

**BAYATCIK JEOTERMAL ALANININ (AFYONKARAHİSAR)
HİDROJEOLÖJİK VE HİDROJEOKİMYASAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seray DUYSAK

Danışman

Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

JEOLÖJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

Bu tez çalışması 17 FEN.BİL.46 numaralı proje ile AKÜ BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAYATCIK JEOTERMAL ALANININ (AFYONKARAHİSAR)
HİDROJEOLÖJİK VE HİDROJEOKİMYASAL OLARAK
İNCELENMESİ

Seray DUYSAK

Danışman
Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

JEOLÖJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Seray DUYSAK tarafından hazırlanan “Bayatcık Jeotermal Alanının (Afyonkarahisar) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 20/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Başkan : Prof. Dr. Ahmet YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ
Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Metin BAĞCI
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza



Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/06/2019



Seray DUYSAK

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**BAYATCIK JEOTERMAL ALANININ (AFYONKARAHİSAR) HİDROJEOLJİK
VE HİDROJEOKİMYASAL OLARAK İNCELENMESİ**

Seray DUYSAK
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Bu çalışma Bayatcık bölgesi ve çevresinde yer alan jeotermal sistemin hazne ve örtü kayalarının tipini, beslenme alanını ve ısı kaynağını belirlemek jeotermal suların kimyasal kompozisyonunu, kökenini, yeraltındaki sirkülasyon sürelerini, rezervuar sıcaklığını, su-kayaç etkileşimini, mineral doygunluklarını saptamak ve jeotermal sahanın kavramsal hidrojeokimyasal modelini kurmaktır. Bayatcık jeotermal sahasında Oyuklutepe mermerleri bölgede yer alan en önemli rezervuar kayacı oluşturmaktadır. Bayramgazi şistleri geçirimsiz temel birimi oluştururken, Miyosen yaşlı volkanosedimanter birimler ise örtü kayaç özelliğindedir. İnceleme alanının kuzeyinde ve daha yüksek rakımdan beslenen Ömer-Gecek termal suları ile bu bölgede reenjeksiyonu yapılan sular, havza içinde Güneydoğu yönünde hareket ederek soğuyarak Bayatcık bölgesindeki sondajlarla tekrar yüzeye çıkarlar. İnceleme alanındaki termal akışkanlar genellikle Na-Ca-HCO₃-Cl tipinde sulardır. Uygulanan jeotermometre yöntemlerine göre Bayatcık jeotermal alanında akifer sıcaklığının ~82°C–106°C arasında olduğu hesaplanmıştır. Yapılan izotop analizleri sonucu suların 0.47 TU'dan daha az olanların trityum içerdiği ve bu suların yaşlarının 55 ve üzeri olduğu; 0,47 TU civarında olanların ise yaşlı sular ile güncel meteoorik suların karışımı olduğu bulunmuştur.

2019, ix + 86 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bayatcık, Hidrojeoloji, Hidrojeokimya, Jeotermal

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**HYDROGEOLOGICAL AND HYDROGEOCHEMICAL INVESTIGATION OF
BAYATCIK (AFYONKARAHISAR) GEOTHERMAL AREA**

Seray DUYSAK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Ahmet YILDIZ

The purpose of this study is to determine the type of the cap and aquifer rocks; origin, heat source and chemical composition of the water, circulation time underground, reservoir temperature, water-rock interaction, mineral density and also to make a conceptual hydrogeochemical model of the area. Oyuklutepe marble is the most important reservoir rock in the region. While Bayramgazi schist forms the impermeable basic unit, volcano-sedimentary unit from the miocene epoch forms the cap rocks. Originating to the north and at higher altitudes of the study area, Ömer-Gecek thermal waters follow the fault fractures, then move into the Bayatcik region and become enriched with Ca & HCO₃. Thermal fluids in the study area is generally Na-Ca-HCO₃-Cl type. Results of the applied geothermometer methods show that aquifer temperatures is around between ~ 82°C-106°C. Isotope analyses show that waters that have 0.47 TU, contains tritium, and these waters are 55 years or older; waters that have around 0.47 TU is a mixture of old and recent waters.

2019, ix+ 86 pages

Keywords: Bayatcik, Hydrogeology, Hydrogeochemistry, Geotherma

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ‘Bayatcık Jeotermal Alanının (Afyonkarahisar) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Olarak İncelenmesi’ Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi 17 FEN.BİL.46 numaralı proje ile desteklenmiştir. Tez çalışmamda maddi desteklerinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması kapsamında, tez konumun seçilmesi, planlanması, yürütülmesinde beni yönlendiren, yazım sürecinde yardımlarını esirgemeyen bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet YILDIZ’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın planlanması, araştırılması, yürütülmesi, arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve yazım aşamalarında yardımını hiç esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Arş. Grv. Dr. Can BAŞARAN hocama sabrından ve verdiği emeklerden dolayı çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın veri temini, arazide gerçekleştirilen örnekleme çalışmalarında değerli katkılarından dolayı arkadaşım Sayın Bekir ÇENGELCİ’ye (AFJET-Jeofizik Mühendisi) teşekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatım boyunca beni destekleyen karşılaştığım her zorluğu aşmamda bana sabırla yardım eden, tez çalışmamda maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında ve halen çalışmakta olduğum UMUT ÇEVRE VE İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİM SAĞLIK HİZ. TİC. LTD. ŞTİ. Ünvanlı kurumda İşveren Hasan ÇELİK ve Mesul Müdür Orçun YILDIRIM’a gösterdikleri iyi niyet ve manevi desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Seray DUYSAK
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	11
1.1 Çalışmanın Amacı.....	11
1.2 Çalışma Alanının Yeri	11
1.3 Yerleşim Merkezleri ve Ulaşım	11
1.4 İklim ve Bitki Örtüsü	11
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	13
3. MATERYAL ve METOT	20
3.1 Literatür Çalışmaları	20
3.2 Saha Çalışmaları	20
3.2.1 Jeolojik ve Hidrojeolojik Çalışmalar	20
3.2.2 Örnekleme ve Yerde Ölçüm Çalışmaları.....	20
3.2.3 Analiz.....	21
4. JEOLJİ.....	23
4.1 Genel Jeoloji	23
4.2 Çalışma Alanının Jeolojisi	24
4.2.1 Afyon Metamorfitleri.....	24
4.2.1.1 Bayramgazi Şistleri.....	26
4.2.1.2 Oyuklutepe Mermerleri.....	26
4.2.2 Ömer Gecek Formasyonu.....	26
4.2.2.1 Başçakmaktepe Konglomasası.....	26
4.2.2.2 Köprülü Volcano-Sedimanter İstifi	27
4.2.2.3 Seydiler Tuf ve Aglomasası	27
4.2.3 Volkanizma.....	28
4.2.3 Kuvarterner	28
4.2.3.1 Alüvyon	28

4.3 Tektonizma	28
4.3.1 Demirçevre (Erkmen) Fayı.....	29
4.3.3 Gecek Fayı.....	29
5. HİDROJEOLOJİ	31
5.1 Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri	31
5.2.1 Geçirimli Birimler	31
5.2.1.1 Oyuklutepe Mermerleri.....	31
5.2.1.2 Başçakmaktepe Konglomerası.....	31
5.2.1.3 Alüvyon	31
5.2.2 Yarı Geçirimli Birimler	33
5.2.2.1 Kocatepe Trakiti	33
5.2.2.2 Seydiler Tüf ve Aglomerası.....	33
5.2.3 Geçirimsiz Birimler	33
5.2.3.1 Bayramgazi Metamorfitleleri.....	33
5.2.3.2 Köprülü Kilitaşı–Marn–Tüf Üyesi.....	33
5.3 Bayatcık Jeotermal Sahası	33
5.4 Su Noktaları	34
5.4.1 Yüzey Suları	34
5.4.2 Soğuk Su Sondajları.....	35
5.4.3 Soğuk Su Kaynakları	35
5.4.4 Sıcak Su Sondajları.....	36
5.5 Su Örnekleme Noktaları	36
5.6 Suların Fiziksel Özellikleri	36
5.6.1 Sıcaklık (°C)	38
5.6.2 Elektriksel İletkenlik (EC-µS/cm)	40
5.6.3 Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH) ve Redoks Potansiyeli (Eh)	41
6. HİDROJEOKİMYA.....	42
6.1 Suların Kimyasal Özellikleri	42
6.2 Hidrojeokimyasal Sınıflandırma.....	49
6.2.1 Suların Hidrojeokimyasal Fasiyes Kavramına göre Sınıflandırılması.....	49
6.2.2 Suların Piper Sınıflaması	51
6.2.3 Schoeller Sınıflandırması.....	52
6.2.4 Cl-SO ₄ -HCO ₃ Sınıflaması	55
6.2.5 Suların Doyma İndeksleri	55
7. İZOTOP JEOKİMYASI.....	59

7.1 ^{18}O -D İlişkisi.....	59
7.2 ^3H (trityum) İçeriği	61
8. JEOTERMOMETRE	63
8.1 Kimyasal Jeotermometreler	63
8.1.1 Niteliksel (Kalitatif) Kimyasal Jeotermometreler.....	63
8.1.2 Sayısal (Kantitatif) Kimyasal Jeotermometreler.....	65
8.1.2.1 Çözünürlüğe Bağlı Jeotermometreler	65
8.1.2.2 İyon Değişimine Bağlı Katyon Jeotermometreleri	67
8.3 Birleşik Jeotermometre Uygulamaları	69
9. TARTIŞMA	71
10. SONUÇLAR	74
11. KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

pH	Hidrojen iyon aktivitesi
Eh	Redoks potansiyeli
EC	Elektriksel iletkenlik
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
%	Yüzde
‰	Binde
km	Kilometre
m	Metre
mm	Milimetre
m^3	Metreküp
ml	Mililitre
vd.	Ve diğerleri
cm	Santimetre
sn	Saniye
lt	Litre
meq/l	Miliekivalan/litre
log	Logaritma
μ	Mikron
β	Beta
α	Alfa
δ	Delta
λ	Lamda
mg/lt	Miligram/litre
Mv	Milivolt
μs	Mikrosiemens
TU	Trityum unit
ppm	Parts per million
VSMOW	Vienna standart mean ocean water
D	Döteryum
^3H	Trityum

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
AFJET	Afyon Jeotermal Turizm ve Ticaret Anonim Şirketi
DSİ	Devlet Su İşleri
MTA	Maden Teknik Arama
IAH	International Association of Hydrogeologists
TSE	Türk Standartlar Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Çalışma alanı yerbuldur haritası.....	12
Şekil 3.1 Yerinde ölçüm çalışmaları.....	21
Şekil 3.2 Yerinde ölçüm çalışmaları.....	21
Şekil 3.3 Örneklerin analize hazırlanması.....	22
Şekil 3.4 Örneklerin analize hazırlanması.....	22
Şekil 4.1 Türkiye ve çevresinin tektonik konumu.....	23
Şekil 4.2 İnceleme alanının jeoloji haritası.....	25
Şekil 4.3 İnceleme alanının tektonik haritası.....	29
Şekil 5.1 İnceleme alanının hidrojeoloji haritası.....	32
Şekil 5.2 Bayatcık jeotermal sahası oluşum şekli.....	35
Şekil 5.3 Su örnekleme noktaları.....	37
Şekil 5.4 Örnekleme noktaları ve yerinde analiz çalışmaları.....	38
Şekil 5.5 İnceleme alanı sularının EC-toplam iyon grafiği.....	41
Şekil 6.1 Analizi yapılan su örneklerinin pie diyagramı.....	51
Şekil 6.2 Su örneklerinin piper diyagram konumu.....	53
Şekil 6.3 Su örneklerinin yarı logaritmik Schoeller diyagramı.....	54
Şekil 6.4 Su örneklerinin Cl-SO ₄ -HCO ₃ diyagramı.....	56
Şekil 6.5 Su örneklerinin sıcaklık-doygunluk diyagramı.....	59
Şekil 7.1 Su örneklerinin ¹⁸ O-D diyagramındaki konumu.....	62
Şekil 8.1 Su örneklerinin Giggenbach diyagramı.....	71
Şekil 9.1 İnceleme alanı sularının Cl-iyon grafikleri.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 5.1 İncelenen su örneklerinin fiziksel özellikleri.....	39
Çizelge 5.2 TSE (1985) Standartlarına göre termal suların sınıflandırılması.....	39
Çizelge 5.3 Bogomolow’a göre sıcak suların sınıflandırılması.....	40
Çizelge 6.1 İncelenen örneklerin kimyasal analiz sonuçları sonuçları.....	43
Çizelge 6.2 Bayatcık jeotermal suların IAH (1979)’a göre su tipi sınıflaması.....	51
Çizelge 6.3 Klorür, sülfat ve karbonat miktarlarına göre suların sınıflaması	55
Çizelge 6.4 İnceleme alanındaki termal suların doygunluk indisleri.....	58
Çizelge 7.1 ¹⁸ O-D izotop analizi yapılan örnekler ve analiz sonuçlar.....	62
Çizelge 7.2 ³ H izotop analizi yapılan örnekler ve analiz sonuçları.....	63
Çizelge 8.1 Akifer sıcaklıklarının tespit edilmesi için kullanılan bazı silis jeotermometreleri.....	67
Çizelge 8.2 Silis jeotermometre sonuçları	68
Çizelge 8.3 Akifer sıcaklığı tespit edilmesinde kullanılan jeotermometre denklemlerinden bazıları.....	69
Çizelge 8.4 Katyon jeotermometre sonuçları.....	70

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmış olan bu çalışmanın amacı Afyonkarahisar ili Bayatcık bölgesi ve çevresinde yer alan jeotermal sistemin hazne ve örtü kayalarını, beslenme alanını ve ısı kaynağını belirlemek, jeotermal suların kimyasal kompozisyonunu, kökenini, yeraltındaki sirkülasyon sürelerini, rezervuar sıcaklığını, su-kayaç etkileşimini, mineral doygunluklarını saptamaktır. Erişilmek istenen sonuç jeotermal sahanın kavramsal hidrojeokimyasal modelini kurmak ve bu yolla jeotermal akışkandan yararlanma türleri ve sahanın geliştirilme çalışmalarında yol gösterici olmaktır.

1.2 Çalışma Alanının Yeri

Çalışma alanı Afyonkarahisar ili şehir merkezine 8 km uzaklıkta olup 1/25 000 ölçekli haritada K24B3, K25A4 sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1.1).

1.3 Yerleşim Merkezleri ve Ulaşım

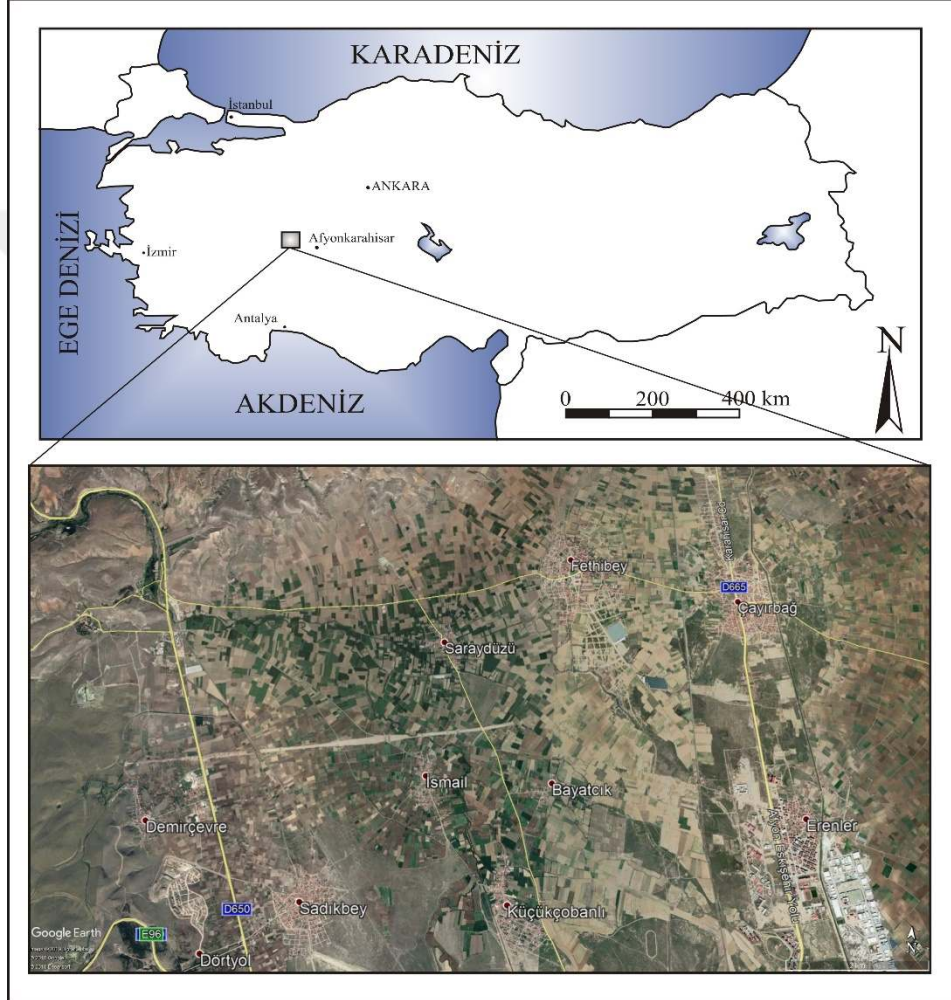
Afyonkarahisar il merkezine bağlı Bayatcık bölgesi Erenler, Küçükçobanlı, İsmailköy, Saraydüzü, Fethibey, Çayırbağ gibi önemli yerleşim merkezleri ile çevrelenmiştir. Afyon Kocatepe Üniversitesi kampüsü arkasında yer almaktadır. Bayatcık köyüne Afyonkarahisar-Eskişehir karayolu üzerinden Bayatcık köy yolu takip edilerek ulaşım sağlanmaktadır. Köye ulaşımı sağlayan asfalt yol bulunmaktadır.

1.4 İklim ve Bitki Örtüsü

Afyonkarahisar merkezi ve Merkez ilçesinde yer alan Bayatcık köyünde karasal iklim hakimdir. Karasal iklimin yanı sıra Ege Denizi'nden gelen ve iklimi az da olsa yumuşatan hava etkisi görülmektedir. Yazları sıcak ve kurak, baharları ılık ve yağışlı, kışları soğuk

ve kar yağışlı geçmektedir. Deniz seviyesinden yüksekliği 1021 m olup yıllık sıcaklık ortalaması 11.2 derece ve yıllık yağış ortalaması 461 mm'dir (İnt.Kyn.1).

Afyonkarahisar'ın tabii bitki örtüsü kara ikliminin elverdiği kuru orman topluluklarıdır. Dağlık alanlarda hüküm süren ormanlıklar düzlüklerde ortadan kalkmıştır. Ovalık alanlar bozkır görünümü almıştır. Yüksek dağlık kesimlerde Karaçam ve Ardıç ormanlıkları yer alırken ovalar tamamen açıktır.



Şekil 1.1 Çalışma alanı yerbulduru haritası.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Genel jeoloji, Yapısal Jeoloji ve Tektonizma;

Başarır ve Kun (1982), Afyonkarahisar ili ve çevresinde incelenen volkanik kayaların alkali bileşiklerce zengin olmasının yanında, daha az silis ve daha fazla MgO içerdiklerini belirtmişlerdir. Afyonkarahisar kalesinin üzerinde yer aldığı lavları trakiandezit olarak isimlendirmişlerdir.

Bozkurt (2000), tarafından Ege-Anadolu bloğunun bir bütün halinde batıya hareket ettiği, bunun sonucu olarak Anadolu levhasının, Karadeniz levhasına göre batıya kaydığı, Batı Anadolu'nun D-B doğrultusunda sıkıştığını, K-G yönünde ise genişlediğini savunmuştur.

Boyacı (1996), tarafından Afyonkarahisar Bayat bölgesinde yapılan çalışmalar sonucunda bölgede birçok metamorfizma olayı gerçekleştiği saptanmış, Metamorfitler alttan üste doğru sırasıyla Doğan şistleri, Çakmak kuvarsiti, Deliktaş metakonglemerası, Ballica filliti ve en üst İscehisar mermerinden oluşan bir litoloji sergilediği belirtilmiştir.

Ercan (1985), Afyon ve civarının Miyosen zaman dilimine ait volkanizmaya sahip olduğu Afyon ve dolaylarındaki volkanik kayaların esas olarak manto kökenli bazaltik ve trakibazaltik türde olup, yer yer de melez kabuk-manto karışımı latit türde lavlardanda oluştuğunu ve ayrıca Afyon volkanitlerinin aşırı yüksek potassik bir volkanik seriyi oluşturduğunu belirtmiştir.

Harut (1995), Afyonkarahisar Erkmen dolaylarında yaptığı çalışmada Erkmen volkanitlerinin trakiandezit ve trakit arasında değişen bir yapıya sahip olduğunu saptamıştır. Jeokimyasal çalışmalar sonucunda volkanitlerin alkali özellikli potasyumlu ve yüksek potasyumlu kayalar olduğunu saptamıştır.

Koçyiğit (1984), bu çalışmasında genişlemeli neotektonik rejimin ve ilgili graben-horst yapılarının Tuz Gölü'ne kadar etkin olduğunu; özellikle Isparta bukümü ve Konya çöküntüsünün de aktif genişlemeli rejimin denetiminde geliştiğini ortaya koymuştur.

Genişlemeli neotektonik rejimin büyük boyutlu yapılarından birinin de sismojenik bir kuşak özelliğinde olan yaklaşık KB-gidişli Akşehir-Simav çöküntüsü olduğunu, bu kuşağı temsil eden ana yapılardan birinin Akşehir grabeni ve onun güney kenarını denetleyen normal bir fay (Akşehir fayı) olduğunu belirtmiştir.

Koçyiğit ve Deveci (2007), Çobanlar-Çukurören sismik boşluğu içinde değişik boyutta 11 graben, 6 horst ve 2 adet alt horst yapısının varlığını tespit ederek isimlendirmiş ve özelliklerini anlatmışlardır. Yazarlar, bu sismik boşluğun deprem tehlikesi haritasının hazırlanmasında temel olarak kullanılacak olan deprem kaynaklarını (faylar) ve bu faylardan kaynaklanacak en büyük deprem büyüklüklerini saptamışlardır.

Metin vd. (1987), Afyonkarahisar ili ve çevresinin genel jeolojisini inceleyerek volkanizma ve volkanik kayalar ayırmaksızın, Kuzey ve Güney volkanitlerine ait piroklastitleri Seydiler volkanik kül ve aglomeraları olarak tanımlayıp lavlarında andezit ve trakit olarak isimlendirmiştir.

Nalbantçılar (1994), tarafından Sultandağı masifinin kuzeybatı bölgesi jeolojisinin allokton, otokton ve neotokton masiflerinden oluştuğu belirlenmiştir. Etkinlik gösteren genç–tektonik hareketlerin mevcut horst görünümünü almasında önemli rol oynadığı belirtilmiştir.

Okay (1984), Batı Anadolu’da, Anatolid-Torid Tektonik Birliği’nde Anatolidler’e karşılık gelen “Kütahya-Bolkardağı Kuşağı’nı”, kuzeyden güneye azalan metamorfizma koşulları ve tektonik ilişkisini değerlendirerek; mavişist fasiyesi koşullarında metamorfizma geçirmiş “Tavşanlı zonu” ve yeşilşist fasiyesi koşullarında metamorfizma geçirmiş “Afyon Zonu” olmak üzere iki alt zona ayırmıştır.

Öktü vd. (1997), Ömer-Gecek bölgesinde kuzey ve güney doğrultusunda metamorfik serinin yüksekte kalan basamaklı bir kesit görünümü, batıdan doğuya doğru ise derinlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Belirtilen duruma bağlı olarak sıcak su akiferinin derinliğinin önemli değişimler gösterdiğini söylemişlerdir.

Tolluoğlu vd. (1997), Afyon zonunda sedimanter kökenli Afyon metamorfiklerini iki gruba ayrılabilirliğini belirtmişlerdir. Afyon Metamorfikleri ile Anadolu karbonat platformunun oluşturduğu istifi Afyon Metasedimanter Grubu olarak isimlendirmişler ve bu istifin Mesozoyik öncesi dönemde evrimini tamamladığını bildirmişlerdir.

Yağmurlu vd. (1997), Isparta bükümünü aktif tektonik ve alkalın volkanizma açısından incelenmiştir. Kuzeyde güneye doğru gençleşen bir volkanizmanın olduğunu belirtilmiştir. Volkanizmanın alkalın ve hiperalkalın olarak ayrıldığını ve latitik, trakitik, lösitik ve lamproitik karakterli kayaçların bölgede yüzeylediklerini belirtmişlerdir. Üst Miyosen-Alt Pliyosen’de K-G yönündeki horst-graben yapılarına paralel volkanizmanın geliştiğini, Afyon bölgesindeki volkanizmanın dalma-batma prosesi ile ilişkin kompresyonel rejimle geliştiğini, Isparta’da ise, daha genç volkanizmanın grabenlerin K-G doğrultulu faylarla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Hidrojeoloji, Hidrojeokimya, Jeotermal;

Akan (2002), tarafından yapılan bu çalışma ile Afyonkarahisar Ömer-Gecek sıcak su akiferinin hidrojeolojik modellemesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda açılacak olan sondajların birbirlerinden uzak alanlarda ve düşük debilerle çalışması sıcaklık düşüşlerine neden olabilecek önemli bir unsur olduğu ifade edilmiştir.

Akdemir (2015), Afyonkarahisar Çöl (Haydarlı) ovasının hidrojeolojik incelemesini yapmış ve bölgedeki su örneklerinin Ca-HCO₃ bileşimli olduğunu belirlemiştir. Bölgede tarımsal amaçlı su çekiminin fazla olması sebebiyle yeraltı sularının nitrik içeriklerinin arttığını söylemiştir.

Akkuş vd. (2006), Afyon ilindeki jeotermal suların sodyum, sülfat, magnezyum, bikarbonat ve klorürlü termal sular olduğunu ifade etmişlerdir. Jeotermal kaynak alanlarını koruma amaçlı fikirler geliştirmişlerdir.

Aksever (2011), tarafından Afyonkarahisar Sandıklı ilçesinin hidrojeolojik incelemesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sandıklı bölgesinde tarımsal amaçlı çekilen

suların fazla olması bir risk olarak değerlendirmiştir. Ayrıca emniyetli yeraltı suyu kullanımı miktarı $41,62 \times 106 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak tespit edilmiştir. Yapılan hidrojeokimyasal analizlerde suların Ca-Mg-HCO₃ içerikli olduğunu tespit etmişlerdir.

Başaran (2017), Afyonkarahisar Heybeli jeotermal alanında hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal çalışmalar yapmıştır. İnceleme alanında alınan su numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucu sıcaklık değerlerinin 28,9°C-54,7°C arasında değişkenlik gösterdiği, su içeriğinde Na-Ca-HCO₃-SO₄ olduğunu tespit etmiştir. İnceleme alanında kalsit, dolomit, kalsedon, aragonit gibi kabuklaşma yapıcı çökelimlerin varlığını gözlemlemiştir.

Çakmakçı (1999), Bu çalışmada coğrafi bilgi sisteminin hidrojeolojik araştırmalarda elde edilen verilerin kullanım alanları, depolama alanları, kullanılan bilgisayar yazılım programları saptanarak bu programın hidrojeoloji alanında kullanımını değerlendirmektedir. Yapılan çalışmada örnek bölge olarak Akarçay havzası seçilmiştir. Akarçay havzasında elde edilen çalışma sonuçları ile Türkiye genelinde yapılacak olan çalışmalara ışık tutmak hedef edinilmiştir.

Dağ (2012), Afyonkarahisar Sandıklı Hüdai jeotermal alanında kireçtaşı, traverten, çakıltası, alüvyon, kumtaşı, kuvarsit, dolomit, şeyl, silttaşı, marn birimlerinin var olduğu belirtilmiştir. Bölgeden alınan su numuneleri üzerinde hidrokimyasal ve izotopik analizler yapılarak elde edilen sonuçlarla, suların 3 farklı hidrokimyasal fasiyeste olduğu tespit edilmiştir. Bunlar Ca-Mg-HCO₃, Ca-Mg-SO₄, Na-Ca-SO₄-HCO₃'dir. İnceleme alanındaki soğuk suların kısa ve sık kökenli, jeotermal suların ise uzun ve derin süreçler içerdiği tespit edilmiştir. Genel olarak bölge jeotermal sularının 27°C-107°C arasında değişim gösterdiği ifade edilmiştir.

Doğdu ve Bayarı (2002), Afyon-Akarçay Havzası'nda Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli jeotermal alanlarının soğuk yeraltı sularını jeotermal kökenli kirlenme açısından araştırmışlardır. Termal suların Na-Cl, soğuk suların ise Ca-HCO₃ karakterli olduğunu belirten yazarlar termal su karışımının göstergesi olarak kullanılan Na+K, Cl, Li, B, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik parametrelerinin alansal dağılımının soğuk yeraltı

suyundaki kirlenmenin jeotermal alanlara yakınlık olduğunu tespit etmişlerdir.

Memiş (2010), Bu çalışmada Afyonkarahisar Sandıklı Hüdai kaplıcaları bölgesinde jeotermal suların hidrojeokimyasal özellikleri ve iz element kirliliği incelenmiştir. Bölge metamorfik sedimanter ve volkanik kayaç oluşumu sunmakta olup, Hüdai jeotermal rezervuar kayacı kuvarsit olduğu gözlenmiştir. İnceleme alanında alınan su numunelerinde yapılan çalışmalar sonucu jeotermal suların Na-SO₄-HCO₃, yeraltı sularının Ca-HCO₃ içerikli olduğu tespit edilmiştir. İz element incelemelerinde herhangi bir kirlilik gözlenmediği, iyon değişim diyagramları ile tek kaynak kökenli ve yeraltında uzun süre beklemediği tespit edilmiştir.

Mutlu (1997), Gazlıgöl jeotermal sahasındaki termal ve maden sularının sıcaklıklarının 18,5°C ile 64°C arasında değiştiği ve Na ve HCO₃'ca zengin olduğu tespit edilmiştir. Sulardaki sülfat derişimlerinin büyük ihtimalle bakteriyel sülfat indirgenmesinden kaynaklandığını ifade ederek ve silis ve katyon jeotermometreleri ile Gazlıgöl jeotermal sahası için elde edilen rezervuar sıcaklığının maksimum 120°C olduğunu söylemiştir.

Mutlu (1996), Çalışmada Ömer-Gecek, Gazlıgöl, Sandıklı, Heybeli-Karaburun termal suları incelenmiş olup rezervuar sıcaklıklarını çeşitli jeotermometreler ile saptanmış ve termal suların kökenleri içerdikleri mineraller değerlendirilmiştir. Ömer-Gecek termal sularının rezervuar sıcaklığı 75°C-155°C arasında değişmekte olup, su bileşiminin Na-Cl-HCO₃ ağırlıklı olduğu rezervuar sıcaklığının yüksek olmasından da derin su döngüsüne sahip olduğu verisi elde edilmiştir. Gazlıgöl 66°C-120°C, Sandıklı 84°C-97°C, Heybeli-Karaburun 56°C-96°C'lik rezervuar sıcaklığına sahip olduğu su bileşiminde Na-HCO₃ içerikli olduğu verisi elde edilmiştir.

Oğuz (2011), Afyonkarahisar Sandıklı jeotermal alanının hidrotermal alterasyon özellikleri incelenmiştir. Jeotermal alanın rezervuar kayacının paleozoik yaşlı şistlerden oluştuğu görülmüştür. İnceleme alanında açılan üretim sondajlarından elde edilen kırıntılar üzerinde XRD analizleri yapılmış olup dolomit, feldispat, zeolit, mika, illit, kil mineralleri, klorit, kuvars varlıkları tespit edilmiştir.

Özdemir (2017), Afyonkarahisar Karakuyu gölü sulak alanı hidrojeolojik incelemesi

yapılmıştır. Çalışma alanından alınan numuneler üzerinde yapılan jeokimyasal çalışmalar sonucunda suların bileşiminin Ca-HCO_3 , Ca-Mg-HCO_3 içerikli olduğu görülmüştür. Değerlendirmeler sonucunda kullanılabilirliğini araştırmak için çeşitli deneyler yapılmıştır ve sulama suyu içinde uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Özgül (2000), Afyonkarahisar Şuhut ilçesinde hidrojeolojik verilerin değerlendirilmesi amacıyla yapılan bu çalışmadan öncelikle 1/25 000 ölçekli hidrojeoloji haritası çıkartılmıştır. Bunun yanı sıra eşyağış haritaları ve su bilançoları çıkartılmıştır. Açılan sondajlardan numuneler alınarak su kimyası çalışmaları yapılmıştır. Yapılan kimyasal analizler sonucunda endüstriyel sulama ve içme amaçlı kullanılabileceği saptanmıştır.

Şimşek vd. (1993) tarafından bu çalışmada Ömer-Gecek jeotermal sahasındaki jeotermal kökenli suların meteorik kökenli ve derin dolaşıma sahip oldukları belirtilmiştir.

Yetemen (2006), Afyonkarahisar Ömer-Gecek sahasında ve diğer jeotermal sahalarda rezervuar basıncının korunması amacıyla reenjeksiyon sistemlerinin uygulanmasının verimli olacağı kanaatine varılmıştır. Ömer-Gecek sahasında reenjeksiyon yeterli olmayışı yeraltı sularının drenaj yapıldığı kapalı sistem havzalarda ekolojik dengesizliğe neden olduğu ifade edilmiştir. Ömer-Gecek sahası baz alınarak verimli debi elde edilmesi sırasında harcanan enerji maliyeti ile ilgili parametreler bu çalışmada değerlendirilmiştir.

Tamgaç vd. (2004), Ömer-Gecek jeotermal alanında Afyon Ovası ve Heybeli termal tesisleri çevresinde suların Na-Cl içeriğinde artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Tezcan vd. (2002), Akarçay Havzası'nda yeraltı ve yüzey suları akım modeli oluşturarak su dolaşımının bütünü değerlendirip matematiksel modeller çerçevesinde değerlendirmeler yapmışlardır.

Ulutürk (2009), Afyon Ömer-Gecek jeotermal sularının meteorik kökenli olup bölgeye düşen yağışın basamaklı faylar aracılığı ile yeraltına süzülerek ve magmadan direk veya indirek konvektif akımlar vasıtası ile ısınarak tekrar yeryüzüne ulaştığını dile getirmiştir. Jeotermal suların $\text{Na}+\text{K}$ ve Cl 'ca zengin sular olduğunu ve yüksek Cl içeriğinin bölgedeki

suların derin dolaşımı olmasına işaret ettiğini belirtmiştir.

Vengosh vd. (2002), Batı Anadolu’da jeotermal sularda farklı kökenli üç tip kimyasal bileşimli jeotermal su ayırt etmişlerdir. Bunlardan $\text{Na}+\text{HCO}_3$ ve $\text{Na}+\text{SO}_4$ tipli suların metamorfik kayalarla ve gnayslarla ilişkili olduğu, $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ bileşimli suların ise karbonatlı kayalardaki yüzeysel dolaşımı ve soğuk yüzeysel sularla karışımı olduğunu ifade etmişlerdir.



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Literatür Çalışmaları

Bu aşamada çalışma alanı ve yakın çevresinde jeoloji, hidrojeoloji ve jeokimya konularında yapılmış çalışmalara ilişkin makale ve raporlar incelenmiştir.

3.2 Saha Çalışmaları

Saha çalışmaları, jeolojik-hidrojeolojik çalışmalar ile su noktalarında yerinde ölçüm ve örnekleme çalışması ve analiz şeklinde üç safhadan oluşmaktadır.

3.2.1 Jeolojik ve Hidrojeolojik Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında inceleme alanı ve çevresinde, önceki çalışmalarda hazırlanan jeolojik haritalar yardımıyla kaya birimleri ve faylar yerinde gözlenmiş, fotoğraflanarak makro özellikleri incelenmiştir. Elde edilen jeolojik bilgiler ışığında çalışma alanında bulunan jeolojik birimler su bulundurma ve geçirimsizlik özelliklerine göre sınıflandırılmış ve hidrojeoloji haritası oluşturulmuştur.

3.2.2 Örnekleme ve Yerinde Ölçüm Çalışmaları

İnceleme alanında seçilen 8 adet termal su ve 2 adet soğuk su kuyusunda Hach-Lange portatif HQ40D multi ölçüm cihazı kullanılarak sıcaklık, elektriksel iletkenlik, pH ve Eh ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.1, 3.2). Ölçümlerden önce, cihaz EC ve pH standart çözeltileriyle kalibre edilmiştir.

Majör anyon analizleri için örnekler 2 adet 250 ml'lik polipropilen şişeye alınmış ve bu örnekler analiz başlangıcına kadar +4°C altındaki sıcaklıklarda korunmuştur. Katyon ve iz element analizleri için örnekler 100 ml'lik polipropilen şişelere filtre edilerek (~0,40 µm) alınmış, daha sonra numunelere ultra saf HNO₃ eklenerek pH değerinin 2 ve altına inmesi sağlanmıştır. Trityum analizleri için su örnekleri 500 ml'lik polipropilen şişelere

doğrudan alınmıştır. ^{18}O ve ^2H analizleri için örnekleme 50 ml'lik polipropilen şişelere doğrudan yapılmıştır.



Şekil 3.1 Yerinde ölçüm çalışmaları.



Şekil 3.2 Yerinde ölçüm çalışmaları.

3.2.3 Analiz

Suların anyon ve katyon analizleri (HCO_3 , Cl , F , SO_4 , NO_2 , NO_3 , NH_4 , Na , K , Ca , Mg) ile trityum (^3H) analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası laboratuvarlarında, ağır metal ve iz element analizleri ACME (Kanada) laboratuvarında ve ^{18}O ve ^2H analizleri için Utah Üniversitesi Biyoloji Bölümü'ne (ABD) yaptırılmıştır. Su örnekleri analize

gönderilmeden önce Afyon Kocatepe Üniversitesi JUAM laboratuvarında analize hazırlanmıştır (Şekil 3.3, Şekil 3.4).



Şekil 3.3 Örneklerin analize hazırlanması.

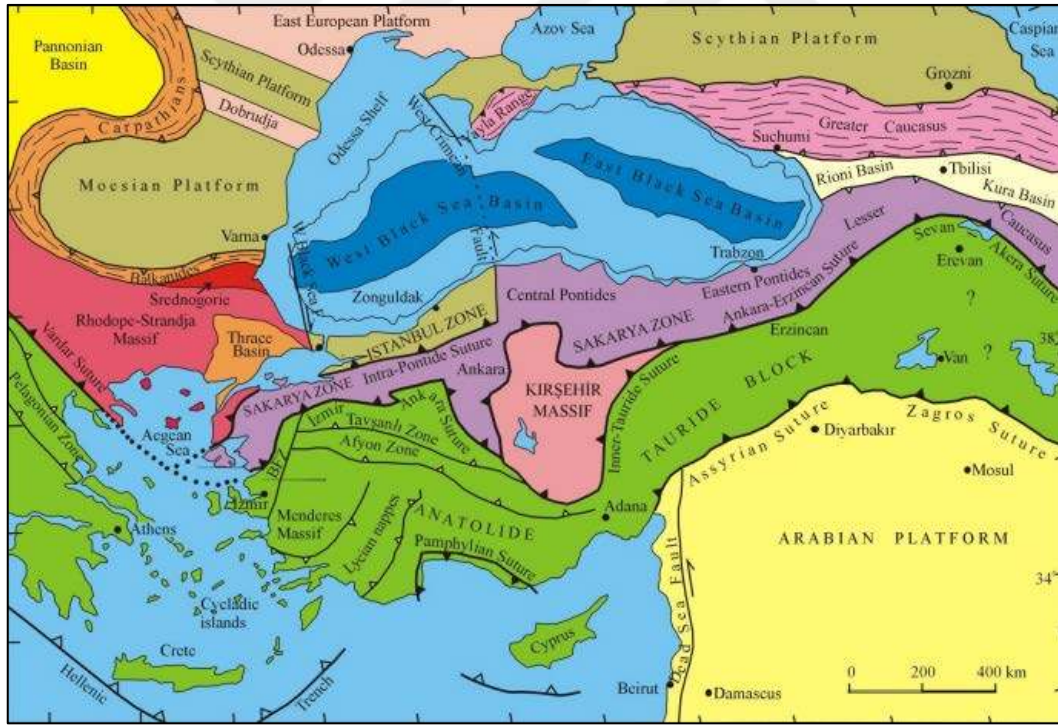


Şekil 3.4 Örneklerin analize hazırlanması.

4. JEOLOJİ

4.1 Genel Jeoloji

Ülkemiz jeolojik devir olarak Mesozoyik ve Tersiyer zaman dilimlerinde meydana gelmiş olup bugünkü son halini Oligo-Miyosen zaman diliminde almıştır. İnceleme alanı Ketin (1966)'de belirtilen ve esas itibariyle Orta ve Batı Anadolu kristalin masiflerini veya metamorfik serilerini ve bunları diskorkan olarak örten Tersiyer formasyonlarını içerisine alan 'Anatolid' bölgesinde yer almaktadır. Okay (1984, 1986) Anatolidleri Afyon-Bolkardağı, Tavşanlı zonları, Menderes-Kırşehir masifleri olarak kuşaklara ayırmıştır. Çalışma sahası; Okay ve Tüysüz (1999) ve Göncüoğlu vd. (1996) tarafından önerilen tektonik modele göre Afyon Zonu'nun içerisinde yer almakta ve bu zona ait temel kayalar içermektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Türkiye ve çevresinin tektonik konumu (Okay ve Tüysüz 1999).

Afyon Zonu batıda Menderes Masifi'nden başlayıp Uşak ve Denizli üzerinden Afyonkarahisar'a kadar uzanan düşük dereceli metamorfik bir kuşaktır. Yeşilışt fasiyesinde metamorfizma geçirmiş platform tipi çökellerden oluşan ve baskın olarak

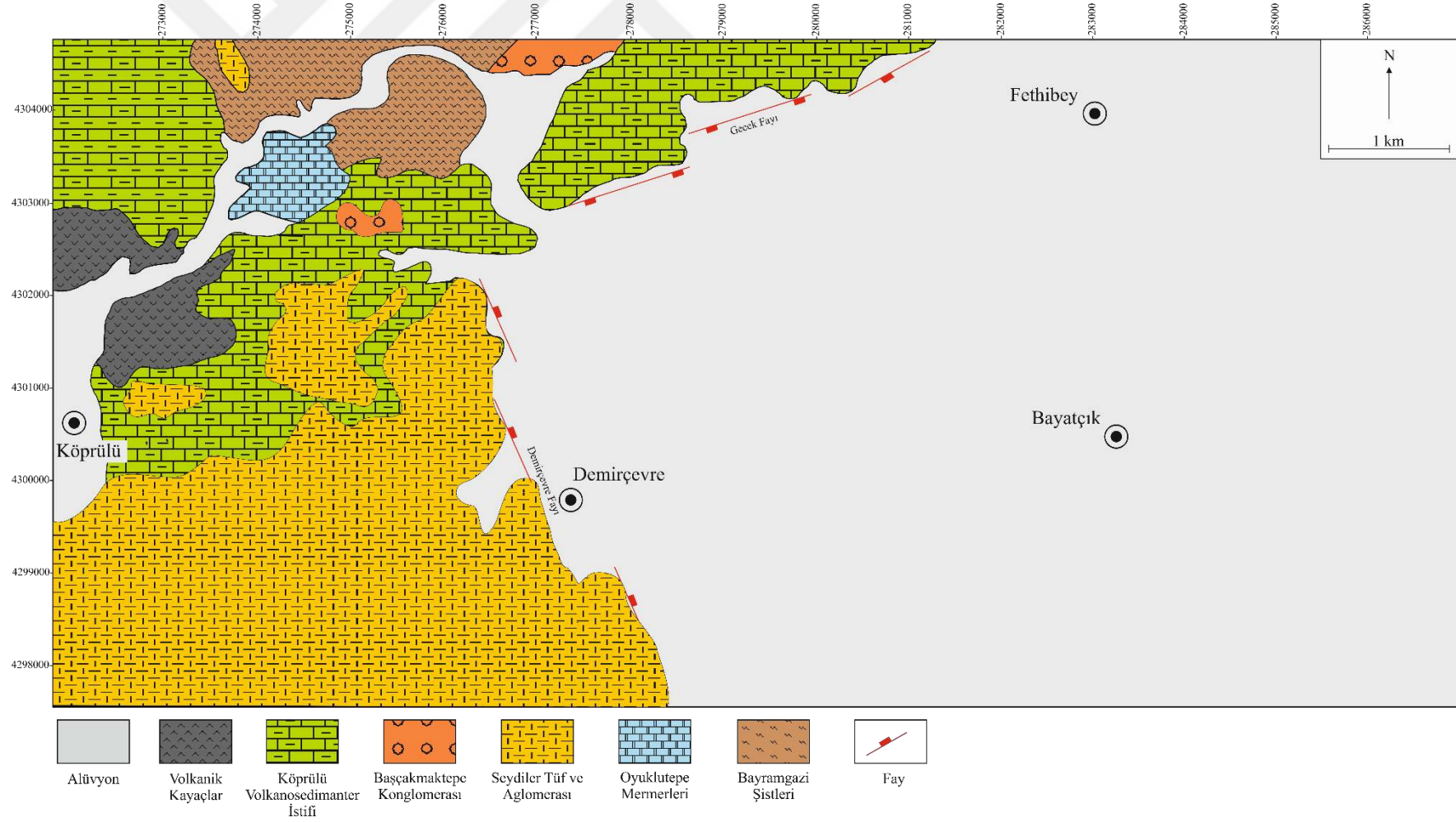
sedimanter kökene sahip olan birimler Mesozoyik öncesi dönemde birden fazla bölgesel metamorfizma ve deformasyon geçirmişlerdir (Tolluoğlu vd. 1997). Bu sedimanter istif Üst Permian-Alt Triyas yaşlı polijenik çakıllı konglomeralar ve Triyas-Jura yaşlı karbonatlar üzerlemektedir. Neojen yaşlı genç volkanik ve piroklastik seriler ise tüm birimleri örtmektedir (Tolluoğlu vd. 1997). Afyon Zonu metamorfikleri Paleosen döneminde, Anatolid-Torid bloğunun Sakarya zonu altına dalması ile ilişkili bölgesel YB/DS metamorfizmasını işaret etmektedir (Candan vd. 2005). Genleşme tektoniğinin hakim olduğu Batı Anadolu ile blok deformasyonların hakim olduğu Orta Anadolu arasında geçiş niteliği taşıyan bir coğrafyada bulunan Afyon volkanitleri bölgede geniş alanlar kaplamaktadır (Erkan vd. 1996). Volkanik kayaların, geçmişte plaka hareketlerini belirlemedeki etkin rolleri ve ülkemizin son derece hareketli olan Alp Kuşağında yer alması nedeniyle Anadolu'daki volkanik kayalarda son yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından çok sayıda jeokimyasal, petrografik ve jeokronolojik çalışmalar yapılmış ve Türkiye'nin jeodinamik evrimine ilişkin çeşitli görüşler öne sürülmüştür. (Ercan 1985).

4.2 Çalışma Alanının Jeolojisi

İnceleme alanının temelinde Bayramgazi şistleri ve Oyuklutepe mermerlerinden oluşan Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfikleri yer almaktadır. Orta-Üst Miyosen yaşlı Ömer-Gecek formasyonu temel kayaların üzerine uyumsuzlukla gelmiştir. Birim Başçakmaktepe konglomerası, Seydiler Tüf ve Aglomerası ve Köprülü volkano-sedimanter istifinden oluşmaktadır. Üst Miyosen yaşlı volkanitler bölgedeki volkanizmanın son ürünleridir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ise inceleme alanındaki en genç birimlerdir (Şekil 4.2).

4.2.1 Afyon Metamorfikleri

İnceleme alanının temelini oluşturan ve Tolluoğlu vd. (1997) tarafından Afyon metasedimanter grubu olarak adlandırılan formasyon inceleme alanında Bayramgazi şistleri ve Oyuklutepe mermerleri üyelerinden oluşmaktadır.



Şekil 4.2 İnceleme alanının jeoloji haritası (Ulutürk 2009'dan değiştirilmiştir).

4.2.1.1 Bayramgazi Şistleri

Bayramgazi Şistleri inceleme alanında, albit–klorit–muskovit–biyotit–kuvarsşist ve kalkşist olarak gözlenmektedir. Şistlerin içinde yer yer kuvarsit damarları yer almaktadır (Metin vd. 1987, Kuşcu vd. 1999, Kibici vd. 2001). Öktü vd. (1997) tarafından şistlerin düşük dereceli yeşilşist fasiyesinde metamorfizma geçirdiği ve buna bağlı mineral parajenezleri içerdiği belirtilmiştir. Sahada yeşil, kahve ve boz renkli görünüm sunarlar.

4.2.1.2 Oyuklutepe Mermerleri

Öktü vd. (1997), tarafından yapılan araştırmalar sonucunda Paşadağ Mermerleri olarak tanımlanan alan, Ulutürk (2009) tarafından ‘Oyuklutepe Mermerleri’ olarak ifade edilmiştir. Jeolojik zaman cetvelinde Paleozoyik zaman aralığında yer aldığı bilinmektedir. Oyuklutepe Mermerleri, beyaz, gri renkli sert kristalize görünümlü olup biriminin kalınlığı 50-125 m arasında değişmektedir (Yetemen 2006, Ulutürk 2009).

4.2.2 Ömer Gecek Formasyonu

Literatürde Ercan vd. (1978) tarafından Yeniköy formasyonu olarak tanımlanan çalışma alanı Ulutürk (2009), tarafından formasyon özelliklerinin en iyi Ömer Gecek bölgesinde gözlemlendiği gerekçesiyle Ömer Gecek formasyonu olarak tanımlanmıştır. Ercan vd. (1978), bölgede yapılan araştırmalar doğrultusunda kayaçların akarsu kökenli olup, akarsuların taşıdıkları kırıntıların çökmesi sonucu oluştuğunu ifade etmiştir. Jeolojik zaman cetvelinde Senozoik zaman aralığında yer aldığı bilinmektedir. Ömer Gecek formasyonu Başçakmaktepe Konglomerası ve Köprülü Volkano-sedimanter istif ve Seydiler tuf ve aglomerası olarak üç alt birime ayrılmaktadır (Ulutürk 2009, Yıldız vd. 1999).

4.2.2.1 Başçakmaktepe Konglomerası

Literatürde Özburun Konglomera Üyesi olarak ifade edilen birim Ulutürk (2009),

tarafından birim özelliklerinin en iyi Başçakmaktepe mevkiinde görülmesi sebebiyle Başçakmaktepe Konglomerası olarak ifade edilmiştir. Jeolojik zaman cetvelinde Senozoyik zaman aralığında yer aldığı bilinmektedir. Konglomera üyesi kendisinden daha yaşlı kayaların çakıllarını içerdiği için, yaşının Orta-Üst Miyosen olabileceği tahmin edilmektedir (Metin vd. 1987).

Ulutürk (2009), tarafından konglomera üyesinin alttaki birimlerle açısız uyumsuzluk, üst kısımdaki killi kireçtaşı ve tüfit ile yanal/düşey geçiş gösterdiğini söylemiş ayrıca birimin kalınlığının 50-300 m arasında olduğunu tahmin etmektedir. Başçakmaktepe Konglomera biriminin kumtaşı, silttaşı ve kiltası ardalanması şeklinde olduğu bilinmektedir.

4.2.2.2 Köprülü Volcano-Sedimanter İstifi

İlk kez Harut (1995) tarafından adlandırılan istif, karakteristik olarak Köprülü Köyü civarında yayılım göstermektedir. Köprülü volcano-sedimanter istifi, lav ve piroklastik türündeki volkanik ara katkılar ve epiklastik sedimanlar içermektedir. Altta lav seviyesi gözlenmektedir. Lav seviyesinin üst bölümleri breşik yapıda olup, yer yer gaz boşlukları da görülmektedir. Bu seviyenin üstünde tuf, marn ve konglomeradan oluşan birimler yer almaktadır. Bu kayalar Köprülü volcano-sedimanter istifindeki farklı lav akıntılarını birbirinden ayırmaktadır.

4.2.2.3 Seydiler Tuf ve Aglomerası

Metin vd. (1987) tarafından Seydiler tuf ve aglomerası olarak adlandırılan bu birim genellikle süt beyaz ve krem renkli olup çok kalın katmanlar sunarlar. Seydiler tufü kuvars, plajioloklas, biyotit lamallerinden oluşan bir tüftür. Kolay aşınım gösterir. Tüfler üzerinde kalın katmanlı aglomeralar bulunur ve bunlar harita üzerinde tek birim olarak değerlendirilir. Seydiler kasabası ve çevresinde özellikle Afyonkarahisar–Ankara karayolunun her iki tarafında kalınlığı toplam 20 m’ye varan beyaz, beyazımsı sarı, krem renkli diatomit seviyelerini kapsamaktadır (Yıldız 1999).

4.2.3 Volkanizma

İnceleme alanında yer alan volkanik kayalar trakit, traki-andezit, traki-bazalt bileşimindedir (Ulutürk 2009). Genel olarak kahve mor renkli ve sert dayanımlı olup, boyutları 10 cm'ye ulaşan sanidin kristalleri içermektedirler. Volkanik kayaların yaşı Besang *et al.* (1977) tarafından K/Ar yöntemi ile elde edilmiş ve 8-10 my (Üst Miyosen-Pliyosen) olarak belirtilmiştir.

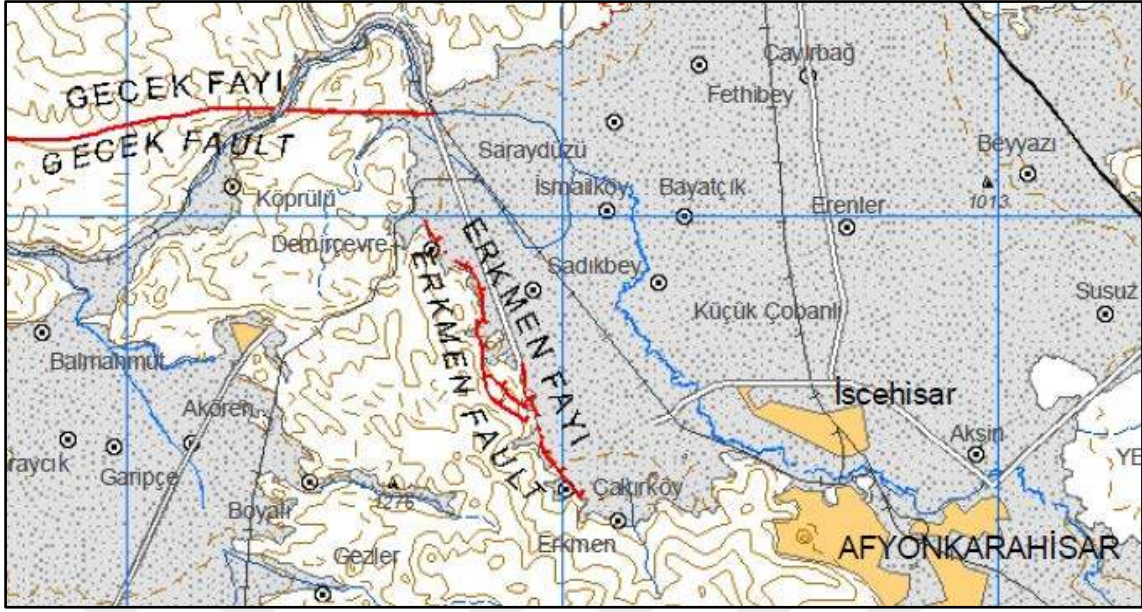
4.2.3 Kuvarterner

4.2.3.1 Alüvyon

Nehirlerin bıraktığı silt, kum, kil, çakıl gibi gevşek tutturulmamış güncel çökellerdir. Bu birim metamorfik kayaların volkanik kayaların zaman içerisindeki ufak hareketleri sonucu oluşmaktadır. Ulutürk (2009) tarafından alüvyon kalınlığının ova ortalarında 325 m., kil kalınlığının yüzeyden itibaren yaklaşık 25 m kalınlıkta olduğu dile getirilmiştir.

4.3 Tektonizma

Çalışma alanı Ketin (1966) tarafından Anadolu'nun tektonik birlikleri sınıflamasına göre Anatolidlerin güney kısmında ve Tolidlerin sınırında yer almaktadır. Bölgede etkin olan fay sistemlerine bakıldığında Afyon Akşehir graben sisteminde yer alan Erkmen (Demirçevre) fayı ve Gecek fayının varlığı görülmektedir (Şekil 4.3). Afyon-Akşehir grabeni kuzeydoğuda yer alan Orta Anadolu ile güneybatıda yer alan Isparta açısını (Blumenthal 1963) birbirinden ayıran, yaklaşık 4-20 km genişliğinde 130 km uzunluğunda olan, KB-GD uzanımlı, aktif olarak büyüyen bir kıtasal rift alanıdır (Koçyiğit 1984, Koçyiğit vd. 2000, Koçyiğit ve Özacar 2003, Özkaymak vd. 2017). Ömer-Gecek bölgesinde faylar basamak şeklinde normal faylardan oluşan bir görünüm sunarlar.



Şekil 4.3 İnceleme alanının tektonik haritası (MTA Türkiye diri fay haritası 1/250 000).

4.3.1 Demirçevre (Erkmen) Fayı

Demirçevre fayı Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultulu bir fay olup Çakırköy, Sadıkbey, Köprülü, Erkmen gibi yerleşkelere yakındır. Yaklaşık olarak 0,1-2,4 km genişlikte, 10 km uzunlukta ve KKB gidişli diri verrev atımlı normal bir fay olan Demirçevre fay zone birbirine paralel-yarı paralel, kısa (0,9-2,5 km), yakın aralıklı (100 m-1 km), kuzeydoğuya graben içine doğru dikçe eğimli (67°) çok sayıda normal fay segmentinden oluşur (Koçyiğit ve Deveci 2007). Demirçevre fay zone boyunca birçok noktada gözlenen sıcak su çıkışlarının ve küçük deprem hareketlerinin varlığı aktif diri bir fay olduğunun bir göstergesidir. Wells and Coppersmith (1994)'ün formülü dikkate alınarak oluşturabileceği deprem büyüklüğü $M_w=6.2$ olarak belirtilmiştir (Koçyiğit ve Deveci 2007).

4.3.3 Gecek Fayı

İnceleme alanımıza D-B istikametinde uzanan Gecek fayı fethibey zonunu oluşturan 17 km uzunluğunda Kuzeydoğuda yarımca Güneybatıda Gecek kaplıcaları arasında yer alan verrev atımlı normal bir faydır. Deveci ve Koçyiğit (2007) tarafından incelenen kayma

verilerinin kinematik analizi, Gecek fayının verev atımlı normal fay karakterinde olduğunu ve bu alanın yaklaşık K-G yönünde genişlediğini göstermiştir.



5. HİDROJEOLOJİ

5.1 Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri

İnceleme alanındaki kayaçların hidrojeolojik özelliklerin belirlenmesi için bölgenin jeolojik yapısı ve önceki çalışmalardan hareketle hidrojeoloji haritası oluşturulmuştur. Bölgedeki birimler; geçirimli, yarı geçirimli ve geçirimsiz olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 5.1).

5.2.1 Geçirimli Birimler

5.2.1.1 Oyuklutepe Mermerleri

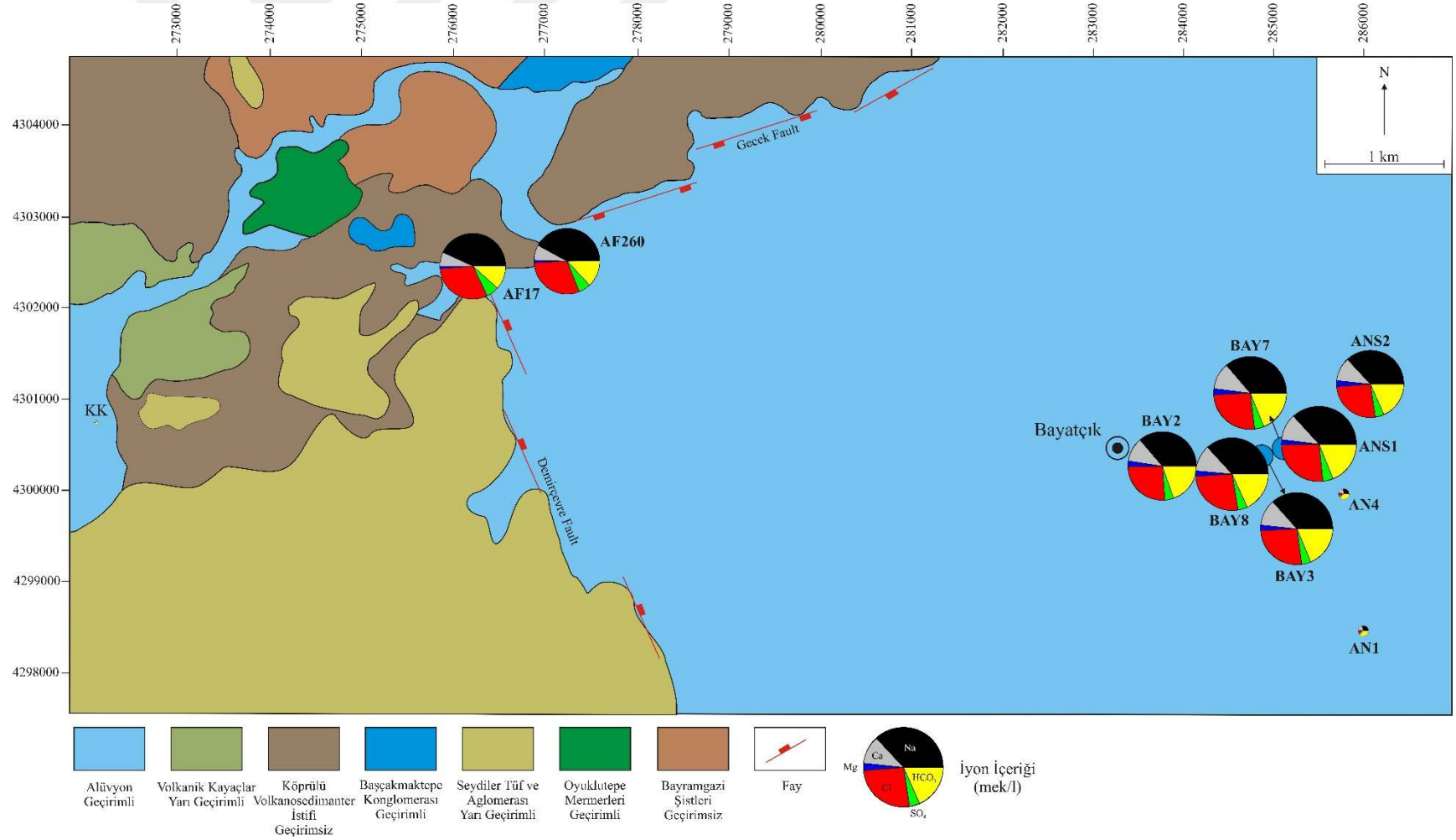
Oyuklutepe mermerleri, çok fazla deformasyona uğraması sebebiyle büyük bloklanmalar göstermemesi, kırıklı, çatlaklı, erime boşluklu bir yapıya sahip olması termal suları bünyesinde barındırarak rezervuar kayaç görevinde bulunduğunu göstermektedir. Oyuklutepe mermerleri inceleme alanımızda geçirimli birimler sınıfında yer almaktadır. Oyuklutepe mermerlerinin bulunduğu alanda soğuk su kaynaklarına rastlanmaktadır.

5.2.1.2 Başçakmaktepe Konglomerası

Başçakmaktepe Konglomerası çalışma alanımızın kuzeybatısında yer almakta olup çok geniş olmayan bir yüzeylenme sergilemektedir. Yapısında yer alan birimlerin kumtaşı, silttaşı ve kiltası ardalanması şeklinde olduğu bilinmektedir. Bu birimlerin çatlaklı, boşluklu yapısı geçirimliliğinin arttırmaktadır.

5.2.1.3 Alüvyon

Bayatcık jeotermal sahasının rezervuar kayacını oluşturan alüvyon birimi silt, kum, kil, çakıl gibi gevşek tutturulmamış güncel çökeltileri içermektedir. Gözenekli ve geçirgen bir akifer özelliği taşımaktadır.



Şekil 5.1 İnceleme alanının hidrojeoloji haritası (Ulutürk, 2009'dan değiştirilmiştir).

5.2.2 Yarı Geçirimli Birimler

5.2.2.1 Kocatepe Trakiti

Kocatepe trakiti yarı geçirimli birim olarak sınıflandırılmıştır. Trakit ve trakiandezitler kırıklı çatlaklı yapıya sahip olması nedeniyle yeraltı suyu içerebilmektedir.

5.2.2.2 Seydiler Tüf ve Aglomerası

Seydiler tüfü kuvars, plajioloklas, biyotit lamallerinden oluşan bir tüftür. Hidrojeolojik olarak incelendiğinde yarı geçirimli birim olarak sınıflandırılmaktadır.

5.2.3 Geçirimsiz Birimler

5.2.3.1 Bayramgazi Metamorfitleleri

Çalışma alanının Kuzeybatısında yer almakta olan Bayramgazi Metamorfitleleri kuvars-muskovit-serizit şist, kuvars-albit-klorit şist, meta kumtaşı, metakonglomera ve kalkışist birimlerinden oluşmaktadır. Bu birim metamorfik özelliğinden dolayı geçirimsiz özellik sunar. Termal sular için akifer özelliği göstermezler.

5.2.3.2 Köprülü Kilitaşı–Marn–Tüf Üyesi

Köprülü kilitaşı, Marn, Tüf üyesi çalışma alanının Kuzeybatı ve Güneybatı alanında yer almakta olup geniş bir yüzeylenme sunmaktadır. Bu birim geçirimsiz özellik sunmaktadır.

5.3 Bayatcık Jeotermal Sahası

Bayatcık jeotermal alanı Afyonkarahisar ili şehir merkezine 8 km uzaklıkta Afyonkarahisar-Eskişehir karayolu üzerinde yer almaktadır.

Akarçay havzasında yer alan Bayatcık jeotermal alanı Batı Anadolu'nun genişleme

tektoniği etkisi ile oluşmuştur. 2. Derece deprem bölgesinde yer alan sahanın tektonik yapısı incelendiğinde bölgede etkin olan fay sistemlerinin Afyon-Akşehir graben sisteminde yer alan Erkmen (Demirçevre) fayı ve Gecek fayının varlığı görülmüştür.

Jeotermal sular, yağmur ve kar gibi yağışlarla gelen suların yeraltına süzülmesi burada jeotermal gradyan ile ısıtılması ve rezervuar kayaçta toplanması gibi süreçleri geçirmektedir. Rezervuar kayaçla etkileşim haline girerek bugünkü kimyasal bileşimine ulaşan jeotermal sular son olarak kırık fay zonlarıyla beraber yeryüzüne çıkmaktadır. Oyuklutepe mermerleri bölgede yer alan jeotermal suların en önemli rezervuar kayacını oluşturmaktadır. Bayramgazi şistleri geçirimsiz temel birimi oluştururken, Miyosen yaşlı volkanosedimanter birimler ise örtü kayaç özelliğindedir.

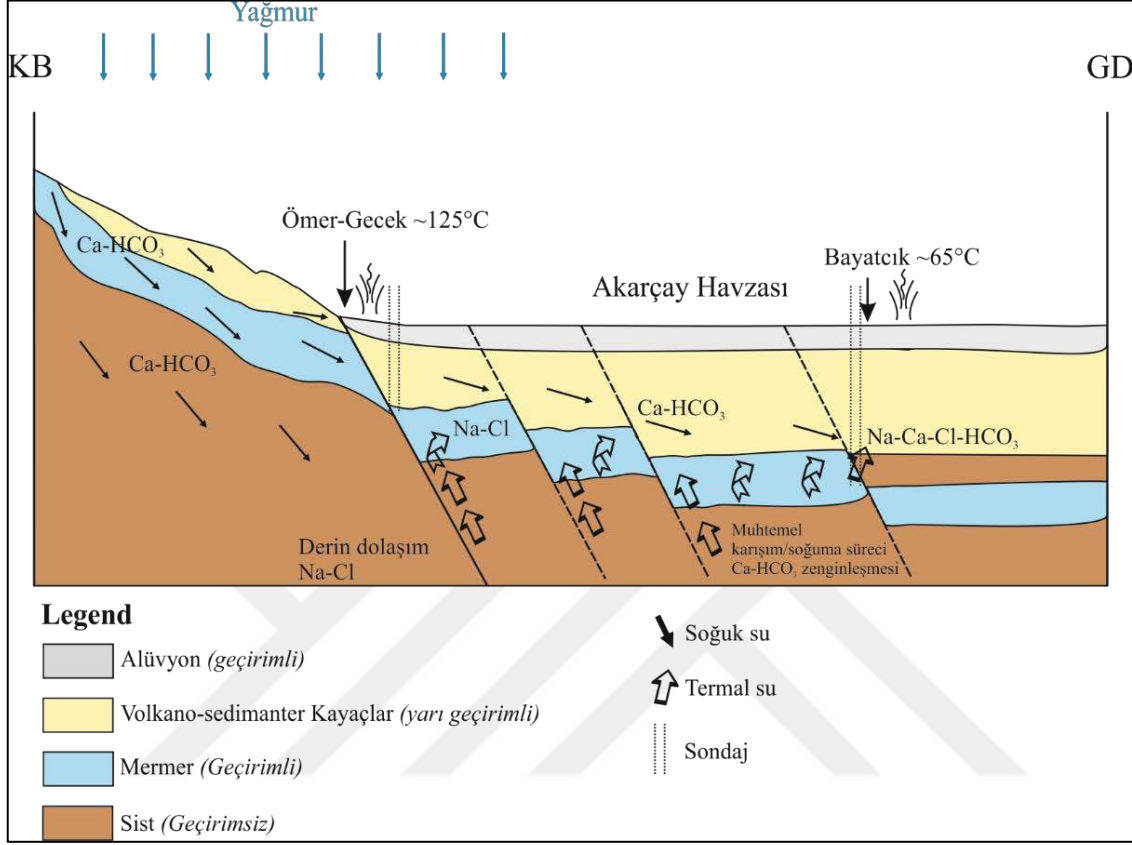
Bölgenin yüksek kesimlerine düşen yağış suları, fay, kırık-çatlak sistemleri boyunca yer altına süzülmekte, burada jeotermik gradyana bağlı olarak ısınmakta ve yine fay, kırık-çatlak sistemleri boyunca yükselerek Ömer-Gecek bölgesinde sondajlar ile elde edilmektedir. Bu sulardan bir kısmı ve Ömer-Gecek bölgesine reenjeksiyonu yapılan sular Güneydoğu'ya doğru hareket etmekte, bu esnada soğumakta ve Bayatcık bölgesinden sondajlar ile alınmaktadır. Ömer-Gecek bölgesinde 125°C ve Na-Cl bileşimli olarak elde edilen sular, Bayatcık bölgesinden 65°C sıcaklık ve Na-Ca-Cl-HCO₃ bileşimli olarak elde edilmektedir (Şekil 5.2).

5.4 Su Noktaları

5.4.1 Yüzey Suları

İnceleme alanında en önemli ve en büyük akarsu 115 km uzunluğuyla ovayı baştan sona kadar kateden Akarçay Deresidir. Akarçay Deresinin esas kolları Sincanlı Ovası'nın batısından çıkarak Balmahmut ve Köprülü kuzeyinden geçen Aksu Deresi ile Nacak ve havzanın kuzeyinden gelen Gazlıgöl dereleridir. Bunların dışında Kali (Selevir), Kuruçay (Seyitler) dereleri Akarçay'a katılmaktadır. Toplam baz akımı $93 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ 'dır (Tezcan vd. 2002). Akarçay Eber ve Akşehir gölüne kadar ulaşmaktadır. Her iki gölde iki fay hattı arasında kalan bir grabenin tabanında oluşmuştur. İnceleme alanında Temmuz, Ağustos

ve Eylül aylarında sıcaklık artışı ve yağış azlığı nedeniyle su kıtlığı görülmekte olup Ocak, Şubat ve Mart aylarında yağışların bol olması sebebiyle su bolluğu görülmektedir.



Şekil 5.2 Bayatcik jeotermal sahası oluşum şekli.

5.4.2 Soğuk Su Sondajları

İnceleme alanında Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) ve Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından sulama suyu amaçlı olarak açılmış 2 adet soğuk su sondajı bulunmaktadır.

5.4.3 Soğuk Su Kaynakları

İnceleme alanının Köprülü köyü içerisinde yer alan 1 adet kaynak suyu örneklenmiş olup, debisi 2 lt/sn olup, Köprülü volkanik kayaçları üzerinde yer almaktadır.

5.4.4 Sıcak Su Sondajları

İnceleme alanında AFJET (Afyon Jeotermal Turizm ve Ticaret A.Ş.) tarafından 6 adet jeotermal kuyu bulunmaktadır. BAY-2, BAY-3, olarak isimlendirilen jeotermal kuyular sera ısıtım amacıyla kullanılırken, BAY-7, BAY-8 kuyuları Afyon Kocatepe Üniversitesi-ANS Kampüsü binalarının ısıtılmasında, AF-17 ve AF-260 olarak isimlendirilen jeotermal kuyular ise turizm amaçlı kullanılmaktadır.

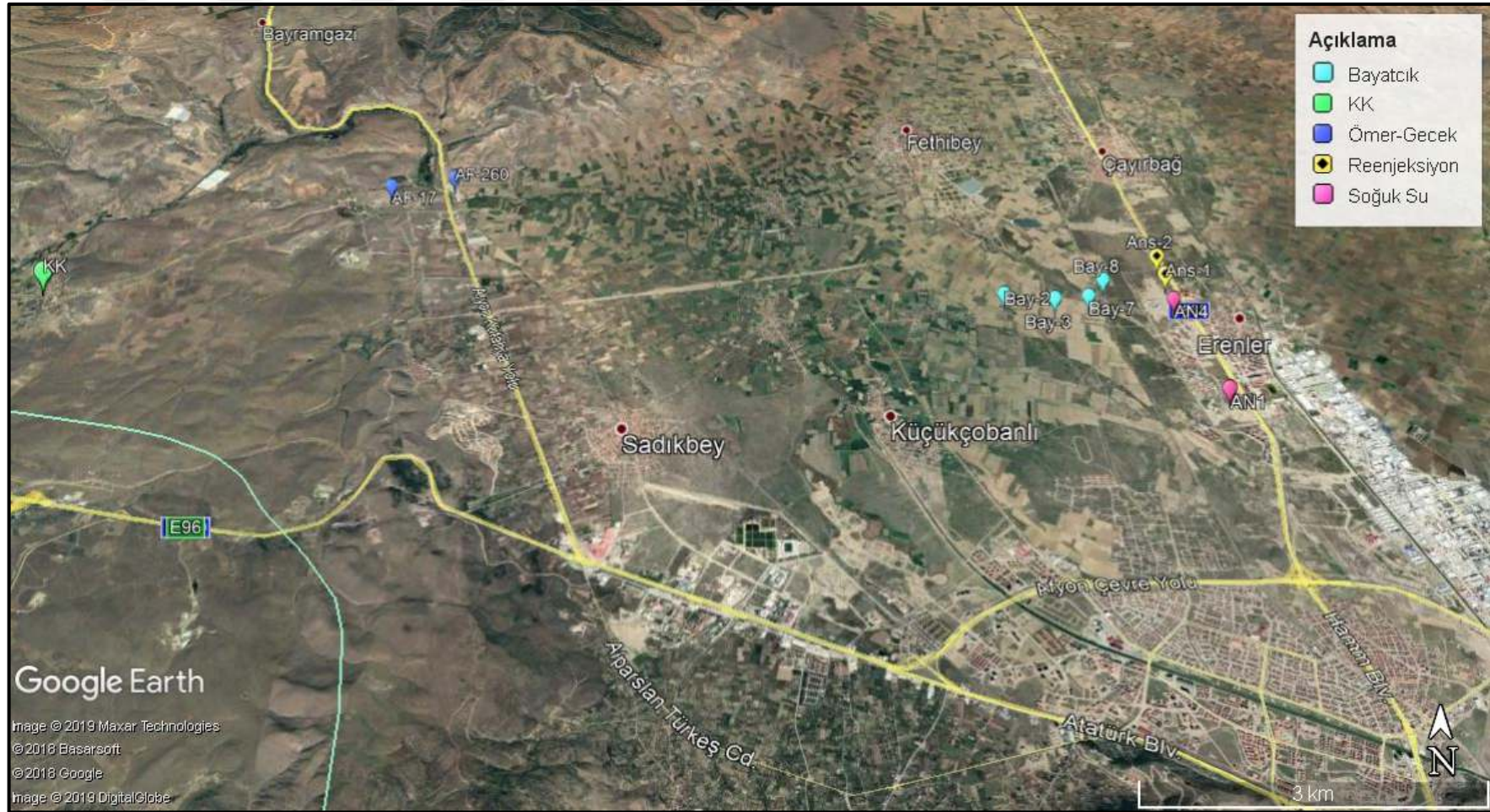
5.5 Su Örneklemeye Noktaları

İnceleme alanında suların kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla Bayatcık bölgesi ve civarından bölgenin hidrojeokimyasal yapısını yansıtabileceğini düşündüğümüz noktalardan örneklemeye ve in-sitü ölçüm çalışmaları yapılmıştır (Şekil 5.1; Şekil 5.2). Bölgeden 8 adet su numunesi alınmış olup bunların dışında 3 adet önceden alınmış su analiz sonuçları kullanılarak toplamda 11 adet su numunesi değerlendirilmiştir.

İnceleme alanında Bayatcık bölgesinden BAY-2, BAY-3, BAY-7, BAY-8 ve Ömer-Gecek bölgesinden alınan AF-17, AF-260 isimli numuneler sıcak su kuyularına ait iken, Afyon Kocatepe Üniversitesi arkasından alınan ANS-1 ve ANS-2 reenjeksiyon kuyularına aittir. Önceki çalışmalarda alınan su numunelerinden AN-1 ve AN-4 soğuk su sondajı, Köprülü bölgesinden alınan KK ise soğuk su kaynağı verilerini temsil etmektedir.

5.6 Suların Fiziksel Özellikleri

İnceleme alanında yerinde ölçülen; sıcaklık (°C), elektriksel iletkenlik (EC-µs/cm), Hidrojen iyon aktivitesi (pH) ve redoks potansiyeli (Eh) Çizelge 5.1 de verilmiştir.



Şekil 5.3 Su örnekleme noktaları.



Şekil 5.4 Örneklem noktaları ve yerinde analiz çalışmaları.

5.6.1 Sıcaklık (°C)

İnceleme alanında yapılan sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre termal sularda sıcaklık değerleri, reenjeksiyon kuyularında 47°C-50°C arasında değişiklik gösterirken, üretim kuyularında 65°C-92°C arasında değişim göstermektedir. Tüm numunelere ait sıcaklık değerleri çizelge 5.1 de belirtilmiştir. TSE (1985) standartlarına göre jeotermal sular sıcaklık değerlerine göre aşağıdaki Çizelge 5.2 de belirtildiği gibi sınıflandırılmıştır.

Çizelge 5.1 İncelenen su örneklerinin fiziksel özellikleri.

Koordinatlar				T°C					
Kuyu	X yukarı	Y sağa	Z (m) Rakım	EC	Ölçülen	Kuyu Başı	pH	Eh	Amaç
ANS-1	285583	4300498	1013	8002	40	50	7,87	4,9	Reenjeksiyon
ANS-2	285855	4300648	1011	7180	32	47	8,04	-2,2	Reenjeksiyon
BAY-2	283886	4300240	1008	7305	52,3	65	7,52	9,3	Sera
BAY-3	284475	4300149	1010	7700	52,8	66	7,4	37,7	Sera
BAY-7	284885	4300180	1015	7778	52,3	66	7,4	27,1	ANS
BAY-8	285115	4300457	1012	7747	56,4	65	7,27	26	ANS
AF-17	276289	4302436	1037	7030	81,2	92	8,23	-15,9	Turizm
AF-260	277147	4302621	1030	6992	83,2	92	8,04	19,6	Turizm
AN-1	286101	4298460	1011	1150	11,7	*	7,38	-13,6	Sulama
AN-4	285850	4299926	1009	1126	9,7	*	7,89	-34	Sulama
KK	272450	4300705	1068	256	15,8		8,65	-	Genel Kullanım

Çizelge 5.2 TSE (1985) Standartlarına göre termal suların sınıflandırılması.

Sıcaklık Aralıkları	Sıcaklık Değerlerine göre Su Sınıfı
20°C >	Soğuk Su
20°C <	Sıcak Su
20-34°C <	Epitermal Su
34-40°C <	Mesotermal Su
40-50°C <	Hipotermal Su
50-100°C <	Çok Sıcak Su
100°C <	Gayzerler, Fümeroller, buharlar

İnceleme alanındaki sular TSE (1985) standartlarına göre değerlendirildiğinde BAY-2,

BAY-3, BAY-7, BAY-8, ANS-1, AF-17, AF-260 (50°C–92°C) çok sıcak su, ANS-2 (47°C) hipotermal su, AN-1, AN-4 ve KK (9,7°C-15,8°C) soğuk su sınıfına girmektedir.

AIH Sıcak ve Minerali Sular Komisyonunca ise 20°C'den daha fazla sıcaklıktaki sular sıcak su olarak tanımlanır. Bu suların haritalanmasında 20°C-35°C, 35°C-75°C, 75°C-100°C ve 100°C'den daha fazla sıcaklıktaki sular farklı olarak işaretlenmektedir (Başkan ve Canik 1983). Bogomolow sınıflandırma şekli dikkate alındığında BAY-2, BAY-3, BAY-7, BAY-8, ANS-1, ANS-2, AF-17, AF-260 (47°C – 92°C) hipertermal su sınıfına girerken AN-1, AN-4 ve KK (9,7°C - 15,8°C) soğuk su sınıfına girmektedir (Çizelge 5.3).

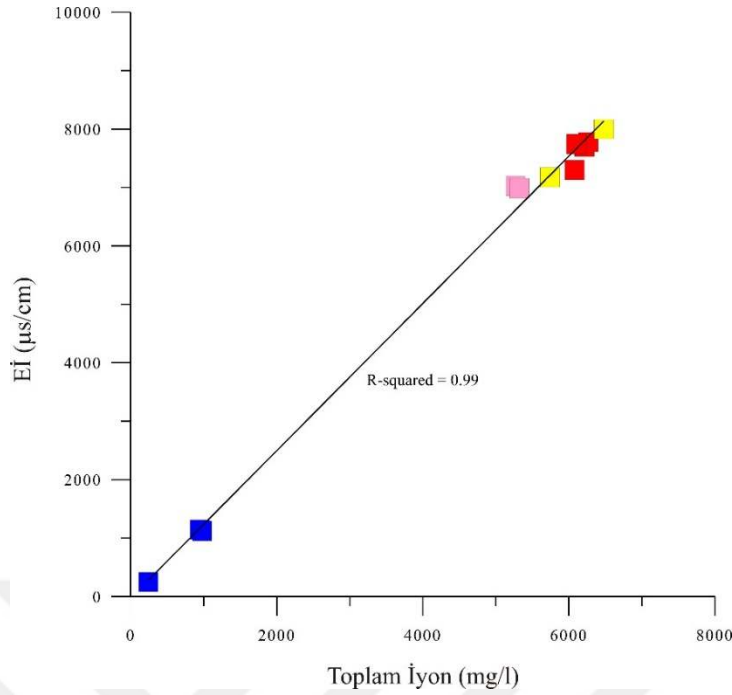
Çizelge 5.3 Bogomolow'a göre sıcak suların sınıflandırılması.

Sıcaklık Aralıkları	Sıcaklık Değerlerine göre Su Sınıfı
20°C >	Soğuk Su
20-37°C <	Hipotermal Su
37-42°C <	Termal Su
42°C >	Hipertermal Su

5.6.2 Elektriksel İletkenlik (EC-µS/cm)

Elektriksel iletkenlik, suyun elektrik akımını iletebilme özelliğinin sayısal ifadesidir. Ölçümler, mikromho/cm (µmho/cm) veya mikrosiemens/cm (µS/cm) olarak ve 25°C'deki değeri hesaplanarak verilmektedir. Suların elektriksel iletkenlikleri, yapılarındaki toplam çözünmüş madde miktarına, etkileşim halinde bulunduğu kayacın cinsine, etkileşim yüzeyi ve sürecine, çözünürlüğüne ve iklime ve sıcaklık değerlerine bağlıdır. İnceleme alanında alınanda yer alan örneklerin iletkenlik değerleri 256-8002 µS/cm arasında değişmektedir. Elektriksel iletkenlik değerlerinin sıcaklık artışı ile arttığı gözlenmiştir. EC değerleri ile toplam iyon miktarları arasında kuvvetli bir doğrusal ilişki vardır (Şekil 5.3). İki değişken arasındaki regresyon denklemi:

Toplam iyon (mg/l) = 1,26*EC – 24,03 olup korelasyon katsayısı 0,995'dir.



Şekil 5.5 İnceleme alanı sularının EC-toplam iyon grafiği.

5.6.3 Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH) ve Redoks Potansiyeli (Eh)

Suyun yapısındaki hidrojen iyonu konsantrasyonunu 10 tabanına göre negatif logaritması pH olarak ifade edilen değer sudaki asit ve baz dengesini göstermektedir. pH değeri 7'nin altında olan sular asit özellik kazanırken pH değeri 7'nin üstündeki sular ise bazik karakter kazanırlar (Erguvanlı ve Yüzer 1973). Sudaki karbonat, hidroksit, ve bikarbonat iyonları suyun bazik özelliğini artırırken, serbest mineral asitleri ve karbonik asit suyun asit özelliğini arttırmaktadır (Doğan 1981). Sudaki serbest karbondioksit çözünme ve hidrotasyon geçirmesi sonucunda karbonik asite dönüşür bununla beraber su çözücü-aşındırıcı özellik kazanır. Aşındırma ve kabuk bağlayıcı özellik suyun sıcaklık, basınç pH ve redoks potansiyeline bağlı bir etkidir. Genel olarak sıcak suların pH değerlerinin 7,27-8,26, soğuk suların pH değerlerinin ise 7,38-8,65 aralığında olduğu görülmüştür (Çizelge 5.1).

Redoks potansiyeli suyun yapısındaki kimyasal bileşenler açısından yükseltgen yada indirgen olma göstergesidir. İnceleme alanında ölçülen redoks potansiyel değerleri -34 ile 37.7 arasında değişim göstermekte olup sıcak suların pozitif (yükseltgen), soğuk suların ise negatif (indirgen) özellikli olduğu görülmüştür.

6. HİDROJEOKİMYA

6.1 Suların Kimyasal Özellikleri

Çalışma alanındaki termal ve mineralli su kaynakları ile beslenme alanındaki soğuk su kuyularından yağışlı ve kurak dönemi yansıtacak şekilde 8 farklı noktadan su örnekleri alınmıştır. Ayrıca daha önce yapılmış olan 3 soğuk su örneğinin kimyasal analiz değerleri alınarak değerlendirme yapılmıştır. Çalışma kapsamında kimyasal analiz sonuçları AquaChem 3.7 (Calmbach 1997) ve PhreeqC (Parkhurst and Appelo 1999) türleştirme programlarında değerlendirilerek suların kimyasal özellikleri, mineral doygunlukları yeraltı sularının kalitesi, kullanım alanları, kabuklaşma türleri, su-kayaç etkileşimi, rezervuar sıcaklığı tespit edilmiştir. İnceleme alanı sularının kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Yeraltı sularında bulunan anyon ve katyon iyonlarının kökenleri, çalışma alanımızdaki değerleri aşağıda belirtilmiştir.

- **Kalsiyum (Ca^{+2})** : Kalsiyum doğada kalsit (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), aragonit (CaCO_3), anhidrit (CaSO_4), florit (CaF_2), jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), piroksen (diyopsit, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), plajiolklas (anortit- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), amfibol ($\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe,Al})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) gibi mineraller şeklinde bulunmaktadır. Suyun yapısında bulunan H^+ iyonu kalsiyumun kolay erimesini sağlar ve yapısında bu mineralleri içeren kayaçların su ile teması sonucunda yeraltı suları kalsiyumca zengin hale gelir. Yeraltı suları incelendiğinde genel olarak yapısındaki kalsiyum miktarı 10-100 mg/l arasında değişim göstermektedir. Fakat bazı durumlarda bu miktarın 500-1000 mg/l’ye kadar ulaştığı görülmektedir. Sularda kaynama esnasında CO_2 miktarının azalması kalsit çökelimini göstermektedir. Kalsiyum deniz suyunda 10 800 mg/l, jeotermal suda 14 000 mg/l, kirlenmemiş yeraltı suyunda 1-200 mg/l ve nehir suyunda 6,3 mg/l’dir (Nicholson 1963). Sulama sularında kalsiyumun bol bulunuşu sodyum yüzdesinin azalmasını sağlar ve böylelikle oluşacak zararları önler (Hounslow 1995). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sulardaki kalsiyum miktarları; termal sularda 219,00-429,46 mg/l arasında, soğuk sularda 61,4-85,1 mg/l’dir

Çizelge 6.1 İncelenen örneklerin kimyasal analiz sonuçları (mg/l).

Örnek Adı	Na	K	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	F	SiO ₂	B	Br	Li	As	Hata %
BAY-2	1435,8	114,5	387,6	59,2	2074	1573	338	0,1	3,31	82,1	7,02	0,3	1,9	2,5	2,4
BAY-3	1501,6	109,7	419	51,6	2013	1676	366,3	1,0	4,1	59,01	7,44	0,4	2,0	3,3	3
BAY-7	1491,9	124,1	429,5	59,4	2074	1657	355,1	1,1	4,02	59,13	7,31	0,3	1,9	2,0	3,4
BAY-8	1485,3	121,9	415,6	55,04	1952	1650	354	0,3	3,3	51,55	7,37	0,3	1,9	2,9	4
ANS-1	1552,8	127	425	47,64	2135	1733	385,9	0,1	3,08	55,47	8,09	0,3	2,2	3,2	2,2
ANS-2	1396	114	373,8	62,01	1830	1539	335,1	7,2	2,43	70,39	7,05	0,2	1,9	2,3	4,2
AF-17	1524,2	120,1	219	23,45	1098	1692	455	0,7	4,69	116,9	8,39	0,4	2,1	6,0	4,5
AF-260	1492,7	120,6	240,5	21,99	1220	1656	439,8	1,2	4,39	108,7	7,59	0,5	2,1	5,7	3,8
AN-1	155,3	11	85,1	10,2	518,5	73,3	39,1	4,7	0,24	47,4	1,03	0	0,2	0,02	2,8
AN-4	149,1	13,1	61,4	40,6	549	61,4	40,6	6,5	0,11	52,8	1,57	0,2	0,3	0,01	2,6
KK	6,76	2,84	35,2	4,28	101	7,92	4,31	22,3	0,63	56,97	0,07	0	0,0	0,04	2,4

- **Magnezyum (Mg^{+2})** : Kalsiyumdan sonra yeraltı sularında en fazla bulunan kation magnezyumdur. Doğal sularda magnezyumun en büyük kaynağı sedimanter kayaçlardaki dolomit $CaMg-(CO_3)_2$, metamorfik kayaçlardaki piroksen, serpantin, talk, tremolitler iken magmatik kayaçlarda olivin $(Mg,Fe)_2SiO_4$, mikalar, amfibol ve magnezyum kaynağı olan diğer minerallerdir. Mg^{+2} konsantrasyonu, nehir suyunda 15 mg/l, kirlenmemiş yeraltı suyunda 1–100 mg/l, deniz suyunda 1290 mg/l ve jeotermal suda maksimum 2000 mg/l'dir (Nicholson 1993). Hounslow (1995), yeraltı sularında bulunan Mg^{+2} kationu miktarının 125 mg/l'yi aşması halinde suların acılaştığını içilebilirliğini yitirdiği ve daha fazlasında bağırsak rahatsızlığına yol açtığını belirtmiştir. Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sulardaki magnezyum miktarları; termal sularda 21,99-62,01 mg/l arasında, soğuk sularda 10,2-40,6 mg/l'dir
- **Sodyum (Na^+)** : Jeotermal akışkanın ana kationu sodyum olup en fazla deniz suyunda bulunmaktadır. Sodyum klorürün tabiattaki bolluğu ve suda kolay çözünmesi sulardaki sodyumun başlıca kaynağıdır. Yeraltı sularındaki sodyum kaynağının, kil minerallerinin bünyesindeki Ca ve Na kationlarının yer değiştirmesi, plajiolklasın ayrışması gibi etmenler olduğu bilinmektedir. Yeraltı suları sulama amaçlı kullanıldığında, özellikle killi topraklar için sodyum miktarı çok önemlidir (Tarcan 2003). Sulardaki yüksek sodyum miktarı toprağın yüzeyinde sert bir kabuk oluşmasına neden olarak bitki köklerinin hava almasını engeller (Garrels 1967, Akgiray 2003, Soyaslan 2004). Ayrıca sodyum kationunun tansiyon yükseltme özelliği nedeniyle tansiyon rahatsızlığına neden olmaktadır. Na^+ konsantrasyonu, nehir suyunda 6,3 mg/l, kirlenmemiş yeraltı suyunda 1–200 mg/l, deniz suyunda 10800 mg/l ve jeotermal suda maksimum 2000 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sulardaki sodyum miktarları; termal sularda 1396,03-1552,78 mg/l arasında, soğuk sularda 149,1-155,3 mg/l'dir.
- **Potasyum (K^+)** : Yeraltı sularının potasyum içeriği K-feldspat ($KAlSi_3O_8$) ve mika ($KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$) minerallerinden nadir olarakta losit ve silvit minerallerinden kaynaklanmaktadır. Yer kabuğunda potasyum miktarının büyük

bir kısmı feldspatlarda bulunur (Tarcan 2003). Jeotermal sularda potasyum, sodyuma göre daha az miktarda bulunur. Na^+ / K^+ oranının yüksek olması yüksek sıcaklıklı rezervuarı belirtirken düşük olması yeraltı suyunun dolaşımın fazla olmadan yüzeye çıktığını ifade eder. K^+ konsantrasyonu, nehir suyunda 2,3 mg/l, kirlenmemiş yeraltı suyunda 0,5–12 mg/l, deniz suyunda 399 mg/l ve jeotermal suda maksimum 2000 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sulardaki potasyum miktarları; termal sularda 109,65-126,98 mg/l arasında, soğuk sularda 11-13,1 mg/l'dir.

➤ **Karbonat Konsantrasyonu (CO_3^{2-} ve HCO_3^-) :** Suların yapısında bulunan karbonat türlerinin (HCO_3^- , CO_3^{2-} , H_2CO_3) büyük bir çoğunluğu karbonat içerikli kütlelerin erimesiyle ve atmosfer ve topraktaki CO_2 ' den oluşmaktadır. Bu nedenle, Sudaki CO_3^{2-} ve HCO_3^- miktarı CO_2 miktarına ve suyun pH'na bağlıdır (Hounslow 1995). Suların yapısındaki pH değerlerine bakılarak baskın olan iyon tespit edilebilmektedir. pH değeri 6-10 arasında iken HCO_3^- baskın yapıda 6'dan düşük değerde iken karbonik asit (H_2CO_3) ve daha alkali sularda CO_3^{2-} iyonunun baskın olduğu bilinir. Suların içerdikleri karbonat konsantrasyonu suların yeraltında geçirdikleri mola süreleri ile ilişkili olarak artar. En kısa yoldan ve en kısa sürede rezervuardan yüzeye ulaşan suların kayaçlar ile olan reaksiyon süreleri de kısa olacağından, karbonatlı kayaçlardan ve çatlak sistemlerindeki karbonatlı minerallerden çözecekleri HCO_3^- değerleri en düşük seviyede olacaktır (Nicholson 1993). Karbonat konsantrasyonu, nehir suyunda 50 mg/l, kirlenmemiş yeraltı sularında genellikle 10–500 mg/l ve jeotermal sularda ise 7500 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda buluna HCO_3^- miktarları; termal sularda 1098-2135 mg/l arasında, soğuk sularda 518,5-549 mg/l'dir.

➤ **Klorür (Cl^-) :** Sıcak akışkanlardaki jeotermal kaynaklarda yüksek klorür konsantrasyonları doğrudan derin bir rezervuar kayaçtan beslenmeye işaret eder (Nicholson 1993). Yeraltı sularındaki klorür kaynağı genel olarak denizel kökenlidir bunun dışında evaporitler, yağmur ve kar suları akışkandaki klorür miktarını arttırmaktadır. Ayrıca sulardaki Cl^- konsantrasyonunun artması deniz

kirliliğine işaret etmektedir. Cl^- konsantrasyonu, nehir suyunda 7,8 mg/l, kirlenmemiş yeraltı sularında genellikle 1–250 mg/l, deniz suyunda 19 500 mg/l ve jeotermal sularda ise maksimum 30 000 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan klorür miktarları; termal sularda 1539,19-1732,60 mg/l arasında, soğuk sularda 61,4-73,3 mg/l'dir.

- **Sülfat (SO_4^{2-})** : Yeraltı suları yapısındaki sülfatın (SO_4^{2-}) büyük bir kısmını sedimanter kayaçlar jips, anhidrit bunların dışında magmatik kayaçlar ve organik maddelerdir. Ayrıca bunların dışında kükürt içerikli maden ocaklarının atıklarının yeraltı sularına karışması, evsel ve endüstriyel atıklar yeraltı suyuna karışması sulardaki SO_4^{2-} konsantrasyonunu arttırmaktadır. Sülfat konsantrasyonu, nehir suyunda 11 mg/l, kirlenmemiş yeraltı sularında genellikle 1–250 mg/l ve jeotermal sularda ise maksimum 1000 mg/l'dir (Nicholson 1993). SO_4^{2-} iyonunun sularda 250 mg/l'nin üzerinde bulunması istenmez (Eisen and Anderson 1979, McNeely *et al.* 1979, Hem 1985, Ford and Tellam 1994, Hounslow 1995). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan sülfat miktarları; termal sularda 335,08-455,03 mg/l arasında, soğuk sularda 39,1-40,6 mg/l'dir.
- **Nitrit (NO_2^{-1})** : Nitrit sularda düşük miktarlarda bulunan bir azot bileşiğidir. Bozunan bitkisel ve hayvansal atıklar, evsel atık sular, tarımda kullanılan gübreler, endüstriyel atık sular, katı atıkların yakılması, atmosferdeki azotun yıkanması yüzey ve yeraltı sularına nitrit sağlayan başlıca kaynaklardır (Anonim 1984). Suda nitritin bulunuşu, organik kirlenme tarafından etkilenmiş aktif biyolojik süreçlerin varlığını gösterir (McNeely *et al.* 1979). Yeraltı sularında nitrit iyonun varlığı oldukça sık görülen bir durumdur fakat yüksek konsantrasyonlarda varlığı zehirlenmelere yol açabilmektedir. Genel olarak yeraltı sularında azot olarak 0.1 mg/l'den fazla nitrit bulunmaz (Erguvanlı ve Yüzer 1987, Yalçın vd. 2004). Genel olarak yeraltı sularında azot olarak 0.1 mg/l'den fazla nitrit bulunmaz (Erguvanlı ve Yüzer 1987, Yalçın vd. 2004). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan nitrit miktarları; termal sularda < 0,01 mg/l'den azdır, soğuk sularda 0 mg/l'dir.

- **Nitrat (NO_3^{-1})** : Yeraltı sularında ve yüzey sularında nitrat konsantrasyonunun fazla olması nedeni endüstriyel atık suların yeraltı sularına karışması, tarımsal faaliyetler sonucunda kullanılan kimyasalların ve gübrelerin toprağa karışması sonucu giderek artmaktadır. Sularda 5-10mg/l'nin üzerinde nitratın bulunması bu suyun dışarıdan kirletildiğini gösterir. (Uslu ve Türkman 1987, McNeely *et al.* 1979, Bouchard *et al.* 1992, Aiuppa *et al.* 2003). Nitratın içme sularında 45 mg/l'ten fazla bulunması durumunda çocuklarda methemoglobinemia (karbondioksit zehirlenmesi-mavi bebek) hastalığına sebep olduğu tespit edilmiştir (McNeely *et al.* 1979, Freeze and Cherry 1979, WHO 1984, Hem 1985, Uslu ve Türkman 1987, Bouchard *et al.* 1992, Aiuppa *et al.* 2003). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan nitrat miktarları; termal sularda 0,11-7,22 mg/l arasında, soğuk sularda 4,7-6,5 mg/l'dir.
- **Fosfat (PO_4^{-3})** : Yeraltı sularında fosfor çeşitli polifosfat, ortofosfat, metafosfat şeklinde bulunmaktadır. Yüzey ve yeraltı sularındaki fosfat, kayalardan ve topraktan, bozulan bitkisel ve hayvansal atıklardan, evsel ve endüstriyel atıklardan, tarımda kullanılan gübrelerden, sulamadan dönen atık sulardan kaynaklanır. (Matthes 1982, Hem 1985, Aiuppa *et al.* 2003). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan nitrat miktarları; termal sularda 0,01 mg/l'den küçüktür, soğuk sularda 0 mg/l'dir.
- **Amonyum (NH_4^{+})** : Yeraltı sularındaki amonyum kaynaklarına bakıldığında hidrotermal aktiviteler kayalık ayrışması gübreler ve endüstriyel atıkların olduğu görülmektedir. TSE 266 (2005)' e göre içme sularında amonyağın hiç olmaması gerektiği belirtilir. Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan amonyum miktarları; termal sularda 0,01 mg/l'den küçüktür, soğuk sularda 0 mg/l'dir.
- **Flor (F^{-})** : Yüzey ve yeraltı sularında florun kaynağı amfibol, apatit, florit ve mika gibi minerallerdir. Alkalın sular genel olarak yüksek F^{-} içerir. Yüksek F konsantrasyonu ortamda düşük kalsiyuma işaret eder ve sedimanter kayalara nazaran, riyolit, pomza ve obsidiyen gibi volkanik kayaların su-kayaç

etkileşimindeki önemini gösterir (Mahon 1966). Yüksek F^- konsantrasyonları sedimanter kayalara göre, riyolit, pomza ve obsidiyen gibi volkanik kayaların su-kayaç etkileşimindeki önemini gösterir (Mahon 1964). Deniz sularının F^- içeriği <1 mg/l'dir (Hem 1992). Jeotermal akışkanlarda F^- içeriği genellikle 10 mg/l'den düşüktür. Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan nitrat miktarları; termal sularda 2,43-6,69 mg/l arasında, soğuk sularda 0,11-0,24 mg/l'dir.

- **Brom (Br^-)** : Jeotermal akışkanlarda brom konsantrasyonun çoğunlukla düşük olduğunu görürüz fakat bu akışkanlara deniz suyu karıştığında bu oranda yükselmeler meydana gelir. Sulardaki brom miktarlarına bakıldığında deniz sularında 67 mg/l ve doğal tuzlu sularda ise 100-1000 mg/l arasında değişim gösterdiğini görürüz. Br/Cl ve Br/I oranı sulara deniz suyu karışımı olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan iyi bir göstergedir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan brom miktarları; termal sularda 0,20-0,46 mg/l arasında, soğuk sularda 0-0,22 mg/l'dir.
- **Lityum (Li^+)** : Lityum jeotermal sularda izleyici bir elementtir. Doğadaki lityum kaynaklarına bakıldığında lityumla magnezyumun yer değiştirdiği bazı piroksen ve mika grubu minerallerdir. Rezervuardaki lityum konsantrasyonu sıcaklıkla doğru orantı, magnezyumla ters orantı sunmaktadır. Bu nedenle Li/Mg oranı jeokimyasal termometre olarak kullanılır (Kharaka and Mariner 1987). Li^+ konsantrasyonu, nehir suyunda 0,003 mg/l, kirlenmemiş yeraltı sularında genellikle 0,01-0,5 mg/l, deniz suyunda 0,17 mg/l ve jeotermal sularda ise maksimum 25 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan lityum miktarları; termal sularda 1,91-2,22 mg/l arasında, soğuk sularda 0,23-0,29 mg/l'dir.
- **Arsenik (As)** : Arsenik kalkofil bir element olup hidrotermal damarlarda Au, Ag, Cu, Ni, Co gibi elementlerle, Ni-Co sülfid yataklarında, bazı uranyum damarlarında bakırlı şeyl ve kumtaşlarında, fosfatlı kayalarda ve oksitlerde izlenir (Şahinci 1991). Derin jeotermal sistemlerde arsenik çoğunlukla As^{+3}

(arsenit) formunda bulunurken, bu form jeotermal suyun atmosferik oksijen ile reaksiyonu sonucu As^{+5} (arsenat)'e geçiş göstermektedir (Brown 1995). Yeraltı sularında yüksek arsenik konsantrasyonunun en önemli nedeni fillosilikat, demiroksit ve sülfür minerallerinden ayrılan arseniktir (Pal *et al.* 2002). Arsenik, deniz suyunda 17×10^{-4} mg/l, nehir suyunda 0,002 mg/l yeraltı sularında <0,001-0,05, maksimum 100mg/l ve termal sularda >12 mg/l'dir (Hitchon *et al.* 1999). Arsenik elementi çok zehirli olması sebebiyle içme sularında bulunması istenmez. Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan arsenik miktarları; termal sularda 2,33-6,01 mg/l arasında, soğuk sularda 0,01-0,04 mg/l'dir.

6.2 Hidrojeokimyasal Sınıflandırma

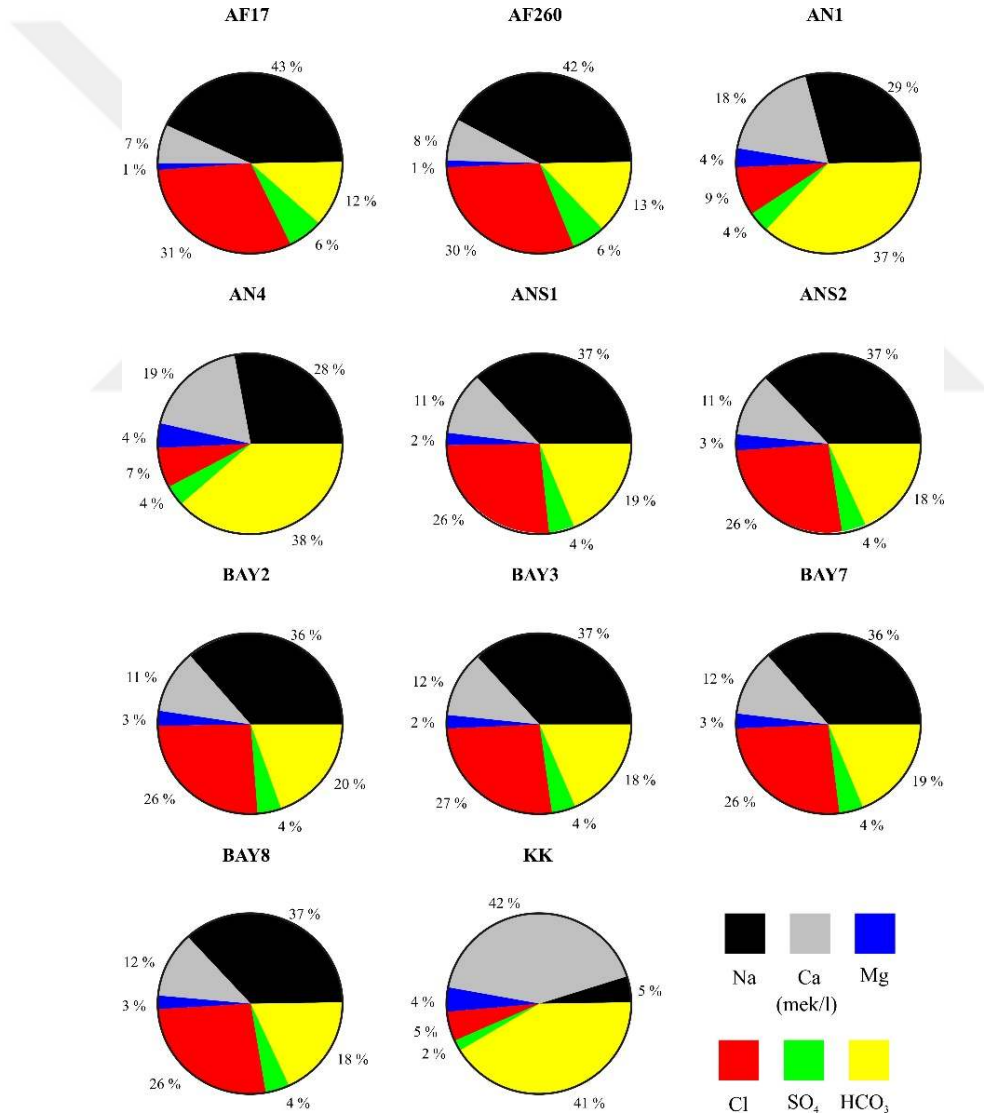
6.2.1 Suların Hidrojeokimyasal Fasiyes Kavramına göre Sınıflandırılması

Suların hidrojeokimyasal fasiyes kavramına göre değerlendirilmesi Back (1966) tarafından geliştirilmiştir. Bu sınıflama şekline göre suların yapısında bulunan anyon ve katyon değerlerinin meq/l birimleri dikkate alınarak fasiyes sınıflaması yapılmaktadır. Anyon ve katyon değerleri %50'nin üzerinde olanlar su tipini belirlerken genel itibarıyla tüm anyon ve katyon değerlerinin %50'nin altında olması karışık su tipi olduğunu işaret etmektedir.

Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (International Association of Hydrogeologists, IAH) Sıcak ve Mineralli Sular Komisyonu'nun çalışma raporunda belirtilen sınıflamada ise meq/l cinsinden olmak üzere suda % 20'den fazla çözünmüş bulunan iyonlar (anyonlar ve katyonlar ayrı ayrı olmak üzere) su tipini belirtmektedir (IAH 1979, Başkan ve Canik 1983, Tarcan 2003). Çalışma alanımızdaki fasiyes kavramına göre yapılan su sınıflamasında Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH 1979) sınıflaması kullanılmıştır (Çizelge 6.2). Bu sınıflamaya ek olarak anyon ve katyon değerlerinin görülmesi için Pie diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 6.1).

Çizelge 6.2 Bayatçık jeotermal suların IAH (1979)'a göre su tipi sınıflaması.

No	Örnek Adı	Tarih	Su Tipi
1	BAY-2	20.12.2017	Na-HCO ₃ -Cl
2	BAY-3	20.12.2017	Na-Ca-HCO ₃ -Cl
3	BAY-7	20.12.2017	Na-Ca-HCO ₃ -Cl
4	BAY-8	20.12.2017	Na-Ca-HCO ₃ -Cl
5	ANS-1	20.12.2017	Na-Ca-HCO ₃ -Cl
6	ANS-2	20.12.2017	Na-HCO ₃ -Cl
7	AF-17	20.12.2017	Na-Cl
8	AF-260	20.12.2017	Na-Cl
9	AN-1	20.12.2018	Na-Ca-HCO ₃
10	AN-2	20.12.2018	Na-Ca-HCO ₃
11	KK	----	Ca-HCO ₃



Şekil 6.1 Analizi yapılan su örneklerinin pie diyagramı.

6.2.2 Suların Piper Sınıflaması

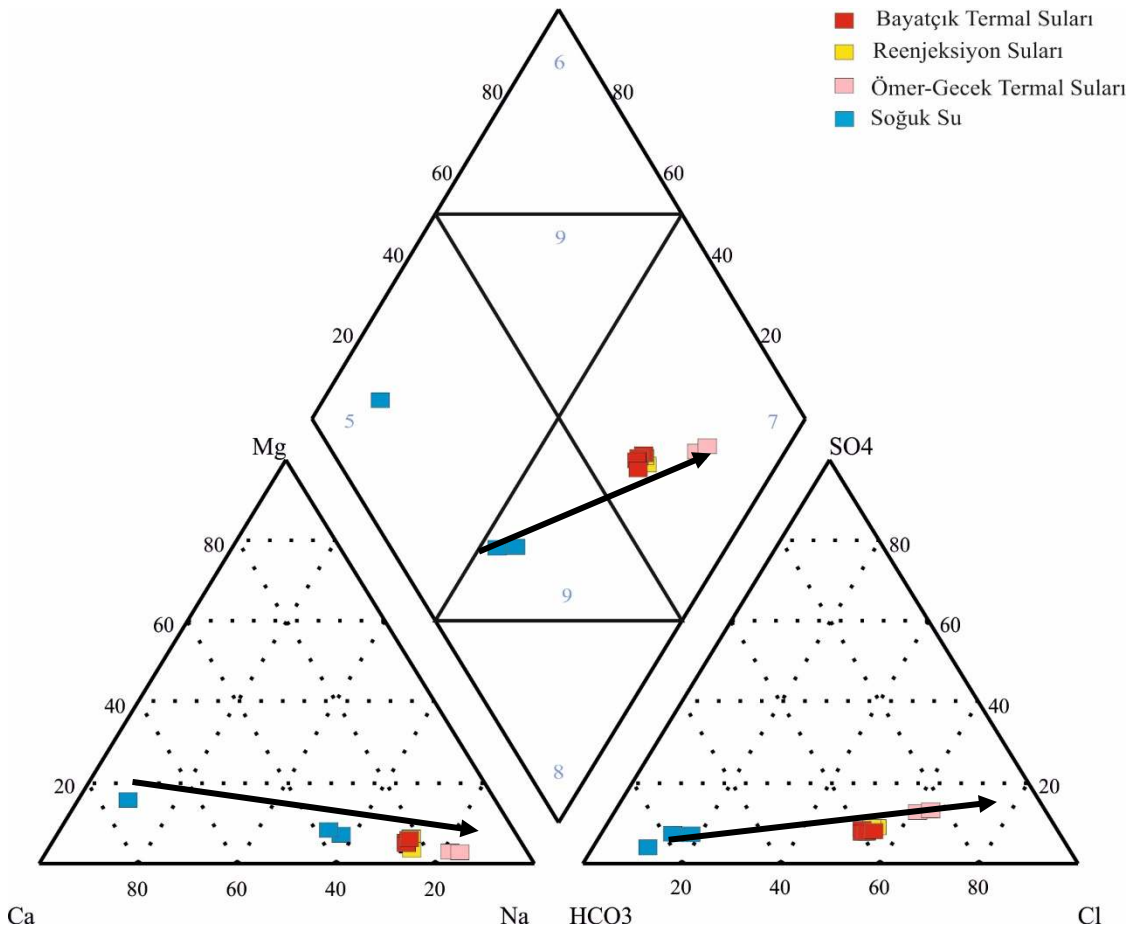
İyonların topluca tek bir diyagramda görüntüleme kolaylığı açısından hidrojeolojide oldukça sık kullanılan diyagramlardan biri Piper (Üçgen) diyagramıdır (Piper 1979). Piper diyagramı ile suların yapılarındaki anyon ve katyon (% meq/l cinsinden) içerikleri değerlendirilerek su fasiyesleri belirlenir. Piper diyagramı iki ayrı üçgen ve bir eşkenar dörtgenden oluşmakta olup üçgen diyagramla suların hidrojeokimyasal fasiyesleri belirlenirken, eşkenar dörtgenle suların sınıflandırılması ve karşılaştırılması sağlanmaktadır.

Çalışma alanımızdan alınan 8 adet sıcak su örnekleri ve 2 adet soğuk su örneklerinde yapılan analiz sonuçları ile hazırlanan Piper diyagramı Şekil 6.2’de verilmiştir. Diyagramdaki eşkenar dörtgen kendi içerisinde 9 sınıfa ayrılmıştır. Bunlar;

- 1 numaralı kısım alkali toprak element ($\text{Ca} + \text{Mg}$) > Alkali elementler ($\text{Na} + \text{K}$)
- 2 numaralı kısım $\text{Ca} + \text{Mg} < \text{Na} + \text{K}$
- 3 numaralı kısım zayıf asit kökleri ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$)
- 4 numaralı kısım $(\text{Cl} + \text{SO}_4) < (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3)$
- 5 numaralı kısım karbonat ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$) sertliği %50’den fazla olan sular
- 6 numaralı kısım karbonat olmayan sertliği %50’den fazla olan sular (CaSO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 , MgCl_2)
- 7 numaralı kısım karbonat olmayan alkalinitesi %50’den fazla olan sular
- 8 numaralı kısım karbonat alkalileri %50’den fazla olan sular. Doğada az rastlanan aşırı yumuşak sular
- 9 numaralı kısım iyonların hiçbiri %50’yi geçmeyen, karışık sular bu arana girer.

Hazırlanan piper diyagramı incelendiğinde dörtgen diyagrama bakılarak örneklerin hepsinin 2 numaralı alan yani $(\text{Ca} + \text{Mg}) < (\text{Na} + \text{K})$, termal suların 4 numaralı yani $(\text{Cl} + \text{SO}_4) < (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3)$ soğuk suların ise 3 numaralı alan zayıf asit kökleri ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$) alanda yer aldıkları görülmüştür. Bunun dışında diyagramın bir diğer sınıflamasında termal sularının (Bayatçık, Ömer-Gecek, reenjeksiyon), 7 numaralı kısım yani karbonat olmayan alkalinitesi %50’den fazla olan sular sınıfında olup $\text{Na}-\text{Cl}-\text{HCO}_3$

tipinde oldukları, soğuk suların 9 numaralı kısımda yani iyonların hiçbirinin %50'yi geçmediği karışık sular sınıfına girdiği ve Na-Ca-HCO₃ tipinde oldukları tespit edilmiştir. Bölgedeki tüm termal suların hakim katyonu Na olup, anyonlar bakımından Ömer-Gecek bölgesi suları Cl alanında yer almakta iken, Bayatçık ve Reenjeksiyon suları karışık anyonlar kısmında yer almaktadır. KK kodlu soğuk kaynak suyu Na- HCO₃ tipinde olup, soğuk sondaj suları karışık katyonlar alanında ve HCO₃ köşesinde yer almaktadır.

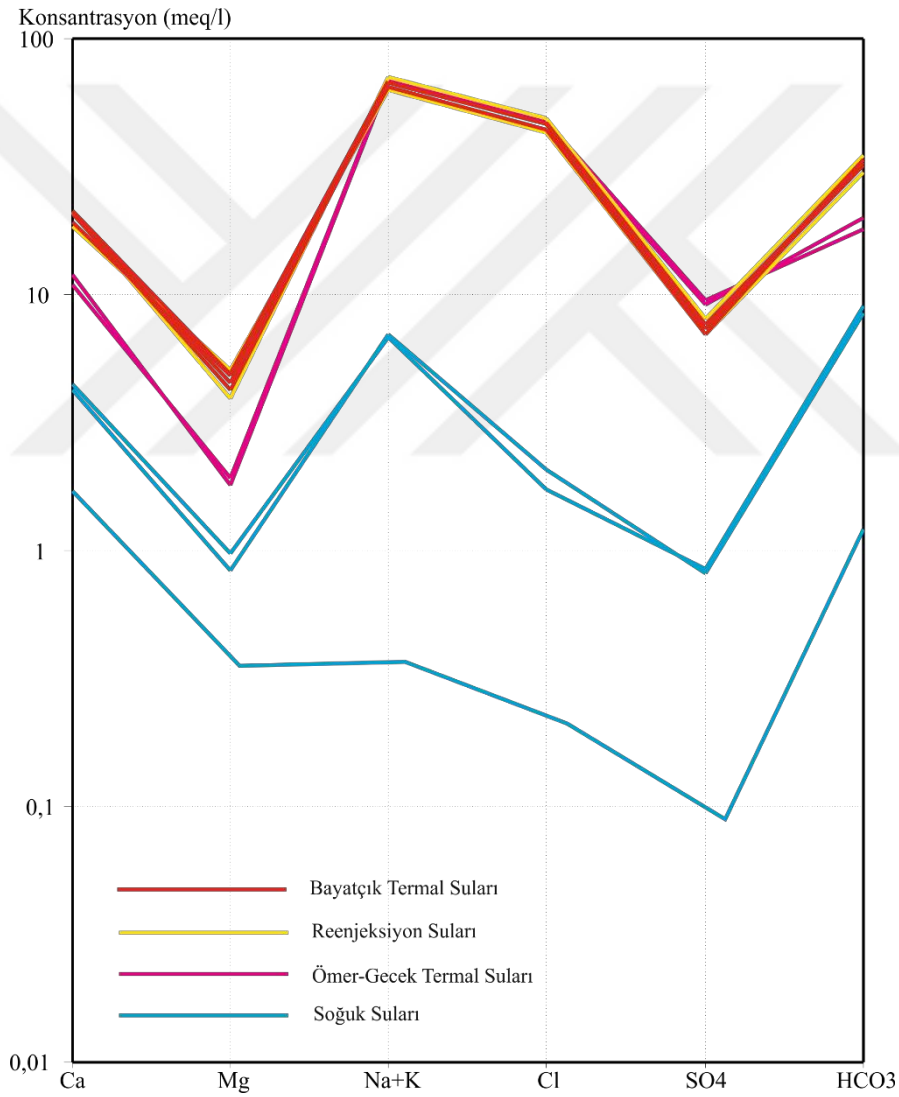


Şekil 6.2 Su örneklerinin piper diyagram konumu.

6.2.3 Schoeller Sınıflandırması

Schoeller diyagramının amacı yeraltı sularının kimyasal yapılarını inceleyerek akiferin litolojisini belirleyebilmektir. Schoeller (1955) tarafından anyon ve katyon iyonlarının konsantrasyonları yarı logaritmik diyagram üzerinde gösterilerek suların klorür (Cl), sülfat (SO₄), bikarbonat (HCO₃) miktarına göre sınıflandırılmıştır. Schoeller

sınıflandırılması için hazırlanan diyagram Şekil 6.3’de verilmiştir. Schoeller diyagramına bakıldığında termal su örneklerinin aynı ve/veya benzer kökene sahip olduğu ve Na+K, Cl, derişimleri ile soğuk sulardan net bir şekilde ayrıldığı görülmektedir. Bayatcık termal su örnekleri, muhtemel bir karışım etkisine bağlı olarak, Ca-Mg ve HCO₃ bakımından Ömer Gecek sularından daha zengindir. Ayrıca yapılan analizler sonucunda ve hazırlanan diyagramda da görüldüğü gibi termal suların yüksek Na konsantrasyonuna sahip olması plajioklasların ayrışmasını gösterirken Cl konsantrasyonlarının sıcak suların derin ve uzun bir dolaşıma sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.3 Su örneklerinin yarı logaritmik Schoeller diyagramı.

Çizelge 6.3 Klorür, sülfat ve bikarbonat miktarlarına göre suların sınıflaması (Schoeller 1955).

(Su Sınıfı)	Klorür Miktarı (mek/l)	(Su Sınıfı)	Sülfatlı Miktarı (mek/l)	(Su Sınıfı)	Bikarbonat Miktarı (mek/l)
Hiperklorürlü	>700	Hiposülfatlı	>58	Hiperkarbonatlı	>7
Klorotalastik	420-700	Sülfatlı	24-58	Normal Karbonatlı	2-7
Klorürce Zengin	140-420	Oligosülfatlı	6-24	Hipokarbonatlı	2<
Orta Klorürlü	40-140	Normal Sülfatlı	<6		
Oligoklorürlü	15-40				
Normal Klorürlü	<15				

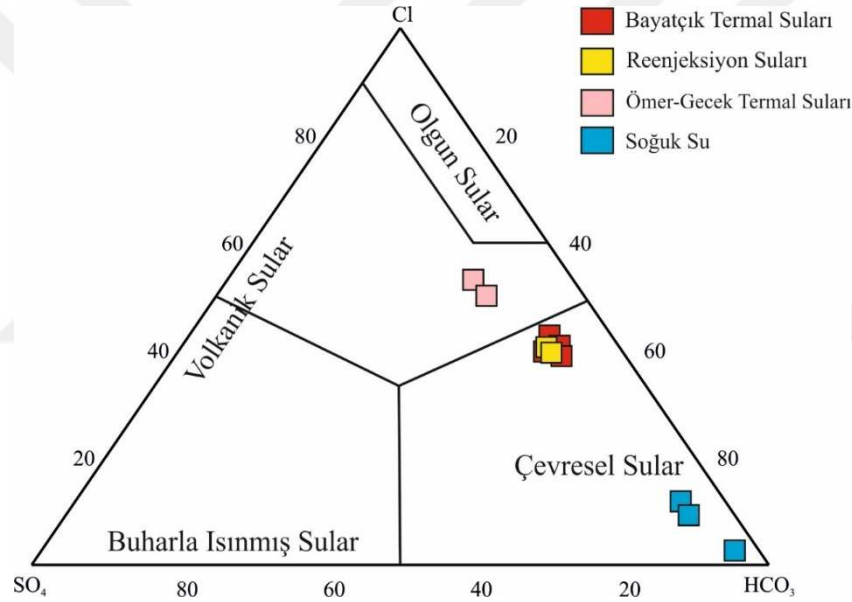
Schoeller sınıflandırmasında çalışma alanımızdan alınan yeraltı su örneklerine göre klorür derişimlerine bakıldığında BAY-2, BAY-3, BAY-7, BAY-8, ANS-1, ANS-2, AF-17, AF-260 ile kodlanmış termal suların ‘orta klorürlü’ sular sınıfına girerken, AN-1, AN-4 ile kodlanmış soğuk suların normal klorürlü sular sınıfına girmektedir

Yeraltı sularının Sülfat derişimine bakıldığında BAY-2, BAY-3, BAY-7, BAY-8, ANS-1, ANS-2, AF-17, AF-260 ile kodlanmış termal suların ‘oligosülfatlı sular’ sınıfına girerken, AN-1, AN-4 ile kodlanmış soğuk suların normal sülfatlı sular sınıfına girmektedir.

Son olarak yeraltı sularının karbonat derişimlerine göre sınıflandırma yapıldığında BAY-2, BAY-3, BAY-7, BAY-8, ANS-1, ANS-2, AF-17, AF-260 ile kodlanmış termal sular ile AN-1, AN-4 ile kodlanmış soğuk suların ‘Hiperkarbonatlı sular’ sınıfına girdiği görülmüştür. Genel olarak bakıldığında termal suların Orta klörürlü, oligosulfatlı ve hiperkarbonatlı sular olduğu, soğuk suların ise normal klorürlü, normal sülfatlı hiperkarbonatlı sular sınıfına girmektedir.

6.2.4 Cl-SO₄-HCO₃ Sınıflaması

Cl-SO₄-HCO₃ üçgen diyagramı suları bir ölçüde kökenel bazda sınıflandırmaya yarar (Nicholson 1993). Bu diyagram kullanılarak hızlı bir şekilde ön değerlendirme yapılmaktadır. Cl-SO₄-HCO₃ üçgen diyagramına göre Bayatcık termal sularının çevresel kökenli sular olabileceği ve HCO₃ köşesine yakın olması sebebiyle sıg kökenli sular olabileceğine işaret olarak yorumlanır (Şekil 6.4). Reenjeksiyon sularının da Bayatcık termal sularında olduğu gibi çevresel kökenli olabileceğine işaret etmektedir. Ömer-Gecek termal sularının olgun sular sınıfında yer alıp olgun sular çizgisine yakın olması yeraltı suyunun Cl konsantrasyonunun yüksek olması ile eşdeğerdir.



Şekil 6.4 Su örneklerinin Cl-SO₄-HCO₃ diyagramı.

6.2.5 Suların Doyma İndeksleri

Jeotermal akışkanlar, kullanımları sırasında kabuklaşma ve korozyon sorunlarına neden olabilecek gaz ve katı maddeler içermektedir. Kabuklaşma, jeotermal kaynakların kullanımı sırasında oluşan en önemli sorunlardan birisidir. Genelde termal suların üretim ve kullanımlarında kimyasal bileşimlerine göre; silikat kabuklaşmaları, karbonat kabuklaşmaları ve sülfat kabuklaşmaları ile karşılaşılır.

Dünyadaki pek çok jeotermal sistemde esas kabuklaşma mineralleri kalsit ve amorf silistir (Arnorsson 2000, Armannsson 2000, Kristmannsdottir 1989).

Denge sabitleri kullanılarak hesaplanan doygunluk indeksleri (SI), mineral çözünme ve çökelme ilişkilerini anlamada faydalı bir yöntemdir. Doygunluk indeksi (SI); (Q) çözelti sıcaklık ve basıncında, çözünmüş bileşenlerin analiz edilmesiyle hesaplanan derişim ve (K) termodinamik yollarla hesaplanan (Gibbs enerjisi) veya laboratuvarında belirlenmiş denge sabitlerinin logaritması olmak üzere;

$$SI = \frac{\log Q}{\log K} \quad (6.1)$$

SI>0 ise çözeltinin o mineralce doymuş ve çökelme eğiliminde olduğu, SI<0 ise çözeltinin o minerali çözme eğiliminde olduğu, SI=0 veya sıfıra yakın bir değerse, o mineralle dengede olduğu anlaşılmaktadır. Suların mineral doygunluk durumları; bu suların üretimi ve iletimi aşamasında oluşabilecek kabuklaşma ve korozyon problemlerinin önceden tahmin edilebilmesi için açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında döneminde analizi yapılan her bir su noktasına ait mineral doygunluk değerleri PhreeqC (Parkhurst and Alpelio 1999) programı yardımıyla hesaplanmıştır. Bölgedeki termal suların doygunluk indisleri hesaplanırken suların çıkış pH ve sıcaklık değerleri dikkate alınmış elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.4 incelendiğinde, tüm sular Al(OH)₃, alunit, anhidrit, anortit, selestit, gibsit, jips, halit, jarosit, sepiyolit, siderit, SiO₂(a), silvit ve viterit'ce doygunluk altı değerler vermekte olup bu mineraller suda çözünme eğilimindedir.

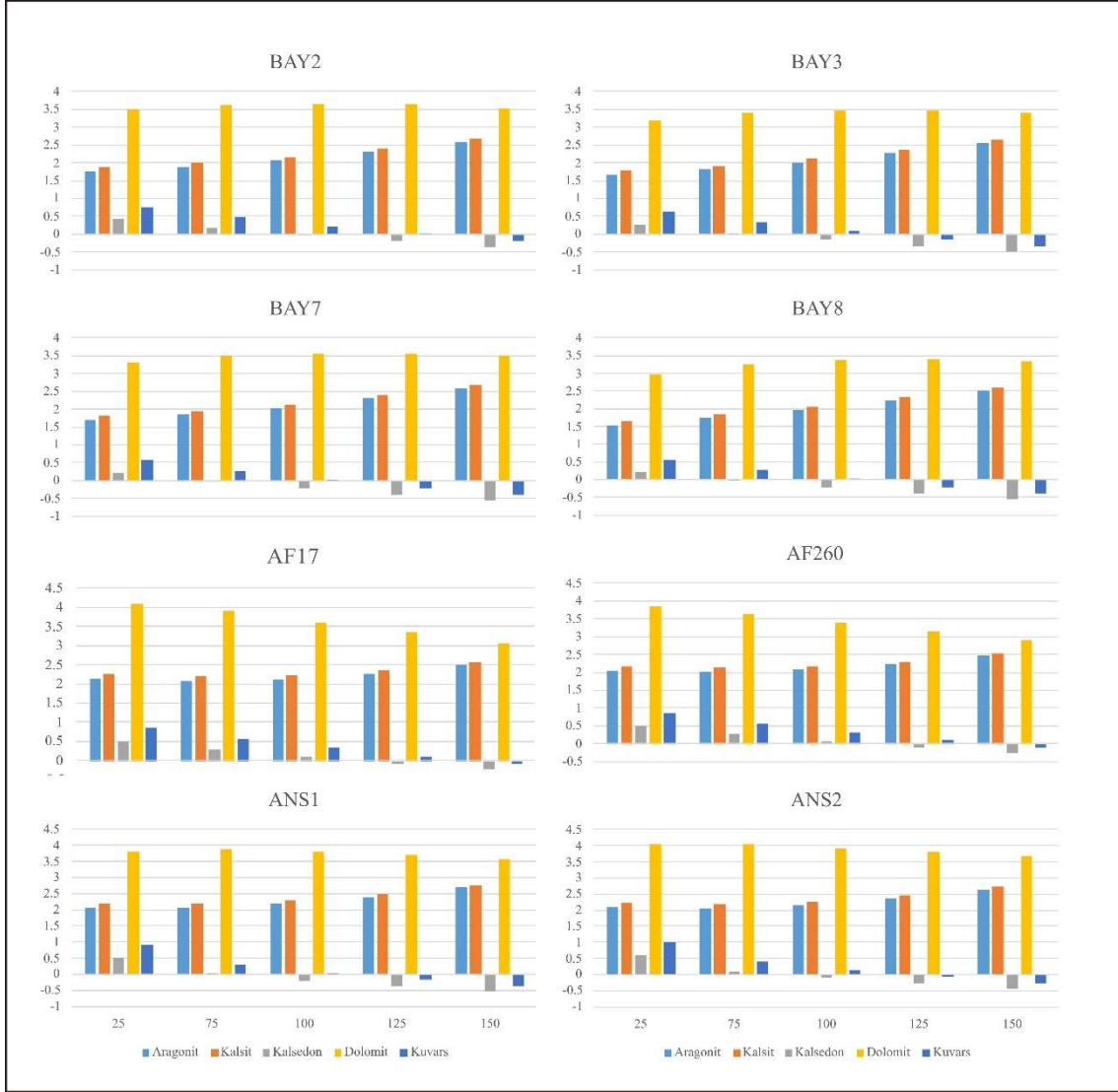
Diğer yandan ise incelenen örnekler aragonit, kalsit, kalsedon, klorit, krizotil, dolomit, götit, hematit, mika, kuvars, stronsiyonit ve talk minerallerince doymuş ve bu mineralleri çöktürme eğilimindedir.

Ayrıca ülkemizdeki en yaygın kabuklaşma mineralleri olan aragonit-kalsit-dolomit-kuvars ve kalsedon gibi minerallerin farklı sıcaklıklardaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla bu mineralleri 25-50-75-100-125-150°C'lerdeki doygunluk indisleri hesaplanmış ve davranışları değerlendirilmiştir (Şekil 6.5). Buna göre örneklerin

tamamında artan sıcaklığa bağlı olarak karbonat minerallerinin doygunlukları da artmakta, bunun aksine silis mineralleri çözünür hale geçmektedir.

Çizelge 6.4 İnceleme alanındaki termal suların doygunluk indisleri.

	BAY2	BAY3	BAY7	BAY8	AF17	AF260	ANS1	ANS2
Al(OH) ₃ (a)	-2,72	-2,93	-2,96	-3,03	-4,40	-4,08	-2,82	-2,89
Albit	0,08	-0,63	-0,87	-1,03	-1,14	-1,06	0,19	0,61
Alunit	-8,23	-8,50	-8,63	-8,56	-16,42	-14,44	-8,56	-9,22
Anhidrit	-0,88	-0,82	-0,82	-0,82	-0,66	-0,43	-0,97	-1,09
Anortit	-1,13	-1,98	-2,12	-2,46	-2,40	-2,15	-1,44	-1,2
Aragonit	1,84	1,77	1,80	1,67	2,11	2,05	2,04	2,06
Barit	-0,21	-0,16	-0,22	-0,21	-0,22	0,00	0,01	-0,02
Ca-Montmorillonit	0,60	-0,42	-0,76	-0,95	-3,98	-3,32	0,57	0,96
Kalsit	1,96	1,88	1,91	1,79	2,21	2,16	2,17	2,19
Selestin	-1,07	-1,00	-1,04	-1,02	-0,80	-0,67	-0,97	-1,07
Kalsedon	0,28	0,14	0,07	0,07	0,15	0,14	0,25	0,38
Klorit (14A)	6,84	4,69	4,92	3,66	13,08	11,22	6,45	8,38
Kristolit	1,93	0,86	1,01	0,34	7,33	5,82	2,03	3,35
Dolomit	3,60	3,35	3,46	3,19	3,72	3,49	3,93	4,14
Fe(OH) ₃ (a)	-0,31	-0,07	-0,35	-0,35	-1,76	-1,73	1,2	0,97
Florit	-0,15	0,08	0,05	-0,12	-0,23	-0,26	-0,06	-0,29
Jipsit	-0,36	-0,56	-0,59	-0,67	-2,21	-1,89	-0,34	-0,39
Götit	6,84	7,08	6,83	6,83	6,08	6,11	7,91	7,59
Jips	-0,99	-0,92	-0,93	-0,93	-1,01	-0,78	-0,93	-1,01
Halit	-4,40	-4,35	-4,36	-4,36	-4,36	-4,39	-4,31	-4,39
Hematit	15,85	16,32	15,83	15,83	14,42	14,49	17,94	17,29
İllit	0,86	-0,25	-0,53	-0,80	-3,05	-2,59	1,04	1,55
Jarosit-K	-5,64	-4,60	-5,36	-5,06	-10,26	-9,15	-2,97	-4,49
K-feldispat	0,89	0,14	-0,06	-0,22	-0,57	-0,48	1,16	1,61
K-mika	6,04	4,88	4,62	4,31	1,05	1,78	6,23	6,58
Kaolinit	1,46	0,77	0,55	0,41	-2,55	-1,92	1,44	1,61
Kuvars	0,60	0,46	0,38	0,39	0,41	0,40	0,6	0,74
Sepiyolit	0,23	-0,72	-0,78	-1,21	2,87	1,85	0,69	1,88
Sepiyolit (d)	-3,60	-4,55	-4,63	-5,06	-1,47	-2,49	-2,81	-1,56
Siderit	-2,90	-2,48	-2,76	-2,58	-6,56	-6,01	-1,96	-2,57
SiO ₂ (a)	-0,44	-0,58	-0,65	-0,64	-0,50	-0,51	-0,51	-0,4
Stronsiyanit	0,33	0,25	0,26	0,15	0,78	0,62	0,66	0,68
Silvin	-5,21	-5,21	-5,16	-5,17	-5,26	-5,28	-5,06	-5,14
Talk	6,64	5,29	5,30	4,64	12,01	10,49	6,52	8,06
Witerit	-2,26	-2,35	-2,37	-2,48	-1,88	-1,94	-1,97	-1,91



Şekil 6.5 Su örneklerinin sıcaklık-doygunluk diyagramları.

7. İZOTOP JEOKİMYASI

Elektron ve proton sayıları aynı olan ve nötron yükleri farklı olan elementlere izotop denilmektedir. İzotoplar radyoaktif ve duraylı olarak iki sınıf oluşturmaktadır. Radyoaktif izotoplar genel olarak jeotermal akışkanların dolaşım sürelerinin saptanmasında ve buna bağlı olarak yaşlarının belirlenmesinde kullanılırken en çok tercih edilen radyoaktif izotoplar ^3H (trityum), ^{14}C , ^{131}I , ^{222}Rn 'dur. Duraylı izotoplar jeotermal akışkanın kökensel yorumunun yapılmasını bu sayede beslenme alanlarının karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde ve sıcaklık tayini yapılmasında etkin rol oynamaktadır. En çok kullanılan duraylı izotoplar oksijen izotopları (^{16}O - ^{18}O), hidrojen izotopları (^1H - ^2H), karbon izotopları (^{12}C - ^{13}C) ve sülfür izotopları (^{32}S - ^{34}S)'dır.

İzotop tekniklerinin başlıca kullanım alanları, suyun kökeninin (meteorik, magmatik ve metamorfik vb), suyun yaşının (beslenme-boşalım veya beslenme-örnekleme arasındaki sürenin), yeraltı sularının beslenme alanlarının, farklı akiferlerden ve/veya farklı kaynaklardan gelen suların karışım oranlarının, yeraltı suyunun akiferde kalış ve yenilenme sürelerinin ve yeraltı suyunun eskilik derecesinin belirlenmesi çalışmalarında kullanılmaktadır (Çiftler ve Sayın 2002).

7.1 ^{18}O -D İlişkisi

Suların döteryum (^2H) ve ^{18}O kompozisyonları genelde SMOW (Standart Mean Ocean Water) standardına göre ölçülmektedir (Fritz and Fontes 1980). Duraylı izotop bileşimleri belli bir standardın bileşiminden olan sapmalar olarak δ (delta) ile tanımlanır formül aşağıda belirtilmiştir;

$$\delta \text{ ağır izotop}(\text{‰}) = \frac{[(\text{ağır}^{\text{izotop}}_{\text{hafif}})_{\text{örnek}} - (\text{ağır}^{\text{izotop}}_{\text{hafif}})_{\text{standart}}]}{(\text{ağır}^{\text{izotop}}_{\text{hafif}})_{\text{standart}}} \times 10^3 \quad (7.1)$$

Oksijen ve hidrojen izotopları için kullanılan formül;

$$\delta D(\text{‰}) = \{[(D/H)_{\text{örnek}} - (D/H)_{\text{standart}}]/[(D/H)_{\text{standart}}]\} \times 10^3 \quad (7.2)$$

$$\delta D(\text{‰}) = \{[(180/160)\text{örnek} - (180/160)\text{standart}]/[(180/160)\text{standart}]\} \times 10^3 \quad (7.3)$$

Meteorik sular üzerinde yapılmış olan izotop analizleri $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerlerinin $\delta\text{D} = 8 (\delta^{18}\text{O}) + 10$ denklemi (Craig 1961) ile tanımlanan çizgisel bir ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Dünya Meteorik Su Doğrusunu (DMD) tanımlayan bu denklemde D değeri Dünya Meteorik Doğrusunun y eksenini kestiği nokta ‘Döteryum Fazlası’ olarak tanımlanır ve yağışa kaynak oluşturan deniz suyunun buharlaşma miktarının bir göstergesidir (Craig 1961).

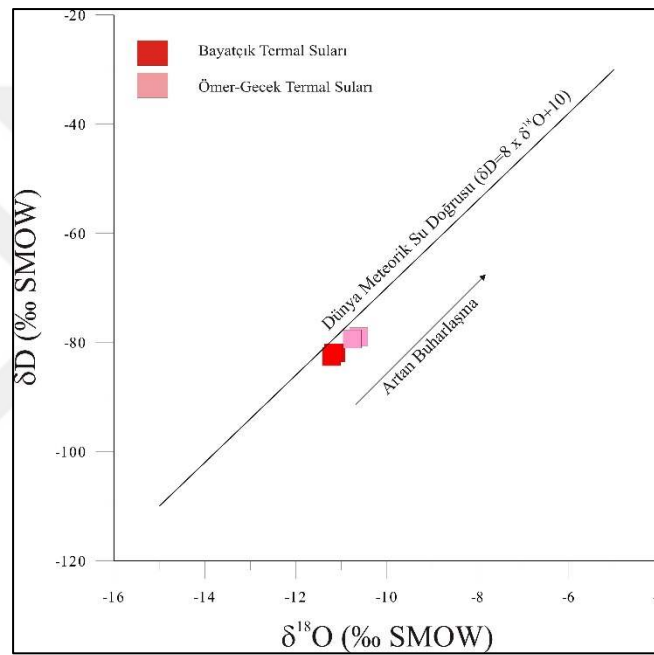
Meteorik suların $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri hava sıcaklığına göre değişim göstermektedir. Sıcaklık düştükçe izotop ayırılma faktörü, dolayısıyla suların ağır izotop/hafif izotop oranları artmaktadır. Ayrıca bu değerler, bulunulan bölgenin enlemine ve deniz seviyesinden olan yükseltisine bağlı olarak da değişmektedir; enlem ve yükseklik arttıkça, $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri düşmektedir (Dangsgaard 1964).

Buhar basıncı izotopların kütleleri ile ters orantılı değer göstermektedir. Buharlaşma sürecinde buhar fazı hafif izotoplarca (^1H ve ^{16}O) zenginleşirken sıvı faz ağır izotoplarca (^2H ve ^{18}O) derişmektedir (Faure 1986). Su buharıyla oluşan yağmur damlaları ağır izotoplarca zengin olmaktadır fakat yağış devam ederken buhardan ^{18}O ve D ayrışması ile birlikte buhar fazında ^1H ve ^{16}O izotop derişimi artmaktadır. Dolayısıyla havadaki buhar fazı, yağmur, kar veya dolu yağışları devam ettikçe, daha negatif $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerlerine sahip olmaktadır (Domenico and Schwartz 1990).

İnceleme alanında jeotermal akışkanlardan alınan örneklerde yapılan izotop analizleri sonucu (Çizelge 7.1) $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ diyagramına işlendiğinde suların genel olarak Dünya Meteorik Su Doğrusu (DMD) üzerinde kaldığı ve suların meteorik kökenli olduğu görülmektedir (Şekil 7.1). Ömer-Gecek örneklerinin maruz kaldığı nispeten daha yüksek buharlaşma bu örneklerin grafik üzerinde buharlaşma çizgisi boyunca yukarı hareket etmesine neden olmuştur.

Çizelge 7.1 ^{18}O -D izotop analizi yapılan örnekler ve analiz sonuçları.

Örnek Adı	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)	D
BAY-2	-11,22	-82,58
BAY-3	-11,12	-81,82
BAY-7	-11,14	-81,88
BAY-8	-11,18	-81,85
AF-17	-10,62	-78,92
AF-260	-10,76	-79,35



Şekil 7.1 Su örneklerinin ^{18}O -D diyagramındaki konumu.

7.2 ^3H (trityum) İçeriği

Hidrojeolojik çalışmalarda radyoaktif izotoplardan kullanılanların başında ^3H (trityum) gelmektedir. Su içerisindeki trityum derişim birimi TU (tritium unit) olarak ifade edilmektedir. 1 TU birimi 10^8 Hidrojen atomundan birinin ^3H olduğunu göstermektedir. Radyoaktif izotopların zamansal değişimleri dikkate alınarak yeraltı sularının bağlı yaşları belirlenebilmektedir. Yarılanma ömürleri bağlı yaşlarının yanında suların akifer kalış ve yenilenme sürelerinin tespit edilmesinde de rol oynamaktadır. Yarı ömrü 12,32 yıl olan beta bozunması veren trityum iki şekilde oluşum göstermektedir. Doğal yolla

oluşumu atmosferde azot atomlarıyla kozmik nötronların etkileşimi ile gerçekleşmekte iken bunun yanı sıra antropojenik olarak termonükleer denemeler sonucunda da oluştuğu bilinmektedir. 1963 yılına kadar yapılan termonükleer bomba denemeleri sonucunda trityum miktarı yüksek değerlere ulaşmış olup bu tarih itibariyle denemelerin yasaklanması sonucu trityum doğal yarılanma sürecine girmiştir. 1963 yılı öncesinde yeraltı sularındaki trityum miktarı 10 TU olduğu kabul edildiğinde bunun günümüze kadar gelen miktarı bozunma denklemi (Kendall and Caldwell 2006);

$$A_1 = A_0 e^{-\lambda t} \quad (7.4)$$

ile tespit edilmektedir. A_1 : Güncel trityum miktarı (TU), A_0 : Başlangıçtaki trityum miktarı, λ : Trityumun yarılanma süresi ($0,0558 \text{ yıl}^{-1}$), t : Başlangıçtan herhangi bir t anına kadar geçen süre (yıl)'dır. İnceleme alanından alınan örneklerle ait ^3H değerleri çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 ^3H izotop analizi yapılan örnekler ve analiz sonuçları.

Örnek Adı	^3H	Hata +/- 1 Sigma
BAY-2	0,16	0,25
BAY-3	0,47	0,26
BAY-7	0,37	0,25
BAY-8	0,46	0,26
AF-17	0	0,24
AF-260	0,19	0,26

İnceleme alanında güncel trityum miktarı yukarıdaki denklem yardımıyla hesaplanılarak; $A_1 = 0,47$ TU değeri bulunmuştur. Buradan hareketle; BAY-2, BAY-7, AF-17, AF-260 kuyularının $0,47$ 'den daha az trityum içerdiği ve bu suların 55 yıl ve daha yaşlı sular olduğu belirlenmiştir. BAY-3 ve BAY-8 örnekleri ise $0,47$ civarında değerlere sahip olup, yaşlı sular ile güncel meteorik suların karışımını işaret etmektedir. Standart hata payları da dikkate alındığında suların tamamının yaşlı sular olduğu görülmektedir.

8. JEOTERMOMETRE

Jeotermometrelerin genel amacı jeotermal sistemlerde rezervuar kayaçtaki akışkanın sıcaklığının tahmin edilmesidir. Jeotermal akışkan rezervuar kayaçtan yüzeye çıkışı sırasında uzun yol alması ve buradaki kayaçlarla etkileşim haline girmesi bunun yanı sıra soğuk sularla karışarak rezervuar kayaçtaki ısılarını önemli ölçüde kaybederek yüzeye çıkarlar. Genel olarak derinlerde sahip olunan sıcaklıklar yüzeydekine kıyasla çok daha fazladır. Termal sular yüzeye çıkış sıcaklıkları dikkate alınarak çeşitli kullanım alanlarına ayrılmaktadır. Bu nedenle termal suların uygun şekilde kullanılabilirliği açısından akifer sıcaklığının tahmini çok önemlidir. Derinlere yapılacak sıcak su sondajları ile akifer sıcaklığı tespit edilebilmektedir. Fakat bu sondajlar yüksek maliyet ve zaman istemektedir. Bu nedenle yapılan çeşitli jeotermometre yöntemleriyle daha az maliyet ve daha az zaman ile akifer sıcaklığı hakkında bilgi edinilmektedir.

8.1 Kimyasal Jeotermometreler

Jeotermometre yöntemlerinden biri olan kimyasal jeotermometre yöntemi, kimyasal analizlerin maliyetinin düşük olması ve daha kısa sürede yapılabilmesi sebebiyle akifer sıcaklığının tahmin edilmesi için tercih edilen bir yöntemdir. Kimyasal jeotermometre değerlendirmeleri niteliksel (kalitatif) ve sayısal (kantitatif) olmak üzere iki bölümde incelenebilir (Şahinci 1987).

8.1.1 Niteliksel (Kalitatif) Kimyasal Jeotermometreler

Kalitatif jeotermometrelerin çoğu uçucu maddelerin sıcak akışkanlarda ve zeminde izafi miktarlarına, dağılımlarına veya zemin gazlarındaki oranlarına dayanır (Fournier 1977). Termal akışkanlarda bulunan bazı element, bileşik ve oranların sıcaklık hakkındaki izafi bilgileri aşağıda verilmiştir.

- ❖ **SiO₂:** Silis akifer sıcaklığı hakkında en iyi bilgi veren bileşendir. Yüksek sıcaklıktaki sularda hemen hemen 180°C de silis çökmesi başlar ve sıcaklık değerinin azalması ile birlikte çökeltmede artış gözlenir. 140°C'nin üzerinde, örtü

kaya tıkama malzemesi olarak genellikle kuvars ve kalsedon izlenir. Miktar olarak zayıf klorür içeren asitli sular 100°C ye yakın değerlerde kayalardaki silikat miktarını değiştirerek amorf silis açısında zenginleşme yapabilir (Tarcan 2004). Doğal gayzerlerde, yüzeyde amorf silis veya kristalleşmiş silis çökelleri, rezervuar kaya sıcaklığının 180°C veya daha fazla olabileceğini gösterir (Şahinci 1987).

- ❖ **Klorür:** 150°C'nin üzerinde sıcaklığa sahip akiferlerde genellikle 150 ppm'den fazla klorür nadir olarak 200°C'nin üzerindeki akiferlerde ise 40 ppm'in altında bulunmaktadır. Klorür, sıcak su sistemleri ile buhar sistemlerini birbirinden ayıran en önemli bileşendir. Sıcak sistemlerde klorür tuzları çok bulunmaktadır. 400°C de bile klorür tuzlarının uçuculuğu önemsizdir. Bu nedenle, düşük basınçlı buhar sistemlerinde klorür azdır (Şahinci 1987). 50 mg/l miktarının üstünde klorür gözlenirse sıcak su sisteminin varlığını gösterir (Tarcan 2004).
- ❖ **Na/K oranı:** Akifer sıcaklığının yüksek derece olması, Na/K oranının yüksekliği ile tahmin edilebilmektedir. Özellikle bu oran, 20/1-8/1 arasında anlamlıdır. Bu oran dikkate alınarak hesaplanan akifer sıcaklığı, suyun ilk derinlik sıcaklığını veya yatay uzaklığın sıcaklığını tanımlar. Yüzeydeki sıcak suyun kimyasal analizlerine göre silis jeotermometresi ile hesaplama yapılır. Silis jeotermometresi ile hesaplanan akifer sıcaklık değeri, Na/K ile bulunandan küçük ise, akışkanın rezervuar kayadan yüzeye gelişi sırasında soğuk sular ile karışmış olabileceği vurgulanır (Şahinci 1987).
- ❖ **B, NH₄, H₂S, Hg, Cl, Na, K, Li, Rb, Cs, As:** Bu gibi element ve bileşiklerin biri veya birkaç tanesinin suda fazla bulunması, akifer sıcaklığının yüksek olabileceğine işarettir (Tarcan 2004).
- ❖ **Traverten Çökelmeleri:** Karbonat oluşumları akifer sıcaklığının düşük olduğuna (yaklaşık 100°C) işarettir. Nadir olarak bikarbonatlı suların yeraltında soğuduktan sonra kireçtaşlarından geçmesi ile, hazne kaya sıcaklığı yüksek olabilmektedir.

8.1.2 Sayısal (Kantitatif) Kimyasal Jeotermometreler

Kantitatif kimyasal jeotermometrelerin kullanılmasında bazı varsayımlar göz önünde bulundurulur. Bunlardan bazıları şunlardır (White 1970, Fournier *et al.* 1974).

- ❖ Sıcaklığın tespit edilmesi için gerekli olan maddelerin ortaya çıkması amacıyla gerçekleşen kimyasal tepkimeler sürekli ve bu tepkimelerin kaynağı rezervuar kayaçta boldur,
- ❖ Sıcak suların yapısındaki kimyasal bileşenlerin oluşması için gerekli olan kimyasal tepkimeleri rezervuar kayaç-su etkileşimi ile gerçekleşmektedir,
- ❖ Rezervuar sıcaklığında rezervuar kayaç ve su etkileşimi kimyasal denge sergilemektedir,
- ❖ Rezervuardan gelen sıcak suların yüzey ve soğuk yeraltı suları ile karışımı olamaz,
- ❖ Rezervuardan yüzeye çıkan sıcak suların soğuması ile kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik olmaz.

Bu varsayımların ilk üçü SiO_2 ve Na-K-Ca jeotermometreleri için kullanılır. Son iki varsayım ise tam olarak gerçeği yansıtmaz (Şahinci 1987). Çünkü akiferden yüzeye doğru gelen sıcak suların soğuk sularla karşılaşmasıyla soğuma gerçekleşebilir ve soğuk sularla karışmasıyla kimyasal bileşimi değişebilmektedir.

8.1.2.1 Çözünürlüğe Bağlı Jeotermometreler

Silis Jeotermometreleri

Kuvars çözünürlüğüne bağlı jeotermometreler, akifer sıcaklığının tespit edilmesinde önemli bir yer edinmektedir. Kuvarsın silika halinde birçok polimorfu mevcuttur. Bunlar

kuvars, kalsedon, amorf silis, moganit, tridimit, kristobalit, koesit ve stikovit'dir (Arnorsson 2000). Bunlar 150°C ile 225°C sıcaklık aralığında iyi sonuç vermektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda akiferden yüzeye doğru hareket eden sıcak akışkanda hızlı silis çökelişi gözlenir ve bu nedenle sıcaklığı 225°C'nin üzerindeki hazne kayalardan gelen sulara gerçek sıcaklığı yansıtmaz. Kalsedon çok iyi gelişmiş küçük kuvars kristalleri içerir ve bu kristallerin yüzey enerjisi sayesinde kuvarstan daha çok suda çözünme özelliğine sahiptir (Arnorsson 2000). Özellikle sıcaklıkları <180°C olan akışkanlarda kuvarsa nazaran kalsedon ile denge söz konusu olduğundan kalsedon jeotermometresi daha doğru sonuçlar vermektedir (Karingithi 2009). Silis Jeotermometresinde kullanılan bazı bağlantılar Çizelge 8.1'de verilmiştir. Alınan su örneklerinden elde edilen kimyasal analiz sonuçlarına göre hazırlanan silis jeotermometre sonuçları Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Akifer sıcaklıklarının tespit edilmesi için kullanılan bazı silis jeotermometreleri.

<i>Jeotermometre</i>	<i>Denklem</i>	<i>Referans</i>
SiO ₂ (Amorf silis)	$t=731/(4.52-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier 1977
SiO ₂ (α Kristobalit)	$t=1000/(4.78-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier 1977
SiO ₂ (β Kristobalit)	$t=781/(4.51-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier 1977
SiO ₂ (Kalsedon)	$t=1032/(4.69-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier 1977
SiO ₂ (Kuvars)	$t=1309/(5.19-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier 1977
SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1522/(5.75-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier 1977
SiO ₂ (Kalsedon)	$t=1112/(4.91-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1264/(5.31-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1021/(4.69-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1164/(4.9-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1498/(5.7-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
SiO ₂ (Kuvars)	$t=1175.7/(4.88-\log \text{SiO}_2)-273.16$	Verma 2000

Çizelge 8.2 Silis jeotermometre sonuçları.

<i>Jeotermometre /Örnek Adı</i>	<i>BAY-2</i>	<i>BAY-3</i>	<i>BAY-7</i>	<i>BAY-8</i>	<i>ANS-1</i>	<i>ANS-2</i>	<i>AF-17</i>	<i>AF-260</i>
SiO ₂ (α Kristobalit)	75,8	59,2	59,3	52,8	56,2	67,8	95,5	91,3
SiO ₂ (Kalsedon)	98,6	80,4	80,5	73,4	77,2	89,9	120,4	115,7
SiO ₂ (Kuars)	126,5	109,7	109,8	103,2	106,7	118,5	146,1	141,9
SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	123,6	109,3	109,4	103,8	106,8	116,8	140,2	136,7
SiO ₂ (Kalsedon)	98,1	81,1	81,2	74,6	78,1	89,9	118,1	113,8
SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	99,1	84,0	84,1	78,2	81,3	91,9	116,7	112,9
SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	94,7	76,6	76,7	69,7	73,4	86,0	116,2	111,6
SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	116,7	98,8	98,9	91,9	95,7	108,2	137,8	133,3
SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	122,5	108,1	108,2	102,5	105,5	115,7	139,3	135,7
SiO ₂ (Kuars)	123	104,7	104,8	97,7	101,5	114,3	144,6	140,0

8.1.2.2 İyon Değişimine Bağlı Katyon Jeotermometreleri

İyon değişim denge sabitleri sıcaklıkla ilişkili olması sebebiyle hidrojeokimyasal araştırmalarda yol gösterici niteliğindedir. Araştırmacılar su içerisinde iyon değişimi göstermeyen bazı mineralleri baz alarak deneysel jeotermometre formülleri oluşturmuşlardır. Bu formüller Çizelge 8.3’de verilmiştir. Oluşturulan formüller pratikte bazı hatalar vermekte olup doğru sonuçlar yansıtmadığı durumlar gözlenmiştir.

- **Ca⁺⁺:** Suda fazlaca Ca iyonu bulunması durumunda akifer sıcaklığı hesaplamalarında yüksek değerler çıkarmaktadır.
- **Na/K:** Bu oranı yansıtan jeotermometre sıcak sularda pH değeri nötr ve nötre yakın veya karbonat çökelimlerinin gerçeklememesi, $\log(\sqrt{Ca/Na})$ değerinin 0,5’ten düşük olması şartları aranmalıdır. Na/K jeotermometreleri genellikle 200 °C üzerindeki sıcaklıktaki bir akiferden gelen sularda daha iyi sonuç vermektedir ve özellikle 100 °C altında sıcaklığa sahip sularda gerçeği yansıtmayan sonuçlar çıkarmaktadır (Fournier 1977, Şahinci 1991).

- **Na-K-Ca:** Bu jeotermometre Na/K jeotermometresiyle karşılaştırıldığında gerçeğe yakın değerler sunmaktadır. Jeotermal sulardaki Ca/Na (mol/l) oranının 1'den büyük olduğu durumlarda Na/K jeotermometre bağlantılarının akifer sıcaklığı hesaplamasında afaki değerler vermektedir. Bunu ortadan kaldırmak için Fournier and Truesdell (1973), tarafından bir formül oluşturulmuştur;

$$t = (1647/(\log (Na/K) + \beta \log (\sqrt{Ca/Na}) + 2,24)) - 273,15 \quad (8.1)$$

$$\log \sqrt{Ca}/Na < 0 \text{ ise } \beta = 1/3 \quad (8.2)$$

$$\log \sqrt{Ca}/Na > 0 \text{ ise } \beta = 4/3 \text{ değeri alır.} \quad (8.3)$$

Çizelge 8.3 Akifer sıcaklığı tespit edilmesinde kullanılan jeotermometre denklemlerinden bazıları.

<i>Jeotermometre</i>	<i>Denklem</i>	<i>Kaynak</i>
Na/K	$t = 933/(0.933 + \log Na/K) - 273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
Na/K	$t = 1319/(1.699 + \log Na/K) - 273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
Na/K	$t = 777/(0.70 + \log Na/K) - 273.15$	Arnorsson <i>et al.</i> 1983
Na/K	$t = 856/(0.857 + \log Na/K) - 273.15$	Truesdell 1976
Na/K	$t = 1217/(1.483 + \log Na/K) - 273.15$	Fournier 1979
Na/K	$t = 1178/(1.470 + \log Na/K) - 273.15$	Nieva and Nieva 1987
Na/K	$t = 1390/(1.750 + \log Na/K) - 273.15$	Giggenbach 1988
Na/K (mmol)	$t = 908/(0.692 + \log Na/K) - 273.15$	Fournier 1979
Na/K	$t = 1180/(1.31 + \log Na/K) - 273.15$	Fournier and Potter 1979
Na/K	$t = 833/(0.78 + \log Na/K) - 273.15$	Tonani 1980
K/Mg	$t = 4410/(13.95 - \log K^2/Mg) - 273.15$	Giggenbach 1988
Na-K-Ca (R)(Mg düz.)	$R = (Mg/Mg + Ca + K) \times 100$	Fournier and Potter 1979
Mg-Li	$t = 2200/(\log (Mg^{0.5}/Li) + 5,47) - 273.15$	Kharaka and Mariner 1989
Na/Li	$t = 1590/(0.779 + \log (Na/Li)) - 273.15$	Kharaka <i>et al.</i> 1982
Na-Li (mmol) Cl>0.3	$t = 1195/(0.130 + \log (Na/Li 0.5)) - 273.15$	Fouillac and Michard 1981
Na/Ca	$t = 1096.7/3.08 - \log (Na/Ca 0.5)) - 273.15$	Tonani 1980
K/Ca	$t = 1930/3.861 - \log (K/Ca 0.5)) - 273.15$	Tonani 1980

Bayatcık jeotermal sahasında alınan örneklerden kimyasal analiz sonucunda elde edilen veriler ile birlikte bazı jeotermometre denklemleri kullanılarak akifer sıcaklığı hesaplanmıştır. Hesaplanan akifer sıcaklıkları Çizelge 8.4'te verilmiştir. Na/K, Na/Li,

K/Ca jeotermometrelerinden elde edilen sonuçların gerçekten uzak olduğu (160°C–234°C) görülmektedir. Silis jeotermometrelerinde elde edilen sonuçlara en yakın K/Mg ve Na/Ca jeotermometrelerinin olduğu görülmektedir. Bayatcık jeotermal alanında akifer sıcaklığı yaklaşık olarak 82°C – 106°C arasında olduğu hesaplanmıştır.

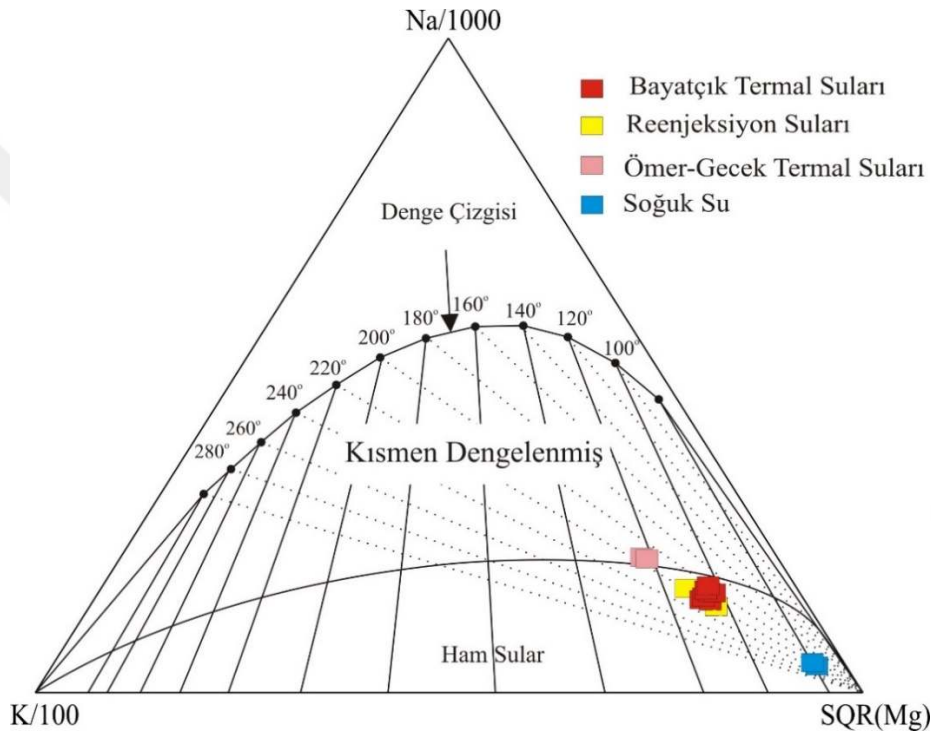
Çizelge 8.4 Katyon jeotermometre sonuçları.

<i>Jeotermometre / Örnek Adı</i>	<i>BAY-2</i>	<i>BAY-3</i>	<i>BAY-7</i>	<i>BAY-8</i>	<i>ANS-1</i>	<i>ANS-2</i>	<i>AF-17</i>	<i>AF-260</i>
Na/K	186,2	177,7	190,3	189	188,6	188,5	184,9	187,4
Na/K	198,4	192	201,5	200,5	200,2	200,1	197,5	199,3
Na/K	158,9	149,9	163,4	161,9	161,6	161,4	157,7	160,3
Na/K	164,7	156,3	168,7	167,4	167,1	166,9	163,4	165,9
Na/K	198,3	191,5	201,7	200,6	200,3	200,2	197,4	199,3
Na/K	185,5	178,8	188,8	187,8	187,5	187,4	184,6	186,5
Na/K	214,9	208,5	218	217	216,7	216,6	213,9	215,8
Na/K (mmol)	234,1	223,5	239,3	237,6	237,2	236,9	232,5	235,6
Na/K	216,9	209,2	220,6	219,4	219	218,9	215,8	217,9
Na/K	170,4	161,5	174,7	173,3	172,9	172,8	169,1	171,7
K/Mg	106,9	107,6	109,1	109,7	113	106	121,9	123,1
Na-K-Ca (R)(Mg düz.)	10,5	8,9	9,7	9,3	7,9	11,3	6,5	5,7
Mg-Li	89,7	92,3	89,1	90,6	96,1	88,5	103,9	105,2
Na/Li	162,9	162,2	159,9	161,2	165,6	163,3	162,9	165
Na-Li(mmol) Cl>0.3	170,1	169,1	165,9	167,7	173,8	170,6	170,1	172,9
Na/Ca	82,7	82,7	82,7	82,7	82,7	82,6	82,4	82,4
K/Ca	227,5	227,6	227,6	227,5	227,5	227,5	227,3	227,3

8.3 Birleşik Jeotermometre Uygulamaları

Bazı araştırmacılar jeotermometre uygulamalarının uygulanabilirliğini ve akifer sıcaklığının tespit edilmesi için diyagramlar geliştirmişlerdir. Buna Giggenbach (1988)’ın geliştirip Fournier (1990)’ın güncellediği Na-K-Mg diyagramı örnek verilebilmektedir. Na-K-Mg üçgen diyagramı jeotermal suların kökenini dengeye ulaşıp ulaşamadıklarının

kontrolünü ve uygun jeotermometrelerin seçiminde kullanılır (Giggenbach 1988). Giggenbach diyagramı su-kayaç ilişkisinin dengede olmadığı, kısmen dengede olduğu ve tam dengede olduğu 3 bölümden oluşmaktadır. Bu diyagrama göre; soğuk su örnekleri ham sular, Ömer-Gecek termal su örnekleri kısmen dengelenmiş sular alanında yer alırken Bayatcık su örneklerinin ham sular ile kısmen dengelenmiş sular arasında kaldığı görülmektedir (Şekil 8.1). Bu diyagramda suların bir doğru üzerinde dizilmesi de bir karışımı ifade eder.



Şekil 8.1 Su örneklerinin Giggenbach diyagramı.

9. TARTIŞMA

Bayatcık jeotermal sahasında yer alan termal örneklerin gerek coğrafik ve jeolojik konumları, gerekse önceki bölümlerde incelenen hidrojeokimyasal özellikleri birlikte değerlendirildiğinde bu suların, yakın bölgede yer alan Ömer-Gecek bölgesi termal suları ile yakından ilişkili oldukları göze çarpmaktadır.

Genel olarak tüm grafiklerde Bayatcık bölgesi sularının Ömer-Gecek bölgesi suları ile aynı hidrojeokimyasal özelliklere sahip oldukları ve/veya bu suların soğuk sular ile Ömer-Gecek bölgesi suları arasında bir geçiş seviyesinde yer aldıkları görülmektedir. Buradan hareketle bu iki sahanın ilişkisinin açıklanmasında aşağıdaki yorumlar dikkate alınabilir;

1. Ömer-Gecek bölgesinde üretilmekte olan termal suların bir kısmı GD yönüne doğru hareket etmekte, uzun dolaşım yolu esnasında sıcaklığını kaybederek Ca-HCO₃ elementleri bu suda derilmekte ve Bayatcık bölgesindeki sondajlar ile yüzeye çıkmaktadır.
2. Bayatcık bölgesi suları; Ömer-Gecek sularının GD'ya akışı esnasında soğuk sular ile karışarak sıcaklığını kaybetmekte ayrıca Ca-HCO₃ gibi soğuk su işaretçisi olan elementler bakımından zenginleşmektedir.

Bu karışım göstergelerinin tamamı sıcak sular ile deniz suyu arasında değişik oranlarda bir karışım olduğunu belgelemektedir. Karışım oranları, deniz suyu ve tatlı su uç noktaları ile karışım suyu olduğu kuvvetle muhtemel olan sulardaki klorür iyonu oranlamalarından yararlanılarak aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$X_f = (Cl_s - Cl_m) / (Cl_s - Cl_f)$$

Burada;

X_f: Soğuk su oranı

Cl_m: Karışım sularında klorür konsantrasyonu

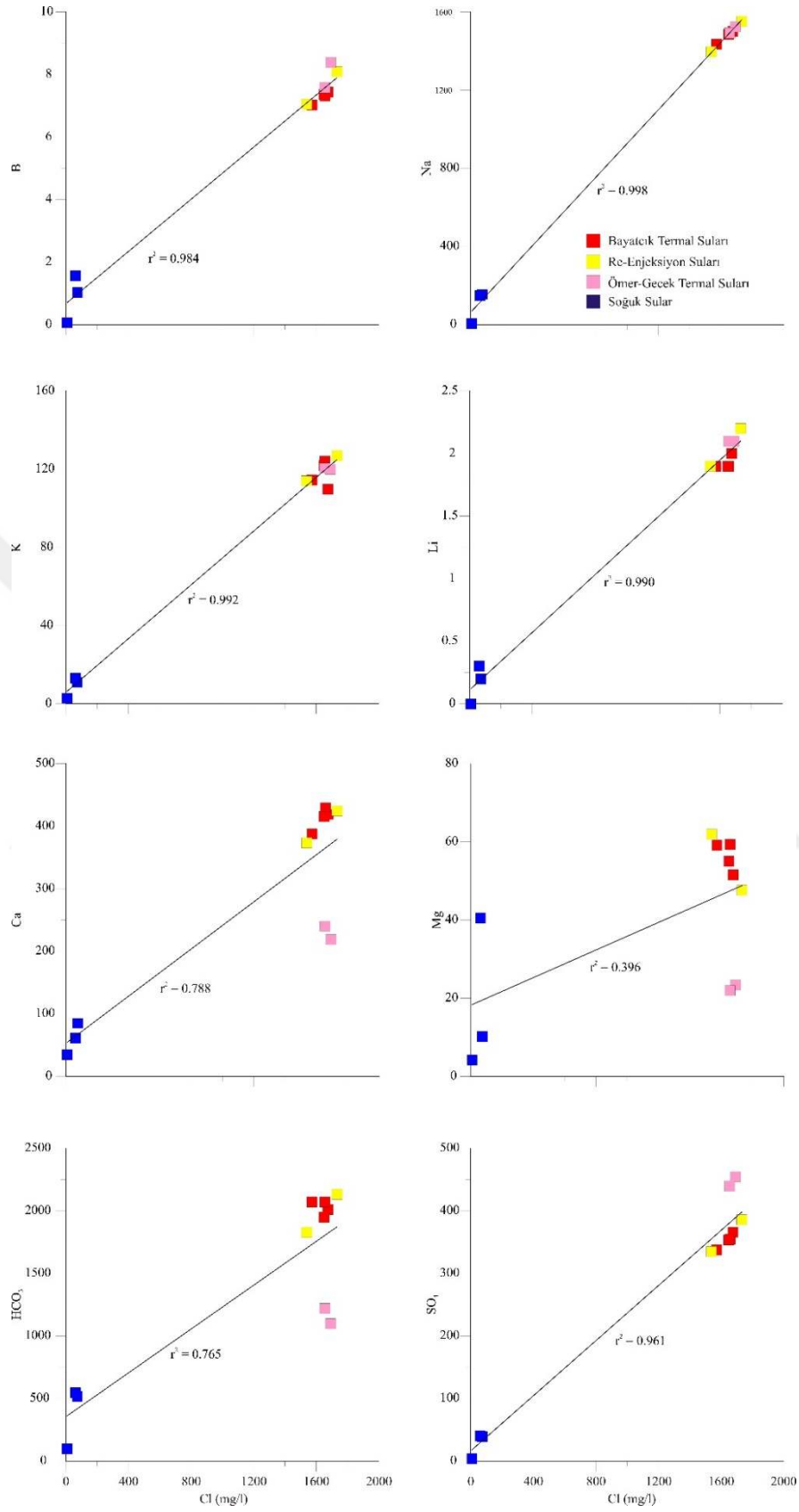
Cl_s: Uç Termal su klorür konsantrasyonu

Cl_f: Tatlı yeraltısuyunda klorür konsantrasyonunu olarak tanımlanmaktadır.

Buradan hareketle; karışım suları olarak Bayatcık su örnekleri, uç termal su klorür konsantrasyonu olarak AF-17 kuyusu ve tatlı yeraltı suyu olarak KK örneğinin klorür değeri dikkate alındığında Xf karışım oranının BAY-2, BAY-3, BAY-7 ve BAY-8 kuyuları için sırasıyla %7, %1, %2, %2 olarak hesaplanmıştır.

Karışımın göstergelerinden birisi Cl iyonunun başta bor olmak üzere diğer kimyasal bileşenlerle pozitif bir doğrusal ilişki göstermesi olup bu doğrusal ilişki karışım için kuvvetli bir delildir (Arnorsson 1985). Karışım göstergelerini sınamak için klorür iyonuna karşı diğer bileşenlerin grafikleri çizilmiştir (Şekil 9.1). Bu grafiklerden klorür iyonuna karşı Na ($r^2 = 0,998$), K ($r^2 = 0,992$), Li ($r^2 = 0,990$), SO_4 ($r^2 = 0,961$) ve B ($r^2 = 0,984$) değerleri ile yüksek doğrusal ilişki sunarken; Ca ($r^2 = 0,788$), Mg ($r^2 = 0,396$) ve HCO_3 ($r^2 = 0,765$) açısından nispeten kötü korelasyon sunmaktadır. Diyagramlarda Bayatcık ve Ömer-Gecek termal sularının aynı özellikte olduğu ve karışımın çok az miktarda veya hiç olmadığı görülmektedir. Ömer-Gecek suları düşük Ca, Mg, HCO_3 ve yüksek SO_4 içerikleri ile Bayatcık jeotermal sularından ayrılmaktadır.

Genel olarak Bayatcık sularının Piper, Cl- SO_4 - HCO_3 ve Na-K-Mg diyagramlarında Ömer-Gecek bölgesi suları ile soğuk sular arasında yer almalarına rağmen soğuk su karışımının çok az olduğunu görülmekte ve bu bilgi yukarıda bahsedilen 1. görüşü desteklemektedir.



Şekil 9.1 İnceleme alanı sularının Cl-iyon grafikleri.

10. SONUÇLAR

İnceleme alanının temelinde Bayramgazi şistleri ve Oyuklutepe mermerlerinden oluşan Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfikleri yer almaktadır. Orta-Üst Miyosen yaşlı Ömer-Gecek formasyonu temel kayaların üzerine uyumsuzlukla gelmiştir. Birim Başçakmaktepe konglomerası, Seydiler Tüf ve Aglomerası ve Köprülü volkano-sedimanter istifinden oluşmaktadır. Üst Miyosen yaşlı volkanitler bölgedeki volkanizmanın son ürünleridir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ise inceleme alanındaki en genç birimlerdir.

Bölgede etkin olan fay sistemlerine bakıldığında Afyon Akşehir graben sisteminde yer alan Erkmen (Demirçevre) fayı ve Gecek fayının varlığı görülmektedir. Ömer-Gecek bölgesinde faylar basamak şeklinde normal faylardan oluşan bir görünüm sunarlar.

Afyonkarahisar ilinin deniz seviyesinden yüksekliği 1021 m olup yıllık sıcaklık ortalaması 11.2 derece ve yıllık yağış ortalaması 461 mm olduğu bilinmektedir. Bölgedeki geçirimli birimler Oyuklutepe Mermerleri, Başçakmaktepe Konglomerası, ve Alüvyon'dan oluşmaktadır. Yarı Geçirimli Birimler Kocatepe Trakiti, Seydiler Tüf ve Aglomerası'ndan oluşmaktadır. Son olarak bölgenin Geçirimsiz Birimlerini Bayramgazi Metamorfikleri Köprülü Kilitaşı-Marn-Tüf Üyesi oluşturmaktadır.

İnceleme alanında yapılan sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre termal sularda sıcaklık değerleri, reenjeksiyon kuyularında 47°C-50°C arasında değişiklik gösterirken, üretim kuyularında 65°C-92°C arasında değişim göstermektedir. İnceleme alanında alınan su numuneleri üzerinde yapılan ölçümler sonucu elektriksel iletkenlik değerleri 256-8002 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişim göstermektedir. Genel olarak sıcak suların pH değerlerinin 7,27-8,26, soğuk suların pH değerlerinin ise 7,38- 8,65 aralığında olduğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucu redoks potansiyel değerleri -34 ile 37,7 arasında değişim göstermekte olduğu ve sıcak suların pozitif (yükseltgen), soğuk suların ise negatif (indirgen) özellikli olduğu görülmüştür.

İnceleme alanı suları farklı kimyasal özelliklere sahip olmasına karşın genel olarak termal

sondaj kuyularının Na-HCO₃-Cl, Na-Ca-HCO₃-Cl ve Na-Cl, Reenjeksiyon kuyularının Na-Ca-HCO₃-Cl ve Na-HCO₃-Cl, soğuk su sondajlarının Na-Ca-HCO₃, soğuk su kaynaklarının ise Ca-HCO₃ tipinde olduğu görülmektedir.

İnceleme alanında jeotermal akışkanlardan alınan örneklerde yapılan izotop analizleri sonucu $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ ilişkisinin genel olarak Dünya Meteorik Su Doğrusu (DMD) üzerinde kaldığı ve suların meteorik kökenli olduğu görülmektedir. Ömer-Gecek örneklerinin maruz kaldığı nispeten daha yüksek buharlaşma bu örneklerin grafik üzerinde buharlaşma çizgisi boyunca yukarı hareket etmesine neden olmuştur.

³H yaşlandırmasında 0,47 TU değeri bulunmuştur. Buradan hareketle; BAY-2, BAY-7, AF-17, AF-260 kuyularının 0.47'den daha az trityum içerdiği ve bu suların 55 yıl ve daha yaşlı sular olduğu belirlenmiştir. BAY-3 ve BAY-8 örnekleri ise 0,47 civarında değerlere sahip olup, yaşlı sular ile güncel meteorik suların karışımını işaret etmektedir.

İnceleme alınan örneklerden elde edilen kimyasal analiz sonuçlarına göre uygulanan çeşitli jeotermometre yöntemleriyle akifer sıcaklıklarının; Na/K, Na/Li, K/Ca jeotermometrelerinden elde edilen sonuçları gerçekten uzak olduğu (160°C–234°C), silis jeotermometrelerinde elde edilen sonuçlara en yakın K/Mg ve Na/Ca jeotermometrelerinin olduğu görülmektedir. Bayatcık jeotermal alanında akifer sıcaklığının 82°C – 106°C arasında olduğu öngörülmektedir.

Genel olarak Bayatcık jeotermal suları, Ömer-Gecek bölgesi jeotermal suları ile aynı özellikte olup, o bölgeden akışa geçen termal ve reenjeksiyon sularının Bayatcık bölgesinden sondajlar ile elde edilmesiyle alınmaktadır. Ömer-Gecek bölgesindeki termal su kullanımı ve reenjeksiyon sıcaklıkları Bayatcık bölgesi sularını da doğrudan etkileyeceği için, Ömer-Gecek bölgesinde su kullanımının yakından takip edilmesi gerekmektedir.

11. KAYNAKLAR

- Aiuppa, A., Bellomo, S., Brusca, L., d'Alessandro, W., and Federico, C. (2003). Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano (Mt. Etna, Italy). *Applied Geochemistry*, **18**: 863-882.
- Akan, B. (2002). Afyon Ömer-Gecek Su Akifer Hidrojeolojik Modeli. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Akdemir, D. (2015). Çöl (Haydarlı/Afyon) Ovası'nın Hidrojeoloji İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Akgiray, Ö. (2003). İçme Suyu ve Su Arıtımı. Suyumuzun Geleceği ve Türkiye Su Politikaları, 22, 62-75.
- Akkuş, İ., Aydoğdu, Ö., Vekli, M., Öziçli, F.M. (2006). Afyon İlindeki Jeotermal Kaynaklara İlişkin Değerlendirme Raporu. Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi, Ankara.
- Aksever, F. (2011). Afyon Sandıklı Havzası Hidrojeoloji İncelemesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Arnórsson, S. (2000). Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., and Svavarsson, H. (1983). The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47**: 547-566.
- Arnórsson, S. (1985). The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **23**: 299-335.
- Back, W. (1966). Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part Of Atlantic Coastel Plain. *U.S. Geol. Surv. Profess. Papers*, **488**: 1-42.
- Başaran, C. (2017). Heybeli Jeotermal Alanının (Afyonkarahisar) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelemesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

- Başarır, E. ve Kun, N. (1982). Afyon Kalesi Çevresindeki Volkanik Kayaçların Petrografik İncelenmesi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Yer Bilimleri Dergisi*, **2**: 87-96.
- Başkan, M. E., and Canik, B. (1983). IAH map of mineral and thermal waters of Turkey Aegean Region. MTA, Ankara, Rapor, (189), 80.
- Besang, C., Eckhardt, F. J., Harre, W., Kreuzer, H., and Müller, P. (1977). Radiometrische Altersbestimmungen an Neogenen Eruptivgesteinen der Türkei. *Geologisches Jahrbuch*, **25**: 3-36.
- Blumenthal, M. (1963). Le systeme structural du Taurus sud-anatolien, In Livre a'memoire du Professeur P. Fallot. *Memoires de la Societe Geologique de France*, **2**: 611-662.
- Bogomolov, G. V., (1965). Özel hidrojeoloji. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- Bouchard, D. C., Williams, M. K., and Surampalli, R. Y. (1992). Nitrate contamination of groundwater: sources and potential health effects. *Journal of the American Water Works Association*, **84**: 85-90.
- Boyacı, M.N. (1996). Bayat (KD-Afyon) Yöresi Bölgesel Metamorfitlelerinin Petrografik ve Yapısal İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bozkurt, E. (2000). Timing of extension on the Büyük Menderes Graben, western Turkey, and its tectonic implications. *Geological Society, Special Publications*, **173**: 385-403.
- Brown, K.L. (1995). Environmental Aspects of Geothermal Development. World Geothermal Congress, Pisa-Italy, 3-38.
- Calmbach, L. (1997). AquaChem computer code-version 3.7. 42. Waterloo, Ontario, Canada.
- Candan, O., Çetinkaplan, M., Oberhänsli, R., Rimmelé, G., and Akal, C. (2005). Alpine high-P/low-T metamorphism of the Afyon Zone and implications for the metamorphic evolution of Western Anatolia, Turkey. *Lithos*, **84**: 102-124.

- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**: 1702-1703.
- Çakmakcı, F. (1999). Akarçay Havzası (Afyon) Hidrojeolojik Coğrafi Bilgi Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çifter, C., ve Sayın, M. (2002). İzotopların hidrolojide kullanılması. Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu, Adana.
- Dağ, T. (2012). Hüdai (Sandıklı-Afyonkarahisar) Jeotermal Suların Kökeninin ve Sürdürülebilir Kullanımının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**: 436-468.
- Doğan, L. (1981). Hidrojeolojide su kimyası. Devlet Su İşleri yayınları, Ankara, 178.
- Doğdu, M. Ş., ve Bayarı, C. S. (2002). Akarçay Havzası'nda (Afyon) jeotermal kökenli kirlenme: 2. Yeraltısuyu kirliliği. *Yerbilimleri Dergisi*, **23**: 35-49.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. (1990). Physical and chemical hydrogeology. John Wiley, Singapore.
- Eisena, C., and Anderson, M. P. (1979). The effects of urbanization on ground-water quality-A case study. *Groundwater*, **17**: 456-462.
- Ercan, T. (1985). Orta Anadolu'daki Senozoyik Volkanizması. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Yayınları, 119-140.
- Ercan, T., Dinçel, A., Metin, S., Türkecan, A. ve Günay, E. (1978). Uşak yöresindeki Neojen havzaların jeolojisi. *Bulletin of the Geological Society of Turkey* **21**: 97-106.
- Erguvanlı, K., ve Yüzer, E. (1987). Yeraltı suları jeolojisi. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Erkan, Y., Bayhan, H., Tolluoğlu, Ü., Aydar, E. (1996). Afyon Yöresi Metamorfik ve Volkanik kayaçlarının Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi. TÜBİTAK-YBAG-0044/DPT Projesi Raporu, Ankara.
- Faure, G. (1986). Principles of Isotope Geology (2nd edition). New York: John Wiley and Sons, 589.

- Ford, M., and Tellam, J. H. (1994). Source, type and extent of inorganic contamination within the Birmingham urban aquifer system, UK. *Journal of Hydrology*, **156**: 101-135.
- Fournier, R. O. (1977). A review of chemical and isotopic geothermometers for geothermal systems. In Proceeding of the Symposium on Geothermal Energy, Cento Scientific Program, 133-143.
- Fournier, R. O. (1990). Interpretation of Na-K-Mg relations in geothermal waters. In 1990 International Symposium on Geothermal Energy, 1421-1425.
- Fournier, R. O., and Truesdell, A. H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **37**: 1255-1275.
- Fournier, R. O., and Potter II, R. W. (1979). Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **43**: 1543-1550.
- Fournier, R. O. (1979). A revised equation for the Na/K geothermometer. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, **3**: 221-224.
- Fouillac, C., and Michard, G. (1981). Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, **10**: 55-70.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). Groundwater. New Jersey: Prentice Hall, 604.
- Fritz, P. and Fontes, J.Ch. (1980). Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. The Terrestrial Environment, Amsterdam, Elsevier.
- GARRELS, R. M. (1967). Genesis of some ground waters from igneous rocks. *Geochemistry*, **2**: 405-420.
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, **52**: 2749-2765.
- Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., Şentürk, K., Uysal, Ş., Özcan, A. ve Işık, A., (1996). Orta Sakarya'da Nallıhan-Sarıcakaya Arasındaki Yapısal Birliklerin Jeolojik Özellikleri. MTA Rapor No. 10094, Ankara. (Yayınlanmamış).
- Harut, B. (1995). Erken Volkanitlerinin (Afyon NW Kesimi) Minerolojik-Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hem, J.D. (1992). Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 2254.
- Hitchon, B., Perkins, E. H., and Gunter, W. D. (1999). Introduction to ground water geochemistry. Alberta Research Council.
- Hounslow, A.W. (1995). Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, 54.
- IAH. (1979). Map of Mineral ve Thermal Water of Europe. Scale 1:500.000, International Association of Hydrogeologists, United Kingdom.
- Karingithi, C.W. (2009). Chemical Geothermometers for Geothermal Exploration. Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, 1-22.
- Kendall, C. and Caldwell, E.A. (2006). Fundamentals of İsope Geochemistry, (eds: C. Kendall ve J. J. McDonnell), Isotope Tracers In Catchment Hydrology, The Netherlands: Elsevier, 51-84.
- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun tektonik birlikleri. *MTA Dergisi*, **66**: 20-34.
- Kharaka, Y. K., and Mariner, R. H. (1989). Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In Thermal history of sedimentary basins (pp. 99-117). Springer, New York, NY.
- Kibici, Y., Yıldız, A., and Bağcı, M. (2001). Afyon kuzeyinin jeolojisi ve mermer potansiyelinin araştırılması. Türkiye III. Mermer Sempozyumu, 73-85.
- Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, **27**: 1-16.
- Koçyiğit, A. (2000). Güneybatı Türkiye'nin depremselliği. Batı Anadolu'nun depremselliği Sempozyumu, 30-38.
- Koçyiğit, A., and Deveci, Ş. (2007). Çukurören-Çobanlar (Afyon) arasındaki deprem kaynaklarının (Aktif fayların) belirlenmesi. TÜBİTAK, Proje, (106Y209).
- Koçyiğit, A., and Özacar, A. A. (2003). Extensional neotectonic regime through the NE edge of the outer Isparta Angle, SW Turkey: new field and seismic data. *Turkish*

Journal of Earth Sciences, **12**: 67-90.

- Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, **27**: 1-16.
- Koçyiğit, A., and Saraç, G. (2000). Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in west Central Anatolia and the Isparta Angle: a case study in the Akşehir-Afyon Graben, Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, **173**: 405-421.
- Kristmannsdóttir, H. (1989). Types of scaling occurring by geothermal utilization in Iceland. *Geothermics*, **18**: 183-190.
- Kuşcu, M., Yıldız, A., ve Bağcı, M. (1999). Köprülü (Afyon) trakiandezitinin yapıtaşı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, 11. Mühendislik Haftası Yerbilimleri Sempozyumu Isparta, 193-203.
- Mahon, W. A. J. (1966). Silica in hot water discharged from drillholes at Wairakei, New Zealand. *New Zealand Journal of Science*, **9**: 135-144.
- Mahon, W. A. J. (1964). Fluorine in the natural thermal waters of New Zealand. *New Zealand Journal of Science*, **7**: 3-28.
- Matthes, G. (1982). The properties of groundwater. Wiley and Sons, 420s., New York.
- McNeely, R. N., Neimanis, V. P., and Dwyer, L. (1979). Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters. In Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters. Environment Canada.
- Memiş, U. (2010). Afyon-Sandıklı Hüdai Jeotermal Alanının Hidrojeokimyasal Özelliklerinin ve İz Element Kirliliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Metin, S., Genç, Ş., ve Bulut, V. (1987). Afyon ve dolayının jeolojisi. MTA Rapor, (8103).
- Metin, Ş., Genç, İ. ve Bulut, V. (1987). Afyon ve Dolayının Jeolojisi. MTA Rapor, (2113).
- Mutlu, H. (1996). Afyon Jeotermal Alanındaki Termal Suların Jeokimyasal Değerlendirmesi; Jeotermometre Uygulamaları ve Akışkan-Mineral Dengesi.

- Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- MUTLU, H. (1997). Gazlıgöl (Afyon) termal ve maden sularının jeokimyasal özellikleri ve jeotermometre uygulamaları. *MTA, Jeoloji Mühendisliği*, **50**: 1-7.
- Nalbantçılar, M.T. (1994). Akkonak-Koçbeyli (Afyon) ile Sağır (Isparta) Çevresinin Jeolojisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Nicholson, K. (1993). Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques. Springer-Verlag, 263. Berlin.
- Nieva, D. and Nieva, R., (1987). Development in Geothermal Energy Mexico, Part 12-A Cationic Composition Geothermometer For Prospection of Geothermal Resources. *Heat Recovery Systems And CHP*, **7**: 243-258.
- Oğuz, A. (2011). Sandıklı (Afyonkarahisar) Jeotermal Alanının Hidrotermal Alterasyon Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Okay, A.I. (1984). KB Anadolu'da Yeralan Metamorfik Kuşaklar. Ketin Sempozyumu, Ankara, 20-21 Şubat, 83-92.
- Okay, A. I., and Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, **156**: 475-515.
- Okay, A.I. (1986). High Pressure – Low Temperature Metamorphic Rocks of Turkey. Geological Society of America Memoir, 164.
- Öktü, G., Kara, İ. ve Önder, İ. (1997). Afyon İlinde Yeralan Ömer-Gecek-Uyuz Hamamı, Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl Jeotermal Alanlarının Detaylı Etüdü. MTA Derleme No: 10097, 41, Ankara. (Yayınlanmamış)
- Özdemir, H. (2017). Karakuyu (Afyon) Gölü Sulak Alanı ve Çevresinin Hidrojeoloji İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özgül, E.B. (2000). Şuhut Ovasının (Afyon) Hidrojeoloji İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ., ve Baybura, T. (2017). Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik,

- Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **60**: 169-189.
- Pal, T., Mukherjee, P. K., Sengupta, S., Bhattacharyya, A. K., and Shome, S. (2002). Arsenic pollution in groundwater of West Bengal, India-An insight into the problem by subsurface sediment analysis. *Gondwana Research*, **5**: 501-512.
- Pal, T., Mukherjee, P. K., and Sengupta, S. (2002). Nature of arsenic pollutants in groundwater of Bengal basin-a case study from Baruipur area, West Bengal, India. *Current Science*, **82**: 554-561.
- Parkhurst, D. L., and Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-resources investigations report, 99(4259), 312.
- Piper, A.M. (1979). Interpretation of Water Analyses. Geol. Surv. Water Res. Div. No.12.
- Schoeller, H. (1955). Geochemie Des Eaux Souterraines. Revue De L'institute Francois Du Petrole, 10, 230-244.
- Soyaslan, İ.İ. (2004). Eğirdir Gölü Doğusunun Hidrojeoloji İncelemesi ve Yeraltısuyu Modellemesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Şahinci, A. (1987). Doğal Suların Jeokimyası. Reform Matbaası, İzmir.
- Şahinci, A. (1991). Jeotermal Sistemler ve Jeokimyasal Özellikleri. Reform Matbaası, İzmir.
- Şimşek, Ş., Doğdu, M.S. and Çelik, N. (1993). Isotope Survey of Geothermal Systems of Central Anatolia. Coordinated Research Program on The Use of Isotope Techniques in Problems Related to Geothermal Exploitation, IAEA RC No: 6716/RB, Final Report, Ankara.
- Tamgaç, Ö.F., Güner, A., Sarp, S. ve Yıldırım, N. (2004). Afyon (Ömer-Gecek) Koruma Alanları, Test ve Potansiyel Değerlendirme Raporu. MTA Derleme No: 10388, 86. (Yayınlanmamış)
- Tarcan, G. (2004). Mineral Saturation and Scaling Tendencies of Waters Discharged From Wells (>150°C) in Geothermal Areas of Turkey. *Journal of Volcanology and*

Geothermal Research, **142**: 253-283.

- Tarcan, G., (2003). Jeotermal Su Kimyası Ders Notları. Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Tezcan, L., Meriç, B. T., Doğdu, N., Akan, B., Atilla, A. Ö., & Kurttaş, T. (2002). Akarçay havzası hidrojeolojisi ve yeraltısuyu akım modeli. Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Proje Final Raporu, Ankara.
- Tolluoğlu, A. Ü., Erkan, Y., Sümer, E. Ö., Boyacı, M. N., ve Yavaş, F. B. (1997). Afyon metasedimanter grubunun Mesozoyik öncesi metamorfik evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **40**: 1-17.
- Tonani, F., (1980). Some Remarks on the Application of Geochemical Techniques in Geothermal Exploration. Adv. Eur. Geoth. Res. Second Symp., 428-443, Strasbourg.
- Truesdell, A. H. (1976). Summary of section III-geochemical techniques in exploration. In Proc. 2nd UN Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources .
- TSE-266 (2005). Sular-İnsani Tüketim Amaçlı Sular. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ulutürk, Y. (2009). Ömer-Gecek (Afyonkarahisar) Dolayının Jeolojisi ve Suların Kökensel Yorumu. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Uslu, O., ve Türkman, A. (1987). Su Kirliliği ve Kontrolü TC Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi 1.
- Vengosh, A., Helvacı, C., and Karamandere, I. H. (2002). Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey. *Applied Geochemistry*, **17**: 163-183.
- Verma, S. P. (2000). Geochemical evidence for a lithospheric source for magmas from Los Hornos caldera, Puebla, Mexico. *Chemical Geology*, **164**: 35-60.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface

displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, **84**: 974-1002.

White, D.E. (1970). Geochemistry Applied to The Discovery, Evaluation And Exploitation Of Geothermal Energy Resources. *Geothermics, Special Issue 2*: 58-80.

WHO, (1984). World Health Organization (WHO), Guidelines for drinking water quality, Volume 2, Health criteria and other supporting information, WHO Publ. Geneva, Switzerland, 335.

Yağmurlu, F., Savaşçın, Y. and Ergün, M. (1997). Relation of Alkaline Volcanism and Active Tectonism Within the Evolution of the Isparta Angle, *SW-Turkey. The Journal of Geology*, **105**: 717-728.

Yalçın, A., Davraz, A. ve Özçelik, M. (2004). Yeraltısularının Kirlenmesinde Litoloji ve Yerleşim Alanlarının Etkisi: Ulupınar Kaynağı, Sorkuncak-Eğirdir-Isparta. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, **28**: 21-29.

Yetemen, Ö. (2006). Afyon İli Ömer-Gecek Sahasının Enerji Kullanım Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yıldız, A., Ersoy, B., Evcin, A., and Çardak, E. Kalsinasyonun Seydiler (Afyonkarahisar) Diatomitinin Özelliklerine Etkisi The Influence of Calcination on Properties of Seydiler (Afyonkarahisar) Diatomite.

İnternet Kaynakları

1) <http://www.on5yirmi5.com>, 10.02.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Seray DUYSAK
Doğum Yeri ve Tarihi : Konak / 08.03.1990
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0506 810 22 37 / serayduysak@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Fatih Lisesi, (2004-2007)
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, (2008-2012)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği Anabilim Dalı, (2014-2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Jeo-Teknik Jeoloji Müh. Müş. Ltd. Şti.
(2014- 2016)
Umut Çevre ve İş Güvenliği Eğitim Sağlık Hiz.
Ltd. Şti. (2016-Devam ediyor)