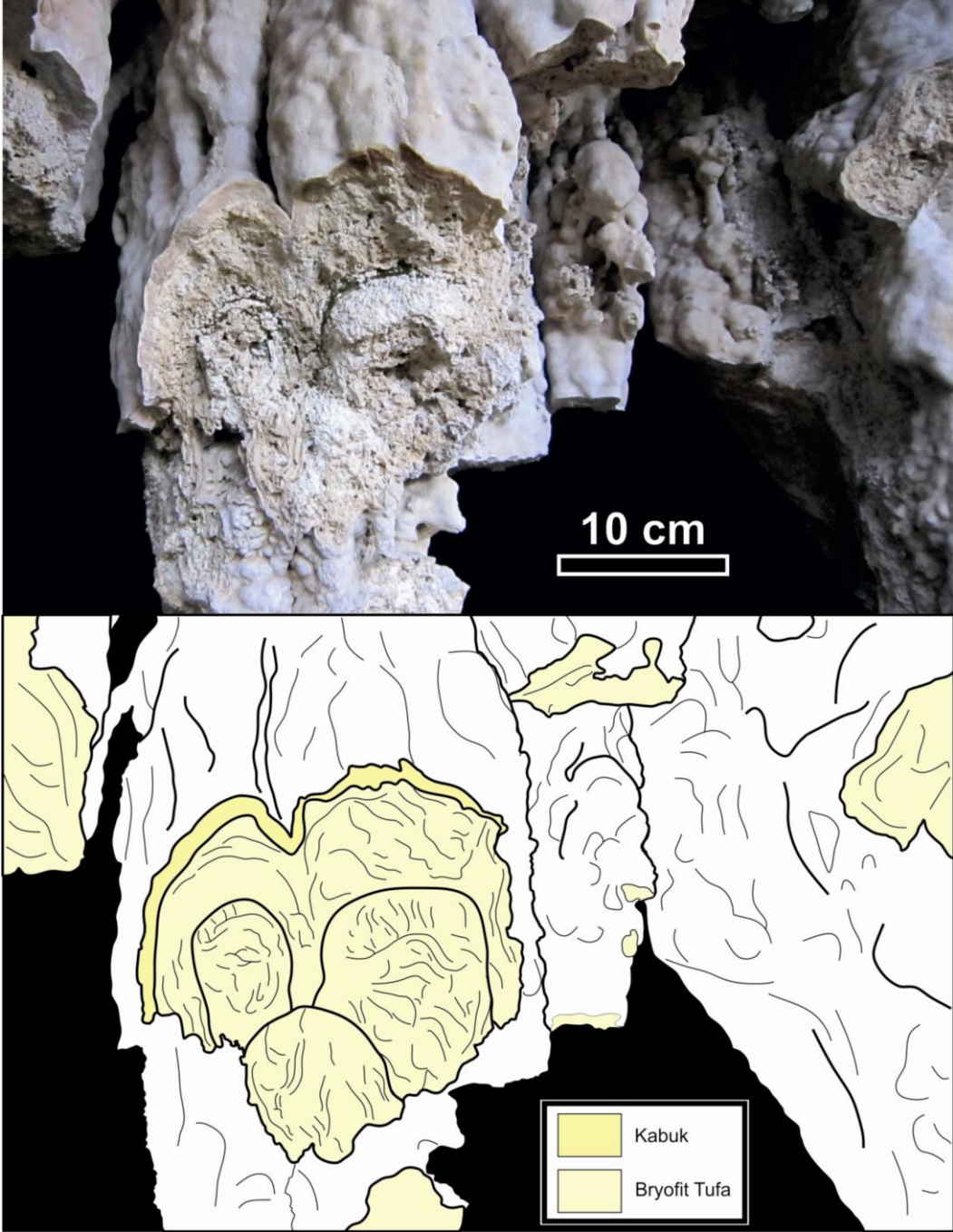


Şekil 7.5. Bryofitik tufa litotipinin arazi görünümü. Aşağı doğru sarkmış, uçları yuvarlak, sütun şekilli bryofitik tufalar. Sütun yapısının ucunun kırılmasıyla ortaya çıkmış dairesel ve taze enine kesitte ışınsal yapı (okla işaretli) görülmektedir. Emendere Otel Tesisleri güney sınırı (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°).

#### 7.1.5. Çakıltaşı Litotipi

Çoğunlukla volkanik kayaç kırıntılarından oluşan çakıltaşı ara düzeyleri genellikle tufa istiflerinin alt kesimlerinde gözlenir. Volkanik kökenli çakıllar arasında seyrek te olsa tufa parçaları–blokları yer alır. Çakıllar köşeli-yarı köşeli olup, kötü boylanmış ve tane desteklidir. Çakıllar arasındaki yer alan hamur malzemesi kum boyu tanelerden kuruludur. Çakıl tane boyları en fazla 10 cm, ortalama 4.5 cm'dir. Tabaka içinde derecelenme, boylanma v.b. iç yapılar gelişmemiştir (Şekil 7.8).

Fluviyal tufa sistemi içinde ara seviyeler olarak yer alan çakıltaşı litotipi, aşırı yağışlar sonucu ortaya çıkan aşındırma ve taşıma gücü yüksek güçlü akıntılarla depolanmış kaba kırıntılardır.



Şekil 7.6. Ucu kırılmış sütunsu bryofit tufa sarkıtı. Ortada boşluklu bir yapı sergileyen bryofitik tufa (bt) dıştan sıkı, boşluksuz ve kalınlığı 1-1.5 cm arasında değişen mikritik bir kabuk (mk) ile kaplanmıştır. Emendere Otel Tesisleri güney sınırı (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°).



Şekil 7.7. Kırıntılı tufa litotipinin arazi görünümü. Eman Otel Tesisleri batısı, yol kenarı.



Şekil 7.8. Çakıltaşı litotipi. Çoğunlukla volkanik kayalardan türemiş kaba taneli, köşeli-yarı köşeli ve kötü boylanmış çakıllar, kum hamur ile tutturulmuştur. Çakıllar arasında seyrek tufa parçaları (Ör., sütunsal bryofit tufa parçası, okla işaretli) da görülür. (Eman Otel Tesisleri'nin kuzeyinde, Emendere vadi tabanı).

### 7.1.6 Çamurtaşı

Çamurtaşı litotipi kahverengi, gri, yer yer şarabi renkte, masif, birkaç dm ile metre arasında değişen kalınlıktadır. İçinde gelişmiş, tane boyları 20 cm'ye kadar çıkan köşeli çakılları içerir. Çakıllar çoğunlukla volkanik, az miktarda tufa kütlelerinden türemiştir. Üstten bazan düşük eğimli tufa kütlesi ile (Şekil 7.9) bazen de şelale tufaları ile örtülmüştür.



Şekil 7.9. Çamurtaşı litotipi (resmin alt yarısı). Çamurtaşı, değişik seviyelerde düzensiz dağılmış köşeli volkanik kayaç çakılları içerir (Eman Otel Tesisleri'nin kuzeyinde, Emendere vadi tabanı).

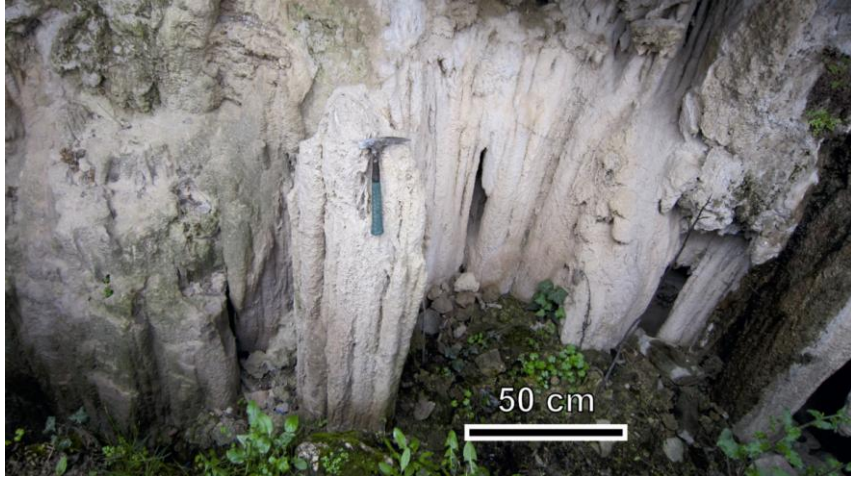
Silisiklastik çamurtaşları, fluviyal tufa sistemi içinde yer alan taşkın düzlüklerinde sellenme dönemlerinde depolanmıştır (Arenas-Abad, 2010). Emendere fluviyal tufa sistemi özelinde ise çamurtaşları, akış aşağıda, vadi tabanının genişlediği taşkın düzlüklerinde depolanmıştır.

## 7.2 Şelale Depolanma Morfolojisi

Emendere sahasında vadi aşağı akış yönünde yer yer şelale tipi depolanma şekilleri gelişmiştir (Şekil 7.10). Günümüzde aktivitesini kaybetmiş fosil tufa kütleleri akış yönü dışında kalmıştır. Genellikle kuzeye bakan şelale cephelerinin yükseklikleri 3.5 – 5.5 m, yanal genişlikleri 10-15 m arasında değişir. Şelale kütlelerinin üstünde yatay-yataya yakın sınırlı düzlükler bulunur. Bazı şelale tufa kütleleri içinde mağara büyüklüğünde boşluklar gözlenir (Şekil 7.10). Bu boşluklar şelale cephesinin öne doğru hızlı bir şekilde büyümesi-ilerlemesi sonucu, tufa kütlesi içinde (altında) korunmuş birincil boşluklardır. Mağara büyüklüğündeki boşluklarda sarkıt, dikit ve akmataş oluşumlarına rastlanır (Şekil 7.11).



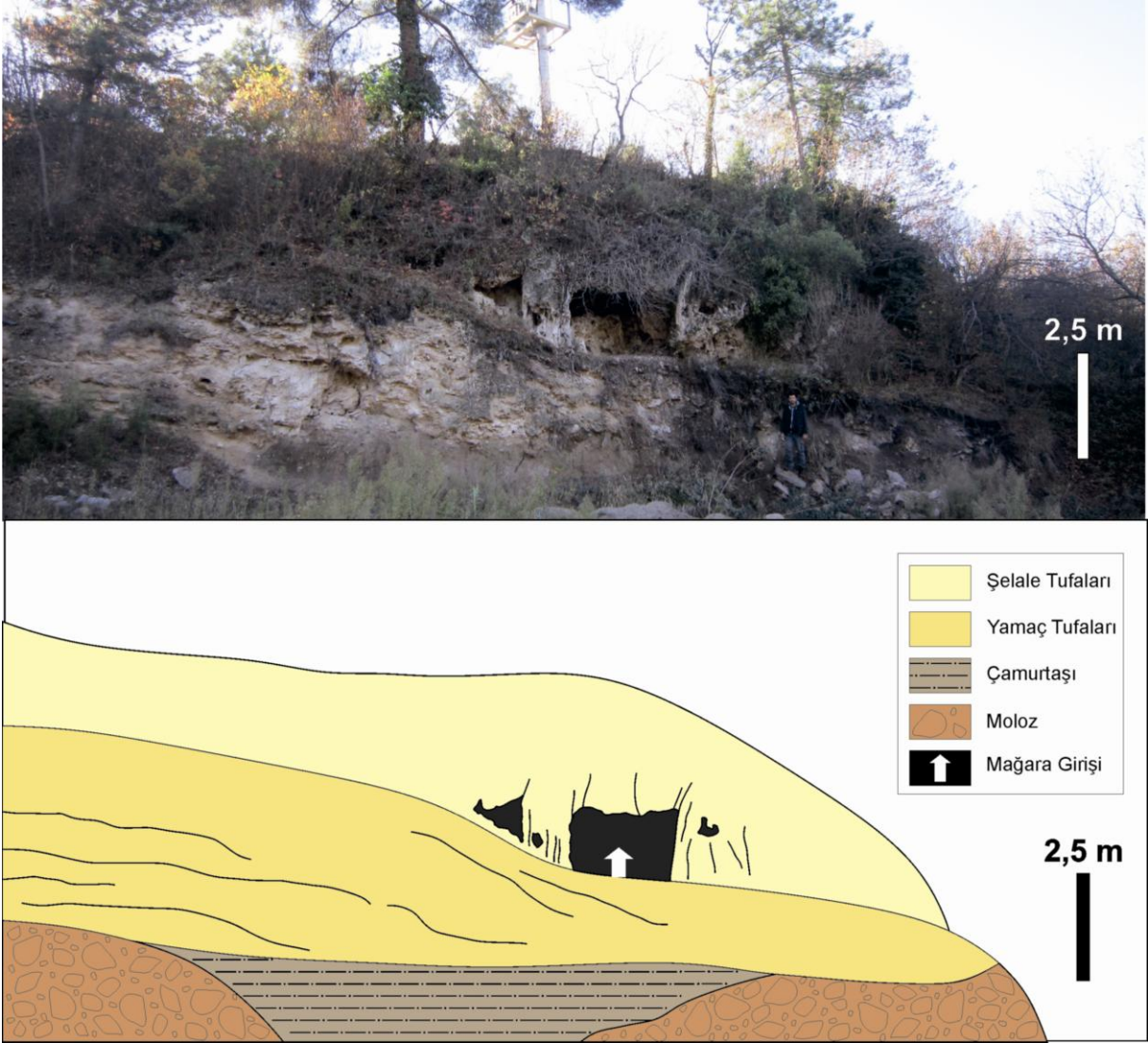
Şekil 7.10. Eman Otel Tesisleri'nin güney sınırında yer alan fosil şelale depolanma morfolojisi. (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°).



Şekil 7.11. Mağara boşluğunda aşağı doğru sarkmış düşey konumlu tufa perdeleri ve önde bir dikit oluşumu (üzerinde çekiç olan). (Koordinat: 39.11431°, 28.13423°)

### 7.3. Yamaç Depolanma Morfolojisi

Emendere vadisinde akış aşağı eğim gradyanında meydana gelen değişiklikler depolanma rejiminin değişmesine yol açmıştır. Yamaç tufaları, fitoklastik tufa ve onkolitik tufa gibi kırıntılı tufa litotipleri ve laminalı tufalardan kuruludur. Bu tür tufa kütleleri yer yer çakıltaşı, çamurtaşı gibi silisiklastik düzeyler içerir. Çalışma alanında yamaç tufaları şelale depolanma morfolojisi ile yanal ve düşey yönde geçişlidir (Şekil 7.12).



Şekil 7.12. Sağa doğru düşük eğimli (10-15°) yamaç tufaları. Üstte, mağara boyutunda boşluklar içeren şelale tufaları (Eman Otel Tesisleri'nin kuzeyinde, Emendere vadisi sol sahil, batıya bakış).

#### 7.4 Element Kimyası

Emendere sahasından alınan 20 adet tufa örneğinin element bileşimleri Tablo 7.1'de verilmiştir. Örneklerde Ca ve Mg konsantrasyonları en yüksek olan elementlerdir. Ca: 368923-385576 ppm, Mg: 5669-9588 ppm'dir. Sr değerleri ise 309 ile 450 ppm arasında değişmektedir. Bu değerler Hisaralan'ın Sr değerlerine göre oldukça düşüktür.

Tablo 7.1. Emendere sahası tufa örneklerinin element konsantrasyonları (ppm).

Örnek No	Ca	Si	Fe	Mg	Mn	Sr	Ba
EM-1	380859	2150	525	8744	0	443	304
EM-2	376642	5656	1294	6211	310	365	276
EM-3	374212	2898	525	9588	0	309	219
EM-4	385576	1309	245	5669	0	348	227
EM-5b	369281	10004	1189	8322	0	332	213
EM-6	368923	8040	944	8744	77	374	257
EM-7	378429	1870	280	7176	0	396	287
EM-8	381859	2337	210	5970	0	388	270
EM-9	379644	3973	245	6694	0	450	287
EM-10	384432	982	175	6272	0	362	245
EM-12	379286	5142	699	6211	0	440	255
EM-13	380215	4160	560	6392	0	371	246
EM-14	379429	3179	595	6452	0	446	248
EM-15	379358	4394	420	9588	0	416	273
EM-16	381645	3693	315	6694	0	197	154
EM-17	382574	2758	490	5729	0	383	268
EM-18	367280	19821	839	6151	0	136	119
EM-19	372139	8742	944	7900	0	291	204
EM-21	388220	1496	245	6030	0	405	253
EM-22	387362	2104	315	5729	0	313	206

### 7.5 Duraylı Karbon ve Oksijen İzotopları

Duraylı izotop değerleri karbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) için ‰PDB cinsinden -3.60 ile -6.81 arasında, oksijen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) için ‰PDB cinsinden -11.45 ile -7.52 arasında değişir (Tablo 7.2; Şekil 7.13).

#### Yorum

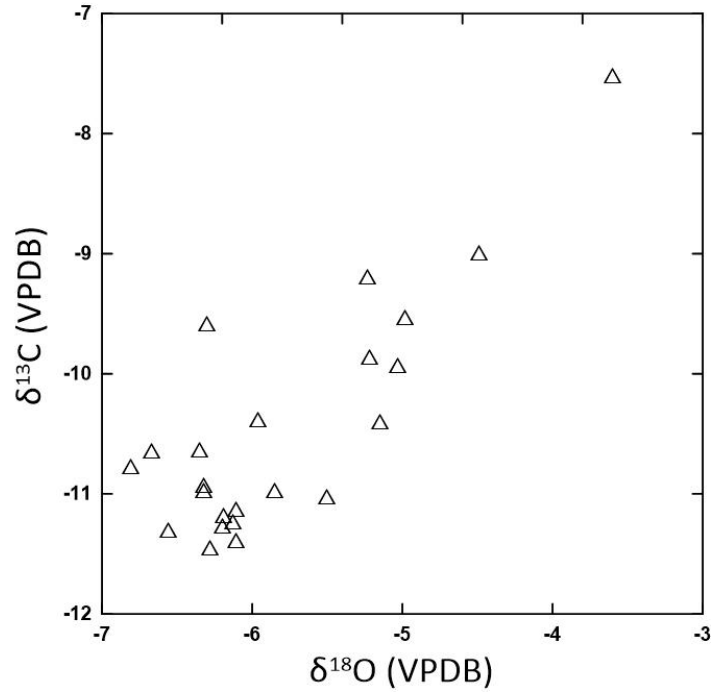
Genel olarak tufa çökellerinin  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri ‰PDB cinsinden -8 ile -5 arasında,  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri ise -4 ile -12 arasında olduğu bildirilmiştir (Andrews vd., 1997; Arenas-Abad, 2010). Negatif değerler, toprak zonundan kaynaklanan  $\text{CO}_2$  katkısını yansıtır (Pentecost, 2005). Emendere tufa çökellerinin duraylı C ve O izotop değerleri daha önceki çalışmalarda rapor edilen değerlerle uyumludur. İncelenen tufa çökellerinin duraylı C ve O izotop değerleri arasında pozitif bir korelasyon vardır ( $r=0.82$ ) (Şekil 7.11). Jeokimyasal özellikleri dikkate



alındığında, bu tufa çökelleri bir akarsu vadisi boyunca boşalan sıg dolaşimli kaynak suları tarafından çökeltmiştir.

Tablo 7.2. Emendere tufalarının duraylı karbon ve oksijen izotop bileşimleri.

Örnek No	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)	Örnek No	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)
EM-1	-3,60	-7,52	EM-12	-6,67	-10,64
EM-2	-6,13	-11,23	EM-13	-6,32	-10,93
EM-3	-5,23	-9,19	EM-14	-5,96	-10,38
EM-4	-6,56	-11,30	EM-15	-5,15	-10,40
EM-5(a)	-6,30	-9,58	EM-16	-6,11	-11,13
EM-5(b)	-4,98	-9,53	EM-17	-6,19	-11,18
EM-6	-5,03	-9,93	EM-18	-4,49	-8,99
EM-7	-5,22	-9,86	EM-19	-6,32	-10,97
EM-8	-6,81	-10,77	EM-20	-5,50	-11,02
EM-9	-5,85	-10,97	EM-21	-6,35	-10,63
EM-10	-6,11	-11,39	EM-22	-6,20	-11,27
EM-11	-6,28	-11,45			



Şekil 7.13. Emendere sahası'ndan alınan tufa örneklerinin duraylı karbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ve oksijen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) değerlerinin dağılımı.

## 7.6 U-Th Yaşları

Toplam 10 adet tufa örneği U-Th yöntemi ile tarihlendirilmiştir (Tablo 7.3). Yaşları 1.151-8.143 bin yıl arasında değişen 7 tufa örneği Holosen dönemine aittir (Tablo 7.3). Diğer 3 örneğin temsil ettiği tufalar ise son buzularası dönemde (=last interglacial period) çökelmiştir.

Tablo 7.3. Emendere tufa örneklerinin U–Th izotop yaşları

Örnek No	$^{238}\text{U}$ ppb	$^{232}\text{Th}$ ppb	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	±	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$	±	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	Hesaplanan yaş (yıl)	Hata	Hesaplanan yaş (yıl)	Hata	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}_{\text{initial}}$	±
Em-5a	2117,357	286,854	1,182	0,006	0,101	0,120	0,001	2,700	11,582	0,096	8,143	1,906	1,193	0,008
Em-8	2856,733	66,015	1,189	0,006	0,061	0,072	0,001	9,556	6,810	0,061	6,234	0,321	1,193	0,006
Em-11	3493,971	16,181	1,188	0,006	0,012	0,014	0,000	9,080	1,266	0,022	1,151	0,067	1,189	0,006
Em-13	3142,383	85,859	1,199	0,010	0,074	0,089	0,001	9,989	8,397	0,103	7,722	0,382	1,205	0,011
Em-14	2346,064	205,025	1,186	0,006	0,088	0,104	0,001	3,633	9,951	0,094	7,752	1,214	1,194	0,007
Em-15	3616,339	44,499	1,197	0,010	0,058	0,070	0,001	17,292	6,509	0,081	6,207	0,182	1,201	0,010
Em-16	2033,961	28,252	1,141	0,010	0,583	0,666	0,005	146,501	92,992	1,741	92,646	1,748	1,184	0,012
Em-17	2715,348	29,002	1,195	0,010	0,029	0,035	0,000	9,905	3,194	0,041	2,931	0,149	1,197	0,010
Em-20	1851,615	82,169	1,093	0,006	0,675	0,737	0,004	50,780	119,204	1,686	118,043	1,810	1,132	0,008
Em-22	1955,140	30,888	1,100	0,009	0,658	0,725	0,006	140,159	114,036	2,501	113,628	2,509	1,139	0,012

## 8. TARTIŞMA

### 8.1. Suların Kimyasal ve İzotopik Kompozisyonu

Hisaralan sahası soğuk kaynak sularının iyon miktarı Ulus kaynağından (yüksek kottan) Kaplıca kaynağına doğru (düşük kota, termal kaynak alanına doğru) artmakta ve kimyasal kompozisyonları değişmektedir (Şekil 4.4). Bu durumda, Ulus kaynağından Kaplıca kaynağına doğru yeraltısuyunun katettiği yolun ve suyun içinde dolaştığı kayaçlarla dokanak süresinin daha uzun, ayrıca, dokanak yüzeyinin daha geniş olduğu ve Kaplıca kaynağı suyunun bir miktar termal sularla karıştığı anlaşılabilir. Yarı logaritmik diyagramdan Ulus ve Kozoluk kaynaklarının asidik volkanitlerden, Ilıcakpınar, Kaplıca ve Ceviz kaynaklarının ofiyolit karmaşığında geldiği söylenebilir.

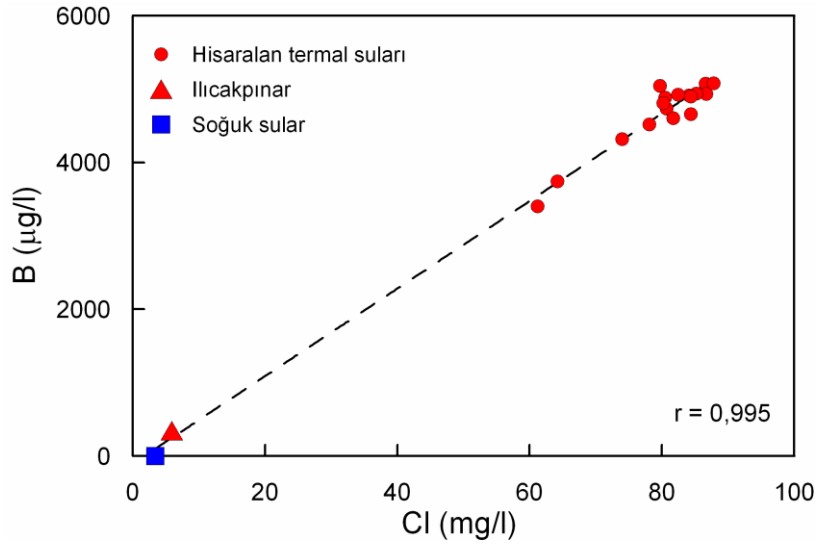
Hisaralan termal suları genel olarak elektriksel iletkenlikleri 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  civarında ve pH'ları nötre yakın olan Na-HCO<sub>3</sub> tipinde sulardır. Termal sular granitik bir temelden faylar aracılığı ile yükselerek Bornova Fliş Zonu içindeki geçirgenliği nispeten yüksek olan kireçtaşlarında depolanmış ve bu rezervuardan yine faylar yoluyla yüzeyleyerek termal kaynakları oluşturmuştur. Termal suların  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri, sulardaki karbonun kaynağının manto CO<sub>2</sub>'i, denizel kireçtaşı veya yeraltısuyu DIC'i veya bunların bir kombinasyonu olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Hisaralan termal sularından çökelen travertenlerin  $\delta^{13}\text{C}$  kompozisyonu da mağmatik bir kaynağa işaret etmektedir. Mutlu (2007), inceleme alanını da içine alan bazı Balıkesir termal sularının yüksek  $\delta^{34}\text{S}$  değerlerinin sülfat indirgenmesinin bir göstergesi olduğunu belirtmiştir. Hisaralan termal suların  $\delta^{34}\text{S}$  değerleri (‰13,17-15,97) sulardaki kükürdün kaynağının kireçtaşı, şeyl, mağmatik kayalar ve/veya volkanik sülfür olabileceğini göstermektedir. Sulardaki yoğun çürük yumurta kokusu H<sub>2</sub>S varlığına işaret etmektedir.

Hisaralan termal sularının kimyasal kompozisyonunu oluşturan başlıca faktör su-kayaç etkileşimidir. Ca-HCO<sub>3</sub>, Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> ve diğer tiplerdeki soğuk sular derinlere süzülürken geçtikleri riyolit ve dasitlerde plajiyoklasları çözerek rezervuarda Na-HCO<sub>3</sub> tipine dönüşmüştür. Bu sulara, yukarıda anıldığı gibi bir mağmatik katkı da sözkonusudur.

Kimyasal kompozisyonu etkileyen diğer bir faktör iyon değişim reaksiyonlarıdır. Baz değişim indisi (Cl-(Na+K))/Cl) Hisaralan termal suları için (-4,08)-(-6,68) mertebesinde olup kayadaki Na ve K ile sudaki Ca ve Mg arasında bir iyon değişimi olduğunun göstergesidir. Ancak bu durum (negatif değer), yüzeye yükselirken dasit ve riyolitlerle dokanakta olan Hisaralan

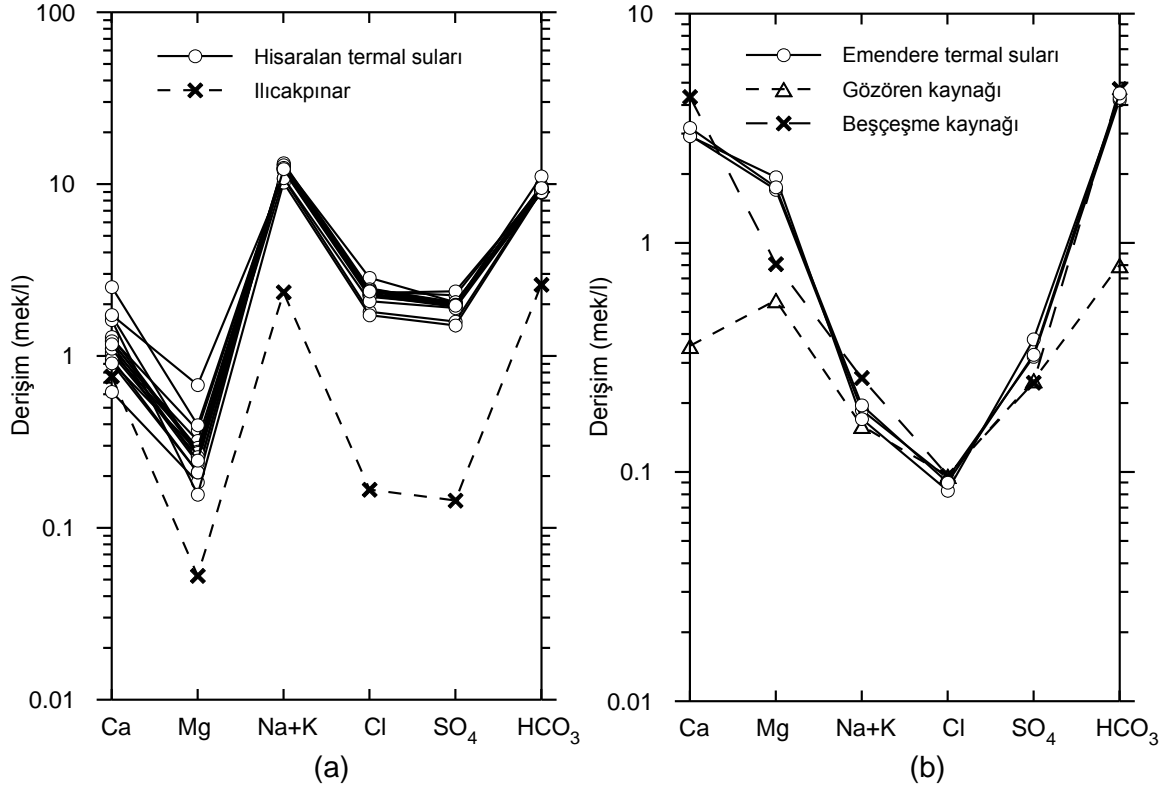
termal sularında silikatların bozunumu ile Cl'dan daha fazla alkali iyonların suya geçmesinden de kaynaklanabilir.

Hisaralan termal suları yüzeye yükselirken değişik oranlarda soğuk yeraltı suları ile karışmaktadır. Bu karışım, bazı termal kaynaklarda su tipini değiştirmeden sıcaklıklarda ve iyon miktarlarında azalmaya neden olmaktadır. Nisan dönemine göre, Ekim döneminde bazı termal kaynaklarda sıcaklıklar 15°C'ye ulaşan miktarlarda artmış ve EC değerlerinde de yükselme gözlenmiştir. Bu dönemde, sulara özellikle Na, Li, As, Cs ve SiO<sub>2</sub> miktarlarında da artış olmuştur. Bu durum, Ekim döneminde birçok yeni termal kaynağın ortaya çıkması da göz önüne alındığında rezervuar basıncının arttığı ve soğuk yeraltı suyu karışımının azaldığının bir göstergesidir. Şekil 4.5 ve 4.6'da genellikle sıcaklığı 55-70°C civarında olan suların HSW termal sondajı ve Ulus soğuk su kaynağı son üyelerini birleştiren çizginin orta kesimlerinde yer alması ve ayrıca Şekil 5.1 ve 5.2'deki Giggenbach diyagramındaki suların dizilimi dikkate alındığında bir sıcak-soğuk su karışımının varlığından sözedilebilir. Şekil 8.1'deki B-Cl diyagramı bu karışımın göstergelerinden biridir. Şekil 8.1 ve 8.2a'da Emendere sahasında bulunan 25°C sıcaklık ve 266 µS/cm EC değerine sahip Na-Ca-HCO<sub>3</sub> tipindeki Ilıcakpınar'ın kimyasal kompozisyonunun Hisaralan termal sularına benzer olduğu ve yüksek oranda soğuk su karışımını yansıttığı görülmektedir.



Şekil 8.1. Suların Cl-B diyagramı.

Emendere'deki diğer sular Hisaralan termal sularından farklı bir kimyasal kompozisyona sahiptir. Emendere termal sularının kimyası, yakınında bulunan ve ofiyolitten boşalan Beşçeşme soğuk su kaynağına oldukça benzerdir (Şekil 8.2b). Bu alandaki suların kimyasal evriminin anlaşılabilmesi için mevsimsel olarak daha çok su numunesinin kimyasal ve izotop analizine ihtiyaç vardır.



Şekil 8.2. Suların yarı logaritmik diyagramı (a) Hisaralan termal suları, (b) Emendere termal suları.

## 8.2. Rezervuar Sıcaklığı

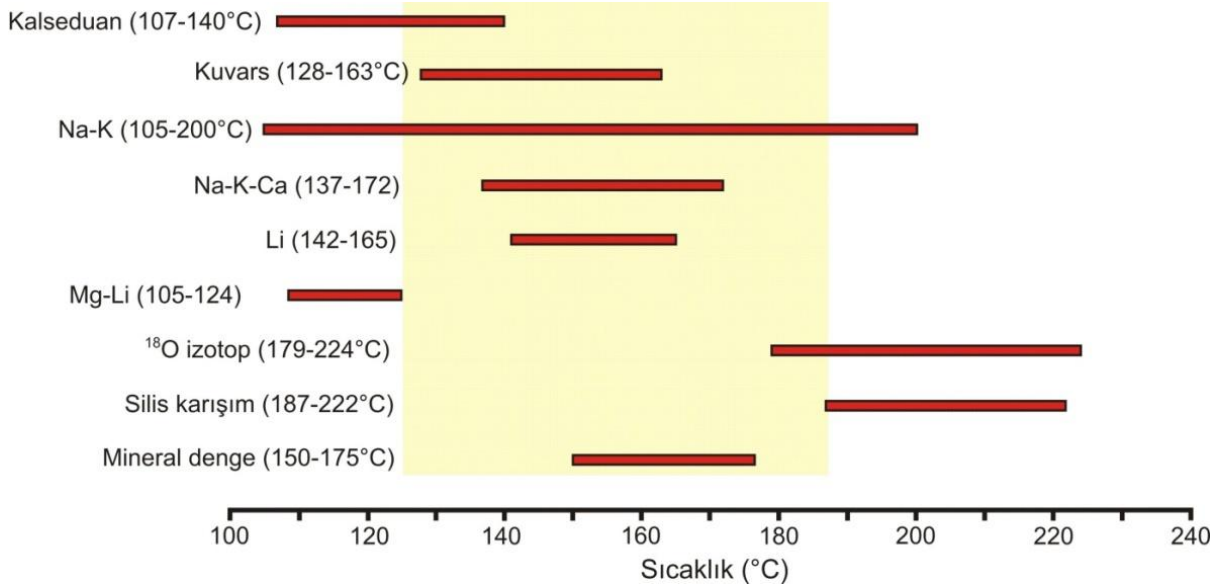
Hisaralan sahasına uygulanan jeotermometreler 110-150°C (Mutlu, 2007), 150°C (Aksoy vd., 2009), 120°C (Mutlu ve Kılıç, 2009) civarında rezervuar sıcaklıkları vermiştir. Aksoy vd. (2009), Hisaralan sahasında TPAO tarafından açılan HSW kuyusunda 500-700 m arasındaki zonda maksimum 107°C sıcaklık ölçüldüğünü vurgulamışlardır.

Çalışma alanının kuş uçuşu 25 km kadar kuzeyinde bulunan Hisarköy (Bigadiç) jeotermal sahasında rezervuar sıcaklığı, silis ve katyon jeotermometreleri ve sıcaklık-mineral denge diyagramları ile 100-190°C olarak belirlenmiş, ancak gerçekçi sıcaklık 110°C olarak öngörülmüştür (Gemici ve Tarcan, 2007). Diğer bir çalışmada Balıkesir jeotermal sahaları için silis ve katyon jeotermometreleri ile 50°C'den düşük (Susurluk) ile 200°C civarına kadar (Bigadiç) değişen değerlerde rezervuar sıcaklıkları hesaplanmış, Hisaralan sahası için ise 110-150°C aralığında bir rezervuar sıcaklığı önerilmiştir (Mutlu 2007). Mutlu ve Kılıç (2009), yine Balıkesir ili jeotermal sahaları için 125°C'yi aşmayan rezervuar sıcaklıkları öngörmüşlerdir.

Kocabaş vd. (2016), Hisaralan jeotermal sahasında klorit, illit, smektit ve karışık tabakalı illit/smektit oluşumları belirlemişler, klorit ve kalsitin ilk evrede propilitik alterasyonun ürünü olarak, illit, kuvars ve adularyanın da daha sonra fosil hidrotermal evrede oluştuğunu

belirtmişler, simektit ve karışık tabakalı illit/simektit minerallerinin ise güncel jeotermal sisteme ait daha düşük sıcaklık evresine ait mineraller olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar HSW kuyusundan aldıkları örneklerde volkanik sekansın daha derin kısımlarında egemen olarak illit ve klorit, 120 m derinlikten yüzeye kadar da smektit ve R2 I-S minerallerini belirlemişlerdir. Saptadıkları hidrotermal mineral topluluğu (Erken Miyosen volkanizması ile yaşıt ve eş zamanlı oluşmuş) ve kil minerallerinin izotop kompozisyonundan hareketle ilk evredeki yeraltı sıcaklığının 175-250°C olduğunu ifade etmişler, günümüzde ise termal suların 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda simektit minerali ile dengede olduğuna işaret etmişlerdir.

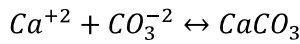
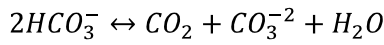
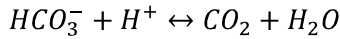
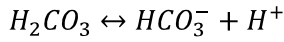
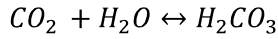
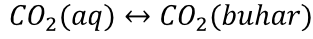
Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak Hisaralan termal sularına silis ve katyon jeotermometreleri dışında silis karışım, sıcaklık-mineral denge ve  $^{18}\text{O}$  ( $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ) izotop jeotermometreleri de uygulanmış ve elde edilen değerler toplu olarak Şekil 8.3'de verilmiştir. Silis karışım, sıcaklık-mineral denge ve  $^{18}\text{O}$  ( $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ) izotop jeotermometre teknikleri ile 150-224°C arasında rezervuar sıcaklığı değerleri elde edilmiştir ki bu değerler Kocabaş vd. (2016)'da verilen ilk evre yeraltı sıcaklıklarına yakındır. Genel olarak değerlendirildiğinde bu Hisaralan sahasında 125-190°C aralığında bir rezervuar sıcaklığı beklenebilir. Emendere sahası için öngörülen rezervuar sıcaklıkları ise 40-90°C arasındadır.



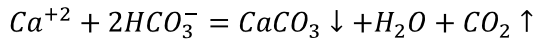
Şekil 8.3. Hisaralan termal sularının değişik jeotermometrelere göre rezervuar sıcaklıkları.

### 8.3 Kabuklaşma

Jeotermal sondajlarda CaCO<sub>3</sub> kabuklaşması ya da termal kaynakların akış yolları boyunca gözlenen CaCO<sub>3</sub> çökelişi aşağıdaki reaksiyonlar sonucu gerçekleşir.



CaCO<sub>3</sub> kabuklaşmasında CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O dengesi çok önemlidir. Kökenine bakılmaksızın, suda çözülmüş halde bulunan CO<sub>2</sub> miktarı, suyla temas halindeki CO<sub>2</sub> (gaz)'in kısmi basıncı ile doğru orantılıdır. Derinlerde basınç altında bulunan jeotermal akışkandaki çözülmüş CO<sub>2</sub>, karbonik asit oluşturarak (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) akışkanın pH değerinin düşmesine ve asidik özellik kazanmasına neden olur. Asidik akışkan temasta bulunduğu karbonat kayaçlardan toprak alkali karbonatları çözündürerek özellikle Ca ve Mg iyonları zenginleşir. Akışkandaki çözülmüş CO<sub>2</sub>, basınç azalması durumunda sıvı ortamdan ayrılarak gaz fazına geçer (CO<sub>2</sub> kaçıışı). Böylece akışkanın pH'ı yükselmeye başlar. Termal kaynaklarda, CO<sub>2</sub> gazının kaçıışı akışkanın yüzeyde akma hızı, kalınlığı, aktığı yüzeyin eğimi, düzgün ya da girdaplı akışı, şelale şeklinde akış ve benzeri diğer koşullara göre hızlı ya da yavaş olur. pH artışıyla akışkanda önce HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sonra CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> iyon derişimleri artar ve sonuçta ortamdaki CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ile akışkandaki Ca iyonları birleşerek CaCO<sub>3</sub> çökelişi gerçekleşir.

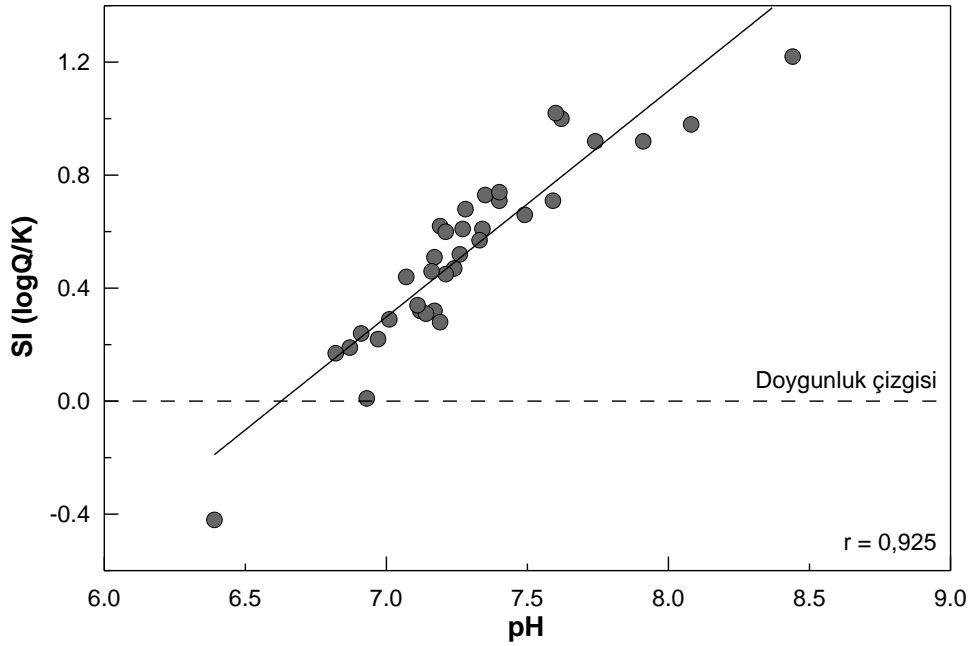


Bu çökelişi etkileyen diğer faktörlerden biri akışkanın toplam tuz konsantrasyonudur. Ayrıca, alüminyum silikat mineralleri de pH dengesi üzerinde etkin rol oynar.

Batı Anadolu kıyı bölgelerindeki düşük sıcaklık ve yüksek tuzluluğa sahip jeotermal sularda çökeltme eğiliminde olan mineraller kalsit, aragonit, dolomit, kalsedon ve kuvars olarak ifade edilmiştir (Tarcan vd. 2000; Tarcan 2001; Gemici ve Filiz, 2001; Tarcan ve Gemici, 2003; Tarcan vd. 2009). Tarcan (2005), Kızıldere, Salavatlı, Germencik, Kavaklıdere-Sazdere, Salihli-Caferbeyli, Simav ve Tuzla sahalarında 150°C'den yüksek sıcaklıktaki jeotermal kuyulardan boşalan termal sularda genellikle kalsit, aragonit ve sölestin minerallerinin aşırı

doymun, jips, anhidrit, flüorit, Ca-montmorillonit, anortit, illit, kaolinit ve K-feldspat minerallerinin ise doymunluk sınırının altında olduğunu belirtmiş ve kalsit ve amorf silis kabuklaşmasının tüm dünyada olduğu gibi bu alanlarda da en yaygın kabuklaşma olduğunu vurgulamıştır.

Hisaralan termal sularının pH değerleri 6,10 ile 8,78 (ortalama 7,45) arasında değişir. Bu suların kısmi CO<sub>2</sub> gazı basınçları (logpCO<sub>2</sub>) -1,94 ile -0,23 arasında olup bu değerler atmosferdeki kısmi CO<sub>2</sub> gazı basıncından (-3,5) çok daha yüksektir. Bu durumda termal kaynak şeklinde yüzeyleyen termal sular içindeki çözünmüş CO<sub>2</sub> gazı atmosferdeki değer ile dengeye ulaşmak için termal akışkandan ayrılır. Termal akışkandan CO<sub>2</sub> gazı kaçışı termal suların yüzeyle yükselme zonlarında basınç düşmesi ile yüzeyle yakın kesimlerde de başlayabilir. Hisaralan sahasındaki termal suların pH değerlerinin kaynak başında genellikle 7,5 civarında olması, termal kaynak alanının çok kırıklı ve çatlaklı yapısı da göz önüne alınarak, CO<sub>2</sub> kaçışının termal akışkan yüzeylemeden önce başladığını göstermektedir. Termal suların pH değerlerinin soğuk yeraltısuyu karışımları ile de değişebileceği gözardı edilmemelidir. Hisaralan termal sularının fokurdamalı çıkışları çözünmüş CO<sub>2</sub>'nin akışkandan hızla ayrılmasına neden olur. Örneğin HS-61 nolu termal kaynakta, kaynak çıkışında suyun pH'ı 7,19 iken 11 m uzunluğundaki kanaldan akışı sonunda pH değeri 8,03'e yükselmektedir (Şekil 6.14). Hisaralan termal sularının kalsit doyma indisleri ile pH değerleri arasındaki doğrusal ilişki Şekil 8.4'de görölmektedir.



Şekil 8.4. Hisaralan termal sularının pH- kalsit doyma indisleri diyagramı.



PhreeqC programı ile yapılan doygunluk hesaplamalarına göre Hisaralan termal kaynaklarının hemen hemen tümü, kaynak çıkışlarında dahi kalsit, aragonit ve kuvars minerallerine göre doygundur. Bu hesaplama sonuçlarına uygun olarak çoğu kaynakta karbonat çökmesi kaynak ağzında başlar ve basıncı daha yüksek kaynaklarda kule tipi travertenler gelişir. Araziden alınan güncel ve fosil traverten örneklerinin XRD analizinde kalsit, aragonit ve kuvars saptanması, hesaplama yoluyla bulunan doygun mineral türleri ile örtüşmektedir. Yine PhreeqC yazılımı kullanımıyla, 25-250°C sıcaklık aralığında, 25°C'lik adımlarla yapılan doygunluk hesaplamalarında HSW sondaj suyu, bu sıcaklık aralığındaki her sıcaklık için aragonit ve kalsitçe doygun bulunmuştur. Bu kuyuda kalsit ve aragonit kabuklaşması başlıca sorundur ve kabuklaşmayı önlemek için yapılan inhibitör uygulaması başarılı olmuştur.

#### **8.4 Traverten Litotipleri**

Hisaralan sahasında arazi çalışmaları sırasında travertenlerde 6 adet litotip tanımlanmıştır: (1) Nilüfer yaprağı (lilypad), (2) Rafsı (ledge) traverten, (3) Kristalin kabuk, (4) Zarflı taneler, (5) Bantlı traverten ve (6) Mikrobiyal traverten. Bunlar arasında nilüfer yaprağı (lilypad) ve rafı (ledge) travertenler Doğu Afrika'da Kenya Rift Vadisi'nde yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Jones ve Renaut, 1998; Renaut, vd., 1999). Türkiye'de ise bu litotiplere ilk defa Hisaralan'da rastlanmıştır. HS-61 kaynağı önünde açılmış bir kanal boyunca 83-96°C sıcaklık aralığında oluşmuşlardır.

Doğu Afrika'da yapılan çalışmalarda, nilüfer yaprağı ve rafı traverten litotiplerinin oluşumunda hızlı CO<sub>2</sub> kaçıışı ve yüksek su sıcaklığının (>75°C) en önemli faktörler olduğu vurgulanmıştır. Yazarlar (Jones ve Renaut, 1998; Renaut, vd., 1999), benzer oluşumların, su-hava ara yüzeyinde mağara tabanlarındaki havuzlarda, buharlaşma tavalarında ve donma sırasında da meydana geldiklerini belirtmişlerdir.

#### **8.5 Ender Bir Depolanma Morfolojisi Olarak Traverten Kuleleri**

Hisaralan Jeotermal Alanı'nda 5 farklı depolanma morfolojisi gelişmiştir. Bunlar (1) kaynak ağzı-boşalım kanalı, (2) yamaç-şelale, (3) kaynak tümseği, (4) traverten kuleleri ve (5) traverten sırtıdır. Depolanma morfolojileri arasında en dikkat çeken traverten kuleleridir. Hisaralan, Türkiye'de traverten kule oluşumlarının görüldüğü tek jeotermal sahadır. Sahada 60'a yakın kule belirlenmiştir. Günümüzde bunlardan sadece birkaçı aktiftir.

Traverten kuleleri ender rastlanan ve göz kamaştırıcı depolanma morfolojilerinden birisidir. Kule yükseklikleri taban genişliklerine göre belirgin bir şekilde büyüktür (Jones ve Peng, 2017). ABD'nin Yellowstone Ulusal Parkı'nda ve Çin'de bu oluşumlar üzerinde bazı

çalışmalar yapılmıştır (Bargar, 1978; Chafetz ve Guidry, 2003; Jettestuen vd., 2006; Meakin ve Jamtveit, 2010; Fouke, 2011; Jones ve Peng, 2017). En çok bilinen kule oluşumu, Yellowstone Ulusal Parkı'nın kuzeyindeki Mammoth Hot Spring alanında 14 m yüksekliğindeki 'Liberty Cap' adı verilen kuledir. 'Liberty Cap' adlı kulenin yakınında 'Devil's Thumb' adı verilen bir koni yer alır (Bargar, 1978; Chafetz ve Guidry, 2003; Jettestuen vd., 2006; Meakin ve Jamtveit, 2010; Fouke, 2011). Yellowstone sınırları içinde diğer bir kule oluşum alanı 'Travertine Totem Forest' adlı alandır. 59 aktif ve aktif olmayan kulenin bulunduğu bu alan, parkın gözden uzak bir kesiminde yer alır. Na-HCO<sub>3</sub> tipindeki termal sulardan oluşan kulelerin yükseklikleri en fazla 4.8 m'dir (Hutchinson ve Thompson, 1992).

Çin'den rapor edilen kule oluşumları ise, Çin'in Yunnan bölgesinde, Tibet-Yunnan jeothermal zonundaki Na-Ca-HCO<sub>3</sub> tipli Jifei sıcak kaynak alanında yer alır. Bu alanda 18 adet kule oluşumu tespit edilmiştir. Maksimum kule yüksekliği 7 m'nin üzerindedir (Liu vd., 2012). Çin'deki diğer bir kule-koni oluşum alanı Tibet'in kuzeyinde bulunan Rongma sıcak kaynak alanıdır (Gao vd., 2013). Bu alandan 27 kule-koni oluşumu rapor edilmiştir.

### **8.6 Traverten Kulelerinin Sr İzotop Kayıtları**

Sr izotop kayıtları, traverten oluşturan akışkanın kökenine yönelik değerlendirmeler yapmak için yararlı bir araçtır (Zentmyer vd., 2008; Claes vd., 2015; El Desouky vd., 2015; Gibert vd., 2009). Denizel karbonatlar, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr izotop kayıtlarını içinde çökdikleri deniz suyundan kazanırlar (Veizer ve Compston, 1974). Diğer taraftan, bir travertende <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr izotop oranları, kaynak akışkanın içinden geçtiği temel kayaların jeokimyasını yansıtır (Zentmyer vd., 2008). O nedenle, bir traverten çökelinin Sr izotop kayıtları doğrudan onu oluşturan akışkanın izotopik bileşimini yansıtır (El Desouky vd., 2015).

Denizli Havzası'nda (GB Türkiye)Ballık traverten sahasında yapılan bir çalışmada (Claes vd., 2015) <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr izotop kayıtları 0.70785 ile 0.70792 arasında bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, bölgede traverten oluşumu için kaynak kaya, muhtemelen Likya Napları içinde yer alan Triyas yaşlı kireçtaşlarıdır (Claes vd., 2015; El Desouky vd., 2015).

Diğer taraftan, güney Tibet'te bir traverten platformundan ve Ordovisiyen kireçtaşlarından, ki bu birim traverten oluşumu için olası karbonat kaynak kaya olarak düşünülmüştür, elde edilen yüksek <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr izotop oranları sırasıyla 0.7169 - 0.7181 ve 0.7112'dir (Zentmyer vd., 2008). Bilinen zamanlar (Fanerozoik) boyunca Dünya okyanuslarındaki <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr oranlarında meydana gelen değişimler karbonat, evaporit ve fosforit gibi denizel tortulların analizlerinden elde edilmiştir (Burke vd., 1982; Palmer ve Elderfield, 1985; Elderfield, 1986; Veizer, 1989).

Buna göre,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop oranı Erken Ordovisiyen için 0,7090, Orta-Geç Ordovisiyen için 0.7079 olmuştur (Burke vd., 1982). Oysa güney Tibet'teki Ordovisiyen kireçtaşının 0.7112'lik Sr izotop değeri denizel karbonatlar için anormal derecede yüksek bir değerdir. Dolayısıyla, güney Tibet'teki traverten platformunun 0.7169 - 0.7181 arasında değişen bu yüksek Sr izotop kayıtları aynı yerdeki Ordovisiyen kireçtaşlarının Sr izotop değerlerinden bile yüksektir. Bu durum, kireçtaşı temel kayasını çözüdüren ve traverten çökeltten kaynağın doğrudan meteorik sularla beslenmediğini akla getirir. Traverten Sr izotop oranlarının radyojenik karakteri yeraltında akış güzergahı boyunca bir yerlerde kaynak suyunun radyojenik temel kayalar içinden geçtiğini gösterir. Zentmyer vd. (2008)'e göre Tibet'teki yüksek değerler, akışkanın yeraltında Büyük Himalayalar'ın radyojenik kristalin kayaçlarıyla olan etkileşimini işaret eder. Bu radyojenik kristalin kayaçlar, büyük olasılıkla, Güney Tibet Fay Sistemi'nin taban bloğundaki Neoproterozoyik yaşlı psammitik şistler ve lökograditlerin yanı sıra, Kambriyen kuvarsit ve psammitik şistlerinden oluşan enjeksiyon karmaşı olarak ifade edilmiştir (Zentmyer vd., 2008).

Hisaralan traverten kulelerinin 0.7100 ile 0.7104 arasında değişen  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop kayıtları (Tablo 6.3), Tibet örneğinde olduğu gibi, yüksek değerler sergiler. Bu yüksek değerler, Hisaralan Jeotermal Sahası'nın altında yer alan radyojenik bir temelin varlığını işaret eder. Sahadaki HS-2 kuyusuna ait karotlarda ve yüzeydeki riyolik ve dasitik volkanik kayaçların hidrotermal alterasyon ürünü killerden de yüksek  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop kayıtları (0.7116 - 0.7194) elde edilmiştir (Kocabaş vd., 2016). Yine Hisaralan Jeotermal Sahası'nın yaklaşık 25 km KD'sunda yüzeyleyen Erken Miyosen yaşlı Alaçam Granitoidi'nin Sr izotop kayıtları 0.70884 ile 0.71021 arasındadır (Erkül ve Erkül, 2012). Alaçam Granitoidi'nin Sr izotop kayıtları Hisaralan traverten kulelerinin kayıtları ile karşılaştırılabilir. Benzer şekilde, Yellowstone Ulusal Parkı'nın (A.B.D.) kuzey sınırında yer alan Mammoth Hot Springs travertenlerinin Sr izotop kayıtları (0.71110 to 0.71112), Hisaralan Sr izotop kayıtlarına benzerlik gösterir (Fouke vd., 2000). Sonuç olarak Hisaralan traverten kulelerinin yüksek  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  izotop oranları, çalışma alanı ve çevresini altlayan radyojenik temel kayalarla akışkanın etkileşiminin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

## 8.7 Duraylı Karbon Ve Oksijen İzotop Bileşimleri

Traverten ve tufaların izotop bileşimleri geniş bir yelpazede dağılım gösterir. Çökeltme için gerekli ana girdilerden olan  $\text{CO}_2$ 'in başlıca kaynağı denizel kireçtaşlarıdır. Denizel kireçtaşlarının  $\delta^{13}\text{C}$  değeri yaklaşık 0'dır. Buna karşılık, toprak zonundaki  $\text{CO}_2$ 'nin  $\delta^{13}\text{C}$ 'ü ~ -15 ve mağmatik kökenli  $\text{CO}_2$ 'in  $\delta^{13}\text{C}$ 'ü -7 civarındadır (Pentecost, 2005).

Bazı durumlarda yüksek değerler rapor edilmiş ise de (Andrews et al., 1997), tufalarda duraylı karbon izotopu ( $\delta^{13}\text{C}$ ) genellikle -4 ile -12 (‰PDB) arasında bir dağılım gösterir (Arenas-Abad vd., 2010). Buna karşılık travertenler, 13‰'e kadar çıkan pozitif değerler gösterir (Pentecost, 2005). Batı Anadolu'da Denizli Havzası'nın kuzey kenarında yer alan traverten kütlelerinde +3.7 ile +11.7 arasında değişen pozitif değerlerle karşılaşılmıştır (Kele vd., 2011; Özkul vd., 2013). Yine Uşak İli'nin ~40 km GB'sında bulunan Aksaz travertenleri +4.3 ile +6.3 (‰PDB) arasında değişen  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri vermiştir (Özkul vd., 2014).  $\delta^{13}\text{C}$ 'ün göreceli pozitif değerleri, mağmatik aktivite ile birlikte gerçekleşen termometamorfik süreçlerin ortaya çıkardığı  $\text{CO}_2$  katılımına atfedilmiştir (Kele vd., 2011). Çoğu durumda,  $\text{CO}_2$ 'nin kireçtaşı dekarbonasyon reaksiyonlarından kaynaklandığına inanılır (Pentecost 2005), ancak mağmatik köken (~ -7‰PDB) de önemli olabilir (Yoshimura vd., 2004).

Traverten ve tufalarda  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri birbirine yakındır. Çoğunlukla -8 ile -5 (‰ PDB) arasında dağılım gösterirler, ancak, -1 ve -26 gibi daha uç değerler de rapor edilmiştir (Pentecost 2005, Şekil 44c). Travertenlerde  $\delta^{18}\text{O}$  değerlerinin ortalaması, istatistiksel olarak, ‰ PDB cinsinden -7.56 olarak bildirilmiştir (Pentecost 2005, Şekil 44c; Arenas-Abad vd., 2010). Pamukkale'deki güncel traverten yamaçlarında bu değerler ( $\delta^{18}\text{O}$ ) yamaç başında ‰ PDB cinsinden -10.7, yamaç tabanında -9.1'dir (Kele vd., 2011). Denizli Havzası'nın genelinde ise daha geniş bir dağılım (-16.6 ile -4.8‰ PDB) görülmektedir (Özkul vd., 2013; Tablo 4, Şekil 15). Diğer taraftan Aksaz (Uşak) travertenlerinde -12.6 ile -7.2 arasında yer alan sonuçlar elde edilmiştir (Özkul vd., 2014).

Arjantin'in kuzeyinde, And Dağları'nda yapılan bir çalışmada travertenlerde ölçülen -6 civarındaki  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri,  $\text{CO}_2$ 'nin mağmatik kökenli olduğunun bir göstergesi olarak yorumlanmıştır (Gibert vd., 2009).

Hisaralan'da kule tipi travertenlerden alınan 41 adet örneğin  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri -0.5 ile -4.2‰ (V-PDB) arasında,  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri ise -22.19 ile -9.99‰ (V-PDB) arasında değişir (Tablo 6.2, Şekil 6.23). Daha önceki bir çalışmada, Sındırgı ve Bigadiç'ten alınan 3 adet traverten örneğinin  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$  analizleri yapılmış,  $\delta^{13}\text{C}$  için -2.97, -2.21 ve 0.07,  $\delta^{18}\text{O}$  için -10, -6.51 ve -6.12 değerleri bulunmuştur (Mutlu, 2007; Tablo 6). Yazar,  $\delta^{13}\text{C}$  sonuçlarının denizel kireçtaşlarına benzerlik gösterdiğini belirtmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen  $\delta^{13}\text{C}$  sonuçlarına göre,  $\text{CO}_2$ 'nin kaynağının mağma kökenli olduğu düşünülmektedir.

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Hisaralan kaplıcaları (Sındırgı/Balıkesir) ve çevresinin temelinde Bornova Fliş Zonu yer alır. Bu temel kaya topluluğu üzerine Sındırgı volkanitleri gelir. En üstte sıcak suların oluşturduğu travertenler gelişmiştir.
- Çalışma alanı ve çevresinde Erken Miyosen yaşlı volkanitlerinde ölçülen eklemlerin doğrultusu K0-30°B, K50-90°B ve K30-50°D arasında üç farklı yönde yoğunlaşmaktadır.
- Sahada belirlenen faylar eklem doğrultularına paralel-yarı paralel olarak üç farklı yönde doğrultuya sahiptir. Fay düzlemleri üzerinde yapılan kinematik ölçümlere göre, faylar düşey, yatay ve oblik atım karakterindedir. Çalışma alanında tespit edilen traverten sırtlarının eksen doğrultuları K10-70°B'dir.
- Hisaralan jeotermal sistemi devirli bir sistemdir. Rezervuar kayaçlar Bornova Fliş Zonu içindeki Mesozoyik kristalize kireçtaşları ve kısmen asidik volkanik kayaçlardır. Tüfler ve Fliş Zonu içindeki geçirimsiz litolojiler örtü kayayı oluşturur. Beslenme alanına düşen yağış suları derinlere süzülerek, yüksek jeotermal gradyanla ısınır ve faylar aracılığıyla yüzeyleyerek sıcak su kaynaklarını oluşturur.
- Hisaralan sahasında toplam 118,6 l/s debi ile boşalan termal suların sıcaklık, EC ve pH değerleri sırasıyla 54,1 ile 97,0°C, 1193 ile 1659 µS/cm ve 6,10 ile 8,78 arasındadır. Emendere sahasında bu değerler sırasıyla 25,2- 32,0°C, 266 ile 436 µS/cm ve 6,82 ile 8,44 şeklindedir.
- Hisaralan sahası termal sularının tümü ve EM-3 (Emendere) Na-HCO<sub>3</sub>, Emendere sahasındaki diğer termal sular Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> tipindedir. Termal suların kimyasal kompozisyonunu şekillendiren başlıca işleyler su-kaya etkileşimi, soğuk yeraltısuyu karışımı ve iyon değişimidir.
- İnceleme alanı suları meteorik kökenlidir. Termal sulardaki karbonun kaynağı manto CO<sub>2</sub>'i, denizel kireçtaşı veya yeraltısuyu DIC'ı ya da bunların bir kombinasyonudur. Kükürdün kaynağı ise kireçtaşı, şeyl ve/veya volkanik sülfürdür.
- Termal suların trityum değerleri genellikle 1 TU'nun altındadır. <sup>14</sup>C değerlerine göre termal suların görünür yaşının 25.000 yıl mertebesinde olduğu söylenebilir.

- Hisaralan termal kaynaklarının hemen hemen tümü kalsit, aragonit ve kuvars minerallerine göre doygundur ve bu minerallerin, suyun çıkarılması, akımı veya iletimi sırasında çökmesi beklenir. Hisaralan sahasında suların, kaynak çıkışlarında dahi bu minerallerce doygun olması, kaynak ağzından itibaren karbonat ve silis (kuvars) çökeline neden olmaktadır. Başlıca kabuk türü kalsit ve aragonittir.
- Termal sulara uygulanan çeşitli jeotermometre teknikleri değerlendirildiğinde Hisaralan sahası için 125-190°C, Emendere sahası için ise 40-90°C aralığında rezervuar sıcaklığı öngörülmektedir.
- Hisaralan travertenlerinde kristalin kabuk, bantlı traverten, pizoid, nilüfer yaprağı (lilypad), rafı (ledge) ve mikrobiyal traverten litotipleri ayıt edilmiştir. Bu litotiplerin kökensel birlikteliklerinden traverten kuleleri, kaynak tümsekleri, fisür sırtları, şelale ve yamaç depolanma morfolojileri gelişmiştir. Bunlar arasında ender oluşumlar olan traverten kuleleri dikkat çekmektedir.
- Travertenlerin mineralojik bileşimlerinde en çok rastlanan mineral kalsittir. Ancak bazı örneklerde %1 ile %64 arasında aragonit belirlenmiştir. Bunun yanında eser miktarda kuvars, feldispat ve jips gözlenir.
- Hisaralan travertenlerinin  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri -0.5 ile -4.3‰ (V-PDB) arasında,  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri ise -23.6 to ile -11‰ (V-PDB) arasında değişir. Negatif  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri, traverten çökeline mağmatik kökenli  $\text{CO}_2$  katılımını işaret etmektedir. Element ve duraylı izotop verileri dikkate alındığında, travertenleri derin dolaşımli hidrotermal suların depoladığı düşünülür.
- Travertenlerde yüksek Sr İzotop değerlerine (0.710024-0.710396) rastlanmıştır. Bu yüksek değerler, Hisaralan Jeotermal Sahası'nın altında, derinde radyojenik temel kayaları ile akışkan arasında bir etkileşimin varlığına işaret eder.
- U-Th yaşlandırma analizlerine göre travertenlerde  $12.006 \pm 0.752$  (bin yıl), ile  $32,543 \pm 4,605$  (bin yıl) arasında değişen yaşlar elde edilmiştir.
- Ender rastlanan traverten kulelerinin ve sıcak su kaynaklarının yer aldığı Hisaralan sahası koruma altına alınmalı ve önümüzdeki süreçte bir jeopark statüsü kazandırılmalıdır.
- Emendere sahasında yapılan çalışmalarda laminalı tufa (=stromatolitik tufa), onkolitik tufa, bryofit tufa, fitoklastik tufa gibi litotipleri ile silisiklastik ara düzeylerde çakıltaş ve

çamurtaşı litotipleri tanımlanmıştır. Flüvyal sistem içinde şelale ve yamaç depolanma depolanma morfolojileri gelişmiştir.

- Emendere tufalarının  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri ‰PDB cinsinden -3.60 ile -6.81 arasında,  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri ise ‰PDB cinsinden -11.45 ile -7.52 arasında değişir. Bu negatif izotop değerleri dikkate alındığında, tufa çökelleri bir akarsu vadisi boyunca boşalan sığ dolaşımli kaynak suları tarafından çökeltmiştir.
- U-Th yaşlandırma sonuçlarına göre tufa çökeli Holosen (1.151-8.143 bin yıl arasında) ve son buzularası dönemde (92,65-118,04 bin yıl arasında) gerçekleşmiştir.
- Traverten kulelerinin ve sıcak su kaynaklarının yer aldığı Hisaralan sahasında elektrik üretimi amacıyla açılacak bir jeotermal sondaj ya da sondajlar termal kaynakların kurumasına ve kule oluşumlarının durmasına neden olacaktır. Bu nedenle, bu doğal sit alanının korunması için sahaya (koruma ve rekreasyon çalışmaları dışında) müdahale edilmemelidir.

## KAYNAKLAR

- Aksoy, N., Demirkıran, Z., Şimşek, C. 2009. "Sındırgı–Hisaralan (Balıkesir) Jeotermal Sahasının Jeokimyasal Özelliklerinin Değerlendirilmesi", Jeotermal Enerji Semineri, 61-72. İzmir.
- Altunel, E., Hancock P.L. 1993. "Morphology and structural setting of Quaternary Travertines at Pamukkale, Turkey", *Geological Journal*, 28, 335-346.
- Altunel, E., Karabacak V. 2005. "Determination of horizontal extension from fissure-ridge travertines: A case study from the Denizli Basin, southwestern Turkey", *Geodinamica Acta*, 18, 333-342.
- Andrews, J. E. 2006. "Palaeoclimatic records from stable isotopes in riverine tufas: synthesis and review", *Earth Science Review*, 75, 85-104.
- Andrews, J.E., Riding, R., Dennis, P.F. 1997. "The stable isotope record of environmental and climatic signals in modern terrestrial microbial carbonates from Europe", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129, 171-189.
- Arenas-Abad, C., Vázquez-Urbez, M., Pardo-Tirapu, G. And Sancho-Marcen, C. 2010. "Fluvial and associated carbonate deposits", In: *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments, and Processes* (Eds A.M. Alonso Zarza and L.H. Taner), *Dev. Sedimentol.*, 61, 133–175.
- Arnórsson, S., Sigurdsson S., Svavarsson H. 1982. "The chemistry of geothermal waters in Iceland I. Calculation of aqueous speciation from 0°C to 370°C", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 1513-1532.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H. 1983. "The chemistry of geothermal waters in Iceland, III. Chemical geothermometry in geothermal investigations", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47 (3), 567-577.
- Atabey, E. 2000. Deprem. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınlarından, Eğitim Serisi No. 34, Ankara.
- Bargar, K. E. 1978. "Geology and thermal history of Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, Wyoming", *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1444, 1-55.
- Bertini, A., Minissale, A., Ricci M. 2014. "Palynological approach in upper Quaternary terrestrial carbonates of central Italy: Anything but a 'mission impossible'", *Sedimentology*, 61, 200-220.
- Bilim, F., Akay. T., Aydemir, A., Koşaroğlu, S. 2016. "Curie point depth, heat-flow and radiogenic heat production deduced from the spectral analysis of the aeromagnetic data for geothermal investigation on the Menderes Massif and the Aegean Region, western Turkey", *Geothermics*, 60, 44–57.
- Boschetti, T. 2013. "Oxygen isotope equilibrium in sulfate-water systems: a revision of geothermometric applications in low-enthalpy systems", *Journal of Geochemical Exploration*, 124, 92–100.
- Brinkmann, R. 1971. "Jung Palaozoikum und alteres Mesozoikum in NW Anatolien", *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, 76, 56-67.
- Brogi, A., Capezzuoli, E., Buracchi, E., Branca M. 2012. "Tectonic control on travertine and calcareous tufa deposition in a low-temperature geothermal system (Sarteano, Central Italy)", *Journal of the Geological Society*, 169, 461-476.
- Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Koepnick, R.B., Nelson, H.F., Otto, J.B. 1982. "Variation of seawater <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr throughout Phanerozoic time", *Geology*, 10, 516–519.



- Chafetz, H.S., Folk, R.L. 1984. "Travertines: Depositional morphology and the bacterially constructed constituents", *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 289-316.
- Chafetz, H. S. Guidry, S. A. 2003. "Deposition and diagenesis of Mammoth Hot Springs travertine, Yellowstone National Park, Wyoming, USA". *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40 (11), 1515-1529.
- Claes, H., Soete, J., Van Noten, K., El Desouky, H., Erthal, M.M., Vanhaecke, F., Özkul, M., Rudy S. 2015. "Sedimentology, three-dimensional geobody reconstruction and carbon dioxide origin of Pleistocene travertine deposits in the Ballık area (south-west Turkey)", *Sedimentology*, 62, 1408-1445.
- Clark, I.A., Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers-CRC Press, Boca Raton, New York.
- Cortecci, G. 1974. "Oxygen isotopic ratios of sulfate ions-water pairs as a possible geothermometer", *Geothermics*, 3, 60-64.
- Cortecci, G., Dowgiałło, J. 1975. "Oxygen and sulfur isotopic composition of the sulfate ions from mineral and thermal groundwaters of Poland", *J Hydrol*, 24, 271-282.
- Craig, H. 1961. "Isotopic variations in meteoric waters", *Science*, 133, 1702-B.
- Crossey, L. J., Fischer, T. P., Patchett, P. J., Karlstrom, K. E., Hilton, D. R., Huntoon, P., Reynolds A. C. 2006. "Dissected hydrologic system at Grand Canyon: interaction between upper world and lower world waters in modern springs and travertine", *Geology*, 34, 25-28.
- Çobanoğlu, I., Çelik S.B. 2012. "Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey)" *Engineering Geology*, 129-130, 38-47.
- Çolak Erol, S., Özkul, M., Aksoy, E., Kele, S., Ghaleb B. 2015. "Travertine occurrences along major strike-slip fault zones: Structural, depositional and geochemical constraints from the Eastern Anatolian Fault System (EAFS), Turkey", *Geodinamica Acta*, 27 (2-3), 154-173.
- Çolak, M., Kocabaş, C. 2011. Hisaralan (Sındırgı) ve Çevresindeki Volkaniklerde Gözlenen Hidrotermal Alterasyonun Kökeni. 109Y171 nolu TÜBİTAK Projesi Sonuç Raporu.
- De Filippis, L., Faccenna, C., Billi, A., Anzalone, E., Brilli, M., Özkul, M., Soligo, M., Tuccimei, P., Villa, M. 2012. "Growth of fissure ridge travertines from geothermal springs of Denizli Basin, western Turkey", *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 124, 1629-1645.
- Demirtaş, R., Erkmén, C., Yaman, M., Tepeuğur, E., Eravcı, B., Yanık, K., Baran, B., Çolakoğlu, Z. 2003. 17-18 Haziran 2003 Sındırgı-Bigadiç Depremleri Deprem Fırtınası mı?, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Sismoloji Şube Müdürlüğü, Deprem Raporları No:023, Ankara.
- Doğan, A. ve Emre, Ö. 2006. "Ege Graben Sistemi'nin Kuzey Sınırı: Sındırgı-Sincanlı Fay Zonu", 59. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 20-24 Mart 2006, Bildiri Özleri Kitabı, 83-84, Ankara.
- Eisenlohr, T. 1997. The thermal springs of the Armutlu Peninsula (NW Turkey) and their relationship to geology and tectonics in active tectonics of Northwestern Anatolia—The Marmara Poly Project. In: Schindler, C., Pfister, M. (eds) vdf Hochschulverlag-AGanderETHZurich, pp197-228.
- Ekmekçi, M., Günay, G., Şimşek, Ş. 1995. "Morphology of rimstone pools, Pamukkale, Western Turkey", *Cave Karst Science*, 22, 103-106.
- El Desouky, H., Soete, J., Claes, H., Özkul, M., Vanhaecke, F., Swennen, R. 2015. "Novel applications of fluid inclusions and isotope geochemistry in unravelling the genesis of fossil travertine systems", *Sedimentology*, 62, 27-56.
- Elderfield, H. 1986. "Strontium isotope stratigraphy", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 57, 71-90.

Emre, T., Sözbilir, H. 2007. "Tectonic Evolution of the Kiraz Basin, Küçük Menderes Graben: Evidence for Compression/Uplift-related Basin Formation Overprinted by Extensional Tectonics in West Anatolia", Turkish Journal of Earth Sciences,16, 441-470.

Emre, Ö., Duman, T.Y. 2011. 19 Mayıs 2011 Simav (Kütahya) Depremi Ön Değerlendirmesi Raporu. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi Yer Dinamikler Araştırma ve Değerlendirme Koordinatörlüğü Aktif Tektonik Araştırmaları Birimi.

Emre, Ö., Özalp, S., Duman, T.Y. 2011a. Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Uşak (NJ 35-8) Paftası, Seri No:11. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.

Emre, Ö., Doğan, A., Özalp, S. 2011b. Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Balıkesir NJ 35-3) Paftası. Seri No:4. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S. 2011c. Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Kütahya (NJ 35-4) Paftası. Seri No:10, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun, Ş., Elmacı, H. 2011d. Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Afyon (NJ 36-5) Paftası. Seri No:16, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.

Erdoğan, B. 1990. "Tectonic relations between İzmir- Ankara Zone and Karaburun Belt", Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey, 110, 1-15.

Erdoğan, B., Güngör, T. 1992. "Stratigraphy and tectonic evolution of the northern margin of the Menderes Massif", Turkish Association of Petroleum Geologists Bulletin, 4, 9-34.

Erkül, F., Helvacı, C., Sözbilir, H. 2005. "Evidence for two episodes of volcanism in the Bigadiç borate basin and tectonic implications for western Turkey", Geological Journal,40, 545-570.

Erkül, F., Tatar Erkül, S., Helvacı, C. 2010. "Erken Miyosen Bigadiç bor havzasındaki volkanik birimlerin petrografik ve jeokimyasal özellikleri: magma karışımının kanıtları, Batı Anadolu-Türkiye", Yerbilimleri, 31 (2), 141-168.

Erkül, S.T. ve Erkül, F. 2012. "Magma interaction processes in syn-extensional granitoids: The Tertiary Menderes Metamorphic Core Complex, western Turkey", Lithos, 142-143, 16-33.

Faccenna, C., Soligo, M., Billi, A., De Filippis, L., Funiciello, R., Rossetti, C., Tuccimei P. 2008. "Late Pleistocene depositional cycles of the Lapis Tiburtinus travertine (Tivoli, Central Italy): possible influence of climate and fault activity", Global and Planetary Change, 63, 299-308.

Ford, T.D., Pedley H.M. 1996. "A review of tufa and travertine deposits of the World", Earth and Science Review, 41, 117-175.

Fouke, B.W. 2011. "Hot-spring systems geobiology: abiotic and biotic influences on travertine formation at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA", Sedimentology, 58, 170-219.

Fouke, B.W., Farmer, J.D., Des Marais, D.D., Pratt, L., Sturchio, N.C., Burns, P.C., Discipulo, M.K. 2000. "Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, U.S.A.)", Journal of Sedimentary Research, 70, 565-585.

Fouillac, C. and Michard, G. 1981. "Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs", Geothermics 10, 55-70, (1981).

- Fournier, R.O. 1977. "Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems", In: Proceedings of the Symposium on Geothermal Energy, Cento Scientific Programme, Ankara, 199-210.
- Fournier, R.O., Potter, R.W. 1979. "Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometers", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43, 1543-1550.
- Fournier, R.O., Truesdell, A. 1973. "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters", *Geochim Cosmochim Acta*, 37, 1255-1275.
- Fouillac, C., Fouillac, A.M., Criaud, A., 1990. "Sulphur and oxygen isotopes of dissolved sulphur species in formation waters from the Dogger geothermal aquifer, Paris Basin, France", *Appl Geochem*, 5, 415-427.
- Gao, J., Zhou, X., Fang, B., Li, T., Tang, L. 2013. "U-series dating of the travertine depositing near the Rongma hot springs in northern Tibet, China, and its paleoclimatic implication", *Quaternary International*, 298, 98-106.
- Gemici, Ü., Tarcan G. 2007. "Hydrogeochemistry of the Hisarkoy geothermal area (Balıkesir) Western Turkey", 12th International Symposium on Water-Rock Interaction, JUL 31-AUG 05, Water-Rock Interaction, Vols 1 and 2, Proceedings, 203-206, China.
- Gibert, R.O., Taberner, C., Sáez, A., Giralt, S., Alonso, R.N., Edwards, R. L., Pueyo J.J. 2009. "Igneous origin of CO<sub>2</sub> in ancient and recent hot-spring waters and travertines from the Northern Argentinean Andes", *Journal of Sedimentary Research*, 79, 554-567.
- Giggenbach, W.F. 1988. "Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Göçmez, G., Ölmez, E. 2008. "Hydrochemical investigation of waters in Bigadiç-Hisarköy (Balıkesir-Turkey) geothermal area", 8th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, Jun 16-20, Conference Proceedings, Vol. 1, 691-697, Bulgaria.
- Gradziński, M., Wróblewski, W., Duliński, M., Hercman H. 2014. "Earthquake-affected development of a travertine ridge", *Sedimentology*, 61, 238-263.
- Guo, L. and Riding R. 1998. "Hot-spring travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy", *Sedimentology*, 45, 163-180.
- Gündoğdu, E., Özden, S., Güngör, T. 2015. "Simav (Kütahya) ve yakın civarının geç Senozoyik yaşlı jeodinamik evrimi", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58 (3), 23-37.
- Hafeli, C. J. 1966. "Hisaralan (Batı Anadolu) ılıcaları bölgesinde yapılan jeolojik ve hidrolojik etüdüleri", *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 67, 110-117.
- Hancock, P.L., Chalmers, R.M.L., Altunel, E., Çakır, Z., Becher-Hancock A. 2000. "Creation and destruction of travertine monumental stone by earthquake faulting at Hierapolis, Turkey", In: McGuire, W.G., Griffiths, D.R., Hancock, P.L., Stewart, I.S. (Eds.), *The Archaeology of Geological Catastrophes: The Geological Society, London. Special Publications 171*, 1-14.
- Helvacı, C. 1995. "Stratigraphy, mineralogy and genesis of the Bigadiç borate deposits, western Turkey", *Economic Geology*, 90, 1237-1260.
- Helvacı, C., ve Alaca, O. 1991. "Bigadiç Borat Yatakları ve Çevresinin Jeolojisi ve Mineralojisi", *MTA Dergisi*, 113, 61-92.
- (<http://bolge25.dsi.gov.tr/isletmedekitesisler/baraj-golet>)-08.02.2018
- Hutchinson, R.A., Thompson, J.M. 1992. "The Travertine Totem Forest of Yellowstone National Park, USA – geologic controls and geochemistry", In: Kharaka, Y.K., Maest, A.S. (Eds.), 7th International Symposium on Water-Rock Interaction. International Association of Geochemists and Cosmochemists, Park City, Utah, U.S.A., pp. 1419-1421.

- IAH. 1979. Map of mineral and thermal water of Europe. Scale 1:500.000. International Association of Hydrogeologists, United Kingdom.
- Işık, V., Tekeli, O., Seyitoğlu, G. 2004. "The Ar-40/ Ar-39 age of extensional ductile deformation and granitoid intrusion in the northern Menderes core complex: implications for the initiation of extensional tectonics in western Turkey", *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 (4), 555-566.
- Jettestuen, E., Jamtveit, B., Podladchikov, Y.Y., Amundsen, H.E.F., Meakin, P. 2006. "Growth and characterization of complex mineral surfaces", *Earth and Planetary Science Letters*, 249 (1-2), 108-118.
- Jones, B., Renaut, R.W. 1998. "Origin of platycalcite crystals in hot-spring deposits in the Kenya Rift Valley", *Journal of Sedimentary Research*, 68, 913-927.
- Jones, B., Renaut, R.W. 2010. "Calcareous spring deposits in continental settings", In: Alonso Zarza, A.M., Taner, L.H. (Eds.), *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments, and Processes. : Developments in Sedimentology*, 61. Elsevier, pp. 177-224.
- Jones, B., Renaut, R.W. 2008. "Cyclic development of large, complex calcite dendrite crystals in the Clinton travertine, Interior British Columbia, Canada", *Sedimentary Geology*, 203, 17-35.
- Jones, B., Peng, X. 2017. "Growth and development of spring towers at Shiqiang, Yunnan Province, China", *Sedimentary Geology*, 347, 183-209.
- Kastelli, M. 1974. Balıkesir (Sındırgı-Hisaralan Sahası) J20-b2, b3, b4 ve c1 paftaları jeolojik etüdü ve jeotermal alan olanakları, MTA Rapor, No:5592, Ankara.
- Kele, S., Özkul, M., Gökgöz, A., Fórizs, I., Baykara, M.O., Alçıçek, M.C., Németh T. 2011. "Stable isotope geochemical and facies study of Pamukkale travertines: new evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation", *Sedimentary Geology*, 238, 191-212.
- Keppel, M.N., Clarke, J.D.A., Halihan, T., Love, A.J., Werner, A.D. 2011. "Mound springs in the arid Lake Eyre South region of South Australia: A new depositional tufa model and its controls", *Sedimentary Geology*, 240, 55-70.
- Kharaka, Y.K., Mariner, R.H. 1989. "Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins", In: Na "serND, McCullohTH(eds) *Thermal history of sedimentary basins; methods and case histories*. Springer, Heidelberg, pp 99-117.
- Kocabaş, C., Tokçaeer, M., Çolak, M. 2016. "Clay Mineralogy and Geochemistry of Fossil and Active Hydrothermal Alteration in the Hisaralan Geothermal Field (Sındırgı-Balıkesir), western Turkey", *AKU J. Sci. Eng.*, 16, 132-134.
- Linares, R., Rosell, J., Roque, C., Gutierrez, F. 2010. "Origin and evolution of tufa mounds related to artesian karstic springs in Isona area (Pyrenees, NE Spain)", *Geodynamica Acta*, 23, 129-150.
- Liu, Y., Zhou, X., Fang, B., Zhou, H., Yamanaka, T. 2012. "A preliminary analysis of the formation of travertine and travertine cones in the Jifei hot spring, Yunnan, China", *Environmental Earth Sciences*, 66, 1887-1896.
- Lloyd, R.M. 1968. "Oxygen isotope behavior in the sulphate water system", *J Geophys Res*, 73, 6099-6110.
- McKenzie, W.F., Truesdell, A.H. 1977. "Geothermal reservoir temperatures estimated from the oxygen isotope compositions of dissolved sulfate and water from hot springs and shallow drillholes", *Geothermics*, 5, 51-61.

- Meakin, P., and Jamtveit, B., 2010. "Geological pattern formation by growth and dissolution in aqueous systems", *Proceedings of the Royal Society of London A*, 466, 659–694.
- Mesci, B. L. 2013. "Active tectonics of the Ortaköy fissure-ridgetype travertines: Implications for the Quaternary stress state of the neotectonic structures of the Central Anatolia, Turkey", *Geodinamica Acta*, 25, 12-25.
- Mesci, B. L., Gürsoy, H., Tatar O. 2008. "The evolution of travertine masses in the Sivas area (central Turkey) and their relationships to active tectonics", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 219-240.
- Minissale, A., Kerrick, D. M., Magro, G., Murrell, M. T., Paladini, M., Rihs, S., Sturchio, N. C., Tassi, F., Vaselli, O. 2002. "Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): Structural, hydrologic and paleoclimatologic implications", *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 709-728.
- Mizutani, Y., Rafter, T.A. 1969. "Oxygen isotopic composition of sulfates–3. Oxygen isotopic fractionation in the bisulphate ion-water system", *New Zealand Journal of Science*, 12, 54-59.
- Mizutani, Y. 1972. "Isotopic composition and underground temperature of the Otake geothermal water, Kyushu, Japan", *Geochemistry Journal*, 6, 67–73.
- M.T.A. 2005. *Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri. Envanter Serisi, 201, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.*
- Mutlu, H. 2007. "Constraints on the origin of the Balıkesir thermal waters (Turkey) from stable isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) and major-trace element compositions", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 13-32.
- Mutlu, H. ve Kılıç A. 2009. "Geothermometry applications for the Balıkesir thermal waters, Turkey", *Environmental Geology*, 56, 913-920.
- Nieva, D. and Nieva, R. 1987. "Developments in geothermal energy in Mexico, part 12: A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources", *Heat Recovery Systems and CHP* 7, 3, 243-258.
- Okay, A.İ. and Altın, D. 2007. "A Condensed Mesozoic Succession North of İzmir: A Fragment of the Anatolide-Tauride Platform in the Bornova Flysch Zone", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 257-279.
- Okay, A.İ., İşintek, İ., Altın, D., Altın, S.Ö., Okay, N. 2012. "An olistostrome–mélange belt formed along a suture: Bornova Flysch zone, western Turkey", *Tectonophysics*, 568-569, 282-295.
- Özden, S., Tutkun, S.Z., Bekler, T., Karaca, Ö., Komut, T., Kalafat, D., Ateş Ö., Demirci, A., Gündoğdu, E., Çınar, S. 2012. *Simav Fayı ile Kütahya Fayı (Emet-Orta Batı Anadolu) Arasında Kalan Bölgenin Neotektonik ve Sismotektonik Özellikleri. 109Y103, TÜBİTAK Projesi Final Raporu.*
- Özkul, M. 2005. Travertine deposits of Denizli Extensional Basin in Western Turkey: A general review. In: Özkul M, Yagiz S, Jones B (eds), *Proceedings of 1st International Symposium on Travertine, September 21–25, 2005, Denizli-Turkey, 18–24, Ankara: Kozan Ofset.*
- Özkul, M., Gökgöz, A. and Horvatinčić, N. 2010. Depositional properties and geochemistry of Holocene perched springline tufa deposits and associated spring waters: a case study from the Denizli province, Western Turkey. In: *Tufas and Speleothems: Unravelling the Microbial and Physical Controls*, pp. 245–262. (Eds. H.M. Pedley and M. Rogerson), The Geological Society, London.
- Özkul, M., Kele, S., Gökgöz, A., Shen, C.C., Jones, B., Baykara, M.O., Fórizs, I., Németh, T., Chang, Y.-W., Alçiçek, M.C. 2013. "Comparison of the Quaternary travertine sites in the

Denizli Extensional Basin based on their depositional and geochemical data”, *Sedimentary Geology*, 294, 179-204.

Özkul, M., Gökgöz, A., Kele, S., Baykara, M.O., Shen, C.-C., Chang, Y.-W., Kaya, A., Hançer, M., Aratman, C., Akın, T., Örü, Z. 2014. “Sedimentological and geochemical characteristics of a fluvial travertine: a case from the eastern Mediterranean region”, *Sedimentology*, 61, 291-318.

Palmer, M.R. and Elderfield, H. 1985. “Sr isotope composition of sea water over the last 75 Myr”, *Nature*, 314, 526–528.

Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99–4259, 312 pp.

Pedley, H. M. 2009. “Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments”, *Sedimentology*, 56, 221-246.

Pentecost, A. 2005. *Travertine*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag.

Piper, J. D., Mesci, L. B., Gürsoy, H., Tatar, O., Davies C. J. 2007. “Palaeomagnetic and rock magnetic properties of travertine: its potential as a recorder of geomagnetic palaeosecular variation, environmental change and earthquake activity in the Sıcak Çermik geothermal field, Turkey”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 161, 50-73.

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, 1479–1492.

Renaut, R.W., Jones, B., Le Turdu, C. 1999. “Calcite lily pads and ledges at Lorusio Hot Springs, Kenya Rift Valley: travertine precipitation at the air– water interface”, *Canadian Journal of Earth Science*, 46, 649-666.

Richter, D.V., Besenecker H. 1983. “Subrecent high-Sr aragonite ooids from hot springs near Tekke Ilica (Turkey)”, In: Perty, T.M. (Ed.), *Coated Grains*. Berlin:Springer-Verlag, pp. 154-162.

Seyitoğlu, G. ve Işık, V. 2006. “Batı Anadolu’nun Geç Tersiyer Jeolojik evrimi: Menderes masifinin yüzeleme mekanizması ve ilişkili sedimanter havza oluşumu hakkında yeni bir tektonik model”, 59. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri, 18-20.

Seyitoğlu, G., Işık, V., Çemen, İ. 2004. “Complete Tertiary exhumation history of Menderes massif, western Turkey: a working hypothesis Turkey”, *Terra Nova*, 16, 358-364.

Seyitoğlu, G., Scott, B. 1994. “Late Senozoic basin development in west Turkey: Gördes basin tectonics and sedimentation”, *Geological Magazine*, 131, 631-637.

Soete, J., Kleipool, L.M., Claes, H., Claes, S., Hamaekers, H., Özkul, M., Foubert, A., Reijmer, J.J.G., Swennen R. 2015. “Acoustic properties in travertines and their relation to porosity and pore types”, *Marine and Petroleum Geology*, 59, 320-335.

Sözbilir, H. 2005. “Oligo–Miocene extension in the Lycian Orogen: evidence from the Lycian molasse basin, SW Turkey”, *Geodinamica Acta*, 18, 255-282.

Spötl, C. and Vennemann, T.W. 2003. “Continuous-flow IRMS analysis of carbonate minerals”, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 17, 1004-1006.

Şahinci, A. 1991. *Jeotermal Sistemler ve Jeokimyasal Özellikleri*. Reform Matbaası, No.37/4 Beyler-İzmir, 247 s.

Şimşek, Ş. 2009. “Geothermal Energy Development Possibilities in Turkey”, Conference on “Geothermal Energy in Turkey” 01st October Potsdam-Germany.

- Şimşek, Ş., Günay, G., Elhatip, H., Ekmekci M. 2000. "Environmental protection of geothermal waters and travertines at Pamukkale, Turkey", *Geothermics*, 29, 557-572.
- Tarcan, G. 2001. "Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Gülbahçe Bay Hydrothermal Karst System, İzmir, Turkey", In *Present State and Future Trends of Karst Studies*. In: Günay, G., Johnson, K.S., Ford, D.C., Johnson, A.I.(eds), *Proceedings of the 6th international symposium and field seminar, Marmaris, Turkey*. UNESCOIHP-V Technical Documents in Hydrology, pp. 515–524.
- Tarcan, G. 2005. "Mineral saturation and scaling tendencies of waters discharged from wells (>150°C) in geothermal areas of Turkey", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 142, 263-283.
- Tarcan, G., Filiz, Ş., Gemici, Ü. 2000. "Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Davutlar thermal spring and its surroundings, Kuşadası, Aydın", *Dokuz Eylül University Faculty of Engineering, Journal of Science and Engineering*, 2, 91–110.
- Tarcan, G., Gemici, Ü. 2003. "Water geochemistry of the Seferihisar geothermal area, İzmir, Turkey", *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 126, 225–242.
- Tarcan, G., Gemici, Ü., Aksoy, N. 2009. "Hydrogeochemical factors effecting the scaling problem in Balçova geothermal field, İzmir, Turkey", *Environ.Geol.*, 58, 1375–1386.
- Temiz, U., Eikenberg J. 2011. "U/Th dating of the travertine deposited at transfer zone between two normal faults and their neotectonic significance: Cambazlı fissure ridge travertines (the Gediz Graben-Turkey)", *Geodinamica Acta*, 24, 95–105.
- Temiz, U., Gökten, E., Eikenberg J. 2013. "Strike-slip deformation and U/Th dating of travertine deposition: Examples from North Anatolian Fault Zone, Bolu and Yeniçağ Basins, Turkey", *Quaternary International*, 312, 132-140.
- Toker, E., Kayseri-Özer M. S., Özkul, M., Kele, S. 2015. "Depositional system and palaeoclimatic interpretations of Middle to Late Pleistocene travertines: Kocabaş, Denizli, south-west Turkey", *Sedimentology*, 62, 1360-1383.
- 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, 1975, Vol.1, Washington D.C., U. S. Government Printing Office, iii-ixxxix.
- Ünal, A. 1972. *Hisaralan Kaplıcaları Civarının Jeotermal Alan Olanakları Hakkında Rapor*. MTA Raporu, No: 5974,
- Van Noten, K., Claes, H., Soete, J., Foubert, A., Özkul, M., Swennen, R. 2013. "Fracture networks and strike-slip deformation along reactivated normal faults in Quaternary travertine deposits, Denizli Basin, Western Turkey", *Tectonophysics*, 588, 154–170.
- Vázquez-Urbez, M., Arenas, C. and Pardo, G. 2012. "A sedimentary facies model for stepped, fluvial tufa systems in the Iberian Range (Spain): the Quaternary Piedra and Mesa valleys", *Sedimentology*, 59, 502–526.
- Veizer, J. 1989. "Strontium isotopes in seawater through time", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 17, 141–67.
- Yalçın, T. 1997. "Hydrogeological investigation of the Gönen and Ekşidere thermal waters (northwest Turkey)", In: Schindler, C. & Pfister, M. (eds), *Active Tectonics of Northwestern Anatolia-the Marmara Poly-Project*. Vdf Hochschulverlag an der ETH, Zurich, 275–300.
- Yılmaz, Y., Genç, S.C., Gürer, F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, Ş, Elmas, A. 2000. "When did the western Anatolian grabens begin to develop?", E. Bozkurt, J.A. Winchester ve J.D.A. Piper (Ed.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*. Geological Society, London, Special Publications, pp. 353-384

Yılmaz, H., Sönmez, N. F., Akay, E., Şener, A. K., Tufan, S.T. 2013. "Low-Sulfidation Epithermal Au-Ag Mineralization in the Sındırgı District, Balıkesir Province, Turkey", Turkish Journal of Earth Sciences, 22, 485–522.

Yılmazer, S., Karahan, Ç., Vural S. 2010. Balıkesir ilinin muhtemel jeotermal potansiyeli. TMMOB- Balıkesir İl Koordinasyon Kurulu, Balıkesir Kent Sempozyumu, 26–28.11.2010, Balıkesir.

Yoshimura, K., Liu, Z., Cao, J., Yuan, D., Inokura, Y., Noto, M. 2000. "Deep source CO<sub>2</sub> in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sichuan, China", Chemical Geology, 205, 141–153.

Zentmyer, R., Myrow, P.M., Newell, D.L. 2008. "Travertine deposits from along the South Tibetan Fault System near Nyalam, Tibet", Geol. Mag., 145, 6, 753-765.



**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. MEHMET ÖZKUL
Proje No:	115Y141
Proje Başlığı:	Hisaralan (Sındırgı, Balıkesir) Jeotermal Alanındaki Traverten Oluşumları ve Sıcak Sular Üzerinde Sedimentolojik, Petrografik ve Jeokimyasal İncelemeler
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ALİ GÖKGÖZ, ALİ KAMIL YÜKSEL
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	PAMUKKALE Ü. MÜHENDİSLİK F. JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/12/2015 - 15/12/2017
Onaylanan Bütçe:	357511.0
Harcanan Bütçe:	258737.63
Öz:	<p>Çalışma alanının temelini Bornova Fliş Zonu oluşturur. Bu temel üzerinde Miyosen yaşlı volkanitler yer alır. En üstte travertenler bulunmaktadır.</p> <p>Hisaralan Jeotermal alanında Erken Miyosen volkaniklerinde eklemeler üç yönde yoğunlaşmıştır. Fayların çizikleri eklem doğrultuları ile uyumludur. Bölgedeki faylar düşey, yatay ve verrev atımlı faylardır. Çalışma alanındaki traverten sırtları KB_GD doğrultusunda gelişmiştir.</p> <p>Hisaralan jeotermal sistemi devirli bir sistemdir. Rezervuar kayaçlar Bornova Fliş Zonunun içindeki Mesozoyik kireçtaşları ve kısmen asidik volkaniklerdir. Tüfler ve Fliş Zonu içindeki geçirimsiz birimler örtü kayayı oluşturur.</p> <p>Hisaralan sahasında toplam 118,6 l/s debi ile boşalan termal suların sıcaklık, EC ve pH değerleri sırasıyla 54,1 ile 97,0°C, 1193 ile 1659 µS/cm ve 6,10 ile 8,78 arasındadır. Emendere sahasında bu değerler sırasıyla 25,2- 32,0°C, 266 ile 436 µS/cm ve 6,82 ile 8,44'dür. Hisaralan sahası termal suları Na-HCO<sub>3</sub> tipindedir. Termal suların kimyasal kompozisyonunu şekillendiren başlıca süreçler su-kaya etkileşimi, soğuk yeraltısuu karışımı ve iyon değişimidir. Hisaralan termal kaynaklarının tamamına yakını kalsit, aragonit ve kuvars minerallerine doygundur.</p> <p>İnceleme alanı suları meteorik kökenlidir. Termal sulardaki karbonun kaynağı manto CO<sub>2</sub>'i, denizel kireçtaşı veya yeraltısuu DIC'ı ya da bunların bir kombinasyonudur. Kükürdün kaynağı ise kireçtaşı, şeyl ve/veya volkanik sülfürdür.</p> <p>Termal sulara çeşitli jeotermometre teknikleri uygulandığında, Hisaralan için 125-190°C, Emendere için 40-90°C rezervuar sıcaklığı öngörülmüştür.</p> <p>Hisaralan travertenlerinde ve Emendere tufalarında toplam 12 litotip tanımlanmıştır. Hisaralan'da kule, kaynak tümseği, sırt, şelale ve yamaç depolanma morfolojileri gelişmiştir. Bunlar arasında traverten kuleleri dikkat çekmektedir. Emendere'de ise şelale ve yamaç depolanma morfolojileri ortaya çıkmıştır.</p> <p>Travertenlerin <math>\delta^{13}C</math> değerleri <math>-20.5</math> ile <math>-4.3</math> (V-PDB) arasında, <math>\delta^{18}O</math> değerleri <math>-23.6</math> ile <math>-11.1</math> (V-PDB) arasındadır. Negatif <math>\delta^{13}C</math> değerleri, mağmatik kökenli CO<sub>2</sub> katılımını işaret etmektedir. <math>^{87}Sr/^{86}Sr</math> izotopları 0.710024-0.710396 arasındadır. Bu sonuçlar, Hisaralan'da traverten çökeltin suların volkaniklerle etkileşimine bağlı olarak Sr izotop değerlerinin yükselmiş olduğunu gösterir. Buna karşılık, Emendere tufalarının <math>\delta^{13}C</math> değerleri <math>-3.60</math> ile <math>-6.81</math> (V-PDB) arasında, <math>\delta^{18}O</math> değerleri ise <math>-11.45</math> ile <math>-7.52</math> (V-PDB) arasındadır. Bu negatif değerlere göre, tufalar sıg dolaşimli kaynaklardan çökelmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Hisaralan, Emendere, traverten kulesi, tufa, U-Th yaşlandırma, termal sular, hidrokimya, izotop
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Proje Yapılan Yayınlar:	<p>1- Hisaralan (Sındırgı, Balıkesir) Jeotermal Sahası'nda sırt tipi traverten gelişimi ve bölgesel tektonik içindeki konumu. (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum),</p> <p>2- Özkul, M., Gökgöz, A., Yüksel, A.K., Atı, A., Çağdaş, G., 2017. Hisaralan (Sındırgı, Balıkesir) Jeotermal Alanındaki Travertenlerin Depolanma Özellikleri ve Jeokimyası. 70. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 10-14 Nisan 2017, O.D.T.Ü., Ankara. Bildiri Özleri, s. 718-719. (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>3- Hisaralan (Sındırgı, Balıkesir) Jeotermal Alanındaki Traverten Kulelerinin Depolanma Özellikleri. (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p>
-------------------------	--

TÜBİTAK