

KARAADA VE TAVŞANBURNU (BODRUM) SICAK VE MİNERALLİ SULARININ HİDROJEOKİMYASAL İNCELEMESİ

Kemal KOÇ

ÖZ

Karaada Jeotermal alanında bulunan sıcak ve mineralli su kaynaklarının kimyasal analizleri yapılarak akışkanların kimyasal karakterleri hidrojeokimyasal yöntemlerle değerlendirilerek termal kaynakların hidrotermal modelinin oluşturulması bu tez çalışmasının esas amacıdır.

İnceleme alanı Güneybatı Anadolu'da Muğla iline bağlı Bodrum ilçesinin güneyinde Kerme (Gökova) körfezinde yer almaktadır.

Çalışma alanında Triyas-Liyas yaşlı dolomitik kireçtaşları (Pazardağı Formasyonu), Liyas-Malm yaşlı siltli marnlı kireçtaşları (Karadağ Formasyonu), Malm-Senomaniyen yaşlı çörtlü kireçtaşları (Kışladağı Formasyonu) üst Miyosen yaşlı magmatik kayalar, Üst Kretase-Paleosen yaşlı Bodrum Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yer almaktadır. Bu birimlerden Pazardağı Formasyonu, Kışladağı Formasyonu ve alüvyonlar yeraltısuyu taşıyan başlıca birimlerdir. Aktif tektonizma sonucu gelişen horst-graben, kırık-çatlak sistemleri ve gelişen karstlaşma birimlere ikincil geçirimsizlik kazandırmıştır.

Karaada jeotermal alanında bulunan sıcak ve mineralli su kaynakları tuzlu sular (Na-Cl) soğuk sular ise karbonatlı (Ca-HCO_3) sular tipindedir. Sahile yakın kuyu sularına deniz suyu girişi olmaktadır. Jeotermal akışkanının rezervuar sıcaklığı silis jeotermometreleriyle 38-60 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcak su kaynağının Dünya Meteorik Su Doğrusuna yakın yerde bulunması bu kaynağın deniz suyu etkisinde olduğunu göstermektedir. Düşük ^3H ve yüksek ^{18}O içeriği kaynağın derin dolaşımli sular tarafından beslendiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: sıcak ve mineralli su, hidrojeokimya, izotop, jeotermal, Bodrum grabeni, Karaada, Muğla

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, Hidrojeoloji Mühendisliği

HYDROGEOCHEMICAL INVESTIGATION OF THERMAL AND MINERAL WATERS OF KARAADA AND TAVSANBURNU (BODRUM)

Kemal KOÇ

ABSTRACT

The main purpose of this study was to produce hydrothermal model by determine the chemical character from the chemical analysis of the hot and mineral water springs which is located in Karaada geothermal field.

The study area is located in Kerme (Gökova) Gulf, which lies in the south of Bodrum district of Mugla province.

Main lithostratigraphic units in the study area, Triassic-Liassic dolomitic limestones (Pazardağı Formation), Liassic-Malm aged silty and marly limestones (Karadağ Formation), Malm-Cenomanian aged cherty limestones (Kısladağı Formation), Upper Miocene aged magmatic rocks, Upper Cretaceous-Paleocene aged Bodrum Formation and Quaternary alluviums. Among these units, Pazardağı Formation, Kısladağı Formation and alluvium are the main formation carrying groundwaters. Results of active tectonism exhibit horst-graben, crack-fracture systems and karstic structure provided secondary permeability to these units.

Hot and mineralized water springs which is located in Karaada geothermal field are Sodium-Chloride type (Na-Cl) and cold groundwaters are Calcium-Carbonate (Ca-HCO_3) type water. Salt water intrusion has been observed in cold water wells close the shore. The temperature of geothermal fluid reservoir was calculated as 38-60°C by silica geothermometers. Being close this hot water spring to the World Meteoric Water Line shows that this spring is under effect of the sea water. Less amount of ^3H and high amount of ^{18}O also shows that this resource is consist of the deep circulation waters.

Key words: hot and mineralized water, hydrogeochemistry, isotope, geothermal, Bodrum graben, Karaada, Mugla

Hacettepe University, Geology Engineering, Hydrogeology Engineering

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın çeşitli aşamalarında destek ve katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kişi ve kuruluşlara içtenlikle teşekkür eder.

Prof. Dr. Şakir ŞİMŞEK (Tez Danışmanı), çalışmanın tüm aşamalarında bilgi ve tecrübeleri ile araştırma yöntemlerinin belirlenmesinde, saha, laboratuvar ve değerlendirme çalışmalarında yol gösterici maddi ve manevi katkıda bulunmuştur.

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Çevre ve Petrol Jeokimyası Laboratuvarı çalışanları duraylı izotop analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Hidrojeoloji Yük. Müh. N. Nur ÖZYURT (H.Ü.), Kimya Müh. Füsün MUSLU (H.Ü.) ve Kimyager Esin ÖNCEL (H.Ü.) su kimyası analizleri ve trityum analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Doç Dr. Mehmet EKMEKÇİ (HÜ), Dr. Müfit Şefik DOĞDU (H.Ü.), Dr. Harun AYDIN (H.Ü.), Hidrojeoloji Yük. Müh. Evren SOYLU (H.Ü.), Hidrojeoloji Yük. Müh. Hakan Aksu (DSİ), Hidrojeoloji Müh. Ünsal TURALI (MTA), Jeoloji Müh. Servet AÇIKGÖZ (MTA) Kimya Yük. Müh. Nazım YILDIRIM (MTA) tez çalışmasının çeşitli aşamalarında katkıda bulunmuşlardır. Harita Kadastro Teknikeri Bülent TOPUZ kesit ve harita çizimlerinde katkıda bulunmuştur.

Çalışma süresince Hidrojeoloji Yük. Müh. Hüseyin KARAKUŞ (H.Ü.) arazi çalışmalarının gerçekleştirilmesinde ve tezin her aşamasında yardımcı olmuştur.

Maddi, manevi destek ve sabırlarını hiç esirgemeyen aileme özellikle ağabeyim Erdal KOÇ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Çalışma ve Değerlendirme Yöntemleri	1
1.3. İnceleme Alanının Konumu	2
1.4. Doruk ve Hidrografi Ağı	2
1.5. İklim ve Bitki Örtüsü	3
1.6. Önceki Çalışmalar	9
2. İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ	11
2.1. Genel Stratigrafi	12
2.1.1. Mesozoyik	12
2.1.2 Senozoyik	17
2.1.3. Kuvaterner	18
2.2. Bölgesel Tektonizma ve Magmatizma	19
2.3. Depremsellik	22
3. HİDROJEOLJİ	24
3.1. Hidrojeolojik Birimler	24
3.1.1 Geçirimli birimler	24

3.1.2 Yarı Geçirimli Birimler	30
3.1.3 Geçirimsiz Birimler	30
3.2 Kaynaklar	30
3.3. Kuyular	33
3.4. Sarnıçlar	34
4. SU KİMYASI	36
4.1. Suların Fiziksel Özellikleri	36
4.1.1. Sıcaklık (S)	36
4.1.2. Elektriksel İletkenlik (EI)	37
4.1.3. Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH)	38
4.2. Suların Kimyasal Özellikleri	40
4.2.1. Majör ve minör iyonlar	40
4.2.2. Kirlilik Analizleri	44
4.2.3. Ağır metal analizleri	46
4.3. Deniz Suyu Katkı Oranının Belirlenmesi	51
4.4. Su Kaynaklarının Sınıflandırılması	55
4.4.1. Piper diyagramı	55
4.4.2. Schoeller diyagramı	57
4.4.3. Wilcox diyagramı	59
4.4.4. ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı	60
4.5. Suların Mineral Doygunlukları	62
4.6. Jeotermometre Uygulamaları	68
4.6.1. Silis jeotermometreleri	68
4.6.2. Katyon jeotermometreleri	70
5. ÇEVRESEL İZOTOP HİDROJEOLOJİSİ	76
5.1. Tritiyum (^3H)	76
5.2. Oksijen-18 (^{18}O) - Döteryum (^2H)	77
5.3. Örnekleme ve Analiz Çalışmaları	80
5.4. Duraylı İzotop Verilerinin Değerlendirilmesi	80
5.4.1. ^{18}O ve ^2H ilişkisi	81
5.4.2. ^{18}O -Cl ilişkisi	83
5.4.3. ^2H - ^3H ilişkisi	84

6. KAVRAMSAL HİDROTHERMAL MODEL	85
6.1. Jeotermal Akışkanın Kökeni ve Beslenme Alanı	85
6.2. Hazne Kayaç	86
6.3. Isı Kaynağı	86
6.3. Örtü kayaç	87
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
8. KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
Eİ	Elektriksel iletkenlik
HÜ	Hacettepe Üniversitesi
l/s	Litre/saniye
meq/l	Miliekivalen/litre
mg/l	Miligram/litre
µmho/cm	Mikromho/santimetre
MTA	Maden Tektik ve Arama Genel Müdürlüğü
pH	Hidrojen iyonu aktivitesi negatif logaritması
ppm	Milyonda Bir
S	Sıcaklık (°C)
SAR	Sodyum Adsorpsiyon Oranı
SI	Doygunluk indisi
SMOW	Standart Mean Of Ocean Water (Standart Ortalama Okyanus Suyu)
TÇM	Toplam çözünmüş madde miktarı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü Genel Müdürlüğü
TU	Tritiyum birimi
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
YĞİ	Yağış Gözlem İstasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İnceleme alanı yer bulduru haritası.....	4
Şekil 1.2. İnceleme alanı ve yakın çevresi yağış gözlem istasyonlarının dağılımı	5
Şekil 1. 3. Bodrum DMI'ye ait aylık ortalama yağış ve sıcaklık değişimi	6
Şekil 1. 4. İnceleme alanında yükselti yağış ilişkisi.....	7
Şekil 2. 1. İnceleme alanının genelleştirilmiş jeolojik stratigrafi kesiti	13
Şekil 2. 2 Bodrum-Karaada ve yakın dolayının jeoloji haritası.....	14
Şekil 2. 3. İnceleme alanındaki jeolojik kesitler.....	15
Şekil 2. 4. Anadolu-Ege bölgesinin tektonik düzeni, güncel plaka hızları ve hareket yönleri.....	19
Şekil 2. 5. İnceleme alanı ve çevresinin fay hatları haritası	22
Şekil 2. 6.a. Türkiye deprem haritası	23
Şekil 2. 6 b. Türkiye deprem episantr dağılım haritası (M>5)	23
Şekil 2. 6.c. İnceleme alanı çevresinin deprem episantr dağılım haritası (M>4)	23
Şekil 3. 1. İnceleme alanındaki litolojik birimlerin hidrojeolojik özellikleri	25
Şekil 3. 2 Bodrum-Karaada ve yakın dolayının hidrojeoloji haritası.....	26
Şekil 3. 3. İnceleme alanındaki hidrojeolojik kesitler.....	27
Şekil 4. 1. İnceleme alanında yer alan suların tatlı su-tuzlu su oranları.....	53
Şekil 4. 2: İnceleme alanındaki suların Cl-Eİ grafiği	54
Şekil 4. 3.a. İnceleme alanındaki su örneklerine ait Piper diyagramı (Eylül 2004).....	56
Şekil 4. 3.b. İnceleme alanındaki su örneklerine ait Piper diyagramı (Nisan 2005).	56
Şekil 4. 4.a,b. İnceleme alanındaki suların Schoeller diyagramları (a: Eylül 2004, b: Nisan 2005).....	58
Şekil 4. 5. İnceleme alanındaki suların Wilcox diyagramı	60

Şekil 4. 6: İnceleme alanındaki suların ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı	63
Şekil 4.7.a. İnceleme alanındaki tatlı suların SI diyagramı	66
Şekil 4.7.b. İnceleme alanındaki tuzlu suların SI diyagramı	66
Şekil 4.7.c. İnceleme alanındaki sıcak sular ve deniz suyunun SI diyagramı	67
Şekil 4.8. İnceleme alanındaki sıcak suların Na-K-Mg üçgen diyagramı	75
Şekil 5.1. Şematik $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ grafiği.	80
Şekil 5.2. İnceleme alanındaki suların $^{18}\text{O}-^2\text{H}$ grafiği.....	82
Şekil 5.3. İnceleme alanındaki suların $^{18}\text{O}-\text{Cl}$ grafiği	83
Şekil 5.4. İnceleme alanındaki suların $^{18}\text{O}-^3\text{H}$ grafiği.....	84
Şekil 5.5. İnceleme alanındaki suların $^2\text{H}-^3\text{H}$ grafiği..	85
Şekil 6.1. Karaada jeotermal alanının kavramsal hidrotermal modeli	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. İnceleme alanı ve yakın çevresi yağış gözlem istasyonlarının özellikleri.	5
Çizelge 1.2. İnceleme alanı dolayındaki meteoroloji istasyonlarına ait aylık ortalama yağış değerleri (mm).....	8
Çizelge 1.3. İnceleme alanı dolayındaki meteoroloji istasyonlarına ait aylık ortalama sıcaklık değerleri (°C).	8
Çizelge 4.1. Çalışma alanında örnekleme yapılan su noktalarının UTM koordinatları.	37
Çizelge 4.2. Çalışma alanından derlenen su örneklerine ait kimyasal analiz sonuçları	39
Çizelge 4.3. Çalışma alanından derlenen su örneklerine ait kirlilik analiz sonuçlar	46
Çizelge 4.4. Çalışma alanından derlenen su örneklerine ait ağır metal analiz sonuçları.	49
Çizelge 4.5. Çalışma alanındaki su noktalarına olan deniz suyu katkısı	53
Çizelge 4.6. Çalışma alanındaki su noktalarının SI değerleri	65
Çizelge 4.7. Silis jeotermometre eşitlikleri	69
Çizelge 4.8. Çalışma alanındaki sıcak su noktaları için silis jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (°C).....	69
Çizelge 4.9. Katyon jeotermometre eşitlikleri (derişimler meq/l'dir)	70
Çizelge 4.10. Çalışma alanındaki sıcak su noktaları için katyon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (°C).....	72
Çizelge 5.1. inceleme alanındaki örneklerin duraylı izotop ve trityum içerikleri (Eylül 2004).....	81

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Foto 3.1. Kışladağı Formasyonu içinde gözlenen jeolojik ve hidrojeolojik yapılar	29
Foto 3. 2. Karaada jeotermal kaynağı ve çıkış noktasındaki mağara	32
Foto 3.3. Tavşanburnu sıcak ve mineralli su kaynağı (günümüzde kaynak görülmemektedir.)	33
Foto 3.4. İnceleme alanındaki bazı kuyular ve iç görünüşleri	35

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, Bodrum-Karaada jeotermal alanında yer alan sıcak ve mineralli su kaynaklarının kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ile jeotermal sistemindeki akışkanın kimyasal karakteri, yeraltında gelişen hidrojeokimyasal süreçleri, rezervuar sıcaklığı, akışkan-mineral dengesi ve ısı kaynağı gibi jeotermal sistemin yorumlanmasında gerekli olan bazı parametrelerin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu parametrelerden yararlanılarak sistemin kavramsal hidrotermal modeli tanımlanmıştır.

İnceleme alanında daha önce yapılmış hidrojeolojik amaçlı çalışmalar genel olarak bölgenin tümünü kapsamakta olup, bugüne kadar araştırma konusu olan Karaada jeotermal alanının hidrojeolojisine ve su kimyasına yönelik ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle jeotermal alandaki sıcak su kaynaklarına akifer olan kayaçların litolojileri, yayılımları, beslenme alanları hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışmada; Karaada jeotermal alanında yer alan suların fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenerek, izotop verileri ışığında bölgedeki yeraltısuyunun beslenme ve dolaşım sistemi incelenmiştir.

Bölgeye ait jeolojik veriler önceki çalışmalardan yararlanılarak derlenmiş, alandaki formasyonların hidrojeolojik özellikleri yapılan saha çalışmaları ile birlikte değerlendirilmiştir. Saha çalışmalarında sıcak ve mineralli su kaynaklarından, soğuk su kuyularından ve deniz suyundan örnekler alınmış ve bu örneklerin analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

1.2. Çalışma ve Değerlendirme Yöntemleri

Çalışma alanındaki sıcak su kaynaklarının, akifer litolojileri, su kimyası çalışmaları ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Karaada jeotermal alanındaki rezervuar kayaç sıcaklığı silis ve katyon jeotermometre eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Sıcak su kaynağının kökeni ve soğuk su karışım süreçleri, yeraltısularında korunumlu kabul edilen elementlerin kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ile açıklanmaya çalışılmıştır. İnceleme alanındaki sıcak ve mineralli su kaynaklarının beslenme şekilleri duraylı izotoplar ile belirlenmiştir. Suların fiziksel ve kimyasal özellikleri

izotop analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilerek, bölgedeki yeraltısuyu dolaşım sistemleri açıklanmıştır.

1.3. İnceleme Alanının Konumu

İnceleme alanı Güneybatı Anadolu'da, Muğla ili Bodrum ilçesi sınırları içerisinde yer alan yaklaşık 200 km²'lik bir alanı kapsamaktadır (Şekil 1.1). Bu alan 27°22' ile 27°37' doğu boylamları ve 36°52' ile 37°07' kuzey enlemleri arasında, Aydın N18c3 ve N19d4 ile Marmaris O18b2 ve O19a1 olmak üzere 4 adet 1/25.000 lik pafta sınırları içinde yer almaktadır. Kerme körfezinde yer alan Karaada jeotermal alanının kuzeyinde Bodrum yarımadası; güneyinde ise Datça yarımadası yer almaktadır.

Bölgeye ulaşım genel olarak karayoluyla sağlanmaktadır. İl merkezleri arası yollar asfalt; köy yolları ise asfalt, stabilize ve toprak olup her mevsim ulaşım açıktır. Bölgede ulusal ve uluslararası deniz ulaşımını sağlayan önemli limanlardan biri Bodrum limanıdır. Gerenkuyu limanı, Yalıçiftlik limanı ve Akyalı limanı bölgede bulunan diğer limanlardır. İnceleme alanının güneyinde yer alan ve termal kaynağın da içinde bulunduğu Karaada'ya ulaşım sadece deniz yoluyla sağlanmaktadır. Bölgeye hava ulaşımı 1997 yılında işletmeye açılan Milas-Bodrum havaalanı ile sağlanmaktadır.

1.4. Doruk ve Hidrografiya Ağı

İnceleme alanının genel topografyasını dik kıyı yükseltisini takip eden plato ve doruklar tanımlar. Bodrum ilçe merkezinin doğusunda ve kuzeyinde yükseltiler yer yer 400-550 metreyi bulmaktadır. Bölgedeki en önemli yükseklikler, Tırman dağı (548 m), Kocadağ (484 m), Pınar dağı (396 m), Kışladağ (409 m), Elmadağ (297 m), Kale tepe (327 m) ve Karaada' da yer alan Karatepe (383 m) dir.

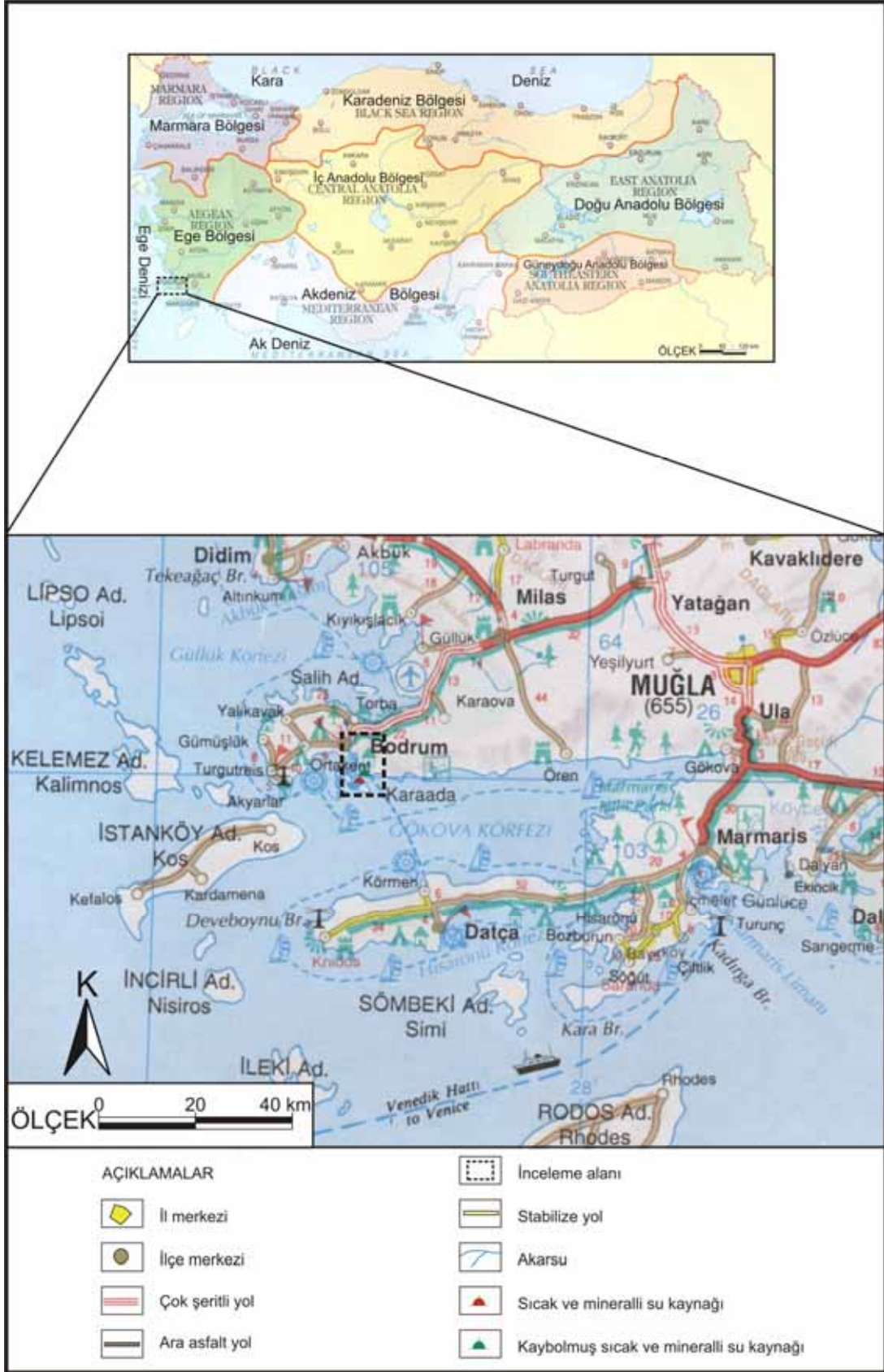
Bölgede drenaj ağı özellikle karstik birimlerin bulunduğu alanlarda fazla gelişmemiştir. Akarsuların tümü mevsimsel olup sürekli akarsu bulunmamaktadır.

1.5. İklim ve Bitki Örtüsü

Çalışma alanında yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı geçen tipik Akdeniz iklimi hüküm sürmektedir. Kıyı şeridindeki ani yükselmelere bağlı olarak mikroklima özellikleri de görülmektedir.

İnceleme alanı ve yakın çevresinde yer alan Yağış Gözlem İstasyonlarının (Y.G.İ) özellikleri Çizelge 1.2’de; konumları ise Şekil 1.3’te verilmiştir. YGİ uzun yıllar aylık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri sırası ile Çizelge 1.3 ve Çizelge 1.4’te verilmiştir. Çalışma alanını içine alan YGİ’lerden elde edilen yağış ve sıcaklık değerleri tipik Akdeniz ikliminin genel özelliklerini yansıtmaktadır.

Çalışma alanına en yakın istasyon olan Bodrum Meteoroloji İstasyonu’nda (D.M.İ) 1981-2003 yılları arasında yıllık toplam yağışların ortalama değerleri 676.62 mm dir (Şekil 1.3). En düşük yıllık toplam yağış 1992 yılında 361.80 mm ve en yüksek yağış 1981 yılında 1027.10 mm olarak gerçekleşmiştir. Kasım, aralık, ocak, şubat ve mart aylarında düşen ortalama yağış miktarı (571 mm), yıllık toplam yağış miktarının % 84’ne karşılık gelmektedir. En yüksek aylık yağış miktarı, 1981 yılı Ocak ayında 364.7 mm olarak gözlenmiştir. Bodrum DMİ verilerine göre 1981-1999 yılları arası ortalama sıcaklık 12.8 °C, aylık en yüksek sıcaklık Temmuz ayında 29.6 °C (1998) ve en düşük sıcaklık Ocak ayında 9.2 °C (1983) olarak gözlenmiştir. 1981-1999 yılları arasında Bodrum DMİ’de ölçülen aylık ortalama nisbi nem % 68.56 dır.



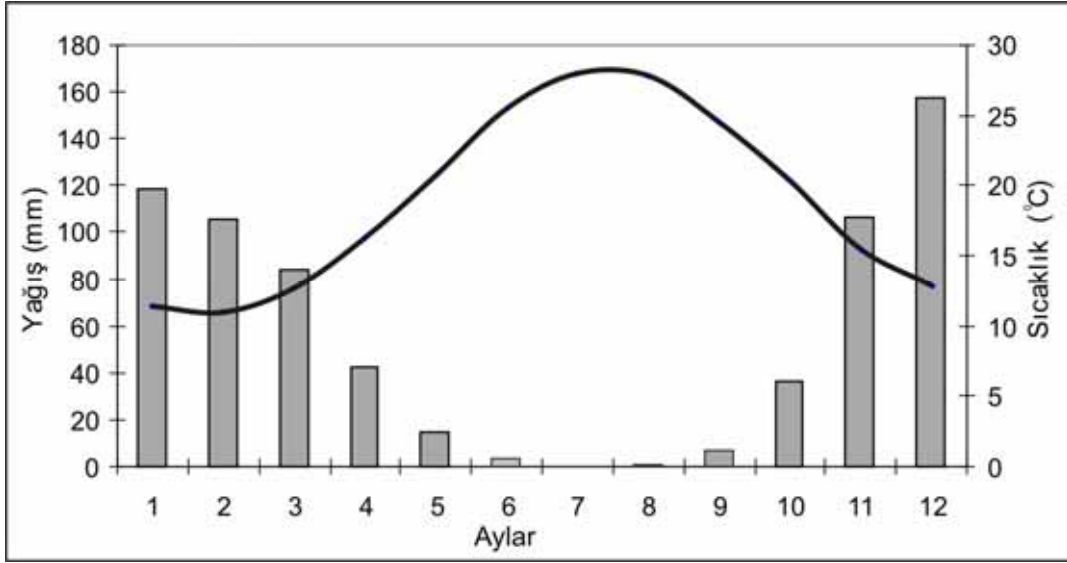
Şekil 1.1. İnceleme alanı yer bulduru haritası



Şekil 1.2. İnceleme alanı ve yakın çevresi yağış gözlem istasyonlarının dağılımı

Çizelge 1.1. İnceleme alanı ve yakın çevresi yağış gözlem istasyonlarının özellikleri

No	DMİ istasyon No	İstasyon Adı	Yükselti (m)	İşleten	Yıllık ortalama yağış (mm)
1	8327	Turgutreis	5	DMİ	519.4
2	17290	Bodrum	27	DMİ	538.4
3	7856	Güllük	10	DMİ	566.1
4	17884	Milas	52	DMİ	682.9
5	8027	Karaova	125	DMİ	576.2
6	8189	Ören	10	DMİ	694.5
7	17922	Datça	30	DMİ	643.6
8	8002	Çamköy	240	DSİ	835.1



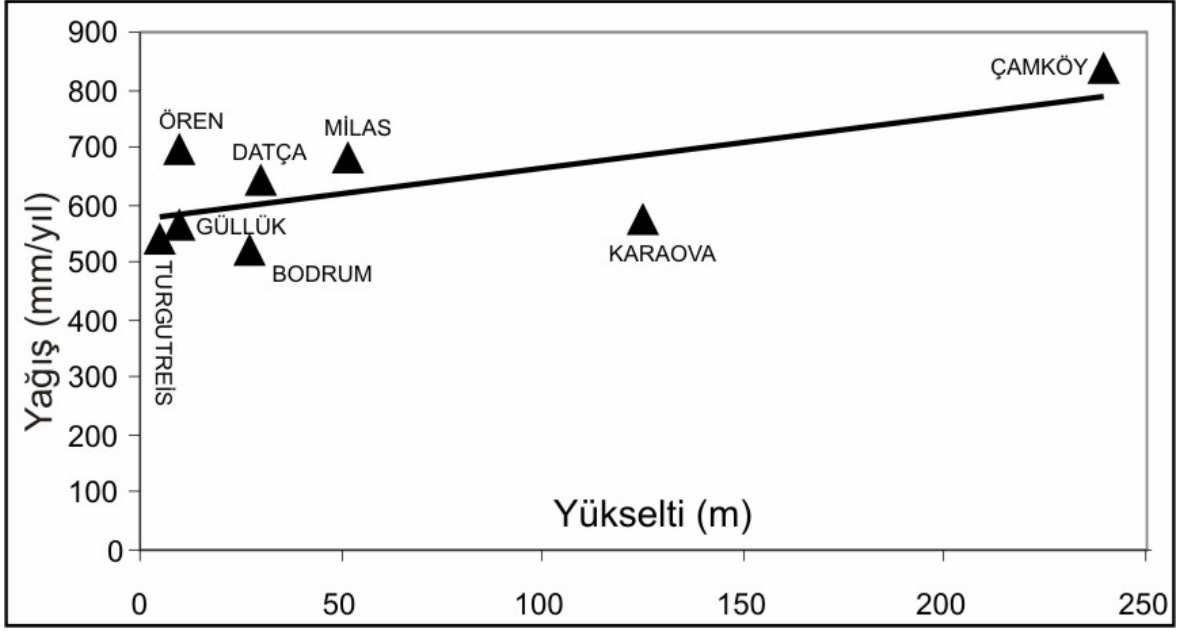
Şekil 1.3. Bodrum DMI'ye ait aylık ortalama yağış ve sıcaklık değişimi

İnceleme alanı yakın çevresinde bulunan meteoroloji istasyonlarının uzun yıllar ortalama yağış değerlerine göre inceleme alanında yükselti (h) ve yağış (P) arasındaki ilişki;

$$P \text{ (mm)} = 0.88 h \text{ (m)} + 576.9 \quad (r^2 = 0.47)$$

şeklindedir (Şekil 1.4). Eşitlikten elde edilen korelasyon katsayısı ile bölgenin genelinde yağış ve yükselti arasında belirgin doğrusal bir ilişki görülmemektedir. Turgutreis, Güllük, Datça ve Milas istasyonları kendi aralarında ($r^2=0.996$), Bodrum, Karaova ve Çamköy istasyonları da ($r^2=0.91$) kendi aralarında doğrusal bir ilişki sunmaktadırlar.

İnceleme alanında tarım, balıkçılık, turizm ve sanayi gelişmiş durumdadır. Kıyı kesimlerde yaşayan halkın büyük bir kesiminin esas geçim kaynağı turizmdir. Bölge engebeli bir topografik yapıya sahiptir. Yüksek topografyaya sahip ve sert birimlerden oluşan alanlar orman ile kaplıdır. Topografyanın kısmen düz olduğu bölgelerin (Kızılağaç köyü, Yalıçiftlik köyü ve Bodrum ilçe merkezi) alüvyonla dolması sonucu bölgenin verimli tarım arazileri oluşmaktadır. Bölgedeki ovalarda Akdeniz iklimine özgü bütün tarım ürünleri yetiştirilmektedir. Bölgedeki bitkisel ürünlerin başlıcaları; hububat, turuncgiller ve zeytindir. Balıkçılık da bölgedeki halkın önemli geçim kaynaklarından biridir.



Şekil 1.4. İnceleme alanında yükselti yağış ilişkisi

Çizelge1.2. İnceleme alanı dolayındaki meteoroloji istasyonlarına ait aylık ortalama yağış değerleri (mm).

İstasyon adı	Gözlem Süresi	Yükselti (m)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
Bodrum	1981-2003	27.0	118.4	105.2	83.8	42.5	14.8	3.7	0.1	0.7	7.2	36.6	106.5	157.3	519.4
Turgutreis	1985-2001	5.0	86.5	89.1	73.7	32.9	15.1	1.9	0.0	0.0	3.7	26.0	91.0	118.6	538.4
Güllük	1982-1991	10.0	91.9	88.6	89.2	34.5	17.0	9.9	0.0	0.8	2.4	18.5	87.9	125.2	566.1
Milas	1981-2003	52.0	113.6	100.8	90.5	50.0	26.7	5.1	4.3	3.5	10.8	29.9	108.7	138.9	682.9
Karaova	1988-1997	125.0	37.5	92.8	96.4	40.6	10.2	1.6	4.0	1.5	0.3	23.9	98.3	169.0	576.2
Ören	1988-1993	10.0	53.4	84.4	96.2	57.5	15.3	0.6	2.2	3.4	9.3	38.7	151.6	182.1	694.5
Datça	1982-2003	30.0	106.4	98.1	76.7	34.3	12.3	6.0	0.3	0.4	3.3	42.1	113.2	150.6	643.6
Çamköy	1962-2003	240.0	147.9	130.9	88.2	48.3	34.6	21.0	10.7	7.5	27.2	44.4	102.4	172.0	835.1

Çizelge1.3. İnceleme alanı dolayındaki meteoroloji istasyonlarına ait aylık ortalama sıcaklık değerleri (°C).

İstasyon Adı	Gözlem Süresi	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ortalama
Bodrum	1981-1999	11.4	11	12.7	16.3	20.7	25.5	28.0	27.8	24.5	20.3	15.5	12.8	18.88
Turgutreis	1985-1999	11.3	11.2	12.6	16.3	19.9	23.8	25.5	25.6	23.5	19.6	15.4	12.7	18.12
Güllük	1982-1990	10.7	10.4	12.2	16.3	19.9	23.9	26.9	25.9	23.5	19.0	14.8	11.9	17.95
Milas	1981-1999	9.0	9.4	11.4	15.4	20.2	25.7	28.5	27.8	23.9	19.0	13.3	10.5	17.84
Karaova	1989-1992	9.1	9.9	13.4	17.1	19.9	24.5	27.2	27.0	23.5	19.6	15.7	11.0	18.16
Ören	1988-1993	12.6	12.6	13.9	15.9	18.0	21.0	26	27.1	24.7	21.3	16.8	13.8	18.64
Datça	1982-1999	12.4	11.9	13.5	16.6	20.7	25.2	27.7	27.9	25.1	21.1	16.5	13.6	19.35

1.6. Önceki Çalışmalar

İnceleme alanında ilk jeolojik çalışma Philippson (1915) tarafından, Bodrum yarımadasının 1/300.000 ölçekli jeoloji haritası alımı şeklinde yapılmıştır.

Flügel ve Metz (1954), daha ayrıntılı 1/100.000 ölçekli bir jeoloji haritası yapmış ve paleontolojik incelemelerde bulunmuşlardır.

Brinkmann (1967), çökel kayalarda stratigrafik çalışmalar yapmıştır.

Burri vd. (1967), Robert (1976), Robert ve Cantagrel (1977) ise volkanik kayalarda petrolojik çalışmalar yapmışlardır.

Yenal vd. (1971), Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında ve Tavşanburnu ılcasındaki suların kimyasal analizlerini yaparak suların tıbbi alanda kullanımı hakkında yorumda bulunmuşlardır. Yaptıkları analizler sonucunda bu sular Na-Cl tipi sular sınıfında yer almaktadır. Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında sıcaklığı 33 °C, debiyi yaklaşık 20 l/s, Radon (Rn^{222}) 235 Pci/l ve Radyum (Ra^{226}) 6.32 Pci/l olarak ölçmüşlerdir. Tavşanburnu ılcasında sıcaklığı 22 °C, debiyi 0.6 l/s, Radon (Rn^{222}) 161 Pci/l ve Radyum (Ra^{226}) 0.93 Pci/l olarak ölçmüşlerdir.

Canik (1983), Bodrum-Karaada Kaplıcasında yer alan sıcak ve mineralli su kaynağında inceleme yapmış; suyu kimyasal olarak değerlendirip kaplıca hakkında not hazırlamıştır. Kaynağı; çıkış yeri jeolojisine göre bir fay kaynağı; sıcaklık sınıflamasına göre (Mauren) hipertermal su ve kimyasal bileşimine göre (AIH) Na-Cl tipi sıcak su olarak sınıflandırıp, kaynak suyunu karışık kökenli su olarak değerlendirmiştir.

Özçiçek ve Özçiçek. (1977) ile Pişkin (1980), Bodrum yarımadasındaki magmatizmaya ilişkin cevherleşmelerde ayrıntılı saha ve laboratuvar çalışmaları yapmışlardır.

Ercan (1979, 1981 a, b), bölgede yer alan volkanik kayalarda petro-kimyasal çalışmalarda bulunmuştur.

Ercan, Günay ve Türkecan (1983), Bodrum yarımadasının ayrıntılı jeolojisini çalışmışlardır. Bu çalışmada inceleme alanının da içinde yer aldığı Güneybatı

Anadolu'da otokton ve allohton olmak üzere iki birlik olduğunu belirtmektedir. otokton birliği, Menderes masifine ait çeşitli türde gnaysların ve migmatitlerin oluşturduğu bir çekirdek ve bunun üzerine gelen çeşitli şistlerden bir örtü ile daha da üstte yer alan ve Permien'den Paleosen'e kadar değişik türde karbonat çökel kayaların yer aldığı örtü istifler oluşturmakta olduğunu, allohton birliği ise "Toros Kuşağı" olarak adlandırılan Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı çeşitli çökel kaya birimlerden oluştuğunu belirtmişlerdir.

Meşhur vd. (1995), "Batı Toroslar'ın Jeolojisi ve Petrol Olanakları" adlı çalışmalarında, Köyceğiz-Bodrum arasındaki alanın jeolojik haritalarını hazırlamış ve petrol açısından ortama ait yorumlarda bulunmuşlardır.

Filiz, Tarcan ve Gemici (1998), Bodrum yarımadasının genel hidrojeoloji haritasını hazırlayarak akifer özelliklerini belirtmişlerdir. Yarımada'nın çeşitli bölgelerinden aldıkları su örneklerinin kimyasal analizlerini yapıp hidrojeokimyasal değerlendirmede bulunmuşlardır. Yarımada'daki karstik akiferlerdeki baskın hidrojeokimyasal sürecin çözünme reaksiyonlarından oluştuğunu, suların $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{HCO}_3$ tipi sular olduklarını ve sıcak su kaynağının deniz suyu kökenli olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları katyon jeotermometre uygulamaları sonucu kaynağın 100-150 °C arası hazne kaya sıcaklığına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Çubukçu (2002), Bodrum volkanizmasının petrolojik incelenmesini gerçekleştirmiş, magmatik birimlerin petrografik ve jeokimyasal özelliklerini belirtmiştir.

2. İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ

Bu çalışmada, Bodrum-Karaada jeotermal alanındaki sıcak ve mineralli su kaynaklarının hidrojeokimyasal incelemesi amaçlandığından, bölgede daha önce bu alanı kapsayacak şekilde Ercan vd. (1983), Ersoy (1991) ve MTA Genel Müdürlüğü'nce hazırlanmış jeoloji haritaları temel alınmış olup, Ercan vd. (1983) vermiş olduğu stratigrafi ve adlamalar dikkate alınarak benzer yaş ve kayaç türleri birleştirilerek bölgenin 1/50.000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmıştır. İnceleme alanında yüzeylenen birimlerin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti, jeoloji haritası ve jeolojik kesitleri sırası ile Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te verilmiştir.

Çalışma alanında, temeli alan içinde yüzeylenmeyen ancak çalışma alanı dışında (Salih adasında, Bafa ve Güllük çevresinde) geniş alanda yayılım gösteren, Paleozoyik yaşlı ve Güllük Formasyonu olarak adlandırılan, çakıltası-kumtaşı-şeyl ardalılarından oluşan düşük metamorfik birim oluşturmaktadır. Bunun üstüne Mesozoyik yaşlı birimler olarak Triyas-Liyas yaşlı dolomitik kireçtaşları (Pazardağı Formasyonu); Liyas-Malm yaşlı siltli-marnlı kireçtaşları (Karadağ Formasyonu) ve daha üstte Malm-Senomaniyen yaşlı pelajik kireçtaşları (Kışladağı Formasyonu) ile tüm bu çökel birimleri üstleyen Üst Kretase-Paleosen yaşlı vahşi filiş (Bodrum Formasyonu) yer almaktadır.

Senozoyik birimler, çalışma alanında yüzlek vermeyen Oligosen yaşlı çökeller (Koyunbaba Formasyonu) ile başlar. Oligosen sonrası yarımada şiddetli bir magmatizma etkin olmuş, çeşitli evrelerde plütonik ve volkanik kayaçları oluşturmuştur. Daha sonra bölgede yaygın bir kalkalkalin volkanizma etkin olmuş tuf-aglomera birimleri ve andezit-trakiandezit-latit-dasit türde lavlar oluşmuştur. Kabuksal malzeme ürünü olan bu kalkalkalin volkanizma belirgin bir süreçten sonra gittikçe manto ürünü alkali olivin bazaltik oluşumlara dönüşmüştür. Bu suretle, ikinci volkanik evre başlamış olup, bu kez alkali nitelikte dayklar ve bazalt-trakibazalt-trakit türde lavlar oluşmuştur. İnceleme alanında volkanizmanın Üst Miyosen'de bitiminden sonra, Pliyosen başında volkanizma sonucu oluşmuş Bodrum magmatik kayaçları (Montigny and Robert ,1991) ile Kuvaterner'de oluşmuş alüvyonlar yer almaktadır.

2.1. Genel Stratigrafi

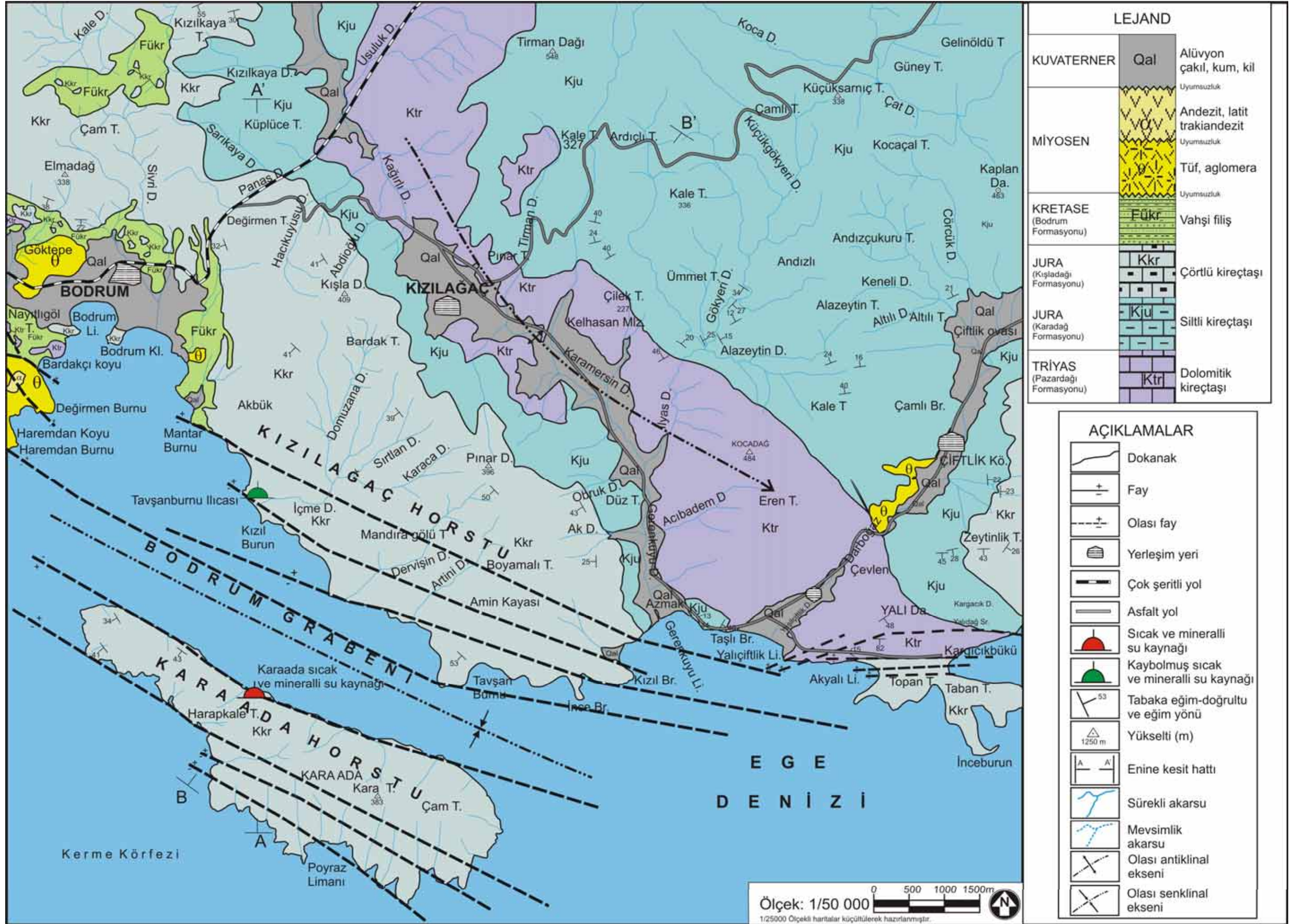
Çalışma alanında bulunan jeolojik birimlerin bir kısmının stratigrafik konumu, bulundurdıkları fosillere ve ilişkilerine göre saptanmış, diğer bir kısmının konumu ise komşu kaya birimleri ile olan ilişkilerine, bölgesel yayılımlarına ve özellikle magmatik kayalarda eski araştırmacılar tarafından yapılan radyometrik yaş belirlemelerine göre saptanmış ve denetirmeye dayandırılmıştır (Ercan vd.1983). İnceleme alanında yüzeylenen birimler yaşlıdan gence doğru aşağıda tanıtılmıştır.

2.1.1. Mesozoyik

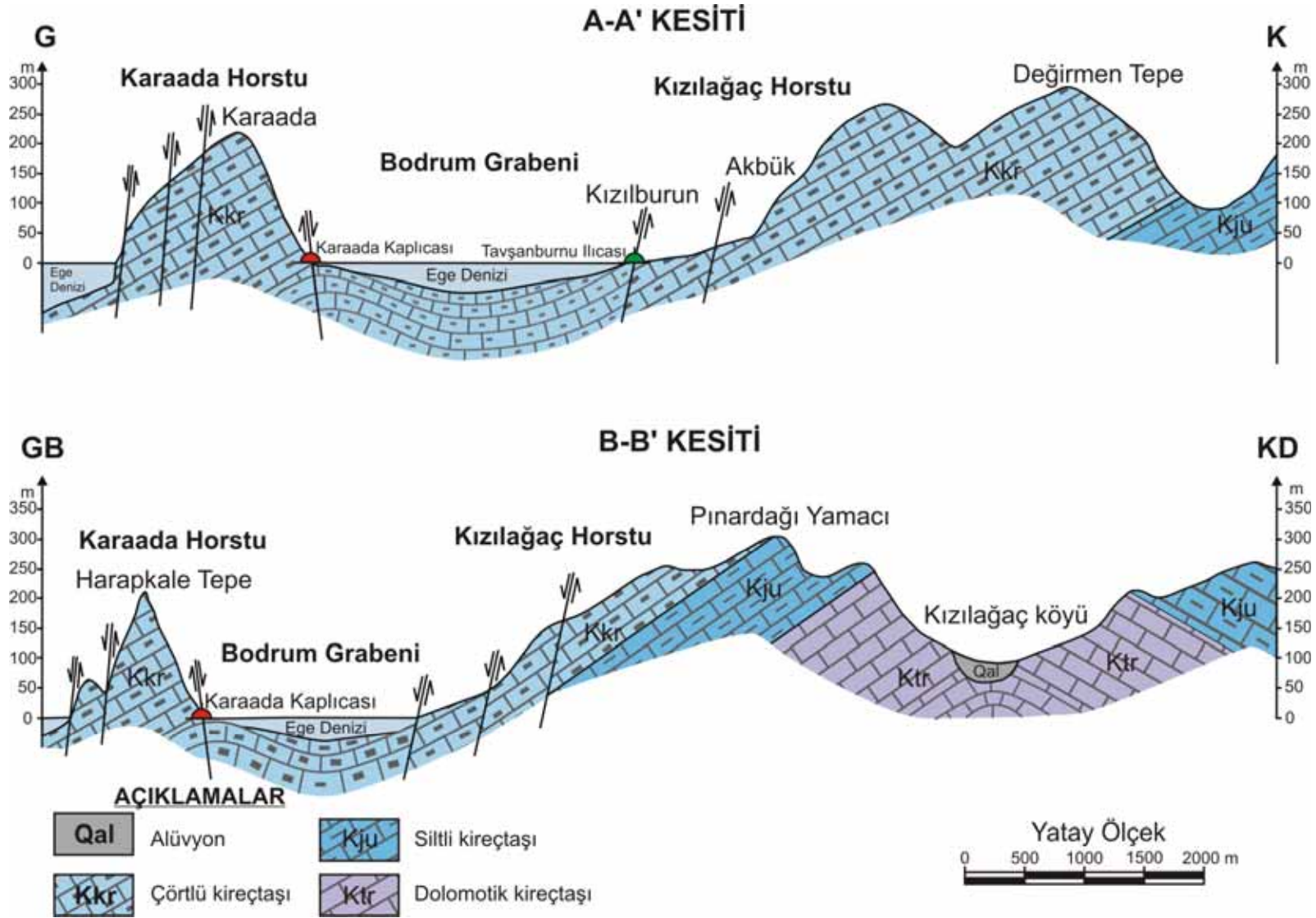
İnceleme alanında Mesozoyik; Pazardağı Formasyonu, Karadağ Formasyonu, Kışladağı Formasyonu ve Bodrum Formasyonu ile temsil edilmektedir.

Pazardağı Formasyonu (Ktr)

Güllük Formasyonu üzerinde uyumlu olarak izlenen dolomitik kireçtaşlarıdır. Geniş alanlarda yüzeylenen formasyon, adını çalışma alanı dışında N18c4 paftasındaki Pazardağı'ndan almaktadır. İnceleme alanında bu formasyon, Bodrum'un kuzeydoğusunda ve güneybatısında küçük alanlarda yüzeylenmesine karşın Kızılağaç Köyü civarında yaklaşık 2.5 km. genişliğinde KB-GD doğrultusu boyunca geniş bir alan kaplamaktadır (Şekil 2.2). Kireçtaşları çoğunlukla masif, kalın katmanlı ve beyaz renkte olup yer yer gri renkli dolomitlerle ardalanmalıdır. Yer yer rekristalizasyona uğramış olan kireçtaşlarının içinde iskeletsi kavkı parçacıkları ve algler izlenir. Bazı seviyelerde ikincil kuvars ve kalsit damarları gözlenmektedir (Ercan vd. 1983). Bölgede öncel çalışmalar yapan Philippson (1915), bu birimlere "Gereme Formasyonu" adını vermiş ve bu birimlerin bazı alg fosilleri içerdiğini belirtmiştir. Aynı adlama, Brinkmann (1967) ve Bernouilli vd. (1974) tarafından da kullanılmıştır. İnceleme alanı doğusunda bu formasyon, Akat vd. (1975) tarafından da ayrıntılı olarak incelenmiş, "Kapladağı Formasyonu" olarak adlanmıştır. Araştırmacılar, bu formasyonda gözlenen fosillerin Üst Triyas-Üst Liyasta yaşadıklarını belirtmişler; formasyona Üst Triyas-Üst Liyas yaşını vermişlerdir (Ercan vd.1983).



Şekil 2.2. Bodrum-Karaada ve yakın dolayının jeoloji haritası.



51 Şekil 2.3. İnceleme alanındaki jeolojik kesitler

İnceleme alanında Pazardağı Formasyonu olarak adlandırılan dolomitik platform kireçtaşları en çok 300 metre kalınlığa erişmektedirler. Ancak çalışma alanına komşu bölgelerde bu kalınlık çok daha fazla ve değişkendir (Ercan vd.1983).

Karadağ Formasyonu (Kju)

Pazardağı Formasyonu üzerinde uyumlu olarak yer alan Karadağ Formasyonu, siltli marnlı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Bu formasyon, ince düzgün katmanlı ve sarı-pembe renkli olup yer yer çört bantları içermekte olup inceleme alanının KD'sunda geniş bir yayılıma sahiptir. Bu formasyon, adını çalışma alanı dışında N18c3 paftasındaki Karadağ'dan almaktadır. Bu formasyonun kireçtaşlarının, üzerinde yer alan Kışladağı Formasyonu'nun çörtlü kireçtaşlarına çok benzemesi, bu iki formasyonun ayırt edilmesini güçleştirmektedir. Bernouilli vd. (1974) tarafından bu formasyon, Kışladağı Formasyonu'nun tabanı olarak kabul edilmekte ve fosil içeriğine göre Üst Triyas-Alt Malm yaşı verilmektedir Bu formasyon inceleme alanında en çok 220 m kalınlığa erişmektedir (Ercan vd. 1983)

Kışladağı Formasyonu (Kkr)

Adını Kışladağı'ndan alan formasyon, Karadağ Formasyonu üzerinde uyumlu olarak yer alan gri renkli, düzgün ince-orta katmanlı, bol kavkı parçacıkları içeren yer yer çört bant ve yumruları gözlenen pelajik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Çalışma alanının büyük bir kısmında yüzeylenen formasyonun kalınlığı Ercan vd. (1983) tarafından yaklaşık olarak 800 metre belirtilmiştir. Çalışma alanı dışında da geniş yayılımlı olup, kalınlığı değişkendir. Örneğin, Datça yarımadasında Orombelli vd. (1967) tarafından bu formasyon "Mandalıya çörtlü kireçtaşları" olarak adlandırılıp 480 m kalınlıkta olduğu belirtilmiştir. Bodrum'un doğusunda 1500 m kalınlığa erişen formasyon Brinkmann (1967) tarafından Bodrum Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bernouilli vd. (1974) tarafından Bodrum çevresinde 900 m kalınlığa eriştikleri ve bol fosilli oldukları belirtilerek Çaldağ Formasyonu adı verilmiştir. Araştırmacılar formasyonun çeşitli yüzleklerinde hem Jura, hem de Kretase yaşlı fosiller saptamışlardır.

Bodrum Formasyonu (Fükr)

Birim ince-orta-kalın tabakalı, gri, yeşilimsi gri, siyah, açık kahve, kirli sarı renklerde kumtaşı, kiltası ve silttaşlarından oluşmaktadır. Yanal ve düşey yönde sık kaya türü değişimi sunan bu formasyon, yer yer kumlu-killi kireçtaşları, mikrit, çörtlü mikrit, kalsitürbidit, marn gibi düzeyler ile serpantinit, bazik volkanik ve kireçtaşı bloklarını kapsamaktadır. (Şenel ve Bilgin 1997). Vahşi filiş olarak da nitelendirilen bu formasyonun katmanlarının stratifikasyonu büyük ölçüde bozulmuş olup, içerdikleri ekzotik bloklar kaotik matrikstedir. Bu ekzotik bloklar, daha yaşlı Pazardağı, Karadağ ve Kışladağı Formasyonlarına ait çeşitli türde kireçtaşlarıdır. Birim inceleme alanının batısı ile Bodrum ilçe merkezi çevresinde küçük alanda yüzlek vermektedir. Vahşi filiş çökelleri yer yer, Kışladağı Formasyonu çörtlü kireçtaşları üzerinde 2-3 m kalınlıkta, çört ve kireçtaşı çakıllarından oluşan bir breşik zon ile uyumsuz (diskordan) olarak başlamaktadır. Bu breşik zon, Bernouilli vd. (1974) tarafından Sirna breşi olarak adlandırılmış olup, filiş sedimantasyonunun başlangıcını izleyen tektonik hareketin başlatmış olduğu denizaltı çamur akıntıları ile oluştukları öne sürülmüştür. İnceleme alanında 300 m kalınlığa erişen Bodrum Formasyonu içinde bulunan pembe renkli kireçtaşı düzeylerinde *Radiolites angeoides* (Pic. de Lap) fosili bulunmaktadır. Birime Üst Kretase (Kampaniyen) yaşını veren bu fosil kireçtaşı düzeyleri üzerinde de bir miktar devam ettiğinden tüm birimin yaşı Üst Kretase-Paleosen olarak yorumlanmaktadır.

2.1.2 Senozoyik

İnceleme alanında Senozoyik; magmatik kayalar ile temsil edilmektedir.

Magmatik kayalar

Andezit, latit, trakiandezit, tuf ve aglomera (α , θ)

İnceleme alanında magmatizma son derece etkin olup, çeşitli evrelerde plütonik ve volkanik kayalar oluşturmuştur. İnceleme alanındaki magmatik kayalarla, çevrelerindeki Kos, Patmos, Samos ve Söke volkanitleri eş provenste olup, özel bir volkanik birlik oluştururlar. Magmatik kayalar ilk kez Orta Miyosen'de Bodrum yarımadasının batısı ile çevresindeki birkaç adada, bir monzonit intruzyonu ile etkili olmuştur (Ercan vd. 1983). Daha sonra Bodrum

yarımadasında şiddetli bir kalkalkalin volkanizma etkin olmuştur. Kabuksal malzeme ürünü olan bu kalkalkalin volkanizma ile önce yaygın tüf-aglomera yatakları, volkan külü ve kültası oluşmuş sonra ise andezit, latit, trakiandezit ve dasit türde lavlar oluşmuştur. Bu kalkalkalin lavlar çok değişik renk ve bileşimlerde olup, inceleme alanı dışında geniş yer kaplamalarına karşın inceleme alanının batısında ve doğusunda dar alanda yüzeylemektedirler (Şekil 2.2). Yapılan petrografik incelemelerde ojit-andezit, piroksen-andezit, andezit, trakiandezit, latit-andezit, latit, kuvarslı ojit-andezit, ojitli latit-andezit, dasit vb. isimler almaktadırlar (Ercan vd.1983).

Tüflerde yapılan petrografik incelemelerle, bunların ortalama 0.01-0.15 mm büyüklükte plajiyoklaz kristal parçalarının ve küçük biyotit levha ve pulcuklarının, kloritle killi serisitli bir çimento ile birleşmesinden meydana geldikleri saptanmıştır (Ercan vd.1983).

Lavlarda yapılan petrografik incelemelerle bunların genellikle porfirik yer yer felsitik, mikrolitik porfirik, pilotaksitik dokuda oldukları, fenokristal olarak biyotit, plajiyoklaz, piroksen, alkali feldispatların bulunduğu hamurun genellikle volkanik camdan ve feldispat mikrolitlerinden oluştuğu, hamurda yer yer kil mineralleşmelerinin olduğu belirtilmiştir (Ercan vd. 1983).

2.1.3. Kuvaterner

İnceleme alanında Kuvaterner; alüvyonlar ve çalışma alanının dışında gözlenen volkanik kayalar ile temsil edilmektedir. Helenik yay, şiddetli Kuvaterner volkanizmanın görüldüğü bir alandır. Yunanistan'a bağlı Kos, Milos, Santorini, Nisyros ve Yali en şiddetli volkanik patlamaların görüldüğü merkezler olarak tanımlanmaktadır (Keller vd. 1989). Özellikle Kos adasındaki Kuvaterner yaşlı volkanizma ürünleri Bodrum yarımadasının batısında da gözlenmektedir. Ancak Allen (2001), bu ignimbritlerin Yalı Adası (Yunanistan) yakınlarından geldiğini belirtmektedir.

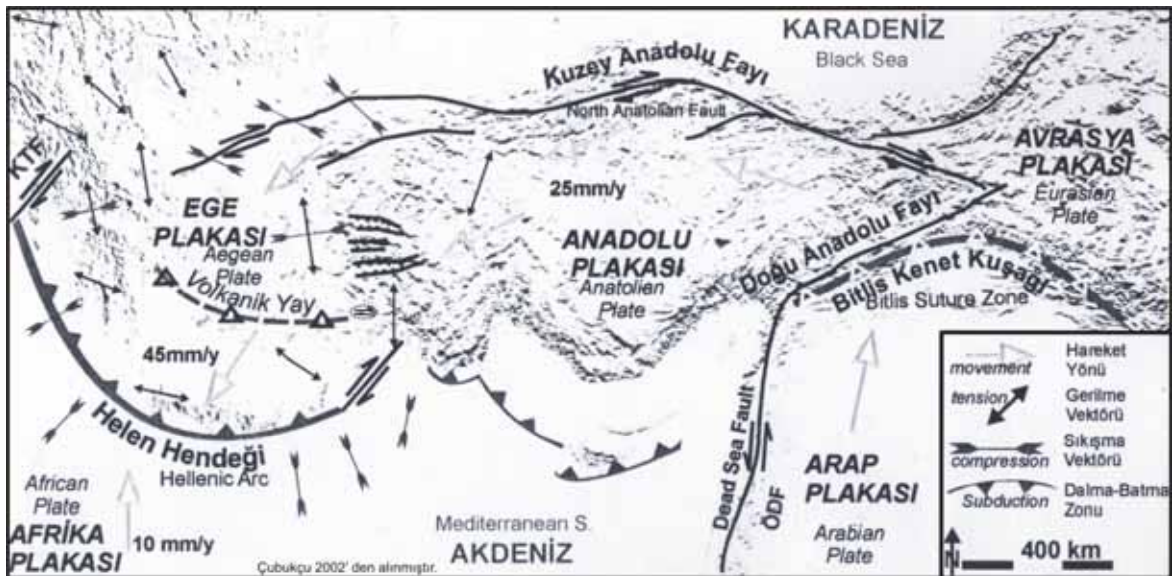
Alüvyonlar

Kuvaterner'de bölgenin hızlı yükselmesi, çukur alanlarda alüviyal çökellerin oluşmasına neden olmuştur. Alüvyonlar kaba çakıl, kum ve kilden oluşmaktadır. Bodrum ilçe merkezi, Kızılağaç köyü civarı ile Yalıçiftlik ve çevresi alüvyonların

başlıca yayılım alanlarıdır. Ancak inceleme alanı içinde önemli bir kalınlığa ve yayılıma sahip olmamakla beraber en fazla 20 m kalınlığa erişmektedir.

2.2. Bölgesel Tektonizma ve Magmatizma

Ege Bölgesi hem tektonizma, hem de volkanizma açısından, Alp-Himalaya sisteminin en hızlı deforme olan zonunu teşkil etmektedir. Afrika Plakası ile Avrasya Plakası'nın çarpışması nedeniyle Anadolu; Kuzey ve Doğu Anadolu faylarının yardımıyla batıya doğru hareket etmektedir (Şekil 2.4) (Yılmaz 1990). Yapılan araştırmalar sonucunda yılda yaklaşık 10 mm hızla kuzeye doğru hareket eden Afrika plakası, Anadolu bloğunu transform faylar ile yılda ortalama 25 mm batıya doğru hareket ettirmektedir (Dimitriadis vd. 1998). Yine McKenzie and Yılmaz (1990) batıya olan bu hareketin nedenini şöyle açıklamaktadırlar: Arabistan ve Avrasya plakalarının sıkışmasıyla Doğu Anadolu'daki kabuk kalınlaşmaktadır. Bu kalınlaşma nedeniyle depolanan gravitasyonel enerji kabuk kalınlığını azaltmaya çalışmaktadır. Doğu-batı yönlü genişleme kabuk kalınlığını azalttığı sürece Anadolu bloğu batıya doğru hareket edecektir. Anadolu bloğunun batıya "kaçışı" Ege bölgesindeki Helenik yay tarafından durdurulmaktadır (Şengör ve Yılmaz. 1981). Ege plakasının K-G yönünde gerilmesinin nedeni farklı araştırmacılar tarafından farklı şekilde yorumlanmaktadır;



Şekil 2.4. Anadolu-Ege bölgesinin tektonik düzeni, güncel plaka hızları ve hareket yönleri

Robert and Cantagrel (1977) Bodrum yarımadası ve çevre adalarda gözlediği volkanik/subvolkanik kayaçların, çapı 30 km den daha büyük olan bir strato volkanın ürünleri olduğunu iddia ederek Bodrum volkanik kompleksi şeklinde adlandırmıştır.

Şengör ve Yılmaz (1981), Ege'deki bu açılmayı, Arap ve Avrasya plakalarının Bitlis Kenet kuşağında çarpışmalarını içeren "tektonik kaçış modeli" ile açıklamaktadır. Ancak Seyitoğlu ve Scott (1996) Arap-Avrasya plakalarının çarpışmasından önce (Orta Miyosen) Batı Anadolu'nun kuzey-güney yönlü gerilme rejimi altında olduğunu iddia etmektedirler.

Le Pichon and Angelier (1981) tarafından önerilen "yay ardı yayılma" modeli (back-arc spreading), Helenik yayının güney ve güney batıya göç etmesi nedeniyle, yay ardında (Ege ve Batı Anadolu) gerilme rejiminin hakim olmayacağını kabul etmektedir. Helenik yayının güneye doğru hareketinin Üst Miyosen'den önce gerçekleşmeye başladığı kabul edilmektedir (McKenzie, 1978; Jackson and McKenzie. 1988). Ancak Seyitoğlu ve Scott (1996)'a göre, bu model Batı Anadolu'daki doğu-batı yönlü Alt Miyosen grabenlerini açıklayamamaktadır.

Ercan vd. (1984) Bodrum volkanizmasının Orta Miyosen'de monzonitik plütonlarla başladığını ve Orta Miyosen sonuna doğru kalkalkalin karakterde volkanik-piroklastik ürünlerin oluştuğunu belirtir. Yüksek potasyum içerikli ürünler veren magmanın daha sonra alkali nitelikli manto ürünleri verdiğini belirtir ve nedenini magma karışımı olarak kabul eder.

Helenik yay, şiddetli Kuvaterner volkanizmanın görüldüğü bir alandır. Yunanistan'a bağlı Kos, Milos, Santorini, Nisyros ve Yalı adaları en şiddetli volkanik patlamaların görüldüğü merkezler olarak tanımlanmaktadır (Keller vd. 1989). Özellikle Kos adasındaki Kuvaterner yaşlı volkanizma ürünleri Bodrum yarımadasının batısında da gözlenmektedir.

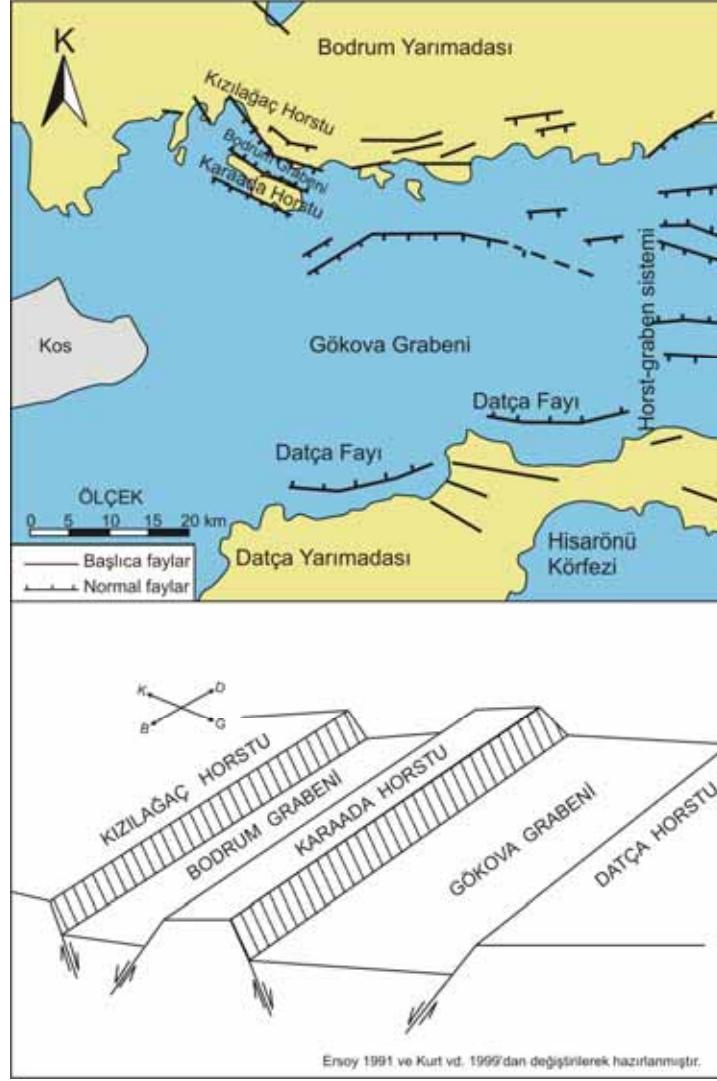
Montigny ve Robert (1991) Bodrum magmatik kayaçlar üzerinde yaptıkları yaş analizlerine dayanarak, Üst Miyosen-Erken Pliyosen zamanında oluştuklarını belirtmişlerdir.

Robert vd. (1991) Bodrum mafik magmatik kayaçlarının izotop ve iz element karakterlerinin yaklaşan levha sınırlarındaki kayaçların karakterleriyle uyduğunu belirtmektedirler. Benzer şekilde Kurt ve Arslan (2001) Bodrum kalkalkalin volkanitlerinin sıkışma rejimi ile oluşduğunu düşünmekte, alkali ürünlerin yerleşiminde ise açılma tektoniğinin etkili olabileceğini belirtmektedirler.

"Orojenik çökme" modeli, Batı Anadolu bloğunun Üst Oligosen-Erken Miyosen zamanında K-G yönlü gerilme rejimi altında olduğunu kabul eder (Seyitoğlu ve Scott. 1996). Doğu'da Avrasya ve Arap Plakalarının çarpışması nedeniyle kabuk kalınlaşması ve ilişkili volkanizmanın litosferde genişleme-gerilim alanı oluşturacak anomaliler yarattığı düşünülür. Seyitoğlu ve Scott (1992) Batı Anadolu'da gözlenen granitoidler ve kalkalkali volkanizmanın nedeni olarak bu modeli kabul etmektedirler.

Sonuç olarak Batı Anadolu'da genişleme rejiminin başlama zamanı için farklı iki temel görüş bulunmaktadır. Seyitoğlu ve Scott (1996), genişlemenin Üst Oligosen-Alt Miyosen zamanlarında başladığını; Yılmaz, (1990), Güleç (1991) ve Savaşçın (1991) ile benzer görüşe sahip olan araştırmacılar ise genişlemenin Orta-Üst Miyosen zamanlarında başladığını savunmaktadırlar. Batı Anadolu'da eş zamanlı gözlenen alkali volkanizmanın başlıca nedenlerinden birinin bu açılma döneminin olduğunu düşünmektedirler. Muhtemelen Üst Miyosen'de bölgede çekme kuvvetleri egemen olmuş ve buna bağlı olarak da D-B yönlü horst-graben sistemleri gelişmiştir (Le Pichon Angelier 1981, Dumont vd. 1981, Ersoy, 1991). Bu bilgiler ışığında sıcak ve mineralli su kaynağının çıkışını kontrol eden KB-GD yönlü olan horst graben sisteminin de Üst Miyosen'de geliştiği söylenebilir.

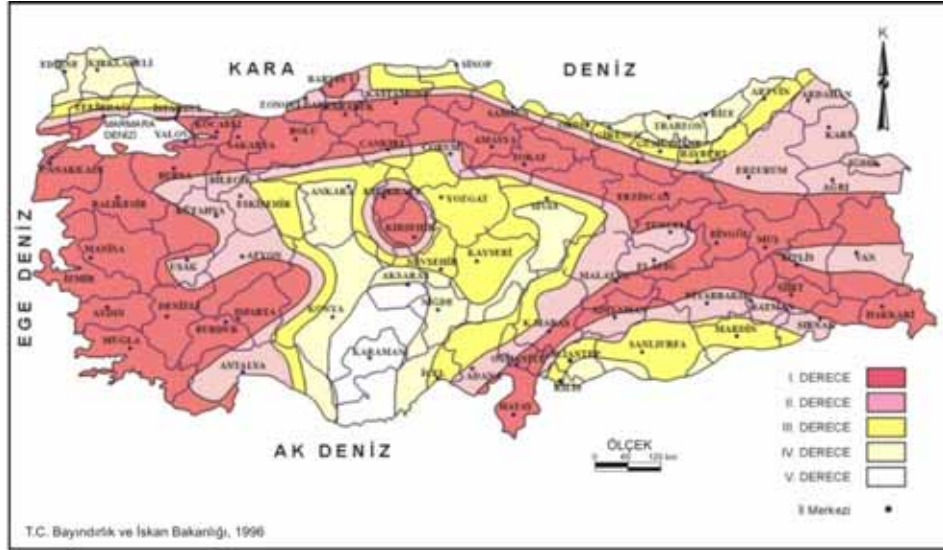
KB-GD yönlü Karaada'nın kuzeyinde ve güneyinde bulunan Karaada fayları, Bodrum yarımadasının doğusunda bulunan Mantarburnu, Kızılburun ve Tavşanburnu fayları ile D-B yönlü olan İnceburun fayı Bodrum-Karaada jeotermal alanındaki önemli faylardır. Gökova körfezinde yapılan jeofizik (sismik) çalışmalarda, körfezin her iki tarafında gerilme (tansiyon) ile oluşan graben fayları ve bunlara bağlı olarak gelişen sentetik ve antitetik faylar belirlenmiştir (Şekil 2.5). Bölge günümüzde de tektonik yönden aktifliğini sürdürmektedir.



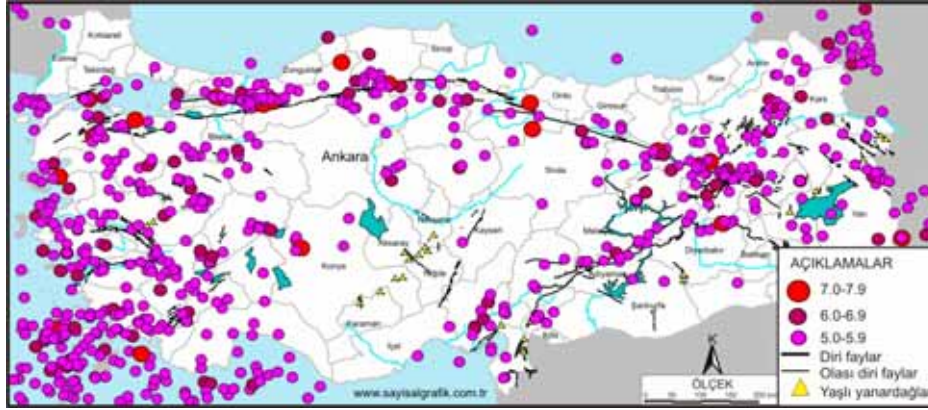
Şekil 2.5. İnceleme alanı ve çevresinin fay hatları haritası

2.3. Depremsellik

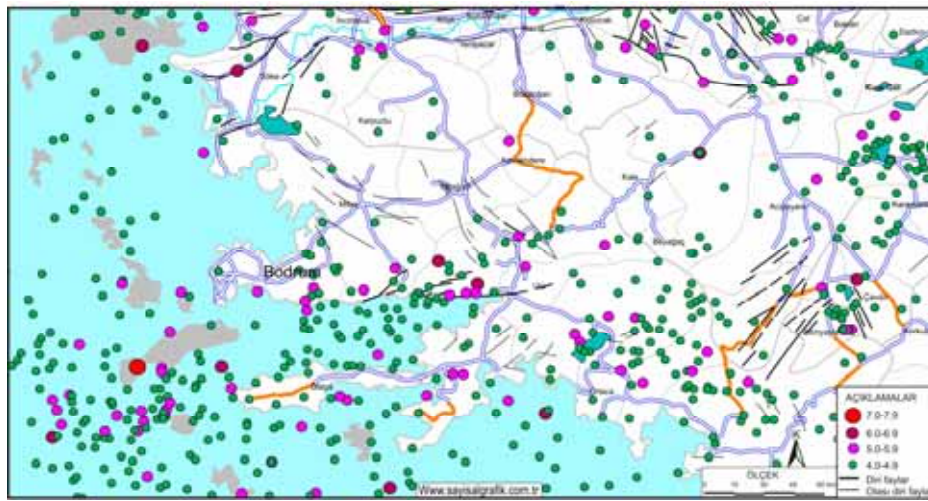
Bodrum-Karaada jeotermal alanını da içine alan Batı Anadolu'daki aktif horst ve graben faylarının bulunduğu bölge, Türkiye deprem haritasına göre (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı 1996) 1. derece deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır (Şekil 2.6a). Yörede başlıca K-G ve D-B yönlü aktif fay sistemleri mevcuttur. 1885-2005 tarihleri arasında olmuş ve magnitüdü 5'ten büyük depremlerin episantır dağılım haritası Şekil 2.6b'de, magnitüdü 4'ten büyük depremlerin episantır dağılımı ise Şekil 2.6c'de verilmiştir. Bütün bu veriler Bodrum-Karaada jeotermal alanının 1.derece deprem kuşağı üzerinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.6.a. Türkiye deprem haritası



Şekil 2.6.b. Türkiye deprem episantır dağılım haritası (M>5)



Şekil 2.6.c. İnceleme alanı çevresinin deprem episantır dağılım haritası (M>4)

3. HİDROJEOLOJİ

3.1. Hidrojeolojik Birimler

Bodrum-Karaada ve yakın çevresinin içinde bulunduğu alan, yüksek topografyası ile belirgindir. Yüksek tepeleri, Likya naplarına ait Bodrum napını oluşturan içindeki Mesozoyik yaşlı siltli-marnlı kireçtaşları, dolomitik kireçtaşları ve pelajik kireçtaşları oluşturmaktadır. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar sahil kesimlerindeki vadilerde Bodrum ilçe merkezinde, Kızılağaç köyü ve Yalıçiftlik civarında yüzeilenmektedir.

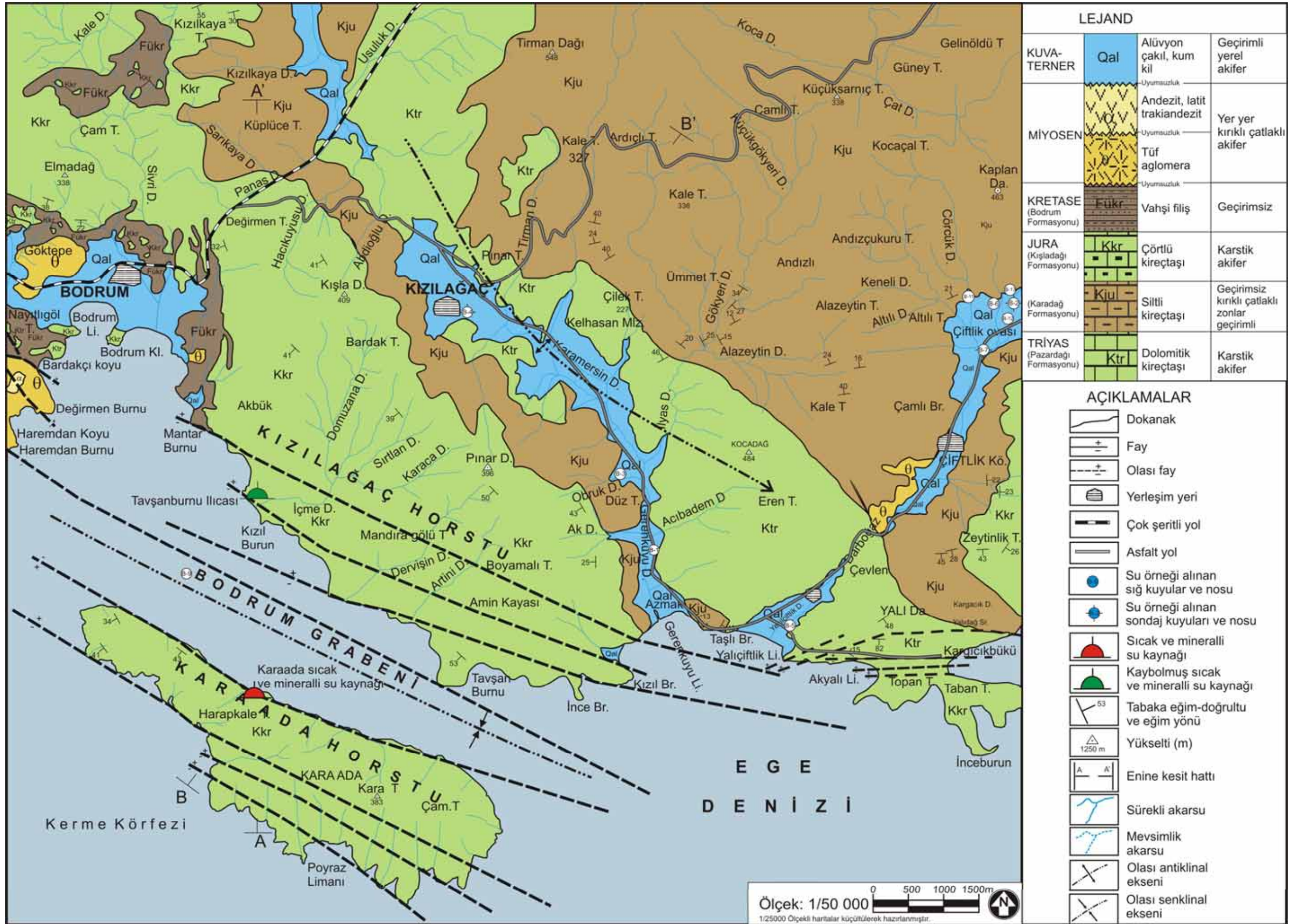
İnceleme alanında genelleştirilmiş stratigrafi istifinde yer alan birimlerin hidrojeolojik özellikleri (Şekil 3.1) belirlenerek, jeolojik haritalarından derlenerek hazırlanan 1/50 000 ölçekli hidrojeoloji haritası (Şekil 3.2) ve hidrojeoloji kesitleri (Şekil 3.3) hazırlanmıştır. Hidrojeoloji haritası üzerinde, inceleme alanı içindeki sıcak ve mineralli su kaynakları, sondaj ve keson kuyular, mevsimlik dereler ile geçirimli, yarı geçirimli ve geçirimsiz litolojik birimler yer almaktadır.

İnceleme alanında yer alan geçirimli birimler; Pazardağı Formasyonu (Ktr), Kışladağı Formasyonu (Kkr) ve alüvyon (Qal)'lardır. Yarı geçirimli birimler olarak, magmatik kayaların oluşturduğu kalkalkalin volkanizma ürünü olan andezit, latit, trakiandezit ve aglomeralar gösterilebilir (α, θ). Bodrum Formasyonu (Fükr) ve Karadağ Formasyonu (Kju) ise geçirimsiz birim olarak tanımlanmaktadır.

3.1.1 Geçirimli birimler

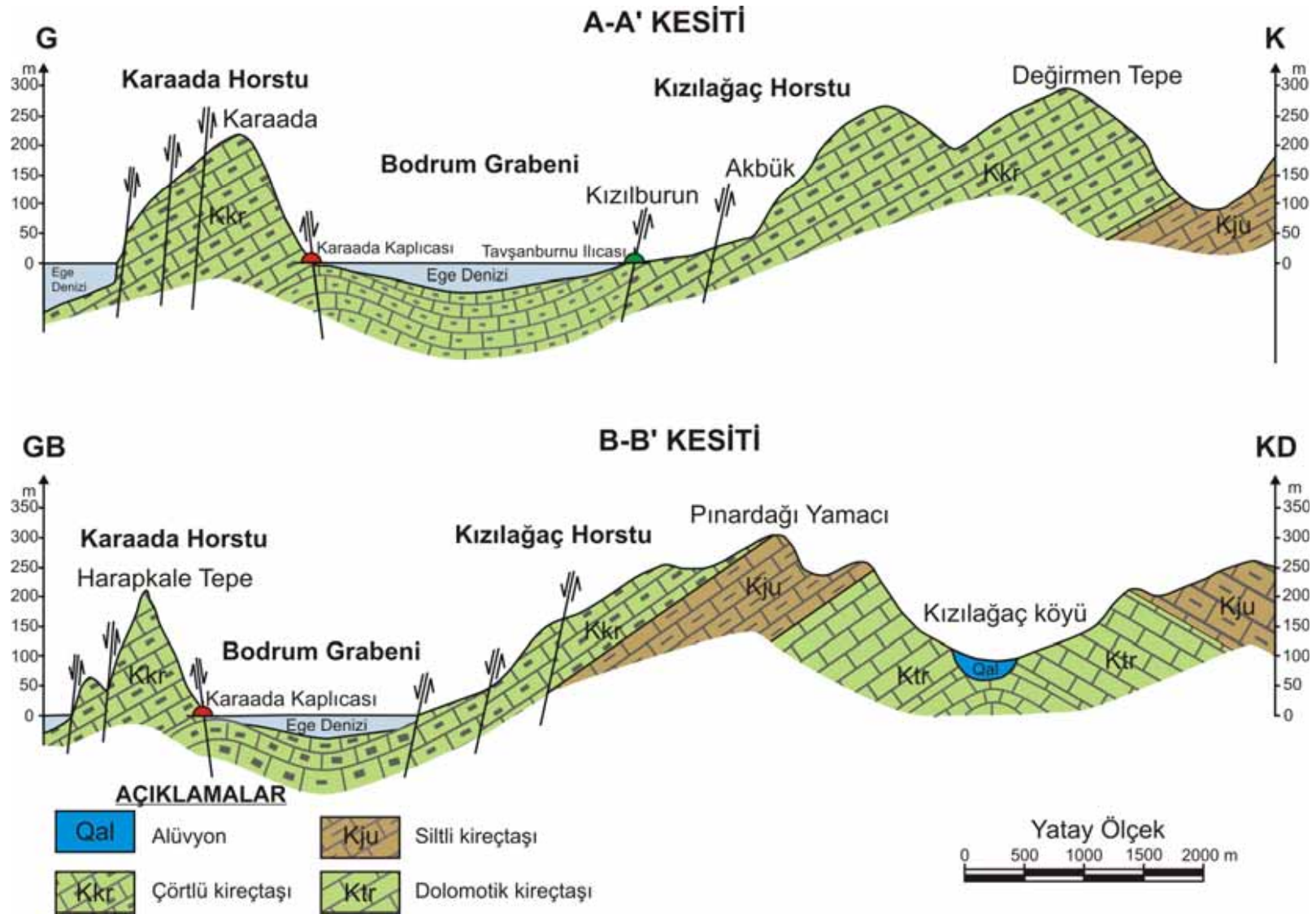
Pazardağı Formasyonu (Ktr)

İnceleme alanı olan Bodrum-Karaada ve yakın çevresinde yeraltısuyu taşıma ve iletme özelliğine sahip dolomitik kireçtaşından oluşan Pazardağı Formasyonu Bodrum Napı içinde yer almakta ve karstik akifer özelliğindedir. İnceleme alanının da içinde bulunduğu bölgede hüküm süren tektonizmaya bağlı olarak gelişen tansiyon (gerilme) ve kompresyon (sıkışma) kuvvetleri bu formasyonun çok fazla kırıklı ve çatlaklı bir yapı kazanmasına neden olmuştur. Pazardağı Formasyonu yer yer erime boşlukları içermektedir. Formasyonun tabanında yer alan ve denize doğru eğimli olan geçirimsiz birim olarak da bilinen



Şekil 3.2. Bodrum-Karaada ve yakın dolayının hidrojeoloji haritası.

Ercan vd. 1983 ve MTA Genel Müdürlüğü 1997'den değiştirilerek hazırlanmıştır.



27 Şekil 3.3. İnceleme alanındaki hidrojeolojik kesitler

Güllük Formasyonu, dolomitik kireçtaşlarından süzülen suların bu birimle olan dokanağından veya karstik kanallardan denize boşalmaktadır. Özellikle üst seviyelerde gelişen karstlaşma nedeniyle birim içinde çöküntü yapıları bulunmaktadır. Kızılağaç obruğu birim içinde karstlaşma sonucu gelişmiş büyük çöküntü yapılarındandır.

Kışladağı Formasyonu (Kkr)

Kışladağı Formasyonu, yoğun tektonizmaya bağlı olarak kırıklı çatlaklı bir yapı göstermektedir. Bu formasyonu besleyen sular, hidrojeokimyasal süreçler sonucunda erime boşlukları ve mağaralar oluşturmaktadır (Foto 3.1.f). Tüm bu özellikler, inceleme alanının batısında yer alan formasyona karstik akifer özelliği kazandırmaktadır. Ancak, formasyonun genellikle denize doğru eğimli olması, bu birime düşen yağışların büyük bölümünün fay ve karstik kanallar yardımıyla yeraltından denize boşalmasına neden olmaktadır. Karaada sıcak ve mineralli su kaynağının da içinde yer aldığı birim Karaada'nın kuzeyindeki fay hattı boyunca hidrotermal alterasyona uğramış (Foto 3.1.e), yer yer kıvrımlı, kırıklı ve çatlaklı bir yapı kazanmıştır (Foto 3.1.a). Birim içinde karstik boşluklar mevcuttur (Foto 3.1b,c,d).

Alüvyonlar (Qal)

Çalışma alanında Bodrum ilçe merkezi, Kızılağaç ve Yalıçiftlik dolayında yüzeylenen alüvyonlar başlıca çakıl, kum, silt ve çamurdan oluşmaktadırlar. Geçirimli olmalarına karşın kalınlıklarının fazla olmayışı nedeniyle sadece yerel öneme sahip sığ akiferdirler. Alüvyonların denizle sınır olması, bu birimlere yağışlardan, mevsimlik derelerden ve komşu kayalarından süzülen suların yeraltından denize boşalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu birimlerde su depolanamamaktadır. Kızılağaç köyü ile Yalıçiftlik civarında bir kısmı alüvyonlarda açılan derinlikleri 5-230 m arasında değişen çok sayıda sığ ve derin kuyu bulunmaktadır. Bu kuyuların kontrolsüz işletilmesi alüvyon akiferin tuzlu su girişimi nedeni ile kirlendiği, yapılan su kimyası analiz sonuçlarından belirlenmiştir.

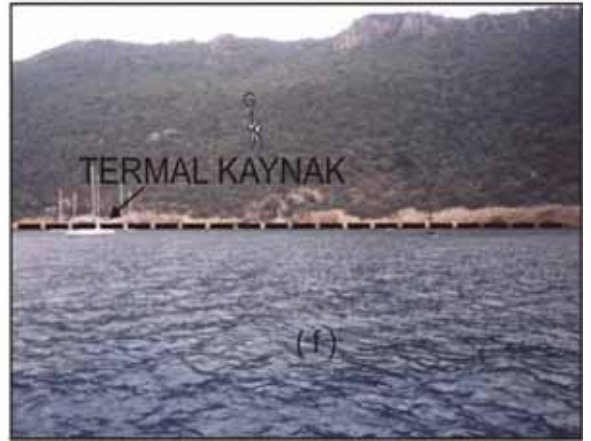


Foto 3.1. Kışladağı Formasyonu içinde gözlenen jeolojik ve hidrojeolojik yapılar

3.1.2 Yarı Geçirimli Birimler

Andezit, Latit, Trakiandezit, Tüf ve Aglomera (α , θ)

Bu birimler genel olarak geçirimsiz olmakla beraber aktif tektonizma sonucu gelişen kırık, çatlak ve fay zonları boyunca suyu iletme ve az da olsa depolama özelliğine sahiptirler. Dar bir alanda yayılım sunduklarından çalışma alanında bu birimler önemli akifer olma özelliğini yitirmektedir (Bkz. Şekil 2.2).

3.1.3 Geçirimsiz Birimler

Karadağ Formasyonu (Kju)

İnceleme alanının doğusunda geniş alanda yüzeylenen Karadağ Formasyonu'nun kırık, çatlak ve fay zonları geçirimli olmakla beraber kireçtaşları bünyesinde bulunan siltli ve marnlı seviyeler bu birimin geçirimsiz olmasına neden olmaktadır. Bu birim, üzerine düşen yağışların büyük bir kısmını yüzeysel akışla alüvyonlara ulaştırmakta böylece alüvyonlar için önemli bir beslenme alanı olmaktadır (Bkz. Şekil 2.2).

Bodrum Formasyonu (Fükr)

İnceleme alanında Bodrum ilçe merkezi çevresinde dar alanlarda yüzeylenen birim içinde bulunan kilttaşları, silttaşları ve marn seviyelerinden dolayı geçirimsiz birim olarak tanımlanmıştır. Bu birimde herhangi bir kaynak görülmemekte ve bu birime açılan kuyu bulunmamaktadır (Bkz. Şekil 2.2).

3.2 Kaynaklar

Tez çalışması süresince inceleme alanında yapılan arazi çalışmalarında Karaada ve Tavşanburnu sıcak ve mineralli su kaynaklarından başka su kaynağı bulunmamaktadır. Bu kaynaklar karstik akifer olan Kışladağı Formasyonu'nda ana fay hatları üzerinde yer almaktadır (Bkz. Şekil 2.2).

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı Bodrum ilçe merkezinin yaklaşık 10 km güneyinde yer alan Karaada'da bulunmaktadır (Foto 3.2a). Kaynak Karaada'nın

kuzeyinden geçen yaklaşık D-B doğrultulu ana fay hattı üzerinde yer alan mağara çevresinde çok sayıda noktadan çıkmaktadır (Foto 3.2d,e,f,g). Mağara fay kuşağında oluşmuş ve fayın doğrultusunda her iki tarafa uzanan dar kolları bulunan yengeç şekilli olup dar bir girişten sonra 5-6 metre yükseklikte ve 10-40 metre genişlikteki bir oda şeklinde dir. Kaynak suyu mağara çıkışında deniz seviyesinden 1 metre. yükselen bir duvar örülerek havuza dönüştürülmüş bir yapıda depolanarak, termal turizm amacıyla kullanılmaktadır (Foto 3.2c). Mağara tabanından çıkan sıcak suyun debisi deniz seviyesinin alçalıp yükselmesine bağlı olarak değişmektedir (Foto 3.2d,g). Daha nceki çalışmalarda debisi 2 l/s (MTA, 2000) ve 15-25 l/s (Canik, 1983) olarak llmştr. Ancak kaynak çevresinde yapılan gözlemler sonucu sıcak suyun bir kısmının çatlaklardan doğrudan denize boşaldığı ve mağara çıkışındaki akış halinde gözlenen suyun debisi göz önüne alındığında toplam debinin yaklaşık 25-50 l/s olduğunu söylemek daha doğru olacaktır. Termal kaynağın sıcaklığı Eylül 2004’de 31.7 C Nisan 2005’de 30.6 C olarak llmştr. Sıcaklık lmnn yapıldığı tarihlerde deniz suyunun yüzey sıcaklığı 17 C ve 23.3 C olarak llmştr. Daha nceki çalışmalarda termal kaynağın sıcaklık değerleri 32 C (ağlar 1947, Canik 1983), 30 C (MTA, 2000) ve 33 C (İstanbul ni. 1971, Pişkin, 1983) olarak llmştr.

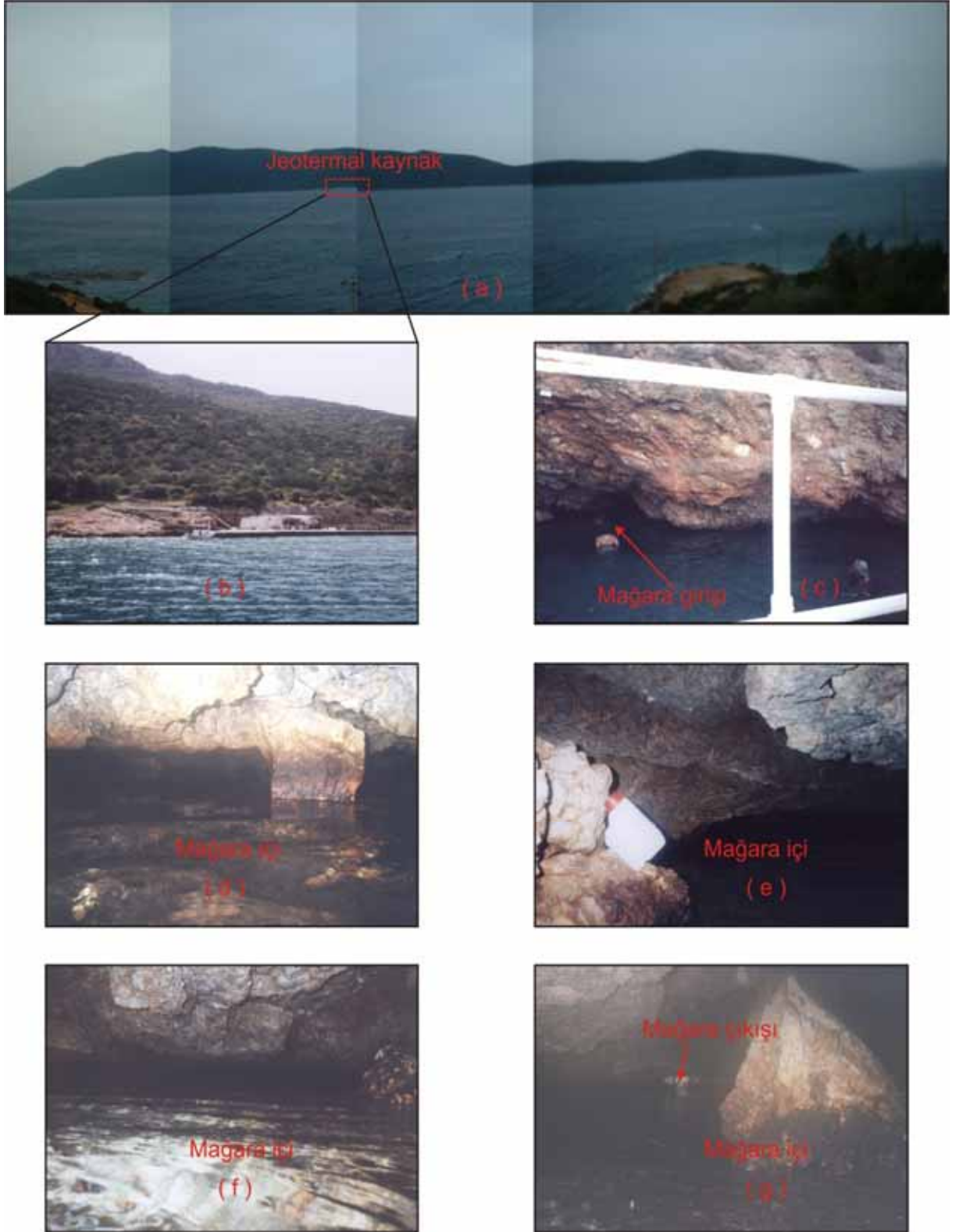


Foto 3.2. Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı ve çıkış noktasındaki mağara

Tavşanburnu Kaynağı (Tavşanburnu Ilıcası)

Karstik Kışladağı Formasyonu'nun Tavşanburnu fayı üzerinde yer alan kaynak, Bodrum ilçe merkezinin güneydoğusunda, Tavşanburnu'nda bulunmaktadır (Foto 3.3). Çalışma yapılan tarihlerde kaynak kuru olduğundan herhangi bir fiziksel ölçüm yapılamamıştır. Ancak daha önceki çalışmalardan derlenen sonuçlara göre kaynağın debisi 0.2 l/s ve sıcaklığı da 18-22 °C olarak sunulmuştur (Çağlar, 1947, ve MTA, 1998).

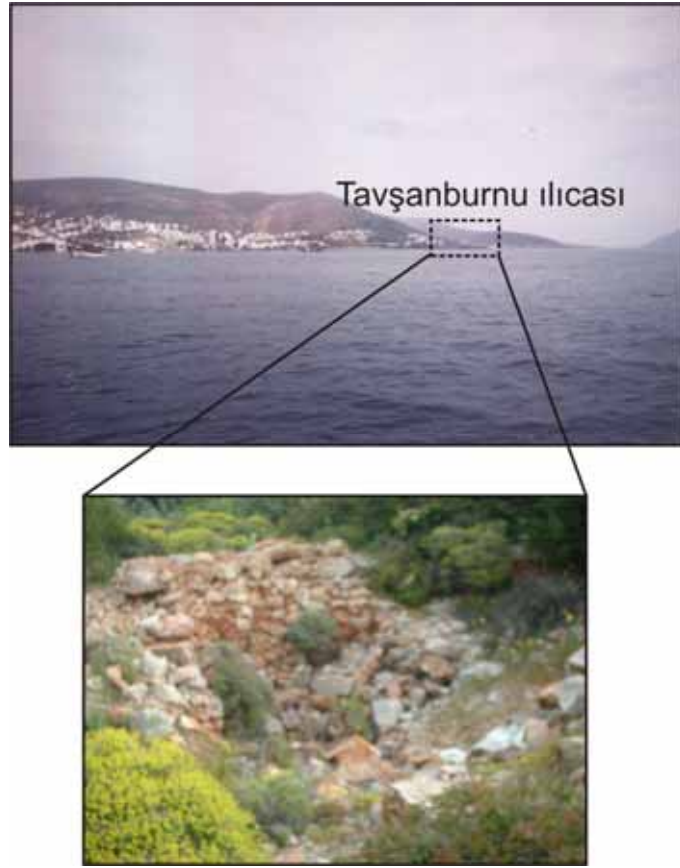


Foto 3.3. Tavşanburnu sıcak ve mineralli su kaynağı (günümüzde kaynak görülmemektedir.)

3.3. Kuyular

İnceleme alanında kaynak, akarsu ve göl gibi su kaynaklarının olmayışı nedeniyle özellikle yaz aylarında yerleşim ve tarım alanlarında içme, kullanma ve sulama suyu amaçlı sığ ve derin işletme kuyuları açılmıştır. İnceleme alanında yer alan kuyulardan 6 sığ, 3 sondaj ve Kızılağaç obruğunda oluşan toplam 10 kuyudan örnekleme ve analiz çalışması yapılmıştır (Foto 3.4).

Sığ Kuyular

Bodrum-Karaada jeotermal alanında Kuvaterner yaşı alüvyonlara açılmış sığ kuyuların derinliği 3-30 m arasında değişmektedir. Sığ kuyuların yoğun olduğu başlıca alanlar Kızılağaç Köyü ve Yalıçiftlik'te bulunan Kuvaterner yaşı alüvyonlardır. Ancak kuyuların çoğunda tuzlu su girişi olduğundan kullanılamamaktadırlar.

Sondaj Kuyuları

Çalışma alanında derinlikleri 20-238 m. arasında değişen çok sayıda sondaj kuyusu açılmıştır (Filiz vd., 1998). İnceleme alanında bulunan 3 tane sondaj kuyusunda fiziksel ve kimyasal ölçüm yapılmıştır.

3.4. Sarnıçlar

İnceleme alanı genellikle sert kayalık araziden oluştuğu için kuyu tekniklerinin gelişmesine kadar halkın su gereksinimi uzun yıllar boyunca yağmur sularını toplama ve depolama yapısı olan sarnıçlarla karşılanmıştır. Önemi yakın geçmişe kadar koruyan yöredeki sarnıçlar günümüzde yeraltısularının kullanılmasıyla önemi yitirmiş ve artık kullanılmamaktadır. İnceleme alanında yer alan sarnıçlar kullanılmadıklarından bunların depoladıkları sularda örnekleme ve analiz çalışması yapılmamıştır.



Foto 3.4. İnceleme alanındaki bazı kuyular ve iç görünüşleri

4. SU KİMYASI

İnceleme alanındaki sıcak ve mineralli su kaynaklarının hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenebilmesi amacı ile kaynaklardan Eylül-2004 ve Nisan-2005 tarihlerinde olmak üzere iki ayrı dönemde örnekleme ve kimyasal analiz çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, yerel yeraltısuyunu temsil eden ve jeotermal sistemin muhtemel beslenme alanı içinde yer alan soğuk su kuyularından ve deniz suyundan da aynı dönemlerde örnekleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tavşanburnu kaynağı inceleme süresi boyunca her mevsim kuru olması nedeniyle bu kaynaktan örnekleme yapılamamış yapılan değerlendirme ve yorumlarda bu kaynak için daha önce Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA, 1998) tarafından yapılan analiz verileri kullanılmıştır. İnceleme alanından alınan su örneklerinin koordinatları Çizelge 4.1'de, inceleme alanındaki konumları ise Şekil 3.2'de verilmiştir.

Örnekleme çalışmalarında pH, toplam çözünmüş madde (TÇM), elektriksel iletkenlik (Eİ), ve sıcaklık (S) gibi fiziksel parametre ölçümleri yerinde yapılmıştır (Çizelge 4.2). Çalışma alanından toplanan örnekler 250 ml'lik özel polietilen şişeler içerisinde, katyon ve ağır metal içeriklerini korumak için pH<2 koşulu sağlanacak şekilde HNO₃ ile asitlenerek Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Su Kimyası Laboratuvarı'na ulaştırılmıştır.

Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Ni, Pb, Cd, Li, Cu, Zn ve Cr analizleri Perkin Elmer Model 2280 Atomik Absorbsiyon Spektrometresi kullanılarak, HCO₃ analizi titrimetrik metotla (hata sınırı ± 3 mg/l), F, Cl, SO₄, PO₄, Br, NO₃, NO₂ analizleri ise iyon kromatograf ile yapılmıştır.

4.1. Suların Fiziksel Özellikleri

4.1.1. Sıcaklık (S)

İnceleme alanındaki tek sıcak ve mineralli su kaynağı olan Karaada sıcak ve mineralli su kaynağının sıcaklık değeri; Eylül 2004'te 31.7 °C ve Nisan 2005'te 30.6 °C olarak ölçülmüştür. Kaynağın dönemsel ± 1 °C sıcaklık değişim aralığı mevsimsel olarak sıcaklığı değişen deniz suyu ile beslenme alanındaki soğuk yeraltısuyunun karışmasından kaynaklanmaktadır. Bogomolow sınıflamasına göre

bu sıcaklık değerleriyle Karaada sıcak su kaynağı epitermal (20-34 °C) sular sınıfına girmektedir.

Mevsimsel atmosferik sıcaklıktan bir şekilde etkilenen sığ kuyu sularında ve deniz suyunda dönemsel sıcaklık farkı gözlenmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1. Çalışma alanında örnekleme yapılan su noktalarının UTM koordinatları

No	Örnek adı	Boylam (D)	Enlem (K)	Kot (m)	Derinlik(m)
B-1	Kızılağaç keson	545814	4095440	17	10.5
B-2	Hasan Hüseyin sondaj kuyusu	551257	4098854	129	120
B-3	Kızılağaç obruk	545414	4096586	35	50
B-4	Süheyla Enç sondaj kuyusu	542387	4100183	110	110
B-5	Yalıçiftlik keson kuyu	547612	4094467	10	6
B-6	Yenkuyu keson kuyu	550715	4098902	128	12
B-7	Osman Çavuş sondaj kuyusu	550803	4098440	108	110
B-8	Karaada kaplıcası	540168	4093599	0	kaynak
B-9	Deniz suyu	539250	4095350	0	yüzey
B-10	Tavşanburnu	541416	4095050	5	kuru
B-11	Kocakuyu keson	550290	4098905	122	4.5
B-12	Meydankuyu keson	551197	4098775	121	10
B-13	Yakabahçe keson	551301	4098976	150	7.5

4.1.2. Elektriksel İletkenlik (Eİ)

Elektriksel iletkenlik, suyun elektrik akımını iletebilme özelliğinin sayısal ifadesidir. Su analiz sonuçları, mikromho/cm veya mikrosiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) olarak ve 25°C'deki değeri hesaplanarak verilmektedir. Suların Eİ'leri, suda çözünmüş toplam madde miktarına (TÇM), suların yeryüzüne çıkıncaya kadar izledikleri yola, temasta oldukları kayaçların cinsine, kayaçların çözünürlüklerine, iklime, bölgedeki yağış koşullarına ve suyun sıcaklığına bağlıdır. Sıcaklık arttıkça aynı konsantrasyondaki çözeltinin ölçülen Eİ'si de artmaktadır. TÇM ile artış gösteren Eİ değeri, sudaki toplam iyon derişiminin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Doğan, 1981). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Türk

Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından içme suyu standartlarında elektriksel iletkenlik için herhangi bir değer aralığı belirtilmemiştir.

Kuyu sularının TÇM ile doğru orantılı olan Eİ değerleri 400-6700 $\mu\text{S/cm}$ aralığında değişmektedir. Bu aralığın bu kadar geniş olması yüksek Eİ değerleri ölçülen sığ kuyu sularına, deniz suyunun karışması ile açıklanabilir. En düşük Eİ değeri su-kayaç etkileşiminin en kısa süreli olduğu ve mevsimsel yağışlardan beslendiği düşünülen Yalıçiftlik Yenikuyu'da 400-427 $\mu\text{S/cm}$ olarak ölçülmüştür. Daha uzun su-kayaç etkileşim süresine sahip olan veya deniz suyu karışımından etkilenen kuyularda bu değer daha yüksektir (Çizelge 4.2).

Karaada sıcak su kaynağında Eİ değeri, Eylül 2004'te 61500 $\mu\text{S/cm}$ ve Nisan 2005'te 57400 $\mu\text{S/cm}$ olarak ölçülmüştür. Mevsimsel olarak Eİ'deki değişim yağışlı dönemde beslenme miktarındaki artıştan dolayı sıcak su kaynağındaki suyun seyrelmesi ve sıcaklığındaki düşüşten kaynaklanmaktadır. Deniz suyunda Eİ değeri Eylül 2004'te 58600 $\mu\text{S/cm}$ ve Nisan 2005'te 58800 $\mu\text{S/cm}$ olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.2).

4.1.3. Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH)

pH, sudaki hidrojen iyonu derişiminin bir ölçüsü olup sudaki asit ve bazlar arasındaki dengeyi gösterir. Doğal yeraltısularının pH değeri 6.0-8.5 arasında değişir (Doğan, 1981). Sudaki karbonat, hidroksit ve bikarbonat iyonları suyun bazik özelliğini arttırırken, serbest mineral asitleri ve karbonikasit suyun asit özelliğini arttırmaktadır (Doğan, 1981).

Atmosferdeki karbondioksit gazı, fiziksel çözünmeyle sulara geçmekte ve hidrotasyon sonucunda karbonik aside dönüşerek sulara çözücü-aşındırıcı bir özellik kazandırmaktadır. Suların aşındırıcı (düşük pH), ve kabuk bağlayıcı (yüksek pH) özellikleri suların pH değerinden kaynaklanmaktadır.

İnceleme alanındaki sıcak ve mineralli su kaynağının pH değeri; Eylül 2004'te 6.20 ve Nisan 2005'te 6.42 olarak ölçülmüştür. Bu değerlerle kaynak hafif asidik bir özellik göstermektedir.

Çizelge 4.2. Çalışma alanından derlenen su örneklerine ait kimyasal analiz sonuçları (*Analizi gerçekleştirilememiştir, ** Türkiye termal ve minerali sular envanteri (MTA,1998) ,E: Eylül 2004,N: Nisan 2005, T: Temmuz 1998).

No	Örnek Adı	Tür	Tarih	pH	Eİ (µS/cm)	Eİ(25°C, µS/cm)	S (°C)	ÇO (mg/l)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Cl (ppm)	SO ₄ (ppm)	HCO ₃ (ppm)	CO ₃ (ppm)	F (ppm)	Br (ppm)	Li (ppm)	Hata (%)
B-1	Kızılağaç keson	Kuyu	E	7.15	3000	3228	21.3	*	151.63	87.83	472.11	16.78	806.08	120.95	38	28.57	0.00	3.42	0	4.70
B-1	Kızılağaç keson	Kuyu	N	7.20	1890	2076	20.3	5.2	96.05	50.39	203.70	9.06	342.08	54.96	373	0.00	0.04	0.82	0.001	2.73
B-2	Hasan Hüseyin sondai	Kuyu	E	7.30	800	803	24.8	*	114.26	21.14	25.81	2.30	53.45	12.40	325	17.14	0.00	0.00	0.003	1.70
B-3	Kızılağaç obruk	Kuyu	E	8.10	1700	1900	19.5	*	81.66	31.36	155.44	9.86	225.79	37.12	258	28.57	0.00	0.00	0	4.90
B-3	Kızılağaç obruk	Kuyu	N	7.38	1860	2219	16.53	3.8	86.40	36.57	213.02	10.11	379.89	53.12	266	0.00	0.11	0.79	0	1.75
B-4	Süheyla Enç sondai kuyusu	Kuyu	E	7.10	1500	1655	20.1	*	119.11	42.91	165.03	7.75	269.40	42.73	351	20.00	0.00	1.04	0	4.60
B-4	Süheyla Enç sondai	Kuyu	N	9.4	817	941	18.1	*	58.71	31.82	68.19	3.62	138.32	19.29	100	49.18	0.23	0.35	0.069	4.55
B-5	Yalıçiftlik keson	Kuyu	E	8.00	6700	7122	21.9	*	290.37	225.67	1455.70	40.36	3072.10	233.75	342	42.86	0.00	10.07	0.016	-0.60
B-6	Yenkuyu keson	Kuyu	E	7.20	400	457	18.5	*	78.44	9.87	8.65	2.83	9.47	6.22	302	0.00	0.23	0.00	0	-1.90
B-6	Yenkuyu keson	Kuyu	N	7.23	427	527	15.05	1.8	70.69	8.40	8.74	2.62	7.17	3.32	245	0.00	0.00	0.00	0	4.10
B-7	Osman Çavuş sondai	Kuyu	E	6.90	700	772	20.10	*	130.27	23.90	13.74	1.38	33.58	6.89	435	0.00	0.00	0.00	0	3.10
B-8	Karaada kaplıcası	Kaynak	E	6.20	61500	54523	31.70	*	851.00	1174.43	11347.24	421.05	20282.28	2794.76	493	0.00	2.33	119.77	0.298	0.30
B-8	Karaada kaplıcası	Kaynak	N	6.42	57400	51854	30.60	1.2	923.92	1284.72	11584.44	390.85	19226.41	2448.93	466	0.00	0.00	40.78	0	5.08
B-9	Deniz suyu	Deniz	E	8.20	58600	60567	23.30	*	556.01	1405.16	10871.88	403.00	18842.93	2661.16	69	40.00	13.65	54.34	0	2.90
B-9	Deniz suyu	Deniz	N	8.31	58800	68479	17.60	6.8	552.50	1459.23	11753.97	425.01	19587.06	2631.25	123	29.51	0.00	41.52	0	4.62
B-10	Tavşanburnu ılıcası**	Kaynak	T	7.90	10000	10608	22.00	*	265.23	327.32	2835.50	130.09	5124.09	769.39	398	*	*	*	*	-0.10
B-11	Yalıçiftlik Kocakuyu	Kuyu	N	7.50	670	814	15.73	6.2	100.11	14.82	18.12	4.89	22.45	13.10	330	0.00	0.05	0.00	0	4.15
B-12	Yalıçiftlik Mevdankuyu	Kuyu	N	7.15	3000	3228	21.30	2	86.24	15.00	30.00	22.03	32.41	24.43	297	0.00	0.34	0.00	0	4.66
B-13	Yalıçiftlik Yakabahçe keson	Kuyu	N	7.03	686	785	18.40	2.8	82.64	18.51	23.20	6.14	42.99	16.36	238	0.00	0.21	0.00	0	4.05

Çalışma alanındaki soğuk kuyu suları pH değerlerine göre (pH'ları 7 civarında) nötr bir özellik göstermektedirler (Çizelge 4.2). Deniz suyunun pH değeri Eylül 2004'te 8.20 ve Nisan 2005'te 8.31 olarak ölçülmüştür.

4.2. Suların Kimyasal Özellikleri

4.2.1. Majör ve minör iyonlar

Doğal suların toplam iyonik içeriğinin %90'ından daha fazlasını oluşturan Na, Ca, Mg, K, Cl, HCO₃ ve SO₄ iyonları major iyonlar olarak adlandırılmaktadır. İnceleme alanında bulunan suların kimyasal analiz sonuçlarında (Çizelge 4.1) yer alan majör iyonlar ve dağılımları aşağıda açıklanmıştır.

Sodyum (Na) ve Potasyum (K)

Sodyum, doğal sularda en yaygın olarak bulunan alkali metaldir. Bütün sodyum bileşikleri suda kolayca çözünürler. Magmatik kayalar, kil mineralleri, feldispatlar, feldispatoidler ve evaporitler sodyum içeren başlıca kayaç ve minerallerdir. İçme ve kullanma suları standartlarında sodyum için 175 mg/l maksimum değer verilmiştir (TSE, 1997) Potasyum ise esas olarak feldispatlarda, mikalarda, feldispatoyidlerde ve kil minerallerinde bulunur. Doğal sularda potasyum içeriği genelde 20 mg/l aşmamaktadır. Ancak sıcak su kaynaklarında bu değer 100 mg/l'ye ulaşabilmektedir (Doğan, 1981). İçme ve kullanma suları standartlarında potasyum 12 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağındaki sıcak suyun yüksek Na ve K değerlerine sahip olmasının nedeni termal kaynağın rezervuarının deniz suyundan beslenmesidir. İnceleme alanında yer alan ve sahile yakın açılmış olan kuyu suları, sahilden uzak açılmış veya deniz suyu karışımı olamayan kuyu sularına göre daha fazla Na ve K derişimlerine sahiptirler. Bu kuyulardan sırasıyla Tavşanburnu ılıcası (MTA, 1997), Yalıçiftlik keson, Kızılağaç keson ve Kızılağaç obruk kuyuları en fazla deniz suyu karışımı etkisinde olan kuyulardır. Bu kuyulardaki yeraltısuyunun Nisan 2005'te, Eylül 2004'e göre daha az Na ve K derişimine sahip olması, bu dönem yeraltısuyunun yağışlarla seyreltiğini göstermektedir.

Kalsiyum (Ca) ve Magnezyum (Mg)

Kalsiyum, doğal sularda en bol bulunan katyonlardan biridir. Ca birçok magmatik kayaç minerallerinin, özellikle piroksen, amfibol ve feldispatların asıl bileşenidir. Tortul kayaçlarda kalsiyum genellikle karbonatlar (kalsit, dolomit vb.) şeklinde bulunmaktadır. Doğal sulardaki miktarı, suyun bulunduğu ortamdaki kayaçların bileşimi ile yakından ilgilidir. Karbonatlı kayaçların bulunduğu bir bölgedeki sularda kalsiyum miktarı 100 mg/l kadar değişebilmektedir. Kalsiyum, suların sertliğini oluşturan ana iyonlardan biridir. İçme ve kullanma suları standartlarında Ca 200 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

Magnezyum tuzları ise genelde dolomit ve ofiyolitik kayaçlarda bol miktarda bulunmakta ve oldukça yüksek bir çözünürlüğe sahiptirler. Kalsiyum tuzları çökdikten sonra da çözeltide kalmaya devam ederler. Doğal sularda 100 mg/l'ye kadar değişen derişimlerde bulunan magnezyum, suların sertliğini oluşturan diğer bir iyondur. İçme ve kullanma suları standartlarında Mg 50 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997). Kalsiyum ve magnezyumun zehirleyici özellikleri bulunmamaktadır (Doğan, 1981).

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağındaki Ca derişimi, Eylül 2004'te 851 ppm ve Nisan 2005'te 923.92 ppm olarak ölçülmüştür. Mg konsantrasyonu ise Eylül 2004'te 1174.43 ppm ve Nisan 2005'te 1284.72 ppm olarak ölçülmüştür. Nisan 2005'te, mevsimsel yağışlardan kireçtaşlarına süzülen sular, derin dolaşım ve su-kayaç etkileşimi nedeniyle kireçtaşından Ca ve Mg minerallerini çözmektedir. Bu durum sıcak su kaynağının bu minerallerce daha yüksek konsantrasyona sahip olmasını sağlamaktadır. İnceleme alanında yer alan kuyu sularında su-kayaç etkileşim süresine bağlı olarak değişik konsantrasyonlarda Ca ve Mg iyonları bulunmaktadır (Bkz. Çizelge 4.2).

Alkalinite (HCO_3^- ve CO_3^{2-})

Suların alkanitesi, içerdği çözünmüş maddelerin asitlerle tepkimeye girme ve nötralleştirme kapasitesidir. Hemen hemen bütün doğal sularda, alkalinite karbonat (CO_3^{2-}), bikarbonat (HCO_3^-) ve hidroksit (OH^-) iyonlarından dolayı ortaya çıkmaktadır. Doğal sularda alkaniteyi oluşturan temel unsurlar atmosferik karbondioksit ile toprakta ve doygun olmayan zonda üretilen gazlardır. Bunun

dışında biyolojik olarak oluşan sülfat redüksiyonu ile karbonat kayaçlarının metamorfizması sonucu da karbondioksit oluşabilmektedir.

Alkalinite değerleri; Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında 493.81-466.67 ppm, deniz suyunda 109.71-152.84 ppm ve soğuk su kuyularında 149.18-435.71 ppm olarak ölçülmüştür (Bkz. Çizelge 4.2).

Klorür (Cl) ve Florür (F)

Klorürün doğadaki dağılımı oldukça geniştir. Klorür, esas olarak deniz suyunda, sedimanter kayaçlarda ve özellikle evaporitlerde bulunmaktadır. Ayrıca, sodalit, biyotit, hornblend gibi magmatik kökenli minerallerde ve şeyllerde klorür iyonu bulunmaktadır. Kirlenmemiş doğal sularda klorür içeriği genellikle 10-20 mg/l arasındadır. Bu değer yağışın klorür içeriği ile yakından ilişkilidir. Sularda görülen florürün başlıca kaynağı ise volkanik kayaçların bileşiminde bulunan kalsiyum florürdür (Doğan, 1981). İçme ve kullanma suları standartlarında Cl 600 mg/l'yi ve F ise 1.5 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

Klorür değerleri; Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında 19226.41-20282.28 ppm, deniz suyunda 18842.93-19587.06 ppm olarak ölçülmüştür (Bkz. Çizelge 4.2).

Suda bulunan çözünmüş iyonlar (Cl, Br, B vb.) ile kayaçların bileşiminde bulunan (Na, Ca, HCO₃ vb.) elementlerden Na/Cl ve Br/Cl oranları termal suların kökeninin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Yüksek tuzlu termal sularda $Na/Cl < 1$ ve $(Br/Cl)_{örnek} > (Br/Cl)_{deniz}$ ise termal sular denizel kökenli, $Na/Cl > 1$ ve $(Br/Cl)_{örnek} < (Br/Cl)_{deniz}$ ise termal sular denizel kökenli olmayan sulardır.

Bu çalışmada elde edilen kimyasal analiz sonuçlarına göre Karada sıcak ve mineralli su kaynağında Eylül 2004'te

$$Na/Cl = 11347.24 / 20282.28 = 0.56 < 1 \text{ ve } (Br/Cl)_{örnek} = 119.77 / 20282.28 = 0.006$$

$$(Br/Cl)_{deniz} = 54.34 / 18842.93 = 0.003$$

Nisan 2005'te

$$\text{Na/Cl}=11584.44/19226.41=0.60<1 \text{ ve } (\text{Br/Cl})_{\text{örnek}}=40.78/19226.41=0.002$$

$$(\text{Br/Cl})_{\text{deniz}}=41.52/19587.06=0.002$$

sonuçları elde edilmiş ve $\text{Na/Cl}<1$ ile $(\text{Br/Cl})_{\text{örnek}}>(\text{Br/Cl})_{\text{deniz}}$ olduğundan sıcak su kaynağının besleniminin denizel kökenli olduğu söylenebilmektedir.

Vengosh et al. (2001) Batı Anadolu'da yaptıkları çalışmada Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı için Na/Cl oranını 0.9, Br/Cl oranını ise 1.6 olarak hesaplamışlar ve kaplıca suyunun denizel kökenli olduğunu belirtmişlerdir.

İnceleme alanında yer alan ve sahile yakın açılmış olan kuyu suları, sahilden uzak açılmış veya deniz suyu karışımı olmayan kuyu sularına göre daha fazla klorür derişimlerine sahiptirler. Bu kuyulardan sırasıyla Tavşanburnu ılıcası (MTA, 1998), Yalıçiftlik keson, Kızılağaç keson ve Kızılağaç obruk kuyuları en fazla deniz suyu karışımı etkisinde olan su noktalarıdır. Florür ise deniz suyundaki derişimine bağlı olarak Karaada sıcak su kaynağında dönemsel olarak değişmektedir (Bkz. Çizelge 4.2).

Sülfat (SO_4)

Kükürt elementi, indirgenmiş halde metal sülfürleri olarak magmatik ve sedimanter kayalarda yaygın olarak bulunmaktadır. Sülfürlü mineraller su ile temas ederek bozundukları zaman oksitlenerek SO_4^{-2} iyonları oluşur ve bu iyonlar suya geçmektedir. İçme ve kullanma suları standartlarında sülfat 250 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

SO_4^{-2} Karaada kaplıcasında klorürden sonra en fazla bulunan ikinci anyondur. Kurak dönemi temsil eden Eylül 2004 analizlerinde, Nisan 2005 analizlerine göre daha fazla konsantrasyona sahiptir. Bu dönemde deniz suyu kökenli olan Karaada kaplıcasına mevsimsel yağışlarla süzülen suların karışması sonucu sülfat derişiminde düşüş olmaktadır (Bkz. Çizelge 4.2).

Deniz suyu karışımı etkisi altında olan soğuk su kuyularında (Kızılağaç keson, Yalıçiftlik keson, Kızılağaç obruk ve Süheyla Enç sondaj kuyusu) sülfat derişimi, bu etki altında olmayan kuyu sularına oranla daha fazladır (Bkz. Çizelge 4.2).

4.2.2. Kirlilik Analizleri

İnceleme alanında bulunan kuyu sularından, jeotermal kaynaktan ve deniz suyundan kirlilik tespitine yönelik örnekler derlenerek, NH_3 , NO_2 , NO_3 ve PO_4 analizleri yapılmıştır (Çizelge 4.3). Bu analizler ile ilgili değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

Amonyak (NH_3)

Amonyak formu, sularda bulunan azotun en fazla indirgenmiş inorganik bileşigidir. Doğal sulardaki amonyak derişimleri genellikle 0.1 mg/l'den daha düşük olmaktadır. Yeraltısularındaki amonyak derişimi toprak tanelerince ve kil minerallerince adsorblanması nedeniyle daha düşük konsantrasyonda ölçölmektedir.

Amonyak içeren sularda bakteri üremesi nedeniyle dağıtım şebekelerinde birtakım sorunlar ortaya çıkmaktadır (McNeely et al., 1979). İçme ve kullanma suları standartlarında amonyak 0.5 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

İnceleme alanındaki su noktalarında amonyak, sadece Süheyla Enç sondaj kuyusunda (0.81 ppm), sınırı aşan değer gözlenmiştir. Bu kirlilik kuyu başı koruma önlemlerinin alınmayışı nedeniyle çevresel etkilerden kuyuya bulaştığı düşünölmektedir.

Nitrit (NO_2)

Nitrit iyonu, sularda düşük miktarlarda bulunan bir azot bileşigidir. Oksijenin bulunduğu ortamlarda kararsız durumda olduğundan, amonyak ve nitrat arasında (nitrifikasyon) veya nitrat ve azotoksit arasında (denitrifikasyon) geçiş formu olarak bulunur. Suda nitritin bulunması organik kirlenme tarafından etkilenmiş aktif biyolojik süreçlerin varlığını göstermektedir (McNeely et al., 1979). Nitrit insanlar ve hayvanlar için nitrattan daha fazla zehirleyicidir. İçme ve kullanma suları standartlarında nitrit 0.1 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

İnceleme alanında nitrit sadece Yenkuyu keson kuyuda Eylül 2004'te 0.38 ppm olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.3). Bu kuyudaki nitrit varlığı çevredeki tarım ve hayvancılık aktiviteleri sonucu oluşan biyolojik faaliyetler ile çevresel etkilere karşı koruma önlemleri alınmayan kuyu başındaki kirlilikten kaynaklandığı düşünülmektedir (Bkz. Foto 3.3).

Nitrat (NO_3)

Nitrat iyonu, sularda bulunan bağlı azot bileşiklerinin en önemlisidir. Çoğu yüzey suları bir miktar nitrat iyonu içerir. Bununla birlikte, nitratin ana kaynaklarından biri insan ve hayvan atıkları olduğundan 5 mg/l'den fazla nitrat içeriği kirlenme göstergesi olarak gösterilmektedir (McNeely et al., 1979). Öte yandan magmatik ve volkanik gazlar sulardaki nitrata yerel olarak kaynaklık etmektedir.

Yüzey ve yeraltısularındaki nitrat çoğunlukla organik veya insan kaynaklıdır. Çürümüş bitkisel ve hayvansal atıklar, endüstriyel atık sular, tarımda kullanılan gübreler, sulamadan dönen sular, atmosferik azotun yağışlarla yıkanması, yüzey ve yeraltısularında ki nitrati sağlayan başlıca kaynaklardır (Hem, 1985). Nitratin insan sağlığı üzerine olan etkileri göz önünde tutularak Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve içme ve kullanma suları standartlarında nitrat 50 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında nitrat Eylül 2004'te 7.67 ppm olarak ölçülmüştür. Kaynaktaki nitratin varlığı olasılıkla, bu dönemde bölgedeki turizm faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Yaz aylarında kaplıcaya oldukça yüksek sayıda yerli ve yabancı turist ziyareti gerçekleşmektedir.

Çalışma alanındaki soğuk su kuyularının tamamı yerleşim yeri ve tarım alanları içinde açılmıştır. Kuyu başlarında, çevresel etkilere karşı koruma önlemleri alınmadığından bu kuyulardaki nitrat varlığı çevredeki tarım ve hayvancılık aktiviteleri sonucu oluşan biyolojik faaliyetlerden kaynaklanmaktadır (Bkz. Foto 3.3). Kuyulara ait nitrat derişimleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Fosfat (PO_4^-)

Fosfor magmatik kayalarda bulunan en yaygın elementlerden biridir. Sedimanlar içinde de oldukça yaygın olmasına karşın doğal sulardaki fosfat derişimi 1 mg/l'nin

çok altındadır (Hem, 1985). Yüzey ve yeraltısularındaki fosfat, kayalardan ve topraktan, bozunan bitkisel ve hayvansal atıklardan, kullanılan gübrelerden kaynaklanabilir. Ortamda yeterli miktarda azot bulunduğunda 0.1 mg/l'nin üzerindeki fosfor derişimleri çamur oluşumuna ve alg çoğalmasına neden olarak suyun içme, endüstriyel ve banyo amacıyla kullanımını etkilemektedir (McNeely et al., 1979). Bodrum-Karaada jeotermal alanında yer alan su örneklerinde fosfat değerlerine rastlanılmamıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Çalışma alanından derlenen su örneklerine ait kirlilik analiz sonuçları (E: Eylül 2004, N: Nisan 2005).

No	Örnek Adı	Tür	Tarih	NH ₄ (ppm)	NO ₃ (ppm)	NO ₂ (ppm)	PO ₄ (ppm)
B-1	Kızılağaç keson kuyu	Kuyu	E	0	3.85	0	0
B-1	Kızılağaç keson kuyu	Kuyu	N	0	9.21	0	0
B-2	Hasan Hüseyin sondaj	Kuyu	E	0	41.52	0	0
B-3	Kızılağaç obruk	Kuyu	E	0	3.22	0	0
B-3	Kızılağaç obruk	Kuyu	N	0	3.66	0	0
B-4	Süheyla Enç sondaj	Kuyu	E	0	27.54	0	0
B-4	Süheyla Enç sondaj	Kuyu	N	0.81	18.68	0	0
B-5	Yalıçiftlik keson kuyu	Kuyu	E	0	0	0	0
B-6	Yenkuyu keson kuyu	Kuyu	E	0.19	0.74	0.38	0
B-6	Yenkuyu keson kuyu	Kuyu	N	0	0.11	0	0
B-7	Osman Çavuş sondaj	Kuyu	E	0	19.33	0	0
B-8	Karaada kaplıcası	Kaynak	E	0	7.67	0	0
B-8	Karaada kaplıcası	Kaynak	N	0	0	0	0
B-9	Deniz suyu	Deniz	E	0	65.98	0	0
B-9	Deniz suyu	Deniz	N	0	0	0	0
B-11	Yalıçiftlik Kocakuyu	Kuyu	N	0.14	14.74	0	0
B-12	Yalıçiftlik Meydankuyu	Kuyu	N	0	26.93	0	0
B-13	Yalıçiftlik Yakabahçe	Kuyu	N	0	50.30	0	0

4.2.3. Ağır metal analizleri

Doğal sularda majör iyonlar dışında eser miktarlarda bulunan bazı maddeler minör bileşenler olarak adlandırılmaktadırlar. Demir dışında diğer ağır metaller sularda genellikle 1 mg/l'den daha düşük derişimlerde bulunur (Freeze and Cherry, 1979). Doğal sulara evsel ve endüstriyel atık suları ve madencilik faaliyetleri atıklarının aracılığı ile bazen önemli miktarlarda ağır metal katılabilir. Suyun dolaşımı sırasında temasta olduğu litolojik birimlerin mineralojik yapısı da, sulardaki ağır metal içeriğinin kaynaklarından birini oluşturmaktadır. İnceleme alanındaki su noktalarında ağır metal olarak demir (Fe), mangan (Mn), bakır (Cu), çinko (Zn),

krom (Cr), kurşun (Pb), nikel (Ni) ve kadmiyum (Cd) analizleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.4).

Demir (Fe) ve Mangan (Mn)

Demir magmatik, metamorfik ve sedimanter kayaçlardaki birçok mineralde ve toprakta yaygın olarak bulunmaktadır İçme ve kullanma suları standartlarında demir ve mangan 0.05 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997). Demirin su içerisindeki çözünürlüğü ortamın pH ve redoks koşullarına bağlıdır.

Mangan ise genel olarak metamorfik ve magmatik kayaçlarda olivin, piroksen ve amfibol minerallerinde bulunur. Yeraltısularında bulunan Mn miktarı su içerisinde çözülmüş oksijen miktarına bağlı olarak değişmektedir. Mangan çözülmüş oksijene doymuş yeraltısularında çökelirken, oksijensiz ortamlarda demirle birlikte bol miktarda bulunmaktadır.

İnceleme alanındaki sıcak su kaynağında Fe, Eylül döneminde 0.34 ppm ve Nisan döneminde 1.95 ppm, mangan bileşimi ise Eylül döneminde 0.12 ppm ve Nisan döneminde 0.07 ppm olarak ölçülmüştür. Deniz ve soğuk su kuyularında demir ve mangan 0.01-0.55 ppm aralığında değişmektedir (Çizelge 4.4).

Bakır (Cu)

Bakır, yerkabuğundaki kayaçlarda doğal bakır veya bakır içeren sülfür ve karbonat mineralleri halinde bulunur. Bununla birlikte, bakır minerallerinin çözünürlükleri çok düşük olduğundan, sulardaki bakırın çok az bir kısmı doğal kökenlidir (Hem, 1985). Çeşitli sanayi atıklarından gelebilen bakır, içme ve kullanma suları standartlarında 3 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

İnceleme alanındaki sıcak su kaynağında Cu, Eylül döneminde 0.12 ppm ve Nisan döneminde 0.07 ppm olarak ölçülmüştür. Deniz suyunda 0.06 ve 0.14 ppm olarak ölçülmüştür. Soğuk su kuyularında ise 0-0.02 ppm aralığında ölçülmüştür (Çizelge 4.4).

Krom (Cr)

Suların bileşiminde bulunan krom, kayalardan, endüstriyel atıklardan ve tarımdan kaynaklanabilir. Doğal sulardaki derişimi genellikle 0.01 mg/l'nin altındadır. Bununla birlikte suyun temasta olduğu kayacın bileşimine bağılı olarak bu derişim 0.2 mg/l'ye kadar artabilmektedir. Türkiye'de içme suyu standartlarında krom içeriğı için önerilen üst sınır 0.05 mg/l olarak verilmektedir (TSE, 1997).

İnceleme alanındaki sıcak su kaynağında Cr, Eylül 2004'te 0.07 ppm ve Nisan 2005'te 0.04 ppm olarak ölçölmüştür. Deniz suyunda Eylül 2004'te 0.06 ppm ölçölmüştür. Soğuk su kuyularında ise 0-0.04 ppm aralığında ölçölmüştür (Çizelge 4.4).

Kurşun (Pb)

Kayaç oluşturan birçok mineralin asıl yapısında yer alan kurşun, sularda doğal olarak bulunmakta, kayalardan ve insan faaliyetlerinden sağlanmaktadır. Doğal sulardaki kurşun nadir olarak yüksek değerlere ulaşır. İnsan vücudunda birikim yaparak zehirli bir etkiye sahip olan kurşun için TSE, içme suyu standartlarında izin verilebilir üst sınır olarak 0.05 mg/l önermiştir. İnceleme alanındaki sıcak su kaynağında Pb, Eylül 2004'te 1.29 ppm ve Nisan 2005'te 0.38 ppm olarak ölçölmüştür. Deniz suyunda Eylül 2004'te 1.30 ppm ve Nisan 2005'te 0.42 ppm ölçölmüştür. Hasan Hüseyin sondaj kuyusunda 0.05 ppm, Süheyla Enç sondaj kuyusunda 0.11 ppm, Yalıçiftlik keson kuyuda 0.17 ppm ölçölmüş olup diğerk kuyularda varlığı saptanamamıştır (Çizelge 4.4).

Çinko (Zn)

Doğal sularda bulunan çinko genellikle, suyun temasta olduğu kayalardan, topraktan, endüstriyel atıklardan, gübreden ve atmosferden kaynaklanabilir. Çinko, insan için görel olarak zehirli olmayan bir element olup 25 mg/l derişimlere kadar büyük bir etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir (McNeely et al., 1979). İçme ve kullanma suları standartlarında çinko 5 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

İnceleme alanındaki sıcak su kaynağında Zn, Eylül 2004'te 0.08 ppm ve Nisan 2005'te 0.03 ppm olarak ölçölmüştür. Deniz suyunda Eylül 2004'te 0.10 ppm ve

Çizelge 4.4. Çalışma alanından derlenen su örneklerine ait ağır metal analiz sonuçları (E: Eylül 2004, N: Nisan 2005, T: Temmuz 1998).

No	Örnek Adı	Tür	Tarih	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Ni (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)	B (ppm)	SiO ₂ (ppm)
B-1	Kızılağaç keson kuyu	Kuyu	E	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.000	0.000	5.766
B-1	Kızılağaç keson kuyu	Kuyu	N	0.05	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.000	0.000	0.000
B-2	Hasan Hüseyin sondaj kuyusu	Kuyu	E	0.06	0.00	0.00	0.40	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.000	12.103
B-3	Kızılağaç obruk	Kuyu	E	0.55	0.10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.000	0.000	7.476
B-3	Kızılağaç obruk	Kuyu	N	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
B-4	Süheyla Enç sondaj kuyusu	Kuyu	E	0.07	0.02	0.00	0.83	0.00	0.11	0.00	0.00	0.000	0.000	8.08
B-4	Süheyla Enç sondaj kuyusu	Kuyu	N	0.04	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.000	0.000	18.59
B-5	Yalıçiftlik keson kuyu	Kuyu	E	0.25	0.99	0.00	0.01	0.02	0.17	0.10	0.01	0.016	0.000	7.376
B-6	Yenkuyu keson kuyu	Kuyu	E	0.16	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	7.476
B-6	Yenkuyu keson kuyu	Kuyu	N	0.20	0.04	0.02	0.01	0.04	0.00	0.04	0.00	0.000	0.000	1.943
B-7	Osman Çavuş sondaj kuyusu	Kuyu	E	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	5.162
B-8	Karaada kaplıcası	Kaynak	E	0.34	0.12	0.12	0.08	0.07	1.29	0.37	0.07	0.298	2.737	15.01
B-8	Karaada kaplıcası	Kaynak	N	1.95	0.07	0.07	0.03	0.04	0.38	0.34	0.07	0.000	2.598	4.106
B-9	Deniz suyu	Deniz	E	0.22	0.05	0.14	0.10	0.06	1.30	0.36	0.07	0.000	1.90	0.032
B-9	Deniz suyu	Deniz	N	0.22	0.05	0.06	0.02	0.00	0.42	0.26	0.07	0.000	2.249	0.000
B-11	Yalıçiftlik Kocakuyu	Kuyu	N	0.06	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.000	0.000	2.094
B-12	Yalıçiftlik Meydankuyu	Kuyu	N	0.06	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.000	0.000	3.603
B-13	Yalıçiftlik Yakabahçe keson	Kuyu	N	0.08	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	2.497

Nisan 2005'te 0.02 ppm ölçülmüştür. Soğuk su kuyularında ise 0-0.83 ppm aralığında ölçülmüştür (Çizelge 4.4).

Nikel (Ni)

Nikel, magmatik kayalarda bulunan birçok mineralin yapısında bulunmaktadır. TSE (1997) tarafından nikel için herhangi bir sınır değeri verilmemiş olan nikelin doğal sulara, 1 mg/l' ye kadar yükselen derişimleri yanında, genellikle 0.005 ile 0.020 mg/l arasındaki derişimlerde bulunduğu belirlenmiştir (WHO, 1984). İçme ve kullanma suları standartlarında nikel 0.05 mg/l'yi aşmamalıdır (TSE, 1997).

İnceleme alanındaki sıcak su kaynağında Ni, Eylül 2004'te 0.37 ppm ve Nisan 2005'te 0.34 ppm olarak ölçülmüştür. Deniz suyunda Eylül 2004'te 0.36 ppm ve Nisan 2005'te 0.34 ppm ölçülmüştür. Soğuk su kuyularında ise 0-0.10 ppm aralığında ölçülmüştür (Çizelge 4.4).

Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum yerkabuğunda eser miktarda bulunan ve özellikleri çinkoya benzeyen bir elementtir. Doğal suların kadmiyum içerikleri genellikle 0.001 mg/l'den daha azdır. Bununla birlikte bazı sulara 0.01 mg/l'ye kadar ulaşan derişimlerde bulunabilmektedir (McNeely et al., 1979). TSE (1997), içme suyu standartları için kadmiyum derişimi üst sınırını 0.0005 mg/l olarak verilmiştir.

İnceleme alanındaki sıcak su kaynağında ve deniz suyunda Cd, analiz yapılan her iki dönemde de 0.07 ppm olarak ölçülmüştür. Kızılağaç keson kuyu, Kızılağaç obruk ve Yalıçiftlik keson kuyularında Cd varlığı saptanmıştır (Çizelge 4.4). Bu kuyular yüksek miktarda deniz suyu karışımı etkisinde olan kuyulardır. Bu kuyulardaki Cd varlığı olasılıkla bu sulara karışan deniz suyundan kaynaklanmaktadır.

4.3. Deniz Suyu Katkı Oranının Belirlenmesi

İnceleme alanında sahile yakın açılan soğuk su kuyularında yüksek klorür ve sodyum konsantrasyonu bu sulara deniz suyu karışımı olduğunu göstermektedir. Deniz suyu karışım oranı, fiziksel ya da kimyasal açıdan reaktif olmayan klorür iyonu derişimi ve $EI-Cl$ diyagramı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan tüm karışım hesaplamalarında, karışımın korunumlu olduğu varsayılmıştır. Hidrojeokimyasal olarak yeraltısuyu (YAS) ile deniz suyunun karışması sonucu oluşan karışım suyunun hacimsel oranları aşağıdaki kütle korunum eşitliğiyle hesaplanmıştır.

$$C_{YAS} \times V_{YAS} + C_{deniz} \times V_{deniz} = C_{karışım} \times V_{karışım} \quad (4.1)$$

Burada

C_{YAS} ve C_{deniz} :Uç suların derişimi (meq/l)

V_{YAS} ve V_{deniz} :Uç suların hacmi (l)

$C_{karışım}$:Karışım suyunun derişimi (meq/l)

$V_{karışım}$:Karışım suyunun hacmi (l, $V_{YAS} + V_{deniz}$)

4.1.'nolu eşitlik gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$V_{deniz}/V_{karışım} = (C_{karışım} - C_{YAS}) / (C_{deniz} - C_{YAS}) \quad (4.2)$$

İlişkisi elde edilmektedir. 4.2'nolu eşitlik deniz suyu katkı oranlarının hesaplamasında kullanılan Cl^- için düzenlendiğinde aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\text{Deniz suyu Katkısı (\%)} = 100 \times (Cl_{örnek} - Cl_{tatlı su}) / (Cl_{deniz} - Cl_{tatlı su}) \quad (4.3)$$

Hesaplamalarda temsil edici uç elemanlar olarak, tatlı su karışımının mümkün görülmediği ve güncel yağış etkisinin homojenleştiği deniz suyu (B-9) ile sığ dolaşıma sahip yıllık yağışlardan beslenen Yenikuyu (B-6) örneklerinin Cl^- derişimleri kullanılmıştır. İnceleme alanında

- Fay ve kırık hatlarının denize doğru olması,
- Karstik yapıların gelişmiş olması,
- YAS seviyesinin düşük olması,

- Düşük kotlarda yer alan kuyuların gelgit olayından etkilenmesi,
- Yağış suyunda bulunan Cl derişimi,
- Deniz suyu girişimi,

İnceleme alanında yer alan kuyu sularında görülen tuzluluğun başlıca nedenleri arasında gösterilmektedir.

Değerler yerine konulduğunda 4.3'nolu eşitlik aşağıdaki şekli almaktadır;

$$\text{Deniz suyu Katkısı (\%)} = (Cl_{\text{örnek}} - 0.267) / (531.535 - 0.267) \quad (4.4)$$

Burada,

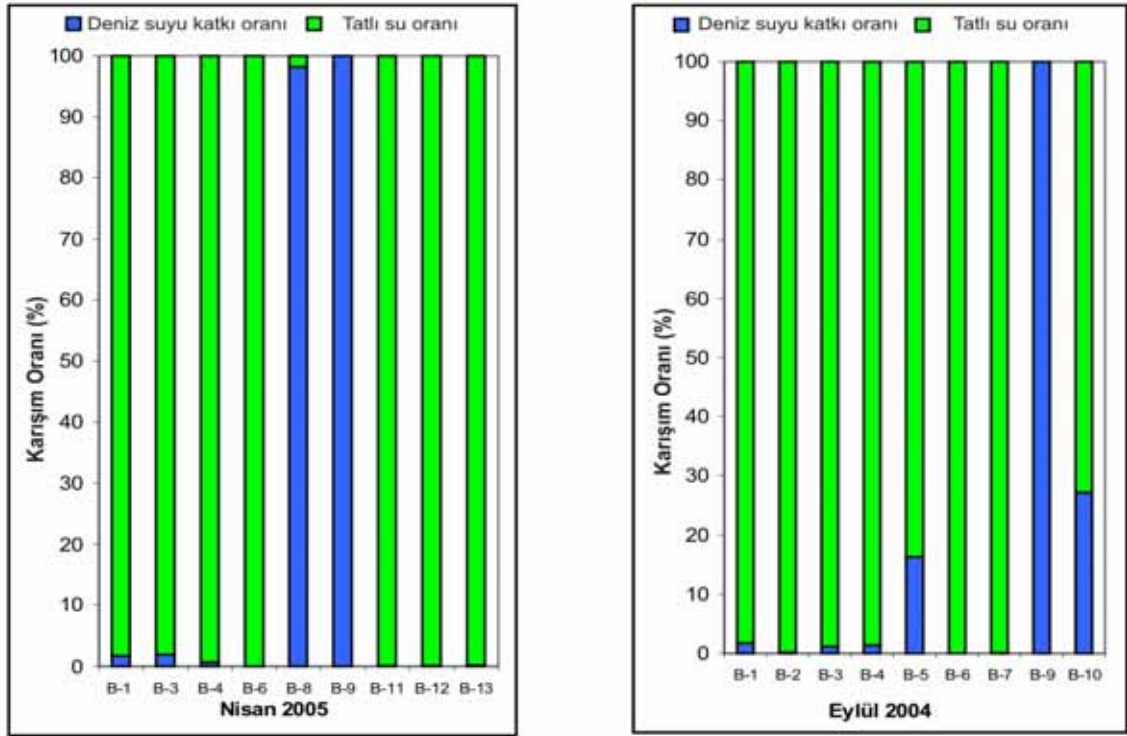
Deniz suyu katkısı: Örnekteki deniz suyu miktarının toplam hacme oranı (%)

$Cl_{\text{örnek}}$: Deniz suyu ile karışmış su örneği (sonuç su)

0.267 : Deniz suyu ile karışmamış tatlı su örneği (YAS, uç eleman)

531.535 : Deniz suyu (uç eleman).

Eşitlik 4.4 ile su örneklerinin Cl içeriklerinden itibaren hesaplanan deniz suyu katkıları Çizelge 4.5'te ve Şekil 4.1'de verilmiştir.



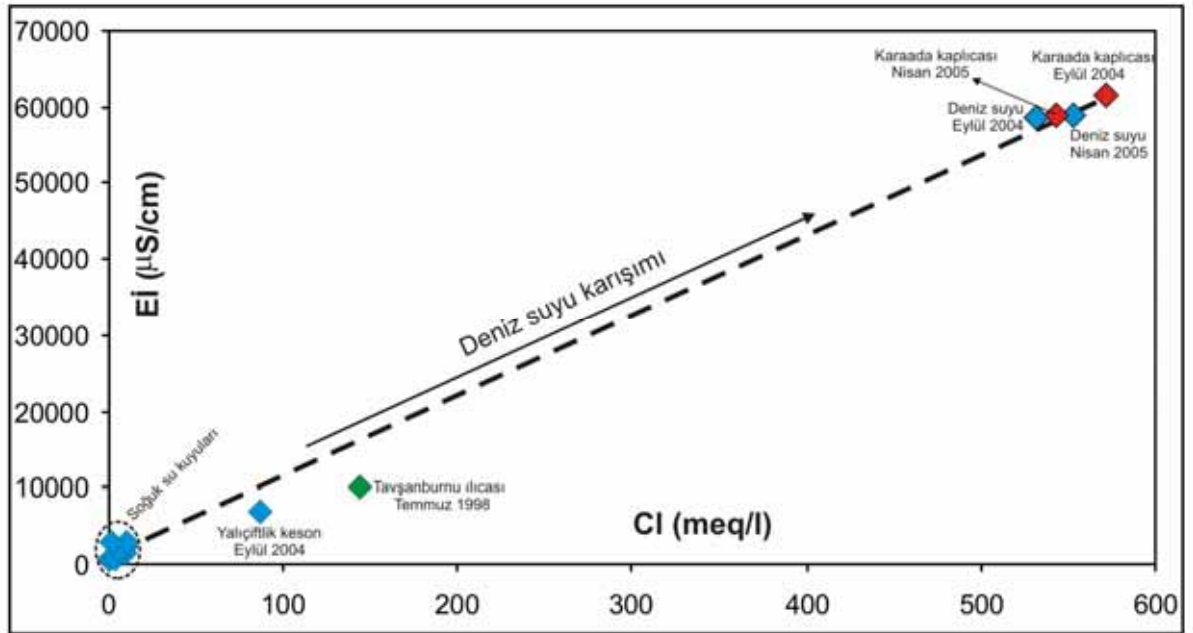
Şekil 4.1. İnceleme alanında yer alan suların tatlı su-tuzlu su oranları

Çizelge 4.5. Çalışma alanındaki su noktalarına olan deniz suyu katkısı

No	Örnek Adı	Tarih	pH	Eİ (µS/cm)	S (°C)	Cl (meq/l)	Deniz suyu katkısı (%)
B-1	Kızılağaç keson	Eylül 2004	7.15	3000	21.3	9.65	1.77
B-1	Kızılağaç keson kuyu	Nisan 2005	7.20	1890	20.3	9.65	1.71
B-2	Hasan Hüseyin sondaj	Eylül 2004	7.30	800	24.8	1.51	0.23
B-3	Kızılağaç obruk	Eylül 2004	8.10	1700	19.5	6.37	1.15
B-3	Kızılağaç obruk	Nisan 2005	7.38	1860	16.53	10.72	1.90
B-4	Süheyla Enç sondaj	Eylül 2004	7.10	1500	20.1	7.60	1.38
B-4	Süheyla Enç sondaj	Nisan 2005	9.75	817	18.1	3.90	0.65
B-5	Yalıçiftlik keson	Eylül 2004	8.00	6700	21.9	86.66	16.26
B-6	Yenkuyu keson	Eylül 2004	7.20	400	18.5	0.27	0.00
B-6	Yenkuyu keson	Nisan 2005	7.23	427	15.05	0.20	0.00
B-7	Osman Çavuş sondaj	Eylül 2004	6.90	700	20.10	0.95	0.13
B-8	Karaada kaplıcası	Nisan 2005	6.42	58800	30.60	542.35	98.16
B-9	Deniz suyu	Eylül 2004	8.20	58600	23.30	531.54	100.00
B-9	Deniz suyu	Nisan 2005	8.31	58800	17.60	552.53	100.00
B-10	Tavşanburnu ılıcası	Temmuz 1998	7.90	10000	22.00	144.54	27.16
B-11	Yalıçiftlik Kocakuyu	Nisan 2005	7.50	670	15.73	0.63	0.08
B-12	Yalıçiftlik Meydankuyu	Nisan 2005	7.15	3000	21.30	0.91	0.13
B-13	Yalıçiftlik Yakabahçe keson	Nisan 2005	7.03	686	18.40	1.21	0.18

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında ve sahile yakın kuyularda yüksek EI değerleri ölçülmüştür. İnceleme alanında açılan kuyuların hepsinden örnek almak mümkün olmadığından girişim sınırı belirlenememiştir. İnceleme alanında yer alan su örnekleri $EI-Cl^-$ grafiğinde karışım doğrusu üzerinde yer almaktadırlar (Şekil 4.2).

İnceleme alanında son yıllarda nüfus ve turizmdeki artış içme ve kullanma suyu ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Bölgede çok sayıda açılan sığ ve derin kuyuların kontrolsüz işletilmesi bölgedeki hidrodinamik yapının bozulmasına neden olmaktadır. Kızılağaç keson, Kızılağaç obruk, Süheyla Enç sondaj ve Yalıçiftlik keson kuyularında deniz suyu karışımı belirlenmiştir. Diğer kuyulardaki Cl derişimi, kuyuların beslenme alanına düşen dönemsel yağışların Cl^- derişimi olup, akiferde karışım oranlarına bağlı olarak değişik derişimler sunmaktadır.



Şekil 4.2: İnceleme alanındaki suların Cl^-EI grafiği

4.4. Su Kaynaklarının Sınıflandırılması

İnceleme alanında derlenen su örneklerinin analiz sonuçları Piper (üçgen), Schoeller, ABD Tuzluluk Laboratuvarı ve Wilcox diyagramlarında değerlendirilmiştir.

4.4.1. Piper diyagramı

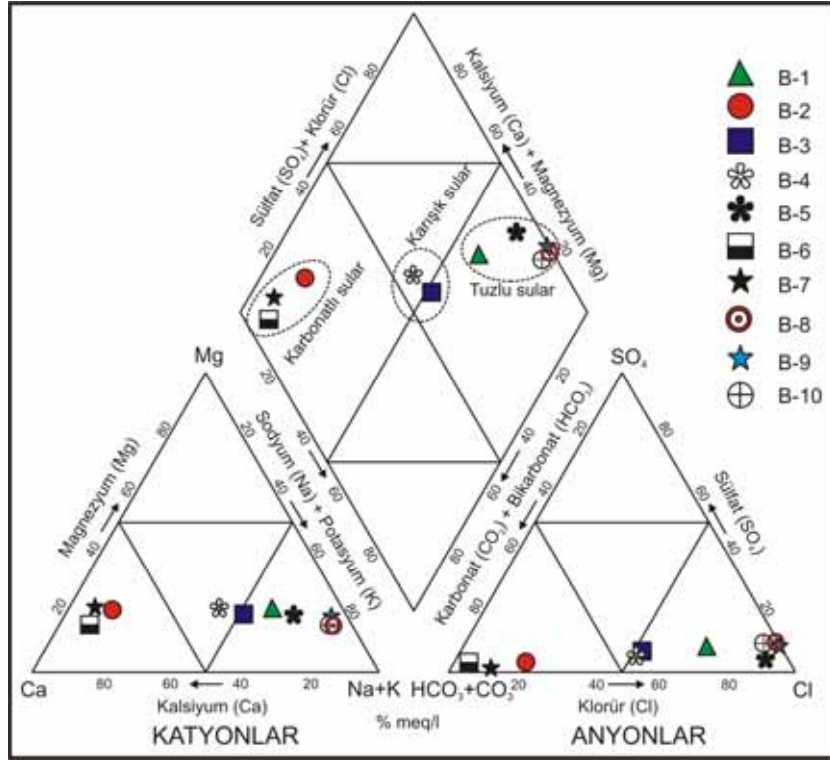
Soğuk ve sıcak su kaynaklarının litoloji ile ilişkileri ve dolaşım sistemleri boyunca meydana gelen hidrojeokimyasal süreçlerin belirlenmesi amacıyla Piper diyagramları çizilmiştir (Şekil 4.3.a,b).

Piper diyagramında görüldüğü gibi bütün örnekler tatlı sudan deniz suyuna geçiş zonunda yer almaktadır. Bu durumda geçiş zonu boyunca örnekleri üç gruba ayırmak mümkündür.

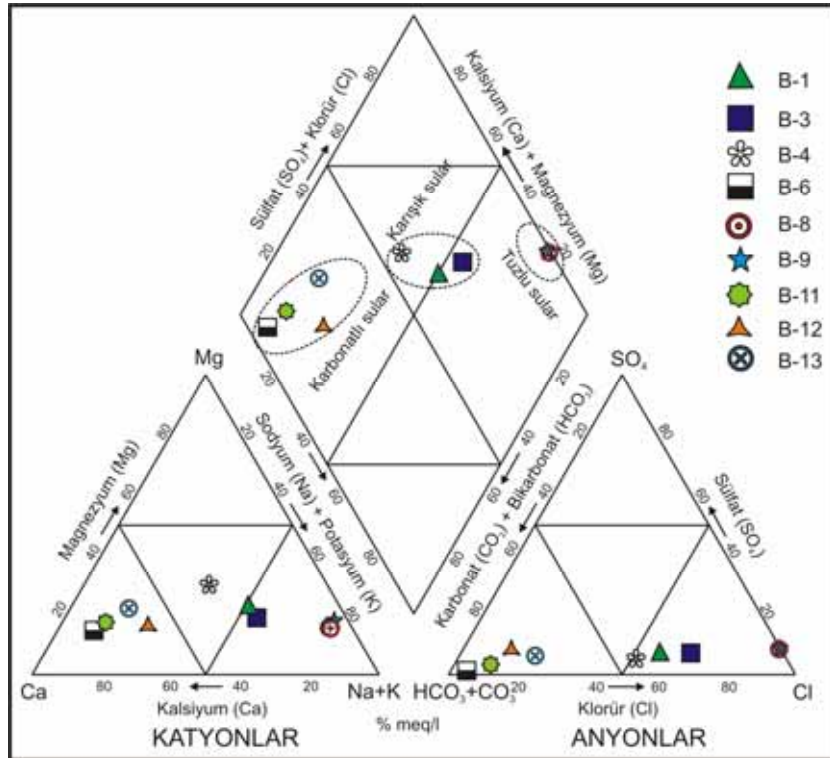
Birinci grupta $\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3$ tipi karbonatlı sular olan Hasan Hüseyin sondaj (B-2), Yenikuyu keson (B-6), Osman Çavuş sondaj (B-7), Yalıçiftlik Kocakuyu (B-11), Yalıçiftlik Meydankuyu (B-12) ve Yalıçiftlik Yakabahçe keson (B-13) kuyuları yer almaktadır. Bu suların iyon karakteristikleri, $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$ ve $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ şeklindedir. Bölgedeki sığ dolaşımlı yeraltısuyu sistemini temsil eden bu soğuk suların aynı bölgede kümelenmeleri beslenme alanlarının aynı olduğunu göstermektedir. Bu sular aynı zamanda deniz suyu karışmamış, uç elemandırlar.

İkinci grupta ise tuzlu suya geçiş zonunda bulunan veya tuzlu su ile karıştığı düşünülen Kızılağaç obruk kuyusu (B-3) ve Süheyla Enç sondaj kuyusu (B-4) yer almaktadır. Bu sular deniz suyu ile karışarak oluşan sular olup iyon karakteristikleri, $\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$ ve $\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$ şeklindedir. Bu sulardaki hakim iyonların Na ve Cl olması bu sulara deniz suyu karışımını açıkça göstermektedir.

Son grupta ise ileri derecede tuzlanmış ve sahile yakın mesafede açılan Kızılağaç keson (B-1), Yalıçiftlik keson (B-5), Karaada kaplıcası (B-8), Tavşanburnu Ilıcası (B-10) ve deniz suyu (B-9) yer almaktadır. Bu sular Na-Cl tipi sular olup iyon karakteristikleri, Kızılağaç keson ve Yalıçiftlik keson kuyularında $\text{Na} + \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca}$ $\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$, Karaada kaplıcası, Tavşanburnu Ilıcası ve deniz suyunda ise $\text{Na} + \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca}$ ve $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ şeklindedir. Hem sığ dolaşımlı yeraltısuyu



Şekil 4.3.a. İnceleme alanındaki su örneklerine ait Piper diyagramı (Eylül 2004).



Şekil 4.3.b. İnceleme alanındaki su örneklerine ait Piper diyagramı (Nisan 2005).

sisteminden hem de denizden beslenen bu soğuk sular ileri derecede tuzlanmış sular grubunda yer almaktadırlar. Karaada kaplıcasının deniz suyuyla aynı noktada yer alması sıcak ve mineralli su kaynağının rezervuar kayaçlarının deniz suyuyla beslendiğini göstermektedir.

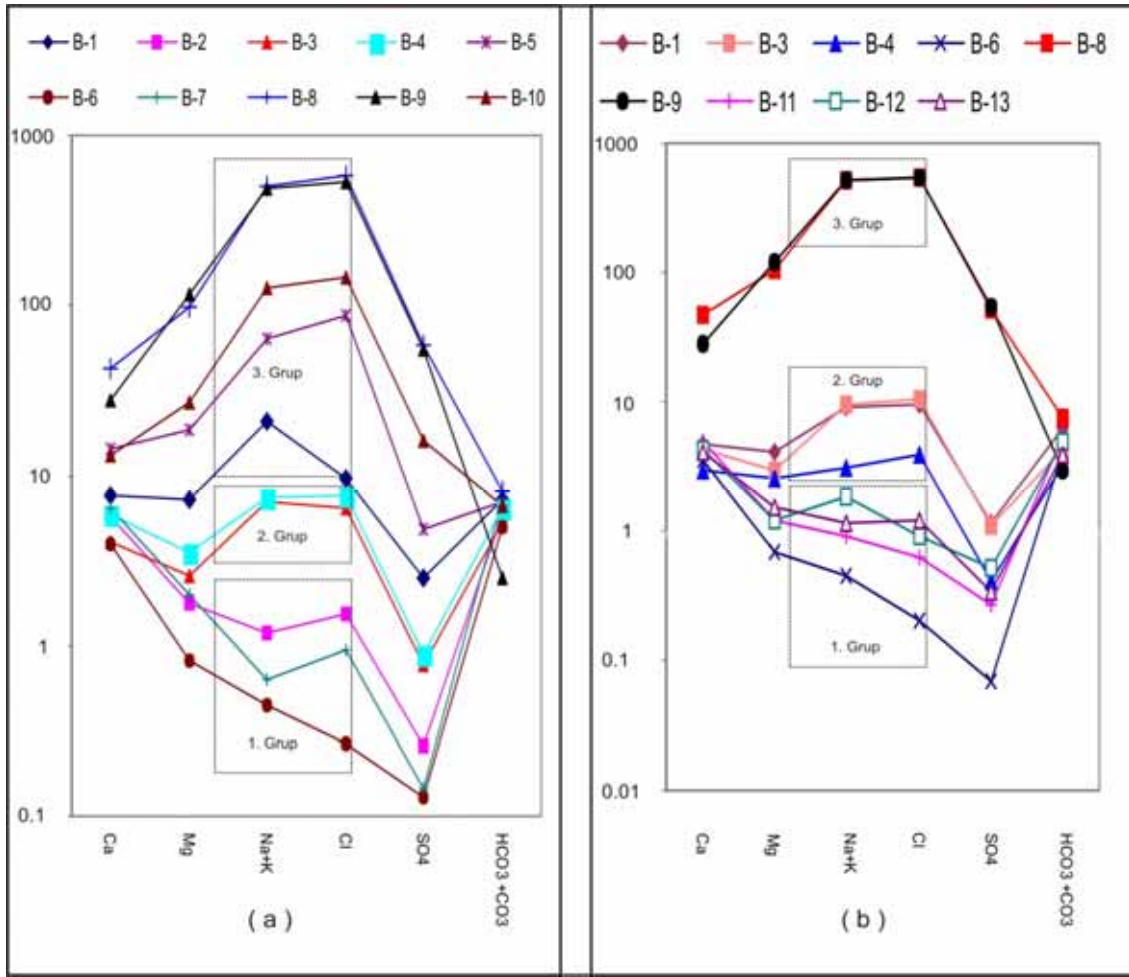
4.4.2. Schoeller diyagramı

İnceleme alanından alınan kuyu, kaynak ve deniz suları yarı logaritmik Schoeller diyagramında karşılaştırılmıştır (Şekil 4.4.a,b). Bu diyagram gerek iyonların topluca tek bir diyagramda görme, gerekse benzer ve farklı kökenli suların karşılaştırılması kolaylığı açısından oldukça sık kullanılmaktadır. Schoeller diyagramlarında aynı kökenli, aynı akifer ve beslenme alanına sahip suların iyon dağılımlarının paralellik göstermesi beklenmektedir.

Schoeller diyagramında yer alan su örneklerini, Piper diyagramındaki gibi üç ana gruba ayırmak mümkündür.

İlk grupta, Schoeller diyagramının alt bölümünde yer alan Hasan Hüseyin sondaj (B-2), Yenkuyu keson (B-6), Osman Çavuş sondaj (B-7), Yalıçiftlik Kocakuyu (B-11), Yalıçiftlik Meydankuyu (B-12) ve Yalıçiftlik Yakabahçe keson (B-13) kuyuları bulunmaktadır. Diyagramda Yenkuyu keson kuyusunun bu grup içinde en düşük iyon derişimine sahip olması nedeniyle en sığ dolaşimli, Osman Çavuş sondaj kuyusunun en yüksek iyon derişimine sahip olması nedeniyle en derin dolaşimli yeraltısuyu sisteminden beslendiği söylenebilir. Kuyu sularında hakim iyonların Ca ve HCO_3 olması, bu kuyuların beslenme alanında bulunan kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçtaşı ile temasta olduğu, akiferlerinin bu kayaçlardan oluştuğunu göstermektedir.

İkinci grupta Schoeller diyagramının orta bölümünde bulunan Kızılağaç keson (B-1), Kızılağaç obruk (B-3) ve Süheyla Enç sondaj kuyuları (B-4) yer almaktadır. Bu sulardaki hakim iyonların Ca, HCO_3 , Na ve Cl olması, sığ dolaşimli yeraltısuyundan beslenen bu kuyulara deniz suyundan karışımın olduğunu ve bu kuyuların geçiş zonu içinde yer aldıklarını göstermektedir.



Şekil 4.4.a,b. İnceleme alanındaki suların Schoeller diyagramları (a: Eylül 2004, b: Nisan 2005)

Son grupta ise Schoeller diyagramının üst kısımlarında bulunan Yalıçiftlik keson (B-5) kuyusu, Karaada kaplıcası (B-8), Tavşanburnu Ilıcası (B-10) ve deniz suyu (B-9) yer almaktadır. Bunları kendi aralarında iki gruba ayırmak mümkündür. Birinci grupta, Yalıçiftlik keson kuyusu ile Tavşanburnu Ilıcası yer almaktadır. Bu örnekler aynı kökene sahip olmalarına karşın akifer içinde dolaşım sürelerine ve deniz suyu karışım oranlarına göre iyon derişimleri değişmektedir. İkinci grupta ise rezervuar beslenimi deniz suyu ile olan Karaada kaplıcası ve deniz suyu bulunmaktadır. Kızılağaç keson kuyusunun dönemsel olarak farklı gruplarda yer alması, bu kuyunun kurak dönemlerde aşırı işletilmesi sonucu kuyuya deniz suyu karışımının artmasıyla, yağışlı dönemlerde ise taze su ile beslenerek tekrar seyrelmesiyle açıklanabilir. İnceleme alanındaki sularda sülfat derişimleri olasılıkla sülfat indirgenmesinden kaynaklanan bir azalma göstermektedirler.

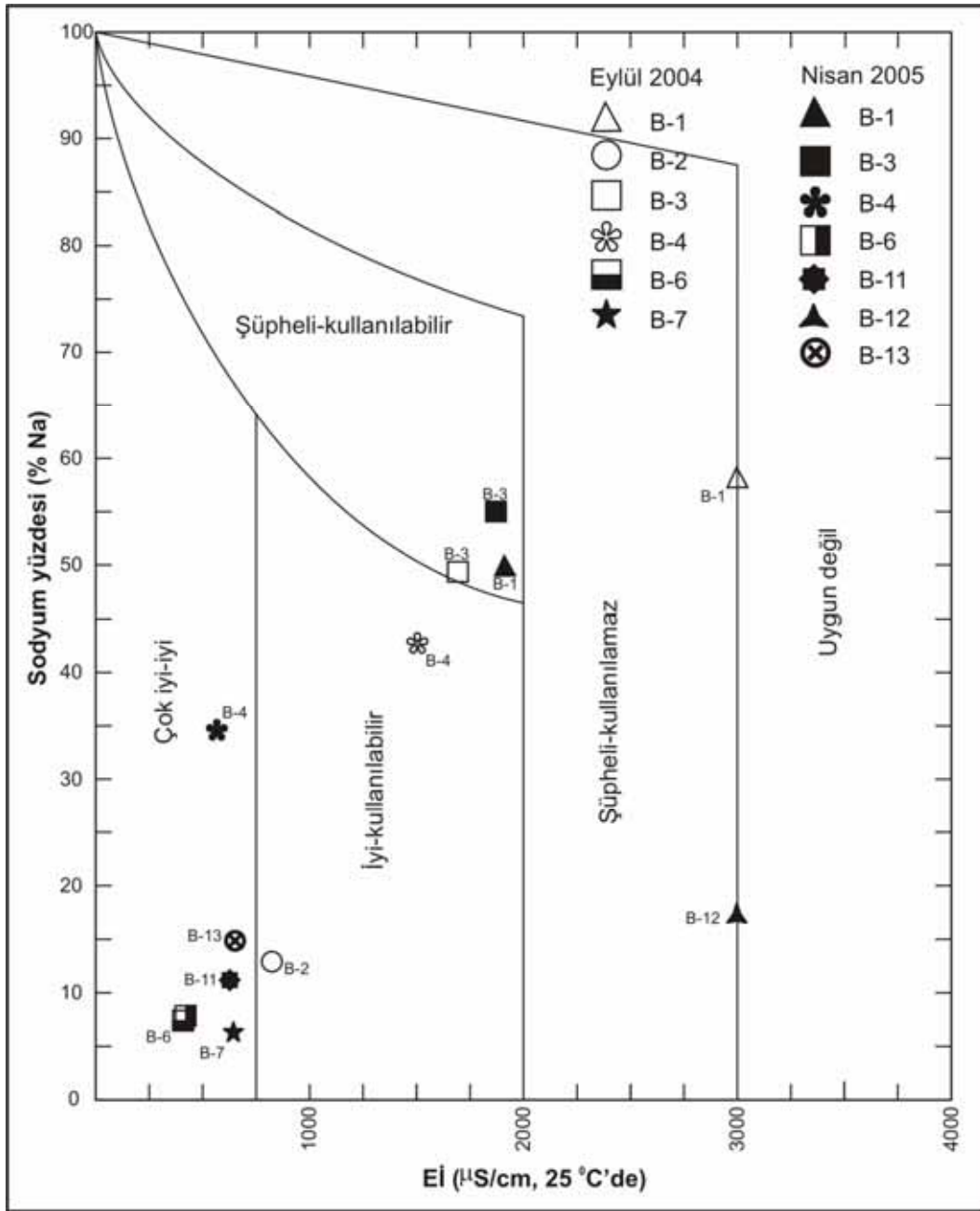
4.4.3. Wilcox diyagramı

İnceleme alanında yer alan kuyu sularının sulama suyu amaçlı kullanımının uygun olup olmadığını belirlemek için bu suların Wilcox diyagramında değerlendirmeleri yapılmıştır (Şekil 4.5). Wilcox diyagramında; sodyum yüzdesi (%Na) ve EI ($\mu\text{S}/\text{cm}$) değerleri suların sulama suyu olarak kullanımı için “çok iyi-iyi”, “iyi kullanılabilir”, “şüpheli kullanılabilir”, “şüpheli” kullanılamaz” ve “uygun değil” bölümlerini kapsamaktadır. Sodyum yüzdesi; suyun toplam major katyonları içinde %Na değerini ifade eder. İyon derişimleri meq/l olmak üzere;

$$\% \text{ Na} = 100 \times \text{Na} / (\text{Na} + \text{K} + \text{Ca} + \text{Mg}) \quad (4.5)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir.

İnceleme alanındaki sular Wilcox diyagramı üzerinde değerlendirildiğinde; Yenikuyu keson, Osman Çavuş sondaj, Yalıçiftlik Kocakuyu ve Yalıçiftlik Yakabahçe keson kuyuları “çok iyi-iyi”, Hasan Hüseyin sondaj ile Süheyla Enç sondaj kuyuları “iyi kullanılabilir”, Kızılağaç obruk “şüpheli kullanılabilir”, Kızılağaç keson ile Yalıçiftlik Meydan kuyuları ise “şüpheli kullanılamaz” bölümde yer almaktadırlar. Kızılağaç keson ile Süheyla Enç sondaj kuyuları dönemsel olarak yer değiştirmeleri bölgedeki yeraltısularının yağışlarla seyreltiğini göstermektedir. İnceleme alanında bulunan ancak EI’leri 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ’den büyük olan sular bu diyagram üzerinde yer almamakla birlikte sulama suyu amaçlı kullanımları uygun değildir.



Şekil 4.5. İnceleme alanındaki suların Wilcox diyagramı

4.4.4. ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı

ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı üzerinde, sodyum (alkali) tehlikesi ve tuzluluk tehlikesinin belirlenmesi amacıyla Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) ve Eİ değerleri işaretlenmiştir (Şekil 4.6).

SAR; Sodyum iyonunun iyon takası (ion exchange) reaksiyonlarındaki aktifliğinin ifadesi olup, sodiklik tehlikesi yönünden suların sınıflamasında kullanılan genel bir ölçüdür. Bikarbonat ve karbonat değerleri nispeten düşük olan suların

değerlendirilmesi için SAR kullanılan bir kriterdir. İyon derişimleri meq/l olmak üzere;

$$SAR = Na / [(Ca + Mg) / 2]^{1/2} \quad (4.6)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir.

SAR kavramı sodyumu tek başına değil, Ca ve Mg ile karşılıklı etkileşimi ve katyon takas reaksiyonlarındaki aktifliğini dikkate aldığı için % Na'a göre daha hassastır. Ca ve Mg suda sodyum tehlikesini azaltıcı etki gösterir (Doğan 1981).

ABD laboratuvarı diyagramında geçen tuzluluk ve sodyum sınıflarının anlamları şu şekildedir;

C1: Az tuzlu suları göstermektedir. Eİ değeri 0-250 µS/cm arasındadır. Çoğu toprakta her türlü bitkinin sulanmasında kullanılabilir.

C2: Orta derecede tuzlu suları göstermektedir. Eİ değeri 250–750 µS/cm arasındadır. Orta derecede bir yıkama varsa, tuzluluk kontrolüne gerek kalkmaksızın, tuza orta derecede dayanıklı bütün bitkilerin sulamasında kullanılabilir.

C3: Yüksek tuzlu, Eİ değeri 750-2250 µS/cm arasında olan suları göstermektedir. Drenaj durumu iyi olmayan topraklarda ve tuza hassas bitkiler için kullanılmamalıdır. Tuza dayanıklı bitkiler seçilerek ve tuz kontrolü yapılarak kullanılabilir.

C4: Çok yüksek tuzlu, Eİ değeri 2250–5000 µS/cm arasında olan suları ifade etmektedir. Normal şartlarda sulamaya uygun değildir. Yüksek permeabilite, çok iyi drenaj, tam yıkamayı sağlayacak kadar bol sulama ve tuzluluğa çok dayanıklı bitki seçimi gibi özel hallerde kullanılabilir.

S1: Az sodyumlu suyu göstermektedir. Bu sınıftaki bir su, sodyum tehlikesi yaratmaksızın kullanılabilir.

S2: Orta sodyumlu suyu temsil eder. Fazlaca değişebilir sodyum var demektir. İnce yapılı topraklarda özellikle jips yönünden fakir topraklarda önemli bir sodyum tehlikesi gösterebilir.

S3: Yüksek sodyumlu suları gösterir. Birçok toprakta sodyum tehlikesi yaratır ve sodikleşmeye yol açar. Bol jipsli topraklarda, çok iyi yıkama ve suya organik maddeler katmak üzere kullanılırsa sodyum tehlikesi önlenabilir.

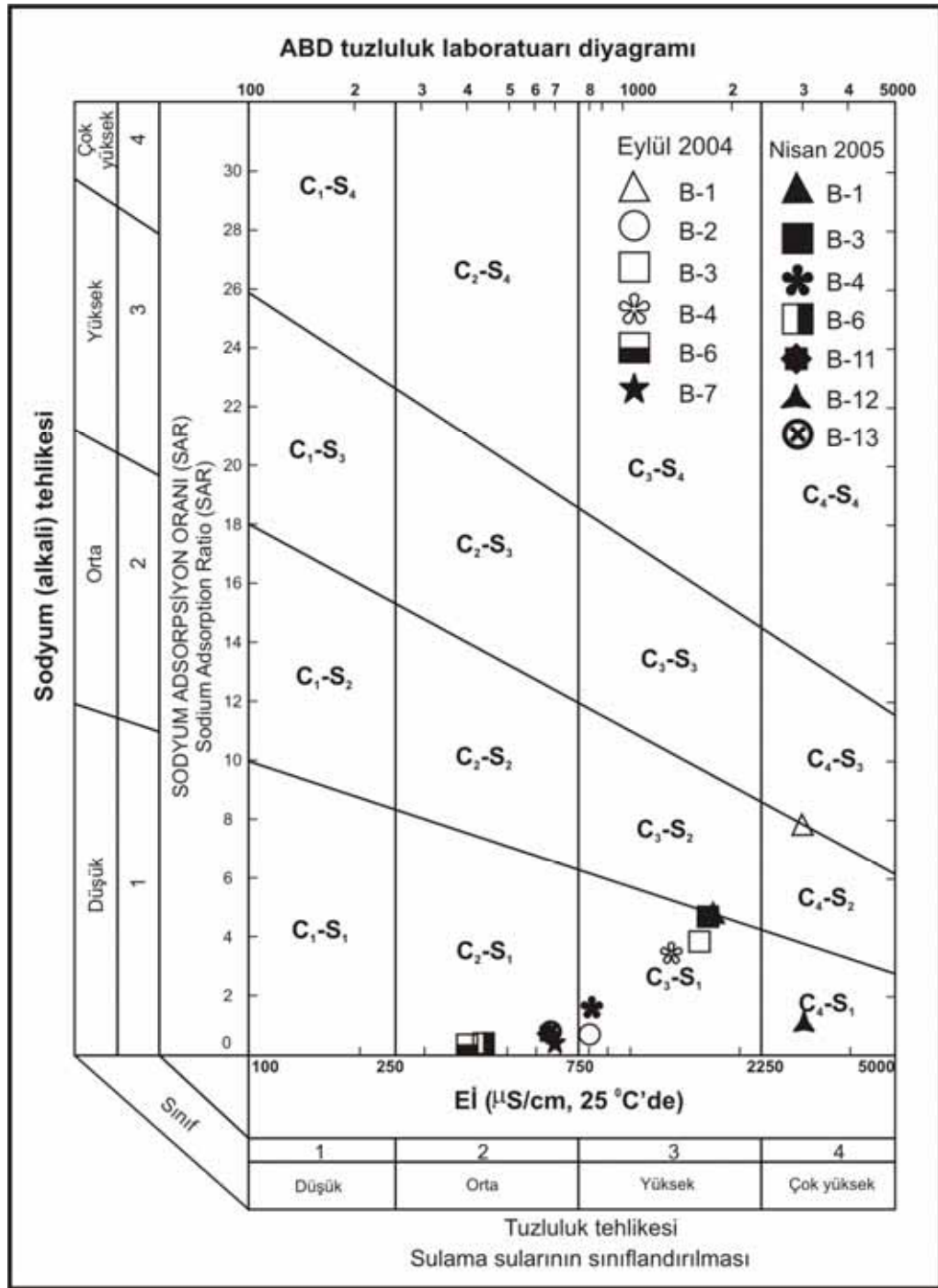
S4: Çok yüksek sodyumlu suları ifade eder. Sulama amaçlarına uygun değildir. Ancak tuzluluğun orta ve düşük olması, jipsle birlikte kullanılarak suda kimyasal değişiklikler yapılması gibi çok özel bazı hallerde kullanılabilir (Doğan, 1981).

Bodrum-Karaada jeotermal alanında bulunan kaynak ve kuyu sularının diyagram üzerinde değerlendirildiğinde; Yenikuyu keson, Osman Çavuş sondaj, Yalıçiftlik Kocakuyu ve Yalıçiftlik Yakabahçe keson kuyuları C2-S1 (orta derecede tuzlu az sodyumlu sular) grubunda, Kızılağaç obruk, Hasan Hüseyin sondaj ve Süheyla Enç sondaj kuyusu C3-S1 (Yüksek tuzlu az sodyumlu sular) grubunda yer almaktadırlar. Kızılağaç keson kuyusu C4-S2 (Çok yüksek tuzlu orta sodyumlu sular) ve Yalıçiftlik Meydankuyusu C4-S1 (Çok yüksek tuzlu, yüksek sodyumlu sular) grubunda yer almaktadır. İnceleme alanında bulunan ancak Eİ'leri 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'den büyük olan sular bu diyagram üzerinde yer almamaktadırlar. Bu diyagramda yüksek Eİ ve alkaliniteye sahip kuyu sularını temsil eden kuyular sahile yakın açılmış ve aşırı derecede işletilen kuyulardır ve deniz suyu karışımı etkisindedirler.

4.5. Suların Mineral Doygunlukları

Yeraltısularında oluşan kimyasal tepkimeler, hidrokimyasal ortam hakkında yorum yapabilme olanağı sağlamaktadır. Bu amaçla inceleme alanındaki suların çeşitli minerallere göre doygunluk durumları incelenmiştir. Karstik birimlerle çevrili olan sıcak su ve kuyuların beslenme havzası, yeraltısularında doğal olarak bulunan kalsit, dolomit gibi karbonat mineralleri, sülfat ve jips gibi kayaç minerallerinin doygunluk değerleri araştırılmıştır.

Doygunluk indisi (Saturation Index, SI), İyonik aktivite çarpımı (IAP) ile denge sabitinin (K) $\log (IAP/K)$ şeklinde de gösterilen logaritmik bir kavramdır.



Şekil 4.6: İnceleme alanındaki suların ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı

Her mineral için özellikle sıcaklıkla ve kısmen de basınçla değişen değerler içermektedir. Termodinamik yöntemlerle hesaplanan mineral doygunluk indisi sonuçları aşağıdaki gibi yorumlanmaktadır.

SI ($\log IAP/K$)=0 ise su ilgili mineral dengededir.

SI ($\log IAP/K$)>0 ise su ilgili minerallerle aşırı doygunudur (mineral çöktürücü özelliktedir).

SI ($\log IAP/K$)<0 ise su ilgili minerallerle doymun değildir (mineral çözücü özelliktedir)

İnceleme alanında yer alan suların mineral doymunluk indisleri hesaplamasında Phreeqc Interactive 2.8 (Parkhurst ve Appelo, 1999) adlı bilgisayar programı kullanılmıştır. Hesaplamalarda arazide ölçülen pH ve sıcaklık değerleri ile kimyasal analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Bilgisayar programında elde edilen SI sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

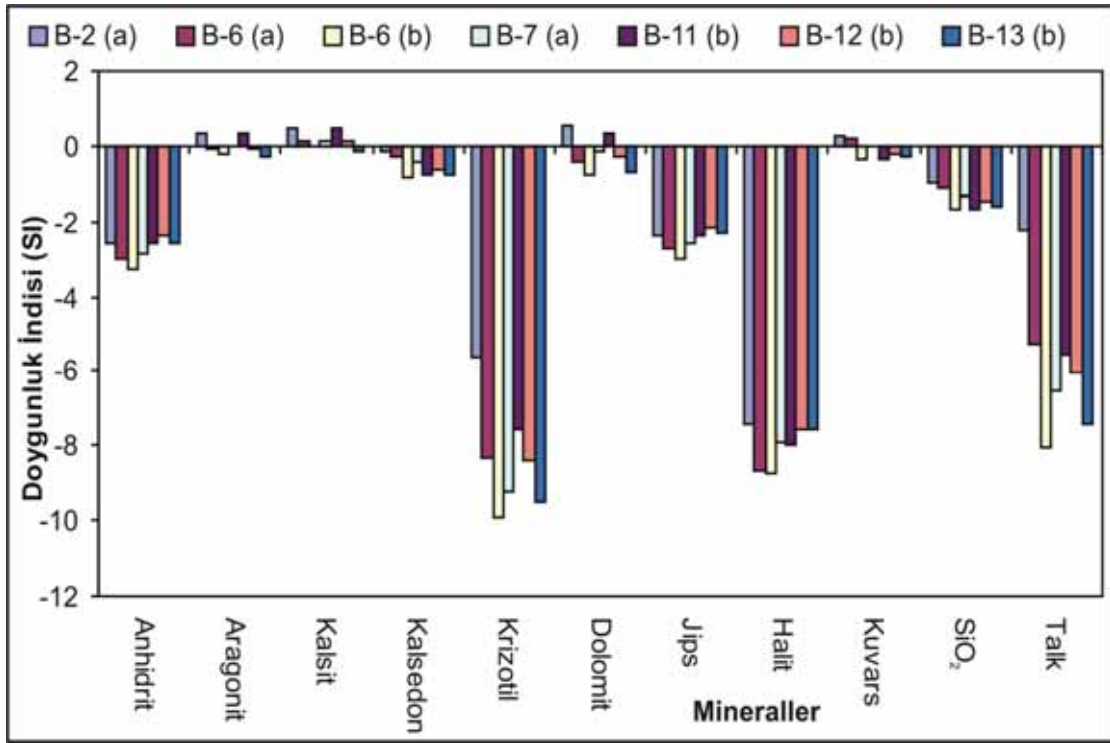
Doymunluk indisinin şekiller üzerinde daha net gözükmesi için inceleme alanındaki sular tuzluluk değerlerine göre, tuzlanmamış kuyu suları (Hasan Hüseyin Sondaj, Yenikuyu, Osman Çavuş Sondaj, Kocakuyu, Meydankuyu ve Yakabahçe keson kuyuları), tuzlanmış kuyu suları (Kızılağaç keson, Kızılağaç obruk, Süheyla Enç sondaj ve Yalıçiftlik keson kuyuları) ile Karaada kaplıcası, Tavşanburnu ılıcası ve deniz suyu olmak üzere üç ayrı grupta gösterilmiştir (Şekil 4.7.a,b,c).

Tuzlanmamış kuyu suları kireçtaşı veya dolomitik kireçtaşı birimlerinden gelen sularla beslendikleri için dönemsel olarak kalsit ve dolomite doymun olmaktadır. Bu grup içinde Hasan Hüseyin sondaj kuyusu en yüksek kalsit ve dolomit SI değerine sahiptir. Bu değer bu kuyuda su-kayaç etkileşim süresinin daha uzun olduğunu göstermektedir. Tuzlanmış kuyu sularının hepsi aragonit, dolomit, kalsit ve kuvarsa doymun olduğu görülmektedir.

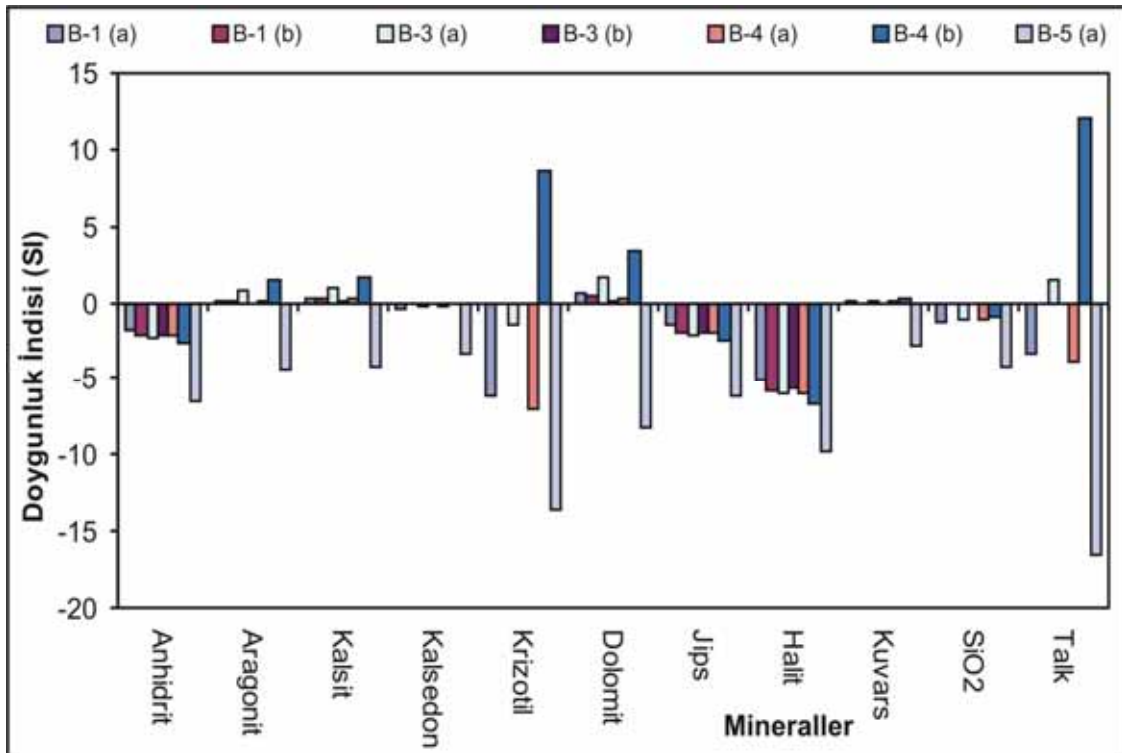
Kuyu sularının kalsit, aragonit ve dolomite doymun olmalarının nedeni; bu suların beslenme alanını ve akifer litolojisini oluşturan ana formasyonun dolomit ve dolomitik kireçtaşlarının olmasıdır. Kırık, çatlak ve karstik boşluklardan dolaşan su, bu mineralleri çözerek aşırı doymunluğa ulaşmaktadır.

Çizelge 4.6. Çalışma alanındaki su noktalarının SI değerleri (a: Eylül 2004, b: Nisan 2005).

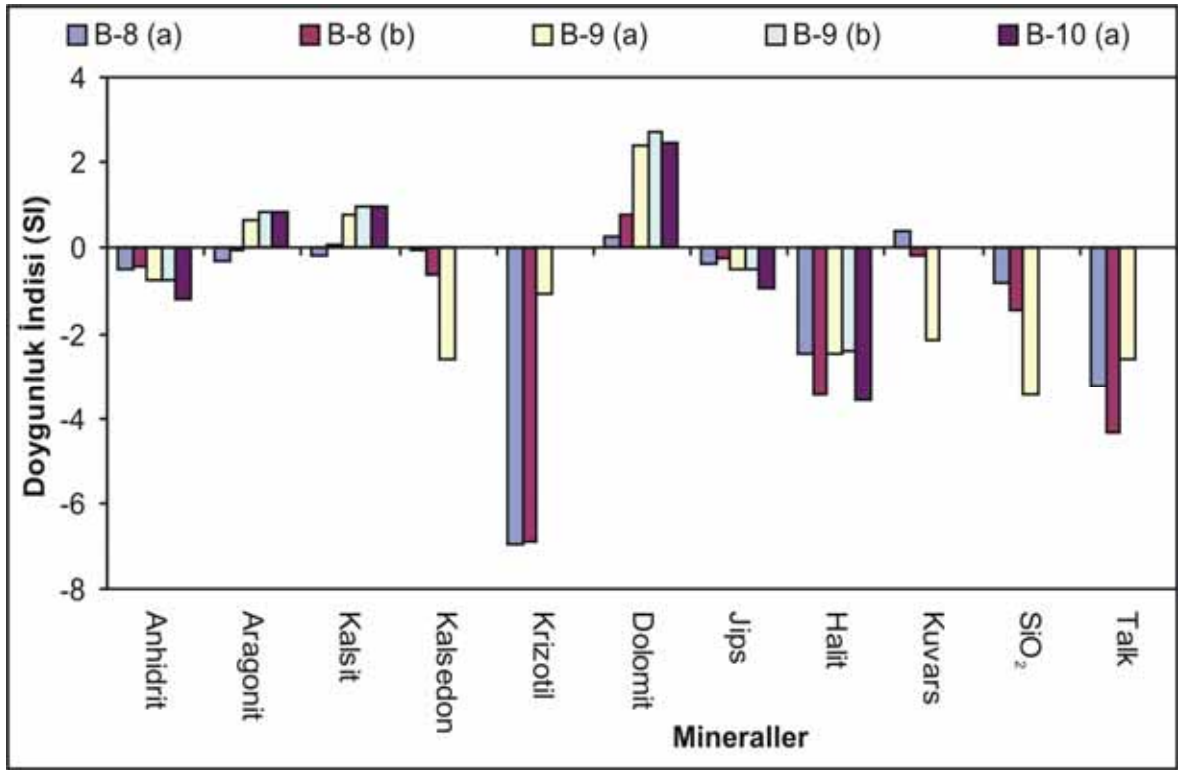
Mineraller	B-1 (a)	B-1 (b)	B-2 (a)	B-3 (a)	B-3 (b)	B-4 (a)	B-4 (b)	B-5 (a)	B-6 (a)	B-6 (b)	B-7 (a)	B-8 (a)	B-8 (b)	B-9 (a)	B-9 (b)	B-10 (a)	B-11 (b)	B-12 (b)	B-13 (b)
Anhidrit	-1.8	-2.2	-2.6	-2.3	-2.2	-2.2	-2.7	-6.5	-3.0	-3.3	-2.8	-0.5	-0.4	-0.7	-0.7	-1.2	-2.6	-2.4	-2.6
Aragonit	0.2	0.0	0.3	0.8	0.0	0.0	1.6	-4.4	-0.1	-0.2	0.0	-0.3	0.0	0.7	0.8	0.9	0.3	-0.1	-0.3
Kalsit	0.3	0.2	0.5	0.9	0.1	0.2	1.7	-4.2	0.1	0.0	0.2	-0.2	0.1	0.8	1.0	1.0	0.5	0.1	-0.2
Kalsedon	-0.4	0.0	-0.1	-0.3	0.0	-0.3	-0.1	-3.3	-0.3	-0.8	-0.5	0.0	-0.6	-2.6	0.0	0.0	-0.8	-0.6	-0.8
Krizotil	-6.1	0.0	-5.6	-1.5	0.0	-7.0	8.6	-13.6	-8.3	-10	-9.2	-7.0	-6.9	-1.1	0.0	0.0	-7.5	-8.4	-9.5
Dolomit	0.7	0.4	0.5	1.7	0.1	0.2	3.5	-8.3	-0.4	-0.8	-0.2	0.3	0.8	2.4	2.7	2.4	0.4	-0.3	-0.7
Jips	-1.5	-1.9	-2.4	-2.1	-1.9	-1.9	-2.5	-6.2	-2.7	-3.0	-2.6	-0.4	-0.3	-0.5	-0.5	-0.9	-2.4	-2.2	-2.3
Halit	-5.1	-5.8	-7.5	-6.1	-5.7	-6.0	-6.6	-9.9	-8.7	-8.8	-7.9	-2.5	-3.5	-2.5	-2.4	-3.6	-8.0	-7.6	-7.6
Kuvars	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.2	0.3	-2.9	0.2	-0.4	0.0	0.4	-0.2	-2.2	0.0	0.0	-0.3	-0.2	-0.3
SiO ₂	-1.3	0.0	-1.0	-1.2	0.0	-1.1	-1.0	-4.2	-1.1	-1.7	-1.3	-0.8	-1.4	-3.5	0.0	0.0	-1.7	-1.5	-1.6
Talk	-3.3	0.0	-2.2	1.5	0.0	-3.9	12.0	-16.6	-5.3	-8.0	-6.5	-3.2	-4.3	-2.6	0.0	0.0	-5.6	-6.0	-7.4



Şekil 4.7.a. İnceleme alanındaki tatlı suların SI diyagramı



Şekil 4.7.b. İnceleme alanındaki tuzlu suların SI diyagramı



Şekil 4.7.c. İnceleme alanındaki sıcak sular ve deniz suyunun SI diyagramı

Karaada sıcak su kaynağı kalsit ve dolomit için dönemsel olarak farklı doygunluk indisi değerleri sunmaktadır. Yağışlarla bölgeye düşen suların su-kayaç etkileşimi ve ıslısının artması sonucu bu mineralleri çözmekte ve bu minerallerce doygunluk göstermektedir. Deniz suyu ise dönemsel olarak denize boşalan suların denize ulaşınca kadar etkileşimde bulundukları birimlerden çözdükleri minerallerin, buharlaşma ve deniz suyu sıcaklık değişimlerinden dolayı doygunluk indisleri dönemsel olarak farklılık göstermektedir. Rezervuar kayaçları deniz suyu tarafından beslenen kimyasal olarak deniz suyuyla benzerlik gösteren Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı sıcaklığa bağlı olarak daha agresif (çözücü) davranmaktadır. Sıcaklığın artması termal kaynağın daha fazla mineral çözmesine neden olmaktadır.

4.6. Jeotermometre Uygulamaları

Jeotermal sular yeraltında izledikleri yol boyunca yüzeye erişirken temas ettikleri kayalarla ısı alışverişi ve soğuk yeraltısuyunun karışması sonucu soğur ve rezervuar içindeki sıcaklık değerlerinden daha düşük sıcaklık değerlerine sahip olurlar. Rezervuardaki akışkan sıcaklığının tahmin edilmesi amacıyla jeotermometre yöntemleri geliştirilmiştir. Jeotermometreler; kimyasal ve izotop jeotermometreleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Kimyasal jeotermometreler kaynak veya kuyu başından alınan örneklerin kimyasal bileşimine (özellikle silis, katyon derişimi ve buhar içerisindeki gazların bağıl oranlarına) izotopik jeotermometreler ise su-gaz-mineral fazları arasındaki izotopik değışime dayalıdır. Kimyasal analizlerin, sondajlara göre daha ucuz ve kısa sürede yapılabilmesi jeotermal araştırmalarda rezervuar sıcaklığının tahmininde kimyasal jeotermometrelerin yaygın olarak kullanılmasını sağılamaktadır. Bu çalışmada sadece kimyasal jeotermometreler ile rezervuar sıcaklığı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

4.6.1. Silis jeotermometreleri

Silis jeotermometreleri, silisin su içerisindeki sıcaklığa bağılı çözünürlüğüne dayalıdır. Termodinamik olarak belirli bir kritik noktaya kadar sıcaklık arttıkça silis çözünürlüğü önemli ölçüde artmaktadır. Kuvars, kristobalit, kalsedon ve amorf silis gibi değışik silis formlarının su içerisindeki çözünürlüğü farklı olduğı için farklı jeotermometre eşitlikleri geliştirilmiştir (Çizelge 4.7). Silis için geliştirilen jeotermometre eşitliklerinin her biri farklı sıcaklık değıer aralıkları için geçerlidir. Kuvars çözünürlüğü, sıcaklığı 120-180 °C'den daha yüksek olan jeotermal rezervuarlarda çözünmüş silisi kontrol eder (Fournier, 1991). Daha yüksek sıcaklıkta akifer kayaktan yüzeye doğıru hareket eden sıcak akışkanda hızlı silis çökelimi gözlenmektedir. Sıcaklığı 180 °C'den az olan jeotermal sistemlerde ise kuvarstan çok kalsedon ile bir denge söz konusudur. Bu nedenle sıcaklığı 180 °C'den düşük olan jeotermal sistemlere kalsedon jeotermometresi, 180 °C'den daha yüksek jeotermal sistemlerde ise kuvars jeotermometresinin uygulanması daha uygun görölmektedir (D'Amore and Arnorsson, 2000). Doğal sularda çözünmüş olarak bulunan silis miktarı genellikle 20-30 mg/l civarındadır. Yüzeye yakın deniz sularında, silis miktarı çok düşük olup, çoğıu zaman 1 mg/l'nin

altındadır. Bunun sebebi, mevcut silisin deniz canlılarının kabuk iskeletinin oluşturulmasında tüketilmiş olmasıdır (Doğan, 1981). İnceleme alanındaki sıcak ve mineralli su kaynağındaki silis derişimi Eylül 2004'te 15.01 ppm iken Nisan 2005'te 4.11 ppm olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.7. Silis jeotermometre eşitlikleri (S: SiO₂ ppm)

No	Jeotermometre	Jeotermometre Eşitliği	Uygulama Aralığı (°C)	Referans
1	Kuvars	$t^{\circ}\text{C} = -42.2 + 0.28831S - 3.6686 \times 10^{-4}S^2 + 3.1665 \times 10^{-7}S^3 + 77.034 \log S$	25-900	Fournier and Potter (1982)
2	Kuvars (buhar-kayı yok)	$t^{\circ}\text{C} = (1309 / (5.19 - \log S)) - 273.15$	25-250	Fournier (1977)
3	Kuvars (100°C'de maks. buhar kaybı)	$t^{\circ}\text{C} = (1522 / (5.75 - \log S)) - 273.15$	25-250	Fournier (1977)
4	Kuvars	$t^{\circ}\text{C} = -55.3 + 0.36559S - 5.3954 \times 10^{-4}S^2 + 5.5132 \times 10^{-7}S^3 + 74.360 \log S$	0-350	D'Amore and Arnorsson (2000)
5	Kalsedon (buhar kaybı yok)	$t^{\circ}\text{C} = (1032 / (4.69 - \log S)) - 273.15$	0-250	Fournier (1977)
6	Kalsedon (buhar kaybı yok)	$t^{\circ}\text{C} = (1112 / (4.91 - \log S)) - 273.15$	25-180	Arnorsson et al. (1983)

Çizelge 4.7'de verilen silis jeotermometre eşitlikleri ile Karaada sıcak su kaynağı ve Tavşanburnu ılıcası için hesaplanan rezervuar sıcaklıkları Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Çalışma alanındaki sıcak su noktaları için silis jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (°C, *Kaynak çıkış sıcaklığından daha düşük veya eşit)

		Jeotermometre eşitliği (°C) (Bkz. Çizelge 4.7)					
Referans		1	2	3	4	5	6
	Karaada kaplıcası (Eylül 2004)	53	53	60	38	*	*
Bu çalışma	Karaada kaplıcası (Nisan 2005)	*	*	*	*	*	*
Canik (1979)		*	*	*	*	*	*
Canik (1974)		48	49	56	32	*	*
Yenal vd. (İÜ Tıp Fak., 1971)		*	*	*	*	*	*
Çağlar (1947)		75	74	78	60	42	45
MTA (1998)		*	*	*	*	*	*
Tavşanburnu ılıcası (MTA, 1998)		*	24	33	*	*	*

kuvarsa dayalı 1, 2, 3 ve 4 nolu jeotermometreler ile Karaada kaplıcası için 32-78 °C aralığında rezervuar sıcaklık değeri elde edilmiştir.

4.6.2. Katyon jeotermometreleri

Katyon jeotermometreler iyon takasına dayalı jeotermometrelerdir. İyon takası, sıcaklığa bağlı olan tepkime denge sabitinin (K) bir fonksiyonudur. İyon takasına uğrayan katyon derişimleri oranı, denge sabitinin sıcaklıkla değişimine bağlıdır. Akışkanın kimyasal bileşimi üzerinde etkin olan süreçler (soğuk su karışımı, su-kayaç etkileşimi vb.) nedeni ile katyon jeotermometreler sıcak su kaynakları için farklı rezervuar sıcaklıkları vermektedirler. Bu nedenle, sondaj kuyularından üretilen akışkanlar dışında bu eşitliklerin rezervuar sıcaklığı tahmininde kullanılması uygun görülmemektedir. Değişik araştırmacılar tarafından türetilen katyon jeotermometre eşitlikleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Katyon jeotermometre eşitlikleri (derişimler meq/l, ^aY= log([Na]/[K]); ^blog(K²/Mg)>1.25; ^clog(K²/Mg)<1.25; ^dt°C>100°C ise β=1/3, t°C <100°C ise β=4/3, t°C<100°C ve (log (√Ca/Na)+2.06)<0 ise β=1/3)

No	Jeotermometre	Jeotermometre Eşitliği	Uygulama Aralığı (°C)	Referans
1	Na - K	t°C =(856/(0.857+log(Na/K)))-273. 15	100-275	Truesdell(1976)
2	Na - K	t°C =(833/(0.780+log(Na/K)))-273.15		Tonani (1980)
3	Na - K	t°C =(933/(0.993+log(Na/K)))-273. 15	25 -250	Arnorsson et al. (1983)
4	Na - K	t°C =(1319/(1.699+log(Na/K)))-273.15	250-350	Arnorsson et al. (1983)
5	Na - K	t°C =(1217/(1.483+log(Na/K)))-273.15		Fournier(1979)
6	Na - K	t°C =(1178/(1.470+log(Na/K)))-273.15		Nieva and Nieva (1987)
7	Na - K	t°C =(1390/(1.750+log(Na/K)))-273. 15		Giggenbach (1988)
8	Na-K ^a	t°C =733.6-770.551Y+378.189Y ² -95.753Y ³ +9.544Y ⁴	0-350	D'Amore and Arnorsson (2000)
9	K-Mg ^b	t°C =(2330/(7.35-log(K ² /Mg)))-273.15		Fournier(1991)
10	K-Mg ^c	t°C =(1077/(4.033+log(K ² /Mg)))-273.15		Fournier(1991)
11	K - Mg	t°C =(4410/(14-log(K ² /Mg)))-273.15		Giggenbach (1988)
12	Li-Mg	t°C =(2200/(5.47-log(Li/Mg ^{0.5})))-273.15		Kharaka and Mariner (1989)
13	Na - K - Ca ^d	t°C =(1647/(log(Na/K)+β(log(√Ca/Na)+2.06)+2.47))-273.15		Fournier and Truesdell (1973)
14	Na - Li	t°C =(1590/(0.779+log(Na/Li)))-273.15		Kharaka et al.(1982)

Na-K jeotermometreleri

Yaygın olarak kullanılan Na-K katyon jeotermometrelerinin temeli, tepkime denge sabitine bağlı olan iyon takasıdır. Alkali feldispatlarda Na^+ ve K^+ iyonlarının değişimi buna tipik bir örnektir.



Alkali feldispatlar ile sulu çözelti arasındaki bu iyon değişimi 300 °C'den daha düşük sıcaklıklarda oldukça yavaştır. Bu nedenle bu jeotermometrelerin uzun süreli geçiş zamanına sahip yeraltısuları ile beslenen jeotermal akiferlerde kullanımı daha uygundur. Sıcak su kaynaklarında ve baz değişiminin feldispatlar yerine kil mineralleri ile kontrol edildiği sedimanter havzalarda güvenilir sonuçlar vermemektedir.

Na-K jeotermometreleri (Bkz. Çizelge 4.10, 1-8 no'lu eşitlikler) Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı için 92-201 °C aralığında rezervuar sıcaklığı türetmektedir. Ancak bu kaynağın besleniminde yüksek Na içeriği bulunan deniz suyu etkin olduğundan hesaplanan rezervuar sıcaklıkları güvenilir olarak kabul edilmemelidir.

Na-K-Ca jeotermometresi

Fournier and Truesdell (1973) tarafından geliştirilen bu jeotermometre eşitliği feldispatlar, kalsit veya Ca içeren mineraller ile jeotermal akışkanlar arasındaki dengeye dayalıdır. Kuvars ve Na-K jeotermometrelerine göre en önemli özelliği düşük sıcaklıklarda veya dengeye ulaşamamış sularda yüksek veya hatalı sonuçlar vermemesidir.

Jeotermometre eşitliğinde : $\log(\text{Ca}^{0.5}/\text{Na})+2.06 < 0$ ise $\beta=1/3$; $\log(\text{Ca}^{0.5}/\text{Na})+2.06 > 0$ ise $\beta=4/3$ alınarak hesaplanır.

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında $\beta=1/3$ alınarak rezervuar sıcaklığı 143-177 °C aralığında hesaplanmıştır (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Çalışma alanındaki sıcak su noktaları için katyon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (°C,
*Kaynak çıkış sıcaklığından daha düşük veya eşit)

	Jeotermometre eşitliği (Bkz. Çizelge 4.9)															
Referans	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 $\beta=1/3$	13 ($\beta 4/3$)	14	R
Karaada kaplıcası (Eylül 2004)	101	104	112	148	145	133	164	131	177	309	100	62	169	-	89	60
Karaada kaplıcası (Nisan 2005)	94	97	105	143	139	127	158	126	169	278	97	47	164	-	65	62
Canik (1979)	92	94	103	141	136	125	156	124	183	330	95	*	164	-	*	67
Canik (1974)	94	96	105	143	138	127	158	125	168	274	96	*	165	-	*	64
Yenal vd. (1971)	70	72	82	122	117	106	137	106	148	214	89	*	143	-	*	54
Çağlar (1947)	103	106	114	150	146	135	165	132	183	330	102	*	171	-	*	60
Filizvd. (1997)	114	118	125	159	156	144	175	142	195	378	106	*	177	-	*	54
MTA (1998)	147	151	156	185	184	171	201	168	225	520	116	*	*	-	*	59
Tavşanburnu ilıcası (Çağlar, 1947)	116	120	127	161	158	146	177	143	140	192	86	*	*	-	*	58
Tavşanburnu ilıcası (MTA, 1998)	141	145	150	180	178	166	196	163	145	205	88	*	176	-	*	51

Na-K-Ca-Mg jeotermometresi

Düşük sıcaklıklardaki suların yüksek Mg içeriği, Na-K-Ca jeotermometre sonucunu etkileyerek hatalı rezervuar sıcaklığı hesabına neden olmaktadır. Bu nedenle Fournier ve Potter (1979), Na-K-Ca jeotermometresi ile hesaplanan rezervuar sıcaklığında Mg düzeltmesini önermişlerdir.

Çizelge 4.10'da yer alan 13 no'lu eşitlikle hesaplanan tahmini rezervuar sıcaklığı ($t^{\circ}\text{C}$) ve R değeri kullanılarak aşağıda verilen eşitlikten düzeltme miktarı (Δt_{Mg}) bulunur. Bu düzeltme değeri, jeotermometre eşitliği ile hesaplanan sıcaklık ($t^{\circ}\text{C}$) değerinden çıkartılarak sonuca ulaşılır. R değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$R = [\text{Mg} / (\text{K} + \text{Ca} + \text{Mg})] \times 100 \text{ (derişimler, meq/l)} \quad (4.8)$$

T= Na-K-Ca sıcaklığı (K)

düzeltilme miktarı (Δt_{Mg}):

$$\Delta t_{Mg} = 10.66 - 4.7415R + 325.87(\log R)^2 - 1.032 \times 10^5 (\log R)^2 / T - 1.968 \times 10^7 (\log R)^2 / 2 + 1.605 \times 10^7 (\log R)^3 / T^2 \quad (4.9)$$

R<1.5 durumunda Mg düzeltmesi uygulanmaz, R>50 durumunda ise rezervuar sıcaklığı kaynak sıcaklığı olarak kabul edilir.

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı için R değerleri (Bkz. Çizelge 4.10) 50'den büyük olarak hesaplanmıştır.

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağının Mg iyonu bakımından oldukça zengin olması, bu yöntemin uygulanmasını olanaksız kılmaktadır. Bu nedenle Fournier ve Potter (1979) tarafından Na-K-Ca jeotermometresi için önerilen Mg düzeltmesi yerine Fournier ve Truesdell (1973) tarafından geliştirilen Na-K-Ca (Bkz. Çizelge 4.9, 13 nolu eşitlik) jeotermometresinin orijinal eşitliği Na-K-Ca-Mg jeotermometresine göre daha uygun rezervuar sıcaklıkları vermektedir.

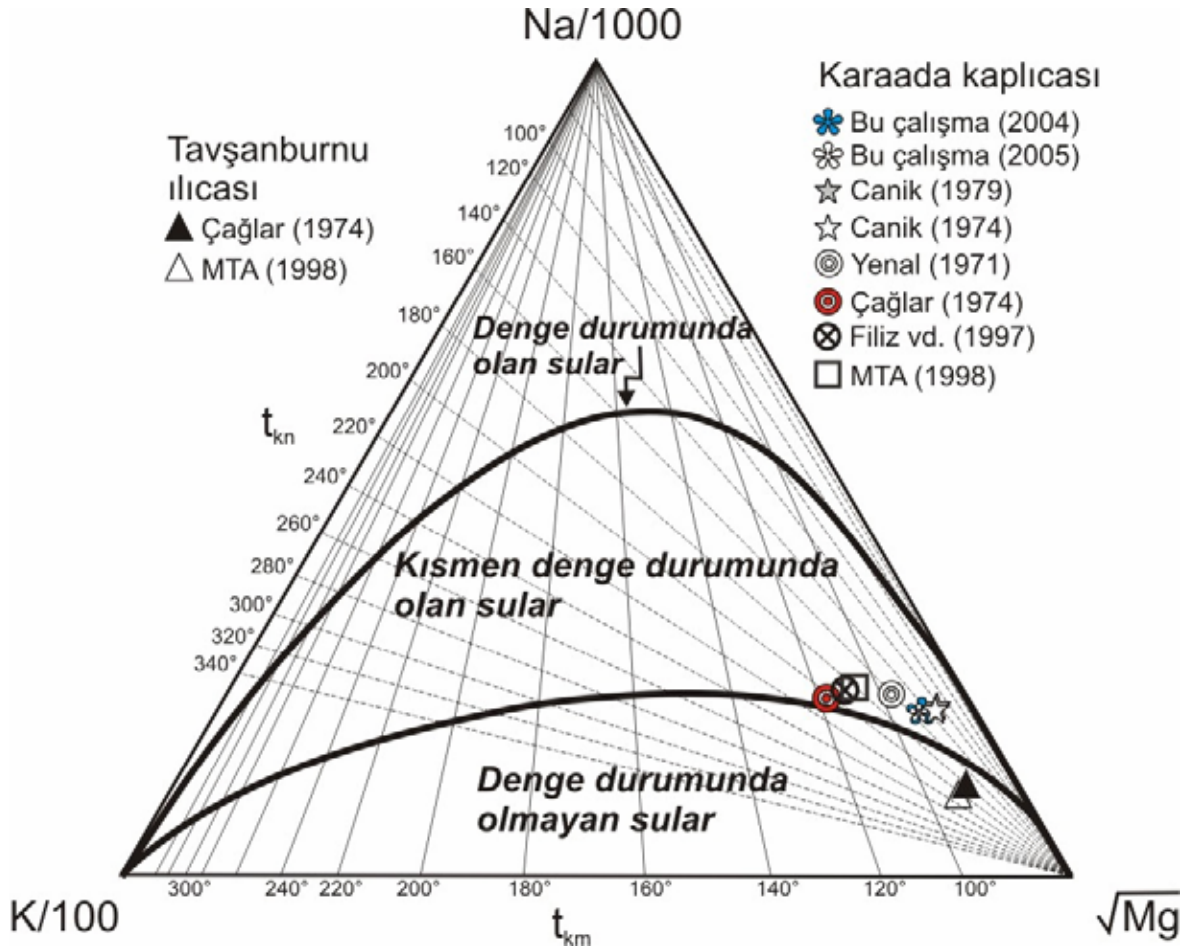
Li-Mg ve Na-Li jeotermometreleri

Kharaka ve Mariner (1989), Li/Mg oranına dayalı bir jeotermometre eşitliği önermişlerdir (Çizelge 4.9, eşitlik 12). Ancak bu jeotermometre eşitliği ile hesaplanan rezervuar sıcaklığı genel olarak sondaj kuyuları ile belirlenen rezervuar sıcaklığından daha düşük olarak hesaplanmaktadır. Bu eşitlik ile Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı için 47-62 °C rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır. Yine Kharaka vd. (1982) tarafından önerilen ve Na/Li oranına dayalı jeotermometre ile Karaada sıcak ve mineralli su kaynağının sıcaklığı 65-89 °C rezervuar sıcaklığı hesaplanmıştır (Çizelge 4.10, eşitlik 14).

Na - K - Mg jeotermometresi

Na-K-Mg jeotermometre eşitlikleri (Bkz. Çizelge 4.9, 7 ve 11 nolu eşitlikler) jeotermal suların akifer sıcaklıklarının yanı sıra suların ilişkide olduğu kayaçlar ve mineraller ile denge durumlarının belirlenmesi amacıyla Giggenbach (1988) tarafından geliştirilmiştir. Na-K-Mg jeotermometresi ile hem sıcak suların rezervuar sıcaklığı hızlı olarak yorumlanabilmekte, hem de katyon jeotermometrelerinin rezervuar sıcaklığının hesabı için jeotermal suya uygulanıp/uygulanamayacağı veya güvenilir sonuçlar verip/vermeyeceği değerlendirilebilmektedir. Giggenbach (1988)'a göre denge halinde olmayan (immature) seyrelmiş jeotermal sularda K-Na arasındaki denge sıcaklığı kullanılarak değerlendirme yapılmasının uygun olamayacağı ancak denge durumunda olan sular (olgun sular "mature") hattı ve bu hat üzerinde yer alan jeotermal sularda katyon jeotermometreleri daha doğru sonuçlar vermektedir.

Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı için Na-K jeotermometresi (Çizelge 4.10, 7 no'lu eşitlik) ile hesaplanan rezervuar sıcaklığı 156-201 °C aralığında K-Mg jeotermometresi (Çizelge 4.10, 11 no'lu eşitlik) ile 89-116 °C aralığında hesaplanmıştır. Giggenbach üçgeninde (Şekil 4.8) Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı **"kısmen denge durumunda olan sular"** ve Tavşanburnu ılıcası **"denge durumunda olmayan sular"** bölümünde yer almaları nedeniyle bu kaynaklar için katyon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları güvenilir olarak kabul edilmemelidir.



Şekil 4.8. İnceleme alanındaki sıcak suların Na-K-Mg üçgen diyagramı.

Kasyon jeotermometreleri ile hesaplanan sıcaklık değerleri silis jeotermometreleri ile hesaplanan sıcaklık değerlerinin yaklaşık olarak iki katı civarındadır. Bu durum sıcak su kaynağının rezervuar kayaçlarını besleyen deniz suyundan kaynaklanmaktadır. Deniz suyunda bulunan yüksek iyon derişimleri jeotermometre hesaplamalarında rezervuarın sahip olabileceği gerçek sıcaklık değerinden çok daha yüksek sıcaklık değerleri hesaplamamıza neden olmaktadır. Silis jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklık değerleri (38-78 °C) daha gerçekçi olmasına karşın düşük silis derişimi nedeniyle bu jeotermometreler ile hesaplanan rezervuarın olası sıcaklık değeri de rezervuarın gerçek değerini yansıtmamaktadır. Sonuç olarak; jeotermometreler ile hesaplanan rezervuarın olası sıcaklık değerleri yüksek oranda deniz suyu karışımı nedeniyle rezervuarın gerçek sıcaklık değerini yansıtmamaktadır.

5. ÇEVRESEL İZOTOP HİDROJEOLOJİSİ

İzotoplar, atom çekirdeklerinden nötron eksilmesi veya nötron eklenmesi ile oluşurlar. Çekirdeğinde aynı sayıda proton ve farklı sayıda nötron bulunan atomlara o elementin izotopu denir. Kararsız çekirdeğin kararlı duruma geçinceye kadar uğradığı nükleer değişime (bozunma) radyoaktivite denir. Bir radyoaktif izotop kararlı bir çekirdeğe dönüşürken bazı nükleer ışınlar yayarak radyoaktif parçalanmaya uğrar. Herhangi bir radyoizotopun parçalanma oranı o izotopun yarı ömrüne bağlıdır. Bir radyoizotopun yarı ömrü ($T_{1/2}$) belirli bir andaki atomlarının sayısının yarıya düşmesi için geçen zamandır ve her radyoizotop için farklıdır. Bu çalışmada kullanılan ^3H için yarılanma ömrü 12.33 yıldır (Unterweger and Lucas 2000).

Jeotermal akışkanların bulunduğu ortamın hidrojeolojik yapısının belirlenmesi amacıyla yararlanılan doğal izotoplar, özellikle "Duraylı izotoplar" olarak bilinen ^2H , ^{18}O ve hidrojenin radyoaktif izotopu ^3H 'dir. Duraylı ^{18}O ve ^2H izotopları genel olarak jeotermal akışkanın kökeninin, beslenme alanını ve akifer içerisindeki sıcaklığını belirlemede kullanılırken ^3H radyoaktif izotopu ise jeotermal akışkanının yaşının belirlenmesinde önemli katkılar sağlamaktadır. Bu izotoplar akiferlerde gelişen hidrojeokimyasal süreçlerden etkilenmezler. Buna karşın suyun etkilendiği fiziksel/kimyasal süreçler hakkında değerli ipuçları vermektedirler. Suyun doğal bileşenleri olmaları nedeniyle iyi birer izleyicilerdir.

5.1. Tritiyum (^3H)

Çevresel izotoplardan ^3H yeraltısuyu araştırmalarında büyük yararı, radyoaktif bozunmanın dışındaki etkilerden hemen hemen hiç etkilenmemesidir. Tritiyum derişimi sıvı parıldama veya gaz sayaçları ile belirlenmektedir. Derişim birimi Tritiyum Birimi (TU, Tritium Unit) olup 1 TU 10^{18} H atomuna karşılık 1 adet ^3H atomunu ifade eder.

Tritiyumun meteorik sulardaki miktarı aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- Stratosferdeki nitrojenin nötron bombardımanı sonucunda oluşan tritiyum miktarı,
- Tritiyumun beta ışınması yaparak yarılanması,

- Mevsimsel olarak stratosferden troposfere geçen (enjekte olan) trityum miktarı,
- Termonükleer bomba denemelerinden türemiş trityumun miktarı,
- Yerel olarak bilimsel çalışmalarda kullanılmak üzere nükleer reaktör veya diğer kaynaklarda yapay yollardan üretilmiş trityumun miktarı,

Kuzey yarımkürede uzun dönemli ölçümlere bağlı olarak bahar ve yaz aylarındaki trityum derişimi, kış aylarına oranla daha fazladır. Karaların üzerinde yaz aylarında trityum miktarının artmasının nedeni kış ve bahar yağışlarının bir kısmının tekrar buharlaşmasıdır. Denizlerin üzerindeki trityum miktarı ise yıl boyunca düşüktür. Bunun nedeni molekül takası (molekul exchange) olayı sonucu trityumların deniz suyu tarafından alınmasıdır (Fritz and Fontes, 1980).

Yeraltısuyunun ^3H derişimi, akiferi besleyen suların ^3H değerine bunların toplam beslenimdeki katkı oranlarına ve beslenim suyunun yeraltında kalış süresine bağlı olarak değişmektedir. Aynı zamanda farklı kökenli suların karışımında yeraltısuyunun trityum miktarını değiştirebilir.

5.2. Oksijen-18 (^{18}O) - Döteryum (^2H)

Yeraltısuyu çalışmalarında kullanılan diğer iki önemli çevresel izotop ise ^{18}O ve ^2H 'dur. Hidrolojik çevrim içindeki miktarlarının ortamın fiziksel ve kimyasal koşullarına bağlı olarak değişmesinden dolayı bu izotoplar suyun geldiği ortam hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Herhangi bir su örneğinin kararlı izotop içeriği, mutlak değer olarak değil, ağır olan izotopun hafif olan izotopa oranının, belirlenmiş bir standarttan farkı olarak ifade edilmektedir. Bu amaçla kullanılan standart, Ortalama-Standart-Okyanus-Suyu (SMOW)'nun kararlı izotop içeriğini temsil etmek üzere hazırlanmış olan "SMOW" dur. Bu standarttan fark olarak ölçülen kararlı izotop içeriği "binde (‰)" olarak ifade edilir ve delta (δ) değeri olarak gösterilir. Buna göre bir örneğin ^{18}O ve ^2H içeriği

$$\delta^{18}\text{O} = 1000 \times ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{örnek}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}) / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} \quad (5.1)$$

$$\delta \text{D} = 1000 \times ((\text{D}/\text{H})_{\text{örnek}} - (\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}}) / (\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}} \quad (5.2)$$

olarak ifade edilir. Hidrolojik çevrim içinde suyun anılan iki kararlı izotopun içeriği gerek yerel olarak ve gerekse zaman içinde değişimler gösterir. Bunun başlıca nedeni $H^2H^{16}O$ ve $H_2^{18}O$ gibi ağır su moleküllerinin, $H_2^{16}O$ hafif su molekülünden daha düşük buhar basıncına dolayısıyla yüksek kaynama noktasına sahip olmasıdır. Örneğin, $H_2^{18}O$ molekülü, $H_2^{16}O$ molekülünden %11 daha ağır ve buharlaşma basıncı %5 daha azdır. Buharlaşma basıncının az olması nedeniyle kaynama noktası $0.14\text{ }^{\circ}C$ daha fazla olduğundan su ile dengede olan buhar fazı $H^2H^{16}O$ ve $H_2^{18}O$ açısından daha fakirdir. Atmosferik nem denizlerden itibaren oluştuğu için suyun ağır molekülleri açısından denize göre fakir ve dolayısıyla yağışın ^{18}O ve 2H içeriği de denizden daha az olacaktır. Yoğunlaşma sürecinde ^{18}O ve 2H içeriğinde meydana gelen değişimler genellikle yoğunlaşmanın oluştuğu sıcaklığa bağlıdır. Bunun doğal sonucu olarak, yağışlar içindeki ^{18}O ve 2H içerikleri gerek yerel ve gerekse mevsimler boyunca değişim gösterir (Payne and Dinçer, 1965; Drost et al., 1974; Gill, 1996). Atmosferdeki nem kıydan iç kesimlere, karaya doğru ilerledikçe yağış ile birlikte suyun ağır bileşenleri ($H^2H^{16}O$ ve $H_2^{18}O$) açısından gittikçe fakirleşecektir. Diğer bir deyişle yağışın ^{18}O ve 2H içeriği deniz kenarından kara içlerinde ve yükseklik arttıkça azalmaktadır. Aynı şekilde yaz yağışlarında buharlaşma etkisinden ötürü adı geçen izotoplar açısından zengin (pozitif değer), kış yağışları ise fakir (negatif değer) olacaktır (Fritz and Fontes, 1980). Hidrojen ve oksijen izotoplarının oranları ile jeolojik çevrimdeki üç tür su ayırt edilebilmektedir;

- Kayaçların oluşumu sırasında içinde hapsedilen deniz suyu (connate water); bu durumda yeraltısuyunun beklenenden daha az negatif 2H ve ^{18}O değerleri göstermesi söz konusudur,
- Yağış sularından itibaren oluşan yeraltısuyu; doğada yaygın olarak rastlanan bu durumda beslenme bölgesindeki yağış rejimine ve bölgedeki sıcaklığa bağlı olarak (buharlaşma etkisi), negatif $\delta\ ^2H$ ve $\delta\ ^{18}O$ değerleri gözlenir,
- Yüksek sıcaklıklarda silikatlı kayaçlarda izotopik eşdeğerliğe sahip magmatik ve metamorfik su; bu durumda izotopik açıdan özellikle 2H açısından zenginleşme söz konusu olabileceğinden muhtemelen pozitif $\delta\ ^2H$ ve $\delta\ ^{18}O$ değerleri gözlenir (Gill, 1996).

Yağışlara ait ^{18}O ve ^2H grafiği ilk defa Friedman (1953) tarafından çizilmiş ve Craig (1961) tatlı suların ^{18}O ve ^2H içeriği ile ilgili olarak aşağıdaki eşitliği önermiştir;

$$\delta D (\text{‰}) = a \times \delta^{18}\text{O} (\text{‰}) + d \quad (5.3)$$

burada D; ^2H derişimi (TU), a; eğim ve d; döteryum fazlası

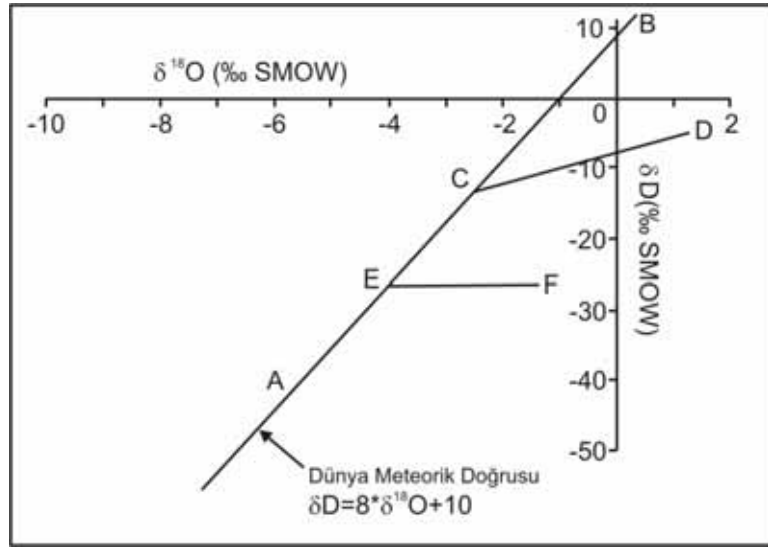
Bir bölgedeki yağışlara ait duraylı izotop değerleri ile yeraltısuyuna ait izotop değerleri, eğer suların kökeni aynı ise aynı doğru üzerinde ve aynı küme içinde toplanırlar. Bu doğru küresel meteorik su doğrusu olarak adlandırılmaktadır (Global Meteoric Water Line, GMWL, Şekil 5.1).

Şekil 5.1'deki AB doğrusu küresel meteorik doğruyu göstermektedir. Ortalama deniz suyu bu grafikte her iki ekseninde "0" olduğu noktada bulunmaktadır. Ancak çalışma alanında da olduğu gibi genellikle buharlaşmanın etkisi nedeniyle pozitif δD ve $\delta^{18}\text{O}$ değerler gösterir. Bu doğrunun ^2H eksenini kestiği nokta "Döteryum Fazlası" olarak tanımlanır ve yağışa kaynak oluşturan deniz suyunun buharlaşma miktarının bir göstergesidir. Buharlaşmanın fazla olduğu bölgelerde ^2H fazlası pozitif değerlere ulaşır. Önemli bir buharlaşmanın olmadığı yüzey ve yeraltısuları AB doğrusu üzerinde bulunur. İlkbahar ve yaz yağışları ile topoğrafik olarak alt yüksekliklerdeki yağışları temsil eden sular bu doğrunun B noktasına yakın, sonbahar ve kış yağışları ile topografik olarak üst kotlardaki yağışlar doğrunun A noktasına yakın bulunurlar.

İzotopik yer değiştirme işleminin gerçekleştiği sularda, buharlaşma etkisinde kalan sularda ve deniz suyu ile temas halindeki sularda suyun ^2H değeri, diğer meteorik kökenli sularla aynı değer aralığında yer alırken; ^{18}O değeri kireçtaşı ile temas sonucunda daha pozitif bir değere ulaşacağından, meteorik doğrudan sağa doğru sapma oluşmaktadır. Öte yandan buharlaşma etkisi altında olan sular eğimi 4° ile 6° arasında değişen CD doğrusu üzerinde yer alır. Bu doğru üzerinde buharlaşma miktarı arttıkça su noktaları C noktasından D noktasına doğru hareket eder. Meteorik doğru ile olan kesişme noktası C ise yüzey sularının buharlaşmadan önceki İzotopik kompozisyonunu gösterir. EF doğrusu ^{18}O derişiminin artmasına karşılık ^2H değerinin sabit olduğu jeotermal sıcak suların yer aldığı doğrudur. Aynı şekilde termal suyun sıcaklığına bağlı olarak E noktasından F noktasına doğru bir yönelme görülür. Daha sıcak sular bu doğrunun sağında yer alırlar.

5.3. Örneklem ve Analiz Çalışmaları

Bodrum-Karaada jeotermal alanında yürütülen bu çalışma boyunca yeraltısuyundan 7 adet, Karaada sıcak ve mineralli su kaynağından ve denizden 1'er adet olmak üzere Eylül 2004 tarihinde alınan örneklerin duraylı izotop (^{18}O , ^2H) analizleri yapılmıştır. Toplanan örneklerin ^{18}O , ^2H izotoplarının analizleri Tübitak Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Çevre ve Petrol Jeokimyası laboratuvarı'nda, ^3H analizleri ise Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Su Kimyası Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Şematik $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ grafiği.

5.4. Duraylı İzotop Verilerinin Değerlendirilmesi

Duraylı (kararlı) izotoplar jeotermal sistemlerde hidrojeokimyasal süreçlerin aydınlatılmasında kullanılmaktadırlar.

Duraylı izotop analiz sonuçları ve örneklem sırasında ölçülen fiziksel ve kimyasal parametrelere ilişkin bilgiler çizelge 5.1'de verilmiştir (İzotop analizlerinde hata payı ^2H için $\pm\%$ 1, ^{18}O için $\pm\%$ 0.2).

Çizelge 5.1. inceleme alanındaki örneklerin duraylı izotop ve trityum içerikleri
(Eylül 2004, * Nisan 2005 analizi)

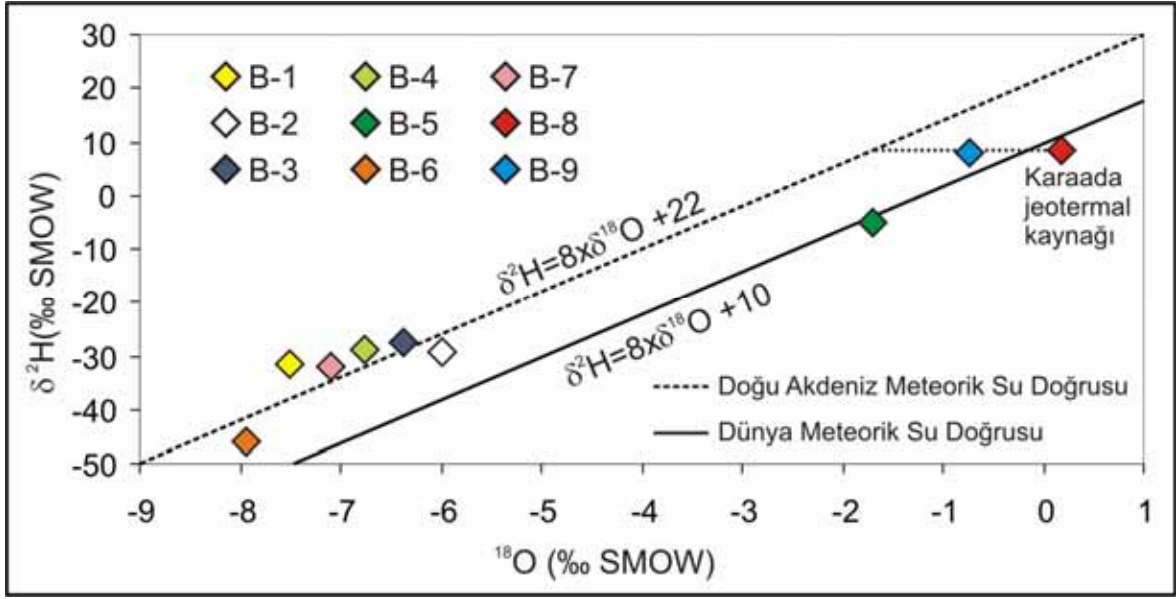
Örnek No	Örnek Adı	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	Kot (m)	δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	δ ² H (‰ SMOW)	³ H (TU)
B-1	Kızılağaç keson kuyu	21.3	7.15	3000	17	-7.51	-31.76	3.24±0.31
B-2	Hasan Hüseyin sondaj kuyusu	24.8	7.3	800	129	-6	-29.15	2.86±0.29
B-3	Kızılağaç Obruk	19.5	8.1	1700	35	-6.37	-27.6	4.57±0.32
B-4	Süheyla Enç sondaj kuyusu	20.1	7.1	1500	110	-6.75	-29.06	2.63±0.29
B-5	Yalıçiftlik keson kuyu	21.9	8	6700	10	-1.69	-5.05	4.79±0.32
B-6	Yenkuyu keson kuyu	18.5	7.2	400	128	-7.94	-46.02	3.36±0.31
B-7	Osman Çavuş sondaj kuyusu	20.1	6.9	700	108	-7.09	-31.98	4.39±0.32
B-8	Karaada Kaplıcası	31.7	6.2	61500	0	0.17	8.54	0.61±0.25
B-8*	Karaada Kaplıcası	30.6	6.42	57400	0	-	-	*0.14±0.20
B-9	Deniz suyu	23.3	8.2	58800	0	-0.74	8.09	1.27±0.25

5.4.1. ¹⁸O ve ²H ilişkisi

Meteorik suyun hidrojen ve oksijen izotopları arasında buharlaşma ve yoğunlaşma gibi atmosferik süreçler ile kontrol edilen bir doğrusal ilişkisi vardır. Her bölgenin kendini karakterize eden bir meteorik su doğrusu vardır. Bu meteorik su doğruları yeraltısularının kökeninin belirlenmesinde doğal izleyici olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Şekil 5.2'de verilen inceleme alanına ait ¹⁸O-²H grafiğinden, tüm su noktalarının değeri;

$\delta D = 8 \delta^{18}O + 22$ (Doğu Akdeniz Meteorik Su Doğrusu; Payne ve Dinçer, 1965) ile $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ (Dünya Meteorik Su Doğrusu; Craig, 1961) olan meteorik yağış doğruları çevresinde yer aldıkları görülmektedir.



Şekil 5.2. İnceleme alanındaki suların ^{18}O - ^2H grafiği.

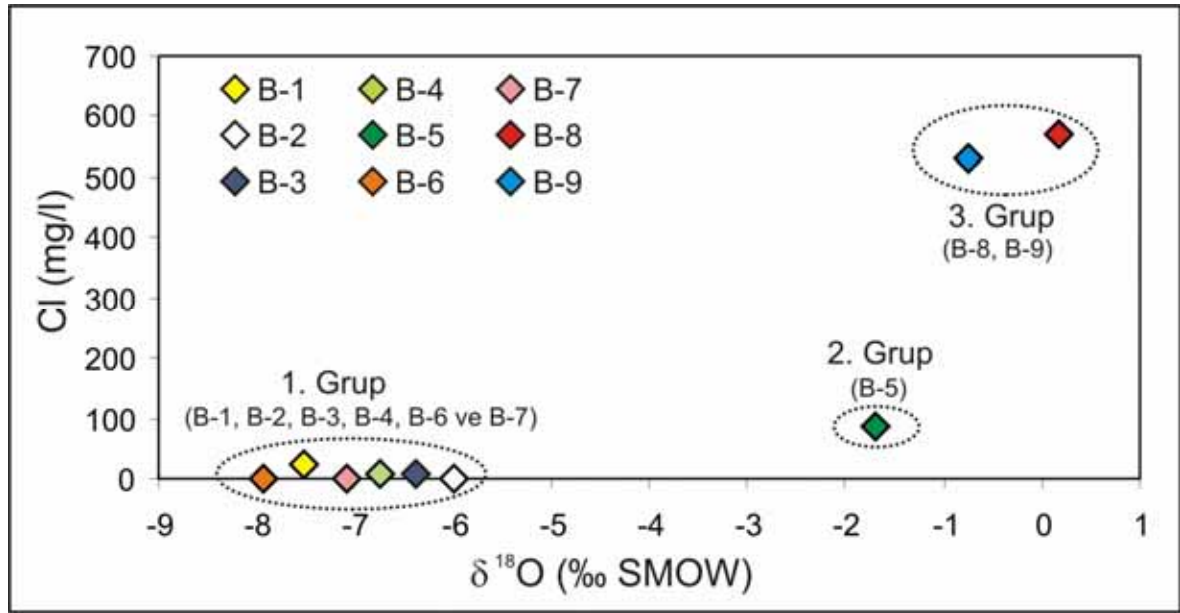
Meteorik doğruya ait "Döteryum fazlası" değerinin yüksek (‰ 22) olması havzada hakim yağışların hızlı buharlaşma etkisi altındaki Doğu Akdeniz kaynaklı atmosferik su buharınca oluştuğunu göstermektedir.

Soğuk sularından B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-7, kuyuları (Şekil 5.2) ^2H yaklaşık olarak birbirinin aynısıyken ^{18}O değerlerindeki artış bunlardaki deniz suyu karışımına bağlı olarak artış göstermektedir. B-5 soğuk su kuyusu, soğuk yeraltısuyuna yüksek miktarda deniz suyu karışımı ve buharlaşma etkisi altında olup Doğu Akdeniz Meteorik Su Doğrusu'ndan sapma göstermiştir. Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı diğer su noktalarına oranla yüksek miktarda deniz suyu etkisinde kaldığından ve sıcaklığın etkisiyle jeotermal akışkan-kayaç etkileşimi sonucunda kayaç ve yeraltısuyu arasındaki izotopik yer değiştirme sürecinden kaynaklanmaktadır. Bu zenginleşme ^{18}O izotopu bakımından zengin kayaçlar (karbonatlı kayaçlar) ile jeotermal akışkan arasındaki etkileşim sonucunda, jeotermal akışkanın izotopik bileşiminin pozitif ^{18}O değerlerine doğru değişmesidir. Hidrojen ise kayaçların ana bileşenlerinden biri olmadığından kayaç-akışkan etkileşimi jeotermal suların ^2H değerleri üzerinde bir değişikliğe neden olmamaktadır. Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı deniz suyuyla hemen hemen aynı ^2H değeri sunarken daha pozitif ^{18}O değeri sunması bu kaynağın rezervuar kayaçlarının deniz suyu tarafından beslendiğini göstermektedir.

5.4.2. ^{18}O -Cl ilişkisi

Çalışma alanında bulunan su noktalarının ^{18}O ve ^2H içeriklerine karşılık çizilen Cl (mg/l) değerleri deniz suyunun tatlı suyun ^{18}O içeriğini değiştirdiğini göstermektedir (Şekil 5.3 ve 5.4).

Şekil 5.3'teki grafikte su örnekleri 3 gruba ayrılmaktadır. İlk gruptaki su noktalarının El değeri 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'nin altında, ikinci grupta ileri derecede tuzlanmış olan B-5 keson kuyusu son grupta ise El değeri 50.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'den büyük olan Karaada kaplıcası ve deniz suyu yer almaktadır.



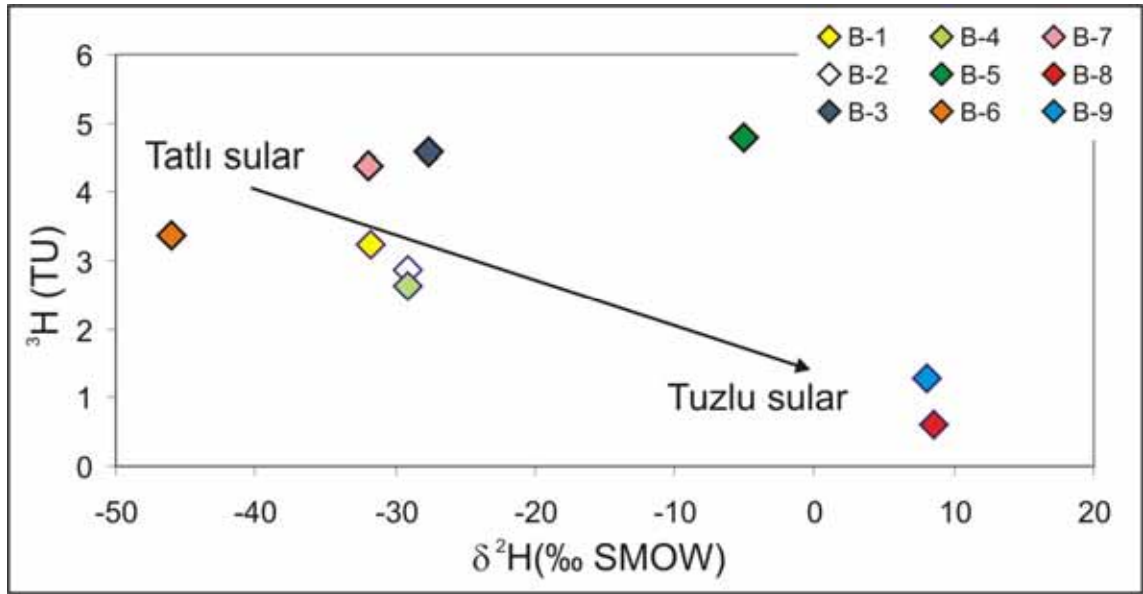
Şekil 5.3. İnceleme alanındaki suların ^{18}O -Cl grafiği.

İnceleme alanına ait su örneklerinin ^{18}O ve ^2H içeriklerinden hareket edilerek, ortak (ya da benzer) beslenme süreçlerinin etkisi altında bulunan suların ayırt edilmesi mümkündür. Benzer bir yaklaşımla ortak yeraltısuyu dolaşım sistemine sahip olan yeraltısuyu boşalımlarının ^{18}O -Cl grafiği üzerinde birbirine yakın konumlarda bulunması beklenir. Bu varsayımdan hareketle B-7 kuyusunun diğer kuyulara oranla daha sıkı dolaşım bir sistemden beslendiği, B-5 kuyusunun diğer tuzlanmış kuyulara (B-1, B-3, B-4) göre buharlaşma etkisinde kaldığı ve deniz suyu karışımından daha fazla etkilendiği söylenebilir. Öte yandan Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı (B-8) ve deniz suyunun (B-9) aynı grupta yer alması bu kaynağın rezervuar kayaçlarının yüksek miktarda deniz suyu deniz suyu

tarafından beslendiğini göstermektedir. Dönemsel olarak daha pozitif Cl⁻derişimine sahip olması, muhtemelen magmatik kökenli sulardan kaynaklanmaktadır.

5.4.3. ²H-³H ilişkisi

²H-³H grafiğinde (Şekil 5.4) inceleme alanında yer alan suların tatlı sudan tuzlu suya doğru geçişi görülmektedir. Grafiğe göre Yenikuyu keson kuyu (B-6) inceleme alanında yer alan tuzlanma etkisinde olmayan yeraltısuyunu , Karaada sıcak ve mineralli su kaynağı ise deniz suyu etkisinden dolayı tuzlanmanın en fazla olduğu sıcak ve mineralli suyu yansıtmaktadır.



Şekil 5.4. İnceleme alanındaki suların ²H-³H grafiği.

6. KAVRAMSAL HİDROTHERMAL MODEL

Jeotermal sistemler: ısı kaynağı, beslenme alanı, akifer, örtü kayaç ve jeotermal akışkanın yüzeye çıkışını kontrol eden kırık veya çatlak yapılarından meydana gelmektedir. Karaada jeotermal alanında gerek birincil akifer ve gerekse ikincil akifer litolojileri ve hidrojeolojik özellikleri hakkında kapsamlı veri bulunmamaktadır. Bölgedeki jeotermal akifer litolojileri su kimyası çalışmaları ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. İnceleme alanında yaygın olarak bulunan karstik birimlerin hem tektonizma, hem de volkanizma açısından oldukça aktif bir bölgede yer alması, bu birimlerin ikincil geçirimlilik özelliği kazanmalarına neden olmuştur. Sıcak su kaynağının bulunduğu bu aktif zon jeotermal sistemi besleyen akışkanların (deniz suyu+yeraltısuyu) inceleme alanının dışından da kırık zonlar ve karstik boşluklar boyunca taşınmasını sağlayabileceği için belirlenen bu akifer kayaç litolojileri tahminden öteye gidememektedir.

İnceleme alanında yapılan kimyasal ve izotopik çalışmalardan bölgede bulunan kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı formasyonlarının akifer olabileceği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada esas olarak Karaada jeotermal alanının yayılımı ve hidrotermal yapısının ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Karaada sıcak su kaynağı ve çalışma süresi boyunca kuru olan Tavşanburnu ılıcası ile temsil edilen Karaada jeotermal alanı için kavramsal hidrotermal model ortaya konulmuştur (Şekil 6.1).

6.1. Jeotermal Akışkanın Kökeni ve Beslenme Alanı

Jeotermal sistemler başlıca meteorik olmak üzere magmatik, jüvenil kökenli akışkanlar ile beslenmektedirler. Karaada jeotermal alanında yer alan sıcak su kaynağının Dünya Meteorik Su Doğrusu üzerinde denize yakın yerde ^{18}O artışı göstererek yer alması nedeniyle inceleme alanındaki jeotermal sistemi deniz suyu, meteorik kökenli sular ve muhtemelen magmatik kökenli suların beslediği belirlenmiştir.

Karaada sıcak ve mineralli kaynağının düşük ^3H ve yüksek ^{18}O derişimi jeotermal alandaki derin yeraltısuyu dolaşım sistemini yansıtmaktadır. Kaynak, deniz suyunun ve bölgedeki geçirimli birimlere düşen yağış sularının derinlere süzülmesi, jeotermal gradyan ile Miyosen sonrası ve Kuvaterner'de gerçekleşen

şiddetli volkanizmanın derinlerde soğumamış magmatik kayaçlarıyla etkileşimi sonucu ısınarak Karaada Fayı boyunca tekrar yüzeye yükselmesi sonucunda oluşmuş bir fay kaynağı özelliğindedir.

6.2. Hazne Kayaç

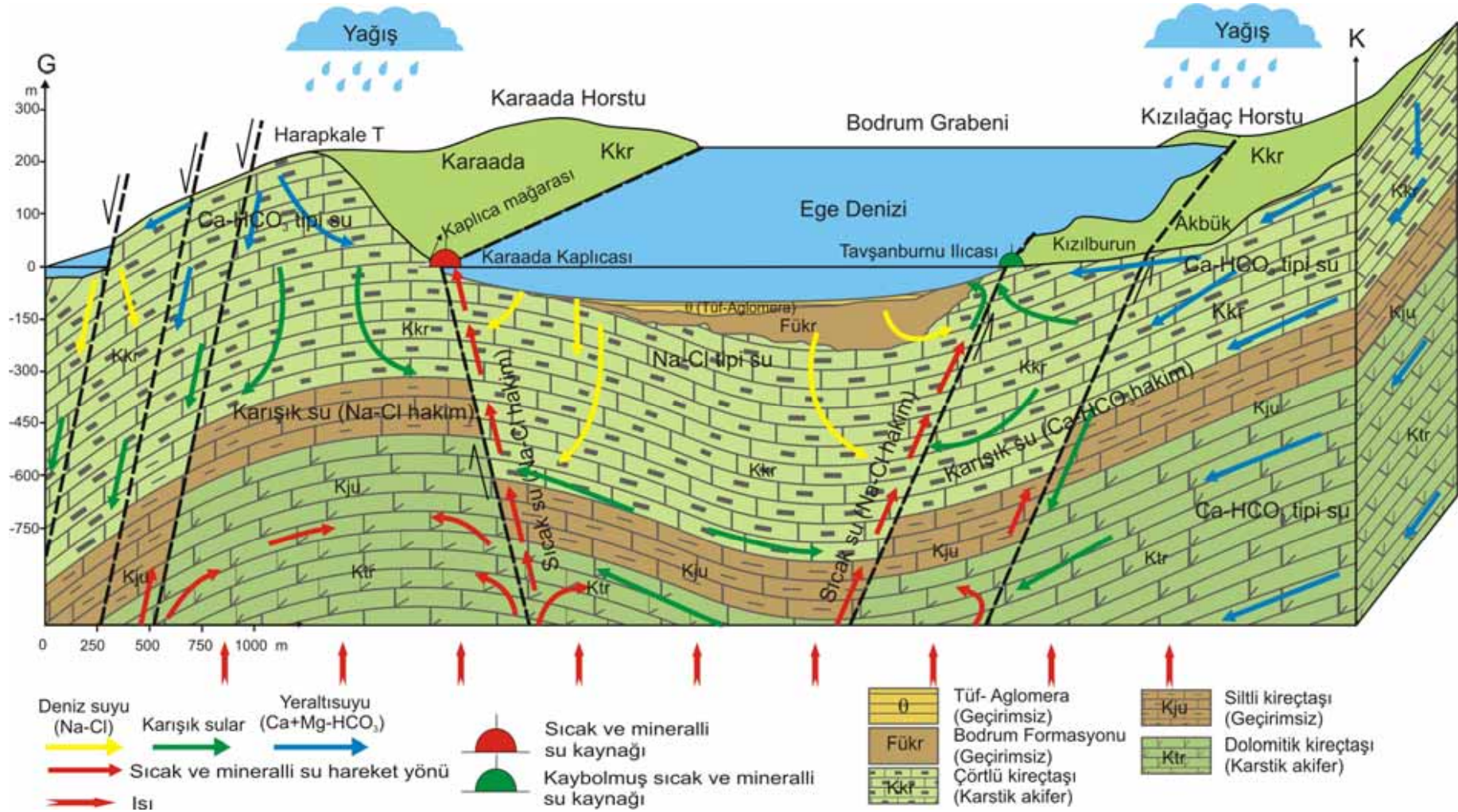
Karaada sıcak ve mineralli su kaynağında yapılan kimyasal değerlendirmeler sonucunda sıcak su akiferi karbonat mineralleri bakımından zengin kayaçlardan oluşmaktadır. Yapılan mineral doygunluk indisi hesaplamalarında, Karaada sıcak ve mineralli su kaynağının aragonit, kalsit ve dolomit minerallerine doygun olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle Karaada jeotermal alanında bulunan kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşlarından oluşan Kışladağı ve Pazardağı Formasyonlarının sıcak ve mineralli su kaynağına akifer oldukları belirlenmiştir. Bölgede gelişen karstlaşma ve aktif tektonizma bu kayaçlara ikincil geçirimsizlik özelliği kazandırmıştır. Bol kırık çatlak ve karstik boşluklar sergileyen bu formasyon yüksek iletkenliği olan rezervuar kayaç özelliğindedir.

6.3. Isı Kaynağı

Jeotermal alanlarda ısının kaynağı; volkanizma, soğumasını tamamlamamış magmatik bir sokulum veya tektonik etkinliğe bağlı olarak değişmektedir. Tüm bu faaliyetler jeotermal alanın bulunduğu bölgede ısı akısının yüksek olmasına neden olmaktadır. Ege adayayında güncel volkanik etkinliğin varolması, soğumasını henüz tamamlamamış magma; Gökova Grabeni'nde genişleme tektoniği ile kıtasal kabuğun incilmesi; bölgede jeotermal gradyanın yüksek olduğunu göstermektedir. Mutlu and Güleç (1998), Türkiye'de farklı bölgelerdeki jeotermal alanlar için kimyasal jeotermometreler ile ortalama rezervuar sıcaklıkları genişleme tektoniğinin etkin olduğu Batı Anadolu için ortalama 251 °C olarak hesaplamışlardır. Güneybatı Anadolu'da bulunan Karaada jeotermal alanı için bu çalışma ile rezervuar sıcaklığı Kışladağı Formasyonu için yaklaşık 40-45 °C, Pazardağı Formasyonu için 45-60 °C olarak belirlenmiştir.

6.4. Örtü Kayaç

Hidrotermal sistemin sahip olduğu ısıyı koruyabilmesi için, sıcak su akiferi üzerinde düşük termel iletkenliğe ve düşük geçirimliliğe sahip bir örtü kayacın olması gerekmektedir. İnceleme alanında örtü kayaç olabilecek formasyon siltli marnlı kireçtaşlarından oluşan Karadağ Formasyonu ile kumtaşı, kıltaşı ve siltaşı ar dalanmasında oluşan Bodrum Formasyonu'nun killi ve siltli seviyeleridir. Karadağ Formasyonu'nun fay zonları boyunca kırıklı ve çatlaklı bir yapı sergilemesi ve karstik boşluklara sahip olması bu formasyonun iyi bir örtü kayaç olamayacağını göstermektedir. Bodrum ilçe merkezi ve batısında tüm bu formasyonların üzerinde yer alan Bodrum formasyonu iyi bir örtü kayaç özelliğindedir.



Şekil 6.1. Karaada jeotermal alanının kavramsal hidrotermal modeli

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İnceleme alanında daha önce yapılmış çalışmalar ışığında bölgenin 1/50 000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmış, jeolojik kesitler ve stratigrafik istif ortaya konmuştur. İnceleme alanındaki kayaç birimleri ve faylar belirlenmiştir. Buna göre, sahada başlıca KB-GD D-B, doğrultularında basamaklı ve normal fay sistemine bağlı horst ve graben yapısının geliştiği ortaya konmuştur.

Hazırlanan jeoloji haritası temel alınarak inceleme alanındaki formasyonların hidrojeolojik özellikleri arazi ve önceki çalışmalar ışığında belirlenmiş ve bölgenin 1/50 000 ölçekli hidrojeoloji haritası oluşturulmuştur. Bölgedeki şiddetli tektonizma ve gelişen karstlaşma, litolojik formasyonlarda ikincil geçirimliliğin gelişmesini sağlamıştır. KB-GD doğrultulu Tavşanburnu ve Karaada fayının oluşturduğu Bodrum grabeni sıcak su kaynaklarının çıkışını kontrol etmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen kavramsal hidrotermal modele göre Karaada jeotermal alandaki sıcak su akiferinin Kışladağı ve Pazardağı Formasyonları olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanında yeraltı ve yerüstü sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ortaya konabilmesi, dolayısıyla sıcak ve soğuk suların bağlı bulundukları yeraltısuyu sistemi, kökenleri ve birbirleri ile olan ilişkilerinin aydınlatılması amacıyla 2004 yılı Eylül ve 2005 yılı Nisan aylarında örnekleme ve ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Bölgedeki kaynak, kuyu ve deniz sularından alınan toplam 13 tane örneğin kimyasal analizleri Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Su Kimyası Laboratuvarı'nda, izotop analizleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)'da yapılmıştır.

İnceleme alanındaki suların hidrojeokimyasal özellikleri Piper diyagramındaki konumları ile saptanmış ve örneklerin tatlı sudan deniz suyuna geçiş zonunda dizildikleri belirlenmiştir. İnceleme alanındaki suların Schoeller, Piper, ABD tuzluluk ve Wilcox diyagramları çizilmiştir. Bu diyagramlara göre inceleme alanındaki sular kimyasal bileşimlerine (tuzluluk) ve kalitelerine göre başlıca 4 grupta toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla;

1-Yeraltısuyu (Ca-HCO₃ tipi sular)

2-Tuzlanmış yeraltısuyu (Na-Cl tipi sular)

3-Tuzlu sıcak ve mineralli su kaynakları (Na-Cl tipi sular)

4-Deniz suyu (Na-Cl tipi su) dur.

Wilcox ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramına göre; tuzlanmamış kuyu suları çok iyi-iyi ile iyi-kullanılabilir, C2-S1 ve Tuzlu kuyu suları şüpheli kullanılabilir sınıfındaki sular olup C3-S1, C4-S1 ve C4-S2 grubundadır.

İnceleme alanındaki sulara deniz suyu karışım oranı suların Cl derişimleri oranları ve Eİ-Cl diyagramı ile saptanmıştır. Buna göre Karaada sıcak ve mineralli su kaynağının rezervuar kayaçları başlıca deniz suyu (%98) ve az miktarda yeraltısuları (%2) tarafından beslenmektedir.

Karaada sıcak su kaynağı aragonit, kalsit ve dolomit minerallerine doygunudur. Bu durum, bu kaynağın bölgede yaygın olarak gözlenen kireçtaşlarından süzülen suların derin dolaşımda olan sularla beslendiğini göstermektedir.

Duraylı izotop içeriklerine göre bölgedeki soğuk su kuyuları için meteorik su doğrusu denklemi $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 22$ ve Karaada sıcak su kaynağı ile deniz suyu için $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$ olarak belirlenmiştir. Sıcak su kaynağı ile deniz suyunun Dünya Meteorik Su Doğrusu üzerinde yer alması bölgedeki jeotermal sistemin rezervuar kayaçlarının deniz suyu tarafından beslendiğini göstermektedir. Daha pozitif ^{18}O değeri sıcak su kaynağının derin dolaşımlı su olduğunu göstermektedir. Soğuk su kuyularının Doğu Akdeniz Meteorik Su Doğrusu üzerinde yer alması bölgede hakim yağışların hızlı buharlaşma etkisi altındaki Doğu Akdeniz kaynaklı atmosferik su buharınca oluştuğunu göstermektedir.

Rezervuar sıcaklığının belirlenmesi için uygulanan jeotermometre hesaplamalarında Karaada sıcak su kaynağının Giggenbach diyagramına göre "kısmen denge durumunda olan sular" sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Bu nedenle katyon jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıklarına göre silis jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıklarının daha güvenilir olduğu saptanmıştır. Sıcak su kaynağı silis jeotermometreleri ile yapılan hesaplamalara göre 38-60 °C rezervuar sıcaklığına sahiptir. Katyon jeotermometrelerin çok

yüksek sıcaklık değeri vermeleri deniz suyundaki yüksek Na ve K değerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle değerlendirme kapsamı dışında tutulmuştur.

Karaada dolayında jeotermal sistem açık hidrotermal sistem olduğundan Kışladağı Formasyonu içinde yeraltısuyu sıcaklığı 40-45 °C aralığında beklenmelidir. Pazardağı Formasyonu'nun derinlerdeki bölümlerinde daha yüksek sıcaklık değerleri (45-60 °C) beklenebilir.

Bodrum grabeninin batı uzanımında yer alan örtü kaya (Bodrum Formasyonu) bölümlerinde daha derinlerde sıcak su sistemi araştırılmalıdır. Daha yüksek sıcaklıkta ve debide sıcak ve mineralli su üretimi için araştırma kuyuları açılabilir.

Tavşanburnu yöresinde jeofizik rezistivite çalışmaları yapılarak sıcak ve mineralli su taşıyan kırık hatları ve derinlerdeki yayılımları araştırılmalıdır.

Deniz içinde sıcak su çıkışlarının olup olmadığını belirlemek için Karaada çevresi ve Bodrum arasında yeraltısuyunda ve mümkünse deniz içinde ve tabanında sıcaklık ölçümleri ayrıntılı bir şekilde yapılmalıdır.

Kaynağın çıkış noktasına yakın yapılan yapılar ve tesisler kaldırılarak, kaynak çevresinde hiçbir yapılaşmaya izin verilmemelidir. Kaynağın doğusunda belirlenecek bir alana modern tesisler yapılarak kaynaktan daha fazla kişinin sağlıklı bir şekilde faydalanması sağlanmalıdır.

Karaada'da bulunan sıcak ve mineralli sudan ilçe merkezindeki turistik tesislerin de yararlanabilmesi için iyi izole edilmiş boru hatlarıyla termal suyun taşınması yönünde bir fizibilite çalışması yapılabilir.

Kimyasal analizler sonucunda Yenкую keson kuyu suyunda az miktarda amonyum ve nitrat kirliliği görülmektedir. Bu da kuyu başı koruma önlemlerinin alınmayışından kaynaklanmaktadır. Deniz suyu karışımı nedeniyle sahile yakın olan birkaç kuyuda ağır metal içerikleri limit değerlerinin üstünde ölçülmüştür.

Bölgede tatlı su kaynağı olan kuyularda koruma önlemleri alınmalıdır. Bölgede yer alan bütün soğuk su kuyuları belirlenerek kontrollü bir şekilde işletilmeleri sağlanmalıdır.

8. KAYNAKLAR

- Akat, U., Öztürk, Z., Öztürk, E. M., Çağlayan, A., 1975, Menderes Masifi Güneyi SW Toros Kuşağı ilişkisi (Ön Rapor), MTA Enstitüsü Jeoloji Şubesi, MTA Rapor no 5488, 58s., Ankara.
- Allen, S.R., 2001, Reconstruction of a major caldera forming eruption from pyroclastic deposit characteristics: Kos Plateau Tuff, Eastern Eagean Sea, J. Volcanol. Geotherm. Res., 105, 141-162
- Altunkaynak, Ş. ve Yılmaz, Y. 2000, The Turgutreis Stratovolcano of the Bodrum, SW Anatoia, ISBN 975-441-178-6, P: 39-46, İzmir.
- Andic. T., 1982, Bodrum Yarımadası'nın Genel Jeokimyasal Etüdləri. MTA Ege Bölge Müdürlüğü Yayınları, No:Jş/4, İzmir
- APHA, AWWA and WPCF, 1989, Standart Methods For The determination Of Water And Waste Water, American Public Health Association Publication, 17th Ed., 1391 p., Washington.
- Appelo, C.A.J., and Postma, D., 1994, Geochemistry, Groundwater and Pollution, Balkema, Rotterdam, 536 p.
- Arnnorsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983, The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochimica et Cosmochimica Ağa, 47, 567-577.
- Baksan, M.E., Canik, B., 1984, AIH Map of mineral and thermal waters of Turkey Aegean Region, MTA No, 189, Ankara, 80 p.
- Bernouilli, D., Graciansky, P. C. and Monod, D., 1974, The extension of the Lycian nappes (SW Turkey) into the southeastern Aegean Islands, Eclo. Geol Helv., 67, 4-90.
- Bilgin, Z. R., Metin, Y., Çörekçioğlu, E., Bilgiç, T. Ve Şan, Ö., 1997, Bozburun-Marmaris-Köyceğiz-Dalaman (Muğla) dolayının jeolojisi, MTA Rap. 10008, Ankara
- Brinkmann, R., 1967, Die Südfan ke des Menderes massivs bei Milas, Bodrum und Ören, Ege Univ. Fen Fak. İlmi Rap., Seri., 43, 12 s.
- Burri, V.C., Tatar, Y. ve Weibel, M., 1967, Zur Kenntnis der Jungen vulkanite der Halbinsel Bodrum (SW-Turkei): Schweiz. Mineral. Petrog. Mitte., 47/2, 833-853.
- Canik, B., 1986, Bodrum Yarımadası'nın Doğu Yarısında Karst şekillerinin Oluşum ve Yeraltısuyundan Yararlanma İmkanları, DSİ Yayınları, Jeoteknik Seminer. İstanbul.
- Canik, B., 1983, Bodrum-Karaada sıcak su kaynağının hidrojeoloji incelenmesi, Gazi Üni. Mühendislik Mimarlık Fak., Ankara.

- Castany, G., 1969, Yeraltısuları Hakkında Pratik Uygulamalar, (çev. K. Karacadağ ve A. Şeber), DSİ Yayını, no 638, 692s
- Çağlar, K. Ö., 1950, Türkiye Maden Suları ve Kaplıcaları, MTA yayını, Seri B, No. 11, Ankara, 638s.
- Çağlayan, M.A., Öztürk, E.M., Öztürk, Z., Sav, H. ve Akat, U., 1980, Menderes Masifi güneyine ait bulgular ve yapısal yorum, Jeoloji Mühendisliği Derg., 10, 9-17.
- Çubukçu, E. H., 2002, Bodrum volkanizmasının petrolojik incelenmesi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Mühendislik Tezi, 200s, Ankara
- D'Amore F., and Arnorsson, S., 2000, Geothermometry. Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. Arnorsson, S. (ed.), IAEA, Vienna. pp.152-199.
- Dimitriadis, S., Kondopoulou, D., and Adsemoğlu, A., 1998, Dextral aotation and tectonomagmatik evolution of the southern Rhodope and adjacent regions (Greece), Tectonop physics, 299, 159-173
- Doğan, L., 1981, Hidrojeolojide su kimyası, DSİ yayınları, 178s, Ankara
- Dumont, J.F., Uysal, Ş., Şimşek, Ş. Karamanderesi, İ.H., ve Letouzey, J., 1981, Güneybatı Anadolu'daki grabenlerin oluşumu, Maden Tetkik ve Arama Enst. Derg., 92, 7-17.
- Ercan, T. Günay, E.ve Türkecan,A. 1984b. Bodrum Yarımadasındaki Magmatik Kayaçların Petrolojisi ve Kökensei Yorumu, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni,27: 85-98.
- Ercan, T., Türkecan, A., Günay, E., 1983, Bodrum Yarımadasının Jeolojisi ve Magmatik Kayaçların Petrolojisi, 68s., Ankara.
- Ercan, T., Türkecan, A., ve Günay, E., 1982a, Bodrum yarımadasının jeolojisi, Maden Tetkik Arama Enst. Derg., 97/98, 21-32.
- Ercan, T., Günay, E., Baş, H., Can., B., 1982b, Datça Yarımadasının Pliyo-Kuvaterner Jeolojisi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Ankara.
- Ercan, T., 1982c, Batı Anadolu'daki Pliyo-Kuvaterner yaşlı alkali bazaltik volkanizmanın kökensei yorumu, Jeomorfoloji Derg.
- Ercan, T., 1981b, Kula yöresinin jeolojisi ve volkanitlerinin Petrolojisi, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Yer Bilimleri Fakültesi, 165s, İstanbul.
- Ercan, T., 1981a, Batı Anadolu'daki Tersiyer volkanitleri ve Bodrum yarımadasındaki volkanizmanın durumu, İstanbul Yerbilimleri Derg., 2/3-4, 263-281.

- Ercan, T., Günay, E., Baş, H., ve Can, B., 1980b, Datça yarımadasının Neojen stratigrafisi ve volkanitlerin petrolojisi: Maden Tetkik Arama Enst. Rap. No. 6799, Ankara
- Ercan, T., 1980, Akdeniz ve Ege Denizindeki Pliyo-Kuvaterner ada yayı volkanizması, Jeomorfoloji Derg., 9, 37-59.
- Ercan, T., 1979, Batı Anadolu, Trakya ve Ege adalarındaki Senozoyik volkanizması, Jeoloji Mühendisliği Derg, 9, 23-46.
- Ersoy, Ş., 1991, Datça (Muğla) yarımadasının stratigrafisi ve tektoniği, Türkiye Jeol. Bült., 34/2, 1-14
- Filiz, Ş., Tarcan, G., Gemici, Ü., 1998, Bodrum Çevresinin Hidrojeolojik incelenmesi, Bodrum Yarımadası Çevre Sorunları Sempozyumu, 798 s 173-187 İzmir
- Flügel, H., and Metz, K., 1954, 1954 senesinde Bodrum ve Muğla bölgesinde yapılan Jeolojik Harita Hakkında Rapor, çev. Hayri Sonkur, MTA Rapor no 2799, 59s, Ankara.
- Fournier, R.O., 1991, Water geothermometers applied to geothermal energy. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development, D'Amore, F. (coord.), UNITAR/UNDP, Rome. pp. 37-69.
- Fournier, R.O., Potter, R.W. II, 1982, A revised and expanded silica (quartz) geothermometer, Geothermal Research Council Bull. 11, 3-9.
- Fournier, R.O., 1979a, A revised equation for the Na-K geothermometer. Geothermal Res. Council Trans. 3, 221-224.
- Fournier, R.O. and Potter, R.W. II, 1979b, Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer, Geochimica et Cosm. Acta. 43,1543-1550.
- Fournier, R.O., 1977, Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics. 5, 41-50.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H., 1973, An emprical Na-K-Ca geothermometer for natural waters, Geochimica et Cosm. Acta. 37,1255-1275.
- Freeze, R. A. And Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice - Hall, USA, 604p.
- Friedman, I., 1953, Deuterium content of natural water and other substances, Geochim. Cosmochim. Acta, 4, 89-103.
- Fritz, P. and Fontes, J. Ch., 1980, Handbook of Environmental Isotope Geochemistry (ed.), Elsevier Scientific Publ., The Netherlands.
- Gat, J.R., 1971, Comments on the Stable Isotope Method in Regional Groundvwater Investigations, , Water Resources Research, v.7, pp.980-993,

- Giggenbach, W. F., 1988, Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 55, 2749-2765.
- Giggenbach, W. F., 1981, Geothermal mineral equilibria, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 45, 393-410.
- Güleç, N., 1991, Crust-mantle interaction in western Turkey; implications from Sr and Nd isotope geochemistry of Tertiary and Quaternary volcanics. *Geol. Mag.*, 128 , 417-435
- Hem, J.D., 1989, Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, United States Geological Survey, Water -Supply Paper, 2254, Washington.
- Hem, J.D., 1985, Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, USGS Water Supply Paper 2254, US Gov. Print. Office, 263 p.
- Kaaden, G.V.D. ve Metz, K., 1954, Datça-Muğla-Dalaman çayı (SW Anadolu) arasındaki bölgenin jeolojisi: *Türkiye Jeol. Kurumu. Bült.*, 5/1-2, 71-170.
- Karakuş, H., 2004, Efteni bölgesi (Düzce)sıcak ve mineralli su kaynaklarının hidrojeokimyasal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 126 sayfa, Ankara,
- Kaya, O., and Savaşçın, Y., 1981, Petrologic significance of of the Miocene volcanic rocks in Menemen, West Anatolia. *Aegean Earth Sciences*, 1/1-2, 45-58.
- Keller, J., Rehren, T.H., and Standlbauer, 1989, Explosive volcanism in the Hellenic Arc, a summary and review, Thera and the Aegean World III, V.2 *Earth Sciences*, 3-9 September 1989, Proceedings of the Thirt International Congress, Santorini. Pp13-56
- Kharaka, Y. K., Lico, M.S. and Law, L.M., 1982, Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 66, 558.
- Kurtaş, T., 1997, Gökova (Muğla) karst kaynaklarının çevresel incelenmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 220s, Ankara.
- Kurt, H., Arslan, M., 2001, Bodrum (GB Anadolu) Volkanik Kayaçlarının Jeokimyasal ve Petrolojik Özellikleri: Fraksiyonel Kristalleşme, Magma Karışımı ve Asimilasyona İlişkin Bulgular, *Yerbilimleri*, Sayı no 23, ISSN 1301-2894, P.15-32, Ankara
- Le Pichon, X., and Angelier, J., 1981, The Aegean Sea, *Phil. Trans. R. Soce.*, London, A300, 357-372
- Meşhur, M., Yoldemir, O., Akpınar, M., Öztaş, T., Aklan, H., 1995, Batı Toroslar'ın Jeolojisi ve Petrol Olanakları, TPAO, Arama Grubu Başkanlığı, Ankara

- McNeely, R.N., Neimanis, V.P. and Dwyer, L., 1979, Water Ouality Sourcebook, a Guide to Water Ouality Parameters, Inland Waters Directorate, Water Ouality Branch, Ottawa, 88p
- MTA, 2000, Türkiye Jeotermal Envanteri, MTA, Ankara
- Montigny, R., and Robert, U., 1991, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating on igneous rocks from the Bodrum Volcanic Complex (SW-Turkey), Terra Abstracts, EUG VI, Strasbourg, 3,p.500
- Nieva, D. And Nieva, R., 1987, Development in geothermal energy in Mexico, part 12-A cationic compositiongeothermometer for prospecting of geothermal resources, Heat recovery systems and CHP. 7, 243-258.
- Orombelli, G., Lozej, G.P., Rossi, L.A. ve desio, A., 1967, Preliminary notes on the geology of the Datça peninsula (SW Turkey): Accad. Naz. dei. Line., 42, 830-841.
- Özçiçek, H. ve Özçiçek, B., 1977, Muğla-Bodrum-Karatoprak dolayının Cu-Pb-Zn cevherleşmesi ve ayrıntılı jeoloji etüdü: Maden Tetkik ve Arama Ens. Derleme Rap. No: 6541
- Özgül, N., 1976, Toroslar'ın bazı temel jeoloji özellikleri, Türkiye Jeoloji Kur. Bült, 19/1, 65-78.
- Parkhurst, D.L. and Appelo C.A.J., 1999, User's guide to PHREEOC (Version 2) - a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, USGS Water Resources Investigation Report 99-4259, 312p.
- Pichler, H., and Kussmaul, S., 1972, The calc-alkaline volcanic rocks of Santorini group (Aegean sea, Greece), N. Jb. Miner. Abh, 116, 268-307.
- Pişkin, Ö., 1980, Kadıkalesi-Girelbelen (Bodrum yarımadası) hidrotermal ve kontakt metasomatik Pb, Zn, Cu cevherleşmelerinin mineralojik ve jeolojik incelenmesi, Doçentlik tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Philippson, A., 1915, Reisen und forschungen im westlichen Kleinasien: Pet. Mitt. Erç. Heft 167, Gotha.
- Robert, U. and Cantagrel J.M., 1977, Le volcanisme basaltique dans le sud-est de la mer Egee; Donnees geochronologiques et relations avec la tectonique: VI. Colloquium on the Geology of the Aegean Region.
- Robert, U., 1976, Donnees nouvelles sur i'le volcanisme du Sud-Est de la Mer Egee; Existenced 'un episode a caractere alcalin: Inter Cong. on Therm. Wat Geoth. Ener. and Vulcan. of the Medit. Area. Atina, 211-224.
- Rossi, L.A., 1966, La geologia della peninsula di Datça (Turchia): Doktora tezi, Milano Univ., italya, 184 s.

- Savaşçın, M.Y., 1991, Magmatic activities of Cenozoic compressional and extensional tectonic regimes in Western Anatolian. Proc. Int. Earth Sci. Congr. on Aegean Regions, İzmir, Turkey, 420-434
- Savaşçın, M.Y., 1981, Batı Anadolu (Ege Kıyı Şeridi) genişleme tektoniği ve genç alkali magmatizma. Türkiye Jeoloji Kurumu 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı Tebliğler kitabı., 36-37.
- Savaşçın, Y., 1978, Foça-Urla Neojen volkanitlerinin mineralojik, jeokimyasal incelenmesi ve kökensel yorumu, Doçentlik tezi, Ege Univ. Yerbilimleri Fak., 64 s., İzmir.
- Seyitoğlu, G., Scott, B.C., 1996, The cause of N-S extensional tectonics in Western Turkey; Tectonic escape vs back-arc spreading vs orogenic collapse, J. Geodynamics, 22, 145-153
- Şahinci, A., 1991, Doğal Suların Jeokimyası, Reform Matbaası, Beyler-İzmir.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Kuşçu, İ. 1992, Türkiye Diri Fay Haritası, MTA, Ankara.
- Şenel, M. ve Bilgin, Z. R.: 1997, 1:100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Marmaris- L4 ve L5 Paftaları, MTA, NO 18, Ankara
- Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y., 1981, Türkiye’de Tetis’in evrimi, Levha tektoniği açısından bir yaklaşım, Türkiye Jeol.kur. Yerbil. , Özel dizi, No: 1, 75s
- Şengör, A.M.C, 1980, Türkiyenin neotektoniğinin esasları, Türkiye Jeoloji Kurumu Yayını, 40 s. Ankara.
- Şimşek, Ş., 2001, Research on isotope techniques for exploitation of geothermal reservoirs in Western Turkey, IAEA Research Contract No, 9828/R2.
- Tonani, F., 1980, Some remarks on the application of geochemical techniques in geothermal exploration. Adv. Eur. Geoth. Res. Second Symp. , Strasbourg, pp. 428-443.
- Truesdell, A.H. and Hulston, J.R., 1980, Isotopic evidence of environments of geothermal sytems. Handbook of Environmental isotope Geochemistry. Fritz, P. and Fontes J. Ch. (eds.), Vol.1, The Terrestrial Environment, Elsevier, pp. 179-226.
- Truesdell, A. H., 1976, Summary of section III geochemical techniques in exploration. Proc. of Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 1975, San Francisco, U.S. Gov. Print. Office, pp. 53-79.
- TSE, 1997, Türk Standartları, İçme Suları, TS 266, Ankara.
- Unterweger, M.P., Lucas, L.L., 2000, Calibration of the National Institute of Standards and Technology tritiated-water standards, Applied Radiation and Isotopes USA

- UKAM 2001, Datça-Bozburun Çevre Koruma Bölgesi Su Kaynakları Yönetimi, ÖÇKB Projesi, Ankara
- Vengosh, A., Karamandere, İ. H., Helvacı, C., 2001, Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey, *Applied Geochemistry* 17, 163-183.
- Wendt, I., Raschko, H., Lenz, H., Kreuzer, H., Hohndorf, A., Harre, W., Wagner, G.A., Keller, J., Altherr, R., Krush, M., Schliestedt, M. and Seidel, E., 1976, Radiometric dating of crystalline rocks from Cyclades (Aegean sea, Greece): 4th. Evr. Coll of Geochr. Cosm. and isotope Geol. ECOGN, Amsterdam., 48-61.
- WMO, 1974, Guide to Hydrological Practices, Publ. no. 168, Geneva.
- Yenal, O., Umsan, N., Bilecen, L., Öz, G., Öz, Ü., 1971, İstanbul Üniversitesi Tıp Fakültesi Hidro-Klimatoloji Kürsüsü, Türkiye Maden Suları, Ege Bölgesi cilt no 3, 352 sayfa
- Yılmaz, Y., 1990, Comparison of young volcanic associations of western and eastern Anatolia formed under a compressional regime, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 44, 69-77
- Yılmaz, Y., ve Şengör, A.M.C., 1982, Egede kabuk evrimi ve neomagmatizmanın kökeni: Türkiye

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kemal KOÇ

Doğum Yeri : Ardahan

Doğum Yılı : 1974

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1990-1993

Lisans 1998-2002

Yabancı Dil: İngilizce

İş Tecrübesi:

19....-19...

19....-19....