



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HANLE (CİBUTİ) JEOTERMAL ALANININ
HİDROJEOLJİSİ VE HİDROTERMAL
ALTERASYONU

Moussa Hassanleh HASSAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA

TEZ KABUL VE ONAYI

Moussa Hassanleh tarafından hazırlanan “Hanle (Cibuti) Jeotermal Alanının Hidrojeolojisi Ve Hidrotermal Alterasyonu” adlı tez çalışması 03/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Unvanı Adı SOYADI
(Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Ali Ferat BAYRAM
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI
(Üniversitesi)

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI
(Üniversitesi)

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI
(Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Moussa Hassanleh HASSAN

Tarih: 03.06.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

HANLE (CİBUTİ) JEOTERMAL ALANININ HİDROJEOLOJİSİ VE HİDROTHERMAL ALTERASYONU

Moussa Hassanleh HASSAN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Ali Ferat BAYRAM

2024 , 64 Sayfa

Jüri

Danışmanın Doç. Dr. Ali Ferat BAYRAM

Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI

Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI

Hanle Jeotermal Alanının jeotermal potansiyelinin belirlenmesi için hidrojeokimyasal ve hidrotermal alterasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.. Kaplıca suyu, yeraltı suyu ve buhar yoğunlaşımından alınan örneklerle elektriksel iletkenlik (EC), SiO₂, Cl, SO₄, HCO₃, F, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, B, As, D ve ¹⁸O gibi önemli parametreler analizleri yapılarak yorumlar yapılmıştır. Elde edilen bulgular, Hanle bölgesindeki suyun oluşumunda ısıtılmış yeraltı suyu ile ısıtılmış fosil deniz suyunun karışımının veya ısıtılmış yeraltı suyunun evaporiti çözmesinin etkili olduğunu göstermektedir. Sıcak sulara ait doygunluk endeksi hesaplamalarına göre, bölgede yer alan jeotermal sistemler genellikle dolomit, aragonit, kalsit gibi mineraller gözlenirken, Hanle bölgesinde alunite, anhidrit, silvit, jips ve melenterit gibi farklı mineral doygunlukları saptanmıştır. Bununla birlikte rezervuar sıcaklığının yaklaşık olarak 120 ila 125°C arasında olduğu tahmin edilmektedir.

XRD araştırmasının sonuçlarına göre, bölgedeki alterasyon mineralleri arasında kuvars, kalsit ve alunite yanı sıra illit, smektit, klorit ve kil mineralleri bulunmaktadır. Bu mineral bileşimi, hidrotermal etkilere maruz kalarak oluşmuş ve bazıları belirli stabil sıcaklık koşullarında gelişmiştir. Özellikle, yüksek sıcaklıkta oluşmuş hidrotermal alterasyon minerallerinin varlığı, kil ve zeolit gibi minerallerde olduğu gibi, yüksek sıcaklık ortamına geçişin belirgin bir işaretidir.

Anahtar Kelimeler: Hanle,Cibuti, Jeotermal, Volkanik, Hidrotermal, Alterasyon

ABSTRACT

MS THESIS

HYDROGEOLOGY AND HYDROTHERMAL ALTERATION OF THE HANLE (DJIBOUTI) GEOTHERMAL FIELD

Moussa Hassanleh HASSAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geological Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr Ali Ferat BAYRAM

2024, 64 Pages

Jury

Advisor Assoc. Prof. Dr Ali Ferat BAYRAM

Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI

Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI

Hydrogeochemical and hydrothermal alteration studies were carried out to determine the geothermal potential of Hanle Geothermal Area. Samples of hot spring water, groundwater and steam condensate were analyzed for important parameters such as electrical conductivity (EC), SiO₂, Cl, SO₄, HCO₃, F, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, B, As, D and 18O. The findings indicate that the formation of the water in the Hanle region was influenced by the mixture of heated groundwater and heated fossil seawater or the dissolution of evaporite by heated groundwater. According to the saturation index calculations of the hot waters, geothermal systems in the region generally contain minerals such as dolomite, aragonite and calcite, while different mineral saturations such as alunite, anhydrite, silvite, gypsum and melenterite were found in the Hanle region. However, the reservoir temperature is estimated to be approximately 120 to 125°C.

The clay minerals smectite, chlorite and illite, as well as quartz, calcite and alunite, are the main alteration minerals in this region, according to XRD research. Minerals that have undergone hydrothermal alteration are formed according to this composition; some of these minerals are known to occur in particular, stable temperature regimes. The clay minerals represent a transition to a high temperature environment as evidenced by the presence of high temperature hydrothermal alteration minerals such as quartz (>180°C).

Keywords: Hanle, Djibouti, Geothermal, Volcanic, Hydrothermal, Alteration

ÖNSÖZ

Hanle bölgesinde yürüttüğümüz bu çalışma, araziden toplanan jeolojik ve jeokimyasal veriler sayesinde jeotermal rezervuarları belirlememize yardımcı olacak.

Hanle grabenindeki beş içme suyu kuyusu, bir kaplıca ve bir buhar kondensatından majör ve minör hidrojeokimyasal parametreler ve izotopik analizler için numune aldık. Ayrıca XRD ve ince kesit analizleri için kaya örnekleri topladık.

ODDEG laboratuvarlarının devre dışı kalmasıyla, sıvı ve kaya örnekleri analiz için Fransa'daki Korsika Üniversitesi ve Japonya'daki Kyushu Üniversitesi'ne gönderildi.

Bununla birlikte, bu raporun gerçekleştirilmesi için bana yüksek lisans çalışmamı yürütmek üzere Türkiye'ye gitme izni veren genel müdürüm Dr. Kayad Moussa'ya çok minnettarım.

İkinci olarak, tez danışmanım Profesör Ali Férat'a, bu tezin yazımı sırasında bana ayırdığı zaman, anlayışlı rehberliği, cömert tavsiyeleri ve ayrıntılı düzeltmeleri için teşekkür etmeliyim. Deneyim ve bilgi birikiminizin zenginliği çok verimli ve teşvik edici oldu.

Ayrıca, eşim Nasro Bourhan'a koşulsuz güveni, zamanında teşviki, sonsuz sabrı ve çalışma yıllarım boyunca sadık desteği için derin minnettarlığımı ve sevgimi ifade etmeliyim.

Aileme sevgileri ve sürekli maddi ve manevi destekleri için teşekkür ederim. Hayatımda olduğunuz için kendimi onurlu ve kutsanmış hissediyorum. Bu tezi tüm kalbimle üçünüze de ithaf ediyorum.

Son olarak, tüm çabalarımda eşsiz lütfu, sürekli nimetleri, üstün koruması ve rehberliği için Yüce Tanrı'ya minnettarım. Tanrım, çok minnettarım.

Moussa Hassanleh HASSAN

KONYA/2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
1 GİRİŞ	1
2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3 MATERYAL VE YÖNTEM	6
3.1 Ön araştırma	6
3.2 Arazi çalışmaları	6
3.3 Laboratuvar çalışmaları.....	9
4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	13
4.1 JEOLOJİ.....	13
4.1.1 Alt bazalt seviyesi (2.0-2.7My).....	13
4.1.2 Alt statoid riyolit (2.0-2.7My).....	14
4.1.3 Orta bazalt seviyesi (1.8-2.2My)	15
4.1.4 Trakit (1.7 à 1.97 My)	15
4.1.5 Üst bazalt seviyesi (1.25-1.65My)	16
4.1.6 Alüvyon.....	17
4.2 Yüzey tezahürleri	17
4.2.1 Hidrotermal alterasyonu	17
4.2.1.1 Kalsit.....	17
4.2.1.2 Zeolit (lumontit).....	18
4.2.1.3 Amorf kuvars (kalsedon)	19
4.2.2 Fumarols.....	19
4.3 Petrografik ve XRD analiz sonuçları	20
4.3.1 Petrografik	20
4.3.2 X-ışını kırınımı (XRD).....	22
4.4 HİDROJEOLOJİ.....	24
4.4.1 Çalışma alanındaki iklim koşulları.....	24
4.4.2 Buharlaşma ve terleme	26
4.4.3 Akifer sistemi	27
4.4.3.1 Alt Akifer.....	28
4.4.3.2 Tortul akifer	28
4.4.3.3 Lokal volkanik akiferler.....	29
4.4.3.4 Bölgesel volkanik akifer	29

4.4.4	Hanle bölgesinin su sirkülasyon modeli.....	29
4.4.5	Hanle jeotermal sistemi.....	30
4.4.6	Sıcak su kuyuları	32
4.4.6.1	Hanle 1 (H1) jeotermal sondaj kuyusu	32
4.4.6.2	Hanle 2 (H2) jeotermal sondaj kuyusu	33
4.5	HIDROJEOKİMYA.....	34
4.5.1	Suyun fiziksel ve kimyasal özellikleri	34
4.5.1.1	Scholler diagramı	36
4.5.1.2	Piper diagramı	38
4.5.1.3	Cl-SO ₄ -HCO ₃ diagramı.....	40
4.5.1.4	Na, K, and Mg diagramı	41
4.5.2	Izotop özellikleri	42
4.5.3	Doygunluk endeksi hesaplaması	43
4.5.4	Jeotermometreler	48
5	SONUÇLAR.....	49
6	KAYNAKLAR.....	50

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	1.Çalışma alanının yer bulduru haritası.....	2
Şekil 3.	1.Arazi çalışmalarında kullanılan ölçüm cihazları	7
Şekil 3.	2. Hanle'de küçük bir yağmur suyu birikintisi.....	7
Şekil 3.	3.Garrabeyis'in yağmur suyu filtrasyonu	8
Şekil 3.	4.(A) Garrabeyis su sondaj kuyusundan alınan numuneler (B) Garrabeyis su tankı	8
Şekil 3.	5. Fumarol bölgesinde kaya örneklemeşi	9
Şekil 3.	6. (A) Analiz öncesi laboratuvarında su örnekleri (B) Kromatografi makinesi ...	10
Şekil 3.	7. (A)Numunenin uygun boyut ve geometride kesilmesi (B) Ön cilalama	10
Şekil 3.	8. (A) Numunenin cilalanması (B) Mikroskopta numune gözlemleri.....	11
Şekil 3.	9. XRD için yığın numune hazırlama ve cihazlama (a) kaya örneği, (b) fırın, (c) havan ve tokmak, (d) metal plaka üzerinde sıkıştırılmış toz örneği, (e) Rigaku XRD makinesi.	12
Şekil 4.	1.Alt bazalt tabakası fasiyesleri ve oluşumu	14
Şekil 4.	2.Orta bazalt tabakası fasiyesleri ve oluşumu	15
Şekil 4.	3.Tüf ve kumtaşı tabakası fasiyesleri	16
Şekil 4.	4.Hyaloklastit ve bazalt oluşumlarında kalsit ve kuvars damarları	18
Şekil 4.	5.Lümontit, güney inceleme alanındaki alt bazalt tabakasının kabarcığı içinde bulunmuştur.	19
Şekil 4.	6.Çalışma alanındaki fümeroller.....	20
Şekil 4.	7.Mineralerin polarize mikroskoptaki görünimleri (A- Riyolit, B- Bazalt, C- Bazalt, D- Bazalt).	21
Şekil 4.	8.(H1).Yığın numune için X-ışını kırınım desenleri (pl: plajiyoklaz, Qz: kuvars, cal: kalsit, gp: jips, Ab: albit, Anh: Anhidrit Alu: Alunit).....	22
Şekil 4.	9.(H2).Yığın numune için X-ışını kırınım desenleri (pl: plajiyoklaz, Qz: kuvars, cal: kalsit, gp: jips, Ab: albit, Anh: Anhidrit Alu: Alunit).....	23
Şekil 4.	10.Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kuvars minerallerinin çözünürlük kararlılığındaki değişim	24

Şekil 4. 11.Cibuti iklim grafiği	25
Şekil 4. 12.Yağış- buharlaşma- terlemenin grafiği (2023 yılı)	27
Şekil 4. 13.Cibuti'nin akifer sistemleri (Razack ve ark., 2019)	28
Şekil 4. 14.Hanle grabeninin hidrojeolojik diyagramı. (Aquater,1982)	30
Şekil 4. 15.A)Hanle jeotermal sisteminin kavramsal modelinin basitleştirilmiş bir taslağı(Awaleh ve ark.,)	31
Şekil 4. 16.Hanle 1 jeotermal sondajının jeolojik kesiti	33
Şekil 4. 17.jeotermal sondaj kuyusu	34
Şekil 4. 18.Jeokimyasal çalışma için örnekleme yerleri haritası	35
Şekil 4. 19.Çalışma alanındaki yağışlı sezonların Schoeller diyagramı	37
Şekil 4. 20.Çalışma alanındaki kurak sezonların Schoeller diyagramı.....	38
Şekil 4. 21.Çalışma alanının Piper diyagramı (yağışlı sezon)	39
Şekil 4. 22.Çalışma alanının Piper diyagramı (kurak sezon).....	40
Şekil 4. 23.Su örneklerinin bağlı Cl, SO ₄ ve HCO ₃ içerikleri	41
Şekil 4. 24.Su örneklerinin bağlı Na, K ve Mg içerikleri	42
Şekil 4. 25.Hanle bölgesinin hidrojen ve oksijen izotop oranları arasındaki ilişki	43
Şekil 4. 26.Dirdir sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri.....	46
Şekil 4. 27.Kori sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri.....	46
Şekil 4. 28.Garrabeyis sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri.....	47
Şekil 4. 29.Chek saabir sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri.....	47
Şekil 4. 30.Goros sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri.....	48

ÇİZELGELER LİSTESİ

Tablo 4. 1.Hanle'den alınan numunelerden tespit edilen mineraller.....	23
Tablo 4. 2.Hanle (2023) iklimi	25
Tablo 4. 3.İnceleme alanının 2023 yılı denetirmeli nem bilançosu	26
Tablo 4. 4.Su numuneleri için analiz sonuçları	35
Tablo 4. 5.Çalışma alanındaki yağışlı sezonların fizikokimyasal analiz sonuçları (meq/l).....	36
Tablo 4. 6.Çalışma alanındaki suların kurak sezona ait fizikokimyasal analiz sonuçları (meq/l).....	37
Tablo 4. 7. Dirdir sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.	44
Tablo 4. 8. Kori sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.	44
Tablo 4. 9. Garrabeyis sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.	44
Tablo 4. 10. Chek saabir sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.....	45
Tablo 4. 11. Goros sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması	45
Tablo 4. 12. Kori termal kaynağı için jeokimyasal termometre hesaplamalarının sonuçları.....	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
‰	: Binde
δD	: Doteryum
δ	: Delta
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
β	: Beta
B	: Bor
°	: Derece
°C	: Santigrat derece
Ca ⁺⁺	: Kalsiyum
Cl ⁻	: Klor
cm	: Santimetre
F	: Flor
Fe ²⁺	: Demir
³ H	: Tridyum
HCO ₃ ⁻	: Bikarbonat
HNO ₃	: Nitrik asit
K ⁺	: Potasyum
km	: Kilometre
Li	: Lityum
Log	: Logaritma
lt/sn	: Litre/saniye
m	: Metre
m ³ /yıl	: Metreküp / yıl
meq/l	: Miliekivalen / litre
Mg ⁺⁺	: Magnezyum
mg/l	: Miligram/litre
ml	: Mililitre
mm	: Milimetre
my	: Milyon yıl
μS/cm	: Mikrosiemens/santimetre
Na ⁺	: Sodyum
NO ₃ ⁻	: Nitrat
¹⁸ O	: Oksijen 18 izotopu
P	: Yağış
SiO ₂	: Silisyum dioksit
SO ₄ ²⁻	: Sülfat
T	: Sıcaklık
Pl	: Plajiyoklaz
Qz	: Kuvars
Cal	: Kalsit
Gp	: Jips
Ab	: Albit
Anh	: Anhidrit
Alu	: Alunit

Kısaltmalar

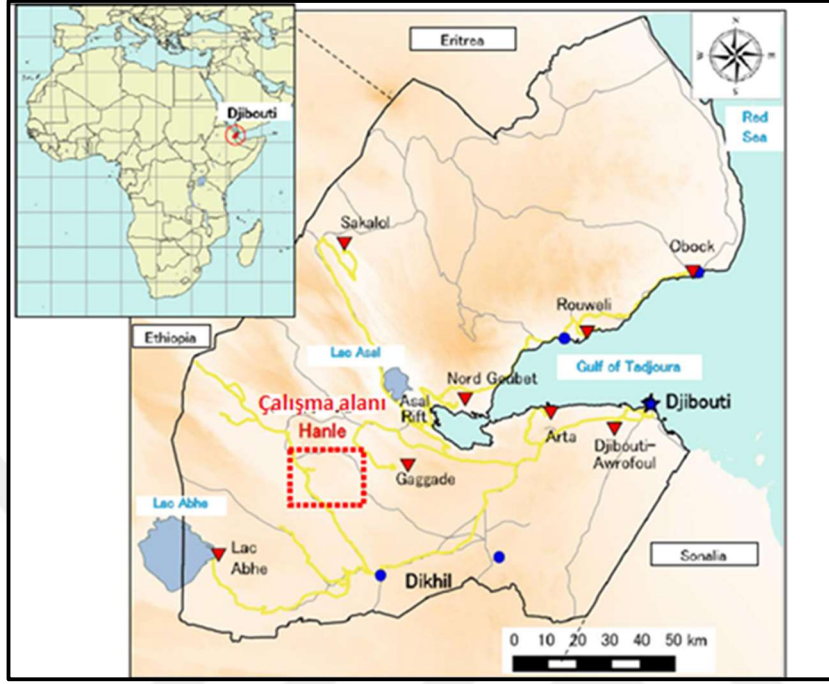
ODDEG	: Cibuti Jeotermal Enerji Geliştirme Ofisi
CERD	: DJIBOUTI Çalışma ve Araştırma Merkezi
BRGM	: Jeolojik ve Madencilik Araştırma Bürosu
BFGUR	: İsviçre Federal Yerbilimleri ve Doğal Kaynaklar Enstitüsü
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
XRF	: X- Işın Floresanı
JICA	: Japonya Uluslararası İşbirliği Ajansı
KTUN	: Konya teknik universitesi
G	: Güney (South)
K	: Kuzey (North)
D	: Doğu (East)
B	: Batı (West)
EDD	: Electricite de Djibouti
GENZL	: Jeotermal Enerji Yeni Zelanda Ltd.
GRMF	: Jeotermal Risk Azaltma Tesis
ICEID	: İzlanda Uluslararası Kalkınma Ajansı
ISOR	: İzlanda Jeosurvey
A.S.I	: Deniz Seviyesinin Üstü
MT	: Manyeto-Tellürik
ORSTOM	: Denizaşırı Bilimsel ve Teknik Araştırma Ofisi)
PPP	: Kamu-Özel Sektör Ortaklığı
TEM	: Transit Elektro-manyetik
TOR	: Görev Tanımları
DB	: Dünya Bankası
AFPB	: Afrika bütçe programı
OPEC	: Uluslararası Kalkınma Fonu
GEF	: Küresel çevre tesisleri
AFD	: Agence française de développement

1 GİRİŞ

Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Lisansüstü Eğitim Entitüsünde yüksek lisans kapsamında bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma konusu olarak, Afrika rift sistemi içerisinde yer alan jeotermal potansiyel olarak oldukça zengin Cibuti Cumhuriyetindeki Hanle Jeotermal Alanının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Hanle Grabeni'nde yer alan akifer sistemindeki dolaşım yönlerini, jeotermal potansiyelini, rezervuar sıcaklıklarını ve su - kaya ilişkileri belirlenmiştir. Bunun yanısıra XRD analizi için de kaya parçaları alınmış ve ince kesitler yapılmıştır, bu da çalışma bölgesindeki hidrotermal alterasyonun özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır.

Cibuti, Afrika Boynuzu'nda kuzeyde Eritre, batı ve güneyde Etiyopya ve güneydoğuda Somali ile sınırı olan küçük bir ülkedir. Başkenti Cibuti aynı zamanda ülkenin en büyük şehridir. Kızıldeniz, Aden Körfezi ve Doğu Afrika Riftinin üçlü kavşağı olan ve 30 My'dan beri volkanik ve tektonik faaliyetlerin gerçekleştiği Afar Depresyonu gibi istisnai bir jeodinamik durum nedeniyle, Cibuti Cumhuriyeti çok sayıda mevcut ve geçmiş hidrotermal faaliyetlerle karakterize edilmektedir (Khaireh, 2012). İtalyan Ulusal Araştırma Konseyi ve Fransız Ulusal Bilimsel Araştırma Merkezi 1970'lerde bölgede ayrıntılı çalışmalar yapmış ve Afar'da okyanus yarıklarına benzer yayılma eksenlerinin varlığını doğrulamıştır. Cibuti'nin kara kütlesi, 25 My'dan beri burada meydana gelen volkanizma ve kapsamlı tektonizma göz önüne alındığında, esas olarak volkanik kayalardan oluşmaktadır. Cibuti'deki tektonik olarak en aktif yapı Assal yarığıdır. Volkanik patlama ve genişlemenin farklı aşamalarında oluşan volkanik kayalar serileri Adolei bazaltları (25 My), Mabla riolitleri (15 My), Dalha bazaltları (9 My, Ribta riolitleri (4.25 My), Stratoid bazaltları (3.3 My), Tadjoura Körfezi bazaltları (3.1 My) ve son dönem rift bazaltlarıdır (Holosen'den günümüze) (Corti ve ark., 2015). Genişleme tektoniği ve buna bağlı volkanizma evreleri de Cibuti'de çok sayıda jeotermal sistem yaratmıştır. Cibuti'deki ilk jeotermal araştırmalar 1970'lerde Fransız Jeolojik Araştırmaları tarafından gerçekleştirilmiştir. Ancak 2014 yılında Cibuti Cumhuriyeti ODDEG (Office djiboutienne de développement de l'énergie géothermique) adında bir kuruluş oluşturmuştur. Bu kuruluşun amacı ülke genelinde jeotermal kaynakları geliştirmektir. Kuruluşundan bu yana ODDEG, potansiyellerine göre sınıflandırılmış 23 jeotermal saha kurmuştur. Hanle çalışma alanı (Şekil 1.1) en değerli 5 sahadan biridir ve

şu anda aktif olan ve yılda 10 ila 15 mm hızla açılan Büyük Doğu Afrika Riftinin Gagade bölgesine yakın bir konumdadır.



Şekil 1. 1.Çalışma alanının yer bulduru haritası

Bu çalışmada Hanle Jeotermal Alanı'nın (HJA) olası enerji potansiyelini ortaya çıkarmak ve Cibuti ekonomisine kazandırmak amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ısı kaynağı, rezervuar kaya ve örtü kaya ilişkisini ortaya koymak ve rezervuar kaya geçirimsizliğine bağlı yüksek ısılı akışkan üretim alanlarını tespit etmek ve akışkanın hidrojeokimyasını ortaya koymak öncelikli çalışma olacaktır.

2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Aquater (1985), bu çalışmada GENZL'nin (Geothermal Inorgy of New-Zealand Limited) Hanle bölgesinde iki termal gradyan sondaj kuyusu önerilmiştir. TEWEO 1 adı verilen ilk sondaj kuyusu, Hanle grabeninde, Dikhil-Yoboki yolunun yaklaşık 2.5 km batısında yer almaktadır. Garabbayıs 2 olarak adlandırılan ikinci sondaj kuyusu ise Dikhil-Yoboki yolunun doğusunda, grabenin doğu kenarında yer almaktadır. Bununla birlikte, sondaj çalışmaları sırasında alınan çeşitli numunelerin analizleri, karşılaşılan yeraltısuyunun nispeten mineralize olduğunu ve toplam mineralizasyonun “Teweo 1” suyu için yaklaşık 1650 mg/l ve “Garabbayıs 2” suyu için 1450 mg/l olduğunu göstermiştir. Ana elementlerden klorürler sırasıyla %30 ve %36, sodyum ise tüm elementlerin %48 ve %45'ini temsil etmektedir. Daha düşük bir seviyede, sülfatlar ana elementlerin yaklaşık %10'unu oluşturmuştur. Su klorür-sülfat alkalin özelliğinde tespit edilmiştir.

“Teweo 1” sondaj kuyusundan gelen suyun sıcaklığı yaklaşık 30°C ölçülmüştür. Garabbayıs 2 sondaj kuyusundan gelen su önemli bir termal anomali göstermiştir. Sıcaklığı 105 m'de 62°C'den 169 m derinlikte 75°C'ye kadar değişmiştir. Sondajın sonunda alınan son numune yaklaşık 77°C sıcaklıkta su üretmiştir.

Aquater (1987), Bu raporda, Cibuti Cumhuriyeti'nde jeotermal enerjinin geliştirilmesine yönelik araştırma programının Hanle Ovası'nda iki araştırma kuyusu ve Asal yarığında dört kuyu açılmasını içerdiği belirtilmektedir. Proje Ocak 1987'de Hanle Ovası'nda bir kuyunun açılmasıyla başlamıştır. Bu alanda iki derin kuyu açılmış ve bu kuyular çalışma bölgesinde düşük sıcaklıkların varlığını ortaya çıkarmıştır.

Hanle 1 kuyusunda, aylar sonra bile, 1400 m'de kaydedilen maksimum sıcaklık 72°C dir ve 36°C/km'lik bir jeotermal gradyana sahiptir. Buna karşılık, Hanle 2'de, kuyunun dibinde kaydedilen sıcaklık 2017 m'de 123°C'dir ve 24°C/km'lik bir jeotermal gradyana sahiptir. Bu gradyan geçirimsiz formasyonlarda ölçülmüştür ve kuyunun çok büyük bir bölümünde neredeyse sabittir. Bu gerçekler, tamamen iletken bir ısı akışı hipotezini desteklemektedir. Bununla birlikte, Hanle ovasının altındaki sığ derinliklerde (maksimum 800 m) büyük miktarlarda tatlı su içeren akiferlerin kullanıma hazır olduğu belirtilmelidir. Bu alanda elde edilen sonuçlara dayanarak, bu alanda ve birkaç km

kuzeydoğuda bulunan Gaggade Ovası gibi benzer jeolojik ortamlarda yüksek entalpili akışkanlar bulma olasılığının düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Zan ve ark. (1990), Hanle bölgesinin Abbe Gölü ile Asal riftinin arasında yer alan iki ana tektonik çöküntüden biri olduğu belirtilmektedir. Bölgedeki yapısal eğilimler kabaca KB eğilimlidir ve tektonik stil, yanlarında bir dizi normal fay bulunan silisik bir masifin (Babba Alou) yakın zamandaki tektonik yükselmesi ile yerel olarak bozulmuş bir yarım grabenin karakteristiğidir. Sondaj yapılan formasyonlar, cüruf katmanları içeren bir dizi bazaltik lav akıntısından oluşmuştur. Kuyuların üst kısmında, H1 kuyusunda 678 m'ye kadar ve H2 kuyusunda 300 m'ye kadar bazı silisli ürünler karışmıştır. İnce tortul tabakalar oldukça yaygındı. H1 ve H2 kuyularından alınan karotlar üzerinde iki radyometrik tarihleme yapılmıştır (sırasıyla 1622-1623 ve 2033-2038 m). H1 karotunun yaşı $1,4 \pm 0,3$ My olup, tabakalı serinin yaşına karşılık gelirken, H2 karotunun yaşı $18,8 \pm 0,5$ My'dir (Miyosen). Bu veriler, BRGM tarafından aynı karot üzerinde gerçekleştirilen radyometrik analiz ile doğrulanmıştır. Radyometrik yaş tayinleri toplu kayalık örnekleri üzerinde ve H1 için ayrıca ayrı laumontitler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Houmad (2002), "Modélisation préliminaire de l'aquifère volcanique régional de la région de la plaine de hanlé république de Djibouti" isimli çalışmada Hanle akiferinin hidrojeolojik bilgisini derinleştirmek ve tortul akiferin (Hanle) suları ile bölgesel akiferin suları arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çeşitli kuyulardan elde edilen suyun kimyasal bileşimine ilişkin sonuçlar Piper, Na/Cl ve Langelier-Ludwig diyagramları gibi grafikler halinde sunulmuştur. Bu farklı diyagramlar, sedimanter akiferin suları ile volkanik akiferin suları arasında etkileşim olabileceğini göstermiştir.

JICA (2015), bu raporunda Garabbayis-1 kuyusunun yakınındaki fumarolün etrafına yerleştirilmiş 30 ölçüm istasyonunda manyetotelerik bir çalışma gerçekleştirmiş ve 2D inversiyon yöntemi kullanılarak özdirenç yapısı tahmin edilmiştir. İnversiyon sonuçları, özdirençin sığ derinliklerde düşük olduğunu ve derinlikle birlikte arttığını göstermiştir. Fumarol çevresinde, sığ derinlikteki düşük özdirenç katmanı kısmen incilir ve bu da kırıklı bir sistemin varlığına işaret eder. Bu çalışmayla özdirenç yapısının

sonuçlarının yanı sıra mevcut sondaj kuyularından elde edilen jeolojik ve jeokimyasal sonuçlara dayanarak üç jeotermal rezervuar modeli ortaya konmuştur.

Awaleh ve ark. (2020), bu araştırma makalesinde, Hanle-Gaggade grabenindeki on termal kaynak, beş içme suyu sondaj kuyusu ve bir el kazısı kuyusundan alınan suyun ana-azınlık hidrojeokimyasal parametreler ve çoklu izotopik bileşim açısından analiz edildiği bildirilmektedir. Bu çalışmada, radyojenik karbon (^{14}C) kullanımı, derin akiferin yaşının 12.500 ila 8.700 yıl (Geç Pleistosen / Erken - Orta Holosen) arasında olduğunu ve Doğu Afrika'nın ıslak dönemine yerleştirildiğini ortaya koymuştur. Su moleküllerinin kararlı oksijen ve hidrojen izotop oranları, $\delta^2\text{H}(\text{H}_2\text{O})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$, bu bölgedeki yeraltı suları arasında ortak özellikler göstermiştir. Bu bölgenin yeraltısuları ile yerel göllerin (Asal-Abhe) ve pale-göllerin (Sakalol-Hanle-Gaggade-Dobi) suları arasında, bu dönemde terminal Awash Nehri havzasını oluşturmak üzere birbirine bağlanmıştır. Bu akiferlerin kuzeydoğu Etiyopya ve Cibuti arasında bulunan sınır aşan akifer içinde olduğu belirtilmiştir. Kuzeydoğu Etiyopya ve Cibuti, bu bölgesel akiferin hem paleo-çevresel geçmişini hem de hidrojeokimyasal özelliklerini yeniden yapılandırmayı mümkün kılmaktadır. Son olarak, Hanlé-Gaggadé düşük entalpili jeotermal sistemi için jeolojik ve tektonik bilgiler ve son jeofizik çalışmaların sonuçları ile birlikte termal ve termal olmayan yeraltı sularına ilişkin jeokimyasal ve izotopik verilere dayanan kavramsal bir model önerilmiştir.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Bu raporun hazırlanması sırasında arazide ve laboratuvarında kullanılan materyal ve yöntemler bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.1 Ön araştırma

Ön araştırmalarda, çalışma alanı ve çevresi ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. Önceki çalışmalar, yüksek lisans ve doktora tezleri, yayınlar, makaleler, projeler, kurumsal raporlar vb. derlenmiş ve incelenmiştir.

Hidrojeolojik ve jeolojik çalışmalar kapsamında yerinde ölçümler için Garmin tipi GPS, pusula, elektrikli nivo, pH metre, EC metre, bir termometre, kalibre edilerek kullanılmıştır. Ayrıca örnekleme çalışmaları için örnek kapları, etiketler ve kuyu haritaları hazırlanmıştır.

3.2 Arazi çalışmaları

Hidrojeolojik çalışmalarda tüm su noktalarının lokasyonları belirlenerek kaynaklardan ve kuyulardan sıcaklık, pH ve elektriksel iletkenlik (EC) ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.1 – Şekil 3.5).

Hidrotermal alterasyonu haritalamak için uydu görüntüleri dikkatle incelenmiştir. Hanle bölgesinin jeolojik haritalama çalışmaları için arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda amaç aynı zamanda bir jeotermal alanın varlığını gösteren alanların yayılımlarını belirlemek ve haritalamak, hidrotermal değişimleri haritalamak ve jeotermal rezervuarın yerini tahmin etmektir. Jeotermal rezervuarın kavramsal modelinin geliştirilmesini iyileştirmek için, bu veriler jeokimyasal verilere ek analizler yorumlanacaktır.



Şekil 3. 1.Arazi çalışmalarında kullanılan ölçüm cihazları



Şekil 3. 2. Hanle'de küçük bir yağmur suyu birikintisi



Şekil 3. 3.Garrabeyis'in yağmur suyu filtrasyonu



Şekil 3. 4.(A) Garrabeyis su sondaj kuyusundan alınan numuneler (B) Garrabeyis su tankı



Şekil 3. 5. Fumarol bölgesinde kaya örnekleme

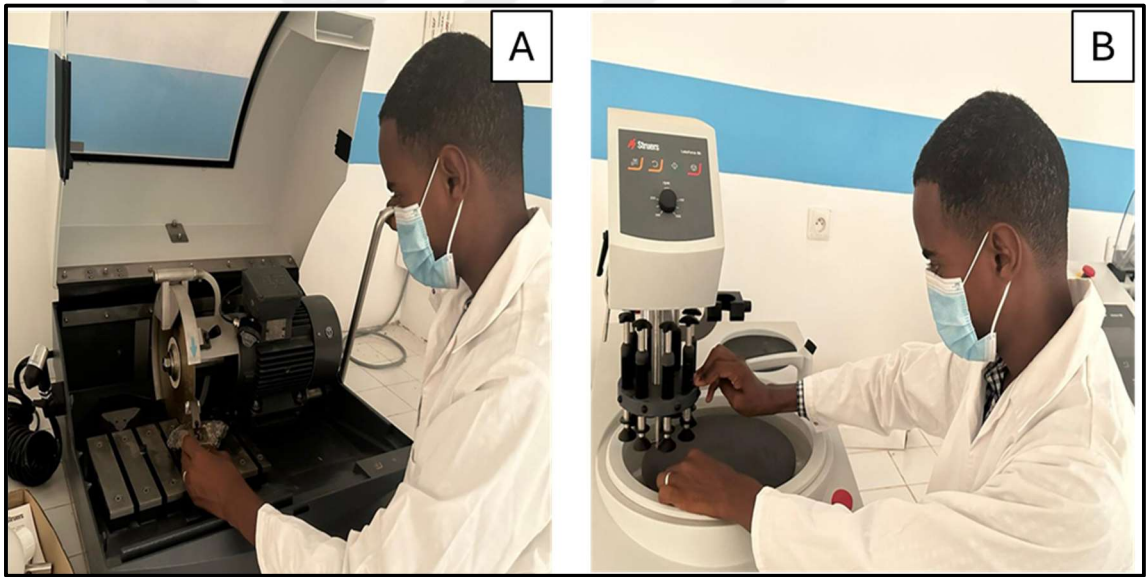
3.3 Laboratuvar çalışmaları

Çalışma alanında 2023 yılının yağışlı ve kurak dönemlerinde alınan örneklerin fiziko-kimyasal analizleri (Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl, SO_4 , CO_3 , F ve NO_3 SiO_2 , I, As, Fe) Fransa'daki Korsika Üniversitesi'nin jeokimya laboratuvarında iyon kromatografisi analitik yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Ayrıca Oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve Döteryum (δD) izotopik analizleri Japonya'daki Kyushu Üniversitesi'nin kimya laboratuvarında kütle spektrometrisi kullanılarak yapılmıştır.

Alanın jeolojisini aydınlatmak için, kayaların mineralojisi, dokusu ve yapısının yanı sıra birincil ve ikincil mineraller ile hidrotermal alterasyon minerallerini anlamak amacıyla Petrografik ve XRD analizi için Japonya'daki Kuysu Üniversitesi'ne bir dizi kaya örneği gönderilmiştir.

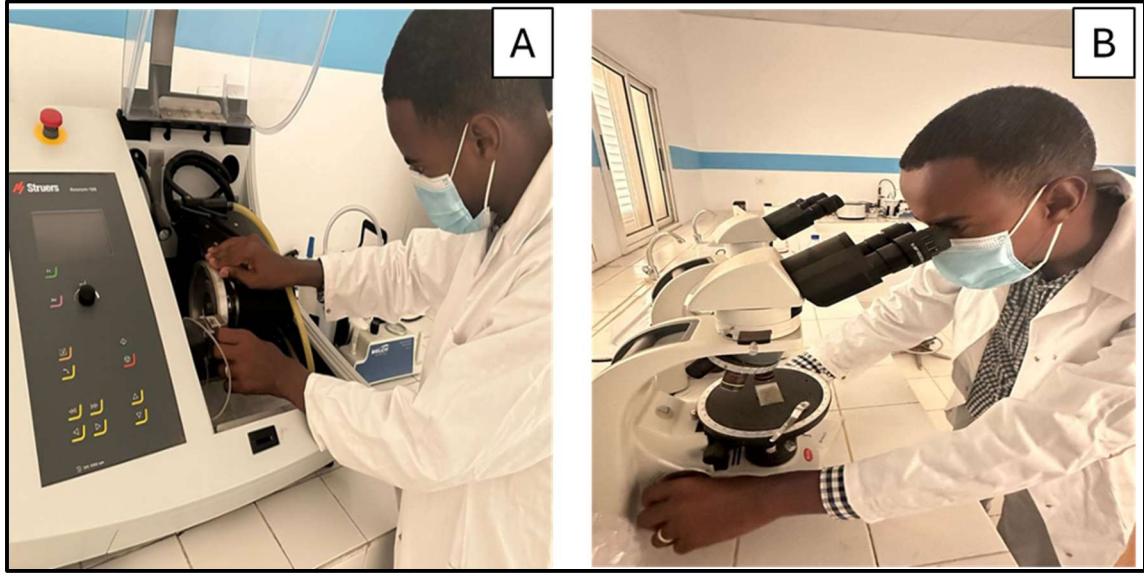


Şekil 3. 6. (A) Analiz öncesi laboratuvarıda su örnekleri (B) Kromatografi makinesi



Şekil 3. 7. (A) Numunenin uygun boyut ve geometride kesilmesi (B) Ön cilalama

Parlatma aşamasına geçmeden önce, yüzey hasarını gidermek (Şekil 3.7A), düz bir yüzey elde etmek ve parlatmaya hazırlamak için ön parlatma veya lepleme yapılır. Numune daha sonra 30 μm nihai kalınlığa kadar parlatılır veya alıştırılır (Şekil 3.7B).



Şekil 3. 8. (A) Numunenin cilalanması (B) Mikroskopta numune gözlemleri

Son parlatma işleminden sonra (Şekil 3.8A), minerallerin birbirlerine göre düzenini incelemek, kristalleşme sıralarını değerlendirmek, düzlemler veya hizalamalar halinde dizilişlerini gözlemek ve kayanın yapısını vurgulamak için lam polarize bir mikroskop (Şekil 3.8B) kullanılarak incelenir.

XRD analizi için laboratuvarında toz numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3.9). Dökme numunenin analiz edilmesinin amacı, numunenin bileşenlerini hızlı bir şekilde tanımlamaktır. XRD analizinden önce, kontaminasyonu önlemek için büyük özen gösterilerek öğütülmüş bir toz numunesi hazırlanmıştır. Numuneyi hazırlamak için kaya numuneleri küçük parçalar halinde öğütülmüş (incir) ve nemi gidermek için 1 gün boyunca 45°C'de fırında kurutulmuştur. Örnek daha sonra toz haline getirilmiştir. Son olarak, toz haline getirilmiş numuneler, değişime uğramış minerallerin doğru bir şekilde analiz edilmesi için XRD'nin kullanılmasına olanak sağlamak üzere metal bir plaka üzerinde ince bir film halinde sıkıştırılmıştır.



Şekil 3. 9. XRD için yığın numune hazırlama ve cihazlama (a) kaya örneği, (b) fırın, (c) havan ve tokmak, (d) metal plaka üzerinde sıkıştırılmış toz örneği, (e) Rigaku XRD makinesi.

4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1 JEOLJİ

Hanle bölgesi, Abbe Gölü ile Asal Rift arasında yer alan iki ana tektonik çöküntüden biridir. Yapısal eğilimler Afar Rift sistemine paraleldir ve tektonik stil, kanatlarında bir dizi normal fay oluşturan asidik bir masifin (Babba Alou) (Ek-1.) son zamanlarda yükselmesiyle yerel olarak bozulan yarım graben görünümündedir.

Bununla birlikte, Hanle platosunda, Afar stratabound serisinin bazaltik lavları yaşa göre alt bazaltik seviye, orta bazaltik seviye ve üst bazaltik seviye şeklinde üç bölüme ayrılır. . Çalışma alanının kuzey kesiminde, bazalt tabakasının altında alt stratoid serisinin riyoitik topluluğunun kalın bir tabakası dağılmıştır. Ayrıca, Pliyosen ~ Pleistosen sırasında oluşan denizel sedimanlar, göl sedimanları, flüvyal sedimanlar ve Eoliyen sedimanlar Hanle Ovası'nda ve Gagade Ovası'nda çökelmiştir.

İnceleme alanı içerisinde KB-GD doğrultusunda çok sayıda birbirini takip eden fay veya kırıklı sistem oluşmuştur. Fayların çoğu KD yönüne doğru azalan normal faylardır. Bu faylar, yaklaşık 5~20 m yükseklik farkına sahip uçurumlar oluşturur ve Hanle platosu boyunca art arda dağılır. Bu fayların çoğu platodaki orta bazalt tabakasının yer değiştirmesine neden olmuştur.

4.1.1 Alt bazalt seviyesi (2.0-2.7My)

Alt bazaltlar, boyutları 1 m ~ birkaç m olan koyu gri ve koyu seladon afirik bazaltik stratiform lav birimlerinden oluşur (Şekil 4.1). Her birim için, alt masif kısım ve üst bubbles kısımdan oluşur ve iki birim arasındaki boşluk tuf ile örtülmüştür. Lav biriminin masif kısmı iri taneli dolerite benzemektedir. İnceleme alanında, piroklastik kayaç olarak görünen fasiyes doğrulanmamıştır. Bu tabaka tarafından ısıtılan, alttaki kumlu silttaş tabakası sınır çevresinde kırmızıya dönüşür. Tüm tabaka altere olmuştur ve kalsit ve kuvars gibi ikincil mineraller boşluk veya dayk içinde kolayca bulunabilir. İnceleme alanındaki diğer volkanik kaya tabakaları ile karşılaştırıldığında, buradaki ayrışma daha hızlıdır. Bu ayrışmalar yüzeyde dar kayma veya soğan benzeri bir şekilde topraklaşmıştır.



Şekil 4. 1. Alt bazalt tabakası fasiyesleri ve oluşumu

4.1.2 Alt statoid riylit (2.0-2.7My)

Alt stratoid serisinin riylitik topluluğu esas olarak Hanlé grabeninin yamaçlarında ortaya çıkmaktadır. Bu kısımda, 150 - 200 m kalınlığa kadar kubbemsi pomza tabakaları şeklini alırken, Babba Alou masifinde (Yoboki'nin kuzeyi) kalın, masif akıntılar şeklinde görülmektedir.

Bu topluluk, alttaki alt stratoid serisinin bazaltik topluluğu ile üstteki orta stratoid serisinin bazaltik topluluğu arasında sıkışmıştır. Afar'ın genelinde olduğu gibi, riylitik masifler tektonik yönlerin kesiştiği noktalarda yer almaktadır.

Buradaki ana tektonik yön, normal fayları tüm seriyi GB'ye daldıran ve bölmeleri KD'ye indiren büyük grabenler K120-K140'ın yönüdür. Eğik yönler K40-K60 fayları ile temsil edilmektedir. Bu süitteki asidik kayalar, Abhé Gölü'nden Asal Gölü'ne kadar olan en son emisyonların yaşının gençleştiğini göstermektedir. Güney Gobaad'da yaklaşık 3 My'dan Asal yakınlarındaki Eadayle'de 1 My'dan daha aza (Gasse ve ark., 1990).

4.1.3 Orta bazalt seviyesi (1.8-2.2My)

Bu bazaltlar, koyu gri ortopiroksen bazalt ve stratiform tipi bazalt lav şeklindedir (Şekil 4.2). Bu bazaltların üzerinde, çok sayıda plajiyoklaz içeren köpüklü kaba taneli bazalt lav akıntısı birimi doğrulanmıştır. Püskürme ortamı (su altında veya karada püskürmüş) gözlenmemiştir. Kısmen altere olmuş ve kalsit gibi ikincil mineraller kaya boşlukları içinde oluşmuş veya dike oluşturmuştur. Sütunsal eklemlenme iyi gelişmiştir. Hanle Platosu'nun yüzeyi bu sütunlu eklemlerden ayrılan bazaltik breş kaya ve çakıllardan oluşmaktadır. Bu tabakadaki ayrışma, yukarıda tanıtılan alt bazalt tabakasındakinden daha güçlüdür. Hanle Platosu, bu tabakanın lav akıntısı yüzeyinden oluşur ve içinde KB-GD doğrultulu faylar ve kırıklı sistem iyi gelişmiştir.



Şekil 4. 2.Orta bazalt tabakası fasiyesleri ve oluşumu

İnceleme alanının orta kesiminde ardışık olarak dağılmış, ancak inceleme alanının kuzey ve batı kesiminde düzensiz bir şekilde sıkışmıştır, bu da lav akışının sona erdiğini gösterebilir. Hanle jeotermal tezahürü bu katmanın üst kısmında doğrulanmıştır.

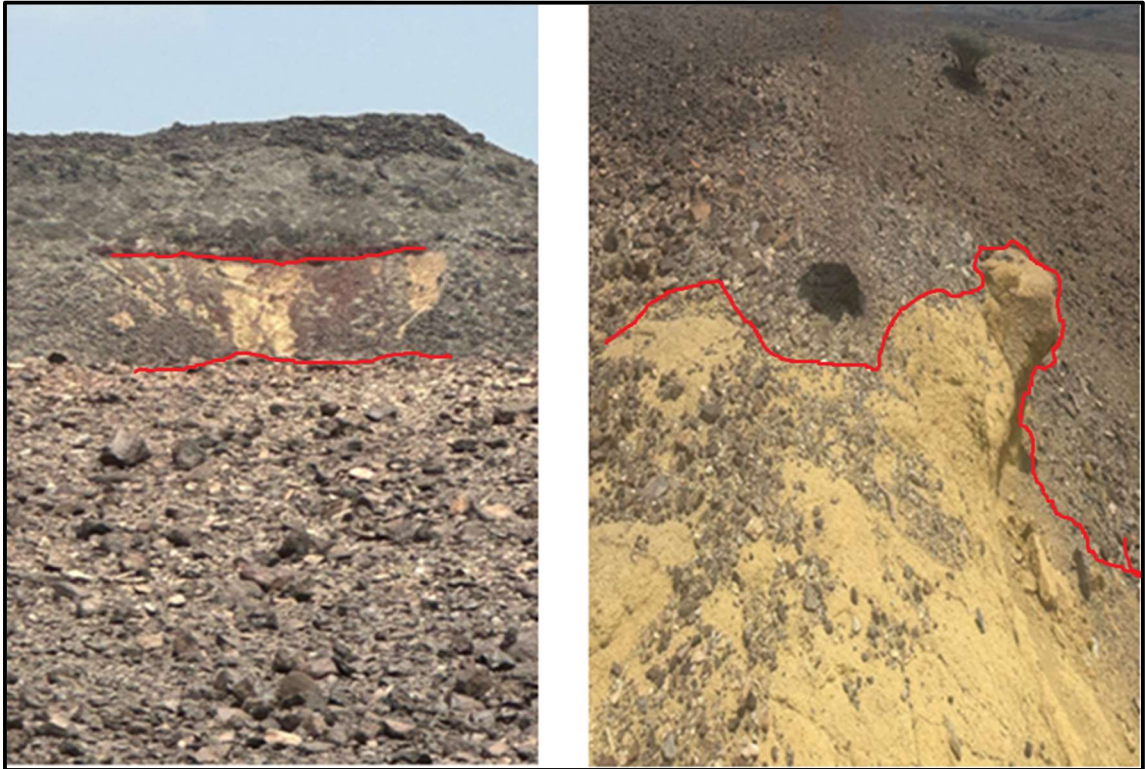
4.1.4 Trakit (1.7 à 1.97 My)

Trakitik topluluk, kalın trakit ve sınırlı ölçüde trakit-bazalt akıntılarından oluşur. (Houmad, 2002) bu trakitlerin yaşını 1.7 ile 1.97 Ma arasında tahmin etmişlerdir. Bu

nispeten yeni yaş, bu ara kaya akıntılarını orta stratoid serisine bağlayabilir. Bununla birlikte, kimyasal analizleri bu kayalar ile altta yatan bazaltlar arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir (Houmad, 2002).

4.1.5 Üst bazalt seviyesi (1.25-1.65My)

Koyu gri lav biriminden oluşur. Bu tabakanın fasiyesi, altında yer alan orta bazalt tabakası ile kapalıdır ve bu nedenle çıplak gözle ayırt edilmesi zordur. Hanle platosunda küçük höyükler şeklinde görülür ve tabakanın bir kısmı orta bazalt tabakasının içine girmiştir. Bu tabaka faylar veya kırıklı sistem boyunca KB-GD yönünde dağıldığından, fay ve kırıklı sistemin faaliyetleri ile ilişkisini gösterir. İntrüzyon yüzeyi boyunca sütunlu eklemleşme iyi gelişmiştir. Kısmen altere olmuş ve kalsit gibi ikincil mineraller kaya boşlukları veya oluşmuş dike içinde oluşmuştur. Çalışma alanında, stratoid seriler arasında tüfler ve kumtaşlar bulunur (Şekil 4.3) . Bu oluşumların doğası, havzaya, havzanın bölgesine ve stratoid serilerin dizilimine göre konumuna bağlı olarak büyük ölçüde değişir.



Şekil 4. 3. Tüf ve kumtaşı tabakası fasiyesleri

4.1.6 Alüvyon

Alt stratoid serisinde, flüvyal ve gölsel çökellerin arakatkıları gözlenir. Orta stratoid serisinin tabanında killi, siltler, diatomitler ve jipsler şeklinde gölsel çökeller tespit edilmiştir (Houmad, 2002).

4.2 Yüzey tezahürleri

Çalışma alanında çeşitli yüzey belirtileri gözlemlenmiştir. En yaygın olanları fumaroller, sıcak su kaynakları, yüksek yüzey sıcaklıkları (sıcak zemin) ve hidrotermal alterasyon mineralleridir.

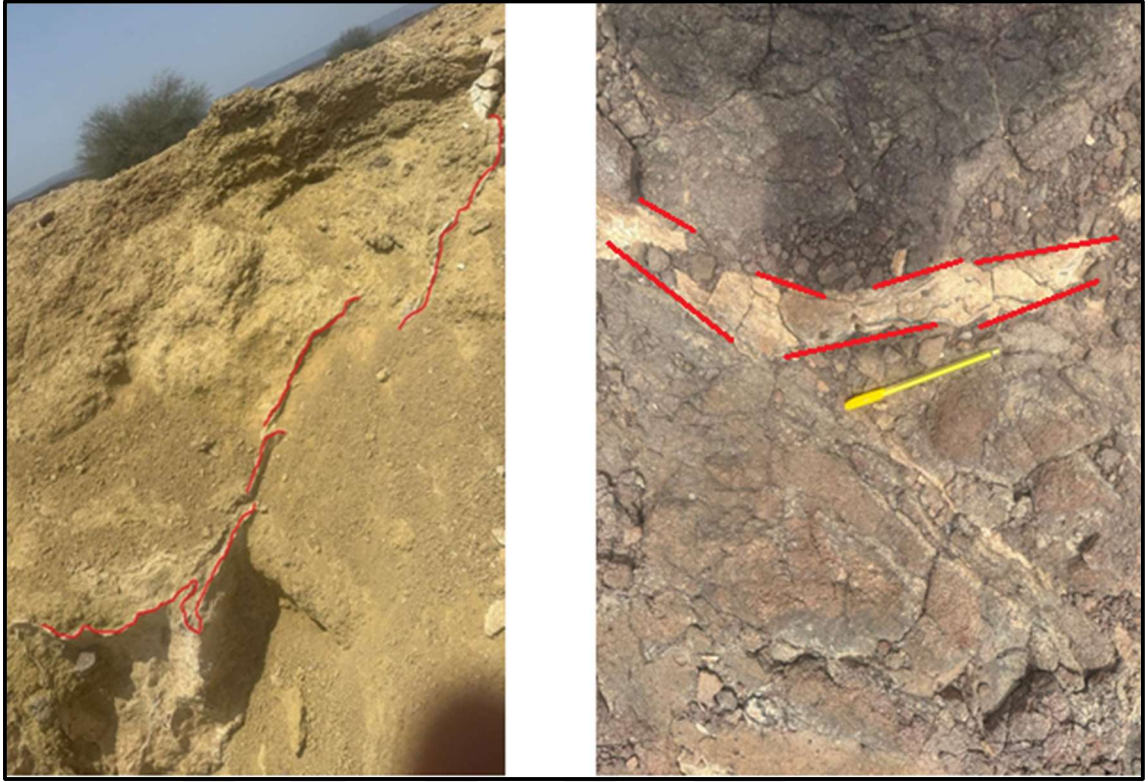
4.2.1 Hidrotermal alterasyonu

Hidrotermal alterasyon, kayalarda meydana gelen kimyasal ve mineralojik değişiklikleri ifade eder (Schwartz, 1959).

İnceleme alanındaki volkanik kayalar arasında, farklı stratigrafide farklı kombinasyon ve oluşum gösteren kalsit ve kuvarsın altere mineralleri doğrulanmıştır. Saha araştırması ile yaygın kalsit hidrotermal dike ve eşlik eden altere minerallerin varlığı doğrulanmıştır.

4.2.1.1 Kalsit

Fumarol dizisinin uzantısında kalsit dikenlerinin varlığı gözlenmektedir (Şekil 4.4). Bu gerçekler, kalsit dikeninin jeotermal sıvıların ve buharın yolu olmasının oldukça olası olduğunu göstermektedir. Bu kalsitlerin çoğu KB-GD yönünde dağıldığından, bu bölgedeki fay ve kırık sisteminin oluşumu sırasında veya sonrasında hidrotermal etki ile oluşmuş ve sonunda yüzeyde açığa çıkmıştır.

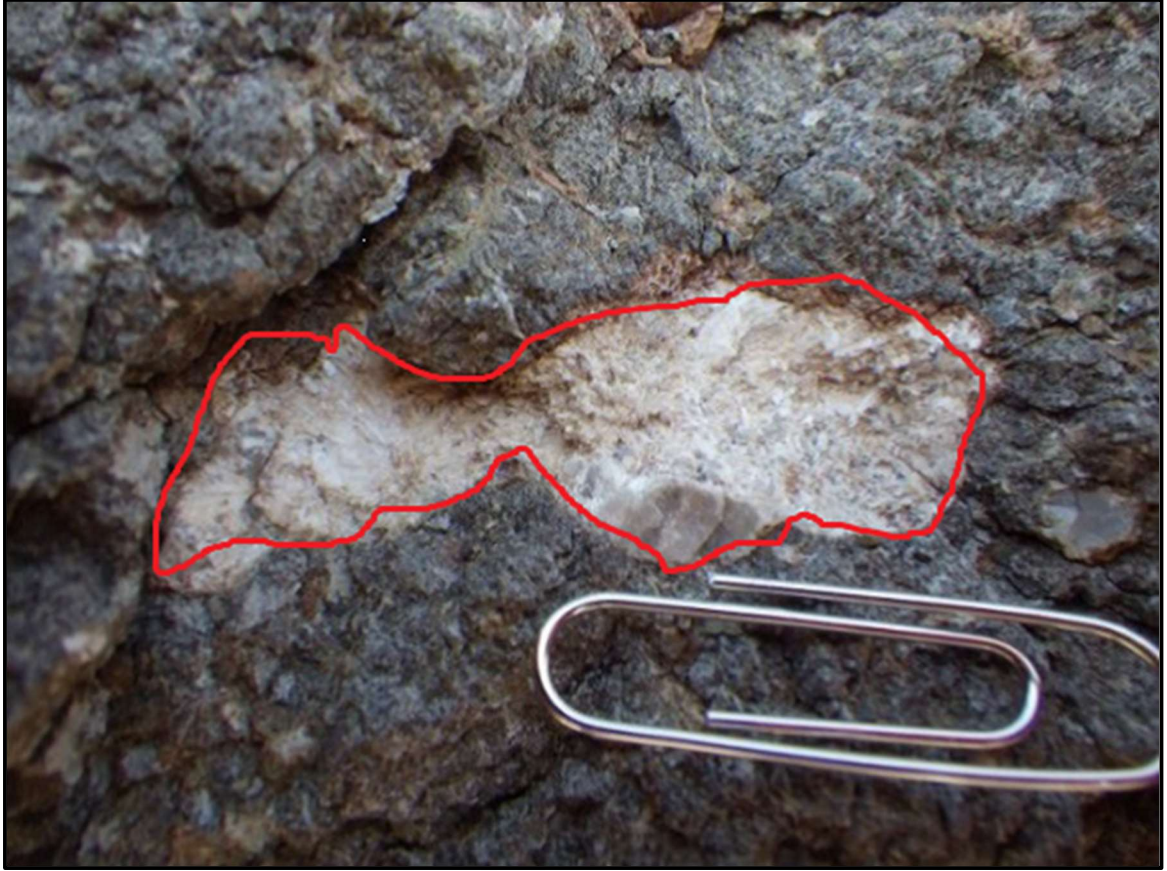


Şekil 4. 4.Hyaloklastit ve bazalt oluşumlarında kalsit ve kuvars damarlari

4.2.1.2 Zeolit (lumontit)

Genel olarak, lumontit yaklaşık 170 °C'de oluşur. Bu çalışmada, lumontit (Şekil 4.5) yukarıda açıklanan yaygın kalsit daykının etrafındaki alt bazalt tabakasında bazaltik lav kabarcıkları içinde bulunmuştur. Buradaki zeolit yaygın bir dağılım göstermemiş, sadece hidrotermal dayk ve jeotermal tezahür bölgesi çevresinde bulunmuştur. Bu

nedenle, inceleme alanındaki zeolitin hidrotermal aktivitenin neden olduğu $140 \sim 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak tahmin edilen zemin sıcaklığı artışıyla oluştuğu belirtilmektedir.



Şekil 4. 5.Lümontit, güney inceleme alanındaki alt bazalt tabakasının kabarcığı içinde bulunmuştur.

4.2.1.3 Amorf kuvars (kalsedon)

Amorf kuvars (kalsedon) riyolitte ve alt bazalt tabakasında kalsit ile birlikte kabarcıklarda ve dayklarda bulunurken, orta bazalt tabakasında ve üst tabakada bulunmaz. Bu durum, orta bazalt tabakasının sıcaklığının amorf kuvars oluşturacak sıcaklığa (yaklaşık $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ulaşmadığını gösterebilir.

4.2.2 Fumarols

Çalışma alanında da fumarollerin varlığını tespit ettik (Şekil 4.6). Fumaroller, volkanik gazların ve buharların yayıldığı yüzeydeki delikler veya açıklıklardır.



Şekil 4. 6.Çalışma alanındaki fümeroller

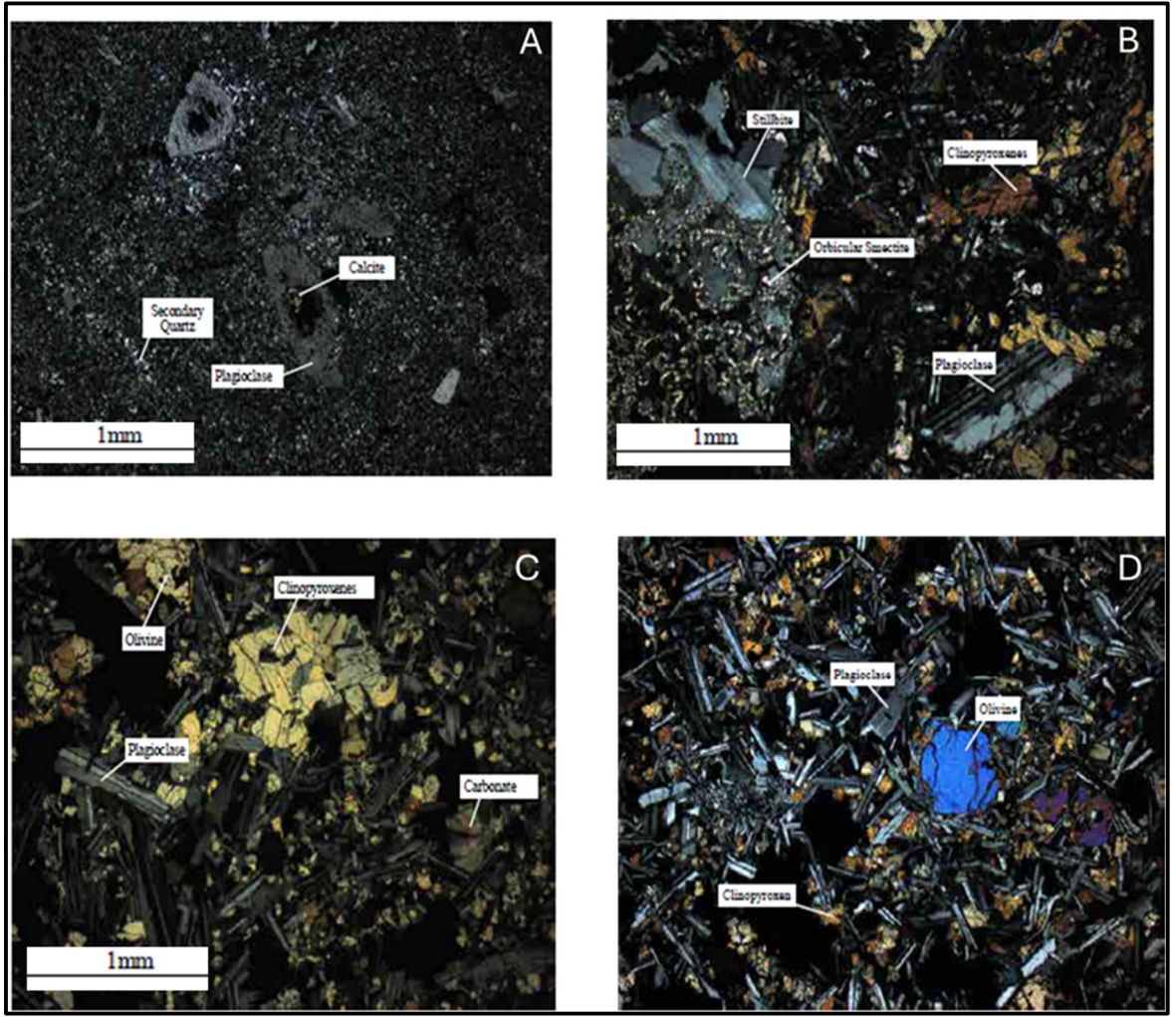
Fumaroller hidrotermal dolaşımın yüzeydeki tezahürüdür ve magmatik, hidrotermal, hidrolojik ve tektonik süreçlerden etkilenebilir (Braddock ve ark., 2017). Bu nedenle fumarollerin yeraltı kaynamasının jeotermal göstergelerinden biri olduğu sonucuna varıyoruz.

4.3 Petrografik ve XRD analiz sonuçları

Petrografik ve XRD analizleri gerçekleştirilmiş olup sonuçlar kayaçların mineralojisi, dokusu ve yapısının yanı sıra birincil, ikincil ve hidrotermal alterasyon minerallerini anlamak için yorumlanacaktır.

4.3.1 Petrografik

Kayaların ince kesitleri, kayayı oluşturan mineralleri, dokularını ve alterasyon minerallerini ve özelliklerini tanımlamak için polarize mikroskop kullanılarak gözlemlenmiştir. Gözlemler aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Tanımlanan alterasyon mineralleri olivin, kalsit, zeolit (stilbite) (Şekil 4.7B) ve ince kesitlerin çoğunda kil mineralleridi



Şekil 4. 7. Minerallerin polarize mikroskoptaki görünüşleri (A- Riyolit, B- Bazalt, C- Bazalt, D- Bazalt).

Kalsit (Şekil 4.7A) damarları ve kesecikleri dolduran yaygın, yaygın bir mineraldir. Binoküler mikroskop altında beyaz ile renksizdir, ancak petrografik mikroskop altında mükemmel bölünme ile şeffaf ile yarı saydamdır. Renksiz ile beyaz veya bulutlu (sütlü) ve saydam ile yarı saydamdır. Plajiyoklaz (Şekil 4.7D) magmatik kayaların çoğunda en bol bulunan mineraldir; bazaltta ana mineraldir.

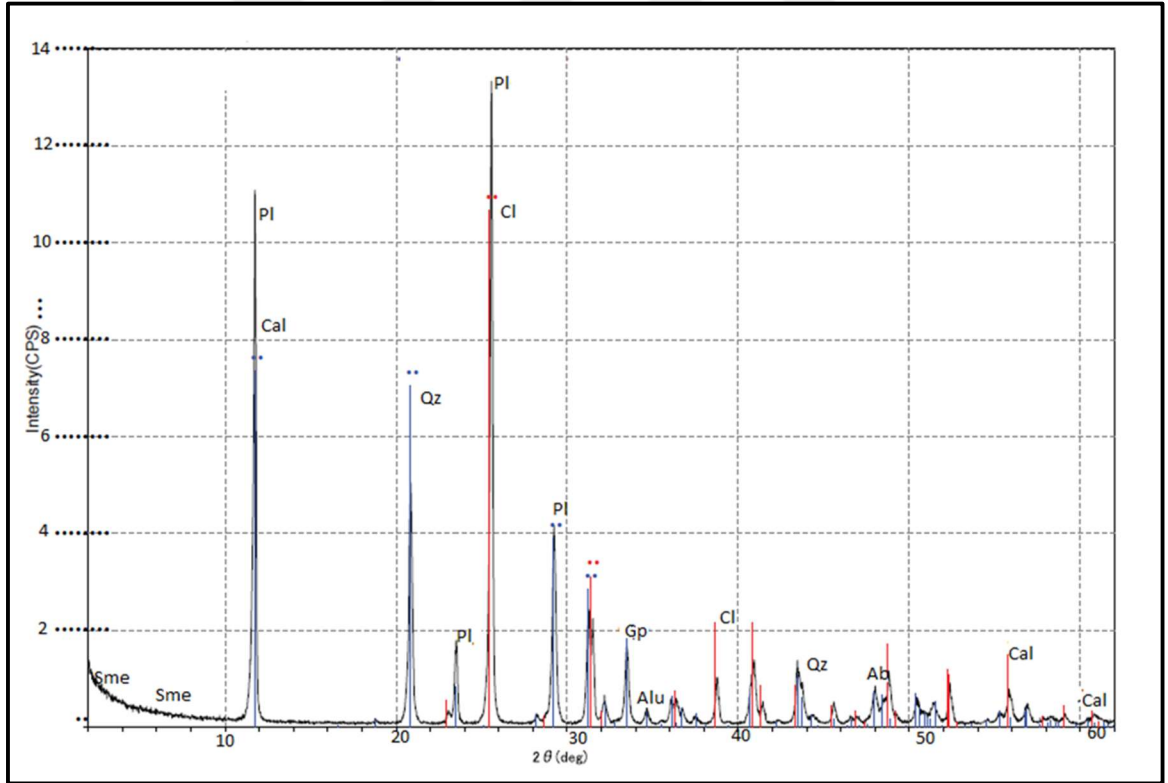
Stilbite, bazaltik kayaların ayrışmasında bulunan en yaygın ve en yaygın zeolitlerden biridir. 50-120 °C sıcaklık aralığında kararlı olduğu düşünülmektedir (Fridriksson ve ark., 2001).

Kil mineralleri jeotermal aramalarda sıcaklık göstergesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve bu amaç için en iyi araçtır (Kristmannsdottir, 1979). Smektit en düşük oluşum sıcaklığına sahip kil mineralidir; su-kayaç etkileşimlerinde cam veya olivin gibi birincil minerallerin alterasyonu ile doğrudan oluşur ve boşluklarda ve damarlarda

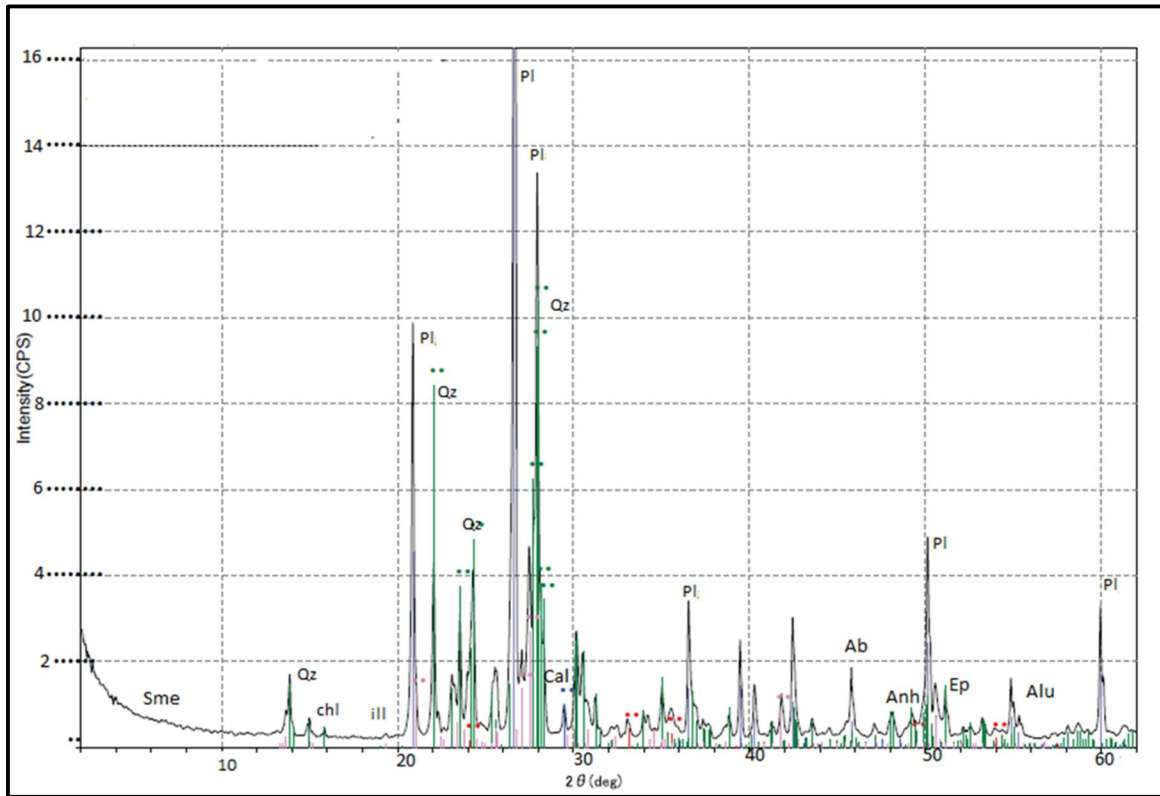
çökelir. Smektit 200 °C'nin altındaki sıcaklıkların bir göstergesidir. Klorit hem kayalardaki birincil minerallerin yerini almak hem de boşlukları doldurmak için bulunur; 230 °C'nin üzerindeki sıcaklıkların bir göstergesidir (Stakes ve ark., 1982).

4.3.2 X-ışını kırınımı (XRD)

Sonuçlar, bu bölgedeki alterasyon minerallerinin esas olarak kuvars, kalsit, albit ve kil mineralleri klorit, simektit ve illit olduğunu göstermektedir (Tablo 4.1'de özetlenmiştir). Kuvars ya opal veya kalsedonun bir alterasyon ürünü olarak ya da vezikülleri veya damarları dolduran bir mineral olarak ortaya çıkar (Randive ve ark., 2019). Kuvars genellikle epidot, prehnit, pirit ve kalsit ile ilişkilidir (Mehegan ve ark., 1982). Epidot, jeotermal sistemlerde oluşan yaygın ve bol miktarda bulunan bir mineraldir. Önemli miktarlarda bulunması 200°C'nin üzerindeki sıcaklıkları gösterir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 ve kendine özgü sarımsı ila yeşilimsi bir renge sahiptir.



Şekil 4. 8.(H1).Yığın numune için X-ışını kırınım desenleri (pl: plajiyoklaz, Qz: kuvars, cal: kalsit, gp: jips, Ab: albit, Anh: Anhidrit Alu: Alunit).

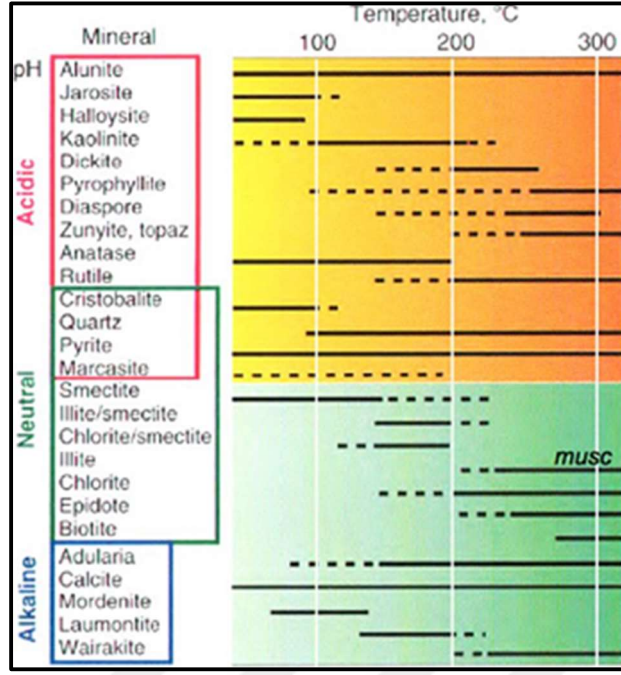


Şekil 4. 9.(H2).Yığın numune için X-ışını kırınım desenleri (pl: plajiyoklaz, Qz: kuvars, cal: kalsit, gp: jips, Ab: albit, Anh: Anhidrit Alu: Alunit).

Tablo 4. 1.Hanle'den alınan numunelerden tespit edilen mineraller.

Mineral Numune	Pl	Cal	Qz	Chl	Gp	Ill	Sme	An	Ep	Alu	Ab
H1	XX		XX	X		X					
H2	XX	X	XX						XX	X	X
H3	XX						X	X			X
H4	XX		XX		X		X				
H5	XX	X	XX			X					X

H=Hanle



Şekil 4. 10. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kuvars minerallerinin çözünürlük kararlılığındaki değişim (amorf silikanın çözünürlük kararlılığı için noktalı çizgi), (Effrey ve ark., 2000)'dan değiştirilmiştir.

Bu sonuçlar, smektit gibi kil minerallerinin varlığının, bu bölgedeki hidrotermal alterasyonun asidik ile nötr olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, kil mineralleri klorit, kalsit ve illit içeren örnekler nötr ile alkali olduklarını göstermektedir. Klorit, smektit ve kalsitin varlığı 200°C'yi aşan oluşum sıcaklıklarına işaret etmektedir (Şekil 4.10).

4.4 HİDROJEOLOJİ

4.4.1 Çalışma alanındaki iklim koşulları

Çalışma alanındaki iklim koşullarını ve sıcaklık, yağış ve nem gibi değerleri değerlendirmek için Cibuti Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü ile iletişime geçilmiş ve bu müdürlükten elde edilen verilerle yağış ve sıcaklık grafiği çizilmiştir.

Cibuti'nin iklim koşulları esasen Cibuti Cumhuriyeti genelinde aynıdır (volkanik olarak aktif bir bölge olan Lac Assal bölgesi hariç) sıcak ve kurak olarak sınıflandırılır. Hanle çalışma alanında iki mevsim yaşanır: Ekim'den Nisan'a kadar yağışlı mevsim ve

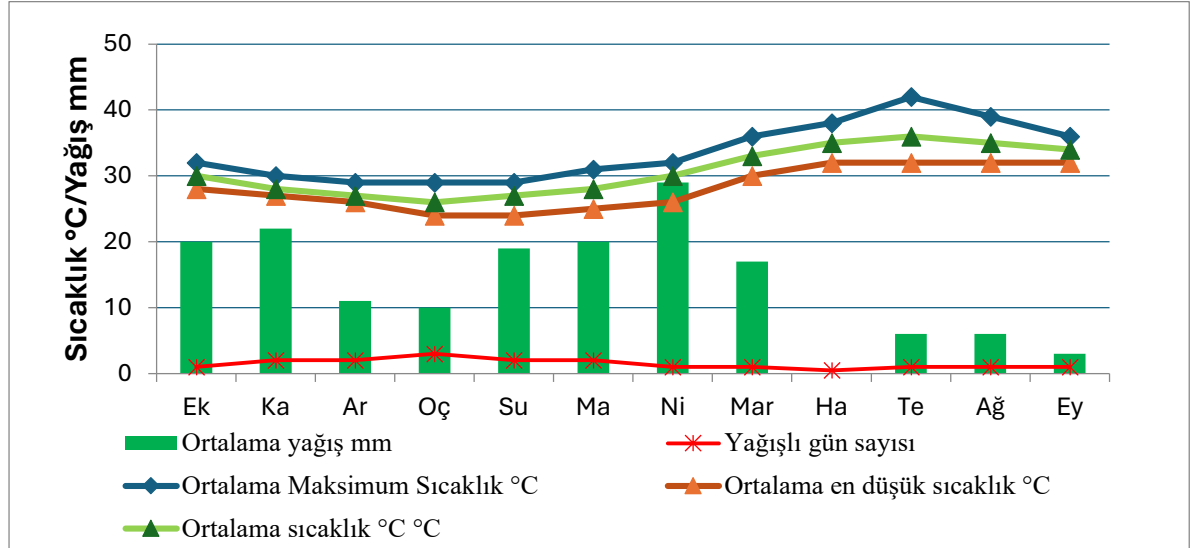
Mayıs'tan Eylül'e kadar kurak mevsim. Yıllık ortalama sıcaklık 30 °C civarındadır ve Asal Gölü (deniz seviyesinden 155 m yukarıda) yakınlarında bazen 48 °C'lik sıcaklıklar kaydedilmiştir (Hughes, 1992).

Aylık bağıl nemin en düşük olduğu ay %51 ile Temmuz ayı, en yüksek olduğu ay ise %79 ile Aralık ayıdır. Yıllık ortalama bağıl nem oranı %63.3'tür (Climatempo, 2023). Nem oranı kıyıda her zaman yüksektir, ancak iç kesimlere doğru gidildikçe önemli ölçüde azalır. Tablo, Cibuti çalışma alanı için iklim verilerini özetlemektedir.

Tablo 4. 2.Hanle (2023) iklimi

	Ek	Ka	Ar	Oç	Su	Ma	Ni	Mar	Ha	Te	Ağ	Ey
Ortalama Maksimum Sıcaklık °C	32	30	29	29	29	31	32	36	38	42	39	36
Ortalama en düşük sıcaklık °C	28	27	26	24	24	25	26	30	32	32	32	32
Ortalama sıcaklık °C °C	30	28	27	26	27	28	30	33	35	36	35	34
Ortalama yağış mm	20	22	11	10	19	20	29	17	0	6	6	3
Yağışlı gün sayısı	1	2	2	3	2	2	1	1	0.5	1	1	1
Bağıl nem %	72	77	79	75	74	78	79	75	56	51	55	61

Ortalama maksimum sıcaklık Temmuz ayında 42°C, ortalama minimum sıcaklık ise Aralık/Ocak aylarında 27°C'dir. Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, yağışlı gün sayısı yıl boyunca 20'den azdır.



Şekil 4. 11.Cibuti iklim grafiği

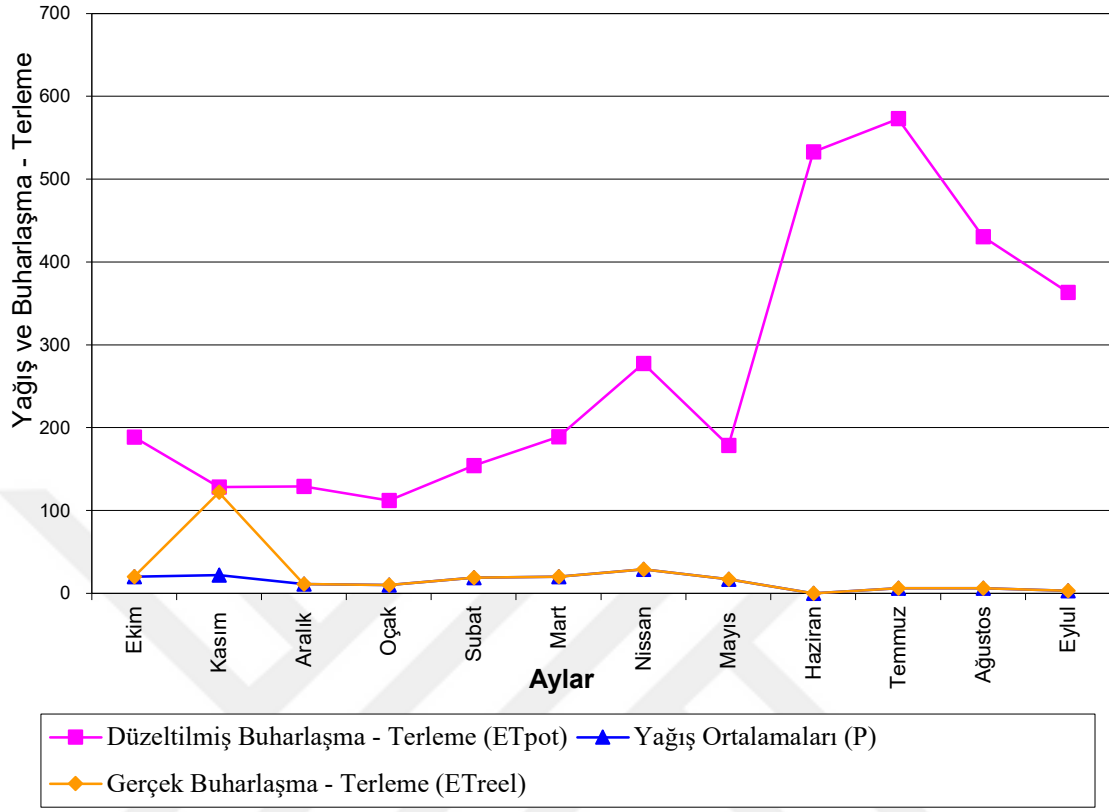
4.4.2 Buharlaşma ve terleme

Thorntwaite (1948) yöntemi kullanılarak, çalışma alanı için (2023) dönemi için dengeli bir su dengesi hazırlanmış ve yağış, buharlaşma ve terlemedeki değişimlerin bir grafiği çizilmiştir (Tablo 4.3, Şekil 4.12).

Ortalama yağış yıl boyunca neredeyse sıfırdır ve gerçek buharlaşma da Kasım ayı dışında çok düşüktür, ancak özellikle Mayıs'tan Temmuz'a kadar hafif bir buharlaşma vardır.

Tablo 4. 3.İnceleme alanının 2023 yılı denestirmeli nem bilançosu

5,43	Ekim	Kasım	Aralık	Ocak	Subat	Mart	Nissan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylul	Toplam
Sıcaklık Ortalamaları(t)	30	28	27	26	27	28	30	28	35	36	35	34	
Sıcaklık indisi(i)	15.07	13.58	12.85	12.13	12.85	13.58	15.07	13.58	19.03	19.86	19.03	18.21	184.84
Buharlaşma - Terleme(Etp)	221.83	152.53	125.20	102.00	125.20	152.53	221.83	152.53	512.25	596.90	512.25	437.66	
Enlem Düzeltme Katsayısı	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83	
Düzeltilmiş Buharlaşma - Terleme (ET _{pot})	188.56	128.12	128.96	112.20	154.00	189.14	277.29	178.46	532.74	573.03	430.29	363.26	3256.03
Yağış Ortalamaları (P)	20	22	11	10	19	20	29	17	0	6	6	3	163.00
Faydalı Su Yedeği	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Gerçek Buharlaşma - Terleme (ET _{reel})	20.00	122.00	11.00	10.00	19.00	20.00	29.00	17.00	0.00	6.00	6.00	3.00	263.00
Su Fazlası	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Su Noksanı	0.00	6.12	117.96	102.20	135.00	169.14	248.29	161.46	532.74	567.03	424.29	360.26	



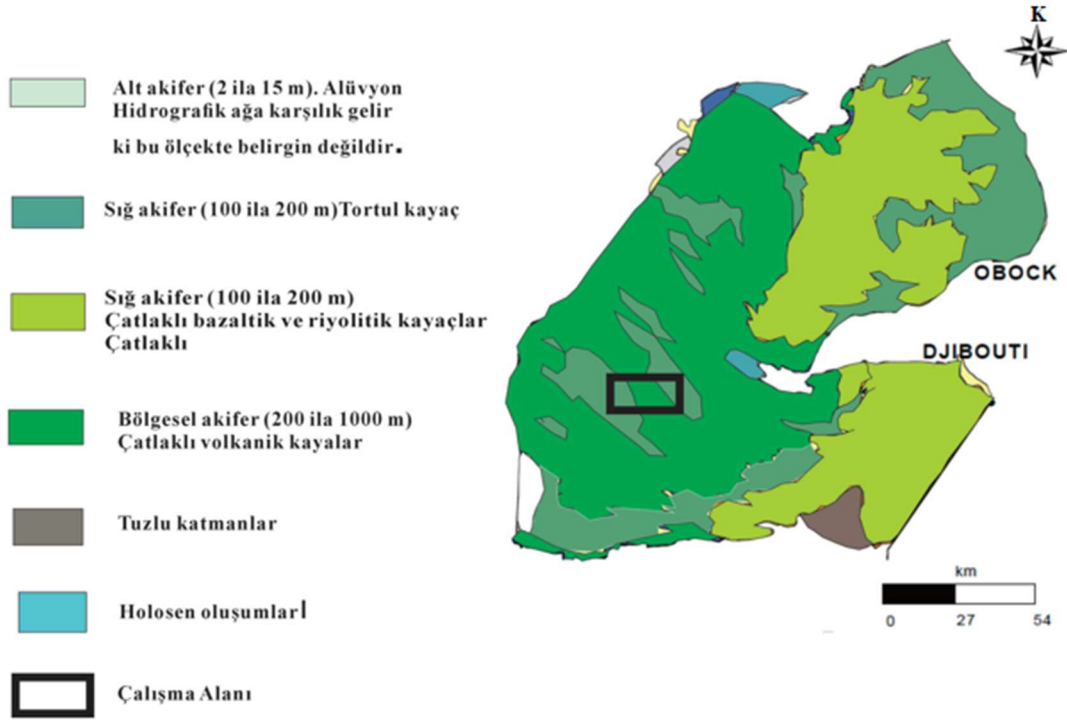
Şekil 4. 12.Yağış- buharlaşma- terlemenin grafiği (2023 yılı)

4.4.3 Akifer sistemi

Cibuti'nin akifer sistemleri esasen volkanik akiferlerle temsil edilmektedir (Şekil 4.13). Stratoid serisi, tüm Afar boyunca dolaşan derin bir bölgesel akifer oluşturur. Ülkede rastlanan diğer volkanik seriler sadece yerel akiferleri oluşturmaktadır.

Sedimanter akiferler kil, silt, diyatomit ve jips şeklindeki göl çökeltilerinden oluşur ve sedimanter havzalarda ve kıyı ovalarında çok nadir görülür.

Cibuti Cumhuriyeti'ndeki akifer sistemleri



Şekil 4. 13.Cibuti'nin akifer sistemleri (Razack ve ark., 2019)

4.4.3.1 Alt Akifer

Sadece vadilerin alüvyon yataklarında bulunan bu akiferler, yüzeysel su yollarının aşağı akış akiferleridir. Genişlikleri onlarca m ile birkaç yüz m arasında değişir ve uzunlukları 20 km'yi aşabilir. Alt akiferler genellikle 10 m'den daha az kalınlıktadır.

4.4.3.2 Tortul akifer

Bu formasyondaki akiferler esas olarak Kretase yaşlı kumtaşları ile temsil edilmektedir. Bu kayaçların geçirgenliği, bölgeyi etkileyen çeşitli tektonik evrelerden kaynaklanan esas olarak fissürelidir. Jeolojik zaman içinde çatlaklarda hidrotermal minerallerin birikmesi bu akiferlerin geçirgenliğini azaltmıştır. Kıyı ovalarının tortuları,

Pleistosen döneminden bu yana çeşitli vadilerin alüvyon yelpazelerinden kaynaklanmaktadır. Ovalar heterojen Pleistosen alüvyonları (kaba ve ince kumlar ve killeri) ile kaplıdır ve Holosen tortuları ve kayalıklarla örtülüdür. Son çökeltilerin niteliği, vadi alüvyon yelpazelerinin eğimine bağlıdır.

Hafif yamaçlarda çökeltiler esasen kumlu ve çakıllıdır. Dik yamaçlar, Tadjourah ovasında olduğu gibi, kayalar ve çakılların hakim olduğu tortulara yol açar. Obock ve Cibuti ovaları esasen deniz kökenli ince tortularla kaplıdır. Bu kıyı ovası akiferleri daha önceki bazaltik oluşumların üzerini örtmektedir.

4.4.3.3 Lokal volkanik akiferler

Bunlar küçük coğrafi alanlarda (2000 km²'den az) bazalt ve riolitlerden oluşan akiferlerdir. Taşkınlar sırasında vadi yataklarına sızma yoluyla yerel olarak yeniden şarj edilirler. Yerel volkanik akiferler genellikle yarı kapalıdır.

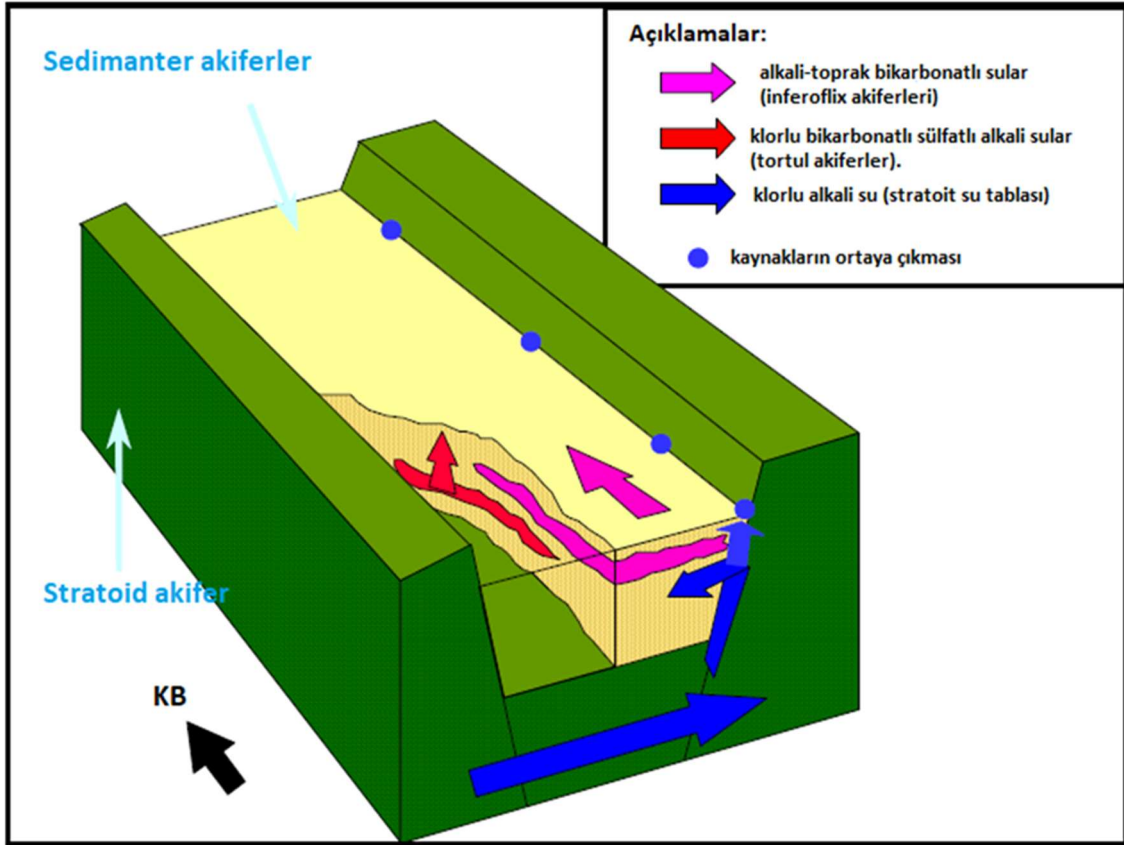
4.4.3.4 Bölgesel volkanik akifer

Bu akiferler için stratoid volkanik seri ülke yüzeyinin 9.000 km²'sinden fazlasını kaplamaktadır. Neredeyse tüm hinterlandı kaplar ve Awash Nehri bölgelerinin ötesinde Etiyopya'nın içine doğru devam eder. Körfez bazaltlarının çağdaşı olan bu volkanik kayalar 1.300 m'ye ulaşan kalınlıktadır ve Afar Depresyonu'nun çoğunu kaplar. Tadjourah Körfezi'nin açılmasına yol açan genel bir genişleme dönemine karşılık gelir (Houssein ve ark., 2014).

4.4.4 Hanle bölgesinin su sirkülasyon modeli

Aquater (1981), kimyasal analiz sonuçlarına ve bunların yorumlanmasının yanı sıra CO₂, NH₃ ve H₃BO₃ anomalilerine dayanarak bir yeraltısuyu sirkülasyon modeli ve Cibuti Cumhuriyeti'nin güneybatı bölgesindeki farklı akiferler arasındaki ilişkileri önermektedir. Hanle Ovası'ndaki ve buna bağlı olarak Gobaad ve Gaggadé ovalarındaki tortul akiferler (sığ ve derin), stratoid akifer tarafından temsil edilen ana kaya çatısı ve yüzey jeomorfolojisi tarafından belirlenen bir geometri ile karakterize edilir. Yeniden dolum, vadi yataklarındaki sel sularının akışına bağlıdır. Stratoit bazalt ve riolit akiferin geometrisi, Etiyopya Rift Vadisi'ne uzanmasıyla karmaşıklaşmaktadır. Yeraltısuyu

dolaşımı, Etiyopya'da yeniden beslenme bölgesini temsil eden aşağı Awash Nehri vadisiyle bağlantılıdır. Hanlé Ovası'nda su kaynakları ve jeotermal amaçlarla açılan çeşitli sondaj kuyuları, yeniden şarjı ancak uzaktan mümkün olan bir hapis su tablasını ortaya çıkaran piezometrik seviyeleri göstermektedir (Şekil 4.14).

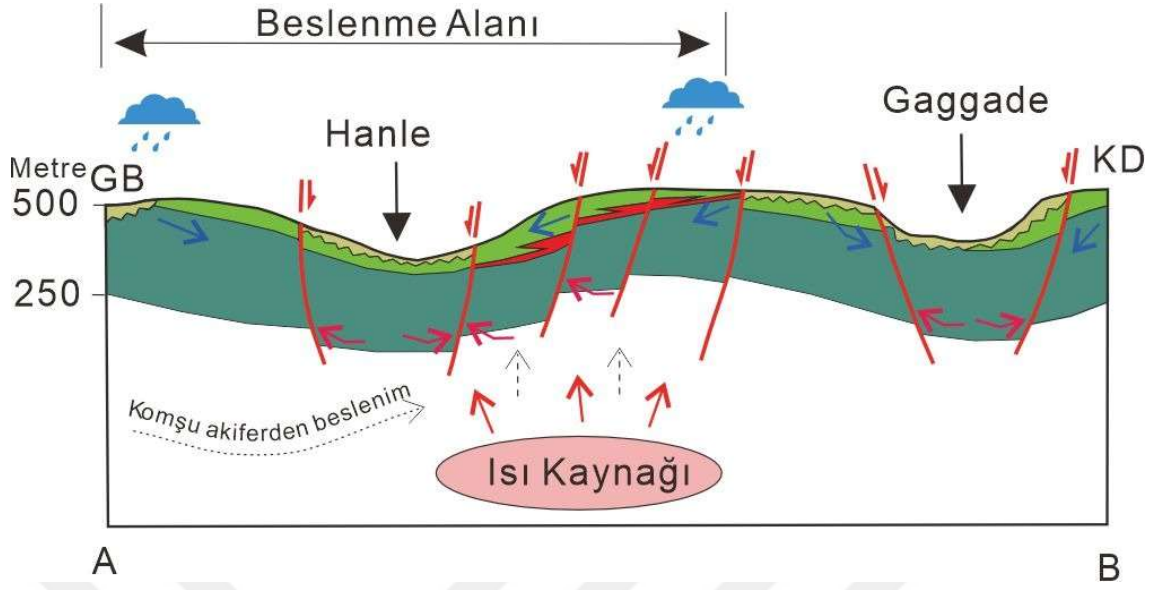


Şekil 4. 14.Hanle grabeninin hidrojeolojik diyagramı. (Aqater,1982)

4.4.5 Hanle jeotermal sistemi

Hanle'ye doğru yeraltısuyu hareketleri, jeokimyasal ve izotopik veriler ve Hanle'nin jeolojik çalışmasının sonuçları temelinde, Hanle'nin kavramsal bir modeli önerilmiştir (Şekil 4.15).

Ayrıca, jeotermal suyun düşük sıcaklığı ($T \approx 120^\circ\text{C}$) nedeniyle sondajdan kısa bir süre sonra kapatılan yaklaşık 2038 m derinliğinde bir jeotermal kuyuya sahip Hanle bölgesinin jeotermal ön fizibilite çalışması (Aqater, 1989), havza dışındaki akiferlerin de Hanle'nin jeotermal sistemini beslediğini açıkça göstermektedir (BFGUR, 1999).



Şekil 4. 15.A) Hanle jeotermal sisteminin kavramsal modelinin basitleştirilmiş bir taslağı (Awaleh ve ark.,)

Bu çalışmanın farklı jeotermometrik yaklaşımları ortalama $145^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa yakınsamaktadır (Awaleh, 2020), bu nedenle ana jeotermal rezervuar maksimum 2400 m derinlikte bulunabilir.

Bununla birlikte, sınıraşan akifer (TBA) akiferine Hanle'de yaklaşık 200 m'den ulaşılabilir (BFGUR, 1999). Dolayısıyla, TBA akifer yeraltı suyu sadece HGGF'nin derin jeotermal rezervuarını beslemekle kalmaz, aynı zamanda Hanle'den yükselen termal sularla da karışabilir (Şekil 4.15).

Holosen'de yeniden şarj olan (Awaleh ve ark., 2017) ve batıdaki Orta Bara'dan Hanle-Gaggade çöküntülerine akan evrimleşmiş termal su da Hanle'nin jeotermal rezervuarını yeniden şarj edebilir (Şekil 4.15).

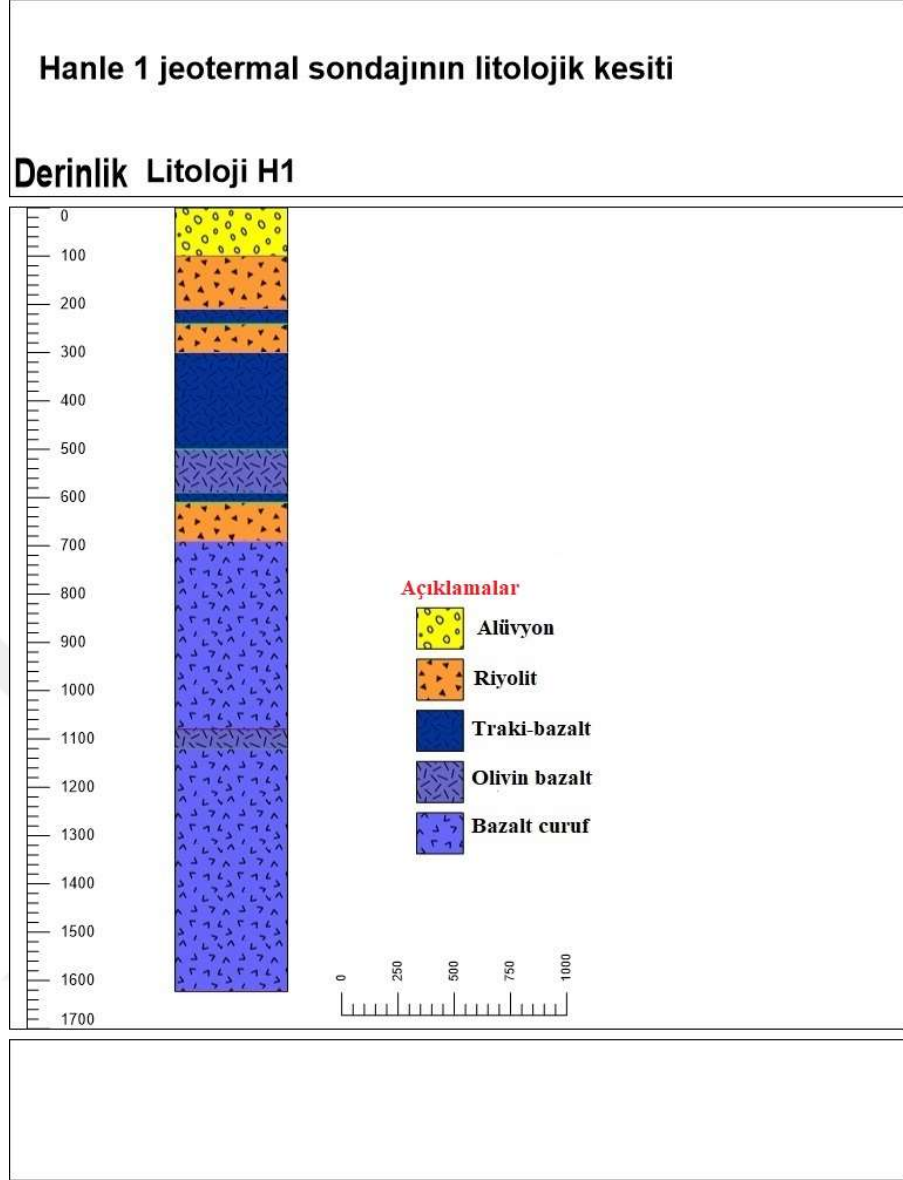
Ayrıca, termal suların kırıklar boyunca yükselişi sırasında Hanle'den gelen jeotermal akışkan, TBA'nın meteorik suyuyla ve bir dereceye kadar Holosen'de Orta Bara'dan Hanle-Gaggade çöküntülerine akan evrimleşmiş eski termal suyla karıştıktan sonra yerel alt-akış akiferin meteorik tatlı suyuyla değişen derecelerde karışabilir (Şekil 4.15).

4.4.6 Sıcak su kuyuları

4.4.6.1 Hanle 1 (H1) jeotermal sondaj kuyusu

H1 kuyusunun sondajı 2 Ocak 1987'de başlamış ve 2 Mart 1987'de sona ermiştir. Ulaşılan son derinlik 1623 m ve kaydedilen maksimum sıcaklık 1420 m'de 72 °C olmuştur (Aquater, 1987).

Hanle 1 (Şekil 4.16) kuyusunun geçtiği jeolojik oluşumlar şunlardır; 0-94 m Lacustrine sedimanter sekans, 94-307 m Riyolitik kompleks ve 307 -1623 m Bazaltik akıntıların monoton dizisi, olivin-bazaltlardan orta trakibazaltik terimlere (ferrobazaltlar) kadar. 580-678 m arasında küçük riyolitik arakatmanlar. Bir alt delik karotu (1622-1623 m) toplanmış ve tarihlendirilmiştir (1,4 My) (Aquater, 1987). Tatlı su içeren başlıca geçirgen aralıklar delinmiştir. Geçirgen bölgeler şu şekildedir: riyolitlerde 100 ila 300 m arasında ve riyolit bazalt kontağında yaklaşık 602 ila 800 m arasında ve ara akış skorlarında. Kuyu yaklaşık 800 m'nin altında tamamen geçirimsizdir.

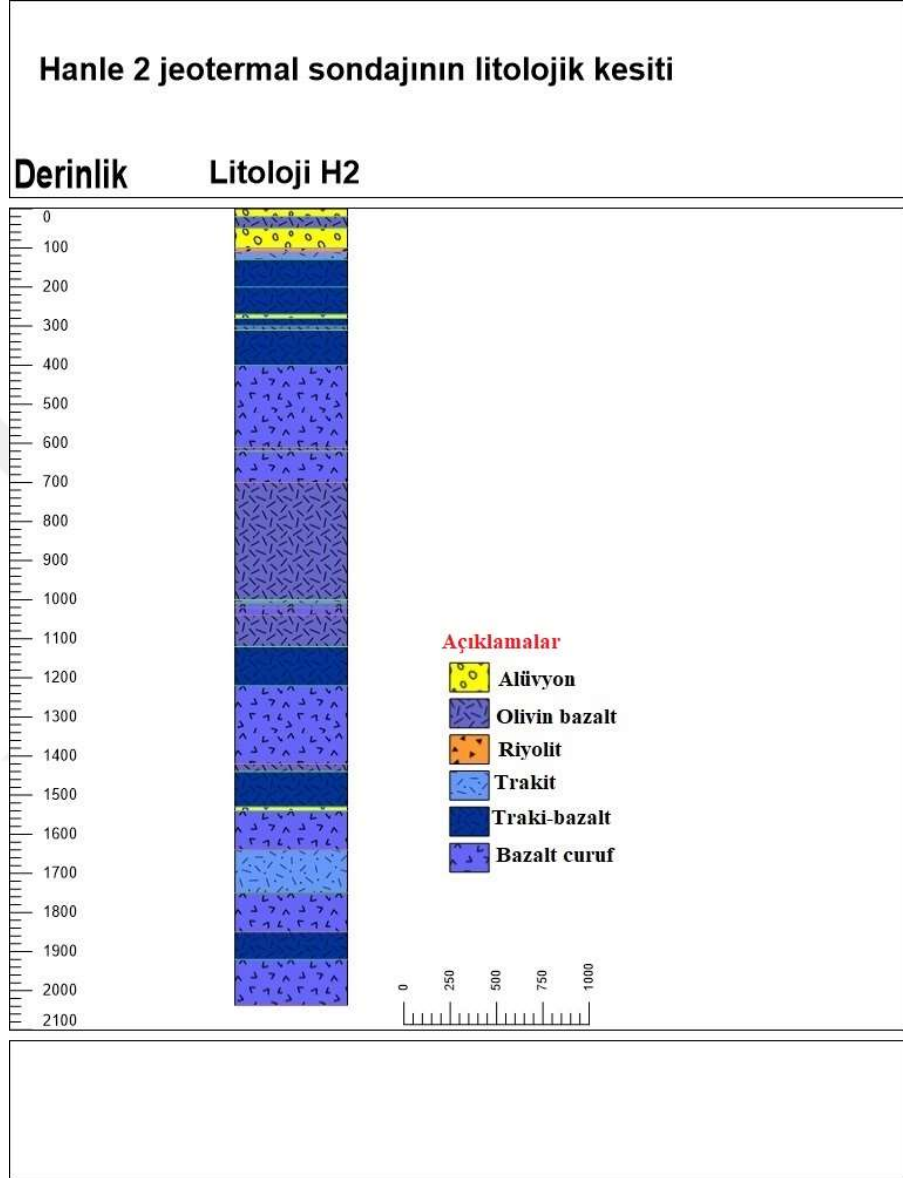


Şekil 4. 16.Hanle 1 jeotermal sondajının jeolojik kesiti

4.4.6.2 Hanle 2 (H2) jeotermal sondaj kuyusu

Hanle 2 kuyusu (Şekil 4.17) 8 Mart 1987 tarihinde açılmaya başlanmış ve 23 Nisan 1987 tarihinde durdurulmuştur. Ulaşılan son derinlik 2038 m ve kaydedilen maksimum sıcaklık 2020 m'de 124°C olmuştur (Aquater, 1987). Delinen ana kaya türü bazalttır. Sekansın üst kısmında trakitler, riyolitler, riyolitik tüfler ve tortul alüvyon seviyeleri gibi diğer kaya türlerine rastlanmıştır. 300 m'nin altında, çok ince sedimanter siltli seviyelerle birlikte, skoriasöz ara akış seviyeleri ile arakatlı bazaltik, olivin-bazaltik ve daha farklılaşmış trakibazaltik lav akıntılarından (ferrobazalt) oluşan sekans çok monoton hale gelir. Bir dip deliği karotu (2033-2038 m) toplanmış ve tarihlendirilmiştir (18,8 My) (Aquater, 1987). Kuyunun üst kısmında (0 ila yaklaşık

450/500 m), skoriasöz ara akış seviyelerine veya alüvyon yataklarına yerleştirilmiş yüksek geçirgen horizonlar açılmıştır. 450 ila 500 m arasında formasyon geçirimsizdir (1590 m'de bulunan olası bir küçük su girişi hariç).



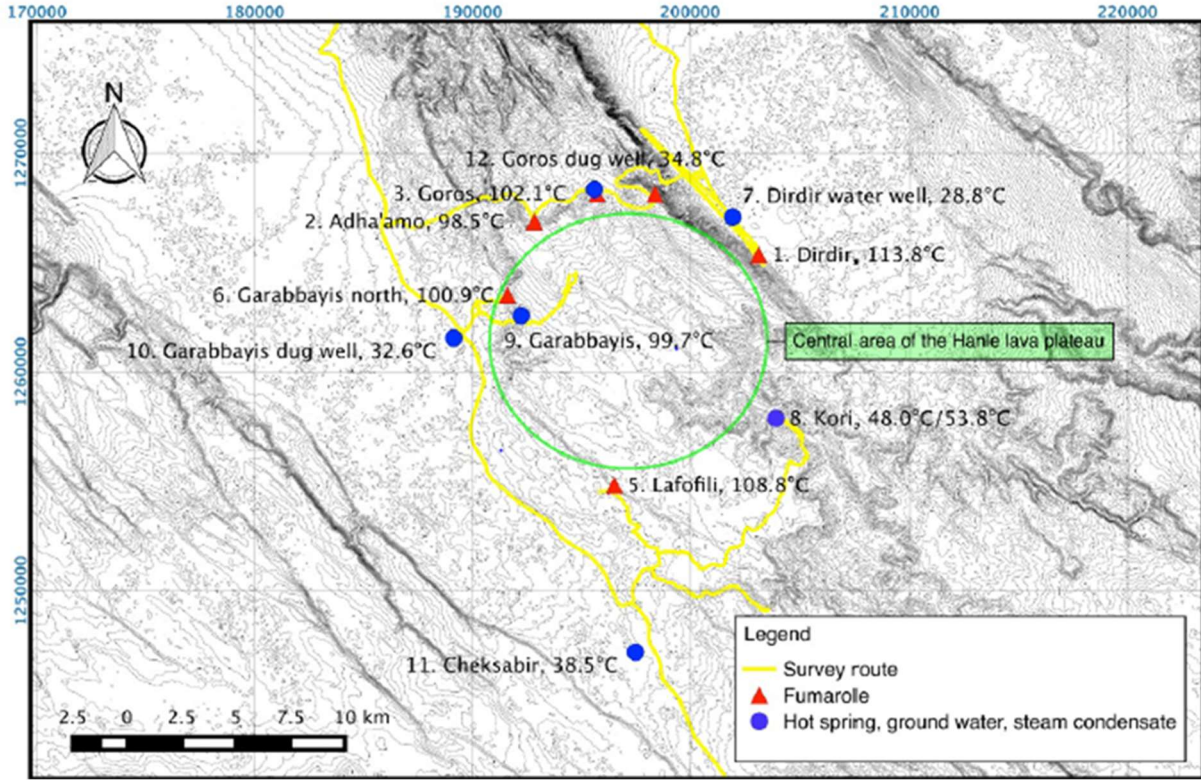
Şekil 4. 17.jeotermal sondaj kuyusu

4.5 HIDROJEOKIMYA

4.5.1 Suyun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Çalışma alanında yağışlı ve kurak dönemlerde numuneler alınmış (Şekil 4.18) ve fiziko-kimyasal analizler Fransa'daki Korsika Üniversitesi ve Japonya'daki Kuysu

Üniversitesi jeokimya laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir (Tablo 4.4). Elde edilen veriler ve bilgisayar programları kullanılarak Schoeller, Piper ve tuzluluk diyagramları da dahil olmak üzere çeşitli diyagramlar çizilmiştir.



Şekil 4. 18. Jeokimyasal çalışma için örnekleme yerleri haritası

Tablo 4. 4. Su numuneleri için analiz sonuçları

	tip	Sezons	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	T°C	pH	CE (µS.cm ⁻¹)	¹⁸ O	δD
Dirdir	sondaj	yağışlı	46.8	4.8	862.0	3.6	852.0	589.0	198.0	28.8	7.5	4170.0	-2.5	-21.0
Kori	Sıcak kaynak	yağışlı	50.2	4.0	724.0	20.3	1000.0	224.0	169.0	48.0	7.8	3780.0	-0.4	-5.0
Garrabeyis	buhar	yağışlı	79.3	29.1	264.7	3.9	362.8	267.5	69.5	58.4	7.9	1968.0	-8.5	-51.0
Cheiksabir	sondaj	yağışlı	21.0	24.4	201.0	5.7	108.0	160.0	306.0	38.5	7.9	1279.0	-0.6	-
Goros	sondaj	yağışlı	24.0	3.1	110.0	2.3	39.0	55.0	232.0	34.8	8.1	711.0	0.1	2.0
Garabbayis	sondaj	yağışlı	36.0	3.4	156.0	6.8	43.0	256.0	104.0	32.6	8.3	1037.0	1.1	9.0
Kori	Sıcak kaynak	kurak	29.0	3.6	262.0	14.0	273.0	176.0	112.0	53.8	8.0	1617.0	-	-6.0
Chek Sabir	sondaj	kurak	83.9	18.9	142.5	4.5	87.4	317.0	204.7	42.5	7.5	965.0		
Garabbayis	sondaj	kurak	0.0	0.0	<0.01	<0.01	0.0	0.7	153.0	99.7	5.8	36.4		

Gorabous	sondaj	kurak	132.5	0.0	381.2	17.5	199.5	595.3	311.8	35.8	8.29	1812.0		
Kouxi Kooma	sondaj	kurak	141.3	24.7	97.4	4.3	97.4	273.0	212.7	38.0	7.4	972.0		
Garrabeyis	Yagmus suyu	kurak	42.0	0.8	66.1	5.4	13.8	73.9	185.7	31.0	8.6	406.0		

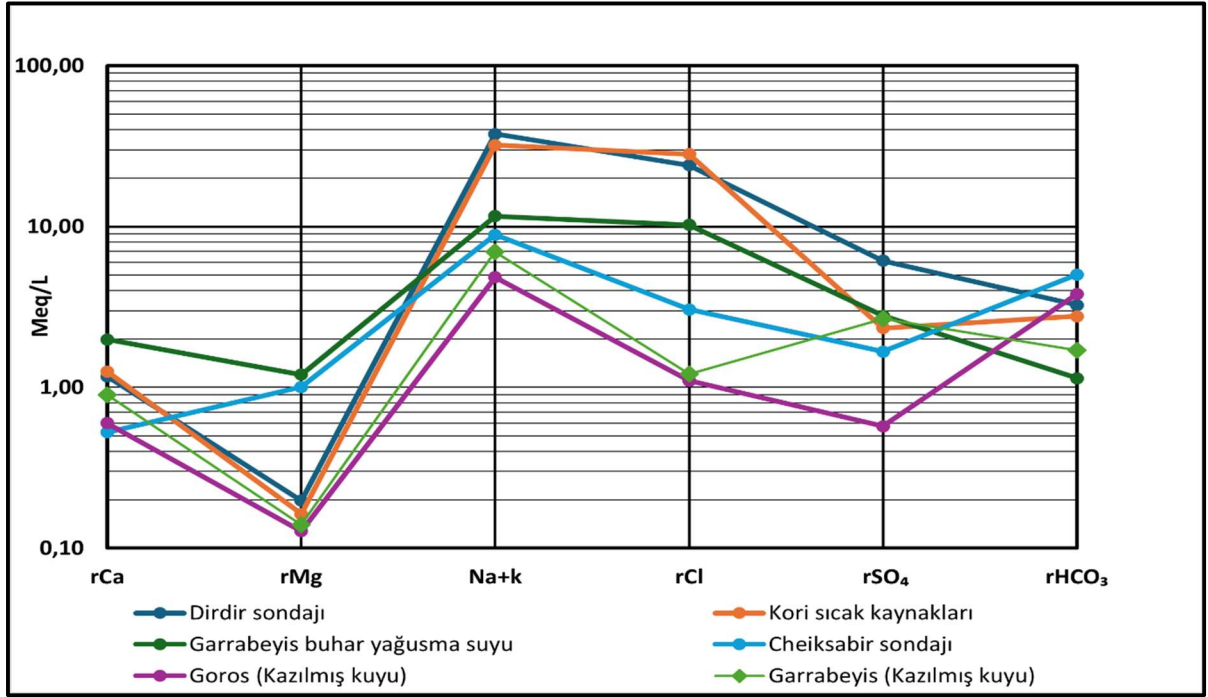
4.5.1.1 Scholler diyaframı

Çalışma alanındaki sondaj kuyuları için kurak ve yağışlı dönemler için yarı logaritmik Schoeller diyaframları hazırlanmıştır (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20). Schoeller diyaframı, kurak ve yağışlı dönemlerde su iyonlarını birbirine bağlayan çizgilerin neredeyse birbirine paralel olduğunu göstermektedir ki bu da suların aynı kökene sahip olduklarını göstermektedir.

Sondaj suyu örneklerinden elde edilen değerler kullanılarak oluşturulan Schoeller diyaframı, iyonların sıralamasının $r(\text{Na}+\text{K}) > r\text{Ca} > r\text{Mg}$, $r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{HCO}_3$ şeklinde olduğunu ve iyonları birbirine bağlayan çizgilerin birbirine paralel olduğunu göstermektedir. Tablo 4.5 ve Şekil 4.19, Hanle bölgesindeki suyun benzer litolojik özelliklere sahip akiferlerden geldiğini göstermektedir.

Tablo 4. 5. Çalışma alanındaki yağışlı sezonların fizikokimyasal analiz sonuçları (meq/l)

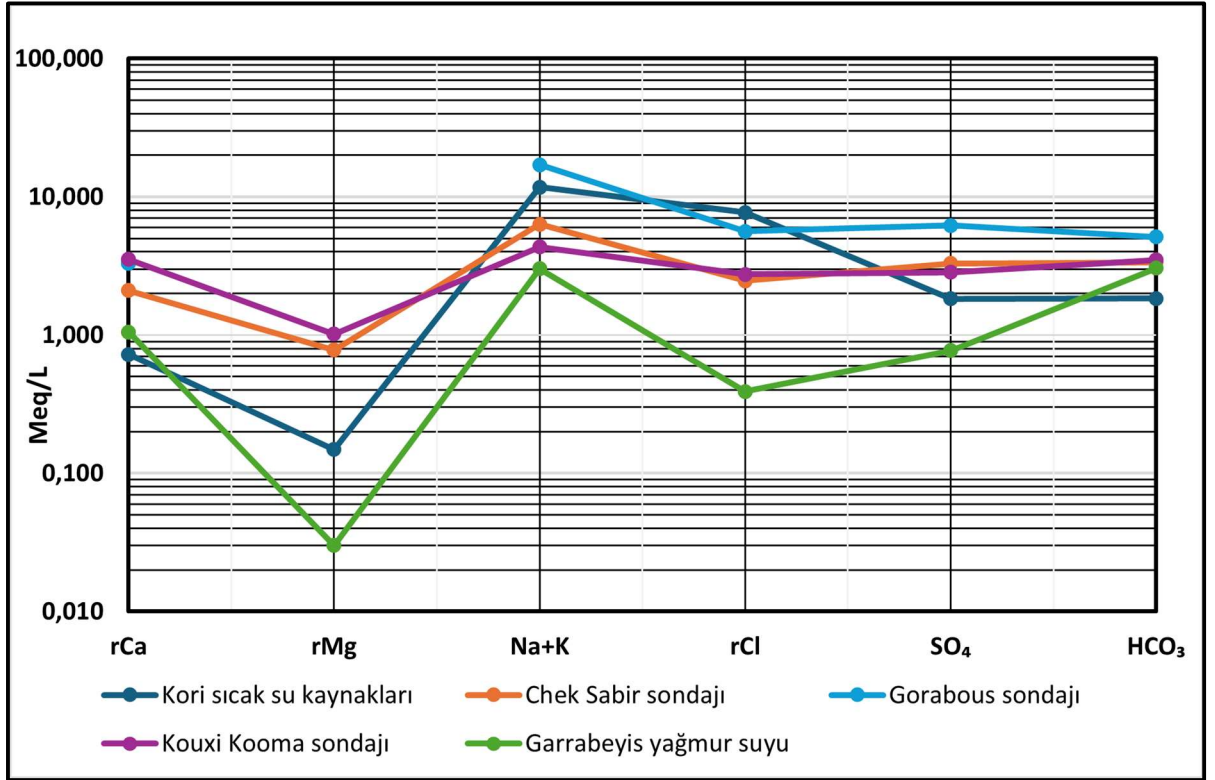
	rCa	rMg	Na+k	rCl	rSO ₄	rHCO ₃	T°C	pH	CE (μS.cm ⁻¹)
Dirdir sondajı	1.17	0.20	37.57	24.03	6.13	3.25	28.8	7.5	4170
Kori sıcak kaynakları	1.26	0.16	32.00	28.21	2.33	2.77	48.0	7.8	3780
Garrabeyis buhar yağusma suyu	1.98	1.20	11.61	10.23	2.78	1.14	58.4	7.9	1968
Cheiksabir sondajı	0.53	1.00	8.89	3.05	1.67	5.02	38.5	7.9	1279
Goros (Kazılmış kuyu)	0.60	0.13	4.84	1.10	0.57	3.80	34.8	8.1	711
Garrabeyis (Kazılmış kuyu)	0.90	0.14	6.96	1.21	2.67	1.71	32.6	8.3	1037



Şekil 4. 19.Çalışma alanındaki yağışlı sezonların Schoeller diyagramı

Tablo 4. 6.Çalışma alanındaki suların kurak sezona ait fizikokimyasal analiz sonuçları (meq/l)

	rCa	rMg	Na+K	rCl	SO ₄	HCO ₃	T°C	pH	CE (μS.cm ⁻¹)
Kori sıcak su kaynakları	0.725	0.148	11.750	7.701	1.832	1.836	53.8	8	1617
Chek Saabir sondajı	2.099	0.780	6.312	2.465	3.300	3.356	42.5	7.5	965
Garabbayis buhar yağusma suyu	0.001	0.000	0.001	0.001	0.008	2.508	99.7	5.8	36
Gorabous sondajı	3.312	0.000	17.021	5.628	6.198	5.112	35.8	8.29	1812
Kouxi Kooma sondajı	3.531	1.017	4.344	2.746	2.842	3.486	38.0	7.4	972
Garrabeyis yağmur suyu	1.050	0.030	3.010	0.390	0.770	3.040	31.0	8.6	406



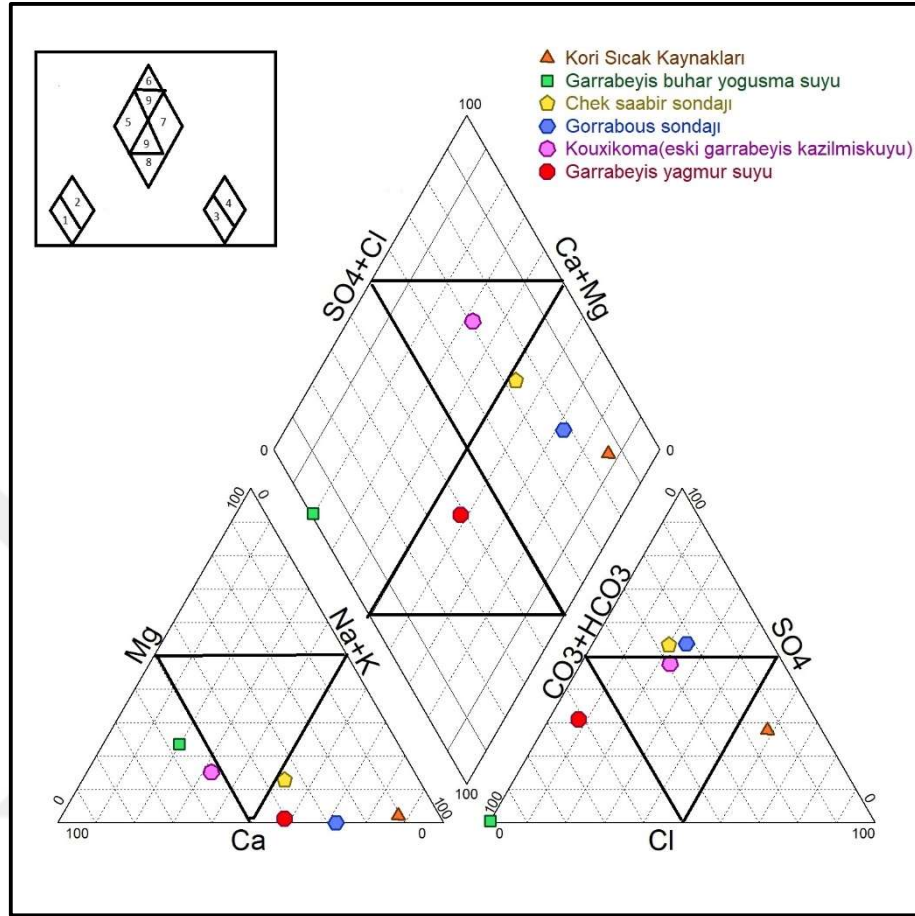
Şekil 4. 20.Çalışma alanındaki kurak sezonların Schoeller diyagramı

4.5.1.2 Piper diagramı

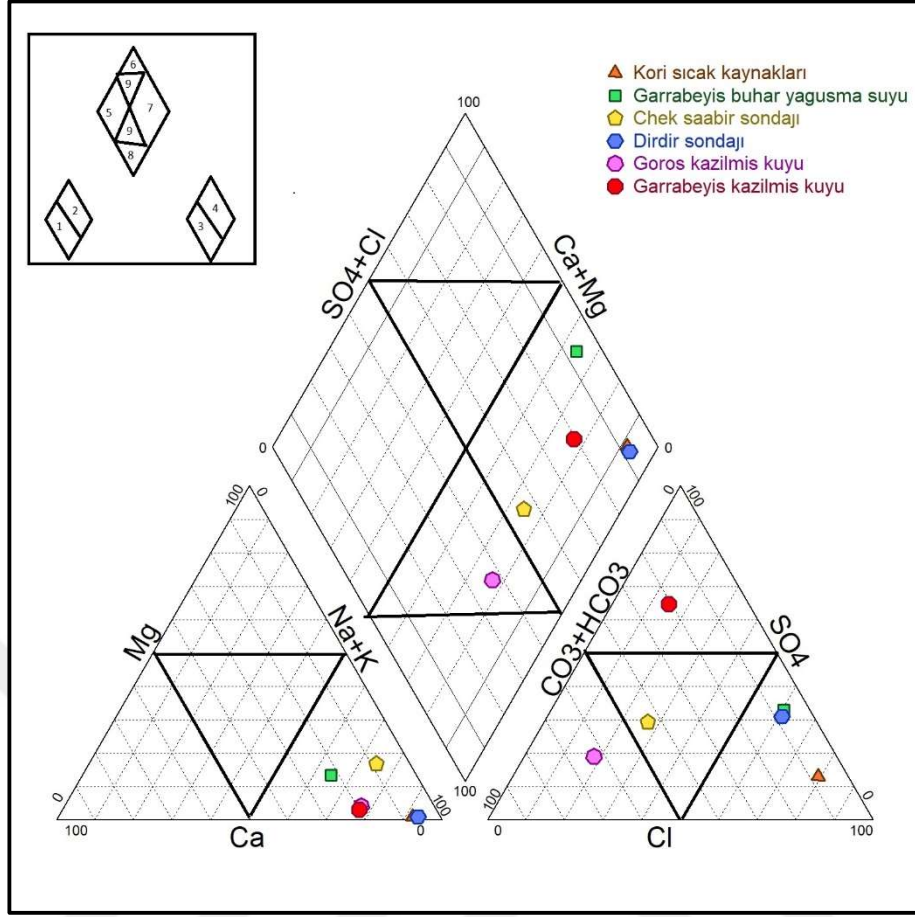
Piper diyagramına göre, çalışma alanındaki sular iki dönem boyunca farklı gruplar halinde neredeyse aynı bölgelere dağılmıştır. Ağırlıklı olarak 2, 4 ve 7. bölgelerde gruplanmışlardır. Sonuç olarak, $Ca + Mg > Na + K$ karbonat ve sülfat suları, $Na + K > Ca + Mg$ tuz ve soda sularıdır. Ayrıca, 5. bölgede değerlendirildiğinde, karbonat sertliği ve karbonat olmayan sertlik $CaCO_3$ ve $MgCO_3$ sularıdır ve 7. bölge $NaCl$, $NaSO_4$ ve KCl sularının karbonat olmayan alkalinitesi > karbonat alkalinitesidir (Şekil 4.21). Öte yandan, yaz döneminde, Garrabeyis buhar yoğunlaşımını haricinde, çalışma alanındaki sular 2. ve 7. bölgelerde çok baskın bir şekilde gruplanmıştır (Şekil 4.21). $Na + K > Ca + Mg$ tuzlu ve sodik sular ile karbonatsız alkalinite > karbonatlı alkalinite $NaCl$, $NaSO_4$ ve KCl suları (Şekil 4.22). Garrabeyis buhar yoğunlaşımında, 5. bölgeden (kış) 7. bölgeye (yaz) tamamen hareket eden küçük bir farklılık gözlemliyoruz.

Yani Garrabeyis suları karbonat sertliği %50 den fazla olan sular sınıfına girmektedir.

Buna göre; $(Ca + Mg) < (Na + K)$, $(SO_4 + Cl) > (CO_3 + HCO_3)$ ve karbonat olmayan alkalinitesi %50 den fazla olan sular sınıfına girmektedir.



Şekil 4. 21. Çalışma alanının Piper diyagramı (yağışlı sezon)

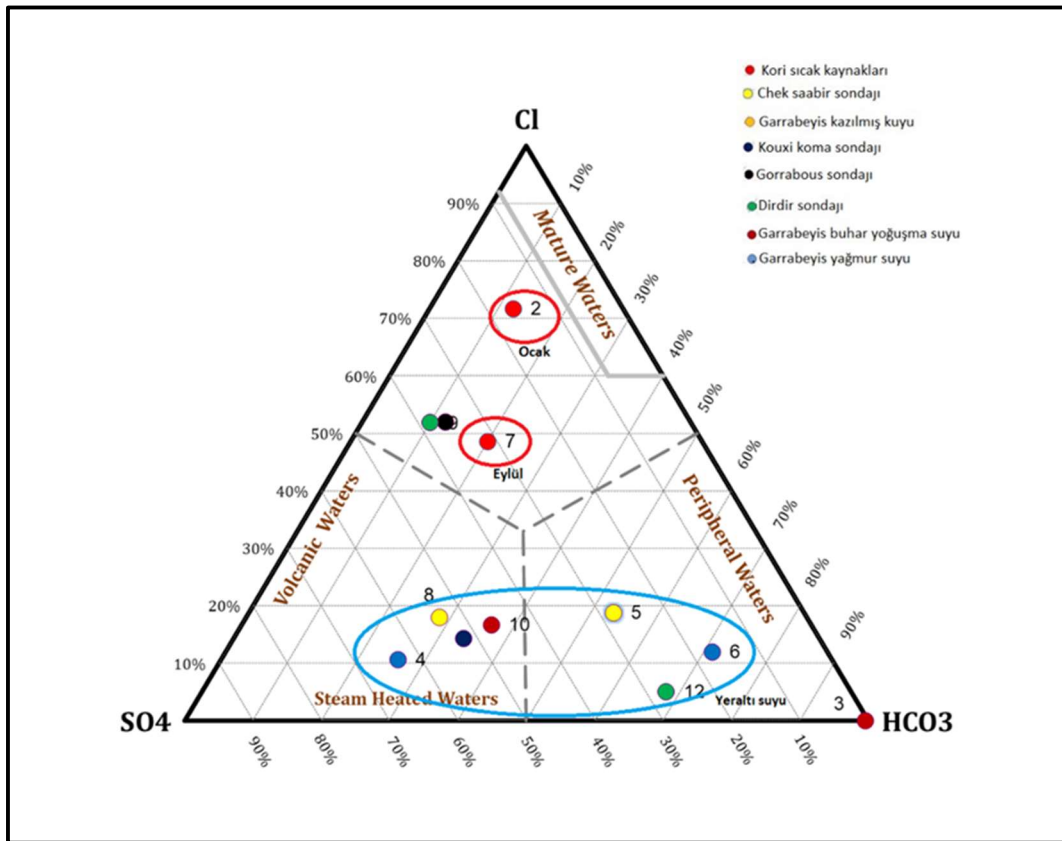


Şekil 4. 22.Çalışma alanının Piper diyagramı (kurak sezon)

4.5.1.3 Cl-SO₄-HCO₃ diagramı

Ana anyonlar olan Cl, SO₄ ve HCO₃'ün göreceli içerikleri Şekil 4.23'de gösterilmektedir. Orijinal bileşenler Pasifik kıyısı boyunca uzanan dalma-batma bölgelerinden kaynaklanmaktadır (Giggenbach ve ark., 1991); bunlar olgun, çevresel, buharla ısıtılmış ve volkanik sularıdır.

Ocak ayında Kori ve Dirdir nispeten yüksek Cl seviyelerine sahipti. Cibuti'de, kıyı bölgelerinde ve Asal Gölü yakınlarında çok daha yüksek Cl konsantrasyonları gözlenmektedir. Mutlak Cl konsantrasyonu kıyı bölgelerinde ve Asal Gölü yakınlarında çok yüksek ve Hanle düzleminde (Garrabeyis ile 13.79) ve lav platosunda orta düzeyde olma eğilimindedir. Bu Cl içeriğinin kaynağı, kıyı bölgeleri ve Asal Gölü için modern deniz suyu ve geçmiş bir deniz transgresyonu sırasında bir oluşumda yakalanan fosil deniz suyu veya evaporit gibi görünmektedir.

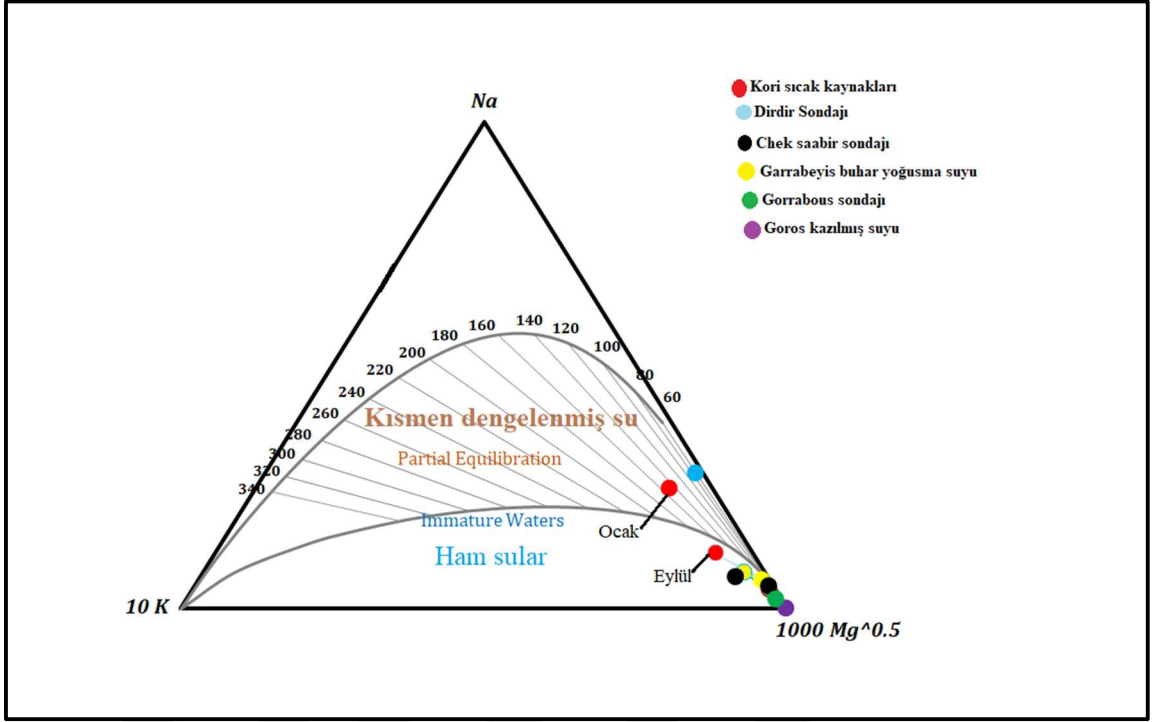


Şekil 4. 23.Su örneklerinin bağlı Cl, SO4 ve HCO3 içerikleri

4.5.1.4 Na, K, and Mg diagramı

Kori termal kaynağının kimyasal bileşimi temelinde su-kaya etkileşimini incelemek için Na, K ve Mg'nin göreceli içerikleri (Giggenbach ve ark., 1988) Şekil 4.24'de gösterilmiştir.

Diyagram, Ocak ayında Kori kaplıcasının kaya ile kısmen dengede olduğunu göstermektedir; bu da Kori kaplıcasının etrafındaki yeraltı bölgesinin su-kaya etkileşiminin bir dereceye kadar devam ettiği sıcaklık koşullarına sahip olduğu anlamına gelmektedir. Öte yandan, Eylül ayında Kori kaplıcası kısmi dengenin dışında olgunlaşmamış sular bölgesinde çizilmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi, bunun nedeni muhtemelen Kori kaplıca suyunun Eylül ayında Ocak ayına kıyasla yeraltı suyuyla daha fazla seyreltilmiş olmasıdır.

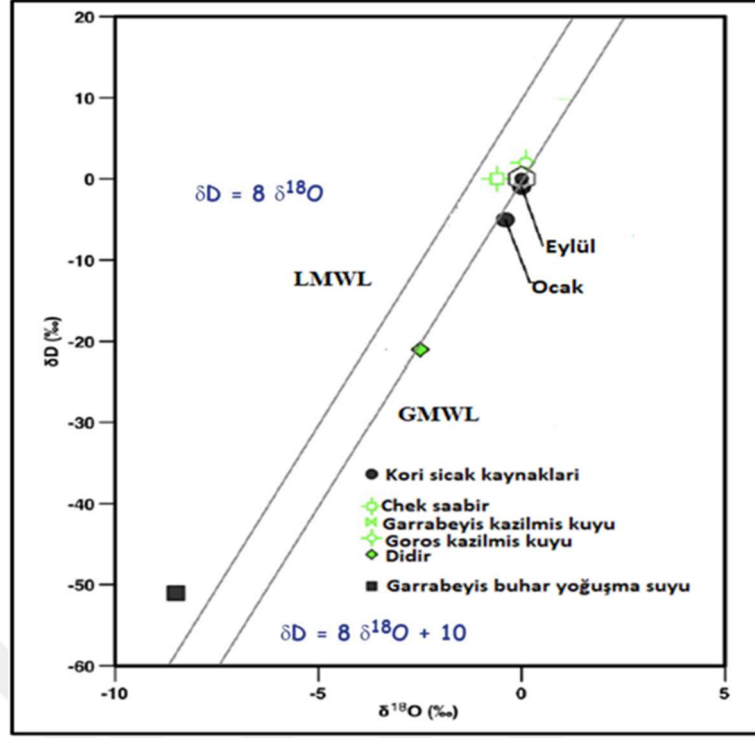


Şekil 4. 24.Su örneklerinin bağıl Na, K ve Mg içerikleri

4.5.2 İzotop özellikleri

Garabbayis'teki kaplıcalardan, su kuyularından ve fumarollerden (buhar yoğunlaşması) alınan su örneklerinin hidrojen ve oksijen izotop oranları arasındaki ilişki Şekil 4.25'de gösterilmektedir. Buhar kondensatı haricinde örneklerin çoğu 6 eğimli bir doğru üzerinde ve yakınında gösterilmektedir. Kondensat çizgiden uzakta temsil edilmektedir ve izotopik oranı sıcak su kaynakları ve su kuyularından önemli ölçüde daha düşüktür. Bunun nedeni suyun kaynaması sırasında izotopik fraksiyonlaşmadır.

Bu süreçte, buhar hafif izotoplar açısından zenginleşir, dolayısıyla izotopik oran düşük olur. Şekil 4.25, Ocak ve Eylül ayları arasında Kori kaplıcasındaki izotopik oranın kaydığını göstermektedir; izotopik oran yeraltı suyuna (su kuyuları) yaklaşmıştır. Bu kayma muhtemelen, yukarıda ana anyon bağıl içerikleri ve Na ile Cl arasındaki konsantrasyon ilişkisi tarafından önerildiği gibi, Eylül ayında yeraltı suyunun Kori kaplıcasına daha fazla karışması anlamına gelmektedir.



Şekil 4. 25. Hanle bölgesinin hidrojen ve oksijen izotop oranları arasındaki ilişki

4.5.3 Doygunluk endeksi hesaplaması

Hanle bölgesindeki jeotermal rezervuarların sıcaklığını tahmin etmek için, çeşitli su sondaj kuyularının doygunluk endeksi Phreeqc yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 4.7, Tablo 4.8, Tablo 4.9, Tablo 4.10, Tablo 4.11). Elde edilen doygunluk endeksi sonuçları aşağıdaki Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30'de gösterilmektedir.

Phreeqc yazılımını kullanarak, 160°C sıcaklığa kadar her bir numunenin doygunluk indeksini belirleyebildik. En yüksek sıcaklık Garrabeyis sondaj kuyusunda yaklaşık 120 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.28). Diğer sondaj kuyularındaki sıcaklıklar 40 °C ila 80 °C arasında değişmektedir.

Jeotermal sistemler genellikle dolomit, aragonit, kalsit gibi mineralleri içerirken, Hanle bölgesinde bulunanlar alunit, anhidrit, silvit, jips ve melenterit gibi farklı minerallerden oluşmaktadır.

Tablo 4. 7. Dirdir sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.

Sıcaklık	Alunit	Anhidrit	Sylvit	Gibbsit	Alçı	Jarosite-K	Melanterit
20	-4.06	-1.68	-6.7	0.59	-1.32	-4.72	-7.59
40	-7.17	-1.49	-6.81	-0.14	-1.35	-6.06	-9.22
60	-10.32	-1.27	-6.9	-0.93	-1.32	-7.86	-10.84
80	-13.07	-1.03	-6.99	-1.6	-1.27	-9.58	-12.29
100	-15.48	-0.79	-7.07	-2.19	-1.2	-11.2	-13.6
120	-17.6	-0.53	-7.14	-2.7	-1.11	-12.75	-14.79
140	-19.49	-0.28	-7.21	-3.15	-1.01	-14.22	-15.87
160	-21.17	-0.02	-7.28	-3.54	-0.91	-15.63	-16.87

Tablo 4. 8. Kori sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.

Sıcaklık	Alunit	Anhidrit	Fluorit	Gibbsit	Alçı	Jarosite-K	Melanterit
20	-5.31	-1.99	-0.47	0.49	-1.63	-5.91	-8.97
40	-8.98	-1.79	-0.7	-0.43	-1.65	-7.87	-10.81
60	-12.14	-1.57	-0.87	-1.22	-1.62	-9.8	-12.47
80	-14.89	-1.33	-0.98	-1.9	-1.57	-11.62	-13.96
100	-17.3	-1.08	-1.06	-2.49	-1.5	-13.35	-15.31
120	-19.42	-0.83	-1.1	-3	-1.41	-15.01	-16.53
140	-21.3	-0.57	-1.11	-3.44	-1.31	-16.58	-17.65
160	-22.98	-0.32	-1.11	-3.84	-1.2	-18.07	-18.67

Tablo 4. 9. Garrabeyis sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.

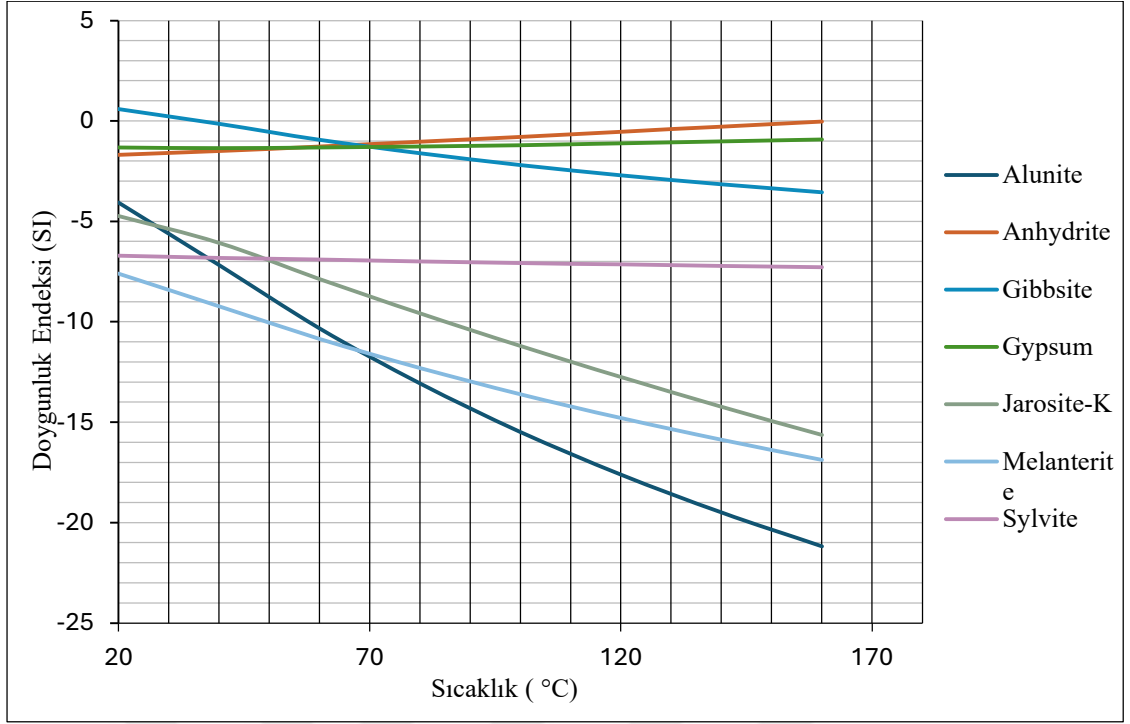
Sıcaklık	Alunit	Anhidrit	Fluorit	Alçı	Halit	Jarosite-K	Silvit
20	-4.88	-6.92	-8.07	-6.56	-13.88	-20.02	-13.42
40	-6.17	-6.69	-8.14	-6.54	-13.9	-17.16	-13.52
60	-8.21	-6.44	-8.28	-6.49	-13.91	-14.78	-13.6
80	-10.42	-6.16	-8.37	-6.4	-13.92	-13.57	-13.68
100	-12.56	-5.88	-8.42	-6.29	-13.93	-13.99	-13.74
120	-14.53	-5.59	-8.44	-6.17	-13.94	-14.92	-13.81
140	-16.31	-5.3	-8.44	-6.03	-13.95	-15.9	-13.86
160	-17.9	-5	-8.41	-5.88	-13.96	-16.85	-13.91

Tablo 4. 10. Chek saabir sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması.

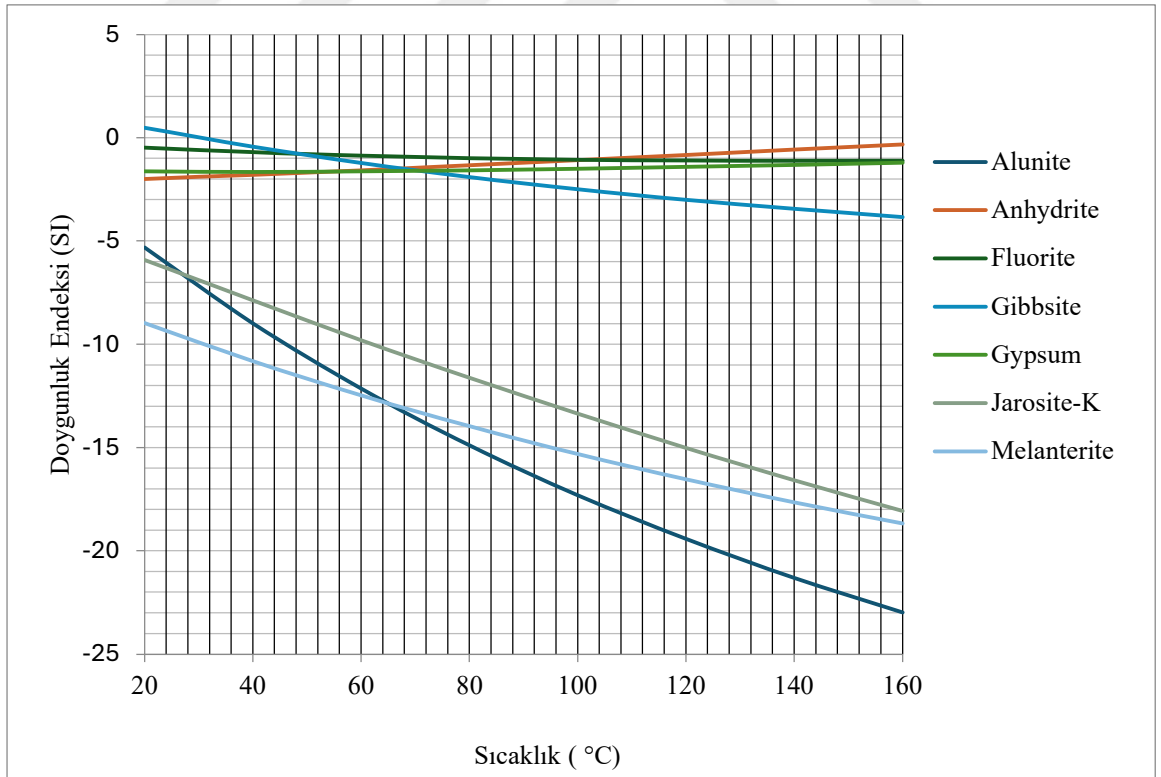
Sıcaklık	Anhidrit	Florit	Goetit	Alçı	Halit	Jarosite-K	Silvit
20	0.06	1.55	8.57	0.42	-3.6	2.68	-4.51
40	0.24	1.3	8.13	0.37	-3.63	0.7	-4.63
60	0.44	1.12	7.65	0.37	-3.66	-1.34	-4.74
80	0.65	0.99	7.18	0.41	-3.68	-3.29	-4.85
100	0.89	0.9	6.72	0.47	-3.71	-5.17	-4.95
120	1.12	0.85	6.27	0.54	-3.74	-6.96	-5.05
140	1.37	0.82	5.85	0.62	-3.77	-8.66	-5.14
160	1.61	0.81	5.44	0.71	-3.81	-10.26	-5.23

Tablo 4. 11. Goros sondaj kuyusu için doygunluk indeksinin hesaplanması

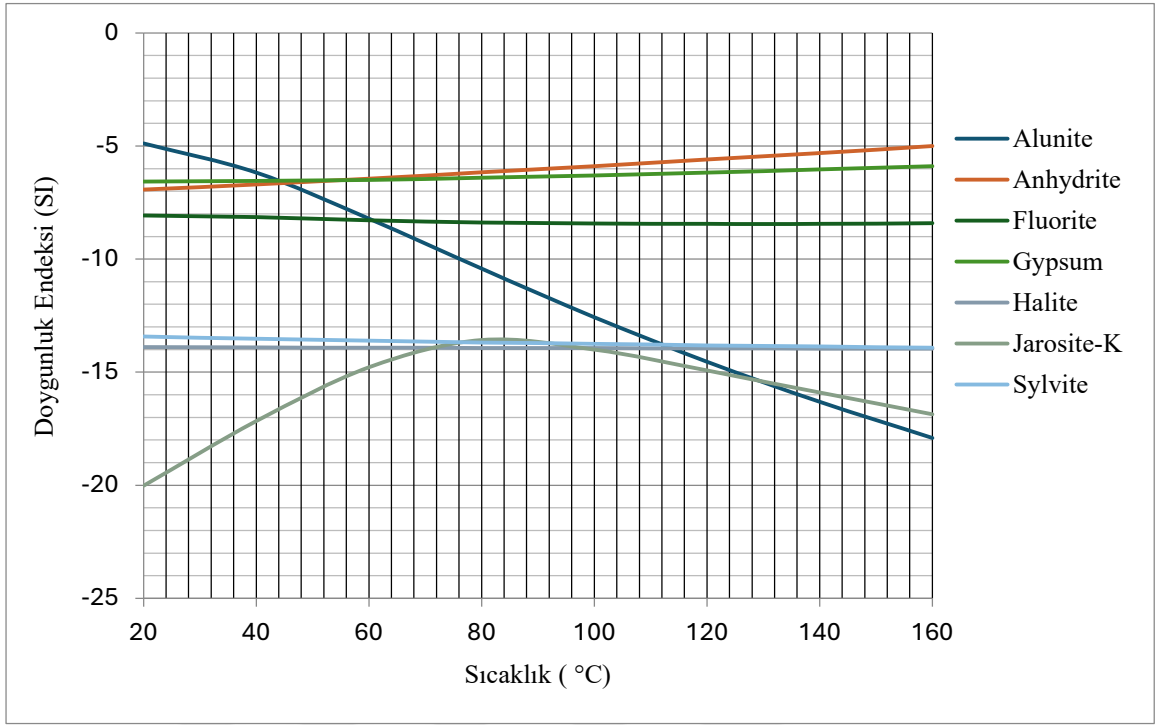
Sıcaklık	Alunit	Anhidrit	Florit	Gibbsit	Alçı	Halit	Jarosite-K	Melanterit
20	-6.45	-2.56	-2.24	1.01	-2.2	-6.91	-5.05	-9.1
40	-10.11	-2.35	-2.46	0.09	-2.21	-6.93	-7.19	-11.01
60	-13.26	-2.12	-2.61	-0.7	-2.17	-6.95	-9.22	-12.7
80	-15.99	-1.87	-2.72	-1.37	-2.1	-6.96	-11.13	-14.22
100	-18.37	-1.6	-2.78	-1.96	-2.02	-6.98	-12.96	-15.59
120	-20.47	-1.33	-2.81	-2.47	-1.91	-6.99	-14.68	-16.84
140	-22.31	-1.06	-2.81	-2.91	-1.79	-7.01	-16.29	-17.97
160	-23.95	-0.78	-2.79	-3.3	-1.66	-7.02	-17.8	-18.99



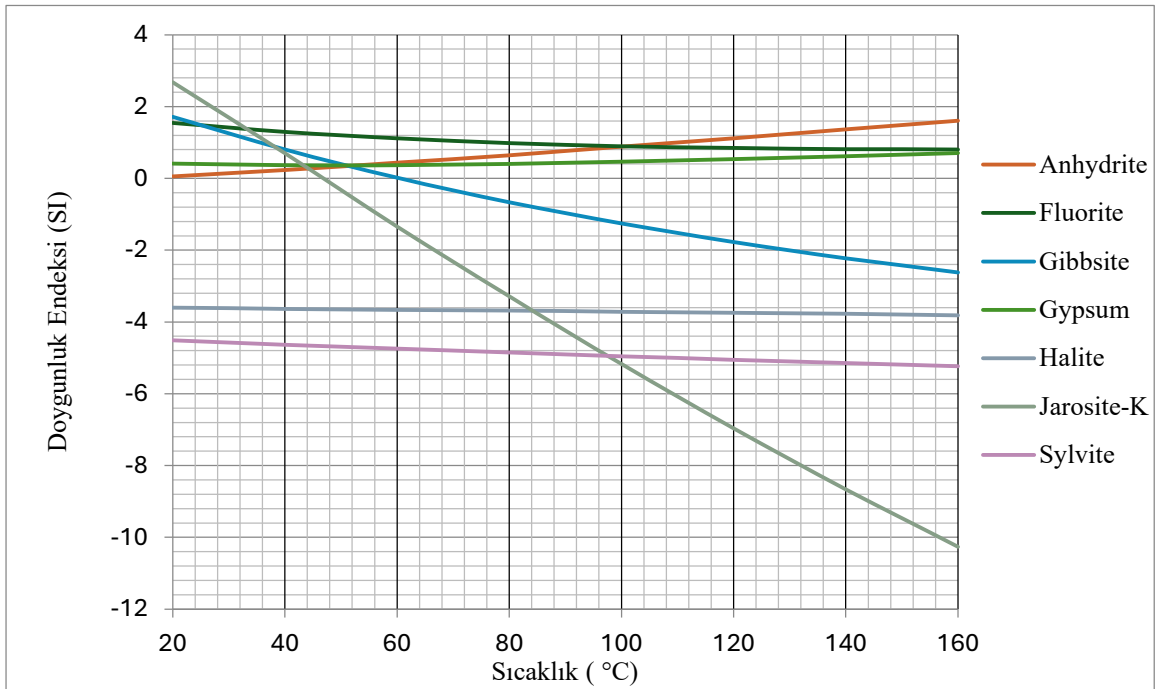
Şekil 4. 26.Dirdir sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri



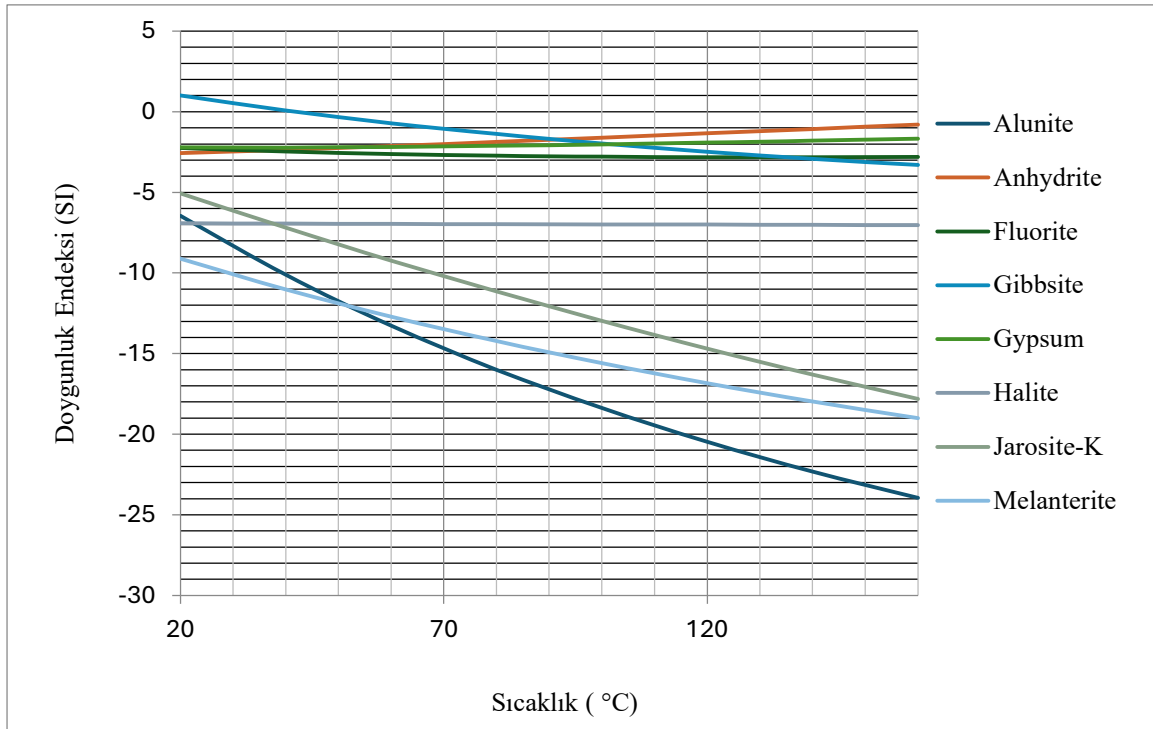
Şekil 4. 27.Kori sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri



Şekil 4. 28.Garrabeyis sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri



Şekil 4. 29.Chek saabir sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri



Şekil 4. 30.Goros sondaj kuyusunun doygunluk indeksinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafikleri

4.5.4 Jeotermometreler

Yeraltı sıcaklığını tahmin etmek için yedi jeotermal denklem kullanılmıştır Tablo 4.12’de Na-K, kalsedon, kuvars, K-Mg ve Na-K-Ca için jeotermometreler hesaplanmıştır. Burada Kori kaplıcasının kimyasal bileşimine dayalı jeokimyasal termometre hesaplamalarının sonuçlarını göstermektedir. Hanle bölgesinde, kalsedon jeotermometresinin seçildiği kayada zayıf alterasyon gözlenmektedir. Kalsedon sonucu, kaplıca akiferinin jeotermal rezervuardan daha sık olan yaklaşık 125°C’lik bir sıcaklığa sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. 12. Kori termal kaynağı için jeokimyasal termometre hesaplamalarının sonuçları

Numune	sezons	Etkinlik	Sıcaklık	Jeotermometer						
				Kuvars	Kalsedon	Na-K (A)	Na-K (F)	Na-K (F)	K-Mg(G)	Na-K-Ca(F)
Kori	Yağışlı	Sıcak su kaynakları	48	142	125	115	127	147	94	143
Kori	Kurak	Sıcak su kaynakları	53.8	120	110	153	169	187	86	153

5 SONUÇLAR

Çalışma alanının kimyasal fasiyesleri belirlendikten sonra, Hanle bölgesindeki çeşitli su noktalarının yoğun bir şekilde mineralize olmadığını görebiliriz. Kaplıcaların kimyasal bileşimleri kullanılarak, rezervuar sıcaklığı çözünen bir jeotermometre ile 125°C olarak tahmin edilmiştir.

Kaplıcanın ana çözünebilir bileşenleri, kaynak suyunun ısıtılmış fosil deniz suyu ile yeraltı suyunun karışması veya ısıtılmış yeraltı suyunun buharlaşması ve çözünmesi sonucu oluştuğunu düşündürmektedir. Bu bölgede jeotermal buharlar en güçlü şekilde Garabbayis ve Goros'tan çıkmaktadır. Rezervuarın sıcaklığı da PHREEQC tarafından tahmin edilmiş ve Kori kaplıcasında jeotermometre ile elde edilen sıcaklıkla hemen hemen aynı olan 120 °C vermiştir.

XRD analizi, bu alandaki alterasyon minerallerinin esas olarak kuvars, kalsit, albit ve kil mineralleri simektit, klorit ve illit olduğunu göstermektedir. Bu bileşim, bazılarının belirli ve kararlı sıcaklık rejimlerinde oluştuğu bilinen hidrotermal olarak değişmiş minerallerin oluşumuyla sonuçlanır.

Kil, kuvars (>180°C) ve epidot (~250°C) gibi yüksek sıcaklıkta hidrotermal alterasyon minerallerinin varlığıyla kanıtlandığı üzere yüksek sıcaklık ortamına geçişi temsil etmektedir.

Sonuç, bu çalışmada kullanılan çeşitli jeotermometrik yöntemlere göre, Hanle bölgesindeki jeotermal rezervuarın sıcaklığı 90 ila 125 °C civarındadır ve Dickson'ın sınıflandırmasına göre orta entalpi bölgesi olarak sınıflandırılabilir.

6 KAYNAKLAR

- Aquater (1985) Prefactibilité géothermique de la zone de Gaggadé Government of Djibouti, ISERST, unpublished report.
- Aquater (1987) Hanle 1 and Hanle 2 well report. Government of Djibouti. ISERST, unpublished report.
- Awaleh, MO, T Boschetti, AE Adaneh, MA Daoud - Geothermics, ve undefined 2020. "and multi-isotope study of the waters from Hanlé-Gaggadé grabens (Republic of Djibouti, East African Rift System): A low-enthalpy geothermal resource from *Elsevier*.
- Braddock, Mathilde, Juliet Biggs, Iain M. Watson, William Hutchison, David M. Pyle, ve Tamsin A. Mather. 2017. "Satellite observations of fumarole activity at Aluto volcano, Ethiopia: Implications for geothermal monitoring and volcanic hazard". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 341: 70-83.
- BFGUR, 1999. Résultats de la campagne des forages de reconnaissance effectuée dans la Plaine de Hanlé par BFGUR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Projet N°9520503. Résultats de la campagne des forages de reconnaissance effectuée dans la Plaine de Hanlé par BFGUR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Projet N°9520503.
- Cheik, HS, HA Ali - Proceedings World Geothermal Congress, ve undefined 2015. 2014. "Prefeasibility design of single flash in Asal geothermal power plant 2x25 MW, Djibouti". *theargeo.org* HS Cheik, HA Ali *Proceedings World Geothermal Congress, 2015*•*theargeo.org*: 29-31.
- Corti, G, ID Bastow, D Keir, C Pagli, E Baker - Landscapes and Landforms, ve undefined 2015. 2015. "Rift-related morphology of the Afar Depression". *Springer*: 251-74.
- Climatemps, 2018: Djibouti climate data. Climatemps, website: www.djibouti.climatemps.com/.
- Effrey, J, W Hedenquist, Antonio Arribas, ve Eliseo G Onzalez-Urien. 2000. "Exploration for epithermal gold deposits". 13: 245-77.
- Fridriksson, T, PS Neuhoff, S Arnórsson - ... et *Cosmochimica Acta*, ve undefined 2001. "Geological constraints on the thermodynamic properties of the stilbite—stellerite solid solution in low-grade metabasalts". *Elsevier*.
- Gasse, F. "Tectonic and Climatic Controls on Lake Distribution and Environments in Afar from Miocene to Present: Chapter 2." (1990): 19-41.

- Geoffroy, Laurent, Bernard Le Gall, Mohamed Ahmed Daoud, ve Mohamed Jalludin. 2014. "Flip-flop detachment tectonics at nascent passive margins in SE Afar". *Journal of the Geological Society* 171(5): 689-94.
- Giggenbach, WF, S Matsuo - Applied Geochemistry, ve undefined 1991. "Evaluation of results from Second and Third IAVCEI field workshops on volcanic gases, Mt Usu, Japan, and White Island, New Zealand". *Elsevier*.
- Giggenbach, WF, AA Minissale, G Scandiffio - Applied Geochemistry, ve undefined 1988. 1988. "Isotopic and chemical assessment of geothermal potential of the Colli Albani area, Latium region, Italy". *Elsevier* 3: 475-86.
- Houmed, AM, AO Haga, J Varet - Proceedings of the 4th, ve undefined 2012. 2012. "A revised approach to the Hanlé-Gaggadé (Djibouti Republic): the Garabbayis geothermal site". *geothermal-energy.org*: 21-23.
- Houmed Gaba, A. (2002). Modélisation préliminaire de l'Aquifère volcanique Régional de la Région de Hanlé en République de Djibouti. DESTAUP, Université de Poitiers.
- Houssein, Bouh, D Chandrasekharam, Varun Chandrasekhar, & M Jalludin, ve M Jalludin. 2014. "Geochemistry of thermal springs around Lake Abhe, Western Djibouti". *Taylor & Francis* B Houssein, D Chandrasekharam, V Chandrasekhar, M Jalludin *International Journal of Sustainable Energy*, 2014 • Taylor & Francis 33(6): 1090-1102.
- Hughes, N. F. 1992. "Ranking of feeding positions by drift-feeding Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) in dominance hierarchies". *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49(10): 1994-98.
- JICA, 2015. Data Collection Survey for Geothermal Development in the Republic of Djibouti (Geophysical Survey). Final Report, August 2015. Japan International Cooperation Agency (JICA), The Republic of Djibouti.
- Khairreh, A, F Aye - Proceedings 4th African Rift Geotherm, ve undefined 2012. 2012. "Geothermal Development in Djibouti Republic: A Country Report". *geothermal-energy.org*: 21-23.
- Kristmannsdottir, H. 1979. "Alteration of Basaltic Rocks by Hydrothermal-Activity at 100-300°C". *Developments in Sedimentology* 27(C): 359-67.
- Mehegan, J. M., P. T. Robinson, ve J. R. Delaney. 1982. "Secondary mineralization and hydrothermal alteration in the Reydarfjörður drill core, eastern Iceland." *Journal of Geophysical Research* 87(B8): 6511-24.
- Randive, Kirtikumar, Sushma Chaudhary, Sneha Dandekar, Kavita Deshmukh, Dilip Peshve, M. L. Dora, ve Boris Belyatski. 2019. "Characterisation and genesis of the chalcedony occurring within the Deccan lava flows of the LIT hill, Nagpur, India". *Journal of Earth System Science* 128(7).

- Razack, M, M Jalludin, A Houmed-Gaba - Water, ve undefined 2019. "Simulation of climate change impact on a coastal aquifer under arid climate. The Tadjourah Aquifer (Republic of Djibouti, Horn of Africa)". *mdpi.com* M Razack, M Jalludin, A Houmed-Gaba *Water*, 2019•*mdpi.com*.
- Stakes, DS, JR O'neil - Earth and Planetary Science Letters, ve undefined 1982. "Mineralogy and stable isotope geochemistry of hydrothermally altered oceanic rocks". *Elsevier* DS Stakes, JR O'neil *Earth and Planetary Science Letters*, 1982•*Elsevier*.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Wakamatsu, Eiji, Shigeru Sugiyama, Hiroto Kamiishi, Haruka Nakagawa, ve Takayoshi Miyazaki. "JICA's Cooperation in Geothermal Development at Great Rift Valley in Africa". *theargo.org*.
- Zan, L, G Gianelli, P Passerini, C Troisi, AO Haga - Geothermics, ve undefined 1990. 1990. "Geothermal exploration in the Republic of Djibouti: thermal and geological data of the Hanlé and Asal areas". *Elsevier* L Zan, G Gianelli, P Passerini, C Troisi, AO Haga *Geothermics*, 1990•*Elsevier* 19(6): 561-82.

EK-1. Çalışma Alanının Jeoloji Haritası ve Kesiti.

