

İSCEHİSAR (AFYONKARAHİSAR) TERMAL VE MİNERALLİ SULARININ

HİDROJEOKİMYASI VE KULLANIM ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve Şenel CİĞERCİ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Can BAŞARAN

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2021

Bu tez çalışması 18.FENBİL.10 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSCEHİSAR (AFYONKARAHİSAR) TERMAL VE MİNERALLİ
SULARININ HİDROJEOKİMYASI VE KULLANIM
ÖZELLİKLERİ

Merve Şenel Ciğerci

Danışman
Dr.Öğr. Üyesi Can BAŞARAN

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2021

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**İSCEHİSAR (AFYONKARAHİSAR) TERMAL VE MİNERALLİ SULARININ
HİDROJEOKİMYASI VE KULLANIM ÖZELLİKLERİ**

Merve Şenel CİĞERCİ
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Can BAŞARAN

Bu araştırmada, Afyonkarahisar İli-İscehisar ilçesi ve çevresinde yer alan 1 adet termal su, 1 adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örneğinin hidrojeokimyası ve kullanım özellikleri incelenmiştir. Paleozoyik yaşlı şistler bölgedeki termal ve mineralli su örneklerinin temel kayacını, İscehisar mermerleri hazne kayacını ve Neojen birimlerin geçirimsiz seviyeleri örtü kayacını oluşturmaktadır. Bölgedeki yeraltı suları, jeotermik gradyana bağlı olarak ısınmakta ve termal su olarak ve/veya daha uzun bir mesafe kaydedip soğuyarak mineralli su olarak yüzeye çıkmaktadır. Analiz sonuçlarına göre; termal su örneğinin Na-Ca-HCO₃, mineralli su örneğinin Na-HCO₃ ve soğuk su örneklerinin Ca-Mg-HCO₃ ve Ca-Na-HCO₃ tipli sular oldukları belirlenmiştir. Termal su örneğinin silis jeotermometrelerine göre hesaplanan hazne kaya sıcaklığı 69-119°C arasındadır. Kullanım özelliklerine göre değerlendirilen mineralli su ve soğuk su örneklerinde As haricindeki tüm elementlerin TS 266 (2005) da belirtilen standartlara uyduğu belirlenmiştir.

2021, x + 73 sayfa

Anahtar Kelimeler: İscehisar, Afyonkarahisar, jeotermal, mineralli su, hidrojeokimya

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**HYDROGEOCHEMISTRY AND USAGE PROPERTIES OF ISCEHISAR
(AFYONKARAHISAR) THERMAL AND MINERAL WATER**

Merve Şenel CİĞERCI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geology Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Can BAŞARAN

In this study, the hydrogeochemistry and usage characteristics of 1 thermal water, 1 mineral water and 5 cold water samples in İscehisar (Afyonkarahisar) were investigated. The schists forming the Paleozoic Afyon metamorphics form the basement rock of the thermal and mineral water samples, whereas Iscehisar marbles are the reservoir rock and the impermeable levels of the Neogene units form the cover rock. The ground waters they are heated at depth by geothermic gradient and then ascend to the surface as thermal waters and/or by taking a longer distance and by losing its temperature they ascend as mineral water. According to the results; the thermal water have Na-Ca-HCO₃, the mineral water have Na-HCO₃ and the cold water samples have Ca-Mg-HCO₃ and Ca-Na-HCO₃ type. The silica geothermometres gave reservoir temperature 69-119°C. All the elements except As in the mineral water and cold water samples are compatible with the TS 266 (2005).

2021, x + 73 pages

Keywords: Iscehisar, Afyonkarahisar, geothermal, mineral water, hydrogeochemistry

TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐması Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 18.FEN.BİL.10 numaralı proje ile desteklenmiştir. Tez çalıŐmamda maddi desteklerinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teŐekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması kapsamında, tez konumun seçilmesi, planlanması, yürütülmesinde beni yönlendiren, yazım sürecinde yardımlarını esirgemeyen bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Can BAŞARAN'a ve Prof. Dr. Ahmet YILDIZ'a teŐekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatım boyunca beni destekleyen karşılaŐtığım her zorluğu aŐmamda bana sabırla yardım eden, tez çalıŐmamda maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz sevgi ve teŐekkürlerimi sunarım.

Merve Şenel CİŐERCİ
AFYONKARAHİSAR, 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Alanının Yeri ve Genel Özellikleri	2
1.2 Çalışmanın Amacı.....	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
3. MATERYAL VE METOD	7
3.1 Literatür Çalışması.....	7
3.2 Saha Çalışması.....	7
3.2.1 Jeoloji-Hidrojeoloji Çalışmaları	7
3.2.2 Örnekleme ve Yerinde Ölçüm Çalışmaları	7
3.3 Laboratuvar Çalışmaları.....	10
3.3.1 Örnek Hazırlama.....	10
3.3.2 Analiz	11
4. JEOLOJİ.....	12
4.1 Bölgesel Jeoloji.....	12
4.2 İnceleme Alanının Jeolojisi	13
4.2.1 Doğanlar Şisti (Çobanlar Şisti).....	13
4.2.2 İncehisar Mermerleri.....	15
4.2.3 Seydiler İgnimbiriti	15
4.2.4 Karakaya Volkanitleri.....	16
4.2.5 Gebeceler Formasyonu	16
4.3 Tektonik	17
4.3.1 Gazlıgöl Fayı	18
4.3.2 Erkmén Fayı	18
4.3.2 Çobanlar Fay Zonu	19
5. HİDROJEOLOJİ	20

5.1 Hidrolojik Bilanço	20
5.2 Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri	23
5.3 İscehisar Jeotermal Sahası	23
5.4 Su Noktaları	25
5.4.1 Yüzeysel Suları	25
5.4.1.1 Seyitler Barajı	27
5.4.1.2 Seydiler Göleti	27
5.4.2 Soğuk Su Sondajları	27
5.4.3 Mineralli Su Sondajları.....	28
5.4.4 Sıcak Su (Termal) Sondajları	28
5.4.5 Kaynak Suları	28
5.5 Suların Fiziksel Özellikleri	28
5.5.1 Sıcaklık (°C)	29
5.5.2 Elektriksel İletkenlik (EC-µS/cm).....	30
5.5.3 Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH) ve Redoks Potansiyeli (Eh).....	31
6. HİDROJEOKİMYA.....	32
6.1 Suların Kimyasal Özellikleri	32
6.2 Hidrojeokimyasal Sınıflandırma.....	36
6.2.1 Suların Hidrojeokimyasal Fasiyes Kavramına göre Sınıflandırılması	36
6.2.2 Suların Piper Sınıflaması	37
6.2.3 Schoeller Sınıflandırması	39
6.2.4 Suların Doyma İndeksleri.....	40
7. İZOTOP JEOKİMYASI.....	43
7.1 ¹⁸ O-D İlişkisi.....	43
7.2 ³ H İçeriği.....	44
8. JEOTERMOMETRE	48
8.1 Kimyasal Jeotermometreler	48
8.1.1 Niteliksel (Kalitatif) Kimyasal Jeotermometreler	48
8.1.2 Sayısal (Kantitatif) Kimyasal Jeotermometreler	49
8.1.2.1 Çözünürlüğe Bağlı Jeotermometreler	50
8.1.2.2 Katyon Jeotermometreleri.....	51
8.2 Birleşik (Kombine) Jeotermometre Uygulamaları.....	52
9. SULARIN KULLANIM ÖZELLİKLERİ	54
9.1 Suların İçilebilirlik Özellikleri.....	54
9.2 Suların Kullanılabilirlik Özellikleri	54

9.2.1 Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR).....	54
9.2.2 Sodyum Yüzdesi (%Na).....	57
9.2.3 Artıksal Sodyum Karbonat (RSC).....	58
9.2.4 Geçirgenlik İndeksi (PI).....	58
9.2.5 Magnezyum Tehlikesi (MT).....	59
9.2.6 Kelly Oranı (KR).....	59
9.2.7 ABD Tuzluluk Diyagramı.....	60
9.2.8 Wilcox Diyagramı.....	60
10. SONUÇLAR.....	63
11. KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	73



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
°C	Santigrat derece
³ H	Tritiyum
Ca	Kalsiyum
Cl	Klor
cm	Santimetre
EC	Elektriksel iletkenlik
Eh	Redoks potansiyeli
H	Hidrojen
HCO ₃	Bikarbonat
log	Logaritma
m ³	Metreküp
mek/l	Miliekivalan/litre
Mg	Magnezyum
Na	Sodyum
O	Oksijen
pH	Hidrojen iyon aktivitesi
ppm	Parts per million
SiO ₂	Silisyum dioksit
SO ₄	Sülfat
µs	Mikrosiemens

Kısaltmalar

DMD	Dünya Meteorik Su Doğrusu
DMSY	Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik
İTASHY	İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik
MTA	Maden Tetkik Arama
SMOW	Standart Mean Ocean Water
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Afyonkarahisar ili jeotermal sahaları.....	1
Şekil 1.2 Afyonkarahisar ili İscehisar ilçesi bölgesi haritası.....	3
Şekil 3.1 Soğuk su çeşmesinden alınan su örneği.....	7
Şekil 3.2 Hach Lange H40QD marka su ölçüm cihazı.....	8
Şekil 3.3 Hach Lange H40QD marka su ölçüm cihazı.....	8
Şekil 3.4 KM1 kuyusundan alınan su örneği.....	9
Şekil 3.5 Soğuk su çeşmesinden alınan su örneği.....	9
Şekil 3.6 Alınan örneklerin laboratuvarında hazırlanması.....	10
Şekil 3.7 Alınan örneklerin laboratuvarında pH analizleri.....	10
Şekil 3.8 Alınan örneklerin laboratuvarında filtre yardımıyla şişelere aktarılması.....	11
Şekil 4.1 İscehisar (Afyon) ve çevresinin jeoloji haritası.....	14
Şekil 4.2 İscehisar (Afyon) bölgesinde bulunan Doğanlar şisti.....	15
Şekil 4.3 İscehisar mermerleri.....	16
Şekil 4.4 Gebeceler formasyonu.....	17
Şekil 4.5 İnceleme alanının genel tektonik haritası.....	18
Şekil 4.6 İnceleme alanının diri fay haritası.....	19
Şekil 5.1 Ortalama sıcaklık-yağış dağılımları.....	20
Şekil 5.2 Çizelge 5.1'e göre hazırlanmış buharlaşma-terlemenin aylık grafiği.....	22
Şekil 5.3 IJ1 sondajında kesilen birimlerin genelleştirilmiş kolon kesiti.....	24
Şekil 5.4 İnceleme alanının hidrojeoloji haritası.....	25
Şekil 5.5 İscehisar jeotermal sahasının kavramsal modeli.....	26
Şekil 5.6 Su örnekleme noktaları.....	30
Şekil 5.7 İnceleme alanı sularının EC-toplam iyon grafiği.....	31
Şekil 6.1 Analizi yapılan su örneklerinin pie diyagramı.....	38
Şekil 6.2 Su örneklerinin piper diyagram konumu.....	39
Şekil 6.3 Su örneklerinin yarı logaritmik Schoeller diyagramı.....	40
Şekil 6.4 IJ kodlu termal su örneğinin doygunluk değerleri.....	42
Şekil 6.5 KM kodlu mineralli su örneğinin doygunluk değerleri.....	43
Şekil 7.1 Su örneklerinin ¹⁸ O-D diyagramındaki konumu.....	45
Şekil 7.2 Su örneklerinin ³ H yarılanma diyagramındaki konumu.....	46
Şekil 7.3 Su örneklerinin ³ H-Cl ve ³ H-EC diyagramındaki konumu.....	47
Şekil 8.1 Su örneklerinin Giggenbach diyagramı.....	53

Şekil 9.1 Schoeller içilebilirlik diyagramı.....	56
Şekil 9.2 Suların ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı.....	61
Şekil 9.3 Suların Wilcox Diyagramı..	62



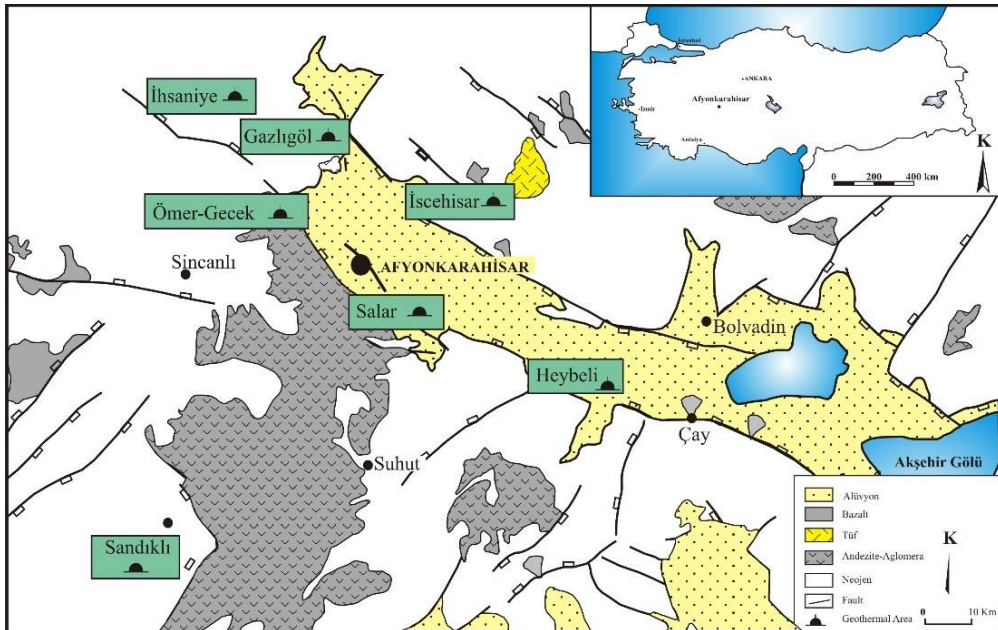
ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Afyonkarahisar ilinde yer alan jeotermal sahaların kullanım alanları	2
Çizelge 5.1 Afyonkarahisar Meteoroloji istasyonu verileri ile hazırlanan su bütçesi....	21
Çizelge 5.2 Seyitler barajının özellikleri.....	27
Çizelge 5.3 Seydiler göletinin özellikleri.....	28
Çizelge 5.4 İncelenen su örneklerinin genel özellikleri.....	29
Çizelge 5.5 İncelenen su örneklerinin fiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 5.6 Bogomolow'a göre sıcak suların sınıflandırılması.....	30
Çizelge 6.1 İncelenen örneklerin kimyasal analiz sonuçları (mg/l).....	33
Çizelge 6.2 İncehisar jeotermal suların IAH (1979)'a göre su tipi sınıflaması.....	37
Çizelge 6.3 Klorür, sülfat ve bikarbonat miktarlarına göre suların sınıflaması.....	41
Çizelge 7.1 ¹⁸ O-D izotop analizi yapılan örnekler ve analiz sonuçları.....	45
Çizelge 7.2 ³ H izotop analizi yapılan örnekler ve analiz sonuçları.....	47
Çizelge 8.1 Silis jeotermometre sonuçları.....	51
Çizelge 8.2 Katyon jeotermometre sonuçları.....	52
Çizelge 9.1 Analizi yapılan değerlerin İTASHY 2013 standardı ile karşılaştırılması.....	55
Çizelge 9.2 Örneklerin %Na değerlerine göre sınıfları.....	57
Çizelge 9.3 Örneklerin RSC değerlerine göre sınıfları.....	58
Çizelge 9.4 Örneklerin PI değerlerine göre sınıfları.....	59

1. GİRİŞ

Ülkemiz jeotermal kaynaklar açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Jeotermal ve mineralli kaynaklar buldukları bölgenin sosyal ve ekonomik kalkınmasına önemli derecede katkı sağlamaktadır. Yeni saha araştırmalarının yanı sıra mevcut kaynakların özelliklerinin belirlenmesi ve bu kaynaklardan en verimli şekilde yararlanma yollarının bulunması gerekmektedir. Türkiye’de yer alan jeotermal kaynakların büyük bir çoğunluğu Batı Anadolu’da yer almakta olup Afyonkarahisar ili de bu bölgedeki en önemli sahalardan birisidir. İl genelinde Ömer-Gecek, Gazlıgöl, Sandıklı, Heybeli, Susuz-İscehisar, Salar ve İhsaniye olmak üzere yedi ayrı jeotermal alan bulunmaktadır (Şekil 1). Bu alanlarda üretilen jeotermal sular başta elektrik üretimi olmak üzere genel olarak konut ısıtmacılığı, seracılık ve termal turizm amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bazı bölgelerde yer alan termal suların ise günümüzde aktif bir kullanımı bulunmamaktadır (Çizelge 1). Daha önceden detaylı ve bilimsel olarak çalışılmamış olan İscehisar bölgesi sularının jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özellikleri ile kullanım alanlarının belirlenmesi bu tezin ana konusunu oluşturmaktadır. Tez konusu kapsamında, inceleme alanında aktif olarak kullanılan 1 adet termal su, 1 adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örneği alınarak, suların sınıflaması, içilebilme ve kullanılabilirlik özellikleri ile hazne kaya sıcaklıklarının tahminine yönelik hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 1.1 Afyonkarahisar ili jeotermal sahaları (Gürsoy vd. 2003’den değiştirilmiştir).

Çizelge 1.1 Afyonkarahisar ilinde yer alan jeotermal sahaların kullanım alanları.

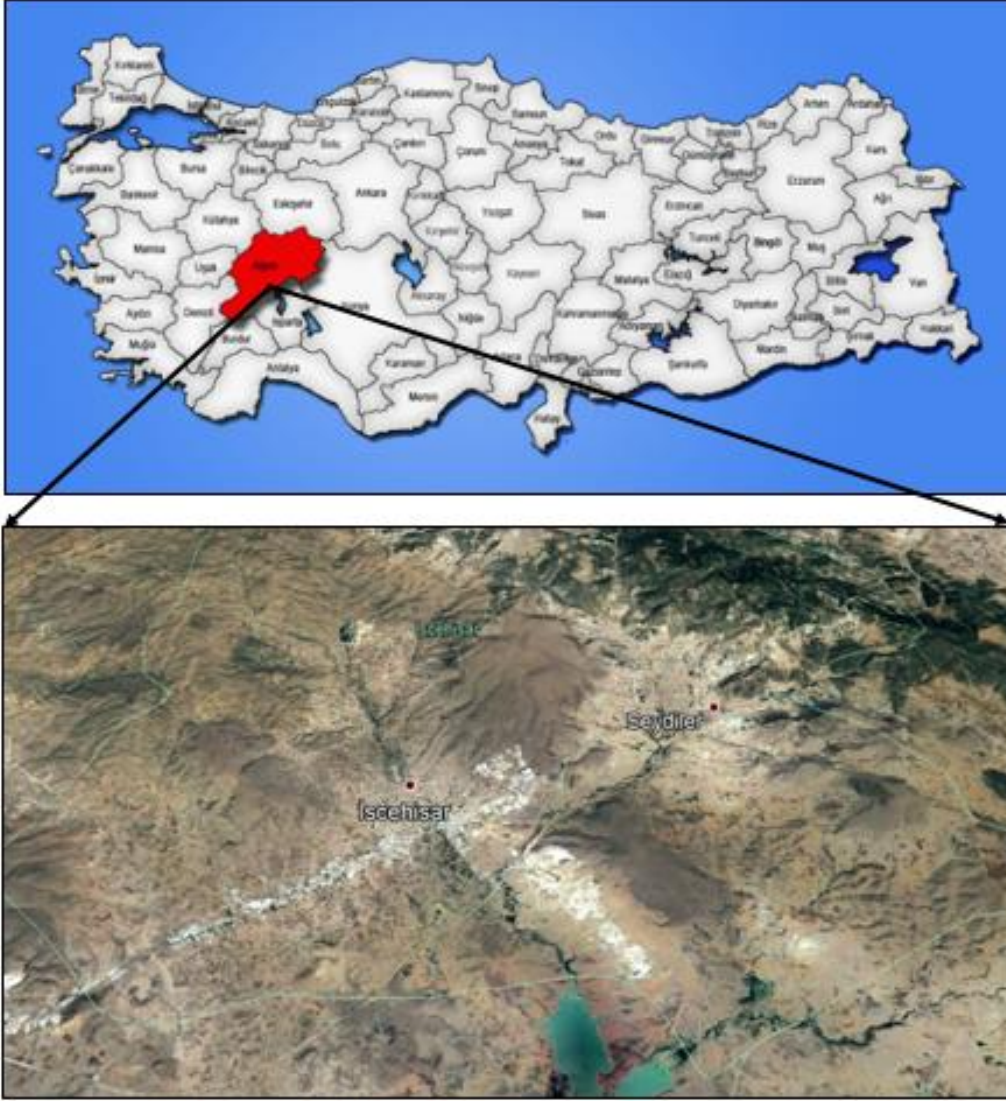
Jeotermal Saha	Sıcaklığı (°C)	Kullanım Alanı
Ömer-Gecek	50-125	Elektrik üretimi, seracılık, şehir ısıtma, turizm
Sandıklı	65-85	Seracılık, şehir ısıtma, turizm
Gazlıgöl	40-85	Seracılık, şehir ısıtma, turizm
Heybeli	30-55	Seracılık, turizm
İscehisar	~ 40	Turizm
Salar	~ 30	Yok
İhsaniye	~ 36	Yok

1.1 Çalışma Alanının Yeri ve Genel Özellikleri

Çalışma alanı, Afyonkarahisar ili İscehisar ilçesinde K25-a3 ve K25-b4 paftalarında bulunmakta ve Afyonkarahisar il merkezine yaklaşık 25 km uzaklıkta yer almaktadır. 12.000 nüfuslu bir ilçe olan İscehisar 2. Derece Deprem bölgesinde yer almaktadır. Sıcak ve ılıman bir iklim hâkimdir. İscehisar ilçesinin yıllık ortalama sıcaklığı 11,3°C ve yıllık ortalama yağış miktarı 438,9 mm'dir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü-sıcaklık, yağış verileri).

1.2 Çalışmanın Amacı

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmış olan bu çalışmanın amacı Afyonkarahisar ili, İscehisar ilçesi ve çevresinde yer alan 1 adet termal su, 1 adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örneğinin kimyasal kompozisyonunu, kökenini, yeraltındaki sirkülasyon sürelerini, rezervuar sıcaklığını, su-kayaç etkileşimini, mineral doygunluklarını ve kullanım özelliklerini saptamaktır.



Ŗekil 1.2 Afyonkarahisar ili IŖcehisar ilçesi bölgesi haritası.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Akan ve Süer (2008), Afyon ilinde yer alan jeotermal sahaların incelenmesi hakkında çalışma yapmışlardır. Yazarlara göre Afyonkarahisar il genelinin ısıtılması için termal akiferin yeterli olup olmadığı konusunda bir bilgi ve çalışma bulunmamaktadır. Bu aşamada sıcak ve mineralli su kaynakları yönetim planı hazırlanması ve sıcak su kaynaklarının işletmesinin tek bir elden kontrolünün yapılması gereklidir.

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.

Aksever (2011), tarafından Afyonkarahisar Sandıklı ilçesinin hidrojeolojik incelemesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sandıklı bölgesinde tarımsal amaçlı üretilen suların fazla olması bir risk olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca emniyetli yeraltı suyu kullanımı miktarı 41,62 x 106 m³/yıl olarak tespit edilmiştir. Yapılan hidrojeokimyasal analizlerde suların Ca-Mg-HCO₃ içerikli olduğunu tespit etmiştir.

Bağcı (2020), başlıklı çalışmasında İsehisar mermerlerini tabandan tavana doğru kalsitik-geçiş ve dolomitik mermerler olarak ayırarak mermerlerin içerdikleri SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve MgO gibi oksitler ile mineralojik bileşimin, mermerlerin değişik renkler kazanmasında etkili olduğunu belirtmiştir.

Bağcı vd. (2008), İsehisar bölgesinde yer alan maden suları ile jeotermal suların jeokimyasal özellikleri ve kullanım alanları konusunda çalışma yapmışlardır.

Başaran (2017), Afyonkarahisar ilindeki 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 içeriğinin Na-Ca-HCO₃-SO₄ olduğunu tespit etmiştir. İnceleme alanında kalsit, dolomit, kalsedon, aragonit gibi kabuklaşma yapıcı çökelimlerin varlığını gözlemlemiştir.

Dedeoğlu, (2014) İŖcehisar-Seydiler (Afyonkarahisar) arasındaki kayaç birimlerinin alt ve Ŗst iliŖkilerini belirleyip, bir istif oluŖturarak bu birimlerin jeolojisini ve volkanik kayaçların petrografik ve jeokimyasal olarak incelemiŖtir.

Koçyiğit ve Deveci (2007), Çukurören-obanlar (Afyon) bölgesi deprem kaynaklarının belirlenmesi ile ilgili araŖtırma yapmıŖtır. Afyon ili yanı sıra ile, belde ve köy boyutunda çok sayıda yerleŖim biriminin, sanayi kuruluŖu ve turistik tesisin bulunduğu obanlar-Çukurören sismik boŖluđunun deprem tehlikesi haritasının hazırlanmasında baz olarak kullanılacak olan deprem kaynakları (faylar) ve bu faylardan kaynaklanacak en büyük deprem büyüklükleri saptanmıŖtır.

Doğdu ve Bayarı (2002), Afyon-Akarçay Havzası'nda, Gazlıgöl, Ömer-Gecek ve Heybeli jeotermal alanlarının soğuk yeraltı sularını jeotermal kökenli kirlenme açısından araŖtırmıŖlardır. Termal suların Na-Cl, soğuk suların ise Ca-HCO₃ karakterli olduğunu belirten yazarlar termal su karıŖımının göstergesi olarak kullanılan parametrelerinin alansal dağılımının soğuk yeraltı suyundaki kirlenmenin jeotermal alanlara yakınlıkla iliŖkili olduğunu tespit etmiŖlerdir.

Mutlu (1996), alıŖmada mer-Gecek, Gazlıgöl, Sandıklı, Heybeli-Karaburun termal suları incelenmiŖ olup rezervuar sıcaklıklarını eŖitli jeotermometreler ile saptanmıŖ ve termal suların kökenleri içerdikleri mineraller deđerlendirilmiŖtir. Ömer-Gecek termal sularının rezervuar sıcaklığı 75°C-155°C arasında deđiŖmekte olup, su bileŖiminin Na-Cl-HCO₃ ağırlıklı olduğu rezervuar sıcaklığının yüksek olmasından da derin su döngüsüne sahip olduğu verisi elde edilmiŖtir. Gazlıgöl 66°C-120°C, Sandıklı 84°C-97°C, Heybeli-Karaburun 56°C-96°C'lik rezervuar sıcaklığına sahip olduğu su bileŖiminde Na-HCO₃ içerikli olduğu verisi elde edilmiŖtir.

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

Türker vd. (2008), Afyonkarahisar'da alternatif jeotermal alanlar ve mevcut jeotermal alanların geliştirilebilirliği ile ilgili ön çalışma yapmışlardır. Çalışmaya göre; İncehisar ilçesinde yer alan, 575 m. derinlikte ve 42°C sıcaklıkta olan termal kuyunun termal sağlık turizmi için uygun olduğu belirtilmiştir. Soğuk su karışımı ve rezervuarın tam kesilmemesi gibi olaylara bağlı olarak dolayısı ile yeterli sıcaklık ve debide su alınamamıştır.

Ulutürk (2009), Afyon Ömer-Gecek jeotermal sularının meteorik kökenli olup bölgeye düşen yağışın faylar aracılığı ile yeraltına ulaşarak ve magmadan direk veya indirek konvektif akımlar vasıtası ile ısınarak tekrar yeryüzüne ulaştığını dile getirmiştir. Jeotermal suların Na-Cl'ce zengin sular olduğunu ve yüksek Cl içeriğinin bölgedeki suların derin dolaşımına işaret ettiğini belirtmiştir.

Yalım vd. (2008), Afyonkarahisar bölgesindeki bazı jeotermal kaynakların radon konsantrasyonları hakkında çalışma yapmışlardır. Hesaplanan yıllık doza bakıldığında USEPA tarafından belirlenen limit değerinin altında doz değerleri elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışması; literatür taraması, saha ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere üç aşamada yürütülmüştür.

3.1 Literatür Çalışması

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

3.2 Saha Çalışması

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

3.2.1 Jeoloji-Hidrojeoloji Çalışmaları

İnceleme alanı 1/25000 ölçekli K25-a3 ve K25-b4 paftalarında yer almaktadır. İnceleme alanının jeolojik özellikleri önceki çalışmalar ve arazi çalışmalarından yararlanılarak incelenerek, jeolojik birimlerin su bulundurabilme ve geçirimsizlik özelliklerine göre hidrojeoloji haritası oluşturulmuştur.

3.2.2 Örnekleme ve Yerinde Ölçüm Çalışmaları

Çalışma alanından, incelenmek üzere 1 adet termal su, 1 adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örneği alınmış ve örneklerin elektriksel iletkenlik (EC- $\mu\text{s}/\text{cm}$), redoks potansiyeli (EH-mV), sıcaklık (T- $^{\circ}\text{C}$) ve hidrojen iyonu aktivitesi (pH) değerleri Hach Lange HQ40D marka su ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 3.1-3.5).



Şekil 3.1 Soğuk su çeşmesinden alınan su örneği.



Şekil 3.2 Hach Lange H40QD marka su ölçüm cihazı.



Şekil 3.3 Hach Lange H40QD marka su ölçüm cihazı ile yerinde ölçüm çalışmaları.



Şekil 3.4 KM1 kuyusundan alınan su örneği.



Şekil 3.5 Soğuk su çeşmesinden alınan su örneği.

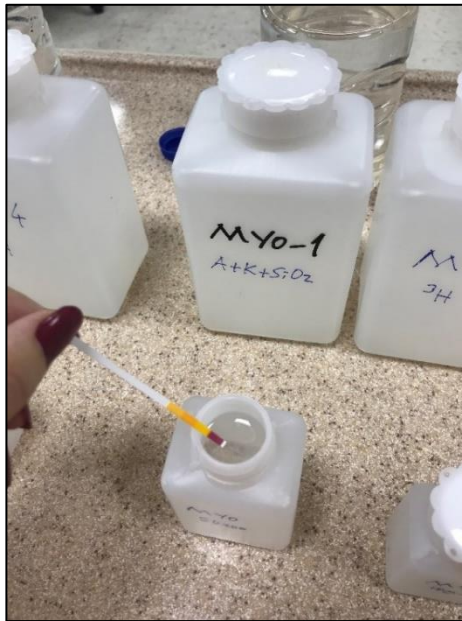
3.3 Laboratuvar Çalışmaları

3.3.1 Örnek Hazırlama

Çalışma alanındaki suların kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla anyon+kasyon analizleri için 500 ml HDPE (High Density Polyethylene) örnekleme kabı kullanılmıştır. Araziden toplanan örnekler, analizlerin yapılacağı zaman kadar $<4^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta korunmuştur. Diğer element analizleri için 100 ml'lik HDPE kaplar kullanılmış, alınan örnekler filtre edilmiş ve son olarak ultra saf HNO_3 ilavesi ile örnek pH'ları <2 'ye düşürülmüştür (Şekil 3.6-3.8).



Şekil 3.6 Alınan örneklerin laboratuvarında hazırlanması.



Şekil 3.7 Alınan örneklerin laboratuvarında pH analizleri.



Şekil 3.8: Alınan örneklerin laboratuvarında filtre yardımıyla şişelere aktarılması.

3.3.2 Analiz

Suların anyon ve katyon analizleri (HCO_3 , Cl , F , SO_4 , NO_2 , NO_3 , NH_4 , Na , K , Ca , Mg) Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası laboratuvarlarında, ağır metal ve iz element analizleri ACME (Kanada) laboratuvarında yapılmıştır. ^{18}O ve ^2H izotop analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Duraylı İzotop Laboratuvarında ve ^3H analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Elde edilen sonuçlar hidrojeokimya grafikleri ile değerlendirilerek, örneklenen suların içme ve kullanma suyu özelliklerinin belirlenmesi için ayrıca Türk İçme suyu Standartı (TS266-2005) ve Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik (2004) ile Schoeller içilebilirlik, ABD tuzluluk, Wilcox grafikleri kullanılmıştır.

4. JEOLJİ

4.1 Bölgesel Jeoloji

Afyon ve çevresinde, tektonik olarak birbirinden ayrılmış olan "Toros Kuşağı" ve "İç Toros Kuşağı"na ait farklı kayaç topluluğu mevcuttur. Toros Kuşağına ait, Sultandağları Paleozoyik istifli Kambriyen, Ordovisiyen, Devoniyen, Karbonifer ve Permiyen yaşlı, genellikle fosilli, şelf fasiyesindeki karbonat ve detritiklerle temsil edilmektedir. Bu kayaçlarda, metamorfizma fark edilemeyecek kadar azdır. Şiddetli tektonik sonucu ileri derecede deforme olmuşlar ve Üst Jura yaşlı birimler tranrgressif olarak gelmiştir (Metin vd. 1987).

İç Toros Kuşağı'na ait "Afyon Metamorfikleri" düşük dereceli metamorfizmaya (Yeşil Şist Fasiyesi) sahiptir. Genel olarak mermer, kalkşist, albit-klorit-muskovit-kuvarsşist ve metakonglomera düzeylerinden oluşmuştur. Bunlardan başka Afyon'un GB'sında ise bu metamorfikler içerisinde serisit-feldispat-kuvars şistten oluşan volkanik kökenli porfiroidler geniş alanlar kaplar (Metin vd. 1987, Tolluoğlu vd.1997).

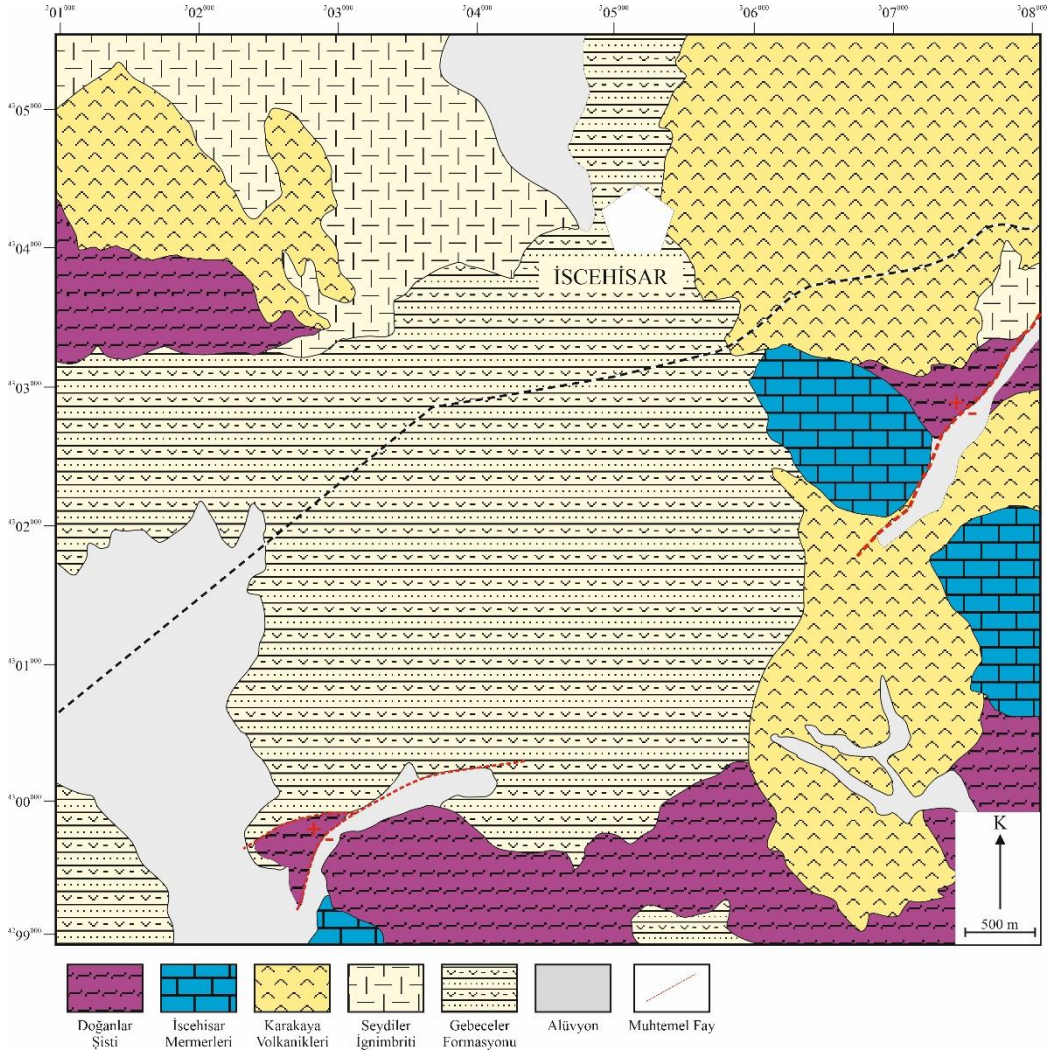
Afyon Zonu batıda Menderes Masifi'nden başlayıp Afyonkarahisar'a kadar uzanan düşük dereceli metamorfik bir kuşaktır. Yeşilşist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş platform tipi çökellerden oluşan ve sedimanter kökene sahip olan birimler Mesozoyik öncesi dönemde birden fazla bölgesel metamorfizma ve deformasyon geçirmişlerdir (Tolluoğlu vd. 1997). Bu sedimanter istifli Üst Permiyen-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 ve Çetinkaplan 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).

4.2 İnceleme Alanının Jeolojisi

İnceleme alanında Paleozoyik ve Senozoyik sistemlerine ait olan kaya birimleri yer almaktadır. Bu çalışmada kaya-stratigrafi kesitine dayalı beş formasyon ayırt edilerek haritalanmıştır. Tabanda Paleozoyik yaşlı düşük derecede metamorfik olan birimler bulunmaktadır. Bunlar; egemen litolojilerini şistlerin oluşturduğu Doğanlar şistleri ile mermerlerden oluşan İncehisar mermerleridir. Mermerler; alt seviyelerinde beyaz, gri ve bej, üst seviyelerinde ise menekşe dokulu ve mor renklidirler. Genel olarak kalın ve masif tabakalı olan birim, üst seviyelerinde orta tabakalanma gösterir. Orta-ince kristalli olan mermerlerde kalsit mineralleri ile, tali oranda kuvars ve muskovit mineralleri bulunur. Alüvyon birimi silt, kum, kil, çakıl gibi gevşek tutturulmamış güncel çökelleri içermektedir. Devoniyen öncesi bir yaş aralığına sahip olan Doğanlar şistleri ve orta-üst Devoniyen yaşında olan mermerlerin üzerine diskordan olarak oturan en yaşlı birim, patlamalı bir volkanizmadan oluşma, egemen litolojilerini piroklastiklerin oluşturduğu Seydiler ignimbriti (erken Miyosen) dir. Seydiler ignimbriti üstünde efüzif volkanizma ürünlerinin akmasıyla meydana gelmiş olan, orta Miyosen yaşlı Karakaya volkanitleri diskordan olarak yer almaktadır. Çalışma alanındaki birimlerin en üst kesimini geç Miyosen-erken Pliyosen yaşlı; akarsu yelpazesi-göl ortamında çökelmiş olan çakıltaşı, kumtaşı, kiltası, çamurtaşı ve kireçtaşı ardalanasından meydana gelen Gebeceler formasyonu oluşturur (Metin vd. 1987, Öcal vd. 2011, Bağcı 2020, Şekil 4.1).

4.2.1 Doğanlar Şisti (Çobanlar Şisti)

Doğanlar şistleri Afyon metasedimanter grubunun temelini oluşturur. Birim Tolluoğlu vd. (1997) tarafından Doğanlar şisti olarak isimlendirilmiştir. Doğanlar şistleri genel olarak şistlerle temsil edilen orta-düşük dereceli yeşil şist fasiyesinde metamorfik kayalardan oluşmaktadır. Harita alanının batısında ve güneyinde oldukça geniş alanlarda gözlenmektedir. Ayrışma yüzeylerinde koyu gri, kahverengi, sarı, mor ve yeşil renkli olan birim, kırık yüzeylerinde ise; kahve, sarı ve açık gri renklidir (Şekil 4.2). Çok ince şekillerde gelişmiş olarak foliasyon düzlemlerine sahip olduğu gözlenmiştir (Dedeoğlu 2014).



Şekil 4.1 Işcehisar (Afyon) ve çevresinin jeoloji haritası (Metin vd. 1987, Öcal vd. 2011).



Şekil 4.2 Doğanlar şistlerinde gözlenen foliasyon düzlemleri.

4.2.2 İsehisar Mermerleri

Birim ilk kez Metin vd. (1987) tarafından İsehisar mermerleri olarak isimlendirilmiştir. Mermerler; alt seviyelerinde beyaz, gri ve bej renkli olup, üst seviyelerinde mor renk ve menekşe doku hakimdir. Genel olarak kalın ve masif tabakalı olan birim, üst seviyelerinde orta tabakalanma gösterir. Orta-ince kristalli olan mermerlerde kalsitlerden başka, küçük kristaller şeklinde, seyrek olarak kuvars ve muskovit kristalleride bulunur. Metin vd. (1987) mermerlerin metamorfik birimler içerisinde merccek konumlu olarak bulunduğunu ifade etmişlerdir. Tolluoğlu vd. (1997), mermerlerin bölgede görülen Doğanlar şisti, Deliktaş metakonglomerası ve Ballica filliti üzerinde transgressif aşmalı olarak bulduklarını belirterek, fillitler ile geçişler gösterdiklerini de vurgulamışlardır. Farklı renk ve dokuda yayılım sunan mermerler tabandan tavana doğru kalsitik-geçiş-dolomitik mermerler olarak sınıflandırılmıştır (Bağcı 2020). Bölgede aktif olarak işletilen çok sayıda mermer ocağı bulunmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 İsehisar bölgesinde yer alan mermer ocağı.

4.2.3 Seydiler İgnimbiriti

Metin vd. (1987) birimi, Seydiler tuf ve aglomeraları olarak isimlendirmişlerdir. Çalışma alanında geniş yayılımlar sunan volkanik istif, Aydar vd. (1998) tarafından ise Seydiler

İgnimbriti olarak isimlendirilmiştir. İgnimbritler volkanik alanlarda yaygın olarak gözlenen piroklastik akma çökelleri olup, baskın olarak pümis, lapilli, bloklar ve volkanik cam parçalarından oluşurlar İgnimbritler başlıca; Afyon-Ankara kara yolunda, Koroğlu belinden başlayarak kuzeybatıya doğru uzanan sırtlar boyunca, Seydiler köyü çevresinde ve İncehisar'ın kuzeybatısında olmak üzere oldukça geniş alanlarda yayılım sunmaktadırlar (Özkaymak vd. 2017a).

4.2.4 Karakaya Volkanitleri

Birim ilk kez Metin vd. (1987) tarafından Karakaya bazaltı olarak isimlendirilmiştir. Aydar vd. (1998) ise lavları lamprofirik bir mağma ürünü olarak belirtmiş ve bunları lav akmaları ve daykları şeklinde açıklamışlardır. Siyahımsı, koyu kahve renkli, akıntı yapısı ve tablamsı bir görünümü olan birim, çalışma alanında Karakaya köyü ve çevresinde en iyi olarak gözleendiği için Karakaya volkanitleri isimlendirmesi yapılmıştır. Volkanitler kırık yüzeylerinde gri, siyahımsı, ayrışma yüzeyinde ise grimsi, kahverengimsi ve kırmızımsı renklerde dir. Yoğun olarak küresel ayrışma gösteren lavlar aynı zamanda yoğun olarak gaz boşlukları içermektedir. Boşluklar bazen ikincil kalsitlerle doldurulmuştur. Oldukça sert ve keskin kenarlı kırılma gösterirler (Dedeoğlu 2014). Karakaya volkanitlerinin doğaltaş özelliklerinin araştırılması üzerine Kuşcu vd. 2003 ve Kuşcu vd. 2006 tarafından yapılmış çalışmalar bulunmaktadır.

4.2.5 Gebeceler Formasyonu

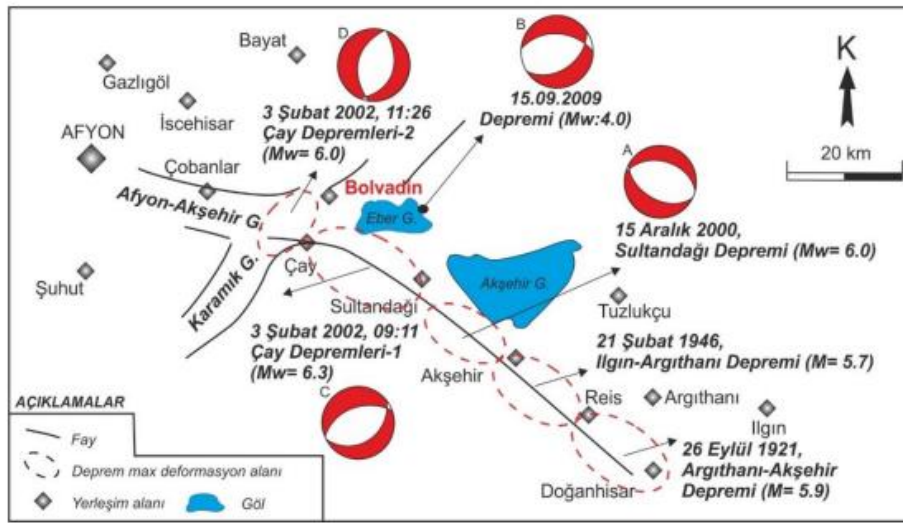
Birim ilk kez Erişen (1972) tarafından adlandırılmıştır. Afyon çevresinde geniş yayılımı bulunan birim, başlıca tortul istif, alüvyon yelpazesi çökelleri, göl sel sedimanlar ve volkanosedimanter göl sel çökellerden oluşur. Alüvyon yelpazesi çökelleri volkanik kökenli çakıltaşı-kumtaşı birimleriyle temsil edilmektedir. Volkanosedimanter istif ise daha çok volkanoklastik akma birimlerinden meydana gelmektedir. Formasyon genel itibariyle kireçtaşı-kumtaşı-çakıltaşı ve tuf bant ve mercceklerinden oluşmaktadır (Şekil 4.3) (Erişen 1972).

4.3 Tektonik

İnceleme alanı genel konumu itibariyle Akşehir-Simav fay sistemi (ASFS) içerisinde ve Afyon-Akşehir grabeninde yer almaktadır (Şekil 4.5). ASFS 3-30 km genişlikte 500 km uzunlukta olan KB-GD gidişli veriv atımlı normal bir fay sistemidir (Koçyiğit ve Deveci 2007). İscehisar bölgesi vey akın çevresinde haritalanan aktif bir fay bulunmamasına rağmen, inceleme alanının güneyinde ve batısında çeşitli aktif faylar haritalanmıştır. Bu fayların detayları aşağıda verilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.4 Gebeceler formasyonu içerisindeki marn türündeki kayalar.



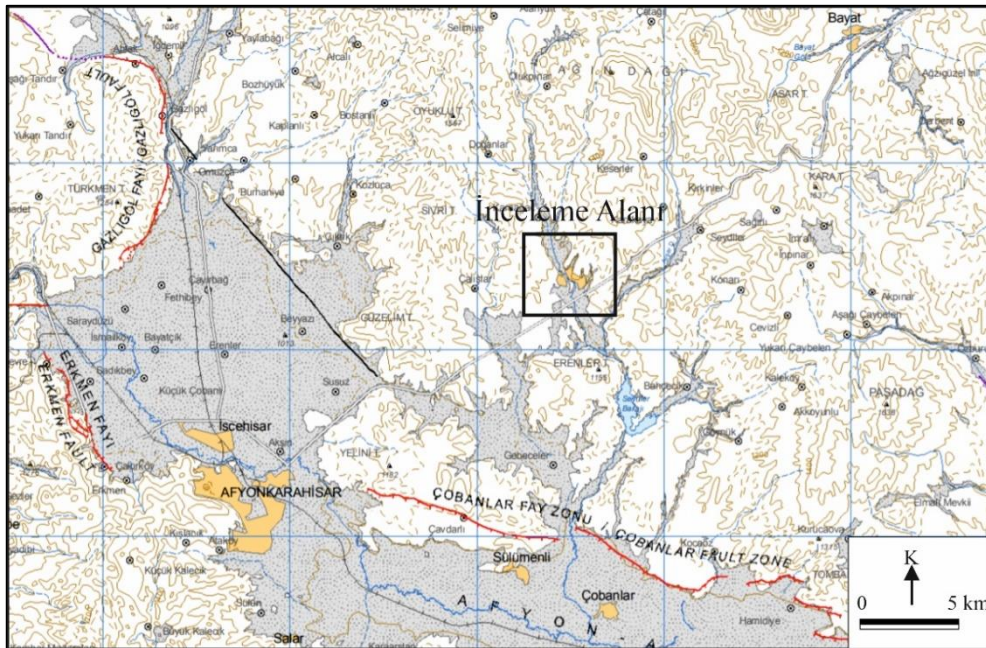
Şekil 4.5 İnceleme alanı ve yakın çevresinin genel tektonik haritası (Özkaymak vd. 2017b).

4.3.1 Gazlıgöl Fayı

Gazlıgöl Fayı ilk defa Emre vd. (2011) tarafından diri fay olarak tanımlanmıştır. Afyonkarahisar yerleşim alanı kuzeyinde Fethibey ile Ablak arasında 19 km uzunluğunda haritalanan eğimli atımlı normal fay özelliğindeki bu fay, genel olarak KG doğrultulu ve doğuya eğimlidir. Özkaymak vd. (2020) tarafından Gazlıgöl fayı üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, fayın üzerinde gelişen sırt tipi travertenlerde üzerinde K-G uzanımlı güncel genişleme çatlakların varlığından bahsedilmektedir. Fayın Gazlıgöl yerleşim alanını kestiği alanlarda, fay kırıklarından yüzeye ulaşan sıcaklıkları 70°'ye varan jeotermal su kaynakları mevcuttur. Fayın üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü 6.55 olarak verilmiştir (Duman vd. 2018, Emre vd.2018).

4.3.2 Erkmen Fayı

Afyonkarahisar yerleşim alanının yakın batısında, Gecek ile Çakırköy arasında yer alan KKB-GGD uzanımlı 13 km uzunluğunda diri bir faydır (Emre vd. 2018). Kuzeydoğuya eğimli fayın üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü 6.33 olarak hesaplanmıştır (Duman vd.2018; Emre vd.2018). Faya ait kayma düzlemleri üzerinde kinematik analiz çalışmaları yapan Özkaymak vd. (2020)'e göre Erkmen Fayı BGB-DKD yönlü genişleme kuvvetleri etkisi altında çalışan eğim atımlı normal bir faydır.



Şekil 4.6 İnceleme alanının diri fay haritası (Emre vd. 2011).

4.3.2 obanlar Fay Zonu

İlk defa Emre vd. (2011) tarafından haritalanan ve tanımlanan obanlar Fay Zonu, Afyonkarahisar ile Bolvadin arasında BKB-DGD doğrultusu boyunca uzanan iki diri fay segmentinden oluşur. Bu fay segmentleri batıdan doğuya doğru sırasıyla 23 ve 21 km uzunluklarında ve güneybatıya eğimlidirler. obanlar Fay Zonu'nun üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü 6,66 olarak hesaplanmıştır (Duman vd. 2018, Emre vd.2018). obanlar Fay Zonu, yaklaşık K-G yönlü genişleme kuvvetleri etkisi altında oluşan eğim atımlı normal bir fay olarak tanımlanmıştır (Tiryakioğlu vd. 2018).

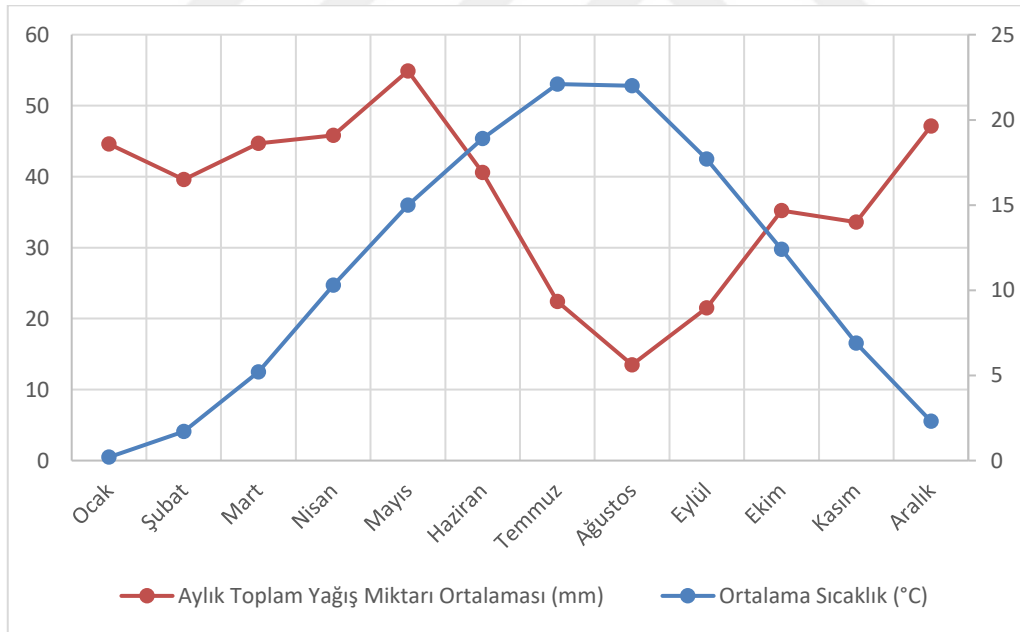


5. HİDROJEOLOJİ

5.1 Hidrolojik Bilanço

Bu bölümde, Afyonkarahisar meteoroloji istasyonundan alınan 1929-2019 yılları arasındaki ortalama yağış ve ortalama sıcaklık verilerinden yararlanılarak su bütçesi yapılmıştır.

Bölgenin 1929 ile 2019 yılları arasındaki yıllık bazda ortalama sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ortalama sıcaklığın 11.2°C olduğu görülmektedir. Maksimum sıcaklık 2000 yılı Temmuz ayında 39.8°C, minimum sıcaklık ise 1954 yılı Ocak ayında -27°C olarak ölçülmüştür. Aylık bazda ortalama sıcaklık değerlerine göre Temmuz ayı 22.1°C ile en sıcak ay iken, Ocak ayı 0.2°C ile en soğuk aydır (Şekil 5.1). Bölgeye düşen yıllık ortalama yağış 443.5 mm olup en çok ortalama yağış alan aylar Aralık, Nisan ve Mayıs ayları, en düşük ortalama yağış alan aylar ise Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarıdır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 1929 ile 2019 yılları arasındaki aylık bazda ortalama sıcaklık-yağış dağılımları.

İscehisar bölgesinin de içerisinde bulunduğu Afyonkarahisar bölgesine ait Thornthwaite (1948)'e göre hesaplanan su bütçesi Tablo 5.1'de verilmiştir. Thornthwaite (1948)'in aylık potansiyel buharlaşma-terlemeyi (Etp) veren formülü:

Çizelge 5.1 Afyonkarahisar Meteoroloji istasyonu verilerinin ortalamasına göre hazırlanan su bütçesi tablosu (Thornthwaite 1948).

	T (°C)	i	Enlem Düzeltme Katsayısı	Yağış	ETP	Düzeltilmiş ETP	P-EP	Zemin Rezervi (mm)	Zemin Rezerv Değişimi (mm)	ETR (mm)	Tarımsal Su Açığı (mm)	Su Fazlası (mm)
Ocak	0.2	0.008	0.85	44.6	0.29	0.25	44.4	100	45.3	0.25	0.0	0.00
Şubat	1.7	0.195	0.84	39.6	4.27	3.58	36.0	100.0	0.0	3.58	0.0	36.02
Mart	5.2	1.061	1.03	44.7	17.42	17.95	26.8	100.0	0.0	17.95	0.0	26.75
Nisan	10.3	2.987	1.11	45.8	41.18	45.71	0.1	100.0	0.0	45.71	0.0	0.09
Mayıs	15	5.277	1.23	54.9	66.10	81.30	-26.4	73.6	-26.4	81.30	0.0	0.00
Haziran	18.9	7.487	1.24	40.6	88.42	109.63	-69.0	4.6	-69.0	109.63	0.0	0.00
Temmuz	22.1	9.488	1.26	22.4	107.65	135.64	-113.2	0.0	-4.6	26.96	108.7	0.00
Ağustos	22	9.423	1.18	13.5	107.04	126.31	-112.8	0.0	0.0	13.50	112.8	0.00
Eylül	17.7	6.779	1.04	21.5	81.41	84.66	-63.2	0.0	0.0	21.50	63.2	0.00
Ekim	12.4	3.955	0.96	35.2	52.02	49.94	-14.7	0.0	0.0	35.20	14.7	0.00
Kasım	6.9	1.628	0.84	33.6	24.87	20.89	12.7	12.7	12.7	20.89	0.0	0.00
Aralık	2.3	0.309	0.82	47.1	6.24	5.12	42.0	54.7	42.0	5.12	0.0	0.00
Ortalama	11.2	48.6		443.5	596.9	681	-237.5	545.6	0.0	382	299.4	62.86

$$Etp = 16. \left(\frac{10.t}{I} \right)^a \quad (1)$$

$$I = \sum i \quad (2)$$

$$\left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (3)$$

$$a : 6,75.10^{-7}.I^3 - 7,71.10^{-5}.I^2 + 1,79.10^{-2}.I + 0,492 \quad (4)$$

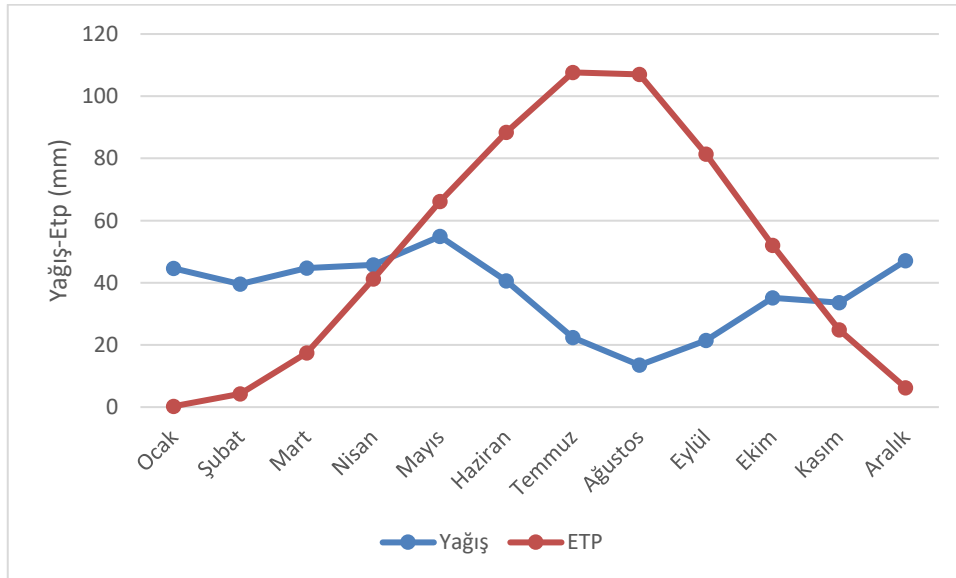
şeklinde olup formülde;

i : Sıcaklık indisi

t : Aylık sıcaklık ortalaması (°C)

Etp : Aylık potansiyel buharlaşma-terleme miktarı (mm)'dir.

Yapılan hesaplamalarda yıllık potansiyel buharlaşma ve terleme (Etp) 596.9 mm, yıllık gerçek buharlaşma-terleme (Etr) 388.00 mm olarak bulunmuştur. Su bütçesi incelendiğinde Nisan ayına kadar yağışın Etp'den fazla olduğu görülmektedir. Nisan ayından Haziran ayına kadar teorik olarak 100 mm kabul edilen zemin rezervi kullanılır. Haziran ayı başından Kasım ayına kadar tarım su açığı vardır. Etp'nin yağıştan fazla olduğu kurak dönemde su noksanı 299.4 mm'dir. Bu döngüye ait yağış ve Etp grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Çizelge 5.1'e göre hazırlanmış buharlaşma-terlemenin aylık değişim grafiği.

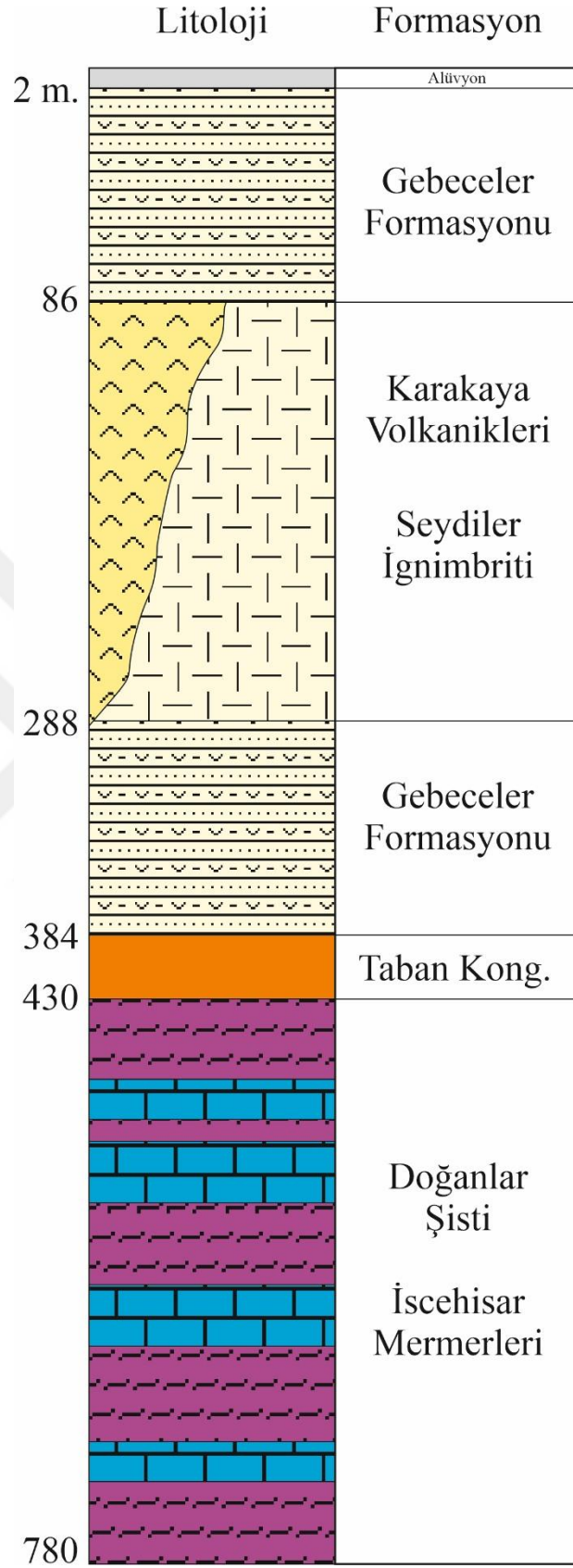
5.2 Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri

İnceleme alanında sıcak su akiferi olan kırıklı-çatlaklı ve boşluklu İscehisar mermerleri ve alüvyon bölgedeki geçirimli birimlerdir. Termal su örneğinin alındığı (IJ1) jeotermal sondaj ~780 metre derinlikte olup sondaj boyunca; 2-86 ve 288-384 metreler arasında Gebeceler Formasyonu; 86-288 ve 384-394 metreler arasında Volkanik kayaçlar ve Seydiler İgnimbiriti, 394-430'ncü metrelerde taban konglomerası ve 432 metreden itibaren ise Doğanlar şisti ile İscehisar Mermerlerinin ardalanması şeklinde Paleozoyik birimler kesilmiştir (Şekil 5.3). Doğanlar şistleri genel itibariyle geçirimsiz birim olarak tanımlanmış olup kırıklı-çatlaklı yapı kazanmış kesimleri yeraltı suyu içerebilmektedir. İnceleme alanında şist alüvyon dokanağında ve/veya bu dokanak boyunca yer alan fay üzerinden boşalan kaynak suları (IC4) mevcuttur. Karakaya volkanikleri ve Seydiler ignimbiritleri kırıklı-çatlaklı kesimleri nedeniyle, Gebeceler formasyonu da çakıtaşı kumtaşı-kireçtaşı seviyeleri nedeniyle yarı geçirimli birim olarak adlandırılmıştır. Bu yarı geçirimli birimlerin dokanaklarında ya da tam üzerlerinde su noktaları yer almaktadır (ICK, IC2, IC3, MYO). Bu yarı geçirimli birimler stratigrafik olarak üstte yer almaları nedeniyle soğuksu akiferi olarak düşünülmektedir. Özellikle bölgedeki mineralli su örneği (KM) Karakaya volkanikleri-Doğanlar şisti-Gebeceler formasyonu olmak üzere üç birimin dokanağında ve muhtemel bir fay üzerinde yer almaktadır (Şekil 5.4).

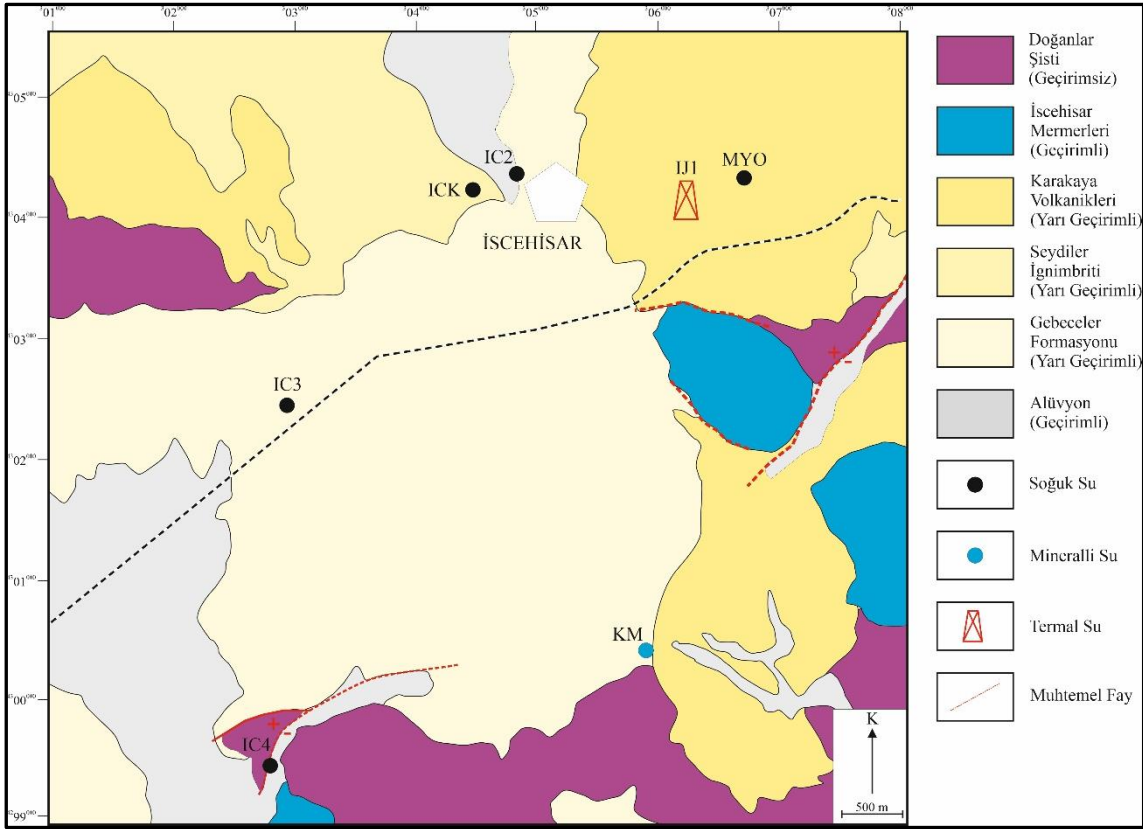
5.3 İscehisar Jeotermal Sahası

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.

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 İscehisar bölgesinde sondajlar ile elde edilmektedir. Bu suların bir kısmı hidrolik eğim boyunca sahanın güneyine doğru akmakta, bu sırada sıcaklığını kaybederek soğumakta ve muhtemel bir fay boyunca mineralli su olarak yüzeylemektedir.



Şekil 5.3 IJ1 sondajında kesilen birimlerin genelleştirilmiş kolon kesiti (ölçeksiz).



Şekil 5.4 İnceleme alanının hidrojeoloji haritası.

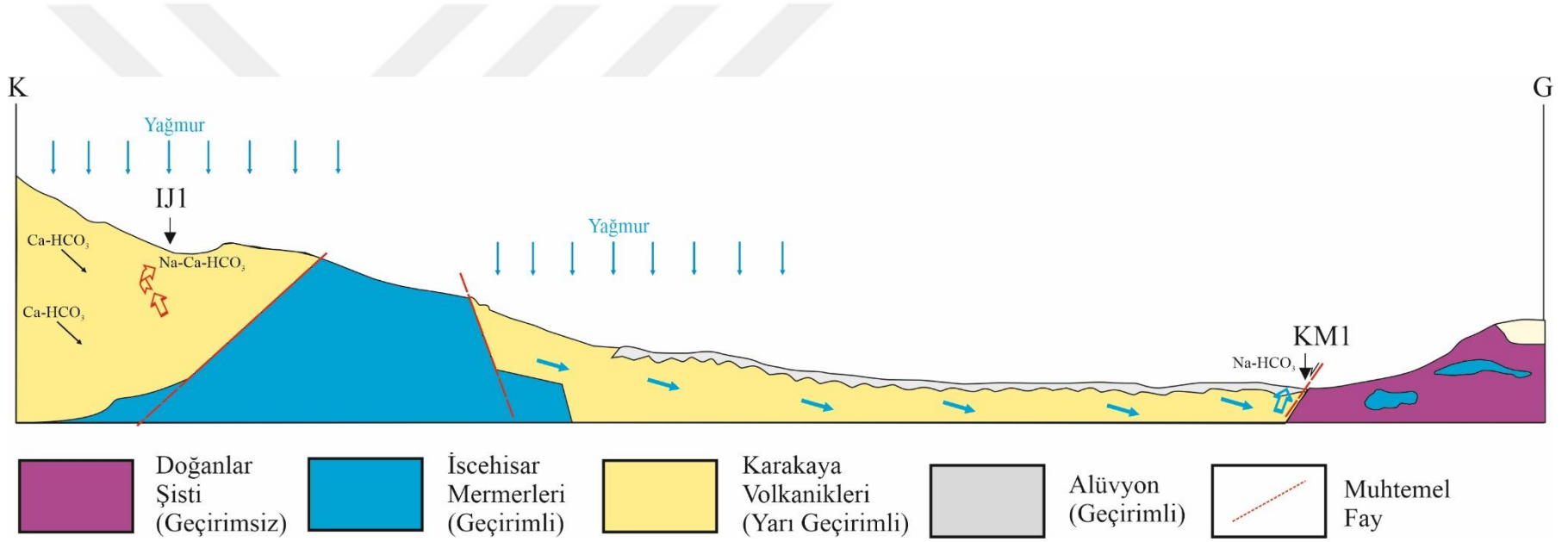
Suyun hareketi esnasında su-kayaç tepkimesi ve ısı kaybına bağlı olarak muhtemel bir Na-Ca transferi söz konusudur. Su dolaşım hattı boyunca sıcaklığını kaybetmekle birlikte temas halinde olduğu kayalar ile etkileşime devam etmekte ve mineral içeriğini korumaktadır (Şekil 5.5).

5.4 Su Noktaları

Çalışma alanında bulunan yüzey ve yeraltı suları bu başlık altında incelenmiştir.

5.4.1 Yüzey Suları

Çalışma alanı içerisinde Seydiler Barajı ve Seydiler Göleti yer almaktadır.



Şekil 5.5: Işcehisar jeotermal sahasının kavramsal modeli (ölçeksiz).

5.4.1.1 Seyitler Barajı

Seyitler Barajı, Seyitler Deresi üzerinde yer almakta olup sulama amacı ile inşa edilmiştir. Toprak dolgu tipi olan barajın gövde hacmi 0,65 hm³, akarsu yatağından yüksekliği 25,50 m'dir. Normal su kotunda göl hacmi 38,00 hm³, normal su kotunda gölalanı 4,50 km²'dir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.2 Seyitler barajının özellikleri.

Barajın Yeri	Afyonkarahisar
Akarsuyu	Seyitler Deresi
Amacı	Sulama
İnşaat Yılı	1961-1964
Dolgu Tipi	Toprak Dolgu
Gövde Hacmi	0,65 hm ²
Yükseklik	25,5 m
Göl Hacmi	38 hm ³
Göl Alanı	4,5 km ²
Sulama Alanı	3222 ha

5.4.1.2 Seydiler Göleti

Seydiler göleti Afyonkarahisar ilinde, Kabız Deresi üzerinde, sulama amacı ile 2007-2008 yılları arasında inşa edilmiş bir barajdır. Homojen toprak dolgu tipi olan barajın depolama hacmi 1340,00 hm³, akarsu yatağından yüksekliği 23,00 m'dir. Sulama alanı 195 ha'dır (Çizelge 5.2).

5.4.2 Soğuk Su Sondajları

Örnekleme yapılan MYO kodlu örnek Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksek Okulu'nun ve İCK kodlu örnek İncehisar Belediyesinin soğuk su sondajlarına aittir. Her iki sondajdan elde edilen sular içme-kullanma suyu olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 5.3 Seydiler göletinin özellikleri.

Göletin Yeri	Afyonkarahisar
Akarsuyu	Kabız Deresi
Amacı	Sulama
İnşaat Yılı	2007-2008
Dolgu Tipi	Homojen Toprak Dolgu
Depolama Hacmi	1,340 hm ³
Aktif Hacim	1,040 hm ³
Ölü Hacim	0,300 hm ³
Yükseklik	23 m
Sulama Alanı	195 ha

5.4.3 Mineralli Su Sondajları

İnceleme alanının içerisinde 1 adet mineralli su (KM) sondajı yer almaktadır. Kimyasal özellikleri itibariyle “mineralli su” olarak adlandırılan bu sondajın herhangi bir kullanım alanı bulunmamaktadır.

5.4.4 Sıcak Su (Termal) Sondajları

İnceleme İscehisar Belediyesine ait 1 adet termal su sondajı (IJ1) yer almakta olup, bu su kaplıca amaçlı olarak kullanılmaktadır

5.4.5 Kaynak Suları

IC2, IC3 ve IC4 örnekleri soğuk su kaynağı örnekleri olup yöre halkı tarafından genel amaçlı olarak kullanılmaktadır. Örneklenen su noktalarının detayları Çizelge 5.4 ve örnekleme lokasyonları şekil 5.6’da verilmiştir.

5.5 Suların Fiziksel Özellikleri

İnceleme alanında yerinde ölçülen; sıcaklık (°C), elektriksel iletkenlik (EC-µs/cm), Hidrojen iyon aktivitesi (pH) ve redoks potansiyeli (Eh) Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.4 İncelenen su örneklerinin genel özellikleri.

Örnek	Koordinat (ED50)	Rakım (m)	Debi (l/sn)	Türü	Kullanım
IJ1	306204/4304152	1095	30	Termal sondaj	Kaplıca
KM	305829/4300328	1060	1	Minerali su	Yok
MYO	306768/4304238	1141	-	Soğuk su sondajı	İnsani tüketim
ICK	304398/4304404	-	-	Soğuk su sondajı	İnsani tüketim
IC2	304647/4304451	1079	2	Çeşme	Genel
IC3	302957/4302398	1074	1	Çeşme	Genel
IC4	306768/4304238	1042	1	Çeşme	Genel

5.5.1 Sıcaklık (°C)

İnceleme alanında yapılan sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre termal suda sıcaklık değeri 41°C olarak ölçülmüştür. Tüm numunelere ait sıcaklık değerleri çizelge 5.5’de belirtilmiştir. IAH Sıcak ve Minerali Sular Komisyonunca ise sıcaklıkları 20°C’den fazla olan sular sıcak su olarak tanımlanır (Başkan ve Canik 1983). Bogomolow 1965 sınıflandırma şekli dikkate alındığında IC2, IC3, IC4, ICK, KM1, MYO1 (12,1°C–18,7°C) soğuk su sınıfına girerken IJ1 (41°C) hipertermal su sınıfına girmektedir. (Çizelge 5.6).

Çizelge 5.5 İncelenen su örneklerinin fiziksel özellikleri.

Kuyu	X yukarı	Y sağa	Z (m) Rakım	EC $\mu\text{s/cm}$	Ölçülen Sıcaklık °C	pH	Eh
IC2	304647	4304451	1079	655	12,1	7,84	-14,7
IC3	302957	4302398	1074	552	14,4	7,9	-21,2
IC4	306768	4304238	1042	619	14,9	7,84	-13,9
ICK	304398	4304404	-	605	18,7	7,74	20,1
IJ1	306204	4304152	1095	5006	41	7,06	13,2
KM1	305829	4300328	1060	5650	15,1	7,6	26,2
MYO1	306768	4304238	1141	575	15,5	8,03	-32,3



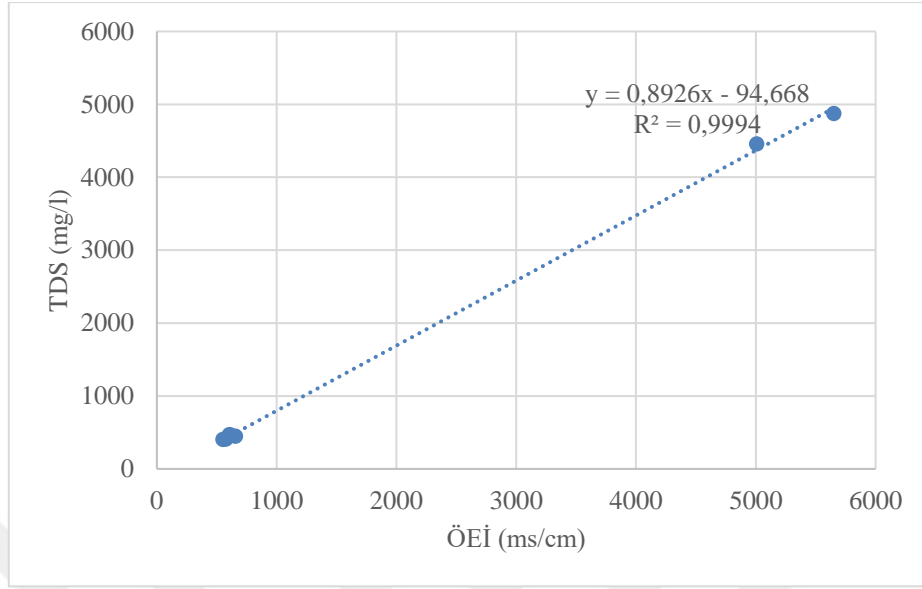
Şekil 5.6 Su örnekleme noktaları.

Çizelge 5.6 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

5.5.2 Elektriksel İletkenlik (EC- $\mu\text{S}/\text{cm}$)

Elektriksel iletkenlik, suyun elektrik akımını iletebilme özelliğinin sayısal ifadesidir. Ölçümler, mikromho/cm ($\mu\text{mho}/\text{cm}$) veya mikrosiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) 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 552-5650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir. (Şekil 5.7) EC değerleri ile toplam iyon miktarları arasında kuvvetli bir doğrusal ilişki vardır (r^2 : 0.99).



Şekil 5.7 İnceleme alanı sularının EC- toplam iyon grafiği

5.5.3 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 asidik, 7'nin üstündeki sular ise bazik olarak adlandırılır (Erguvanlı ve Yüzer 1973). Sudaki bikarbonat, karbonat ve hidroksit iyonları suyun bazik özelliğini artırırken, karbonik asit ve serbest mineral asitleri asit özelliğini arttırmaktadır (Doğan 1981). Sudaki serbest karbondioksit çözünme ve hidrotasyon geçirmesi sonucunda karbonik asite dönüşür ve 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 suyun pH değeri 7,06, soğuk suların pH değerlerinin ise 7,6-8,03 aralığında olduğu görülmüştür (Çizelge 5.3).

Redoks potansiyeli suyun yapısındaki kimyasal bileşenler açısından yükseltgen ya da indirgen olma göstergesidir. İnceleme alanında ölçülen redoks potansiyel değerleri -32,3 ile 26,2 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 kaynaklarından 7 farklı noktadan su örnekleri alınmıştır. Çalışma kapsamında kimyasal analiz sonuçları AquaChem 9.0 (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 çalışma alanındaki değerleri aşağıda belirtilmiştir.

Kalsiyum (Ca⁺²): Sularda kalsiyum kaynağı, başlıca kalsit-aragonit (CaCO₃) ve dolomit (CaMg-(CO₃)₂) gibi mineraller olmak üzere Ca içeriğine sahip tüm mineraller olabilir. Suyun yapısında bulunan hidrojen iyonu kalsiyumun erimesini sağlar ve yapısında kalsiyum mineralleri içeren kayaçların su ile teması sonucunda yeraltı suları kalsiyumca zengin hale gelir. Yeraltı sularında kalsiyum miktarı 10-100 mg/l arasında değişim göstermektedir (Nicholson 1993). Sulama sularında kalsiyumun yüksek olması sodyum yüzdesini azaltarak oluşacak zararları önler (Hounslow 1995). İncelenen sulardaki kalsiyum miktarları; termal suda 244,4 mg/l, mineralli suda 172.7 mg/l ve soğuk sularda 50,6-73,2 mg/l’dir. İscehisar mermerleri ile neojen birimler içerisindeki marn ve kireçtaşları sulardaki kalsiyumun ana kaynağıdır.

Magnezyum (Mg⁺²): Kalsiyumun ardından yeraltı sularında en fazla bulunan ikinci katyon magnezyumdur. Doğal sularda magnezyumun en büyük kaynağı dolomitler olup diğer kaynakları piroksen, serpantin, talk, tremolit, olivin, mikalar ve amfibol mineralleridir. Mg⁺² konsantrasyonu, deniz suyunda 1290 mg/l, yeraltı suyunda 1–100 mg/l ve jeotermal suda maksimum 2000 mg/l’dir (Nicholson 1993). Yapılan analizler sonucunda sulardaki magnezyum miktarları; termal suda 68,7 mg/l, mineralli suda 57.3 ve soğuk sularda 10.4-21.3 mg/l’dir. İscehisar mermerleri başta olmak üzere, bölgedeki metamorfik kayaçlar da sulardaki magnezyum kaynağı olarak yorumlanabilir.

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

Örnek Adı	Na	K	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₂	NO ₃	F	SiO ₂	B	Al	Li	As	Fe	Mn	Cu	Cr	Pb	Hata %
IC2	15,1	3,5	73,2	16,8	274,5	15,2	10,5	0,0	39,7	0,6	80,1	0,09	0,002	0,03	0,023	0,01	0,001	0,001	0,001	0,01>	-0,25
IC3	20,1	6,0	58,3	13,1	286,7	5,7	2,9	0,0	11,9	0,3	78,3	0,09	0,004	0,02	0,014	0,01	0,001	0,001	0,001	0,01>	-1,05
IC4	28,8	2,7	67,2	11,1	311,1	6,8	13,4	0,0	21,2	1,3	68,8	0,18	0,011	0,03	0,043	0,01	0,002	0,001	0,001	0,01>	-3,27
ICK	50,1	5,3	50,6	10,4	329,4	8,6	10,0	0,0	5,8	0,5	79,0	0,33	0,004	0,11	0,043	0,01	0,006	0,002	0,005	0,01>	-2,23
IJ1	814,1	92,5	244,4	68,7	3172,0	61,1	0,6	0,0	0,0	1,3	71,4	9,72	0,009	2,43	0,002	1,95	0,083	0,072	0,119	0,004	1,99
KM1	974,9	79,2	172,7	57,3	3538,0	50,2	1,5	0,0	0,0	0,2	28,9	6,84	0,009	1,97	0,006	0,16	0,089	0,052	0,116	0,003	-1,19
MYO1	17,9	3,7	52,7	21,3	305,0	4,7	4,3	0,0	0,0	0,2	71,3	0,09	0,002	0,02	0,019	0,12	0,004	0,002	0,002	0,01>	0,27

Sodyum (Na⁺): Jeotermal akışkanın ana katyonu sodyum olup en fazla deniz suyunda bulunmaktadır. Sodyum klorürün doğadaki bolluğu ve su içinde kolayca çözünmesi, özellikle termal sularda yüksek sodyum bulunmasına neden olur. Yeraltı sularındaki sodyum kaynağının, kil minerallerinin bünyesindeki Ca ve Na katyonlarının yer değiştirmesi, plajiyoklasın ayrışması gibi etmenler olduğu bilinmektedir. Na⁺ konsantrasyonu, yeraltı suyunda 1-200 mg/l, deniz suyunda 10800 mg/l ve jeotermal sularda maksimum 2000 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanında yapılan analizler sonucunda sulardaki sodyum miktarları; termal suda 814.1 mg/l, mineralli suda 974.9 mg/l ve soğuk sularda 15.1-50.1 mg/l'dir. İnceleme alanındaki metamorfik ve volkanik kayalar içerisindeki feldispatlar sularda sodyumun ana kaynağını oluşturur.

Potasyum (K⁺): Yeraltı sularının potasyum içeriği K-feldspat (KAlSi₃O₈) ve mika (KAl₂(AlSi₃)O₁₀(OH)₂) minerallerinden kaynaklanmaktadır. Na⁺ / K⁺ oranının yüksek olması yüksek sıcaklıklı rezervuarı belirtirken düşük olması yeraltı suyunun dolaşımın fazla olmadan yüzeye çıktığını ifade eder. K⁺ içeriği, 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 alanında yapılan analizler sonucunda sulardaki potasyum miktarları; termal suda 92,5 mg/l, mineralli suda 79.2 mg/l ve soğuk sularda 2.7-6 mg/l'dir. İnceleme alanındaki metamorfik ve volkanik kayalar içerisindeki feldispatlar sularda potasyumun ana kaynağını oluşturur.

Karbonat Konsantrasyonu (CO₃²⁻ ve HCO₃⁻): Suların yapısında bulunan karbonat türlerinin (HCO₃⁻, CO₃²⁻, H₂CO₃) büyük bir çoğunluğu karbonat içerikli kütlelerin erimesiyle ve atmosfer ve topraktaki CO₂' den oluşmaktadır. Sudaki CO₃²⁻ ve HCO₃⁻ miktarı CO₂ miktarına ve suyun pH'na bağlıdır (Hounslow 1995). pH değeri 6-10 arasında iken HCO₃ baskın yapıda 6'dan düşük değerde iken karbonik asit (H₂CO₃) ve daha alkali sularda CO₃²⁻ iyonunun baskın olduğu bilinir. En kısa yoldan ve en kısa sürede rezervuardan yüzeye ulaşan sularda su-kayaç etkileşimi de kısa olacağından, karbonatlı kayalardan ve çatlak sistemlerindeki karbonatlı minerallerden çözecekleri HCO₃⁻ değerleri en düşük seviyede olacaktır (Nicholson 1993). Karbonat konsantrasyonu, yeraltı sularında genellikle 10–500 mg/l ve jeotermal sularda ise 7500 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda buluna HCO₃⁻ miktarları; termal suda 3172 mg/l, mineralli suda 3558 mg/l ve soğuk sularda 274,5-329.4 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. 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 suda 61.1 mg/l, mineralli suda 50.2 mg/l ve soğuk sularda 4.7-15.2 mg/l'dir.

Sülfat (SO₄²⁻): Yeraltı suları yapısındaki sülfatın (SO₄²⁻) büyük bir kısmını sedimanter kayalar jips, anhidrit bunların dışında magmatik kayalar ve organik maddelerdir. Ayrıca bunların dışında kükürt içerikli maden ocaklarının atıklarının yeraltı sularına karışması, evsel ve endüstriyel atıklar yeraltı suyuna karışması sulardaki SO₄²⁻ 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). İncelenen sularda bulunan sülfat miktarları; termal suda 0.6 mg/l, mineralli suda 1.5 mg/l ve soğuk sularda 2.9-13.4 mg/l'dir.

Nitrit (NO₂⁻¹): Nitrit sularda düşük miktarlarda bulunan bir azot bileşimidir. Evsel atık sular, bitkisel ve hayvansal atıklar, tarımda kullanılan gübreler, endüstriyel atık sular, katı atıkların yakılması, atmosferdeki azotun yıkanması yüzey ve yeraltı sularına nitrit sağlayan başlıca kaynaklardır (Ayyıldız 1990). Suda nitritin bulunuşu, organik kirlenme tarafından etkilenmiş aktif biyolojik süreçlerin varlığını gösterir (McNeely vd. 1979). 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 incelenen sularda bulunan nitrit içeriğine rastlanmamıştır.

Nitrat (NO₃⁻¹): Endüstriyel atık suların yeraltı sularına karışması, tarımsal faaliyetler sonucunda kullanılan kimyasallar ve gübreler sulardaki nitratın ana kaynağıdır. 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). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sularda bulunan nitrat miktarları; termal

ve mineralli su örneklerinde 0 mg/l, soğuk sularda 0,0- 39,7 mg/l'dir. Nitratın bazı su örneklerindeki görece yüksekliği bu örneğin çevresel kirleticilerin etkisi altında kaldığına işaret etmektedir.

Florür (F⁻): Yüzey ve yeraltı sularında florun kaynağı amfibol, apatit, florit ve mika gibi minerallerdir. Yüksek F konsantrasyonu sedimanter kayalara nazaran, riyolit, pomza ve obsidiyen gibi volkanik kayaların su-kayaç etkileşimindeki önemini gösterir (Mahon 1966). 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 sulara bulunan florür miktarları; termal suda 1.3 mg/l, mineralli suda 0.2 mg/l ve soğuk sularda 0,2-1,3 mg/l'dir.

Lityum (Li⁺): Lityum jeotermal sulara 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 (Kharaka and Mariner 1989). 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 sulara ise maksimum 25 mg/l'dir (Nicholson 1993). Çalışma alanımızda yapılan analizler sonucunda sulara bulunan lityum miktarları; termal suda 2.43 mg/l, mineralli suda 1.97 mg/l ve soğuk sulara 0.02-0.11 mg/l'dir.

Arsenik (As): Arsenik hidrotermal damarlarda altın, bakır, gümüş ve nikel gibi elementlerle birlikte, Ni-Co sülfid yataklarında, bakırlı şeyl ve kumtaşlarında, fosfatlı kayalarda ve oksitlerde izlenir (Şahinci 1991). Yeraltı sularında yüksek arsenik konsantrasyonunun en önemli nedeni fillosilikat, demiroksit ve sülfid minerallerinden ayrılan arseniktir (Pal vd. 2002). Arsenik elementi çok zehirli olması sebebiyle içme sularında bulunması istenmez. Çalışma alanındaki sulara bulunan arsenik miktarları 0.002 ile 0.043 mg/l arasında değişmektedir.

6.2 Hidrojeokimyasal Sınıflandırma

6.2.1 Suların Hidrojeokimyasal Fasiyes Kavramına göre Sınıflandırılması

Back (1966) suların hidrojeokimyasal fasiyes kavramına göre değerlendirilmesini ele

almıştır. Yaptığı sınıflamaya göre suların yapısında bulunan anyon ve katyon değerlerinin meq/l birimlerine göre fasiyes sınıflaması yapılmaktadır. Anyon ve katyon değerleri %50'nin üzerinde olanlar su tipini belirlerken genel itibariyle tüm anyon ve katyon değerlerinin %50'nin altında olması karışık su tipi olduğunu işaret etmektedir.

Uluslararası Hidrojeologlar Birliği tarafından belirtilen sınıflamada ise meq/l cinsinden olmak üzere suda % 20'den fazla çözünmüş bulunan iyonlar su tipini belirtmektedir (IAH 1979, Başkan ve Canik 1983). Çalışma alanındaki fasiyes kavramına göre yapılan su sınıflamasında Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH 1979) sınıflaması kullanılmış (Çizelge 6.2) ve bu sınıflamaya ek olarak anyon ve katyon değerlerinin görülmesi için Pie diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 6.1).

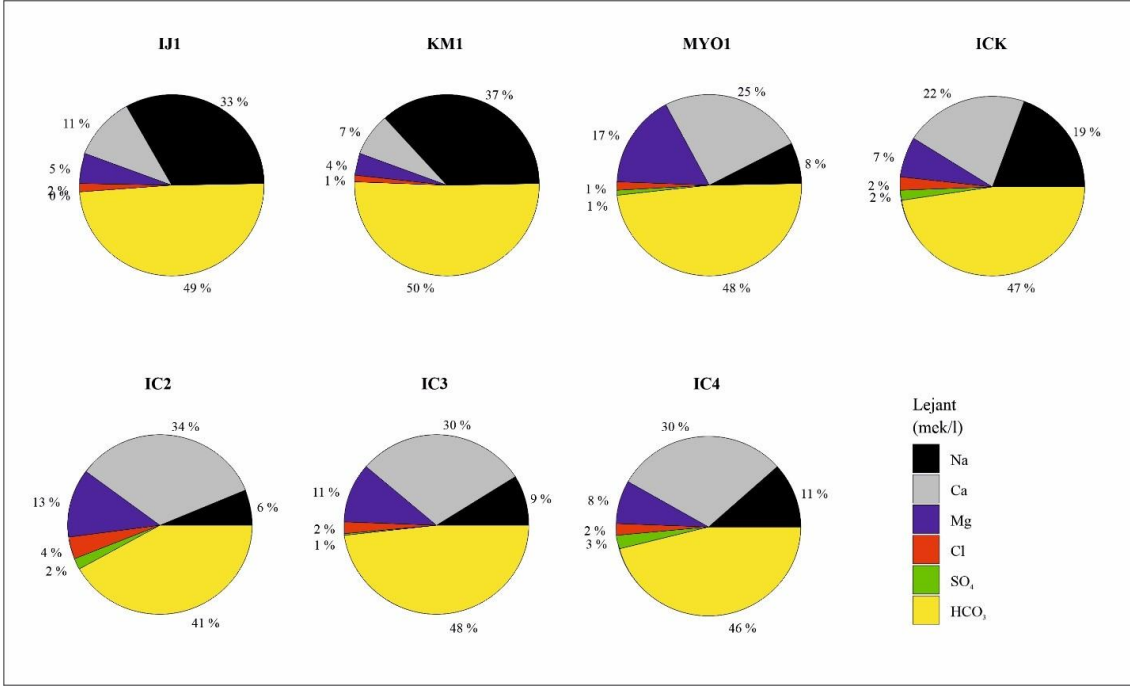
Çizelge 6.2 İscehisar jeotermal suların IAH (1979)'a göre su tipi sınıflaması.

<i>No</i>	<i>Örnek Adı</i>	<i>Tarih</i>	<i>Su Tipi</i>
1	IC2	04.12.2018	Ca-Mg-HCO ₃
2	IC3	04.12.2018	Ca-Mg-HCO ₃
3	IC4	04.12.2018	Ca-Na-HCO ₃
4	ICK	04.12.2018	Ca-Na-HCO ₃
5	IJ1	04.12.2018	Na-Ca-HCO ₃
6	KM1	04.12.2018	Na-HCO ₃
7	MYO1	04.12.2018	Ca-Mg-HCO ₃

6.2.2 Suların Piper Sınıflaması

Su kimyası çalışmalarında oldukça sık kullanılan diyagramlardan biri olan Piper (Üçgen) diyagramı iyonları topluca görüntüleme kolaylığı açısından oldukça önemlidir (Piper 1979). Piper diyagramı ile suların yapılarındaki anyon ve katyon (% cinsinden) içerikleri değerlendirilerek su fasiyesleri belirlenir.

Çalışma alanından alınan 1 adet sıcak su örneği, 1 adet mineralli su ve 5 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;

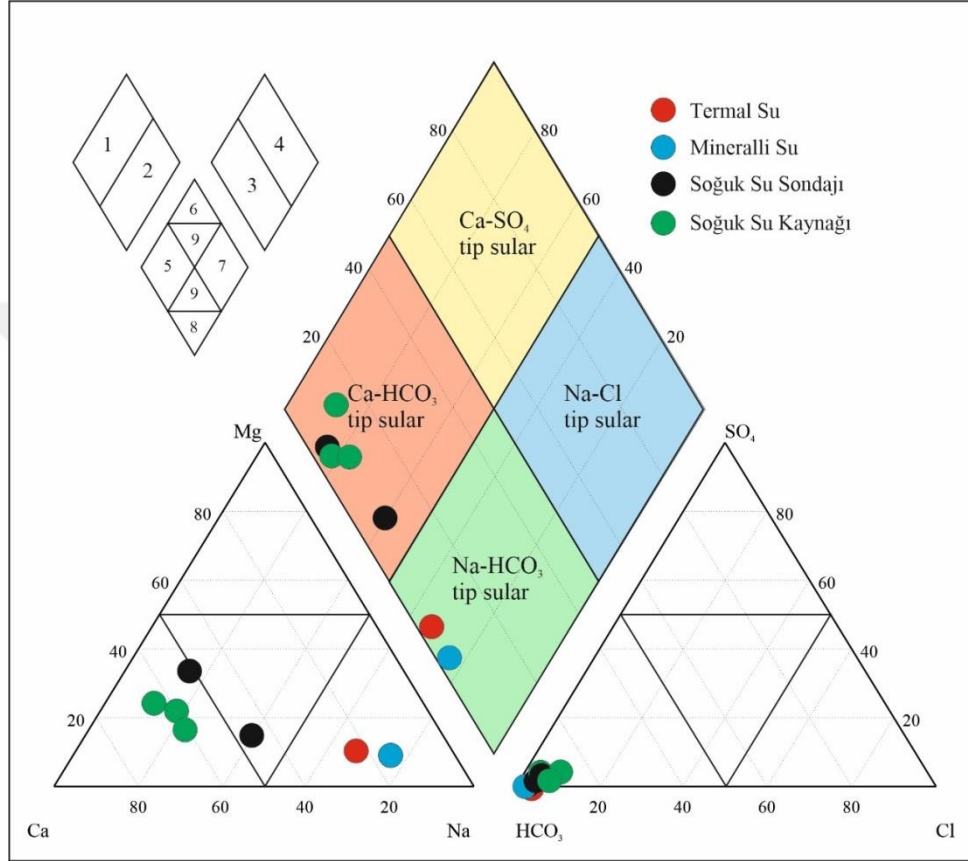


Şekil 6.1 Analizi yapılan su örneklerinin pie diyagramı.

- 1 numaralı kısım Toprak Alkali element (Ca + Mg) > Alkali elementler (Na+K)
- 2 numaralı kısım Toprak Alkali element (Ca+Mg) < Alkali element (Na+K)
- 3 numaralı kısım zayıf asit kökleri (CO₃ + HCO₃) > kuvvetli asit kökleri (Cl+SO₄)
- 4 numaralı kısım kuvvetli asit kökleri (Cl+SO₄) < zayıf asit kökleri (CO₃+HCO₃)
- 5 numaralı kısım karbonat (CO₃ + HCO₃) sertliği %50'den fazla olan sular
- 6 numaralı kısım karbonat olmayan sertliği %50'den fazla olan sular
- 7 numaralı kısım karbonat olmayan alkalitesi %50'den fazla olan NaCl+NaSO₄+KCl'lü sular
- 8 numaralı kısım karbonatlı alkaliler %50'den fazla olan Na₂CO₃+K₂CO₃'lü sular
- 9 numaralı kısım hiçbir iyonu %50'yi geçmeyen sulardır.

Piper (1944) diyagramı incelendiğinde soğuk su sondajı ve soğuk su kaynağından alınan örneklerin Ca-HCO₃'lü sular alanında yer aldığı görülmektedir. Soğuk su örneklerinin tümünde hakim anyon HCO₃ iken; soğuk kaynak sularında hakim katyon Ca iyonudur. Soğuk sondaj suları ise katyon içerikleri bakımından karışık tip katyonlar sınıfına doğru yönlendirilmiştir. Bu sular ayrıca “Toprak Alkali element (Ca+Mg) > Alkali elementler (Na+K)”, “zayıf asit kökleri (CO₃+HCO₃)> kuvvetli asit kökleri (Cl+SO₄)” ve Karbonat sertliği %50'den fazla olan sular alanlarında yer almaktadır. Termal su ve mineralli su örnekleri ise Na- HCO₃'lü sular sınıfında yer almaktadır. Bu örneklerin hakim katyonu

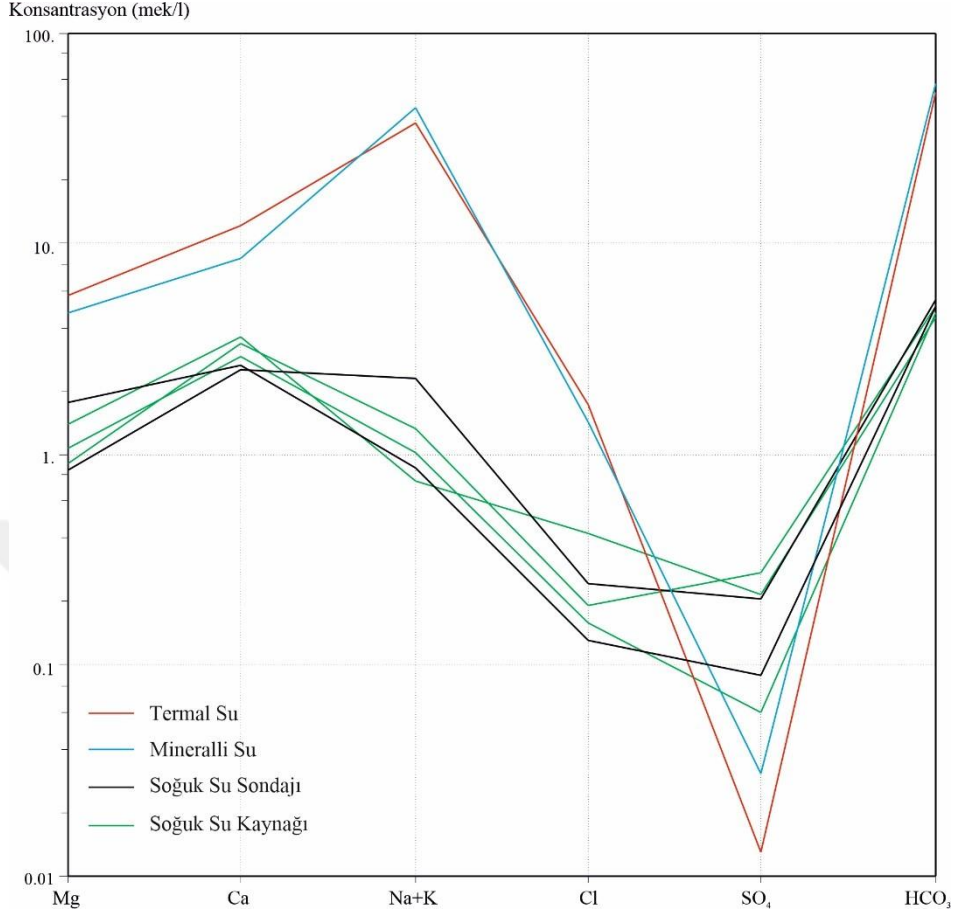
Na, hakim anyonu ise HCO_3 'dür. Bu sulara ayrıca; “Toprak Alkali element ($\text{Ca}+\text{Mg}$) < Alkali element ($\text{Na}+\text{K}$)”, “zayıf asit kökleri (CO_3+HCO_3) > kuvvetli asit kökleri ($\text{Cl}+\text{SO}_4$)” ve Karbonatlı alkaliler %50 den fazla olan sular alanlarında yer almaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Su örneklerinin piper diyagram konumu.

6.2.3 Schoeller Sınıflandırması

Su örneklerinin topluca görüldüğü Schoeller yarı logaritmik diyagramında termal ve mineralli su örnekleri yüksek $\text{Na}+\text{K}$ ve HCO_3 değerleri ile diğer örneklerden kolayca ayrılmaktadır. Bu örneklerin birbirleriyle olan paralel dağılımı benzer rezervuardan geldiklerinin bir işaretidir. Soğuk su örnekleri de görece yüksek Ca ve HCO_3 içeriğine sahip olup bu örnekler de kendi aralarında benzer yeraltı rezervuar koşullarına sahiptir. Örneklerin HCO_3 içerikleri karbonatlı kayalar ile olan etkileşimi işaret ederken, sıcak sulara gözlenen Na ve K gibi elementler su kayaç arası katyon değişimi, metamorfik kayalar ile olan etkileşim gibi süreçlere bağlıdır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Su örneklerinin yarı logaritmik Schoeller diyagramı.

Schoeller tarafından önerilen ve suların klorür (Cl), sülfat (SO₄), bikarbonat (HCO₃) miktarlarına göre yapılan sınıflamada ise (Çizelge 6.3); klorür içeriği bakımından termal su örneğinin normal klorürlü, mineralli su örneğinin normal klorürlü ve soğuk su örneklerinin normal klorürlü sular sınıfında; sülfat bakımından termal su örneğinin normal sülfatlı, mineralli su örneğinin normal sülfatlı ve soğuk su örneklerinin normal sülfatlı sular sınıfında; bikarbonat içeriği bakımından ise termal su örneğinin hiperkarbonatlı, mineralli su örneğinin hiperkarbonatlı ve soğuk su örneklerinin hiperkarbonatlı sular sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

6.2.4 Suların Doyma İndeksleri

Jeotermal akışkanlar, zamanla kabuklaşma ve korozyon gibi problemlere neden olabilecek gaz ve katı maddeler içermektedir. Kabuklaşma, jeotermal kaynakların kullanımını sırasında oluşan en önemli sorunlardan birisidir. Dünyadaki jeotermal alanların

çoğunda ana kabuklaşma mineralleri kalsit ve amorf silistir (Arnorsson, 1989; Armannsson, 1989; Kristmannsdottir, 1989).

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

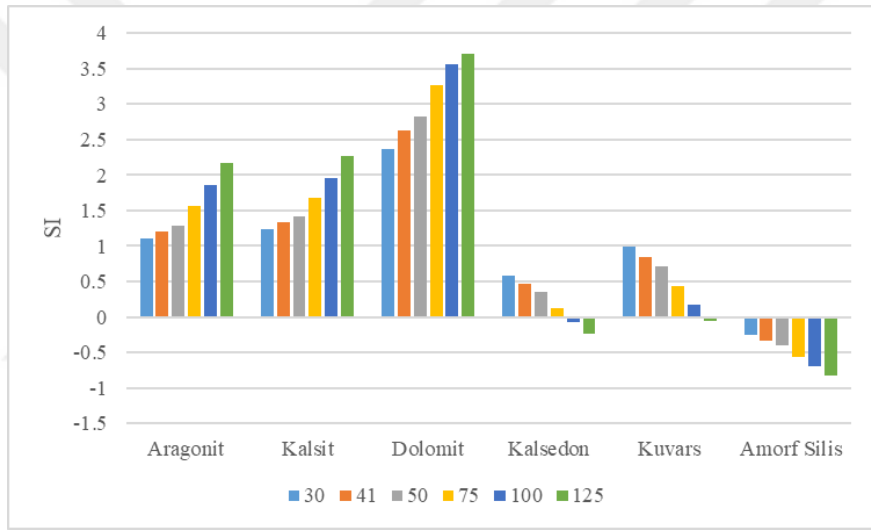
(Su Sınıfı)	Klorür Miktarı (mek/l)	(Su Sınıfı)	Sülfatlı Miktarı (mek/l)	(Su Sınıfı)	Bikarbonat Miktarı (mek/l)
Hiperklorürlü	>700	Hiposülfatlı	>58	Hiperkarbonatlı	>7
Klorotalastik	420-700	Sülfatlı	24-58	Normal Karbonatlı	2-7
Klorürce Zengin	140-420	Oligosülfatlı	6-24	Hipokarbonatlı	2<
Orta Klorürlü	40-140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

Denge sabitleri ile hesaplanan doygunluk indeksi değerleri (SI), minerallerin çözünme ve çökelme eğilimlerinin belirlenmesinde faydalı bir yöntemdir. Doymuluk 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;

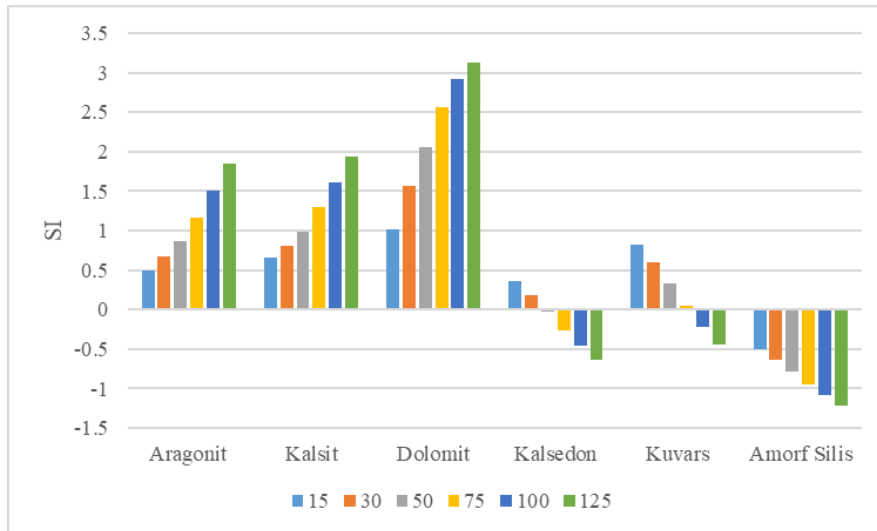
$$SI = \frac{\log Q}{\log K} \quad (6.1)$$

SI>0 ise çözeltinin o mineralce doymuk ve çökelme eğiliminde olduğu, SI<0 ise çözeltini o minerali çözme eğiliminde olduğu, SI=0 veya sıfıra yakın bir değerse, o mineralle dengede olduğu anlaşılmaktadır. Suların mineral doymuluk durumları; üretimi ve taşıma aşamasında oluşabilecek kabuklaşma ve korozyon sorunlarının önceden tahmin edilebilmesi için açısından oldukça önemlidir. Analizi yapılan örneklerin çıkış sıcaklıkları ve pH'ları ile birlikte, farklı sıcaklıklardaki doymuluk durumlarının belirlenmesi için PhreeqC programı kullanılmış olup, 30-41-50-75-100 ve 125°C sıcaklıklar için belirlenen doymuluk değerleri şekil 6.4 ve 6.5'de verilmiştir.

Suyun çıkış sıcaklığı ve ph'sında kalsit, aragonit ve dolomit gibi karbonat mineralleri ile, kuvars ve kalsedon gibi silis mineralleri çökelme eğilimindedir. Kuyunun işletilmesi esnasında bu minerallerin kabuklaşma sorunu yaratmaması için, çeşitli kimyasal ve mekanik yöntemler ile bu sorunun giderilmesi gerekmektedir. Şekil üzerinde ayrıca; karbonat minerallerinin çökelme eğiliminin sıcaklık arttıkça arttığı, buna karşı silis minerallerinin sıcak artışına bağlı olarak çözünme özelliklerinin azaldığı gözlenmektedir. İşletilmekte olan jeotermal sondaj kuyusunda sıcaklık ne olursa olsun karbonat kabuklaşması beklenmelidir. Silis çökelmesini önlemek için ise daha yüksek sıcaklıkta üretim yapılması gerekmektedir. Oluşabilecek silis kabuklaşması mekanik-kimyasal yollarla; karbonat kabuklaşması ise inhibitör kullanımı ile giderilmelidir.



Şekil 6.4 IJ kodlu termal su örneğinin doygunluk değerleri.



Şekil 6.5 KM kodlu mineralli su örneğinin doygunluk değerleri.

7. İZOTOP JEOKİMYASI

Nötron yükleri farklı olup elektron ve proton sayıları aynı olan elementler vardır. Bu elementlere izotop denir. İzotop elementler duraylı ve radyoaktif olarak iki grupta sınıflanmaktadır. Jeotermal akışkanların yaşlarını belirlemekte ^3H (trityum), ^{14}C , ^{131}I , ^{222}Rn gibi radyoaktif izotoplar kullanılırken, duraylı izotoplar ise jeotermal akışkanın temelden kökenine iner ve yorumlamasını yapılmasında yardımcı olmaktadır. Oksijen izotopları (^{16}O - ^{18}O), hidrojen izotopları (^1H - ^2H), karbon izotopları (^{12}C - ^{13}C) ve sülfür izotopları (^{32}S - ^{34}S) en çok kullanılan duraylı izotoplarıdır.

7.1 ^{18}O -D İlişkisi

Suların döteryum (^2H) ve ^{18}O kompozisyonları genelde SMOW (Standart Mean Ocean Water) standardına göre ölçülmüştür (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 $\delta D = 8 (\delta^{18}\text{O}) + 10$ 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 bölgenin hava sıcaklığına, enlemine ve yüksekliğine göre değişim göstermektedir. Sıcaklık düştükçe izotop ayırılma faktörü, dolayısıyla suların ağır izotop/hafif izotop oranları artmaktadır. Enlem ve yükseklik arttıkça, $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri de 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. 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, mineralli ve soğuk su 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).

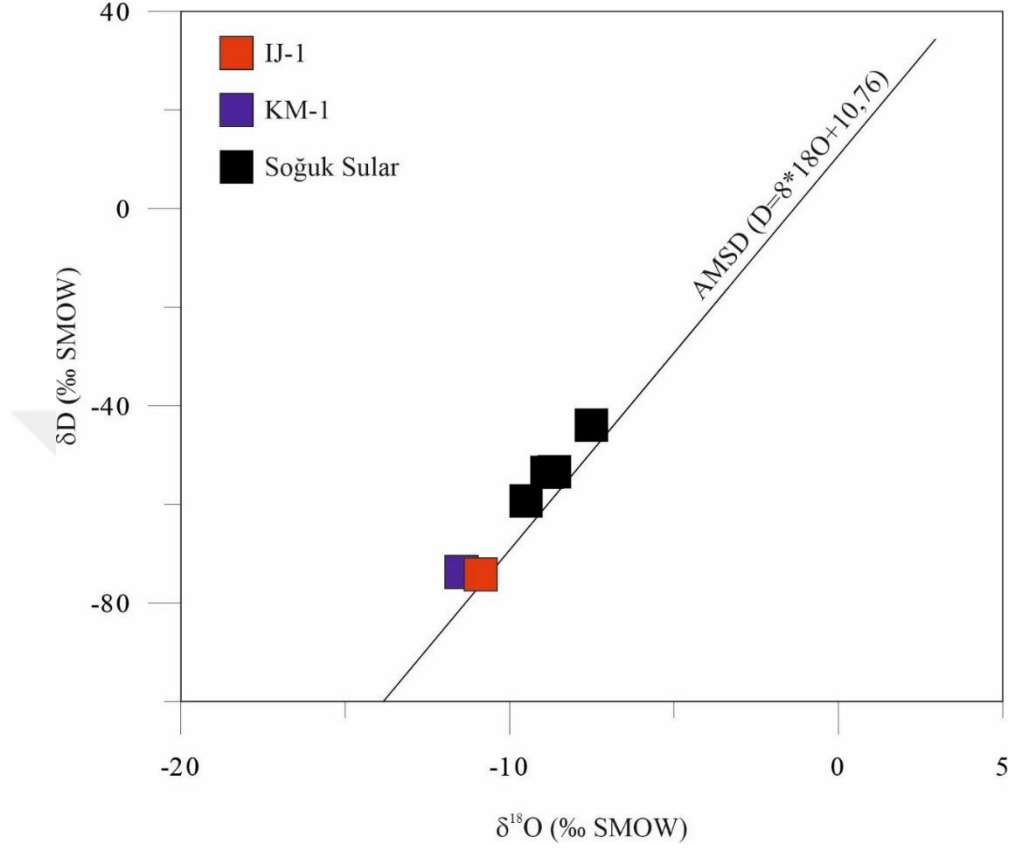
Çizelge 7.1 ^{18}O -D izotop analizi yapılan örnekler ve analiz sonuçları.

Örnek Adı	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)	D
IJ1	-10,88	-74,09
KM1	-11,46	-73,63
IC2	-8,64	-53,28
IC3	-8,86	-53,41
IC4	-7,51	-43,83
MYO	-9,50	-59,21

7.2 ^3H İçeriği

Radyoaktif izotoplardan bir izotop olan trityum, doğal yarılanma yoluyla sürekli bozunmaya uğramaktadır. Buna bağlı olarak belirli bir bölgede yeraltısuyunu besleyen yağışın trityum içeriğinin bilinmesi durumunda, yeraltısuyunun ağırlıklı ortalama yaşının belirlenmesi mümkün olmaktadır. Suların trityum içeriği TU (tritium unit) olarak ifade

edilmektedir. 1 TU birimi 10^8 Hidrojen atomundan birinin ^3H olduğunu göstermektedir. İncelenen su örneklerinin trityum değerleri çizelge 7.2’de verilmiştir.



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

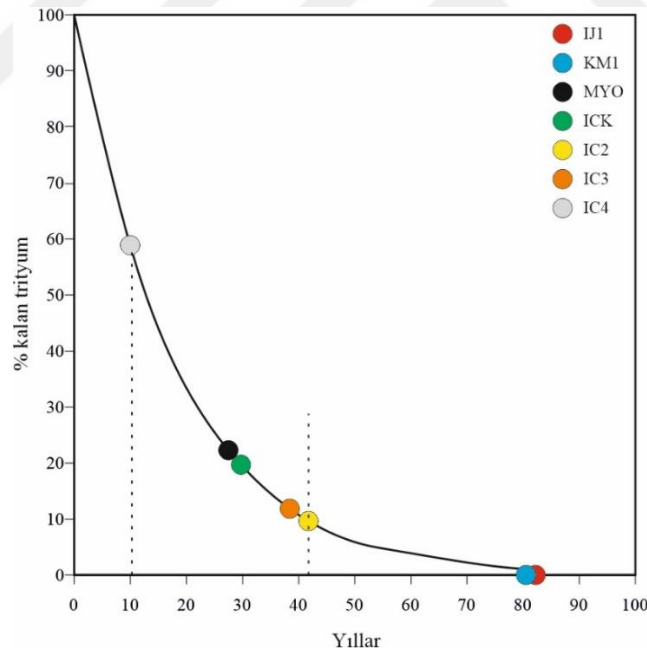
Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı verilerine göre Ankara için 2004 yılı trityum miktarı 11.4 TU olarak verilmiştir (<https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>). Yarılanma düzeltmesi yapıldıktan sonra 2020 yılı için Ankara yağışlarının trityum içeriği 4.65 TU olarak belirlenmiştir. Trityum yarılanma eğrisi ve güncel trityum yüzdesi değerleri yardımıyla incelenen soğuk su örneklerinin yaş aralıkları 10-45 yıl olarak hesaplanmışken, termal su ve mineralli su örnekleri görece düşük trityum içerikleri nedeniyle daha yaşlı olarak belirlenmiştir. Analiz hatası ve trityumun görece yaşlandırması dikkate alındığında genel olarak soğuk su örneklerinin 45 yıl ve daha genç, termal su ve mineralli su örneklerinin ise 50 yıl ve daha yaşlı olduğu değerlendirilebilir.

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

Örnek Adı	^3H	Hata +/- 1 Sigma	%Tritiyum
IJ1	0.00	0.36	0
KM	0	0.36	0
ICK	0.92	0.35	18.4
IC2	0.45	0.37	9
IC3	0.64	0.41	12.8
IC4	2.92	0.37	58.4
MYO1	1.19	0.38	23.8

Güncel trityum yüzdesi aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Mazor, 2004):

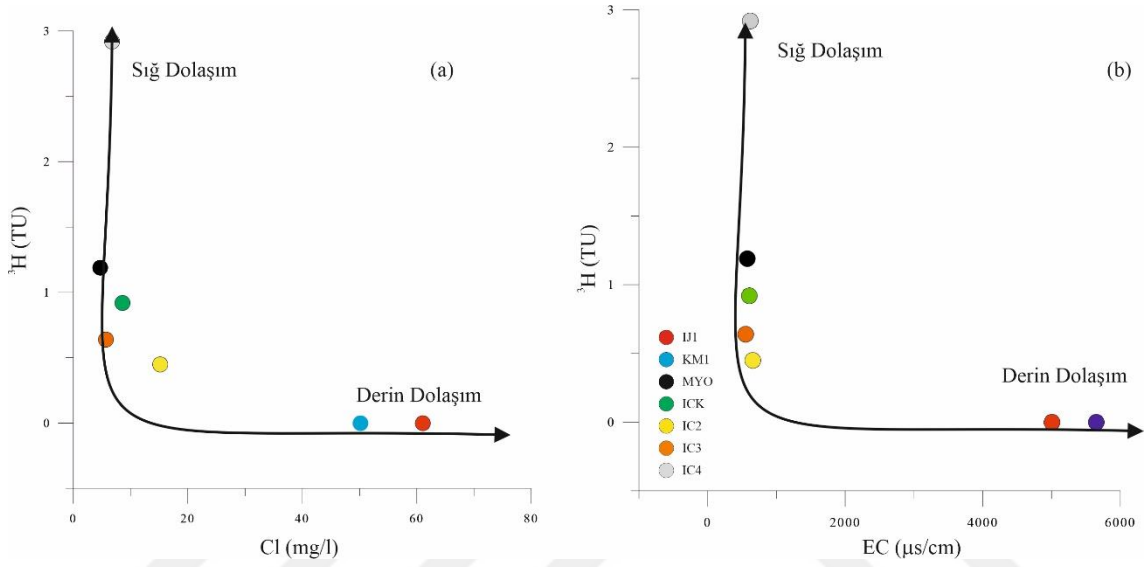
$$\%Tritiyum = \frac{\text{örneğin trityum içeriği}}{\text{doğal konsantrasyon}} \quad (7.4)$$



Şekil 7.2 Su örneklerinin ^3H yarılanma diyagramındaki konumu.

Çalışma alanındaki termal suların yeraltında kalış süreleri suların trityum izotop değerlerinin elektriksel iletkenlik (EC) ve Cl konsantrasyonları ile karşılaştırılmasıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Suların Cl- ^3H ve EC- ^3H diyagramındaki konumları

değerlendirildiğinde termal su ve mineralli su örnekleri ile soğuk su örneklerinin yüksek klorür, yüksek EC ve düşük ^3H içeriği bakımından ayrıldıkları görülmektedir (Şekil 7.3a-b). Termal su ve mineralli su örneği uzun dolaşıma sahip olan yaşlı sular, IC4 soğuk su kaynağı örneği kısa dolaşıma sahip genç sular olarak değerlendirilmiştir. MYO ve ICK soğuk su sondajı örnekleri ile IC2 ve IC3 kaynak suyu örnekleri ise IC4 örneği ile termal ve mineralli su örnekleri arasında geçiş özelliği göstermektedir.



Şekil 7.3 Su örneklerinin ^3H -Cl ve ^3H -EC diyagramındaki konumu.

8. JEOTERMOMETRE

Jeotermometre hesaplamaları, jeotermal suların hazne kaya sıcaklıklarının belirlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Rezervuar sıcaklığının tahmini, termal suyun ekonomik olarak nasıl işletileceğini ve geliştirileceği hakkında bilgi vermektedir. Derinlerde sahip olunan sıcaklıklar yüzeydekine kıyasla çok daha fazladır. Derinlere yapılacak sıcak su sondajları ile akifer sıcaklığı tespit edilebilmektedir. Yüksek maliyete ve zamana bağlı olarak yapılan sondajlar çeşitli jeotermometre yöntemleriyle maliyeti aza indirerek ve zamanı kısaltarak akifer sıcaklığına hızlı ulaşmada daha çok yardımcı olabilmektedir.

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 jeotermometreler sayısal (kantitatif) ve niteliksel (kalitatif) olarak iki bölümde incelenebilir (Şahinci 1987).

8.1.1 Niteliksel (Kalitatif) Kimyasal Jeotermometreler

Kalitatif jeotermometrelerin çoğu uçucu maddelerin sıcak akışkanlardaki ve zemindeki 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 hazne kaya sıcaklığı hakkında en iyi bilgi veren bileşendir. Yüksek sıcaklıktaki sulara hemen hemen 180°C de silis çökmesi başlar ve sıcaklık değerinin azalması ile birlikte çökmede artış gözlenir. 140°C'nin üzerinde 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 2003). Yüzeyde kristalleşmiş amorf silis çökeltileri, 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 2003).
- ❖ **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. Silis jeotermometresi ile hesaplanan akifer sıcaklık değeri, Na/K ile bulunandan küçük ise, akışkanın rezervuar kayadan yüzeye gelişi sırasında soğuk sular ile karışmış olabileceğini işaret eder (Şahinci 1987).
- ❖ **B, NH₄, H₂S, Hg, Cl, Na, K, Li, Rb, Cs, As** element ve bileşiklerin birinin veya birkaçının suda fazla bulunması, akifer sıcaklığının yüksek olabileceğine işaret eder (Tarcan 2003).
- ❖ **Traverten Çökelmeleri:** Karbonat oluşumları akifer sıcaklığının düşük olduğuna (yaklaşık 100°C) işaret eder. 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 vd. 1973).

- ❖ 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 gerçekleştirmektedir,
- ❖ 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 SiO₂ 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. Yüksek sıcaklıklarda akiferden yüzeye doğru hareket eden sıcak akışkanda hızlı silis çökeli mi gözlenir ve bu nedenle sıcaklığı 225°C'nin üzerindeki hazne kayalardan gelen sularda gerçek sıcaklığı yansıtmaz. Özellikle sıcaklıkları <180°C olan akışkanlarda kuvarsa

nazaran kalsedon ile denge söz konusu olduğundan kalsedon jeotermometresi daha doğru sonuçlar vermektedir (Karingithi 2009, Arnorsson 2000).

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. Silis jeotermometresi hesaplamaları termal su örneği (IJ-1) için 69-119°C, mineralli su örneği (KM1) için ise 28-82°C arasında rezervuar sıcaklığı vermektedir. Termal su örneği için Fournier, 1977 tarafından önerilen alfa kristobalit jeotermometresi (69°C), Fournier, 1977 tarafından önerilen kalsedon jeotermometresi (91°C) daha makul ve kabul edilebilir sıcaklıklar vermektedir.

Çizelge 8.1 Silis jeotermometresi sonuçları.

Jeotermometre /Örnek Adı	Referans	IJ1	KM
SiO ₂ (α Kristobalit)	Fournier 1977	69	28
SiO ₂ (Kalsedon)	Fournier 1977	91	46
SiO ₂ (Kalsedon)	Fournier 1977	119	78
SiO ₂ (buhar kaybı)	Fournier 1977	117	82
SiO ₂ (Kalsedon Kon.)	Arnorsson et al. 1983	91	49
SiO ₂ (Kalsedon, ad.buhar kaybı)	Arnorsson et al. 1983	93	55
SiO ₂ (Kalsedon, buhar kaybı)	Arnorsson et al. 1983	87	43
SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	Arnorsson et al. 1983	109	65
SiO ₂ (Kuvars, adiyabatik buhar kaybı)	Arnorsson et al. 1983	116	80
SiO ₂ (Kalsedon mmol)	Arnorsson et al. 1983	90	48

8.1.2.2 Katyon Jeotermometreleri

Katyon jeotermometreleri, jeotermal akışkanda çözünen bazı elementlerin iyon değişimi esasına dayanır. Burada önemli olan parametreler, çözünen maddelerin oranı ve denge sıcaklığı değişimidir.

Katyon jeotermometrelerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, özellikle Na/K

jeotermometrelerinin 200°C civarında ve kabul edilemez sonuçlar verdiği görülmektedir (Çizelge 8.2). Örneklerin Na/K jeotermometresi sonuçları IJ1 örneği için 243-199°C, KM1 örneği için ise 216-187° arasında değişim göstermektedir. Bununla birlikte özellikle K/Mg jeotermometresi silis jeotermometresi sonuçları ile uyumlu olarak IJ1 için 99°C ve KM1 için 97°C sıcaklık vermektedir. Aynı şekilde Na/Li jeotermometresi de 94-86°C olarak kabul edilebilir sıcaklık vermektedir. Genel olarak katyon jeotermometreleri dikkate alındığında termal su örneğinin rezervuar sıcaklığının 94-99°C arasında olduğu söylenebilir.

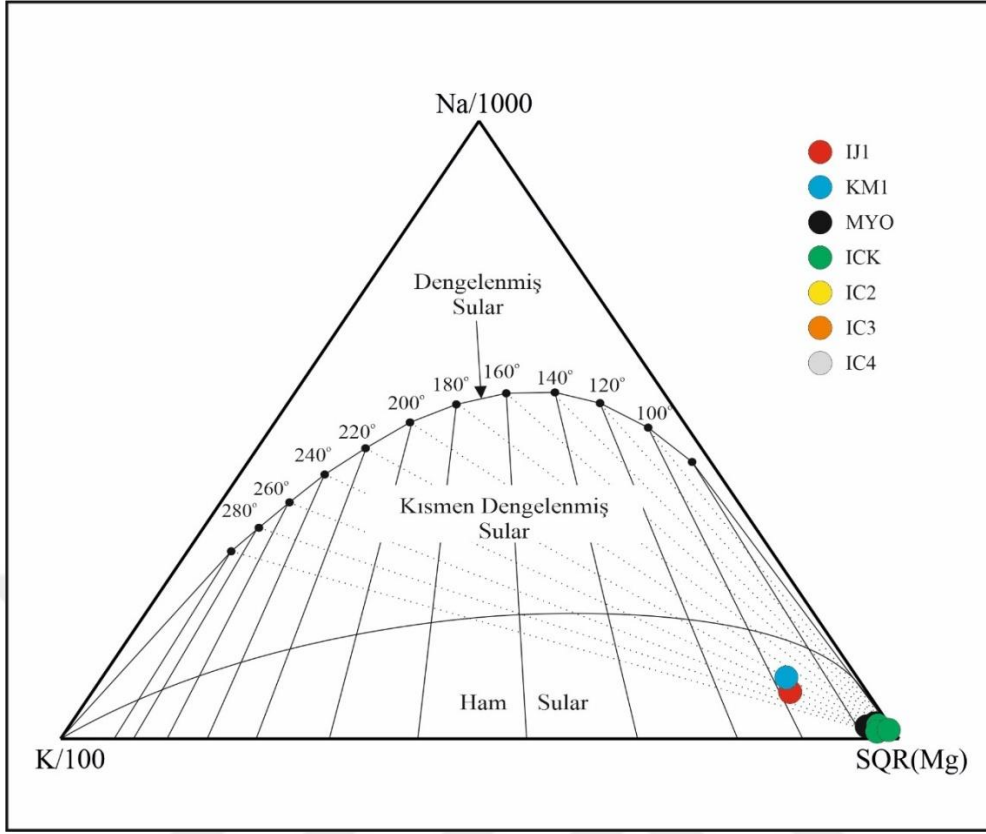
Çizelge 8.2 Katyon jeotermometre sonuçları.

Jeotermometre	Referans	IJ1	KM1
Na/K	Arnorsson vd.1983	224	188
Na/K	Arnorsson vd.1983	226	200
Na/K	Fournier & Truesdell 1973	199	161
Na/K	Verma and Santoyo, 1997	230	203
Na/K	Fournier 1979	228	200
Na/K	Nieva ve Nieva, 1987	215	187
Na/K	Giggenbach 1988	243	216
K/Mg	Giggenbach 1988	99	97
Mg/Li	Kharaka ve Mariner, 1989	40	41
Na/Li	Kharaka vd. 1982	94	86

8.2 Birleşik (Kombine) Jeotermometre Uygulamaları

Suların etkileşimde olduğu kayaçlarla olan denge durumlarının tespiti için geliştirilmiş olan Na-K-Mg üçgen diyagramı ile hem hazne sıcaklığı hızlı olarak yorumlanabilmekte, hem de katyon jeotermometresi sonuçlarının geçerliliği sınanmaktadır (Giggenbach, 1988). Bu diyagramlar üzerinde bazı revizyonlar yapılarak, en güvenilir sonuçların bu üçgen diyagramdan oluşan jeotermometre uygulaması ile alınabileceği öne sürülmektedir (Fournier, 1990).

Bu diyagrama göre; analizi yapılan tüm su örneklerinin ham sular alanında yer aldığı görülmektedir (Şekil 8.1). Su-Kayaç etkileşiminin devam ettiği varsayımından yola çıkılarak ham sular bölgesinde yer alan sular için katyon jeotermometrelerinin kullanımı uygun değildir. Bununla birlikte grafik üzerinden bakıldığında örneklerin rezervuar sıcaklığının yaklaşık 100°C'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 8.1).



Şekil 8.1 Su örneklerinin Giggenbach diyagramı.

9. SULARIN KULLANIM ÖZELLİKLERİ

9.1 Suların İçilebilirlik Özellikleri

Termal suların olduğu kadar, bölgedeki tüm su örneklerinin de kullanılabilirliğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. İnceleme alanında yer alan soğuk su örnekleri içme-kullanma suyu olarak kullanılmakta iken, KM örneği doğal mineralli su özelliğinde olup ticarileşme potansiyeli olan bir su örneğidir. İncelenen su örneklerinin içme suyu olarak kullanımının belirlenmesi için İTASHY 2013 standartları ile schoeller içilebilirlik diyagramı kullanılmıştır.

İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte (İTASHY 2013) belirtilen sınır değerleri dikkate alındığında arsenik (As) bakımından tüm soğuk su örneklerinin sınır değeri aştığı görülmektedir. Mineralli su (KM) örneği ise elektriksel iletkenlik, sodyum, bor, mangan ve krom içeriği bakımından standarta uymamaktadır. Termal su örneği de (IJ1) elektriksel iletkenlik, sodyum, bor, mangan, demir ve krom içeriği bakımından standarta uymamaktadır (Çizelge 9.1).

İnceleme alanında örnekleme yapılan suların içilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için kimyasal analiz sonuçları ayrıca Schoeller içilebilirlik diyagramı üzerine yerleştirilmiştir. Bu diyagrama göre bölgedeki soğuk kaynak ve sondaj suları “iyi kaliteli sular”, termal ve mineralli sular ise “zorunlu olmadıkça içilemeyen sular” sınıfında yer almaktadır (Şekil 9.1).

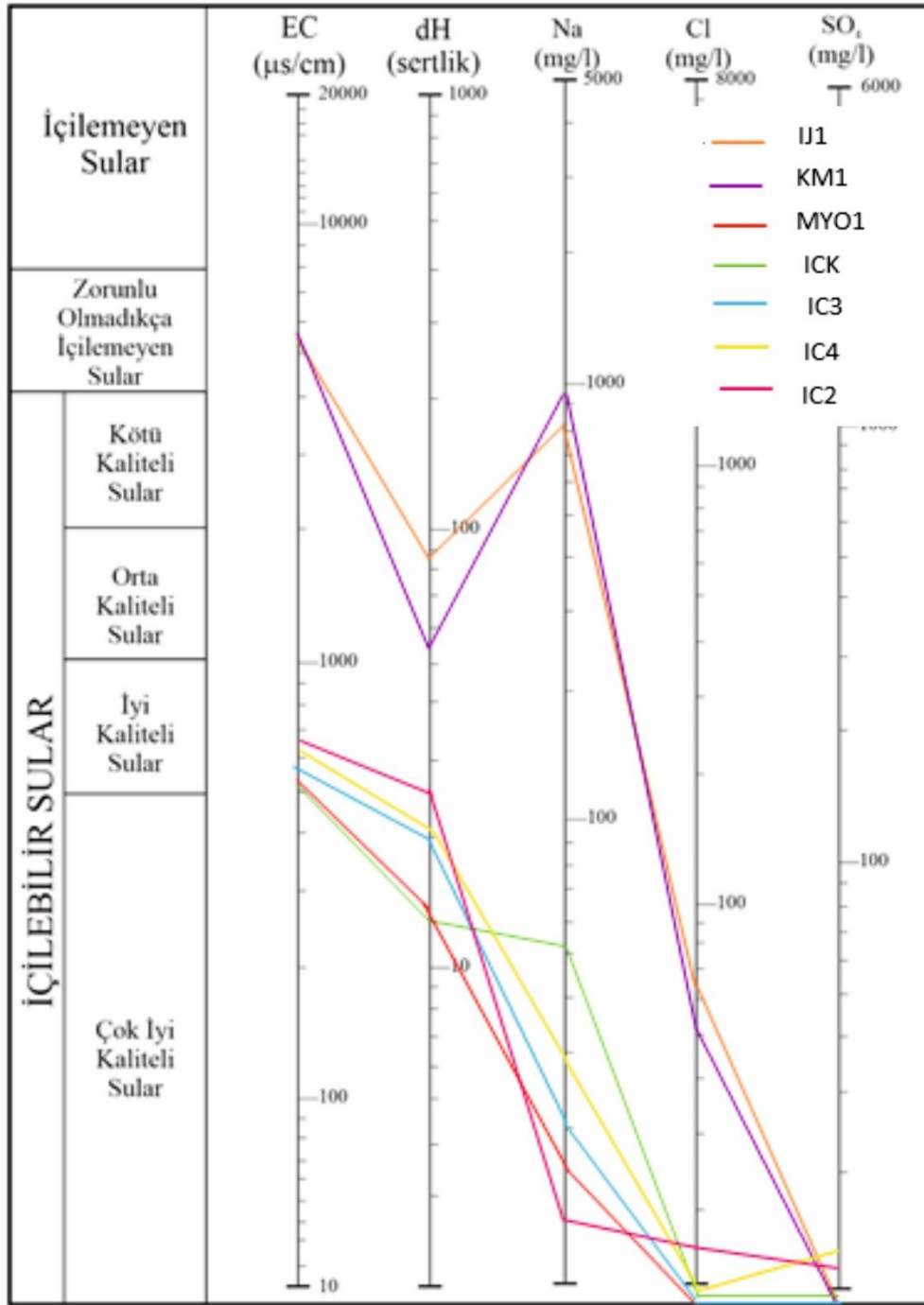
9.2 Suların Kullanılabilirlik Özellikleri

9.2.1 Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR)

Toprağın yapısını bozarak, geçirgenliğini azaltan ve toprak yüzeyinde sert bir kabuğun oluşmasına neden olan sodyum, toprak ve bitki köklerinin hava almasını engeller.

Çizelge 9.1. Analizi yapılan değerlerin İTASHY 2013 standardı ile karşılaştırılması (mg/l).

Örnek	ÖEİ (ms/cm)	pH	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₂	NO ₃	NH ₄	F	As	B	Al	Fe	Mn	Cu	Cr
IJ-1	5006	7.06	814.1	92.5	61.1	0.6	0.0	0.0	0.0	1.3	0.002	9.72	0.008	1.95	0.083	0.072	0.119
KM-1	5650	6.8	974.9	79.2	50.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.006	6.84	0.008	0.16	0.089	0.052	0.116
IC-K	605	7.74	50.1	5.3	8.6	10.0	0.0	5.8	0.0	0.5	0.043	0.33	0.004	0.01	0.006	0.002	0.005
IC-2	655	7.84	15.1	3.5	15.2	10.5	0.0	39.7	0.0	0.6	0.023	0.09	0.002	0.01	0.001	0.001	0.001
IC-3	552	7.9	20.1	6.0	5.7	2.9	0.0	11.9	0.0	0.3	0.014	0.09	0.004	0.01	0.001	0.001	0.001
IC-4	619	7.84	28.8	2.7	6.8	13.4	0.0	21.2	0.0	1.3	0.043	0.18	0.011	0.01	0.002	0.001	0.001
MYO-1	575	8.03	17.9	3.7	4.7	4.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.019	0.09	0.002	0.12	0.004	0.002	0.002
İTASHY 2013	2500	6,5-9,5	200		250	250	0.5	50	0.5	1.5	0.01	1	0.2	0.2	0.05	2	0.05



Şekil 9.1 Schoeller içilebilirlik diyagramı.

Su örneklerinin SAR (sodyum absorpsiyon oranı) değerleri birimler mek/l olmak üzere:

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{(rCa+rMg)/2}} \quad (9.1)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır

%Sar değeri <10 olan sular “Çok İyi Özellikte Sulama Suları”, 10-18 arası olan sular “İyi Özellikte Sulama Suları”, 18-26 arası olanlar “Orta Özellikte Sulama Suları” ve 26’dan büyük olan sular “Kötü Özellikte Sulama Suları” olarak sınıflandırılmaktadır (Richards 1954, Todd 1980). İnceleme alanı suları SAR değerlerine göre sınıflandırıldığında IC2 (0.41), IC3 (0.62), IC4 (0.85), ICK (1.66) ve MYO (0.53) örnekleri “Çok İyi Özellikte Sulama Suları”, IJ1 (11.88) ve KM (16.44) örnekleri ise “İyi Özellikte Sulama Suları” sınıfında yer almaktadır.

9.2.2 Sodyum Yüzdesi (%Na)

Sularda sodyumun fazlalığı toprak yapısını bozarak geçirgenliğini azaltır ve toprak yüzeyinde bitki köklerinin havalanmasını engelleyecek sert bir tabaka oluşmasına neden olur. Bu nedenlerle, sulama suyu olarak kullanımda suların % Na değerinin sınır değerleri aşması istenmemektedir (Erguvanlı ve Yüzer, 1987). % Na değeri birimler mek/l olmak üzere aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmaktadır.

$$\%Na = \frac{rNa}{rNa+rCa+rMg+rK} \times 100 \quad (9.2)$$

İncelenen su örneklerinin %Na değerleri 63.7 ile 11.3 arasında değişmektedir. %Na değeri 0-20 arasında olan sular “çok iyi”, 20-40 arası “iyi”, 40-60 arası “izin verilebilir”, 60-80 arası “şüpheli” ve 80’den büyük olanlar ise “uygun değil” olarak sınıflandırılmaktadır (Wilcox 1955). İncelenen su örneklerinin %Na değerlerine göre sınıflaması çizelge 9.2’de verilmiştir.

Çizelge 9.2 Örneklerin %Na değerlerine göre sınıfları

Örnek Kodu	%Na Değeri	%Na Sınıfı
IJ	63.7	Şüpheli
KM1	73.4	Şüpheli
ICK	38.3	İyi
IC2	11.3	Çok İyi
IC3	17.5	Çok İyi
IC4	22.4	İyi
MYO	14.8	Çok İyi

9.2.3 Artıksal Sodyum Karbonat (RSC)

Yüksek RSC toprakta sodikleşmeye yol açacağından sulama suyunda bulunması istenmemektedir. Toprakta sodyum oranı yükseldikçe, toprağın geçirgenliği azalarak hava alması güçleşmektedir. Pozitif (+) RSC değeri, ortamda (Ca + Mg) ile birleşmiş halde bulunan (CO₃+HCO₃) dışında bir miktar daha karbonat+bikarbonat bulunduğunu işaret etmektedir. Bu iyonlar Na⁺ ile birleşerek sodyum zararı oluşturabilir (Çuhadar ve Tamgaç, 1994, Eaton, 1950; Richards, 1954). RSC değeri birimler mek/l olmak üzere;

$$RSC = (rCO_3 + rHCO_3) - (rCa + rMg) \quad (9.3)$$

formülü ile hesaplanır. RSC değeri < 1.25 olan sular “iyi (1. kalite)”, 1.25-2.5 arası olan sular “şüpheli (2. kalite)” ve >2.5 olan sular ise “uygun değil (3. kalite)” olarak sınıflandırılmaktadır (Eaton, 1950; Richards, 1954). İncelenen su örneklerinin RSC değerlerine göre sınıflaması çizelge 9.3’de verilmiştir.

Çizelge 9.3 Örneklerin RSC değerlerine göre sınıfları

Örnek Kodu	RSC Değeri	RSC Sınıfı
IJ	34.1	uygun değil
KM1	44.6	uygun değil
ICK	2.0	uygun değil
IC2	-0.5	iyi
IC3	0.7	iyi
IC4	0.8	iyi
MYO	0.6	iyi

9.2.4 Geçirgenlik İndeksi (PI)

Geçirgenlik indeksi değeri sulama suyu uygunluğunun değerlendirmesinde kullanılmaktadır. 9.4 numaralı bağıntı ile hesaplanan PI değerine göre üç sınıf ayrıtl edilmektedir (Doneen 1964). Bu sınıflandırmada I ve II sınıf sular iyi sulama sularıdır (Ragunath 1987, Aghazadeh ve Mogaddam 2011). Geçirgenlik İndeksi değeri birimler mek/l olmak üzere;

$$PI = 100 \times \frac{rNa + \sqrt{rHCO_3}}{rNa + rCa + rMg} \quad (9.4)$$

Geçirgenlik indeksi değerleri >%75 olan su örnekleri “çok iyi”, %75-%25 arası olanlar “iyi” ve <%25 olan örnekler ise “uygun değil” olarak sınıflandırılmaktadır (Ragunath (1987). İncelenen su örneklerinin PI değerlerine göre sınıflaması çizelge 9.4’de verilmiştir.

Çizelge 9.4 Örneklerin PI değerlerine göre sınıfları

Örnek Kodu	PI Değeri	Sınıfı
IJ	80.0	çok iyi
KM1	89.7	çok iyi
ICK	81.0	çok iyi
IC2	48.8	iyi
IC3	62.6	iyi
IC4	63.6	iyi
MYO	58.4	iyi

9.2.5 Magnezyum Tehlikesi (MT)

Sulama suyunda Mg artışı toprak kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Szabolcs ve Darab (1964) magnezyum tehlikesini ve sulamaya uygunluğunu belirlemek amacıyla MT katsayısına göre suları iki sınıfa ayırmıştır. 50 mek/l’den büyük MT değerlerinin sulama suyu olarak kullanıma uygun olmadığı belirtilmektedir. 50 mek/l’den küçük MT değerine sahip olan sular ise sulamaya uygun olmayan sulardır (Szabolcs ve Darab, 1964). Birimler mek/l olmak üzere magnezyum tehlikesi;

$$MT = 100 \times \frac{rMg}{rMg+rCa} \quad \text{şeklinde hesaplanır} \quad (9.5)$$

İncelenen su örneklerinin MT değerleri %21.5-40 arasında değişmekte olup, tüm örnekler bu sınıflamaya göre sulamaya uygun olarak sınıflandırılmıştır.

9.2.6 Kelly Oram (KR)

Suların Na, Ca ve Mg içeriklerine göre verilen bu oranın 1’in altında değerleri sulama suyuna uygun olarak tanımlanmıştır. KR’nin 1’den büyük değerleri suda yüksek miktarda sodyum olduğunu göstermekte iken 1-2 arası değerler kısmen uygun olarak

sınıflandırılmıştır. Birimler mek/l olmak üzere Kelly (1940, 1951) oranı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$KI = \frac{rNa}{rCa+rMg} \quad (9.6)$$

İncelenen su örneklerinin Kelly oranları 0.1-3.2 arasında değişmekte olup, IJ örneği kısmen uygun, KM örneği uygun değil ve soğuk su örnekleri ise uygun olarak sınıflandırılmıştır.

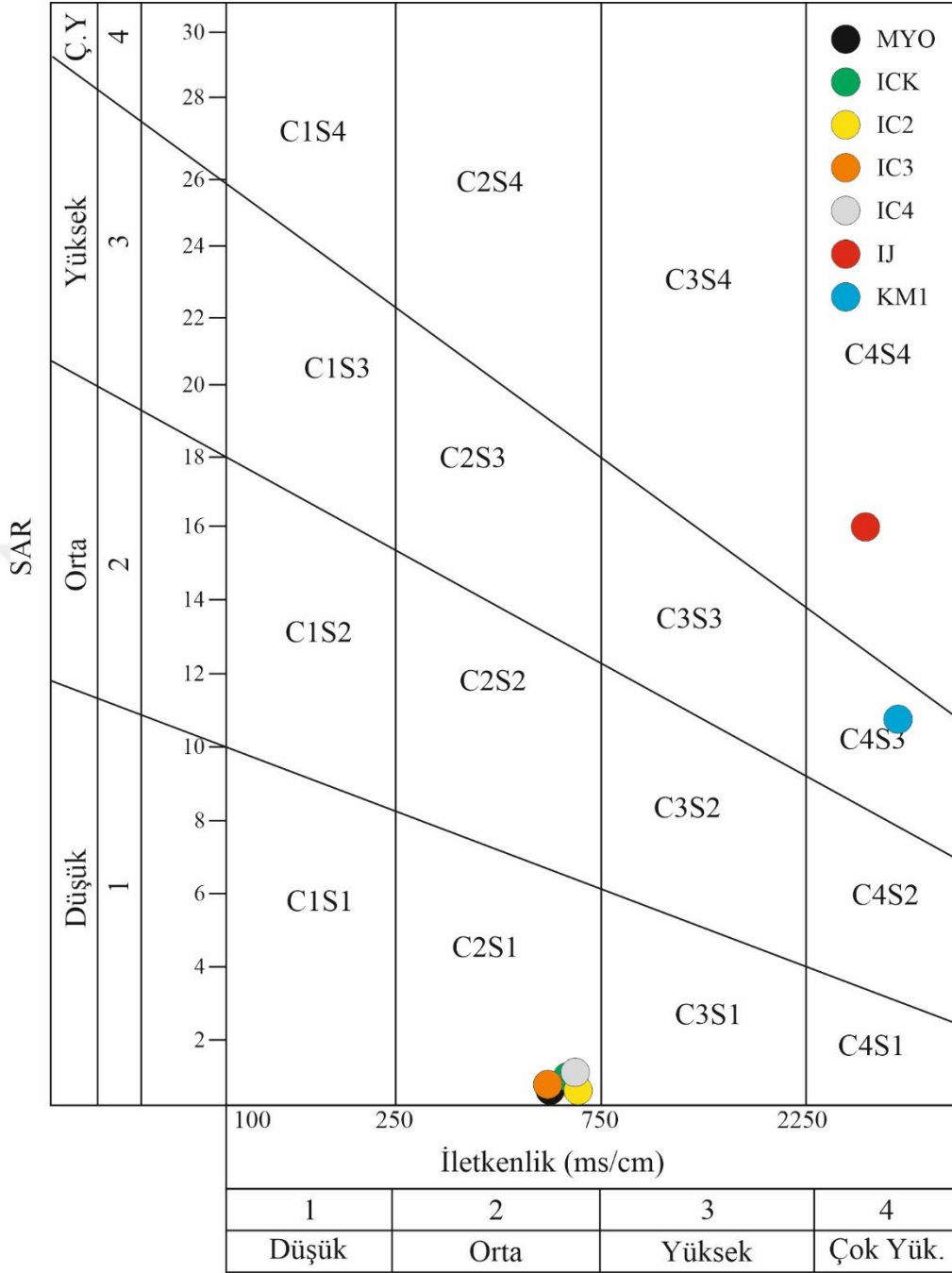
9.2.7 ABD Tuzluluk Diyagramı

Suların sulama suyu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan ABD Tuzluluk Lab. diyagramında (Richards 1954) elektriksel iletkenlik ve SAR değerlerine göre 16 ayrı kategori bulunmaktadır. Bu kategorilerin anlamları oluşturulurken C1, C2, C3 ve C4 tuzluluğa göre alt sınıfları, S1, S2, S3 ve S4 ise sodyum miktarına göre alt sınıfları oluşturmaktadır.

ABD Tuzluluk Lab. diyagramı sınıflamalarına göre çalışma alanındaki soğuk sular C2S1 (C2: Tuza karşı dayanıklılığı orta derecede olan bitkiler çoğunlukla tuzluluk kontrolü için özel tedbirler alınmasına gerek göstermeden yetiştirilebilir; S1: Toprakta zararlı seviyede değişebilir sodyum teşekkülüne sebep olması ihtimali çok zayıf olup, hemen hemen her tip toprağın sulanmasında güvenle kullanılabilir) su sınıfında yer almakta iken termal su örneği C4S4 ve mineralli su örneği C4S3 sınıfında yer almaktadır (Şekil 9.2).

9.2.8 Wilcox Diyagramı

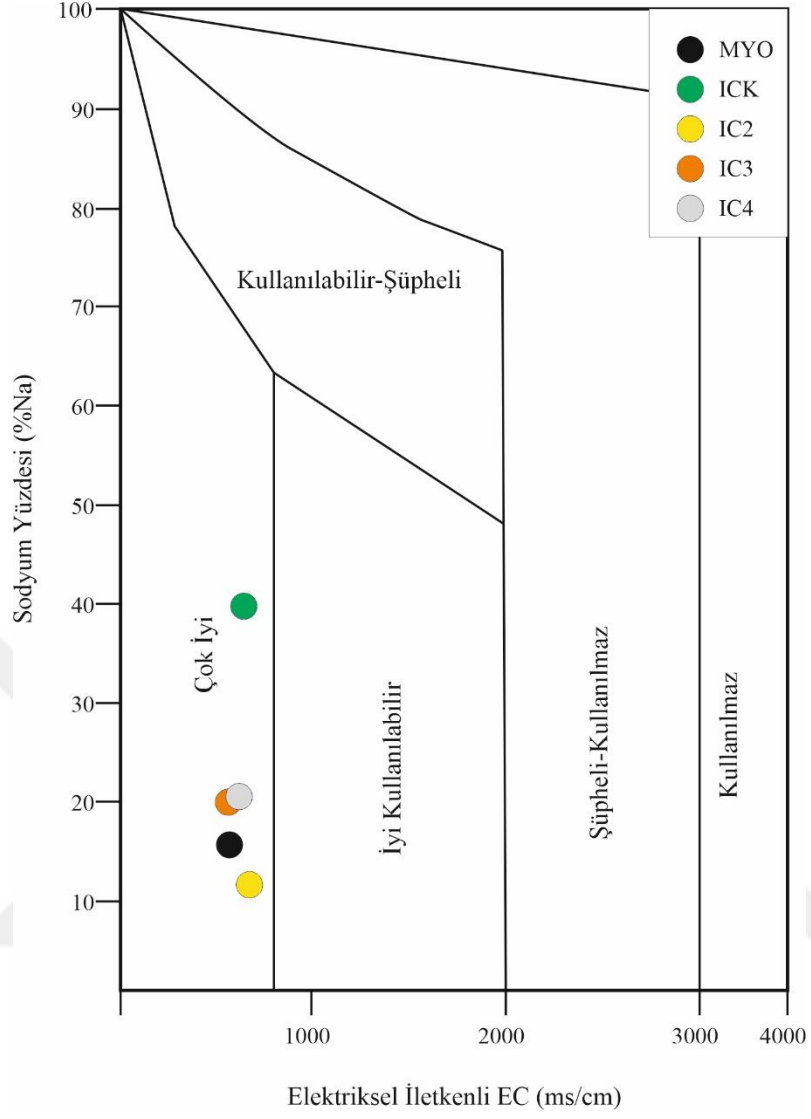
Bu diyagramda; yatay eksen iletkenliği (EC), düşey eksen sodyum yüzdesini (%Na) göstermektedir. Su örneklerinden elde edilen elektriksel iletkenlik (EC) ve sodyum iyonu yüzdesi değerleri (%Na) değerleri Wilcox diyagramı üzerine yerleştirilmiştir. Diyagram üzerinde soğuk su örneklerinin “çok iyi” kullanılabilir sular sınıfında yer aldığı görülmekte iken, termal ve mineralli su örnekleri yüksek elektriksel iletkenlik değerleri nedeniyle grafik dışında yer almaktadır (Şekil 9.3).



TUZLULUK TEHLİKESİ

Şekil 9.2 Suların ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramı. ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı.

(C1: Az tuzlu su, bitkilerin çoğu için sulama suyu olarak kullanılabilir. C2: Orta tuzlulukta su, orta derecede tuza ihtiyaç gösteren bitkiler için kullanılabilir. C3: Fazla tuzlu su, drenaj yapılmaksızın bitkiler için kullanılamaz, bazı bitkiler için kullanılabilir. S1: Az sodyumlu su, sodyuma karşı duyarlı olan bitkilerin dışında her türlü tarım için uygundur. S2: Orta sodyumlu su, geçirgen veya bol jipsli arazilerde kullanılabilir. Yıkama ile toprağın tuzluluğu azaltılıyorsa, özellikle bu tip sular kullanılmalıdır, S3: Yüksek sodyumlu su, birçok toprak cinslerinde sodyum tehlikesi olabilir. Çok iyi geçirgen ve akaçlama gösteren H arazilerde bol su kullanarak, belirli sürelerde yapılacak kimyasal tahlillerle sodyum tehlikesi denetlenmelidir).



Şekil 9.3 Suların Wilcox Diyagramı.

10. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında Afyonkarahisar ili, İscehisar ilçesinde yer alan 1 adet termal su, 1 adet mineralli su ve 5 adet soğuk su örneğinin hidrojeokimyasal özelliklerinin, kalitelerinin ve kullanım koşullarının belirlenebilmesi için yapılmıştır.

İscehisar mermerleri termal ve mineralli su örneklerinin rezervuar kayacı özelliğindedir. Bölgenin yüksek kesimlerine düşen yağış suları, fay, kırık-çatlak sistemleri boyunca yer altına süzülmemekte, burada jeotermik gradyana bağlı olarak ısınmakta ve yine fay, kırık-çatlak sistemleri boyunca yükselerek İscehisar bölgesinde termal sondaj ile elde edilmektedir. Bu suların bir kısmı hidrolik eğim boyunca sahanın güneyine doğru akmakta, bu sırada sıcaklığını kaybederek soğumakta ve muhtemel bir fay boyunca mineralli su olarak yüzeylemektedir.

Gerçekleştirilen kimyasal analizler sonucunda, incelenen termal su örneğinin (IJ1) Na-Ca-HCO₃, mineralli su örneğinin (KM) Na-HCO₃ ve soğuk su örneklerinin Ca-Mg-HCO₃ Ca-Na-HCO₃ tipinde sular olduğu belirlenmiştir. Termal su örneğinde muhtemel soğuk su karışımı nedeniyle Ca iyonunda, soğuk su örneklerinde ise etkileşimde buldukları şist ve volkanik kayalara bağlı olarak Na ve Mg iyonlarında artışlar gözlenmektedir. Termal su örneği ile aynı kökene sahip olduğu değerlendirilen mineralli su örneğinin, daha uzun dolaşım yolu/süresi sonucu sıcaklığını kaybettiği düşünülmektedir.

Doygunluk indeksi hesaplamalarında incelenen su örneklerinin çıkış sıcaklığı ve ph'sında kalsit, aragonit ve dolomit gibi karbonat mineralleri ile kuvars ve kalsedon gibi silis mineralleri çökelme eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

İzotopik özellikler dikkate alındığında incelenen su örneklerinin meteorik kökenli olduğu ve soğuk su örneklerinin 10-45 yıl aralığında bir yaş aralığına sahip olduğu, buna karşın termal ve mineralli su örneklerinin ise yaşlarının 50 yıl ve daha yaşlı olduğu belirlenmiştir.

Jeotermometre hesaplamaları sonucunda, termal su örneğinin rezervuar sıcaklığı silis jeotermometreleri ise 69-119°C aralığında, katyon jeotermometreleri ile ise 94-243°C aralığında olduğu belirlenmiştir.

Soğuk suların içilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için analiz sonuçları İTASHY (2013) limitleri ile ölçülen parametreler kapsamında karşılaştırılmıştır. Örneklerin tamamında As haricindeki diğer elementler standartlarda belirtilen sınır değerlere uymaktadır.

Sodyum absorpsiyon oranına göre tüm soğuk su örnekleri iyi kaliteli sular sınıfında yer almakta iken, RSC sınıfları iyi/uygun değil, PI sınıfları iyi/çok iyi, MT ve KR sınıfları uygun olarak belirlenmiştir. ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramında tüm soğuk su örnekleri C2S1 sınıfında “ Orta tuzlulukta su, orta derecede tuza ihtiyaç gösteren bitkiler için kullanılabilir ve az sodyumlu su, sodyuma karşı duyarlı olan bitkilerin dışında her türlü tarım için uygundur” yer almaktadır. Wilcox diyagramında da tüm soğuk su örnekleri çok iyi kaliteli sular sınıfında yer almaktadır.

11. KAYNAKLAR

- Aghazadeh N, Mogaddam A A, 2011, Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, North-west of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176, 183–195.
- Aiuppa A, Bellomo S, Brusca L, d'Alessandro W, Federico C, 2003, Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano (Mt. Etna, Italy). *Applied Geochemistry*, 18, 863-882.
- Akan B, Süer S, 2008, Afyonkarahisar ilinde yer alan jeotermal sahaların incelenmesi. *Termal ve Maden Suları Konferansı*, 92-100, Afyonkarahisar.
- Akdemir D, 2015, Çöl (Haydarlı/Afyon) Ovası'nın Hidrojeoloji İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Aksever F, 2011, Afyon Sandıklı Havzası Hidrojeoloji İncelemesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Arnorsson S, Gunnlaugsson E, 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.
- Armannsson H, 1989, Predicting calcite deposition in Kraflaboreholes. *Geothermics*, 18, 25-32.
- Arnorsson S, 1989, Deposition of calcium carbonate minerals from geothermal waters theoretical considerations. *Geothermics*, 18, 33-39.
- Arnorsson S, 2000, Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Aydar E, Bayhan H, Gourgaud A, 1998, Köroglu Caldera, Mid-West Anatolia, Turkey: Volcanological and Magmatological Evolution, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 83–98.
- Ayyıldız M, 1990, Sulama Suyu Kalitesi ve Tuzluluk Problemleri. Ankara Üniv. Ziraat Fak. Yayınları, 1196, Ankara.
- Back W, 1966, Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part

- of Atlantic Coastel Plain. U.S. Geological Survey professional paper, 488, 1-42.
- Bağcı M, 2020, Mineralogical, petrographic, and geochemical characterization of colored İschehisar marbles (Afyonkarahisar, W-Turkey), Turkish Journal of Earth Sciences, 29, 946-975.
- Bağcı M, Engin C, Ulutürk Y, Özkan E, Akbulut H, 2008, İschehisar (Afyonkarahisar) Maden Ve Jeotermal Sularının Jeokimyasal Özellikleri Ve Potansiyel Kullanım Alanları, Termal ve Maden Suları Konferansı, 204-215, Afyonkarahisar.
- Başaran C, 2017, Heybeli Jeotermal Alanının (Afyonkarahisar) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelemesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 143s, Denizli.
- Başkan M E, Canik B, 1983, IAH map of mineral and thermal waters of Turkey Aegean Region. MTA, Ankara, 189, 80.
- Bogomolov G V, 1965, Özel hidrojeoloji. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- Bouchard D C, Williams M K, Surampalli R Y, 1992, Nitrate contamination of groundwater: sources and potential health effects. Journal of the American Water Works Association, 84, 85-90.
- Calmbach L, 1997, AquaChem computer code-version 3.7. 42. Waterloo, Ontario, Canada.
- Candan O, Çetinkaplan M, 2005, Bayat- İschehisar (Afyon) Çevresindeki Mesozoik Yaşlı Kayaların Alpin Yüksek Basınç/Düşük Sıcaklık Metamorfizması ve Batı Anadolu'daki Tektonik Ünitelerin Evrimiyle Olan İlişkisi. TÜBİTAK Projesi No:101Y022.
- Craig H, 1961, Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702–1703.
- Çuhadar G, Tamgaç S, 1994, Hidrojeolojik Etütlerde Su Kimyası Verilerini Toplama ve Değerlendirme Yöntemleri. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, DSİ Yayınları, Ankara, s. 1-22.
- Dansgaard W, 1964, Stable isotopes in precipitation, Tellus, 16, 436-468.
- Dedeoğlu, 2014. İschehisar-Seydiler (Afyon) Arasındaki Birimlerin Jeolojisi, Volkanik Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi, Süleyman Demirel

- Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 128s, Isparta.
- DMSY 2004, Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik (2004), Resmi Gazete Sayısı: 25657.
- Doğan L, 1981, Hidrojeolojide su kimyası. Devlet Su İşleri yayınları, Ankara, 178.
- Doğdu M Ş, Bayarı C S, 2002, Akarçay Havzası'nda (Afyon) jeotermal kökenli kirlenme: 2. Yeraltısuyu kirliliği. Yerbilimleri Dergisi, 23, 35-49.
- Doneen L D, 1964, Notes on water quality in agriculture, Davis: Water Science and Engineering, University of California.
- Domenico P A, Schwartz F W, 1990, Physical and Chemical Hydrogeology. xxii + 824 pp. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons.
- Duman T Y, Çan T, Emre Ö, vd., 2018, Seismotectonic database of Turkey. Bull Earthquake Eng 16, 3277–3316.
- Eaton F M, 1950, Significance of Carbonates in Irrigation Water. Soil Science, 69, 123-133.
- Emre Ö, Duman T Y, Özalp S, Olgun Ş, Elmacı H, 2011, 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Afyon (NJ 36-5) Paftası, Seri No:16, MadenTetkik veArama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.
- Emre Ö, Duman T Y, Özalp S, Şaroğlu F, Olgun Ş, vd., 2018, Active fault database of Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering 16 (8), 3229-3275.
- Erguvanlı K, Yüzer E, 1987, Yeraltı suları jeolojisi. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Erkan Y, Bayhan H, Tolluoğlu A Ü, Aydar E, 1996, Afyon Yöresi Metamorfik ve Volkanik Kayaçların Jeolojik, Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Projesi: Proje No YBAG-0044/DPT. Ankara, Turkey (in Turkish).
- Erişen B, 1972, Afyon-Heybeli (Kızılkilise) jeotermal araştırma sahasının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları, MTA Raporu, No:5490, Ankara.
- Faure G, 1986, Principles of isotope geology. Second edition. United States: N. p., Web.

- Fournier R O, 1977, A review of chemical and isotopic geothermometers for geothermal systems, Proceedings of the symposium on geothermal energy, Cento Scientific Programme, 133-143.
- Fournier R O, 1979, A revised equation for the Na-K geothermometer. Geothermal Resource Council Transactions, 3, 221-224.
- Fournier R O., 1990, The interpretation of Na-K-Mg relations in geothermal waters. Geothermal Resource Council Transactions, 14, 1421-1425.
- Fournier R O, Truesdell A H, 1973, An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters. Geochimica et Cosmochimica Acta, 37, 1255-1275.
- Fritz P, Fontes J Ch, 1980, Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, The Terrestrial Environment-A, Vol. 1, 545 pp. Amsterdam: Elsevier. [A comprehensive reference book on isotope techniques in hydrology).
- Giggenbach W F, 1988, Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geothermometers. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52, 2749-2765.
- Gürsoy H, Piper J D A, Tatar O, 2003, Neotectonic deformation in the western sector of tectonic escape in Anatolia: palaeomagnetic study of the Afyon region, central Turkey. Tectonophysics, 374, 57-59.
- Hem J D, 1992, Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2254.
- Hounslow A W, 1995, Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, 54.
- IAH, 1979, Map of mineral and thermal water of Europe. Scale 1:500 000, International Association of Hydrogeologists, United Kingdom.
- İTASHY, 2013, İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelikte değişiklik yapılmasına dair yönetmelik, Resmi Gazete, sayı:28580.
- Karingithi C W, 2009, Chemical Geothermometers for Geothermal Exploration, Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, 1-22.
- Karamandere İ H, 2008, Afyonkarahisar jeotermal sahalarının jeolojik ve mineralojik evrimi. Termal ve Maden Suları Konferansı. 24-25.04.2008,55-69, Afyonkarahisar.

- Kelly W P, 1940, Permissible composition and concentration of irrigation waters. Proceedings of ASCE, 66, 607.
- Kelly W P, 1951, Alkali soils-their formation, properties and reclamation. New York: Reinhold.
- Kharaka Y K, Lico M S, Law L M, 1982, Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California Basins, Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 66.
- Kharaka Y K, 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.
- Koçyiğit A, Deveci Ş, 2007, Çukurören- Çobanlar (Afyon) arasındaki deprem kaynaklarının (Aktif fayların) belirlenmesi, TÜBİTAK, Proje No: 106Y209, 71s., Ankara.
- Kristmannsdottir H, 1989, Types of scaling occurring by geothermal utilization in Iceland, Geothermics, 18, 183-190.
- Kuşcu, M., Yıldız, A., and Bağcı, M., “Investigation of Ağın andesite as a building stone (İscehisar- Afyon, W-Turkey)”, International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones 10-13 Haziran 2003, P.243-253, İstanbul, Turkey, 2003.
- Kuşcu, M., Bağcı, M., ve Yıldız, A., “Konarı (İscehisar-Afyon) traki-andezitlerinin yapıtaşı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması”, Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu 2-3 Mart 2006, s.281-291, Afyonkarahisar, 2006.
- Mahon W A J, 1966, Silica in hot water discharged from drillholes at Wairakei, New Zealand. New Zealand Journal of Science, 9, 135-144.
- Mazor E, 2004, Chemical and Isotope Groundwater Hydrology, (3th edition), Marcel Dekker, p. 453.
- McNeely R N, Neimanis V P, Dwyer L, 1979, Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters. In Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters. Environment Canada.
- Metin S, Genç Ş, Bulut V, 1987, Afyon ve Yakın Dolayının Jeolojisi, MTA Raporu,

Ankara.

- Mutlu H, 1996, Geochemical assesment of thermal waters from the Afyon geothermal area: Geothermometry applications and fluid-mineral equilibria., Ph. D. Thesis,, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 169p (yayımlanmamış), Ankara.
- Mutlu H, 1997, Gazlıgöl (Afyon) termal ve maden sularının jeokimyasal özellikleri ve jeotermometre uygulamaları. MTA, Jeoloji Mühendisliği, 50, 1-7.
- Nicholson K, 1993, Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques. Springer-Verlag, 263. Berlin.
- Nieva D, 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.
- Öcal H, Turhan N, Göktaş F, 2011, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 1:100000 ölçekli jeoloji haritaları, Afyon K25 paftası.
- Özkaymak Ç, Yıldız A, Karabaşoğlu A, Bağcı M, Başaran C, 2017a, Seydiler (Afyonkarahisar) ve Çevresinin Jeoturizm Potansiyelinin Belirlenmesi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 60, 259-282.
- Özkaymak Ç, Sözbilir H, Tiryakioğlu İ, Baybura T, 2017b, Bolvadin'de (AfyonAkşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 60: 169-189.
- Özkaymak Ç, 2020, Afyonkarahisar İli Sismotektonik Özellikleri Ve Deprem Kaynakları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü Raporu, 33 sf., Afyonkarahisar.
- Pal T, Mukherjee P K, Sengupta S, Bhattacharyya A K, 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.
- Parkhurst D L, 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, 1944, A Graphic Procedure in the geochemical interpretation of Water Analysis, Transactions, American Geophysical Union, 25, 914-23.
- Piper A M, 1979, Interpretation of Water Analyses. Geol. Surv. Water Res. Div. No.12.
- Ragunath H M, 1987, Groundwater (p. 563). New Delhi: Wiley Eastern.
- Richards L A, 1954, Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils (p. 60). US Department of Agriculture hand book.
- Schoeller H, 1955, Geochemie Des Eaux Souterraines, Revue De L'institute Francois Du Petrole, 10, 230-44.
- Szabolcs I, Darab C, 1964, The Influence of Irrigation Water of High Sodium Carbonate Content of Soils. In: Szabolcs I (ed) Proceedings of 8th International Congress Soil Science Sodics SoilsISSS, Trans, II, 802-812.
- Şahinci A, 1987, Jeotermal Sistemler ve Jeokimyasal Özellikleri. Reform Matbaası, Beyler-İzmir, 548 s.
- Şahinci A, 1991, Jeotermal Sistemler ve Jeokimyasal Özellikleri. Reform Matbaası, İzmir.
- Tarcan G, 2003, Jeotermal Su Kimyası, Jeotermalde Yerbilimsel Uygulamalar, Yaz Okulu Ders Kitabı-JENERUM D.E.Ü.-Mühendislik Fakültesi, İzmir Yayın No:306, s:198-245.
- Thorntwaite C W, 1948, An approach toward a rational classification. Geographical Review, 38(1), 55-94.
- Tiryakioğlu İ, Özkaymak Ç, Baybura T, Sözbilir H, Uysal M, 2018, Comparison of Palaeostress Analysis, Geodetic Strain Rates and Seismic Data in the Western Part of The Sultandağı Fault in Turkey. Annals of Geophysics, 61, 3, GD335. Doi: 10.4401/ag-7591
- Tolluoğlu Ü A, Erkan Y, Yavaş F, 1997, Afyon Metasedimanter Grubunun Mesozoyik Öncesi Metamorfik Evrimi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 40-2, 1-17.
- Todd D K, 1980, Groundwater hydrology (2nd ed., p. 315). New York: Wiley.
- TSE 266, 2005, Türk İçme Suyu Standartı.

- Türker E, Ulutürk Y, Yıldız A, Bağcı M, vd., 2008, Afyonkarahisar'da Alternatif Jeotermal Alanlar Ve Mevcut Jeotermal Alanların Geliştirilebilirliği: Ön Çalışma, Termal ve Maden Suları Konferansı. 24-25 Nisan 2008, 24-41, Afyonkarahisar.
- Ulutürk Y, 2009, Ömer-Gecek (Afyonkarahisar) Dolayının Jeolojisi ve Suların Kökenselel Yorumu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 195s, Isparta.
- Uslu O, Türkman A, 1987, Su Kirliliği ve Kontrolü TC Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi 1.
- Verma M P, 2000, Limitations in applying silica geothermometers for geothermal reservoir evaluation Proceedings, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, vols. 24–26, Stanford University, Stanford, California.
- Verma M P, Santoyo E, 1997, New improved equations for Na/K, Na/Li and SiO₂ geothermometers by outlier detection and rejection, J. Volcanol. Geoth. Res., 79 (1997), pp. 9-23, 10.1016/S0377-0273(97)00024-3
- White D E, 1970, Geochemistry Applied to The Discovery, Evaluation And Exploitation of Geothermal Energy Resources. Geothermics, Special Issue 2, 58-80.
- Wilcox L V, 1955, Classification and use of irrigation waters (19 pp). USDA Circular No. 969.
- Yalçın A, Davraz A, Özçelik M, 2004, Yeraltısularının Kirlenmesinde Litoloji ve Yerleşim Alanlarının Etkisi: Ulupınar Kaynağı, Sorkuncak-Eğirdir-Isparta. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 28: 21-29.
- Yalım H A, Oruncak B, Ünal R, Sarpün İ H, Akkurt A, 2008, Afyonkarahisar Bölgesindeki Bazı Jeotermal Kaynakların Radon Konsantrasyonları, Termal ve Maden Suları Konferansı. 24-25 Nisan 2008, 230-235, Afyonkarahisar.