

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TEKMAN VE ÇAT (ERZURUM) YÖRELERİNDEKİ JEOTERMAL
SULARININ HİDROJEOKİMYASAL VE İZOTOPIK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Dilek ÇAVUŞ

NİSAN-2025
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TEKMAN VE ÇAT (ERZURUM) YÖRELERİNDEKİ JEOTERMAL
SULARININ HİDROJEOKİMYASAL VE İZOTOPIK İNCELENMESİ**

**HYDROGEOCHEMICAL AND ISOTOPIC INVESTIGATION OF TEKMAN
AND ÇAT (ERZURUM) REGIONS GEOTHERMAL WATERS**

YÜKSEK LİSANS

Dilek ÇAVUŞ

**NİSAN - 2025
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TEKMAN VE ÇAT (ERZURUM) YÖRELERİNDEKİ JEOTERMAL
SULARININ HİDROJEOKİMYASAL VE İZOTOPIK İNCELENMESİ**

**HYDROGEOCHEMICAL AND ISOTOPIC INVESTIGATION OF TEKMAN
AND ÇAT (ERZURUM) REGIONS GEOTHERMAL WATERS**

YÜKSEK LİSANS

Dilek ÇAVUŞ

Danışman: Prof. Dr. Abdullah KAYGUSUZ

**NİSAN -2025
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Tekman ve Çat (Erzurum) Yörelerindeki Jeotermal Sularının Hidrojeokimyasal ve İzotopik İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

08/04/2025

Dilek ÇAVUŞ

TEŞEKKÜR

Doğu Anadolu'nun kuzeyinde, **Tekman ve Çat (Erzurum) Yörelerindeki Jeotermal Sularının Hidrojeokimyasal ve İzotopik İncelenmesini** amaçlayan bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (GÜBAP) birimi tarafından desteklenmiştir. 23.F5114.01.02 ve 24.F5114.07.01 kodlu projeler ile yapmış oldukları maddi destekten dolayı GÜBAP birimine teşekkür ederim.

Arazi çalışmaları sırasında imkân veren DSİ 8. Bölge Müdürlüğü'ne (Erzurum) çok teşekkür ederim.

Bu çalışmada sıcak ve soğuk su numunelerinin anyon ve katyon analizleri DSİ Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü Kimya Laboratuvarı (Erzurum) ve DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Laboratuvarı (Ankara)'nda, bazı iz element analizleri Gümüşhane Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda, silis analizleri DSİ 8.Bölge Müdürlüğü (Erzurum) Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü Kimya Laboratuvarı'nda, kayaç örneklerinin ana ve iz element analizleri Kanadada ACME Analiz Laboratuvarı ile Çin'de Wuhan Sample Solution Analitik Teknoloji Laboratuvarında ve jeotermal su örneklerinin izotop analizleri de DSİ Teknik Araştırma Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı İzotop Laboratuvarı (Ankara)'da gerçekleştirilmiş ve hedeflenen amaca ulaşılmıştır.

Bu projeyi destekleyen Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi ve personeline, kimyasal analizlerde yardımcı olan DSİ 8. Bölge Müdürlüğü'ne (Erzurum) teşekkür ederim.

Bu çalışmanın her aşamasında sonsuz destek ve yardımları için Danışman hocam Prof. Dr. Abdullah KAYGUSUZ'a minnet ve şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım esnasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Doç. Dr. Esra HATİPOĞLU TEMİZEL ve Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Doç. Dr. Mehmet Ali GÜCER hocalarımıza teşekkür ederim. Arazi çalışmaları esnasında yardımcı olan eşim Fırat ÇAVUŞ'a, ince kesitleri hazırlayan teknisyen Ferdi DAYANÇ'a teşekkür ederim. Ayrıca yaşamımın her anında maddi-manevi desteklerini esirgemeyen aileme, eşime ve çocuğuma şükranlarımı sunarım.

Dilek ÇAVUŞ
GÜMÜŞHANE – 2025

ÖZET

Bu araştırmada, Erzurum ili Tekman ilçesine bağlı Yiğitler Köyü ve Çat ilçesine bağlı Çimenözü Köyünde yer alan jeotermal, soğuk kaynak (çeşme) ve yüzey (dere) sularının hidrojeokimyasal ve izotopik karakteristikleri incelenmiştir.

Yiğitler ve Çimenözü bölgelerinde yer alan jeotermal sahaların bulunduğu çalışma alanında, Paleozoyik ile Pliyosen dönemleri arasında oluşmuş volkanik, plutonik ve tortul kayalar yüzeylenmektedir. Söz konusu jeotermal su kaynakları tektonizma ve volkanizmanın etkisinde kalmış olup, KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı faylar tarafından oluşan ve bu fay zonlarına paralel ikincil makaslama faylarının etkisiyle yüzeye çıkmaktadır.

Yiğitler ve Çimenözü bölgelerinde yer alan jeotermal su kaynaklarından elde edilen veriler, jeotermal suların sıcaklık değerlerinin sırasıyla 43-49 ve 45-54 °C, pH değerlerinin 7.03-8.33 ve 8.2-8.69 ve EC değerlerinin de 950-1550 ve 925-1415 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değiştiğini, jeotermal suların Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄'lü sular sınıfında yer aldığını, Schoeller diyagramına göre her iki bölgedeki jeotermal suların kaynağının benzer kökenli olduğunu, jeotermal su örneklerinin alfa değerlerinin sırasıyla 0.241-0.249 ve 0.193-0.406 Bq/l, beta değerlerinin 0.336-0.444 Bq/l ile 0.426-0.723 Bq/l arasında değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Jeotermal suların trityum (³H) izotop bileşimleri 0.32 Bq/l ile 0.63-0.93 Bq/l arasında olup, düşük trityum ve orta-yüksek EC değerleri, jeotermal suların derinlerde uzun süreli bir dolaşım sürecine sahip olduğunu ve kayalarla etkileşimde bulunduğunu ortaya koymaktadır. Silis jeotermometre hesaplamaları, her iki bölgedeki rezervuar sıcaklıklarının sırasıyla 55-141 °C ve 62-168 °C arasında olduğunu göstermektedir.

İncelenen jeotermal suların majör iyonları, bazı iz element değerleri ve kirlilik analiz konsantrasyonları yönetmelikteki değerlere uygundur. Erzurum yöresindeki jeotermal sular ile karşılaştırıldıklarında, Yiğitler ve Çimenözü jeotermal suları daha düşük HCO₃, daha yüksek Fe, Mn ve Al içeriklerine sahiptirler.

Anahtar Kelimeler: Çimenözü ve Yiğitler (Erzurum), Hidrojeokimya, Jeotermal sular, Soğuk kaynak ve yüzey suları, Trityum izotopları

SUMMARY

This study investigates the hydrogeochemical and isotopic characteristics of geothermal, cold spring (fountain), and surface (stream) waters in Yiğitler Village (Tekman district) and Çimenözü Village (Çat district) within the Erzurum province.

The study area, encompassing geothermal fields in both regions, exhibits widespread exposures of volcanic, plutonic, and sedimentary rocks dating back to the Paleozoic to Pliocene periods. These hot water sources are influenced by tectonic and volcanic activity, surfacing through secondary shear faults that parallel the dominant NE-SW trending strike-slip faults.

Geothermal waters in Yiğitler and Çimenözü display distinct characteristics: temperatures range from 43-49 °C and 45-54 °C, respectively; pH values fall within 7.03-8.33 and 8.2-8.69; and electrical conductivity (EC) values vary between 950-1550 and 925-1415 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Chemically, both regions exhibit Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄ water types. Schoeller diagrams indicate a similar origin for the geothermal waters in both areas. Alpha activity ranges from 0.241-0.249 Bq/l and 0.193-0.406 Bq/l, while beta activity varies between 0.336-0.444 Bq/l and 0.426-0.723 Bq/l. Tritium (³H) isotope concentrations in the geothermal waters are low (0.32 Bq/l to 0.63-0.93 Bq/l), suggesting long-term deep circulation and rock-water interactions. Silica geothermometer calculations estimate reservoir temperatures between 55-141 °C and 62-168 °C in both regions.

Major ion, trace element, and pollution analysis results for the geothermal waters comply with relevant regulations. However, compared to other geothermal waters in the Erzurum region, the Yiğitler and Çimenözü waters exhibit lower HCO₃ concentrations and higher levels of Fe, Mn, and Al.

Keywords: Çimenözü and Yiğitler (Erzurum), Hydrogeochemistry, Geothermal waters, Cold spring and surface waters, Tritium isotopes

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	IV
TEŞEKKÜR	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVIII
1.GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışma Alanlarının Coğrafi Konumu	3
1.3. Morfoloji.....	4
1.3.1. Tekman İlçesinin Morfolojisi	4
1.3.2. Çat İlçesinin Morfolojisi.....	5
1.4. Ulaşım ve Yerleşim.....	6
1.5. Akarsular	6
1.6. İklim ve Bitki örtüsü	7
1.7. Ekonomik Jeoloji	7
1.8. Çalışmanın Amacı.....	8
1.9. Önceki Çalışmalar.....	8
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	16
2.1. Kaynak Taraması	16
2.2. Arazi Çalışmaları	16
2.3. Laboratuvar Çalışmaları	17
2.3.1. İnce Kesitlerin Hazırlanması	17
2.3.2. Petrografik Çalışmalar.....	18
2.3.3. Analiz Çalışmaları.....	18
2.3.3.1. Su örneklerinin analizleri.....	18
2.3.3.2. Tüm-Kayaç Jeokimyasal Analizleri	18
2.4. Büro Çalışmaları	19
3. BULGULAR	21

3.1. Genel Jeoloji	21
3.1.1. Giriş.....	21
3.1.2. Şahvelet / Hınıs Ofiyolitleri.....	23
3.1.3. Köşehasan / Kozlu Formasyonu	23
3.1.4. Memişkomu Formasyonu	24
3.1.5. Ağcakoca Formasyonu.....	24
3.1.6. Ahlat Formasyonu	25
3.1.7. Solhan Formasyonu.....	25
3.1.8. Bingöldağı Volkanitleri	26
3.1.9. Traverten.....	27
3.1.10. Yeni Alüvyon	28
3.2. Yapısal Jeoloji.....	28
4. HİDROJEOLOJİ.....	29
4.1. İklim ve Özellikleri	29
4.2. Yağış ve Sıcaklık	29
4.2.1. Yiğitler (Tekman) Bölgesi.....	29
4.2.2. Çimenözü (Çat) Bölgesi	30
4.3. Buharlaşma-Terleme	33
4.3.1. Yiğitler (Tekman) Bölgesi.....	33
4.3.2. Çimenözü (Çat) Bölgesi	34
4.4. Termal sular	35
4.4.1. İncelenen Su Noktaları	35
4.4.2. Jeotermal Kaynaklar.....	36
4.4.3. Soğuk Su Kaynakları.....	38
4.4.4. Akarsular	40
4.5. Suların Hidrokimyasal Özellikleri	41
4.5.1. Suların Yerinde Ölçülen Parametreleri (Fiziksel özellikleri)	42
4.5.1.1. Sıcaklık (°C).....	42
4.5.1.2. Hidrojen İyon Aktivitesi (pH).....	44
4.5.1.3. Elektriksel İletkenlik (EC).....	45
4.5.1.4. Çözülmüş Oksijen (DO)	46
4.6. Suların Jeokimyasal Özellikleri	47
4.6.1. Suların Majör İyon İçerikleri	47
4.6.1.1. Kalsiyum (Ca ⁺²)	49
4.6.1.2. Magnezyum (Mg ⁺²).....	50

4.6.1.3. Sodyum (Na^+)	51
4.6.1.4. Potasyum (K^+).....	53
4.6.1.5. Bikarbonat (HCO_3^-) (Alkalinite).....	54
4.6.1.6. Sülfat (SO_4^{2-}).....	56
4.6.1.7. Klorür (Cl^-)	57
4.6.1.8. Florür (F^-).....	58
4.7. Suların İz Element İçerikleri (Ağır metal analizleri)	59
4.7.1. Alüminyum (Al).....	60
4.7.2. Demir (Fe)	61
4.7.3. Mangan (Mn)	62
4.7.4. Çinko (Zn)	63
4.7.5. Nikel (Ni).....	64
4.7.7. Baryum (Ba)	66
4.7.8. Stronsiyum (Sr).....	66
4.7.9. Bor (B).....	67
4.7.10. Silisyum (Si)	69
4.7.11. Bakır (Cu)	70
4.7.12. Krom (Cr)	71
4.7.13. Rubidyum (Rb)	71
4.7.14. Antimuan (Sb).....	72
4.7.15. Lantanyum (La).....	73
4.7.16. Seryum (Ce).....	73
4.7.17. Be, Se, Ag, Cd, Sn, Hg, Pb ve Th	74
4.8. Kirlilik Analizleri.....	74
4.8.1. Amonyum (NH_4).....	75
4.8.2. Nitrit (NO_2^-).....	75
4.8.3. Nitrat (NO_3^-)	76
4.8.4. Fosfat (PO_4)	77
4.9. İnceleme Alanındaki Suların Sınıflandırılması	78
4.9.1. Piper Diyagramı Değerlendirmesi.....	79
4.9.2. Schoeller Diyagramı Değerlendirmesi	80
4.9.3. Schoeller Sınıflaması.....	81
4.9.5. ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı	84
4.10. Jeotermometre Uygulamaları.....	87
4.11. Çevresel İzotop Hidrolojisi.....	96

4.11.1. Tritiyum-EC İlişkisi	98
4.11.2. Tritiyum – Klorür (Cl) İlişkisi	99
4.12. Radyoaktivite	100
4.12.1. Sulardaki Radyoaktivitenin Kaynağı.....	100
4.13. Su-Kayaç Etkileşimi.....	102
4.13.1. Kayaç Jeokimyası.....	103
4.13.2. Su-Kayaç İlişkisi	106
4.14. Hidrojeoloji.....	111
4.14.1. Jeotermal Sistemlerin Oluşum Şekilleri	112
4.14.2. Yiğitler-Çimenözü Jeotermal Sistemi	112
4.14.3. Jeotermal Akışkanların Çevresel Etkileri	114
5. İRDELEME VE TARTIŞMA	116
5.1. İncelenen jeotermal suların sıcaklıklarının değerlendirilmesi.....	117
5.1.1. İncelenen jeotermal suların fiziksel, kimyasal ve izotopik özelliklerinin standartlara göre değerlendirilmesi.....	118
5.1.2. İncelenen soğuk suların (çeşme) içme suyu standartlarına göre değerlendirilmesi.....	121
5.1.3. İncelenen yüzey (dere) suların kirlilik açısından değerlendirilmesi	123
5.1.4. Erzurum yöresi jeotermal suların karşılaştırılması	125
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	140
ÖZGEÇMİŞ.....	154

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Tekman İlçesi'ne 2013-2024 yıllarına ait aylık-yıllık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri.....	29
Tablo 2. Çat İlçesi'ne ait 2013-2024 yılları arasında ölçülen aylık-yıllık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri.	31
Tablo 3. Tekman meteoroloji istasyonu verileri ile Thornthwaite (1948) yöntemine göre hesaplanmış hidrolojik bilanço	34
Tablo 4. Çat meteoroloji istasyonu verileri ile Thornthwaite (1948) yöntemine göre hesaplanmış hidrolojik bilanço	35
Tablo 5. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal alanlarında örnek alınan noktaların koordinatları ve kotları (yükseklikleri).....	42
Tablo 6. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların fiziksel özellikleri.....	42
Tablo 7. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların mg/l cinsinden majör iyon özellikleri, hesaplanan meq/l değerleri ile analiz hata (AH) değerleri.....	48
Tablo 8. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların iz element içerikleri....	60
Tablo 9. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların kirlilik analiz değerleri	74
Tablo 10. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların IAH (1979)'a göre Su Tipi sınıflaması.....	79
Tablo 11. Suların klorür, sülfat ve bikarbonat miktarına göre Schoeller (1955) sınıflaması.....	82
Tablo 12. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularının klorür, sülfat ve bikarbonat miktarına göre Schoeller (1955) sınıflaması değerleri.	82
Tablo 13. Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Sodyum Adsorpsiyon Oranları (SAR) (Şahinci, 1991).....	84
Tablo 14. Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Genel Tuzluluk Özellikleri .	84
Tablo 15. Genel Sodyum Tehlikesi Özellikleri.....	85
Tablo 16. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularının SAR ve Konduktivite (D) değerleri.....	85
Tablo 17. Akifer sıcaklığının tahmininde kullanılan kimyasal jeotermometre formülleri	88
Tablo 18. Çalışma alanında yer alan jeotermal sulara ait silis jeotermometre hesaplama sonuçları (Tablo 17'deki formüller kullanılmıştır)	89
Tablo 19. Çalışma alanında yer alan jeotermal suların $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}})$ değerleri.....	91

Tablo 20. İnceleme alanında bulunan suların sıcaklık ve hesaplanan entalpi değerleri .	93
Tablo 21. Çalışma alanında bulunan jeotermal sulara ait trityum (^3H) izotop verileri...	97
Tablo 22. Çalışma alanından toplanan jeotermal su örneklerinde toplam alfa ve beta radyoaktivite düzeyleri	101
Tablo 23. İnceleme alanından toplanan kayaç örneklerine ait ana oksit (%) değerleri	103
Tablo 24. Kayaçlarda bulunan iz element analiz sonuçları	105
Tablo 25. Su-kayaç etkileşimine bağlı olarak belirlenen olası sonuçlar (Hounslow, 1995)	107
Tablo 26. Hounslow, (1995) tarafından önerilen sınıflama (Tablo 25) dikkate alınarak, Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi su-kayaç etkileşimi değerleri	108
Tablo 27. Tekman sularındaki Na, K, Ca ve Mg katyonları ile Cl, SO_4 ve HCO_3 anyon değişimlerine bağlı olarak kaya-su etkileşimi ve kalsit doygunluk indeksine göre kimyasal olaylar	108
Tablo 28. Çat sularındaki Na, K, Ca ve Mg katyonları ile Cl, SO_4 ve HCO_3 anyon değişimlerine bağlı olarak kaya-su etkileşimi ve kalsit doygunluk indeksine göre kimyasal olaylar	109
Tablo 29. İnceleme alanındaki jeotermal su ve volkanik kayaç örneklerine ait iz element analiz sonuçları (su örnekleri ppb, kayaç örnekleri ppm)	111
Tablo 30. Jeotermal gelişmenin olası çevresel etkileri (Hunt, 2001)	115
Tablo 31. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki jeotermal su kaynaklarının analiz sonuçlarına ait minimum, maksimum ve ortalama değerlerleri	116
Tablo 32. Jeotermal alanların akışkan sıcaklıklarına göre sınıflandırılmaları (Dickson ve Fanelli, 1990).....	117
Tablo 33. Ulusal ve uluslararası içmesuyu standartlarının karşılaştırılması ve kaplıca yönetmeliği	118
Tablo 34. İçme sularında izin verilen radyoaktivite değerleri.....	121
Tablo 35. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi soğuk sularına ait analizlerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri.....	122
Tablo 36. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi yüzey (dere) sularına ait minimum, maksimum ve ortalama değerleri.....	124
Tablo 37. Su kirliliği kontrolü yönetmeliği (2004)	125
Tablo 38. Erzurum yöresindeki jeotermal sulara ait ortalama analiz değerleri.....	127

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Ana neotektonik hatlar ve Türkiye'nin sıcak kaynak dağılımı (Şimşek, 2015'den alınmıştır)	2
Şekil 2. (a) Çalışma alanının yer bulduru haritası, (b) Çalışma alanına ait uydu görüntüsü (Google Earth).	4
Şekil 3. (a) Çoklu parametre ölçer, (b) gaz ölçüm aleti, (c) su örneklerinin alındığı polietilen şişeler	17
Şekil 4. Tekman (Erzurum) ve civarının jeolojik haritası (Konak ve Hakyemez, 2008'den değiştirilmiştir)	21
Şekil 5. Tekman (Erzurum) ve civarının enine jeolojik kesiti	22
Şekil 6. Tekman-Çat (Erzurum) ve yakın çevresinin stratigrafik kolon kesiti.....	22
Şekil 7. Bazaltik andezitlere ait ince kesit görüntüsü (Pl: Plajiyoklas, Pir: Piroksen, Ç.N)	26
Şekil 8. Andezitlere ait iri piroksen mineralleri (Ç.N. Pir: Piroksen, Pl: lajiyoklas).....	27
Şekil 9. Çimenözü kuzeyinde yer alan travertenlerin arazi görünümü.....	27
Şekil 10. Tekman Meteoroloji İstasyonu'ndan ölçülen ortalama sıcaklık (°C) değerleri ve aylara göre değişim grafiği	30
Şekil 11. Tekman Meteoroloji İstasyonu'ndan ölçülen ortalama yağış değerlerinin aylara göre değişim grafiği	30
Şekil 12. DSİ'nin Çimenözü (Çat) Manda Deresi üzerinde yer alan akım gözlem istasyonunun 2018 yılına ait ortalama akım değerleri	31
Şekil 13. Çat Meteoroloji İstasyonu'ndan 2012-2024 yılları arasında ölçülen ortalama sıcaklık değerleri ve bu değerlerin aylara göre değişim grafiği.....	32
Şekil 14. Çat Meteoroloji İstasyonu'ndan 2012-2024 yılları arasında ölçülen ortalama yağış değerlerinin aylara göre değişim grafiği	32
Şekil 15. Yiğitler jeotermal sahasının uydu görüntüsü (Google Earth).	36
Şekil 16. Çimenözü jeotermal sahasının uydu görüntüsü (Google Earth).	36
Şekil 17. Yiğitler (Tekman) jeotermal su kaynakları (a) Kaynak-1, (b) Kaynak-2.....	37
Şekil 18. Çimenözü (Çat) jeotermal su kaynakları (a) Kaynak-1, (b) Kaynak-2	37
Şekil 19. Yiğitler (Tekman) soğuk kaynak suyundan (çeşme) bir görünüm	39
Şekil 20. Çimenözü (Çat) soğuk su kaynağı (çeşme) ve örnek alımı	40
Şekil 21. Yiğitler (Tekman) yüzey (dere) suyu örnek alım noktası	41
Şekil 22. Çimenözü (Çat) Manda Deresi örnek alım noktası.....	41

Şekil 23. İnceleme alanındaki suların sıcaklık değerleri.....	43
Şekil 24. İnceleme alanındaki suların pH değerleri.....	44
Şekil 25. İncelenen suların elektriksel iletkenlik (EC) değerleri.....	46
Şekil 26. İnceleme alanındaki sulara ait çözünmüş oksijen (DO) değerleri.	46
Şekil 27. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Ca^{2+} değerleri....	49
Şekil 28. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Mg^{2+} değerleri. .	51
Şekil 29. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Na^{+} değerleri....	52
Şekil 30. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların K değerleri.....	53
Şekil 31. Çalışma alanındaki suların HCO_3 değerleri.....	55
Şekil 32. Çalışma alanındaki suların SO_4 değerleri.....	56
Şekil 33. İnceleme alanındaki suların Cl değerleri.....	57
Şekil 34. Çalışma alanındaki suların F değerleri.	59
Şekil 35. Çalışma alanındaki suların Al değerleri.	61
Şekil 36. Çalışma alanındaki suların Fe değerleri.	62
Şekil 37. Çalışma alanındaki suların Mn değerleri.....	63
Şekil 38. Çalışma alanındaki suların Zn değerleri.....	64
Şekil 39. Çalışma alanındaki suların Ni değerleri.	64
Şekil 40. Çalışma alanındaki suların As değerleri.....	65
Şekil 41. Çalışma alanındaki suların Ba değerleri.....	66
Şekil 42. Çalışma alanındaki suların Sr değerleri.....	67
Şekil 43. Çalışma alanındaki suların B değerleri.	68
Şekil 44. Çalışma alanındaki suların Si değerleri.....	70
Şekil 45. Çalışma alanındaki suların Cu değerleri.....	70
Şekil 46. Çalışma alanındaki suların Cr değerleri.	71
Şekil 47. Çalışma alanındaki suların Rb değerleri.....	72
Şekil 48. Çalışma alanındaki suların Sb değerleri.	72
Şekil 49. Çalışma alanındaki suların La değerleri.	73
Şekil 50. Çalışma alanındaki suların Ce değerleri.....	73
Şekil 51. Çalışma alanındaki suların NH_4 değerleri.	75
Şekil 52. Çalışma alanındaki suların NO_2 değerleri.	76
Şekil 53. Çalışma alanındaki suların NO_3 değerleri.	77
Şekil 54. Çalışma alanındaki suların PO_4 değerleri.....	78
Şekil 55. Çalışma alanındaki (Yiğitler ve Çimenözü) su örneklerine ait Piper diyagramı (Piper, 1944).	80

Şekil 56. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarına ait suların Schoeller Diyagramı (Schoeller, 1955)'ndaki konumları.....	81
Şekil 57. İncelenen sulara ait Wilcox diyagramı (Wilcox, 1955), (a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat)	83
Şekil 58. İnceleme alanındaki suların ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı, (a) Tekman, (b) Çat.....	86
Şekil 59. Çalışma alanındaki sulara ait Giggenbach diyagramı (Giggenbach, 1991)	92
Şekil 60. İnceleme alanındaki jeotermal suların entalpi-silis diyagramı, (a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat)	94
Şekil 61. Çalışma alanındaki jeotermal suların entalpi-silis diyagramı, a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat)	95
Şekil 62. Çalışma alanındaki jeotermal suların entalpi klorür diyagramı, a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat)	96
Şekil 63. Çalışma alanında bulunan suların ^3H değerleri, a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat).....	97
Şekil 64. Çalışma alanında bulunan suların EC- ^3H diyagramı	98
Şekil 65. Çalışma alanında bulunan suların ^3H ve EC ilişkisi.....	98
Şekil 66. Çalışma alanında bulunan suların ^3H ve Cl ilişkisi.....	99
Şekil 67. Çalışma alanına ait suların ^3H ve sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ilişkileri.....	100
Şekil 68. Çalışma alanındaki suların alfa değerleri.	102
Şekil 69. Çalışma alanındaki suların beta değerleri.....	102
Şekil 70. Çalışma alanındaki Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı kayaçların (a) SiO_2 'ye karşı ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) sınıflaması (Le Maitre et al., 1989), (b) SiO_2 'ye karşı Zr/TiO ₂ sınıflama diyagramı (Irvine ve Baragar, 1971).....	104
Şekil 71. Kayaçlarda bulunan ana element konsantrasyonları	104
Şekil 72. Kayaçlarda bulunan iz element konsantrasyonları.....	106
Şekil 73. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki kayaç ve sularda bulunan iz element konsantrasyonları	111
Şekil 74. Jeotermal enerji sistem modeli (Whiting and Ramey, 1969)	112
Şekil 75. Erzurum yöresi jeotermal suları gösteren harita	126
Şekil 76. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), pH ve EC değerleri.....	129
Şekil 77. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama Ca, Mg, Na ve K değerleri	130

Şekil 78. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama HCO_3 , SO_4 , Cl ve F değerleri.....	131
Şekil 79. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama NO_3 ve NH_4 değerleri.	132
Şekil 80. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama Al, Mn, Fe ve Si değerleri	133
Şekil 81. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama Beta ve ^3H değerleri ...	134



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Ağustos
a	: Yıllık sıcaklık indisine bağlı bir katsayı
Cs	: Doğal radyonükleitlerin radyoaktivite konsantrasyonları
ÇÇ	: Çimenözü Soğuk (Çeşme) Su Kaynağı
ÇD	: Çimenözü Yüzey (Dere) Suyu
ÇSK	: Çimenözü Jeotermal (Sıcak) Su Kaynağı
D	: Döteryum
DO	: Çözünmüş oksijen
EC	: Elektriksel iletkenlik
Etp	: Potansiyel buharlaşma-terleme
G	: Aylık güneşleme faktörü
³ H	: Tritiyum
I	: Yıllık sıcaklık indisi
i	: Aylık sıcaklık indisi
IAP	: İyonik aktivite çarpanı
K	: Kasım
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
NTE	: Nadir toprak elementler
P	: Gama bozunumu
pH	: Hidrojen iyonu aktivitesi
SI	: Doygunluk indeksi
t	: Aylık sıcaklık ortalaması (°C)
TDS	: Toplam çözünmüş madde miktarı
TU	: Tritiyum
w	: Kg olarak kurutulmuş örnek ağırlığı
YÇ	: Yiğitler Soğuk (Çeşme) Su Kaynağı
YD	: Yiğitler Yüzey (Dere) Suyu
YSK	: Yiğitler Jeotermal (Sıcak) Su Kaynağı

1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünya genelinde enerji talebi sürekli artmakta olup, bu talebin önemli bir bölümü fosil yakıtlar (kömür, doğalgaz, petrol) ve nükleer enerji gibi geleneksel ve tükenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu kaynakların çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri göz önüne alındığında, sürdürülebilir enerji üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları, başlıca jeotermal, hidrolik, güneş, rüzgâr, gel-git, dalga, okyanus-termal ve biyokütle olmak üzere çeşitli kategorilerde sınıflandırılabilir (Kaygusuz vd., 1996, 2009; Kaygusuz K ve Kaygusuz A, 2002, 2004; Kaygusuz, 2019).

Jeotermal enerji, yerin derinliklerinde kayalar içinde birikmiş ısının akışkanlar tarafından taşınarak rezervuarlarda depolanması ile oluşmuş, sıcaklığı sürekli 20 oC den fazla olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına oranla daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen jeotermal su ve buhardan elde edilen ısı enerjisidir. Sıcak kuru kayalar ise, akışkan içermemelerine rağmen yüksek sıcaklıkları nedeniyle jeotermal enerji potansiyeli taşıyan önemli bir kaynaktır.

İnsanlık tarihi boyunca jeotermal enerji, başta tedavi amaçlı olmak üzere sınırlı bir kullanım alanına sahipken, 20. yüzyıldan itibaren gelişen teknolojiyle birlikte enerji üretimi, ısıtma, soğutma, kurutma ve endüstriyel uygulamalar gibi çok daha geniş bir alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum, jeotermal enerjinin sağlık ve yiyecekleri pişirme gibi geleneksel kullanım alanlarının ötesine geçerek, günümüzde enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir role sahip olmasını sağlamıştır (URL-1).

Yeraltındaki ısı enerjisinin, sıvı ve gazlar aracılığıyla yeryüzüne taşınmasıyla ortaya çıkan jeotermal enerji, sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Düşük karbon ayak izi ve tükenmez olması gibi avantajları sayesinde elektrik üretimi, ısıtma, soğutma ve sağlık turizmi gibi geniş bir yelpazede kullanımı artmaktadır. Jeotermal sistemlerin sıcaklıklarına göre farklı kullanım alanları bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklı sistemler elektrik üretimi için, orta sıcaklıklı sistemler ısıtma ve soğutma için, düşük sıcaklıklı sistemler ise genellikle tarım ve seracılık gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Jeotermal sistemlerin oluşumu, genellikle tektonik hareketlilik ve volkanik aktivitelerin yoğun olduğu bölgelerde gerçekleşir. Ülkemiz, genç tektonik yapısı ve

yaygın volkanik aktivitesiyle bu koşulları barındıran önemli bir coğrafyadır. Aktif fay hatları boyunca gelişen grabenler, genç volkanizma kaynaklı doğal buhar çıkışları ve hidrotermal alterasyonlar ile birlikte, sıcaklıkları 25 °C ila 103 °C arasında değişen 600’den fazla jeotermal su kaynağının varlığı, ülkemizin jeotermal su kaynakları bakımından zengin olduğunu ve önemli bir jeotermal potansiyele sahip olduğunu gösterir (Şekil 1).



Şekil 1. Ana neotektonik hatlar ve Türkiye’nin sıcak kaynak dağılımı (Şimşek, 2015’den alınmıştır)

Türkiye'deki jeotermal kaynakların coğrafi dağılımı, ülkenin jeolojik yapısıyla yakından ilişkilidir. Genç tektonik hareketliliklerin etkisiyle oluşan graben sistemlerinin hâkim olduğu Batı Anadolu Bölgesi, yüksek sıcaklıklı jeotermal akışkanlara ev sahipliği yaparken; Orta ve Doğu Anadolu ile Kuzey Anadolu fay hattı boyunca düşük ve orta sıcaklıklı jeotermal kaynaklar daha yaygındır. Jeotermal kaynakların Türkiye genelindeki dağılımına bakıldığında, Batı Anadolu Bölgesi %79 ile ilk sırada yer alırken, bunu sırasıyla Orta Anadolu, Marmara ve Doğu Anadolu bölgeleri takip etmektedir. Doğu Anadolu Bölgesi'nde, özellikle Erzurum ili çevresinde yer alan çok sayıda jeotermal alan bulunmasına rağmen, bu potansiyel henüz yeterince değerlendirilememiştir.

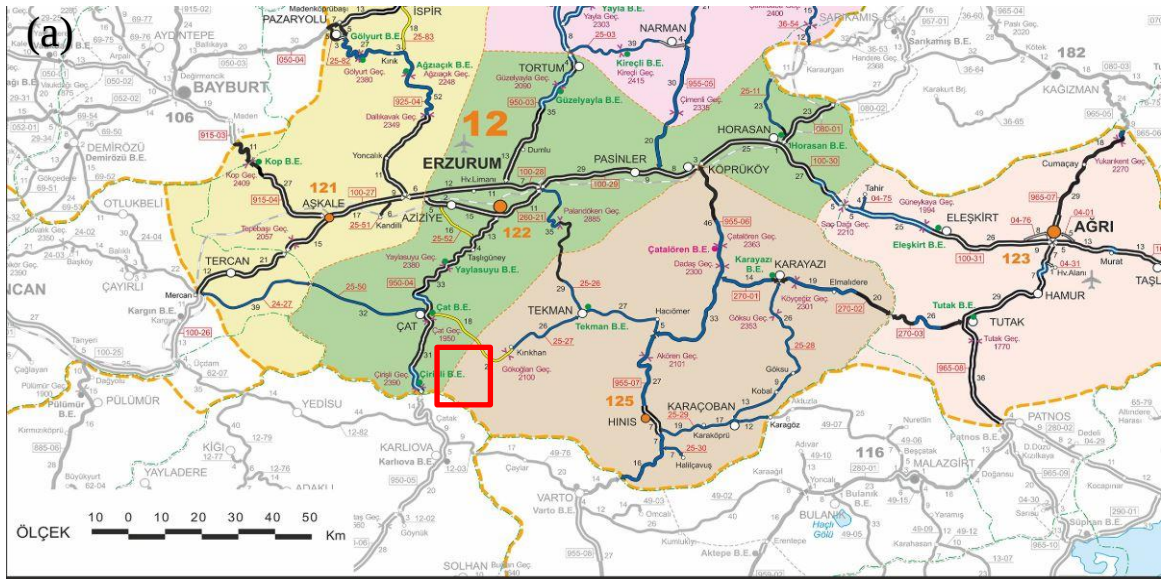
Türkiye'nin jeotektonik konumu, yüksek jeotermal potansiyele sahip olmasını sağlamaktadır. Ülkemiz, aktif fay hatları, volkanik bölgeler ve genç volkanizma gibi jeolojik özelliklere sahip olması nedeniyle yeraltı ısısının yüzeye yakın olduğu bölgelerde zengindir. Bu durum, jeotermal enerji üretimi için uygun koşullar sunmaktadır. Türkiye'deki yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemler, Batı Anadolu'daki grabenlerde, özellikle de volkanik aktivitelerin gözlemlendiği bölgelerde

yoğunlaşmaktadır (örneğin, Denizli Kızıldere (242 °C), Aydın-Germencik (232 °C), İzmir-Seferihisar (153 °C) ve İzmir Balçova (130 °C). Orta Anadolu'daki jeotermal sistemlerin oluşumu ise büyük ölçüde volkanik aktivitelerle ilişkilidir (örneğin, Ankara Kızılcahamam (86 °C) ve Afyon-Ömer Gecek (70 °C). Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde de volkanik ve tektonik hareketler sonucunda çeşitli jeotermal sistemler (örneğin, Van-Erciş (80 °C) ve Ağrı-Diyadin jeotermal sahası (78 °C) gelişmiştir. Kuzey Anadolu'da ise Kuzey Anadolu Fay Hattı boyunca önemli jeotermal sahalar (örneğin, Sakarya Akyazı (84 °C) ve Yalova Armutlu (77 °C) bulunmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde ise, özellikle Artvin, Rize, Giresun ve Ordu illeri sınırları içerisinde yer alan Şavşat, Ayder, İkizdere ve Fatsa gibi sahalar, son yıllarda yapılan detaylı jeotermal araştırmalarla (Fırat Ersoy vd. 2019; Gültekin vd. 2019; Hatipoğlu Temizel vd. 2019, 2020) potansiyellerinin ortaya çıkarıldığı önemli jeotermal alanlardır.

Türkiye, aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer alması ve volkanik aktivitelerin yoğunlaştığı bir coğrafyada bulunması sebebiyle önemli bir jeotermal potansiyele sahiptir. Ülkemiz, küresel jeotermal kapasitesinin yaklaşık %11,5'ini bünyesinde barındırmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın 2020 yılı verilerine göre, Türkiye 1.613 megavatlık jeotermal kurulu gücü ile dünyada dördüncü, Avrupa'da ise ilk sırada yer almaktadır. Fosil yakıtların sınırlı olması ve çevresel etkileri göz önüne alındığında, jeotermal enerji gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Jeotermal enerji, kesintisiz enerji üretimi sağlaması ve düşük karbon emisyonuna sahip olması nedeniyle ülke ekonomisine önemli katkılar sağlamaktadır.

1.2. Çalışma Alanlarının Coğrafi Konumu

Çalışma alanı, Erzurum İli'nin güneyinde, Tekman ve Çat ilçeleri arasında yer almakta olup, özellikle Tekman'ın Yiğitler Köyü ve Çat'ın Çimenözü Köyü çevresini kapsamaktadır (Şekil 2). Bölge, 1/25000 ölçekli I46-d3 ve J46-a2 paftalarında yer almaktadır ve yaklaşık 143 km²'lik bir alanı kapsamaktadır.



Şekil 2. (a) Çalışma alanının yer bulduru haritası, (b) Çalışma alanına ait uydu görüntüsü (Google Earth).

1.3. Morfoloji

1.3.1. Tekman İlçesinin Morfolojisi

Tekman İlçesi, coğrafi konumu itibarıyla karmaşık bir jeomorfolojik yapıya sahiptir. İlçe, kuzeyde Pasinler ve Karayazı, batıda Hınıs, doğuda ise Karaçoban ilçeleri ile çevrilidir. Geniş ve yüksek platolarla karakterize olan bölge, kuzeyde Palandöken Dağları ve güneyde Şahvet Dağları tarafından sınırlandırılmaktadır. Doğu-batı yönünde uzanan bu dağ sıraları, 2500-3500 metre arasında değişen yüksekliklere ulaşan zirveleriyle bölgenin topografyasını belirlemektedir. Tekman Ovası ise bu dağ sıraları arasında yer alan önemli bir jeomorfolojik ünitidir.

Tekman Ovası, deniz seviyesinden yaklaşık 1800 metre yükseklikte yer alan, dağlık bir coğrafyada yerleşmiş bir çöküntü alanıdır. Ovanın sulaması, ağırlıklı olarak Palandöken Dağları'ndan doğan akarsular ve yeraltı suları ile sağlanmaktadır. Bu akarsular arasında en önemlilerinden biri olan Tekman Çayı, Palandöken Dağları'nın güney yamaçlarından doğarak ova boyunca doğu-batı yönünde ilerler ve daha sonra Aras Nehri'ne katılır.

Tekman İlçesi'nin güney kesiminde, Nalbant Dağı (2898 m), Akdağ (2300 m) ve Kara Tepe (2044 m) gibi yüksek rakımlı volkanik kökenli dağlar yer almaktadır. Bu dağlar, bölgenin topografyasını belirleyen önemli jeomorfolojik ünitelerdir. İlçenin kuzey kesiminde ise Palandöken Dağı'nın daha alçak yamaçları, geniş yaylalar ve tarımsal üretime uygun düzlük alanlar yer almaktadır. Bu coğrafi çeşitlilik, ilçenin iklim, bitki örtüsü ve toprak özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

1.3.2. Çat İlçesinin Morfolojisi

Çat İlçesi, coğrafi konumu itibarıyla Erzurum ilinin kuzeyinde, Palandöken Dağları'nın güneybatısında yer alan ve kompleks bir jeomorfolojik yapıya sahip bir bölgedir. İlçe, kuzeyde Erzurum merkez ve Pasinler, doğuda Tekman, batıda Bingöl ili ve güneyde Karayazı ilçeleri ile çevrilidir. İlçe sınırları içerisinde yer alan Çat Ovası, kuzeyde Palandöken Dağları, güneyde ise Bingöl Dağları tarafından sınırlandırılmıştır. Bu dağ sıraları, 2000-3200 metre arasında değişen yükseklikleriyle bölgenin topografyasını belirlemekte ve ova üzerindeki iklim koşullarını etkilemektedir.

Çat Ovası, deniz seviyesinden yaklaşık 1900 metre yükseklikte yer alan, dağlık bir coğrafyada yerleşmiş bir çöküntü alanıdır. Ovanın sulaması, ağırlıklı olarak Bingöl Dağları'ndan doğan akarsular ve yeraltı suları ile sağlanmaktadır. Bu akarsular arasında en önemlilerinden biri olan Çat Suyu, bölgenin hidrolojik rejimini belirleyen ana drenaj sistemini oluşturur. Bingöl Dağları'nın yükseklerinden doğan Çat Suyu, ova boyunca güneybatı yönünde ilerler ve daha sonra Karasu'ya katılır.

Çalışma alanının kuzey sınırını teşkil eden Palandöken Dağları'nın güney uzantıları, bölgenin topografyasını belirleyen önemli bir jeomorfolojik ünite dir. Bu dağ sıralarında 3000 metreyi aşan yükseltilere ulaşan zirveler bulunmaktadır. İlçenin güney kısmında ise Bingöl Dağları'nın devamı niteliğindeki Nalbant Dağı (2898 m) ve Karagöl Dağı (3057 m) gibi volkanik kökenli yüksek dağlar yer almaktadır. Bu dağlar, bölgenin jeolojik yapısı ve iklim koşulları üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

1.4. Ulaşım ve Yerleşim

Tekman İlçesi, Erzurum ilinin güneydoğusunda, kuş uçuşu yaklaşık 25 km, araba ile ise yaklaşık 151 km mesafede yer alan dağlık bir coğrafyada konumlanmıştır. İlçe merkezine ulaşım, Erzurum-Muş devlet yolu üzerinden sağlanmaktadır. İlçe merkezi ile köyler arasındaki ulaşım ağı, büyük ölçüde stabilize yollardan oluşmakla birlikte, ilçe merkezine yakın bazı köylerde asfalt yollar bulunmaktadır. İlçenin topografik yapısı nedeniyle, özellikle kış aylarında gözlenen kar yağışı ve buzlanma gibi olumsuz hava koşulları ulaşımında önemli zorluklar yaratmaktadır. Yaz aylarında ise tüm köy yollarına ulaşım imkânı sağlanmaktadır.

Çat İlçesi, Erzurum ilinin güneybatısında, kuş uçuşu yaklaşık 50 km uzaklıkta yer alan ve ulaşım ağının nispeten gelişmiş olduğu bir yerleşim birimidir. İlçe, Erzurum-Bingöl devlet yolu üzerinde stratejik bir konuma sahip olup, bu karayolu üzerinden il merkezine ve diğer ilçe merkezlerine ulaşım sağlanmaktadır. İlçe merkezi ile köyler arasındaki ulaşım ağı, büyük ölçüde stabilize yollardan oluşmakla birlikte Parmaksız, Karaşeyh ve Yavi gibi önemli köylerde asfalt yollar bulunmaktadır. Bu durum, ilçenin ulaşım altyapısının genel olarak iyi durumda olduğunu göstermektedir.

1.5. Akarsular

Tekman yöresindeki hidrolojik rejim, KD-GB yönünde akan ve havzanın ana drenaj sistemini oluşturan Çimenözü Çayı (eski ismi Manda Deresi) tarafından belirlenmektedir. Çimenözü Köyü'nün doğusundan geçen Çimenözü Çayı, bölgenin en önemli yüzeysel su kaynağı olup, çeşitli kollardan beslenmektedir. Kabak, Kartal, Nur, Küçük, Şavun, Beşik, Yassı, Kul ve Aydelik Dereleri gibi yan kollar, Çimenözü Çayı'na katılarak havzanın su toplama alanını genişletmektedir. Bu hidrografik ağ, bölgenin ekolojik dengesini ve yer altı su kaynaklarını beslemede önemli bir role sahiptir.

Çat yöresindeki hidrolojik rejim, kuzeydoğu-güneybatı (KD-GB) yönünde akan ve havzanın ana drenaj sistemini oluşturan Çimenözü Çayı (eski ismi Manda Deresi) tarafından belirlenmektedir. Çimenözü Köyü'nün merkezinden geçen Çimenözü Çayı, bölgenin en önemli yüzeysel su kaynağı olup, çeşitli kollardan beslenmektedir. Kösekomu, Kurragüheri, Navru, Hüseyin, Hatunan, Kilise, Hızırçayır, Hasar, Geli, Gülüzar Dereleri ve Büyüksu Çayı gibi yan kollar, Çimenözü Çayı'na katılarak havzanın su toplama alanını genişletmekte ve bölgenin hidrolojik dengesini sağlamaktadır. Bu hidrografik ağ, bölgenin jeomorfolojik yapısı, iklim koşulları ve jeolojik özellikleri ile yakından ilişkilidir.

1.6. İklim ve Bitki örtüsü

Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Erzurum, yüksek rakımı ve iç kesimlerde bulunması nedeniyle sert karasal iklim koşullarına maruz kalmaktadır. Yaz mevsimleri kısa, serin ve kurak geçerken, kış mevsimleri uzun, soğuk ve kar yağışlıdır. Yıllık ortalama sıcaklıkların düşük olması ve karla kaplı gün sayısının fazla olması, bölgenin iklim özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerdir. Bu sert iklim koşulları, Erzurum'un doğal bitki örtüsünü de doğrudan etkilemiştir. Bölgede bozkır bitki örtüsü hâkim olup, yüksek rakımlı alanlarda ise alpin çayırliklar ve bodur çalılar görülmektedir. Bu bitki örtüsü, bölgenin coğrafî ve iklimsel koşullarına adaptasyon gösteren türlerden oluşmaktadır. Erzurum'un iklim ve bitki örtüsü özellikleri, Doğu Anadolu Bölgesi'nin genel karakteristiklerini yansıtmaktadır.

Doğu Anadolu Bölgesi'nin tipik karasal iklim özelliklerini yansıtan Tekman ve Çat ilçeleri, yüksek rakımı nedeniyle sert ve uzun kışlara sahiptir. Kış aylarında sıklıkla sıfırın altına düşen sıcaklıklar ve yoğun kar yağışı, ilçenin iklimsel karakterini belirleyen en önemli özelliklerdir. Yaz mevsimleri ise kısa ve serin geçmekte olup, gece sıcaklıklarında belirgin düşüşler görülmektedir. Yıllık yağış miktarı genel olarak yeterli düzeyde olup, kar yağışının toplam yağış içindeki payı oldukça yüksektir. Bu iklim koşulları, ilçenin doğal bitki örtüsü, tarım faaliyetleri ve yerleşim yerlerinin dağılımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

Tekman ve Çat ilçelerinin doğal bitki örtüsü, çoğunlukla bozkır karakterinde olup, geniş otlak ve çayırlarla kaplıdır. Ağaçlandırma çalışmalarının sınırlı kalması nedeniyle orman örtüsü zayıftır. Step bitkileri ve yüksek rakımlara adapte olmuş çalı türleri, ilçelerin bitki örtüsünün temelini oluşturmaktadır. Bu doğal yapı, özellikle hayvancılık faaliyetleri için elverişli bir ortam sunmaktadır. Yaylalarda yetişen çeşitli ot ve bitki türleri, küçükbaş hayvancılık başta olmak üzere bölge ekonomisine önemli katkılar sağlamaktadır.

1.7. Ekonomik Jeoloji

Erzurum'un Çat ve Tekman ilçeleri, Türkiye'nin aktif tektonik kuşağında yer almaları ve volkanik-magmatik kökenli jeolojik yapıları sayesinde zengin doğal kaynak potansiyeline sahip bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Bu bölgeler, özellikle jeotermal enerji başta olmak üzere alternatif enerji kaynakları bakımından önemli bir potansiyele sahiptir. Jeotermal enerji potansiyeli, bölgenin jeolojik yapısı ile doğrudan ilişkili olup, bu sayede bölge aynı zamanda çeşitli maden yataklarına da ev sahipliği yapmaktadır.

Çat ilçesi, tarımsal ve hayvansal üretim faaliyetlerinin yanı sıra ilçenin farklı

bölgelerinde yer alan kireçtaşı rezervleri, çimento üretimi gibi inşaat sektöründe kullanılan ürünlerin temel hammaddesi olarak değerlendirilmektedir. Bu sayede kireçtaşı kaynakları, bölgenin ekonomik yapısına önemli katkılar sağlamaktadır.

Tekman ilçesi, doğal güzellikleri ve yayla turizmi potansiyeliyle tanınmasının yanı sıra zengin jeolojik yapısıyla da dikkat çekmektedir. Tekman İlçesi ve çevresinde Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yapılan çalışmalarda demir cevheri tespit edilmiştir. Ayrıca, Tekman yerleşim yerlerinde yapılan çeşitli jeotermal araştırmalar, bölgenin jeotermal enerji potansiyeli hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Çalışma alanı, geleneksel olarak hayvancılık ve tarım faaliyetlerine dayalı bir sosyoekonomik yapıya sahip olmasına rağmen, son yıllarda yer altı kaynaklarının değerlendirilmesi üzerine odaklanan yeni bir boyut kazanmıştır. Özellikle Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) bölgelerinde yürütülen yer altı suyu potansiyeli ve jeotermal enerji arama çalışmaları, bölgenin ekonomik yapısını çeşitlendirerek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bölgedeki doğal ve enerji kaynaklarının etkin bir şekilde değerlendirilmesi, hem yerel halkın yaşam kalitesini yükselterek bölgesel kalkınmayı destekleyecek hem de Türkiye'nin alternatif enerji kaynakları ve doğal varlıklar açısından sahip olduğu stratejik konumunu güçlendirecektir.

1.8. Çalışmanın Amacı

Bu yüksek lisans çalışmasında, Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde, Tekman ve Çat bölgelerindeki jeotermal su kaynaklarının hidrojeokimyasal ve çevresel izotopik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, jeotermal su kaynaklarının beslenme seviyelerini tespit etmek, rezervuar sıcaklıklarını tahmin etmek, su-kayaç etkileşimlerini değerlendirmek ve akifer sistemlerindeki suyun dolaşım süreçlerini ortaya koymaktır.

1.9. Önceki Çalışmalar

Türkiye ana karası, Alpin Orojenik Kuşağı dahilinde konumlanmakta olup, sırasıyla Pontidler, Anatolidler, Toridler ve Kenar Kıvrımları olarak 4 tektonik birliğe (Ketin, 1966) ayrılmıştır. Çalışma alanı, Pontidlerin güney sınırını oluşturan ofiyolitli kuşak üzerinde ve Kuzeydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır.

Bölgede genel jeoloji, petrol jeolojisi ve jeomorfoloji amaçlı birçok çalışma olup, başlıcaları Pamir ve Baykal (1943), Mercier (1948), Erentöz (1949), Demirtaşlı vd.

(1965), İlker (1966), Pelin (1970), Aziz (1971), Havur (1972), Erdoğan (1972), Gedik (1978), Pelin (1981), Yılmaz ve Şener (1984), Koçyiğit (1985), Gedik (1985), Yılmaz vd. (1986, 1989), Şaroğlu ve Yılmaz (1986), Korkmaz vd. (1991), Ünal (1994), Collins vd. (2005), Gelişli ve Maden (2006), Collins vd., (2008) ve Yıldırım (2008) tarafından yapılmıştır. Ayrıca suların turizm ve insan sağlığı gibi alanlarda bazı çalışmalar yapılmış olup, başlıcaları Özey (1987), ve Toy vd., (2010) tarafından ortaya konulmuştur.

Erzurum yöresindeki jeotermal sularla ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Erzurum ilinde jeotermal enerji kaynaklarına yönelik arama çalışmaları 1987 yılında başlatılmıştır. Küçük (1991) tarafından hazırlanan Pasinler (Erzurum) Kaplıcasına ait PS-1A jeotermal su kuyusu sondaj bitirme raporunda, 200,5 metre derinlikte açılan kuyuda 75 l/s debi ve 42 °C sıcaklığında akışkan tespit edildiği belirtilmiştir.

Uluşahin (1992) tarafından hazırlanan raporda, 200 metre derinliğindeki PS-2 jeotermal su kuyusundan sıcaklığı 42 °C, debisi 95 l/s olan jeotermal akışkan elde edildiği belirtilmiştir.

Göçtü vd. (1992) tarafından Pasinler Havzası'nda manyetik, gravite ve elektriksel yöntemler kullanılarak PS-1A kuyusunda yoğunluk ve gama-nötron logları alınmış, çalışma sonucunda, bölgede eğim atımlı fayların bulunmadığı ve Pasinler Havzasında alüvyon örtüsü altında geniş bir riyolit-riyolitik tüf kütlelerinin varlığı öngörülmüştür.

Taşçı ve Yurtseven (1995) raporunda, 205 metre derinliğindeki jeotermal sondaj suyunun sıcaklığının 40 °C ve debisinin de 110 l/s olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, söz konusu raporda, bu jeotermal suların florür (F) içeren sodyumlu-bikarbonatlı (Na-HCO_3) termal sular sınıfına dahil olduğu ifade edilmiştir.

Aynalı (2000a) tarafından hazırlanan raporda, Pasinler (Erzurum) jeotermal alanında 500 metre derinliğinde açılan PS-4 kuyusundan 50 l/s debi ve 43 °C sıcaklığında akışkan üretildiği belirtilmiştir.

Aynalı (2000b) tarafından hazırlanan raporda, Pasinler (Erzurum) PS-5 jeotermal su sondajında 160 metre derinlikte açılan kuyudan 70 l/s debi ve 40 °C sıcaklıkta akışkan üretildiği bildirilmiştir.

Esen (2001) tarafından hazırlanan raporda, Pasinler (Erzurum) havzasında yer alan jeotermal suların kuzey-güney doğrultulu açılma çatlakları boyunca yüzeye ulaştığı, sahanın düşük sıcaklıklı (entalpili) termal sistem içerdiği ve jeotermal suların tümünün sodyum-klorür-bikarbonat'lı termal sular sınıfına dahil olduğu belirtilmiştir.

Aynalı ve Bulut (2002) tarafından hazırlanan raporda, Pasinler (Erzurum) ilçesini de kapsayan bölgede yeraltı suyu akış yönünün kuzeyden güneye doğru olduğu ve bölgede açılan sondaj kuyularına ait kimyasal analizlerin incelenmesi sonucunda suların bazik karakter gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, yüzeye ulaşan jeotermal sulara başka su karışımlarının olmadığı ifade edilmiştir.

Akbaba (2003), Erzurum çevresindeki Ilıca, Hasankale ve Köprüköy kaplıcalarının termal sularında ve Köprüköy kaplıcasının çamurunda radyoizotop analizleri gerçekleştirilmiş, bu alandaki kaplıca sularının radyoizotop içeriğinin doğal arka plan seviyesinde olduğunu ve sağlık açısından belirgin bir risk taşımadığını ancak radyoizotopların biyolojik etkilerinin daha ayrıntılı incelenmesi gerektiğini ifade etmektedir.

Akkuş vd. (2005) tarafından hazırlanan raporda, Türkiye'deki 25 °C ve üzeri sıcaklıkta jeotermal su kaynağı ya da kuyularının bulunduğu 63 ildeki jeotermal alanlara ait bilgiler sunulmuştur.

Mamontotov vd. (2005), Türkiye'nin KD'sunun önemli jeotermal kaynaklar içerdiğini ve bu kaynakların geliştirilip kullanılmasının, bölgenin ekonomik ve sosyal gelişim için büyük önem taşıdığını ifade etmişlerdir.

Polat ve Elmastaş (2005), Tekman (Erzurum) ilçesinde yer alan Kiğı Hamzan Çimenözü termal su kaynakları üzerinde yapılan analizlerde, suyun pH değerinin genellikle 6,5-7,5 arasında, hafif asidik veya nötr bir karakterde olduğunu, suyun Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ ve K^+ gibi temel katyonlar açısından zengin olduğunu, anyonlar açısından bikarbonat (HCO_3^-), sülfat (SO_4^{2-}) ve klorür (Cl^-) içeriğinin belirgin olduğunu, organik madde oranlarının oldukça düşük seviyelerde bulunduğunu, suyun temiz ve mineral içeriğinin tedavi ve kullanım açısından amacına uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Taşkıran (2006), Tekman ilçesinin (Erzurum) güneybatısında yer alan jeotermal su kaynaklarının hidrojeokimyasal özelliklerini konu alan çalışmada, bu alandaki jeotermal suların, fay hatlarının etkisiyle yüzeye çıkmış olduğunu ve hidrojeokimyasal analizlere göre Çerme ve Ilıpınar kaynaklarının Na-Cl'lü su tipinde, diğer jeotermal suların ise Ca- HCO_3 'lü su tipinde olduğunu, Çerme ve Ilıpınar sularının derin dolaşıma sahip olduğunu, Yiğitler jeotermal suyu ve soğuk suların ise sığ dolaşımla beslendiğini, Ilıpınar kaynaklarının yüksek entalpiye sahip olduğu ve bölgenin yüksek sıcaklıklı bir jeotermal rezervuar potansiyeline işaret ettiğini, jeotermal suların pH değerleri 6,37 ile 8,17 arasında değişmekte olduğunu ve suların kullanıma uygun olduğunu, ancak Çerme ve Ilıpınar kaynaklarının yüksek EC değerleri ve evaporit formasyonlarından kaynaklanan Na-Cl oranlarının fazlalığının göze çarptığını ifade etmiştir.

Polat vd. (2005), Çat (Erzurum) ilçe sınırları içerisinde bulunan Hölenk Çayı Havzası'ndaki jeotermal kaynakları ve travertenleri incelemiş olup, Hölenk ve Köseler termal kaynaklarının sıcaklık değerleri sırasıyla 37°C ve 45°C'ye ulaşmakta olduğu, bu kaynakların çevresinde ise aktif ve fosil traverten birikimlerinin gözlemlendiği, bu travertenler, jeolojik süreçler sonucunda oluşmuş traverten terası, tıraş, konisi, sırtı ve dikit gibi farklı şekillerde sınıflandırıldığı, bu doğal oluşumların çeşitli nedenlerle tahrip edildiğini, travertenler üzerinde yerleşim yerleri kurulması gibi insan kaynaklı etkilerle zarar görmekte olduklarını, Termal kaynakların büyük ekonomik potansiyele sahip olmasına rağmen yalnızca balneolojik amaçlarla kullanıldığı ve bunun da ekonomik faydayı sınırladığını belirtmiştir.

Bektaş vd. (2007) tarafından yapılan çalışmalarda, Doğu Anadolu'nun manyetik anomali verilerinden elde edilen Curie nokta derinlik haritalarının, bölgedeki manyetik kalınlığın 13 ila 23 km aralığında olduğunu, kabuktaki yüksek sıcaklık anomalisinin, bölgede 45 °C'den yüksek sıcaklıktaki suların ve genç volkanik oluşumların varlığını gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Gökmenoğlu vd. (2009) tarafından hazırlanan raporda, Küçüktüy Köyü (Pasinler) sınırları içerisinde 750 metre derinliğinde açılan sondaj kuyusundan sıcaklığı 51.6 °C ve debisi 50 l/s olan artezyen jeotermal su elde edildiği belirtilmiştir.

Toy vd. (2010) tarafından hazırlanan raporda, bölgede yer alan termal tesislerin düşük entalpili sahalarda yer aldığı, bu nedenle modern termal tesislere ihtiyaç duyulduğu ve bölgede yeterli sayıda ve kapasitede işletme/reenjeksiyon kuyularının açılması gerektiği vurgulanmıştır.

Şimşek (2012) tarafından hazırlanan raporda, Hamamderesi (Erzurum-Pasinler) civarında bir adet jeotermal su kaynağının bulunduğu, bu kaynağın pH değerinin 7.35, sıcaklığının 32.6 °C ve elektriksel iletkenliğinin ise 3990 µS/cm olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, söz konusu kaynağın sol yönlü doğrultu atımlı fayı ile eğim atımlı normal fayın kesişim noktasından yüzeye çıktığı bildirilmiştir.

Ersoy ve Sönmez (2014), Ilıca (Erzurum) civarındaki jeotermal suların 29-39 oC sıcaklıkta, 4.000 ila 7.510 ls/cm arasında değişen iletkenlikte ve Na - HCO₃ - Cl bileşimli termal su olduklarını ortaya koymuşlardır.

Hatipoğlu Temizel (2014) tarafından hazırlanan doktora tez çalışmasında, Pasinler (Erzurum) jeotermal alanındaki jeotermal kaynakların sıcaklıklarının 22.5-51°C ve elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin 970-6233 µS/cm aralığında değiştiğini belirtmiştir. Silis jeotermometresi kullanılarak yapılan hesaplamalara göre rezervuar sıcaklığının 46-177°C arasında olduğunu, jeotermal suların δ¹⁸O-δ²H izotopik ilişkisi

incelendiğinde ise meteorik kökenli olduklarını belirtmiştir. $\delta^{13}\text{C}$ değerlerinin, jeotermal sulardaki karbonun yeraltı sularında çözünmüş inorganik karbon (C), tatlı su karbonatları ve manto kökenli CO_2 gazından kaynaklandığı, $\delta^{34}\text{S}$ değerleri ise kükürtün volkanik sülfür, petrol-kömür ve denizel kireçtaşlarından geldiğini ortaya koymuştur.

Erzurum yöresindeki soğuk sular ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Ercan (1956) tarafından hazırlanan raporda, Pasinler Ovası'nın yeraltı suyu etüdü gerçekleştirilmiştir. Raporda, Pasinler ovasında yeraltı suyu içeren birimin yalnızca alüvyonlar olduğu ve 200-300 metre arasında değişen araştırma kuyularının açılması gerektiği belirtilmiştir.

Emre (1962) tarafından hazırlanan raporda, İzirmik-Sos-Müceldi (Pasinler-Erzurum) Köylerinin içme ve kullanma suyu ihtiyacının karşılanması için bir adet su sondaj kuyusunun açılması gerektiğini, ancak kuyudan alınacak suların içinde kükürt (S) olma ihtimalinin de bulunduğunu ifade etmektedir.

Atalay vd. (1972) tarafından hazırlanan raporda, Pasinler Ovası'nın jeoloji, hidrojeoloji ve jeofizik çalışmaları detaylı bir şekilde yapıldığı ve bölgede yer alan 12551, 12569 ve 13283 numaralı kuyularda pompaj deneylerinin gerçekleştirildiği belirtilmiştir.

Aydın vd. (1998) tarafından hazırlanan Erzurum Pasinler Korucuk Köyü münferit hidrojeolojik etüd raporunda, etüd sahasında en yaygın birimlerin kum, kil ve çakıl depozitlerinden oluşan Kuvaterner yaşlı alüvyonlar olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, sahada 50 metre derinliğinde bir adet araştırma su sondaj kuyusu önerildiği ve açılan 52745 numaralı kuyudan iyi kalitede su alındığı ifade edilmiştir.

Bölgede Tersiyer yaşlı volkanik kayalar ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Innocenti vd. (1982), Kars kuzeyi-Çıldır yöresindeki Ardahan andezitinden elde ettikleri 1.8 ± 0.1 My yaş (K-Ar) ile volkanizmanın Geç Pliyosen-Erken Pleyistosen yaşlı olduğunu belirtmişlerdir. Melikler Bazaltının K-Ar yaş analizine göre yaşının 1.6-1.3 My olduğunu, Taşköprü Andezitinin yaşının ise 1.8 My olarak belirlendiğini belirtmişlerdir.

Bayraktutan (1986), Sarıkamış (Kars) yöresindeki bazaltlar üzerinde yaptıkları K-Ar yaş analizinde birimin yaşını 6 My olarak vermişlerdir.

Pearce vd. (1990), Bitlis Bindirme Zonu'nun kuzeyindeki Nemrut (Bitlis), Muş, Süphan (Van), Ararat (Ağrı dağı) ve Bingöl yöresindeki volkanik kayaların (bazalt, andezit ve bazaltik andezit) K-Ar yaşlarının 6.0 ± 1.0 My ile 0.23 ± 0.19 My aralığında

olduğunu ifade etmişlerdir.

Ercan vd. (1990), Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ndeki Orta Miyosende etkili olan volkanizmaya ait kayaçların genellikle kalk-alkalin ve alkalin karakterli nadiren de toleyitik özellikte olduklarını, iz element analizlerine göre ise üst kıtasal kabuk kısmen de alt kıtasal kabuk ve manto kökenli olduklarını, örneklerin $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotop oranlarını 0.70350-0.70640 arasında, K-Ar yöntemine göre obsidiyenler ve traki-andezitik lavların yaşlarının 11.4 ± 0.9 My ile 30 000 yıl arasında olduğunu, Horasan (Erzurum) yöresindeki bazalt örneğini yaşını ise 4.61 ± 0.71 My olduğunu belirtmişlerdir.

Bigazzi vd. (1994), Doğu Anadolu'daki birçok volkanik bölgedeki (Kars, Sarıkamış, Pasinler, Erzurum, Bingöl, Muş, Nemrut Dağı, Süphan Dağı, Meydan Dağı) ve Çayönü Neolitik alanından (Ergani ve Diyarbakır yakınları) obsidiyen örnekleri üzerinde Nötron Aktivasyon Analizi (INAA) ve Fizyon Track (FT) yöntemiyle yaşlandırma çalışmaları yapmışlar, kayaçların FT yaşlarının 0.03-6.09 My aralığında olduklarını, KD (Kars)'dan GB (Bingöl) doğrultusu boyunca düzgün bir yay boyunca dağılım gösteren obsidiyenlerin yaşının Üst Miyosen-Pliyosen olduğunu belirtmişlerdir.

Karaköse vd. (1994), yaklaşık kalınlığı 300-350 m olan Ulgartepe andezitinin yaşının, Ardahan andezitini (1.8 ± 0.1 My) kesmesine dayanılarak Erken Pleyistosen'den daha genç olduğu söylenmiştir.

Keskin (1994), Erzurum-Kars Platosunda çarpışma ile ilişkili volkanizma üzerine çalışmalar yapmış olup, Pasinler Ovası'nın kuzeybatısındaki Kargapazarı dağlarında gözlenen andezit, bazalt, riyolit, ignimbirit ve pomza türü kayaçları Kargapazarı Volkaniti olarak adlandırmıştır.

Keskin (1997), Kuzey Doğu Anadolu bölgesinde Pasinler Platosu'nu çarpışma kökenli volkanik istifin riyolitik piroklastik ürünler ile daha az miktarda olivinli bazik-ortaç bileşimli lavlar ile ardalanmalı olarak bulunduklarını, bazik ve felsik ürünlerin aynı magmadan susuz minerallerin fraksiyonel kristallenmesi yoluyla ortaya çıktıklarını ve aynı magma odasında değişim geçirdiklerini, volkanik istifin tabanından alınan örneğin K-Ar yaşının 7.8 My olduğunu, amfibol jeobarometre analizlerine göre volkanizmayı besleyen magma odasının yaklaşık 11-13 km derinlikte bulunduğunu ifade etmiştir.

Keskin vd. (1998), Doğu Anadolu Bölgesi'nde Erzurum-Kars Platosunda Miyosen'den Pliyosen'e kadar volkanik birimlerin bazaltlardan riyolitlere kadar değişen bileşimlere sahip olduğunu, mafik-ortaç lavlar ve piroklastik kayaçların yaşlarının 11-6 My (K-Ar) aralığında olduğunu ve erken evrede bimodal volkanizma ile temsil

edildiğini, geç evrede ise bazalt, bazaltik andezitler ve felsik domlardan (5-2.7 My, K-Ar) oluşan bimodal volkanizma ile karakterize olduğunu, ana magmanın LILE ve LREE elementler açısından zenginleşmesinin, çarpışma öncesi yitim olayları ile ilişkili olduğu belirtmişlerdir.

Keskin (2003), volkanik kayaçları oluşturan magma oluşumu için büyük bir yitim / yığılma kompleksindeki kopma ve levha yükselmesi şeklinde yeni bir model öne sürmüş, bu modele göre Doğu Anadolu Yığılma prizmasının altından kuzeye doğru dalan okyanusal litosferin yükseldiğini ve sonuçta Bitlis-Pötürge Masifi'nin kıtasal litosferden koparak ayrıldığını belirtmiştir.

Kılıç (2009), Pasinler (Erzurum) kuzeyindeki volkanik kayaçları bazaltik andezit, andezit, dasit, riyolit, perlit ve piroklastik kayaçlar olarak farklı kaya birimine ayırmıştır.

Keskin vd. (2006), Avrasya ve Arap kıtaları arasında çarpışma ile ilişkili Erzurum-Kars platosunda (Kuzeydoğu Anadolu) yer alan 11-1.5 My aralığındaki volkanizmanın yitim ilişkili ve kalk-alkali karakterli olduğunu, volkanik aktivitenin üç aşamada geliştiğini, erken evrenin 11-6 My aralığından ve iki modlu volkanik ürünlerle başladığını, orta evrenin 6-5 My aralığında andezitik lavların hakim olduğu tek modlu ara bir volkanizmaya dönüştüğünü ve son evrenin ise 5-1.5 My arasında iki modlu bir aktivite ile tamamlandığını, Erzurum-Kars Platosu'ndaki volkanik birimlerin izotopik bileşimleri zamansal bir değişim göstermezken mekânsal değişiklikler gösterdiği, Platonun batısındaki lavların Pb izotopik oranlarının doğudaki lavlardan daha düşük olduğunu, tüm bu varyasyonların magmalar tarafından asimile edilen kıtasal kabuk miktarı ve bileşimi ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Karlı vd., (2008), Doğu Anadolu'da Kuvaterner yaşlı Erzincan volkaniklerinin yüksek-K'lu kalk-alkalen özellikte olduğunu, yaşlarının 102 ± 2 ila 1061 ± 88 My arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır.

Kaygusuz (2009), Doğu Anadolu'daki Neojen Ilıca (Erzurum) volkaniklerinin, subalkali özellikte ve çarpışma sonrası volkanizmanın özelliklerini gösterdiğini, Ilıca bölgesindeki andezitik lav akıntılarının 13.9 ± 0.5 My ile 4.4 ± 0.3 My (K-Ar) arasında, traki-andezitik lavların 6.53 ± 0.55 My yaşları ile Miyosen ve Pliyosene karşılık geldiğini, volkanik kayaçların kalk-alkali bazaltik trakiandezitik, trakiandezitik, andezitik ve az miktarda piroklastiklerle ilişkili dasitik lavlardan oluştuğunu (andezitik lavların bol miktarda bulunduğunu), volkanik kayaçların LILE ve LREE bakımından zenginleşme ile HFSE bakımından ise tüketilme ile karakterize olduğunu, Ilıca volkanik kayaçlarının çarpışma sonrası alt kıtasal kabuğun kısmi ergimesi ile türediğini belirtmişlerdir.

Lebedev vd., (2016a), Geç Kuvaterner yaşlı Tendürek magmatik kayaçlarına ait bazaltik lavlara ait örneklerin yaşlarının 14.4 ± 0.44 My ile 0.005 ± 0.27 My (K-Ar) aralığında olduğunu ortaya koymuşlardır.

Oyan vd., (2016), Van Gölü'nün (Doğu Anadolu; Türkiye) kuzeydoğusunda yer alan Pliyosen Etrüsk stratovolkanının latitten riolite kadar değişene dar bir bileşim aralığına sahip olduğunu, lavların geçişli veya hafif alkali karakterli olduğunu, bazaltik lavlar üzerinde yapılan K-Ar yaş analizlerinin 4.9-4.5 My aralığında olduğu belirtmişlerdir.

Oyan vd. (2017), Van Gölü'nün kuzeyindeki çarpışmayla ilişkili Kuvaterner yaşlı magmatik aktivitenin K-Ar yaşlarını 1-0.4 My aralığında olduğunu, bazaltik örneklerde LILE ve LREE elementlerin yüksek çekim alanlı elementlere (HFSE) göre zenginleşme gösterdiği, bu örneklerin yüksek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ve Pb izotop oranları ve düşük $^{144}\text{Nd}/^{143}\text{Nd}$ oranlarına sahip olduğunu, Kuvaterner yaşlı mafik magmaların manto kaynak alanının kısmi ergiyiklerle zenginleşmiş olabileceği ortaya koymuşlardır.

Türkecan (2017), Kars ve Ardahan yörelerinde geniş alanlar kaplayan Geç Pliyosen ila Erken Pleistosen yaşlı volkaniklerin, andezit, riolit ve dasit bileşiminde olduğunu, domlar ve sırtlar şeklinde andezit bileşimli lav çıkışları, domlar şeklinde dasitik ve yer yer de riolitik bileşimde lav akıntıları şeklinde yüzeyleme verdiğini belirtmiştir.

Kaygusuz vd., (2018), Doğu Anadolu Bölgesinde (Erzurum, Kandilli) Miyosen-Pliyosen yaşlı bazaltik andezit, bazaltik traki-andezit, traki-andezit, andezit ve traki-dasit gibi kalk-alkali volkanik kayaçların büyük iyon çaplı litofil elementleri ve hafif nadir toprak elementleri bakımından zenginleştiğini, yüksek çekim alanlı elementler bakımından tüketilmiş olduğunu, volkanitlerin $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ oranlarının 0.70432–0.70464, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$ oranlarının 0.51272–0.51282, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)}$ değerlerinin 18.33-18.62, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)}$ değerlerinin 15.51-15.60, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)}$ değerlerinin 38.10-38.45 aralığında olduklarını, Pb izotop oranlarının zenginleşmiş bir manto kaynağını işaret ettiğini rapor etmişlerdir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kaynak Taraması

Çalışma alanını da içine alan bölgede yapılmış olan önceki çalışmalardan sıcak-soğuk sular ile ilgili çalışmalar ile genel jeoloji, tektonik ve magmatizma ile ilişkili çalışmalar da derlenmiştir. Önceki verilerin toparlanması ve değerlendirilmesi sonucunda inceleme alanında yapılacak arazi ve laboratuvar çalışmaları planlanmış ve uygulamaya sokulmuştur.

2.2. Arazi Çalışmaları

2023 ve 2024 tarihleri arasında jeoloji çalışmaları, yerinde ölçümler ve örnekleme çalışmaları olarak yürütülmüştür. İnceleme alanına ait 1/25000 ölçekli jeoloji haritasını hazırlamak amacıyla, topoğrafik haritalar ve önceki araştırmacılar tarafından hazırlanan jeoloji haritaları dikkate alınmış ve çalışma alanının 1/25000 ölçekli jeoloji haritası oluşturulmuştur. Ayrıca, jeotermal sistemlerin rezervuar kayacını oluşturan genç volkanik kayalardan numuneler alınmıştır.

Saha çalışmalarında Tekman ve Çat jeotermal alanlarında yer alan sıcak su, soğuk su ve yüzey suyu kaynaklarının konumları belirlenmiştir. Bu kaynakların çevrelerinde jeolojik ve tektonik incelemeler yapılarak bölgedeki jeolojik ve tektonik unsurlar tespit edilmiştir. Sıcak ve soğuk su kaynaklarının birbirleriyle olan mesafeleri ile morfolojik ve tektonik ilişkileri dikkate alınarak su alınması uygun olan noktalar seçilmiştir.

Saha çalışmaları sırasında yapılan yerinde ölçümlerle havzadaki jeotermal sular, soğuk kayna sular ve yüzey sularından pH, EC, T(°C), TDS ve DO ölçümleri, kurak ve yağışlı dönemleri temsil etmek üzere ikişer kez (Ağustos ve Kasım ayları) YSI-556MPS model çoklu parametre ölçer ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Ayrıca, jeotermal su kaynağının gaz ölçümleri, İbrid MX6 model portatif gaz ölçer ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Ölçümlerde kullanılan problemler, her ölçüm öncesinde ve sonrası saf su ile yıkanmış ve her arazi çalışması öncesi buffer solüsyonları ile günlük kalibrasyonları yapılarak kullanıma alınmıştır. Jeotermal ve soğuk suların kimyasal içerikleri ve değişimlerini belirlemek amacıyla, Ağustos 2024 ve Kasım 2024 dönemlerinde jeotermal su kaynaklarından, soğuk su kaynağından ve yüzey (dere) sularından su numuneleri alınmıştır. Su numuneleri polietilen şişeler ile alınmıştır (Şekil 3c). İz element analizleri

için alınan numunelere ultra saf nitrik asit ilave edilerek numunenin pH değeri­nin 2'nin altına düşürölmesi ve böylece polietilen numune kabı içerisinde sudaki elementlerin ökölmesi veya kabın iç yüzeyinde tutulmalarının engellenmesi sağlanmıştır. İzotop analizleri (^3H) için 100 ml, trityum analizleri için 500'er ml, majör anyon-kasyon analizleri için 250 ml ve radyoaktivite (alfa ve beta) analizleri için de 1000 ml'lik polietilen numune şişeleri kullanılmıştır.



Şekil 3. (a) Çoklu parametre ölçer, (b) gaz ölçüm aleti, (c) su örneklerinin alındığı polietilen şişeler

Saha çalışmaları­nda hem çalışma yapılan alanların hem de numune alım ve ölçüm yapılan noktaların koordinatları topografik haritalara işlenmiştir.

2.3. Laboratuvar Çalışmaları

2.3.1. İnce Kesitlerin Hazırlanması

Su-kaya etkileşimini belirlemek amacıyla çalışma alanından toplanan kayaç örneklerinin ince kesitleri hazırlanmıştır. İnce kesitler hazırlanırken öncelikle kayaçlardan kesilen 0.5x2x4 cm boyutunda plakalar, ön yüzeylerindeki pürüzlölükler giderilip 1 mm kalınlığında, 2.5 x 5 cm cam levhaya Kanada Balzamu ile yapıştırılmıştır. Cam üzerine yapıştırılmış plakanın arka yüzeyi, aşındırıcı tozlar yardımı ile 0.025 mm kalınlığına kadar inceltılmıştır. Laboratuvar­da bulunan bir polarizan mikroskop yardımıyla kesit kalınlığı kontrol edilmiş ve inceltmenin tam olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kalın kalan kesitler tekrar ince toz yardımıyla inceltılmıştır. Kesit hazırlama işlemleri Gümüşhane Üniversitesi MDF (Mühendislik ve Doğa Bilimleri Faköltesi) Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde yer alan ince kesit hazırlama laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.3.2. Petrografik Çalışmalar

İnce kesit incelemeleri ile jeolojik birimlerin mineralojik bileşimleri, dokusal özellikleri ve ayrışma durumları belirlenmiştir. İncelenen kesitler kayaç türlerine göre sınıflandırılmış, doku ve mineralojilerine göre incelenmiştir. Bu çalışmalar, Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Bölümü'ndeki Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Leica marka polarizan mikroskopta gerçekleştirilmiştir.

Uygun olan ince kesitlerin mikroskopik görüntüleri, Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ndeki Leica marka Fotoğraf Ünitesi ile çekilmiş, kaydedilmiş ve kişisel bilgisayara aktarılmıştır.

2.3.3. Analiz Çalışmaları

2.3.3.1. Su örneklerinin analizleri

Çalışma alanından derlenen su numunelerinin anyon-kasyon, iz element, izotop ve radyoaktivite analiz ölçümleri yaptırılmıştır.

Alınan su numunelerinin kimyasal analizleri, DSİ Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü Kimya Laboratuvarı (Erzurum) ve DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Laboratuvarı (Ankara)'nda iyon kromatografi tekniği ile, iz element analizleri ise İndüktif Eşlenik Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) yöntemi ile Gümüşhane Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.

Tritiyum (^3H) analizleri sıvı sintilasyon sayma tekniği ile Teknik Araştırma Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı İzotop Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.

Su örneklerinin silis (Si) analizleri DSİ 8.Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü Kimya Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

2.3.3.2. Tüm-Kayaç Jeokimyasal Analizleri

İnceleme alanında jeotermal kaynakların çevresinden alınan genç volkanik kayaç örneklerine ait tüm-kayaç ana oksit ve bazı iz element analizleri Çin'de Wuhan Sample Solution Analitik Teknoloji Laboratuvarı ve Kanada'da ACME Analiz Laboratuvarında yaptırılmıştır.

Tüm-kayaç ana, iz ve NTE analizleri için mineralojik-petrografik incelemeler neticesinde mümkün mertebe ayrışmamış ya da çok az ayrışmış numuneler seçilmiş ve küçük plakalar halinde (minimum 50 gram) kesilerek ilgili laboratuvarlara gönderilmiştir.

Sample Solution Analitik Teknoloji Laboratuvarında tüm kayaç ana element

analizlerinin numune ön işleme yöntemi ile yapılmıştır. Akı, lityum tetraborat, lityum metaborat ve lityum florürün bir karışımı (45:10:5) olup, oksidan ve ayırıcı olarak sırasıyla amonyum nitrat ve lityum bromür kullanılmıştır. Erime sıcaklığı 1050 0C ve erime süresi 15 dakikadır. RIGAKU, Japonya tarafından üretilen Zsx Primus II dalga boyu dağılımlı X-ışını floresan spektrometresi (XRF), tüm kayadaki ana elementlerin analizi için kullanılmıştır. X-ışını tüpü 4.0KW uç pencere Rh hedefidir ve test koşulları voltajı 50kV, akımı 60mA dir. Tüm ana eleman analiz hatları kα'dır, Standart eğri, ulusal standart malzemeyi kullanmıştır. Kaya standardı numunesi: GBW07101-14, toprak standart numunesi: GBW07401-08, akış tortusu standart numunesi: GBW07302-12'dir. Veriler teorik α katsayısı yöntemiyle düzeltilmiş olup, göreceli standart sapma (RSD) % 2'den azdır.

Tüm kayaç iz element analizleri, Wuhan SampleSolution Analytical Technology Co., Ltd., Wuhan (Çin)'de Agilent 7700e ICP-MS üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıntılı numune öğütme prosedürü şu şekildedir: (1) Numune tozu (200 mesh), 12 saatlik kurutma için 105°C'de bir fırına yerleştirilmiştir; (2) 50 mg numune tozu doğru bir şekilde tartılmış ve bir Teflon bombaya yerleştirilmiştir; (3) Teflon bombaya 1 ml HNO₃ ve 1 ml HF yavaş yavaş eklenmiştir. (4) Teflon bomba paslanmaz çelikten bir basınç ceketine yerleştirilmiş ve >24 saat boyunca bir fırında 190 °C'ye kadar ısıtılmıştır. (5) Soğutulduktan sonra, Teflon bomba açıldı ve 140 °C'de bir ocak üzerine yerleştirilmiştir. Sonra kurumaya başlayana kadar buharlaştırılmış ve ardından 1 ml HNO₃ ilave edilmiş ve tekrar kuruyana kadar buharlaştırılmıştır. (6) 1 ml HNO₃, 1 ml MQ su ve 1 ppm In'in 1 ml dahili standart solüsyonu eklenmiş, Teflon bomba yeniden kapatılmış ve >12 saat boyunca 190 °C'de fırına yerleştirilmiştir. (7) Nihai çözelti bir polietilen şişeye aktarılmış ve %2 HNO₃ ilavesiyle 100 g'a seyreltilmiştir.

ACME (Kanada) Analiz Laboratuvarında ana ve iz elementler ICP-AES yöntemi ile analiz edilmiş olup, seçilen 0.2 gr toz numune 1.5 gr'lık LiBO₂ ile karıştırılması ve %5 HNO₃ içeren sıvı içinde çözündürülmesi ile yapılmıştır. Nadir toprak elementler ise ICP-MS yöntemiyle ve 0.250 gr toz örneğin dört farklı asit içinde çözündürülmesi ile analiz edilmiştir. Analiz limitleri ana oksitlerde 0.002 - 0.04 (% ağırlık), iz elementlerde 0.1 - 8 ppm ve NTE'lerde ise 0.01 ile 0.3 ppm arasındadır.

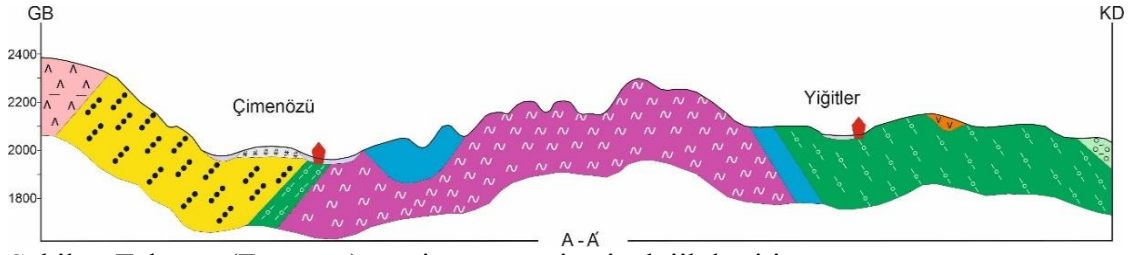
2.4. Büro Çalışmaları

Arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen verilerin korelasyonu, yorumlanması ve değerlendirilmesi amacıyla büro çalışmaları yürütülmüştür. Çalışma alanı ve civarındaki jeotermal sistemi oluşturan havza sınırları belirlenmiştir. Sahada

topografik harita üzerine işaretlenen jeolojik harita, bilgisayar ortamında CoralDraw çizim programı yardımı ile temize geçirilmiş ve inceleme alanının 1/25000 ölçekli jeolojik haritası tamamlanmıştır. Aynı zamanda jeolojik dikme kesit ve enine jeolojik kesitler çizilmiştir. Jeokimyasal ve izotopik veriler Grapher programına aktarılmış, ikili, üçlü ve örümcek diyagramlarının çizilmesini ve yorumlanması sağlanmıştır.



Şekil 4. Tekman (Erzurum) ve civarının jeolojik haritası (Konak ve Hakyemez, 2008'den değiştirilmiştir)



Şekil 5. Tekman (Erzurum) ve civarının enine jeolojik kesiti

SİSTEM	SERİ	Formasyon	Kalınlık	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
KUVATER.			50		Alüvyon
			200	# # # # # # # #	Traverten
	Pliyosen	Bingöldağı volkanitleri	~600	V V V V V V V V V V V V	Bazaltik andezit, andezit ve piroklastları, ignimbirit
				Λ Λ Λ Λ Λ Λ Λ Λ	Bazalt, bazaltik andezit, andezit ve piroklastları (marn, kilaşı ve kumtaşı ara katkılı)
				— — — — — — — —	Kırmızı çakıldaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması
				○ / ○ ○ / ○ ○ / ○ ○ / ○	Şeyl, kumtaşı ve kilaşı ardalanması
	Eosen	Memişkonu Formasyonu	~500	• • • • • • • • • • • •	Kireçtaşı, killi kireçtaşı, çakıldaşı, kumtaşı ve silttaşı ardışımı Aglomera, volkanik breş, tüf, tüffit
				— ○ — — ○ — — ○ — — ○ — — ○ — — ○ —	Çakıldaşı, kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı ardışımı Aglomera, volkanik breş, tüf, tüffit
					Kireçtaşı üyesi (marn, kumtaşı, kireçtaşı)
		Kösehasan / Kozlu Formasyonu	~650		
PALEOZOYİK / ÜST KRETASE		Şahvalet / Hınıs Ofiyolitleri		~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	Serpantin, peridotit, gabro ve diyabaz

Ölçeksizdir

Şekil 6. Tekman-Çat (Erzurum) ve yakın çevresinin stratigrafik kolon kesiti

3.1.2. Şahvelet / Hınıs Ofiyolitleri

Tekman bölgesinde yüzeyleyen ofiyolitler, başlıca serpantinit, peridotit ve gabro gibi ultramafik ve mafik kayalardan ve bunları kesen diyabaz dayklarından oluşmaktadır. İlk olarak Yılmaz ve Uysal (1988) tarafından Şahvelet Ofiyolitleri olarak adlandırılan bu birim, daha sonra Hınıs yöresinde Tarhan (1997) tarafından Hınıs Metaofiyolitleri olarak yeniden tanımlanmıştır. Literatürde bu birim için kullanılan farklı adlandırmalara rağmen, iki çalışma alanının da aynı ofiyolit karakterli kayaları içerdiği ve bu kayaların yaşı konusunda farklı görüşler olduğu belirtilmektedir. Yılmaz ve Uysal (1988), ofiyolitlerin yaşını Pre-Maastriyen olarak verirken, Tarhan (1997) ise Alt Paleozoyik (Karbonifer öncesi) olarak belirtmiştir. Bu çalışmada, söz konusu ofiyolitleri kapsayan geniş bir alana işaret etmek amacıyla "Şahvelet/Hınıs Ofiyolitleri" terimi kullanılmıştır.

Bu Formasyon Çimenözü (Çat)'nın Kuzeyinde ve Yiğitler (Tekman)'in Güneyinde Boğa Tepe, Kortik Tepe, Büyükçil, Hisar Uzun Sirt, Kurt Tepe Navru tepe bölgelerinde aynı zamanda her iki formasyonun doğusunda Kartal Tepe, Semayayla Tepe, Pağdak Tepe, Uzak Tepe bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir (Şekil 4).

Çimenözü (Çat) yöresinde fay hatları boyunca yer alan jeotermal su kaynakları çevresinde sıklıkla gözlenen listvenitler, hidrotermal alterasyon sonucu serpantinleşmiş kayaların silika ve karbonat mineralleri ile zenginleşmesiyle oluşmuş, Mg-Ca silikat bileşimine sahip metamorfik kayalardır. Bu kayalar, genellikle sarımtırak-kızılkahve renkli olup, topografyada belirgin, sarp çıkıntılar oluşturarak kolayca ayırt edilebilirler. Listvenitlerin oluşumu, bölgesel jeolojik yapı ve hidrotermal aktivite ile yakından ilişkilidir.

Şahvelet/Hınıs Ofiyolitleri inceleme alanının en yaşlı birimi olup, üzerine uyumsuz olarak Kösehasan/Kozlu Formasyonu gelir.

3.1.3. Kösehasan / Kozlu Formasyonu

Tekman ve Kozlu yörelerinde yüzeyleyen Eosen yaşlı sedimanter kayalar, farklı araştırmacılar tarafından farklı isimlerle tanımlanmıştır. Erdoğan ve Soytürk (1974) tarafından Kösehasan Formasyonu olarak adlandırılan bu birim, Tarhan (1997) tarafından ise Kozlu Formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Söz konusu formasyon, altta düzenli istiflenmiş kırıntılı kayalar ve kireçtaşları, üstte ise olistostromal ve regresif nitelikli iri kırıntılılardan oluşmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu birimi kapsayan geniş bir alana işaret etmek amacıyla "Kösehasan/Kozlu Formasyonu" terimi kullanılmıştır. Bu birim inceleme alanının kuzeyinde Mağraaltı Tepe, Ziyaret Tepe, Şavun Tepe,

Aydoğdu Tepe ve Yosun Tepe bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir. Ayrıca Kel tepe, Kara Tepe, Kabak Tepe, Selim Tepe, Harunköy, Deviz Tepe ve Kurt Tepe civarında gözlenir (Şekil 4).

Kireçtaşı Üyesi, ilk olarak Tarhan (1997) tarafından Kozlu Formasyonunun alt birimini ifade eden Orta Eosen (Lütesiyen) yaşlı Kireçtaşı Üyesi şeklinde tanımlanmıştır. Kireçtaşı üyesi ince-orta katmanlı, gri-bej renkli, yer yer marn, kumtaşı, kalkarenit arakatkılarını içeren kireçtaşlarından oluşur.

Kireçtaşı üyesi inceleme alanının kuzeyinde Türbe Tepe, Ardıç Tepe, Kurç Tepe, Kırmızışehir Tepe, Kandil Tepe, Deval Tepe ve Yuvaklı bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir (Şekil 4).

Kösehasan/Kozlu Formasyonu'nun inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 650 m dir. Birim tabanındaki peridotitleri açısız uyumsuzlukla örtmekte olup, üste doğru Memişkomu Formasyonu'na tedrici geçiş gösterir.

3.1.4. Memişkomu Formasyonu

Çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, kireçtaşı, tüfit, marn, lav ve piroklastik kaya türlerinden oluşan birim ilk olarak Tarhan (1997) tarafından Memişkomu Formasyonu olarak isimlendirilmiş, bu çalışmada da aynı isimlendirme kullanılmıştır.

Bu birim arazinin güneyinde Yanan Tepe, Talan Tepe, Şemun Dağı, Karavelli Sırtı, Gözeler ve Hasan Komu bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir (Şekil 4).

Birimin inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 600 m olup, üste doğru Ağcakoca Formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülür.

3.1.5. Ağcakoca Formasyonu

Başlıca çakıllı kumtaşı, marn, şeyl, kireçtaşı ve üste doğru jipsli oluşukların yer aldığı Oligosen yaşlı kayalar ilk olarak Soytürk (1973) tarafından Ağcakoca Formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Bu çalışmada aynı isimlendirme kullanılmıştır.

Bu birim inceleme alanının kuzeyinde Akdamar, Ulama Tepe ve Hamam Tepe bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir (Şekil 4).

Birimin inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 350 m olup, üste doğru Bingöldağı Volkanitleri tarafından uyumsuz olarak örtülür.

3.1.6. Ahlat Formasyonu

Kırmızı renkli çakıltası, kumtaşı ve yer yer silttaşı ardalanmasından oluşan birimler, ilk olarak Soytürk (1973) tarafından Ahlat Formasyonu şeklinde isimlendirilmiş ve bu çalışmada da aynı isimlendirme kullanılmıştır.

Kumtaşları ve silttaşları orta-ince katmanlıdır. Birimin içinde sık sık çapraz katmanlar izlenir.

Ahlat Formasyonu inceleme alanının en yaşlı birimi olup, inceleme alanının kuzeyinde Güzellik Dere Mevki ve Bardak Sırtı bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir (Şekil 4). Birimin inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 250 m olup, üste doğru Bingöldağı Volkanitleri tarafından uyumsuz olarak örtülür.

3.1.7. Solhan Formasyonu

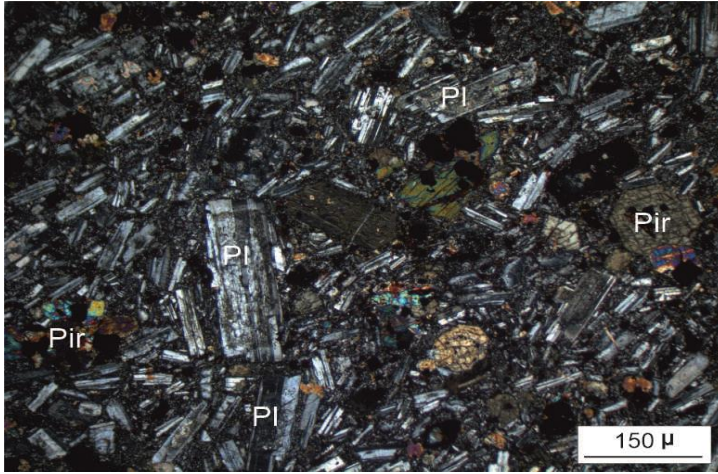
Bazalt, bazaltik andezit, andezit ve piroklastları (aglomera, volkanik breş) ile yer yer orta-ince katmanlı marn, kumtaşı, gölsel kireçtaşı ve silttaşlarının ardalanmasından oluşan birim ilk olarak Tarhan (1989) tarafından Solhan Formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Bu çalışmada da aynı isimlendirme kullanılmıştır.

Bu birim inceleme alanının en yaşlı birimi olup, inceleme alanının güneyinde Hasanyayla Tepe, Küçükkırmızı Tepe, Musadüzü Tepe, Bataklık Tepe, Çığyayla Tepe, Harman Sırtı ve Hasanyayla Sırtı bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir (Şekil 4). Birimin inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 500 m dir.

Birimden alınan örneklerin mikroskobik incelemesinde aşağıdaki özellikler tesbit edilmiştir:

İnceleme alanındaki volkanitlere ait bazaltik andezitler mikrolitik yer yer de mikrolitik porfirik dokusu göstermekte olup, başlıca mineralleri plajiyoklas, piroksen (ojit) ve opak minerallerden oluşur (Şekil 4).

İncelenen örneklerde plajiyoklaslar, genellikle mikrolit ve latalar şeklinde hamur içinde dağılım gösterirken, az miktarda da öz ve yarı öz şekilli levhamsı fenokristaller olarak gözlemlenmiştir (Şekil 7). Küçük kristallerde albit ikizlenmesi yaygın olarak görülür. Piroksenler ise, genellikle küçük yarı öz ve öz şekilli prizmatik kristaller şeklinde bulunurlar ve bazı tanelerde birbirine dik ikizlenmeler tespit edilmiştir (Şekil 7). Piroksenlerin ayrışma ürünleri olarak klorit ve kalsit mineralleri belirlenirken, kenar kısımlarında opak minerallerin gelişimi de gözlemlenmiştir. Hamur, çoğunlukla feldispat ve piroksen mikrolitleri ile küçük opak minerallerden oluşur. Alterasyon ürünleri olarak kil mineralleri, kalsit, serizit, klorit, epidot, iddingsit ve serpantin gibi mineraller de hamur içinde yer almaktadır.



Şekil 7. Bazaltik andezitlere ait ince kesit görüntüsü (Pl: Plajiyoklas, Pir: Piroksen, Ç.N)

3.1.8. Bingöldağı Volkanitleri

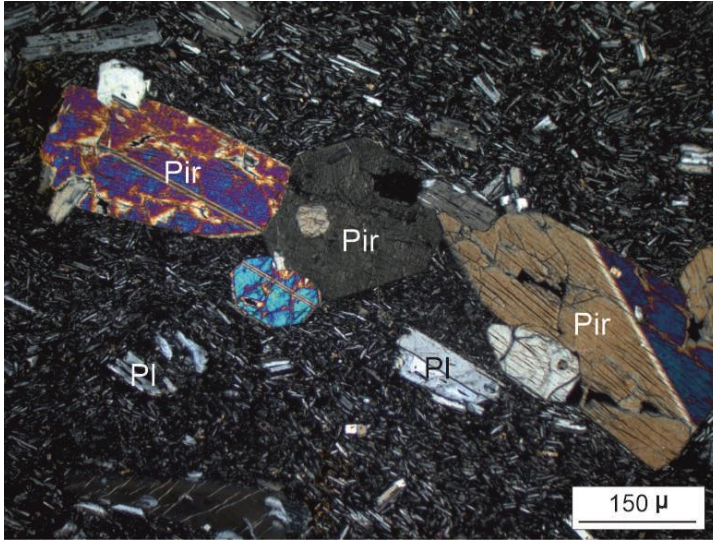
Bazaltik andezit ve andezitlerden oluşan birimler ilk olarak Yılmaz ve Uysal (1988) tarafından Bingöldağı volkanitleri olarak isimlendirilmiş, bu çalışmada da aynı isimlendirme kullanılmıştır.

Bu birim inceleme alanının kuzeyinde Şakşak Tepe, Yosun Tepe, Yusufun Sırtı ve Kayalı Sırtı bölgelerinde yayılım göstermektedir (Şekil 4). Birimin inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 600 m dir.

Birimden alınan örneklerin mikroskobik incelemesinde aşağıdaki özellikler tesbit edilmiştir:

İnceleme alanındaki volkanitlere ait andezitler porfirik, mikrolitik porfirik yer yer de glomeraporfirik dokusu göstermekte olup, başlıca mineralleri plajiyoklas, iri ojit ve opak mineraller oluşturur (Şekil 8).

İncelenen örneklerde plajiyoklaslar hem fenokristal, hem de mikrolit olarak yaygın şekilde bulunurlar. Fenokristaller, çoğunlukla levhamsı habitusta olup, albit ve polisentetik ikizlenmeler gösterirler. Bazı kristallerde salınlı zonlanma ve elek dokusu gibi özellikler gözlenir. Piroksenler ise genellikle prizmatik habitusta olup, bazı tanelerde zonlanma ve (100) ikizlenmesi belirlenir (Şekil 8). İri fenokristallerde plajiyoklas ve opak mineral kapanımları sıklıkla görülür. Hem plajiyoklas hem de piroksen minerallerinde ayrışma ürünleri olarak klorit ve kalsit belirlenirken, kenar kısımlarda opak minerallerin gelişimi de gözlemlenmiştir. Hamur, çoğunlukla feldispat ve piroksen mikrolitleri, küçük opak mineraller, alterasyon ürünleri (kil mineralleri, kalsit, serizit) ve aksesuar mineraller (apatit) içerir.



Şekil 8. Andezitlere ait iri piroksen mineralleri (Ç.N. Pir: Piroksen, Pl: lajiyoklas)

3.1.9. Traverten

Fay ve bindirme zonları boyunca yer alan kırık ve çatlaklar, yeraltı sularının yüzeye çıkışına olanak sağlayarak, bu bölgelerde çökel oluşumunu tetikler. Özellikle aktif fay zonlarında sıcak veya soğuk su kaynaklarının varlığı sıklıkla gözlemlenir. Bu kaynaklar tarafından taşınan minerallerin çökmesiyle oluşan travertenler, zamanla fay hareketleri nedeniyle yer değiştirerek bölgenin jeomorfolojik evriminde önemli bir rol oynar.

Bu birim alüvyonlar ile birlikte inceleme alanının en genç birimi olup, Çimenözü Çayı civarında yayılım göstermektedir (Şekil 9). Birimin inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 200 m dir.



Şekil 9. Çimenözü kuzeyinde yer alan travertenlerin arazi görünümü

3.1.10. Yeni Alüvyon

Bu alüvyonlar, ovaların orta kısımlarında, akarsu vadi ve düzlüklerinde oluşumu sürmekte olan alüvyonlardan oluşur.

Bu birim inceleme alanının en genç birimi olup, inceleme alanındaki yaklaşık kalınlığı 50 m dir.

3.2. Yapısal Jeoloji

Şengör (1980) tarafından Neotektonik dönemde sıkışma rejimi içerisinde tanımlanan Doğu Anadolu Bölgesi, Tekman ve Çat Havzaları'nda da benzer bir jeodinamik evreye sahne olmuştur. Bu sıkışma rejiminin bir sonucu olarak, bölgede doğrultu atımlı faylar en belirgin tektonik yapıları oluşturmaktadır. Yılmaz ve arkadaşları (1989) tarafından yapılan mikrotektonik çalışmalarda, bu fayların Üst Miyosen'de aktif hale geldiği ve Üst Miyosen yaşlı birimlerdeki gözlemlerle doğrultu atımlı fayların D-B yönünde sol yanal hareket gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, bölgedeki sıkışma ekseninin K-G yönünde olduğunu göstermektedir. Bu çatlaklar boyunca yükselen volkanitler, havzanın jeolojik evriminde belirleyici bir rol oynamıştır. Ayrıca, havzanın güney ve kuzeyindeki volkanik domların da bu çatlaklarla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

İnceleme alanının güneyinde Yanan Tepe, Çimenözü, Kartal Tepe hattı boyunca uzanan doğrultu atımlı fay yer almaktadır. Ayrıca yığitler ve civarında küçük ölçekli doğrultu atımlı faylar da gözlenmiştir. İnceleme alanı içerisindeki jeotermal su kaynakları, bu faylar tarafından oluşan ve bu fay zonlarına paralel ikincil makaslama faylarının etkisiyle yüzeye çıkmaktadır.

İnceleme alanındaki tortul birimler, belirgin bir tabakalı yapı göstermektedir. Çimenözü bölgesinde Eosen yaşlı Kösehan/Kozlu Formasyonları ile Memişoğlu Formasyonuna ait tortul kayalar kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda ve 20-35 derece güneydoğuya eğimlidir. Yığitler bölgesinde Kösehan, Ağakoca ve Ahlat Formasyonlarına ait tortul birimler kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda ve 15-40 derece kuzeydoğuya eğimlidir.

İnceleme alanındaki kayalar, 1-5 cm arasında değişen açıklıklara sahip, düz veya yer yer pürüzlü yüzeyli çatlaklarla yoğun bir şekilde kesilmiştir. Bu çatlakların aralıkları kalsit ve ikincil silis mineralizasyonu ile dolmuştur. Bölgenin geçirdiği yoğun deformasyon süreçleri, çatlak sistemlerinde çok yönlü gelişmelere neden olmuştur.

4. HİDROJEOLJİ

4.1. İklim ve Özellikleri

Çalışma alanının iklim ve hidrolojik özelliklerinin incelenmesi amacıyla, bölgeye coğrafi olarak en yakın ve en kapsamlı meteorolojik veriye sahip olan Erzurum İl merkez istasyonundan sıcaklık ve yağış verileri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji 12. Bölge Müdürlüğü (Erzurum) tarafından temin edilmiştir. Elde edilen bu veriler temel alınarak, çalışma alanının su bütçesi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

4.2. Yağış ve Sıcaklık

4.2.1. Yiğitler (Tekman) Bölgesi

Çalışma alanının iklim koşullarını daha iyi anlamak amacıyla, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Tekman istasyonundan elde edilen aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verileri detaylı bir şekilde incelenmiştir (Tablo 1).

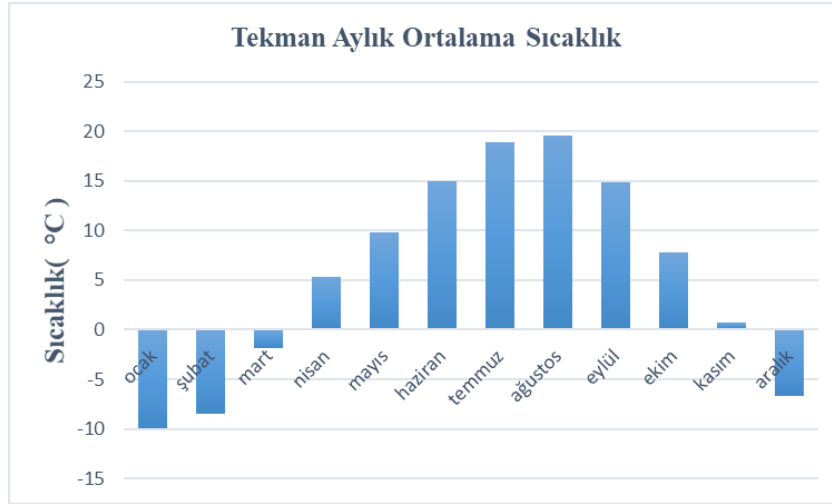
Tablo 1. Tekman İlçesi'ne 2013-2024 yıllarına ait aylık-yıllık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri.

Aylar	Aylık Toplam Yağış (mm)	Ortalama Sıcaklık °C
Ocak	33.68	-9.92
Şubat	24.99	-8.43
Mart	63.52	-1.84
Nisan	45.2	5.35
Mayıs	74.23	9.77
Haziran	31.76	14.97
Temmuz	24.03	18.89
Ağustos	15.73	19.57
Eylül	21.99	14.88
Ekim	40.52	7.84
Kasım	35.48	0.7
Aralık	35.15	-6.73
Yıllık	37.19	5.42

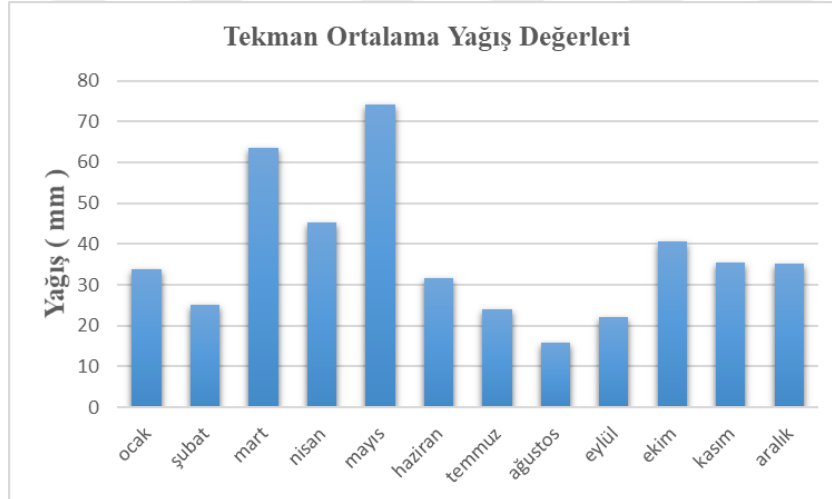
Erzurum ve Tekman arasındaki yükseklik farkının sıcaklık değerleri üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak, gerekli yükseklik düzeltmeleri yapılmıştır. Uzun yıllar boyunca elde edilen ve Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan ortalama değerlere göre, Tekman'da yıllık toplam yağış miktarı 37.19 mm, yıllık ortalama sıcaklık ise 5.42 °C olarak belirlenmiştir.

Tekman Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan veriler ile hazırlanan aylık ortalama

sıcaklık-yağış değerleri ve aylara göre değişimi Şekil 10 ve 11’de yer almaktadır.



Şekil 10. Tekman Meteoroloji İstasyonu’ndan ölçülen ortalama sıcaklık (°C) değerleri ve aylara göre değişim grafiği



Şekil 11. Tekman Meteoroloji İstasyonu’ndan ölçülen ortalama yağış değerlerinin aylara göre değişim grafiği

4.2.2. Çimenözü (Çat) Bölgesi

Çalışma alanındaki akarsuların debisi, DSİ 8. Bölge Müdürlüğü (Erzurum) tarafından sistematik olarak ölçülmektedir. Özellikle Çat ilçesi, Elmalı Komu mevkiinde bulunan akım ölçüm istasyonu, 3T koordinat sisteminde 0.262 km²’lik bir havzayı temsil etmektedir. 2018 yılına ait ortalama akım değerleri incelendiğinde, Haziran ayında 0.262 m³/s ile en yüksek, Eylül ayında ise 0.061 m³/s ile en düşük debilerin gözlemlendiği görülmektedir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün Çat istasyonundan elde edilen aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verileri detaylı bir şekilde incelenmiştir (Tablo 2, Şekil 12).

Tablo 2. Çat İlçesi'ne ait 2013-2024 yılları arasında ölçülen aylık-yıllık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri.

Aylar	Aylık Toplam Yağış (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)
Ocak	24.32	-5.89
Şubat	16.99	-4.52
Mart	48.19	0.4
Nisan	43.61	6.71
Mayıs	74.6	10.83
Haziran	34.74	15.98
Temmuz	19.59	19.69
Ağustos	18.56	20.8
Eylül	17.31	15.9
Ekim	38.78	9.14
Kasım	30.24	3.48
Aralık	25.72	-3.61
Yıllık	32.72	7.41

Grafik analizi incelendiğinde, Manda Dere'de akım değerlerinin yaz aylarında yüksek olduğu, sonbaharda ise en düşük seviyelere ulaştığı görülmektedir. Özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında yağışların azalmasıyla birlikte akım değerlerinde belirgin bir düşüş yaşanmıştır (Şekil 12).

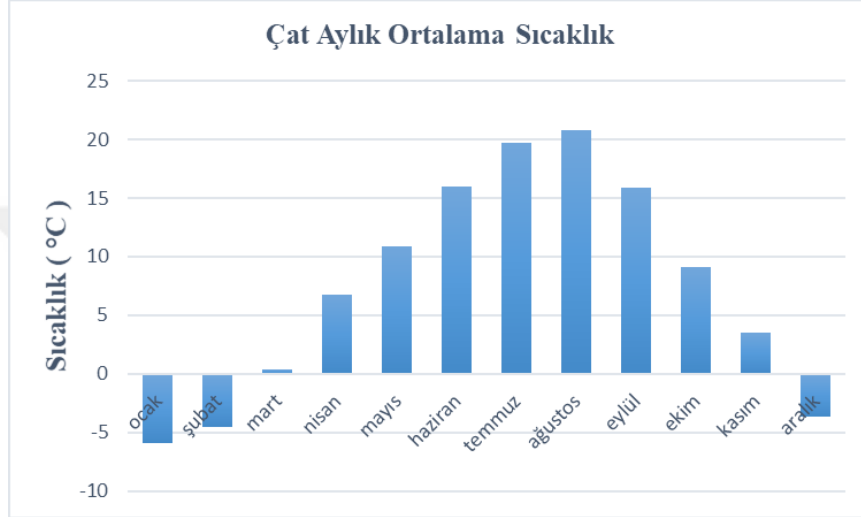


Şekil 12. DSİ'nin Çimenözü (Çat) Manda Deresi üzerinde yer alan akım gözlem istasyonunun 2018 yılına ait ortalama akım değerleri

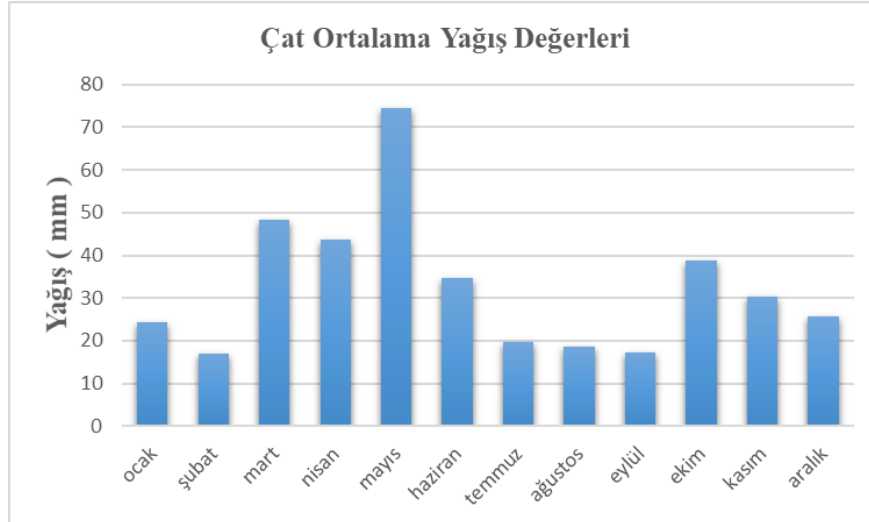
Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) temin edilen aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verileri değerlendirilmiştir. Erzurum ile Çat arasındaki yükselti farkı göz önünde bulundurularak sıcaklık verilerinde gerekli yükselti düzeltmesi yapılmıştır. Uzun yıllara dayanan rasatların ortalamasına göre Çat'ta yıllık toplam yağış miktarı 32.72 mm ve yıllık ortalama sıcaklık 7.41 °C olarak tespit edilmiştir (Tablo 2). Ova tabanı ve çevresindeki yüksek dağlar arasında belirgin sıcaklık farkları gözlemlenmektedir. Özellikle yüksek dağ zirvelerinde yıllık ortalama sıcaklığın 0

°C'nin altına düştüğü tahmin edilmektedir. En soğuk ay -5.89 °C ile Ocak ayı olurken, en sıcak ay 20.80 °C ile Ağustos ayı'dır (Tablo 2). Yağış açısından en yüksek değer, 74.60 mm ile Mayıs ayında gözlemlenmiştir (Tablo 2). En düşük yağış ise 15.73 mm ile Eylül ayında gerçekleşmiştir. Bu veriler, Çat'ın genel olarak soğuk iklime sahip olduğunu ve yağışların ilkbahar aylarında yoğunlaştığını göstermektedir.

Çat Meteoroloji İstasyonu'ndan sağlanan verilere ait ortalama sıcaklık-yağış değerleri ve aylara göre değişim grafikleri Şekil 13 ve 14'de verilmiştir.



Şekil 13. Çat Meteoroloji İstasyonu'ndan 2012-2024 yılları arasında ölçülen ortalama sıcaklık değerleri ve bu değerlerin aylara göre değişim grafiği



Şekil 14. Çat Meteoroloji İstasyonu'ndan 2012-2024 yılları arasında ölçülen ortalama yağış değerlerinin aylara göre değişim grafiği

4.3. Buharlaşma-Terleme

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan 2013-2024 yılları arası sıcaklık ve yağış değerlerinin ortalamasından Thornthwaite (1948) yöntemi kullanılarak bölgenin aylık potansiyel buharlaşma-terleme (Etp) değerleri hesaplanmış ve su bilançosu hazırlanmıştır. Thornthwaite yöntemine göre aylık potansiyel buharlaşma-terleme (Etp) miktarı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır:

$$Etp = 1,6 * G * (10t/I)^a$$

Burada;

Etp: Aylık potansiyel buharlaşma-terleme miktarı (cm)

G: Aylık güneşleme faktörü

I: Yıllık sıcaklık indisi olup, aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$I = \sum i$$

Burada;

i: Aylık sıcaklık indisi olup, aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$i = (t/5)^{1.514}$$

Burada;

t: Aylık sıcaklık ortalaması (°C)

a: Yıllık sıcaklık indisine bağlı bir katsayı olup, aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$a = (6,75 * 10^{-7} * I^3) - (7,71 * 10^{-5} * I^2) + (1,79 * 10^{-2} * I) + 0,492$$

Yağış ve hesaplanan potansiyel buharlaşma-terleme (Etp) değerleri ile hidrolojik bilanço hazırlanmıştır (Tablo 3 ve 4).

4.3.1. Yiğitler (Tekman) Bölgesi

Tekman meteoroloji istasyonu verilerinin Thornthwaite (1948) yöntemine göre hesaplanan hidrojeolojik bilançosu Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Tekman meteoroloji istasyonu verileri ile Thornthwaite (1948) yöntemine göre hesaplanmış hidrolojik bilanço

Bilanço Elemanları	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Yağış (mm)	33.68	24.99	63.52	45.2	74.23	31.76	24.03	15.73	21.99	40.52	35.48	35.15
Etp												
Buharlaşma (mm)	0.00	0.00	0.00	115.5	109.38	112.37	119.42	118.48	111.15	44.37	180.9	0.00
Ger. Buharlaşma (mm)	0.00	0.00	0.00	45.2	74.23	31.76	24.03	15.73	21.99	40.52	35.48	0.00
Su açığı (mm)	-	-	-	70.3	35.15	80.61	95.39	102.75	89.16	3.85	145.42	-
Su fazlası (mm)	33.68	24.99	63.52	-	-	-	-	-	-	-	-	35.15

Tablo 3’de görüldüğü gibi Ocak, Şubat ve Mart aylarında düşük sıcaklıklar nedeniyle potansiyel evapotranspirasyon (Etp) değeri sıfırdır. Bu dönemde buharlaşma ve bitkisel büyüme minimum seviyededir. Bu aylarda gerçekleşen yağışların tamamı toprakta su fazlası olarak birikir ya da yer altı sularına karışır. Nisan ayında sıcaklıkların artmasıyla birlikte Etp değerinde belirgin bir yükseliş görülür; ancak yağışların hâlâ Etp’den fazla olması nedeniyle su fazlası devam etmektedir. Mayıs ayında ise Etp daha da artar ve yağış miktarını aşar. Tablo 3’e göre Mayıs ayındaki su fazlası negatiftir (-35.15 mm). Bu durum yağışın artık bitkisel su ihtiyacını karşılayamadığını ifade eder. İlkbahar aylarında biriken toprak suyu, yaz aylarında artan evapotranspirasyon ile hızla azalmaktadır. Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında Etp oldukça yüksektir ve su fazlası negatife dönmüştür. Bu durum su açığının arttığını ve bu dönemlerde yağışların su ihtiyacını karşılamada yetersiz kaldığını gösterir. Kuraklık riski artmış, bitkiler su stresi yaşamaya başlamıştır. Sonbahar aylarında (özellikle Ekim ve Kasım) Etp düşmeye başlasa da hâlâ su açığı devam etmektedir. Aralık ayında Etp’nin sıfıra düşmesi ve yağışların artmasıyla birlikte yeniden su fazlası oluşur ve toprak su rezervi dolmaya başlar. Tablo incelendiğinde, ilkbahar ve kış aylarında oluşan su fazlasının yaz aylarındaki yüksek evapotranspirasyon nedeniyle tamamen tükendiğini ve bu sebeple yaz boyunca belirgin bir su açığı yaşandığını göstermektedir. Bu da tarımsal faaliyetlerde yaz aylarında sulama gereksiniminin olduğunu ortaya koymaktadır.

4.3.2. Çimenözü (Çat) Bölgesi

Çat meteoroloji istasyonu verileri ile Thornthwaite (1948) yöntemine göre hesaplanan hidrojeolojik bilançosu Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 4. Çat meteoroloji istasyonu verileri ile Thornthwaite (1948) yöntemine göre hesaplanmış hidrolojik bilanço

Bilanço Elemanları	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Yağış (mm)	24.32	16.99	48.19	43.61	74.6	34.74	19.59	18.56	17.31	38.78	30.24	25.72
Etp												
Buharlaşma (mm)	0.00	0.00	20.83	13.18	110.3	114.6	120.07	123.58	114.45	110.3	125.7	0.00
Ger. Buharlaşma (mm)	0.00	0.00	0.00	13.18	74.6	34.74	19.59	18.56	20.31	38.78	30.24	0.00
Su açığı (mm)	-	-	-	-	35.7	79.86	100.48	105.02	94.14	71.52	95.46	-
Su fazlası (mm)	24.32	16.99	27.36	30.43	-	-	-	-	-	-	-	25.72

Tablo 4'e Ocak, Şubat ve Aralık aylarında Etp değeri sıfırdır. Bu aylarda sıcaklıkların düşük olması nedeniyle buharlaşma ve bitkisel faaliyetler yok denecek kadar azdır. Bu durum yağışların tamamının su fazlasına dönüşmesine sebep olmaktadır. Böylece toprak su rezervi dolmaktadır. Mart ve Nisan aylarında Etp artmaya başlasa da yağışlar Etp'yi aştığı için toprakta su fazlası devam etmektedir. Bu durum, bitki gelişiminin yeni başladığı bu dönemde toprakta yeterli nem bulunduğunu göstermektedir. Mayıs ayıyla birlikte Etp değerleri hızla artmakta ve su fazlası negatife dönmektedir. Bu da artık su açığının başladığını ve topraktaki suyun yeterli olmadığını göstermektedir. Haziran'dan Eylül'e kadar olan dönemde Etp çok yüksektir ve su açığı ciddi seviyelere ulaşmaktadır. Bu aylar kuraklık riskinin en yüksek olduğu dönemdir. Ekim ve Kasım aylarında da su açığı devam etmektedir. Özellikle Kasım ayında Etp yüksek olmasına rağmen yağışlar yetersizdir ve su açığı büyüktür. Aralık ayında Etp'in tekrar sıfıra inmesiyle su fazlası oluşmuş, toprak rezervi yeniden dolmaya başlamıştır. Genel olarak, yılın ilk aylarında biriken su yazın tükenmektedir. Sonbahar yetersiz kalmaktadır. Ancak kış ayları rezervin yeniden dolmasını sağlamaktadır.

4.4. Termal sular

4.4.1. İncelenen Su Noktaları

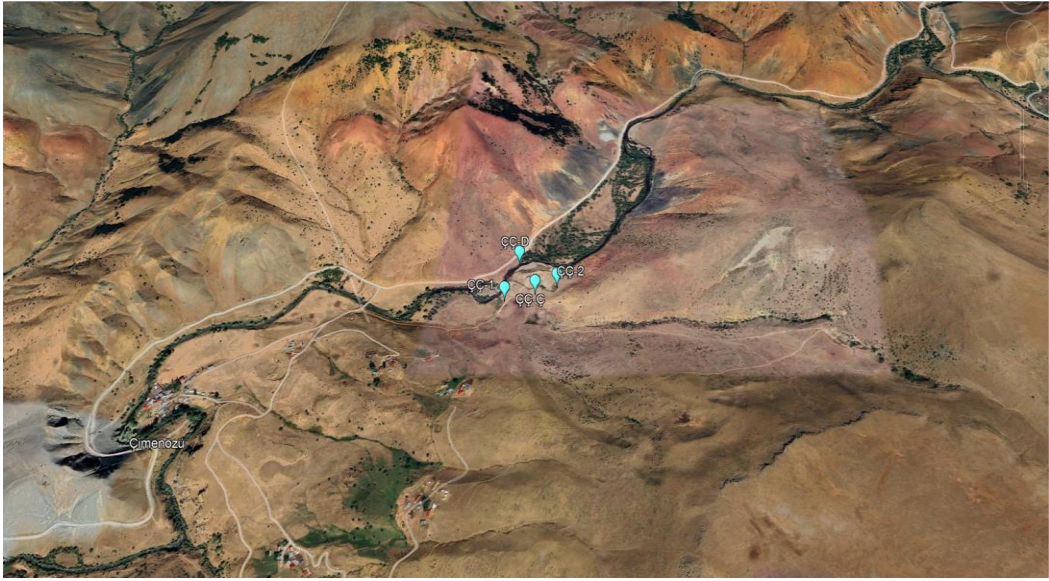
İncelenen sular Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerinde olup, su noktalarını jeotermal su kaynakları, soğuk kaynak (çeşme) suları ve yüzey (dere) suları oluşturur.

Çalışılan su noktalarından Yiğitler sahası, Erzurum ili, Tekman İlçesinin 52 km (kuş uçuşu olarak) güneyinde, Yiğitler Köyü ve civarında yer almaktadır (Şekil 15).



Şekil 15. Yiğitler jeotermal sahasının uydu görüntüsü (Google Earth).

Çalışılan diğer bir su noktası ise Çimenözü sahası olup, Erzurum iline bağlı Çat İlçesinin 67 km güneyinde, Çimenözü Köyü ve civarında yer almaktadır (Şekil 16).



Şekil 16. Çimenözü jeotermal sahasının uydu görüntüsü (Google Earth).

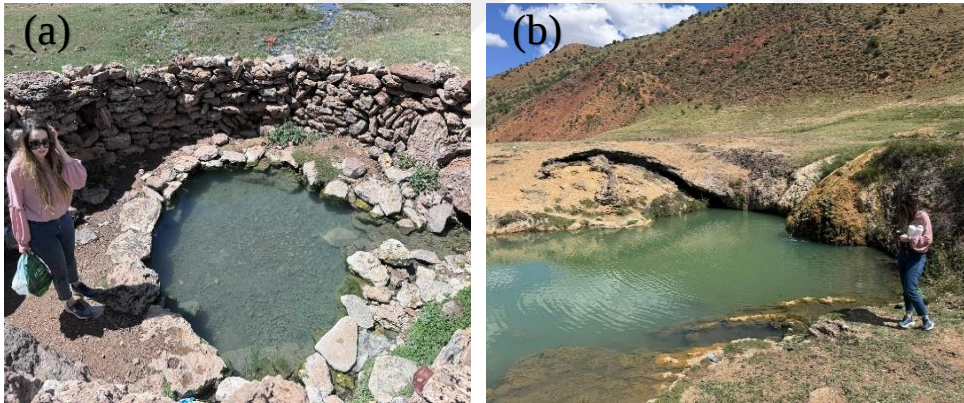
4.4.2. Jeotermal Kaynaklar

Erzurum'un Tekman ilçesine bağlı Yiğitler Köyü, önemli jeotermal kaynaklara sahiptir. Köydeki jeotermal su kaynaklarının sıcaklıkları 43 °C ile 49 °C arasında değişmektedir. Bu termal sular kalsiyum, sodyum, klorür, magnezyum ve bikarbonat iyonları bakımından zengin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 17. Yiğitler (Tekman) jeotermal su kaynakları (a) Kaynak-1, (b) Kaynak-2

Erzurum ilinin Çat ilçesine bağlı Çimenözü (eski adıyla Kiğı Hamzan) köyü çevresinde Çimenözü çayı (Manda Deresi) boyunca yer alan çok sayıda jeotermal kaynak bulunmaktadır. Köydeki jeotermal su kaynaklarının sıcaklıkları 45-54 °C arasında değişmektedir. Termal suların kimyasal analiz sonuçlarına göre kalsiyum, sodyum, klorür, magnezyum ve bikarbonat iyonları bakımından zengin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 18. Çimenözü (Çat) jeotermal su kaynakları (a) Kaynak-1, (b) Kaynak-2

Çalışma alanındaki jeotermal kaynakların mevcut kullanım kapasitesi, altyapı yetersizlikleri ve zorlu iklim koşulları nedeniyle sınırlandırılmıştır. Özellikle Yiğitler ve Çimenözü köylerindeki tesisler, ulaşım zorlukları, konaklama imkanlarının bulunmaması ve güvenlik endişeleri gibi sorunlarla mücadele etmektedir. Bölgenin ulaşım ağı yetersiz olup, sert iklim koşulları, özellikle kış aylarında yaşanan yoğun kar yağışı ve düşük sıcaklıklar, saha çalışmalarını ciddi şekilde etkilemektedir. Bu durum, ekipmanların taşınması, kurulumu ve bakımında güçlükler oluşturmaktadır. Bundan dolayı jeotermal potansiyelinin tam olarak değerlendirilmesini engellemektedir. Jeotermal enerjiden sürdürülebilir bir şekilde faydalanabilmek için, bölgeye ulaşım imkanlarının geliştirilmesi, altyapının güçlendirilmesi ve aynı zamanda iklim

koşullarına uygun teknolojik çözümlerin hazırlanması gerekmektedir.

4.4.3. Soğuk Su Kaynakları

Tekman Havzası, Erzurum'un güneydoğusunda yer alan ve yüksek platolarla çevrili bir coğrafi birimdir. Havzanın yeraltı suyu potansiyeli, büyük ölçüde alüvyal birimler içerisinde sınırlıdır.

Tekman Havzası'ndaki Sondaj Kuyuları Havzada tespit edilen önemli yeraltı suyu kaynaklarından biri Tekman Beyköy Sondaj Kuyusu olup, bölgedeki tarımsal sulama faaliyetlerinde önemli bir yere sahiptir. Bunun yanı sıra, Tekman Çevirme Köyü Akoluk Sondajı, Tekman İncesu Sondajı, Tekman Dengiz Sondajı ve Tekman Küllü Sondajı ile birlikte toplam 5 sondaj kuyusu açılmıştır ve bu kuyular ortalama 70-100-150 m derinliktedir. Bu kuyuların her biri, bölgenin su ihtiyacını karşılamak amacıyla açılmış olup, statik ve dinamik su seviyeleri kuyuların bulunduğu jeolojik yapıya bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Tekman Havzası İçme Suyu Kaynakları ve Toplam Havuzları Havzanın içme suyu ihtiyacını karşılamak amacıyla birçok doğal kaynak bulunmaktadır. Tekman Gözlüce, Tekman Beyköy Ağakom, Tekman Işıklar, Tekman Yeşilören, Tekman Ulugöze, Tekman Küllü, Tekman Körsu, Tekman Çatak, Tekman Çukuryayla, Tekman Kuruca, bölgede açılan su kaynakları (T. Havuzları). Bu içme suyu kaynaklarının düzenli ve sürdürülebilir olması için Tekman Karapınar ve Tekman Kazancık bölgelerinde yeni T havuzları açılmıştır. Bölgedeki toplam T havuzu sayısı 12'dir ve bu havuzlar, içme suyu depolama ve dağıtım sisteminin temel taşlarından birini oluşturmaktadır.

Tekman Havzası'nda Su Pompa Sistemleri Bölgedeki suyun verimli bir şekilde dağıtılması ve özellikle içme suyu sistemlerinin daha etkin çalışması için Tekman Taşkesen Köyü'nde 3 adet Keson su pompası bulunmaktadır. Keson kuyuları, suyun daha düzenli bir şekilde dağıtılmasına olanak sağlamak ve bölgenin su yönetimi açısından önemli bir rol üstlenmektedir.

Havzanın genel su altyapısına bakıldığında: 5 adet sondaj kuyusu, 12 adet T havuzu, 3 adet Keson su pompası, toplam 18 abone, genel olarak 40 MTPMP (su aboneliği ya da ölçü birimi) bulunduğu görülmektedir.

Tekman Havzası, sahip olduğu yeraltı ve yüzey suyu kaynaklarıyla bölgedeki tarım, hayvancılık ve içme suyu ihtiyacını karşılamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bölgede açılan sondaj kuyuları, içme suyu kaynakları ve depolama sistemleri, havzanın su potansiyelinin verimli bir şekilde değerlendirilmesine katkı

sağlamaktadır.

İnceleme alanında su örneklerinin alındığı soğuk su kaynağı (çeşme) Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 19. Yiğitler (Tekman) soğuk kaynak suyundan (çeşme) bir görünüm

Çat bölgesi, Erzurum’un önemli su havzalarından biri olup, yeraltı ve yüzey suyu kaynakları bakımından zengindir. Bölgede açılan sondaj kuyuları, içme suyu depoları ve T havuzları, hem yerleşim yerlerinin içme suyu ihtiyacını karşılamak hem de suyun sürdürülebilir kullanımını sağlamaktır.

Çat Bölgesi’nde Açılan T Havuzları ve İçme Suyu Depoları Bölgede su depolama ve dağıtım altyapısını güçlendirmek amacıyla Çat Göbekören, Taşağıl Köyü, Bardakçı Köyü Venedik ve Çat Gökçeşeyh bölgelerinde T havuzları kurulmuş olup, bu havuzlar içme ve kullanma suyu depolama sistemi haline gelmiştir. Çat bölgesinde su yönetimi kapsamında Erzurum Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından Çat Tahsilat, Çat Yavi, Çat 1 İçme Suyu Deposu ve Çat 2 İçme Suyu Deposu açılmış ve bu tesisler ilgili kurum tarafından kontrol edilerek işletilmeye başlanmıştır. Bölgedeki abone sayısı toplamda 9 olup, mevcut T havuzu sayısı 4, sondaj kuyusu sayısı 4 ve MTPMP (su yönetim sistemine dair bir ölçü birimi) sayısı da 4’tür.

Çat Kızılca Mahallesi’nde, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 2002 yılında açılan sondaj kuyusu halen aktif şekilde kullanılmaktadır. Bu kuyunun statik seviyesi 25.8 metre, dinamik seviyesi 73 metre ve verimliliği 2.4 litre/saniye olarak ölçülmüştür. Bu aktif kuyunun bulunduğu alan kil ve bazalt kayaçlarıyla çevrili olup, hidrojeolojik yapısı nedeniyle bölgedeki su hareketliliğini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, DSİ tarafından Çat bölgesinde açılmış ve daha sonra iptal edilmiş bazı sondaj kuyuları da bulunmaktadır. Bu kuyuların derinlikleri 58 ile 200 metre arasında değişmektedir. Açılan T havuzları, içme suyu depoları ve sondaj kuyuları, suyun kontrollü bir şekilde

yönetilmesini ve bölge halkının ihtiyacını karşılamasını sağlamaktadır.

İnceleme alanında su örneklerinin alındığı soğuk su kaynağı (çeşme) Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. Çimenözü (Çat) soğuk su kaynağı (çeşme) ve örnek alımı

4.4.4. Akarsular

Erzurum'un güneydoğusunda yer alan Tekman ilçesi, hidrolojik açıdan Pasinler ve Çat havzaları kadar zengin bir su kaynaklarına sahip değildir. Ancak ilçe sınırları içerisindeki akarsular, bölgedeki tarım ve hayvancılık faaliyetleri için hayati öneme sahiptir. Yiğitler (Tekman) su kaynakları, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat Bölümü'nde yer alır. Bu havzada öne çıkan akarsulardan biri Perisuyu Irmağı'dır. Perisuyu, Elmalı Çayı'nın bir kolu olan Büyüksu Deresi ile beslenir ve bölgenin su rejiminde önemli bir rol oynar. Ayrıca, Ilıgöze Deresi de Tekman ilçesine yaklaşık 17 kilometre mesafede bulunan ve havzanın su sistemine katkı sağlayan bir diğer akarsudur. Büyüksu akarsuyunun açmış olduğu boğazı takip eden stabilize yolu takiben termal kaynaklara ulaşılmaktadır. Boğaz, Meman depresyonu ile Viranşehir depresyonu arasında açılmıştır. Kaynakların doğusunda Bingöl volkanik kütlesi yükselir (Polat, S., ve Elmastaş, N. (2005))

Erzurum ilinin güneyinde yer alan Çat Çimenözü Deresi, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat bölümünde yer almakta olup, bölgenin önemli su kaynaklarından biridir. Havzanın akarsularından biri olan Perisuyu Irmağı, bölgedeki su rejiminde önemli bir rol oynarken, Çat Çimenözü de Büyüksu Deresi ile beslenmektedir. Akarsuyun kuzeyde Türbe Deresi, güneyde ise Yuvaklı Deresi olmak üzere iki kola ayrılması, suyun bölgeye yayılmasını sağlamakta ve özellikle tarımsal sulama ile

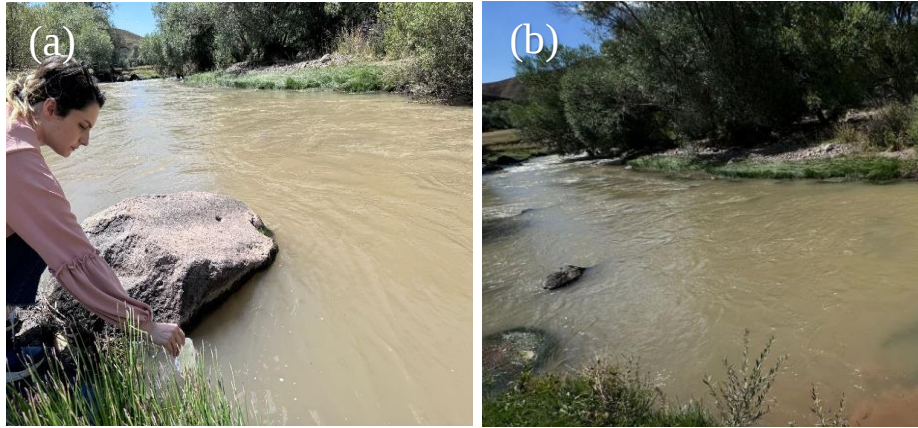
hayvancılık faaliyetleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Çat ve Tekman yüzey (dere) örneklerinin alım noktaları Şekil 21 ve 22’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Yiğitler (Tekman) yüzey (dere) suyu örnek alım noktası

Ayrıca, Hüseyin Deresi Kilise Deresi, Hızırçayır Deresi ve Gülüzar Deresi gibi küçük dereler de Çat Çimenözü’nün su potansiyeline katkıda bulunmaktadır.



Şekil 22. Çimenözü (Çat) Manda Deresi örnek alım noktası

4.5. Suların Hidrokimyasal Özellikleri

Suların hidrokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki jeotermal su kaynaklarından, soğuk su (çeşme) kaynak sularından ve yüzey (dere) sularından Ağustos 2024 ile Kasım 2024 tarihleri arasında numuneler alınmıştır. Alınan numune noktalarının koordinatları ile kot değerleri Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal alanlarında örnek alınan noktaların koordinatları ve kotları (yükseklikleri)

Örnek Alın Yeri	Örnek Türü	Örnek No	Koordinat (Evrensel enlem merkatörü)	Kot (m)
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su kaynağı-1	YSK-1	0685741D-4375584K	2022.46
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su kaynağı-2	YSK-2	0685473D-4375652K	2022.56
Yiğitler (Tekman)	Soğuk su kaynağı (Çeşme)	YÇ	0685436D-4375450K	1947.91
Yiğitler (Tekman)	Yüzey suyu (Dere)	YD	0684774D-4375232K	1948.92
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su kaynağı-1	ÇSK-1	0683992D-4369214K	1933.07
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su kaynağı-2	ÇSK-2	0684166D-4369280K	1947.91
Çimenözü (Çat)	Soğuk su kaynağı (Çeşme)	ÇÇ	0684094D-4369247K	1946.80
Çimenözü (Çat)	Yüzey suyu (Dere)	ÇD	0684020D-4369381K	1930.87

4.5.1. Suların Yerinde Ölçülen Parametreleri (Fiziksel özellikleri)

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal sahasındaki suların yerinde ölçüm parametreleri (fiziksel özellikleri) Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların fiziksel özellikleri

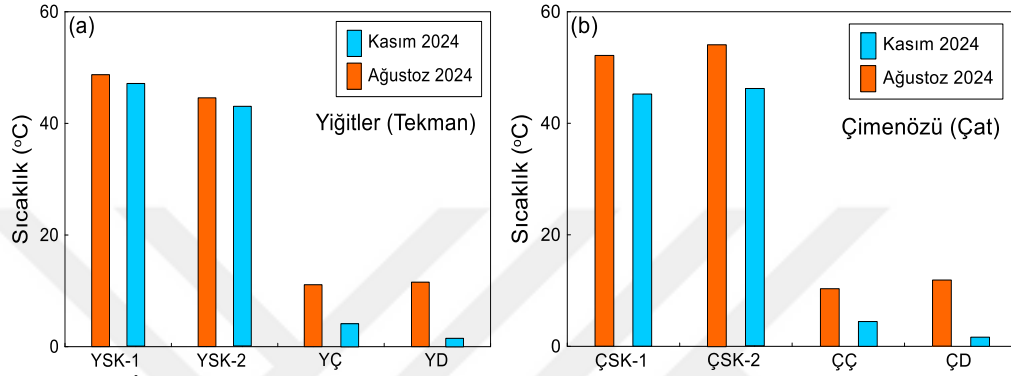
Ölçülen	Örnek Türü	Kısa ad	Ölçüm Ayı	Sıcaklık (°C)	Ph	EC (µs/cm)	DO (mg/l)
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	YSK-1A	Ağustos	48.8	8.33	950	0.69
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	YSK -1K	Kasım	47	8.33	1550	1.22
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	YSK-2A	Ağustos	44.5	7.03	1490	3.93
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	YSK -2K	Kasım	42.9	7.03	1428	1.43
Yiğitler (Tekman)	Çeşme	YÇ-1A	Ağustos	10.9	8.62	60	-
Yiğitler (Tekman)	Çeşme	YÇ-1K	Kasım	4	8.59	52	-
Yiğitler (Tekman)	Dere	YD-1A	Ağustos	11.5	8.61	271	-
Yiğitler (Tekman)	Dere	YD-1K	Kasım	1.3	8.6	289	-
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	ÇSK-1A	Ağustos	52.1	8.2	1415	2.76
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	ÇSK -1K	Kasım	45.1	8.19	1250	0.76
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	ÇSK-2A	Ağustos	54	8.68	925	0.76
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	ÇSK -2K	Kasım	46.1	8.69	1340	2.67
Çimenözü (Çat)	Çeşme	ÇÇ-1A	Ağustos	10.2	7.85	74	-
Çimenözü (Çat)	Çeşme	ÇÇ-1K	Kasım	4.2	7.84	75	-
Çimenözü (Çat)	Dere	ÇD-1A	Ağustos	11.8	7.65	278	-
Çimenözü (Çat)	Dere	ÇD-1K	Kasım	1.5	7.66	247	-

4.5.1.1. Sıcaklık (°C)

Hidrolojik döngü içerisinde sıcaklık hem yüzeysel hem de yeraltı sularının hareketliliği ve kullanım potansiyeli üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yüzey sularının sıcaklığı, topografik yükselti, su kütlesinin derinliği, akım debisi ve mevsimsel değişimler gibi çeşitli faktörlerden etkilenecek heterojen bir dağılım gösterir. Buna

karşın, yeraltı sularının sıcaklığı genellikle çevresel etkilerden daha az etkilenir ve daha homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olur. Suyun sıcaklığındaki artış, suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyerek, özellikle oksijenin suda çözünürlüğünü azaltır (Stevens vd., 1975). Bu durum, sucul ekosistemlerin biyolojik çeşitliliği ve su kalitesi üzerinde önemli olumsuz etkilere neden olabilir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların sıcaklık (°C) değerleri Şekil 23’de verilmiştir.



Şekil 23. İnceleme alanındaki suların sıcaklık değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesinde incelenen termal su kaynaklarından Kaynak 1'in sıcaklık değeri Ağustos ayında 48,8 °C ve Kasım ayında 47 °C olarak ölçülmüş, yaklaşık 1,8 °C'lık çok küçük bir fark oluşmuştur. Benzer şekilde, Kaynak 2'nin sıcaklık değeri Ağustos ayında 44,5 °C ve Kasım ayında 42,9 °C olarak ölçülmüş, yaklaşık 1,6 °C'lık çok küçük bir fark oluşmuştur. Soğuk kaynak suyu sıcaklığı Ağustos ayında 10,9 °C değerine sahipken, Kasım ayında 4°C'a düşmüş, yaklaşık 6,9 °C'lık bir fark oluşmuştur. Aynı bölgedeki yüzey suyu sıcaklığı Ağustos ayında 11,5 °C değerine sahipken, Kasım ayında 1,3 °C'a düşmüş, yaklaşık 10,2 °C'lık bir fark oluşmuştur.

Çat (Çimenözü) bölgesinde incelenen termal su kaynaklarından Kaynak 1'in sıcaklık değeri Ağustos ayında 52,1 °C ve Kasım ayında 45,1 °C olarak ölçülmüş, yaklaşık 7 °C'lık bir fark oluşmuştur. Benzer şekilde, Kaynak 2'nin sıcaklık değeri Ağustos ayında 54 °C ve Kasım ayında 46,1 °C olarak ölçülmüş, yaklaşık 7,9 °C'lık bir fark oluşmuştur. Soğuk kaynak suyu sıcaklığı Ağustos ayında 10,2°C değerine sahipken, Kasım ayında 4,2 °C'a düşmüş, yaklaşık 6 °C'lık bir fark oluşmuştur. Aynı bölgedeki yüzey suyu sıcaklığı Ağustos ayında 11,8 °C değerine sahipken, Kasım ayında 1,5 °C'a düşmüş, yaklaşık 10,3 °C'lık bir fark oluşmuştur.

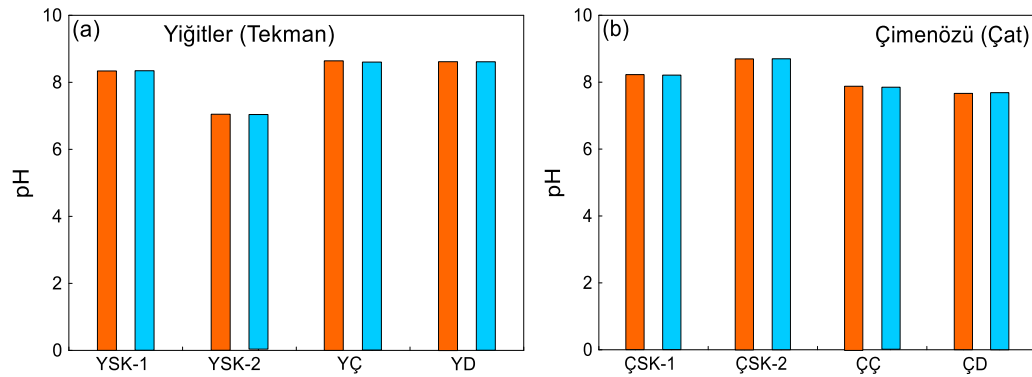
Mevsimsel değişim değerlendirildiğinde jeotermal su kaynaklarında mevsimsel değişimlerin etkisi sınırlı olup, ortalama sıcaklık farkı yaklaşık 2-8 °C arasında kalmıştır. Buna karşılık, yüzey sularında sıcaklık farkı 6-11 °C'yi bulmuştur. Bu da

yüzey sularının atmosferik koşullardan daha fazla etkilendiğini ortaya koymaktadır. Jeotermal su kaynaklarının mevsimsel değişimlerden az etkilenmekte, yüzey suları ise mevsimsel sıcaklık değişimlerinden oldukça fazla etkilenmektedir. Bu kaynakların kullanımı sırasında iklimsel değişkenler dikkate alınmalıdır.

4.5.1.2. Hidrojen İyon Aktivitesi (pH)

Su ortamındaki hidrojen iyonu aktivitesinin logaritmik olarak ifade edilmesiyle elde edilen pH değeri, su çözeltilerinin asitlik ve bazlık durumunun bir göstergesidir. Doğal koşullarda yeraltı sularının pH değerleri genellikle 6.0-8.5 aralığında seyretmekle birlikte, termal sular daha düşük pH değerlerine sahip olabilir (Hem, 1971). Suyun asit karakterini belirleyen başlıca faktörler arasında, serbest mineral asitler ve karbonik asit yer alırken, karbonat, bikarbonat ve hidroksit iyonları ise suyun bazik özelliklerini güçlendirir (Hem, 1971). Suyun aşındırıcı (düşük pH) veya çöktürücü (yüksek pH) özelliği, esas olarak pH değerine bağlıdır. Atmosferden sulara geçen karbondioksitin, suda çözünerek karbonik asit oluşturması, suyun kayalarla çözme ve taşıma kapasitesini artırarak aşındırıcı özelliğini güçlendirir (Hem, 1985).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların pH değerleri Şekil 24’de verilmiştir.



Şekil 24. İnceleme alanındaki suların pH değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesinde incelenen su kaynaklarından Kaynak 1’in pH değeri Ağustos ve Kasım aylarında 8,33 olarak sabit kalmıştır. Bu durum, Kaynak 1’in mevsimsel değişimlerden etkilenmediğini göstermektedir. Benzer şekilde, Kaynak 2’nin pH değeri de hem Ağustos hem de Kasım aylarında 7,03 olarak sabit kalmıştır. Bu sonuçlar, her iki kaynağın da istikrarlı bir bazik özellik sergilediğini ortaya koymaktadır. Soğuk kaynak suyu ise Ağustos ayında 8,62 pH değerine sahipken Kasım ayında 8,59’a düşmüş, ancak bu değişim oldukça sınırlı kalmıştır. Yüzey suyu ise Ağustos ayında 8,61, Kasım ayında ise 8,60 pH değeri göstermiştir. Bu küçük düşüşler,

soğuk kaynak ve yüzey sularının mevsimsel değişimlere karşı nispeten daha duyarlı olduğunu göstermektedir.

Çimenözü (Çat) bölgesine ait su kaynaklarının pH değerleri incelendiğinde, Kaynak 1'in Ağustos ayında 8,20, Kasım ayında ise 8,19 pH değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu minimal fark, Kaynak 1'in mevsimsel değişimlere oldukça dayanıklı olduğunu göstermektedir. Kaynak 2 ise Ağustos ayında 8,68 Kasım ayında ise 8,69 pH değeriyle çok küçük bir artış göstermiştir. Soğuk kaynak suyu ise Ağustos ayında 7,85 Kasım ayında 7,84 pH değerindedir ve bu kaynakta da ciddi bir değişim gözlenmemektedir. Yüzey suyu ise Ağustos ayında 7,65 Kasım ayında ise 7,66 pH değerine sahiptir. Çimenözü (Çat) bölgesindeki tüm kaynaklar, pH açısından bazik özellik sergilemekte ve mevsimsel değişimlerden minimal düzeyde etkilenmektedir.

4.5.1.3. Elektriksel İletkenlik (EC)

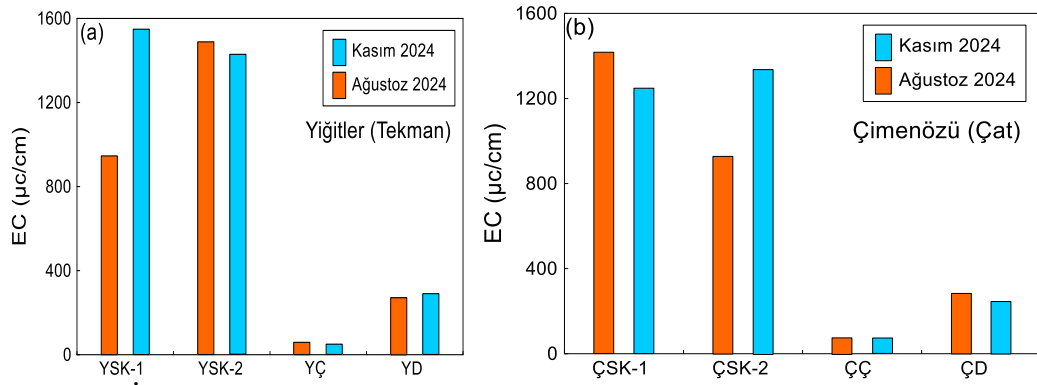
Bir çözeltideki elektrik akımını taşıma yeteneği, elektriksel iletkenlik olarak ifade edilir. Su örneklerinde elektriksel iletkenlik, genellikle 25°C sıcaklıkta mikrosiemens/santimetre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) birimi ile ifade edilen elektriksel iletkenlik (EC) değeri ile belirlenir. EC değeri, suda çözünmüş toplam madde miktarı (TDS) ile doğrudan ilişkili olup, sudaki iyonların toplam konsantrasyonunun bir göstergesi olarak kabul edilir. Suyun elektriksel iletkenliği, suyun kaynağı, yeraltı geçiş yolu boyunca temas ettiği kayaç türleri ve mineraller, iklim koşulları ve sıcaklık gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu nedenle, EC değeri suyun kimyasal bileşimi ve dolayısıyla kalitesi hakkında önemli bilgiler sunar (Hem, 1985).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların EC değerleri Şekil 25'de verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) bölgesinde yapılan ölçümlerde, Kaynak-1 ve Kaynak-2 sularının EC değerleri Ağustos ayında sırasıyla 950 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 1490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişirken, Kasım ayında sırasıyla 1550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 1428 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında ölçülmüştür. Soğuk sularda EC değerleri Ağustos ve Kasım aylarında sırasıyla 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 52 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak belirlenmiştir. Yüzey sularının EC değerleri ise Ağustos ayında 271 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Kasım ayında 289 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak kaydedilmiştir.

Çimenözü (Çat) bölgesinde, Kaynak-1 ve Kaynak-2 sularının EC değerleri Ağustos ayında sırasıyla 1415 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 925 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişirken, Kasım ayında sırasıyla 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 1340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında ölçülmüştür. Soğuk sulardaki EC değerleri Ağustos ve Kasım aylarında sırasıyla 74 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak belirlenmiştir. Yüzey sularının EC değerleri ise Ağustos ayında 278 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Kasım

ayında 247 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak kaydedilmiştir.

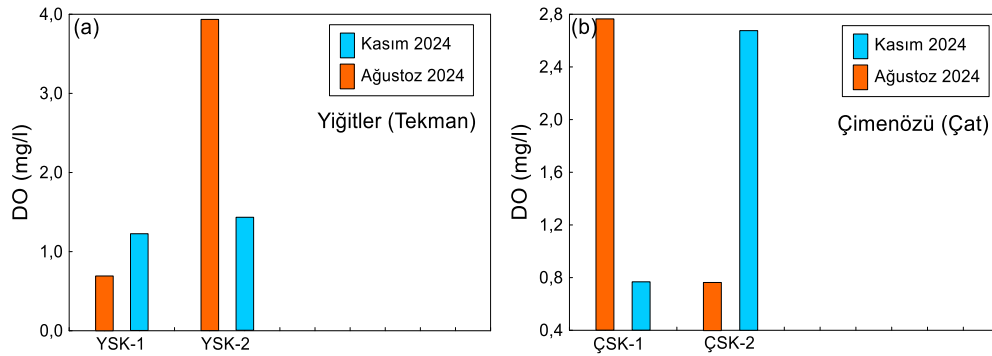


Şekil 25. İncelenen suların elektriksel iletkenlik (EC) değerleri

4.5.1.4. Çözünmüş Oksijen (DO)

Oksijen, suda sınırlı çözünürlüğe sahip olmasına rağmen, sucul ekosistemlerin varlığı ve devamlılığı için hayati öneme sahiptir. Doğal sulardaki çözünmüş oksijen (DO) miktarı, atmosferden difüzyon ve suda yaşayan organizmaların fotosentetik aktiviteleri gibi çeşitli mekanizmalar ile sağlanır. DO miktarı, sıcaklık, tuzluluk ve atmosferik basınç gibi fizikokimyasal parametrelerden önemli ölçüde etkilenir. Sıcaklık ve tuzluluktaki artış, suyun oksijen tutma kapasitesini azaltarak DO miktarında düşüşe neden olur. Yeraltı sularındaki DO miktarı ise, yüzey sularıyla karışım, doymamış bölgedeki hava ile temas ve biyolojik aktivite gibi faktörlere bağlıdır (McNeely vd., 1979).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların DO değerleri Şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 26. İnceleme alanındaki sulara ait çözünmüş oksijen (DO) değerleri.

Yapılan ölçümlerde, Yiğitler (Tekman) Kaynak 1'de ortalama çözünmüş oksijen (DO) miktarının Ağustos ayında 0,69 mg/l, Kasım ayında ise 1,22 mg/l olduğu tespit edilmiştir. Yiğitler (Tekman) Kaynak 2'de DO miktarları Ağustos ayında 3,93 mg/l, Kasım ayında ise 1,43 mg/l olarak ölçülmüştür.

Çimenözü (Çat) Kaynak 1’de DO miktarı Ağustos ayında 2,76 mg/l iken, Kasım ayında 0,76 mg/l olarak belirlenmiştir. Çimenözü (Çat) Kaynak 2’de ise Ağustos ayında 0,76 mg/l, Kasım ayında 2,67 mg/l seviyelerinde DO miktarı kaydedilmiştir.

Bu ölçümler, kaynaklar arasındaki çözünmüş oksijen değerlerinin mevsimsel ve bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır.

4.6. Suların Jeokimyasal Özellikleri

İlk olarak, hesap ve değerlendirmelerde kullanılacak olan suların kimyasal analiz sonuçlarının doğruluğu kontrol edilmiştir. Kontrol aşağıdaki verilmiş olan “elektro nötralite” eşitliği ile yapılmıştır.

$$AH = \left| \frac{\sum Anyon - \sum Kasyon}{\sum Anyon + \sum Kasyon} \right| * 100$$

Burada; derişimler meq/l, AH ise analiz hatası olarak ifade edilir. Doğru bir analizde AH değerinin %5’den küçük olması istenir (APHA, 1989). İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularında yukarıdaki formüle göre yapılan hesaplamalarda, AH değerlerinin %5’den küçük olduğu tesbit edilmiştir.

4.6.1. Suların Majör İyon İçerikleri

İnceleme alanından derlenen su numunelerinde bazı önemli majör iyon analizleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların mg/l cinsinden majör iyon özellikleri, hesaplanan meq/l değerleri ile analiz hata (AH) değerleri

	Örnek No	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺²	K ⁺²	HCO ₃	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	F ⁻
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Yığıtlar (Tekman)	YSK-1A	60.81	66.27	39.41	8.95	547.17	48.75	24.79	0.66
	YSK -1K	208.76	64.11	37.3	8.38	882.06	44.86	23.76	0.91
	YSK-2A	194.06	58.82	36.05	8.53	823.5	41.27	20.98	0.61
	YSK -2K	190.47	56.53	34.58	8.05	828.99	39.72	20.31	0.6
	YÇ-1A	6.76	1.2	1.62	1.76	28.28	1.55	0.54	0.02
	YÇ-1K	6.54	1.15	1.71	1.46	27.45	1.47	0.41	0.02
	YD-1A	33.84	10.82	3.26	9.57	153.11	3.77	8.84	0.08
	YD-1K	37.03	13.09	3.21	1.12	167.75	4.6	0.9	0.02
Çimenözü (Çat)	ÇSK-1A	142.24	51.47	67.6	15.36	764.94	29.33	61	0.98
	ÇSK -1K	140.14	49.97	66.5	10.7	686.25	29.13	57.38	0.95
	ÇSK-2A	39.08	54.59	74.88	12.35	452.62	31.67	64.99	0.81
	ÇSK -2K	136.68	52.7	72.28	11.41	767.99	29.13	62.9	1
	ÇÇ-1A	9.9	2.18	2.54	0.93	45.75	1.59	0.79	0.03
	ÇÇ-1K	9.42	2.05	2.57	0.54	40.87	1.41	0.41	0.04
	ÇD-1A	31.05	11.12	9.07	2.79	154.94	4.78	9.38	0.09
	ÇD-1K	26.29	10.79	9.44	1.85	137.25	4.97	8.93	0.09
	Örnek No	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺²	K ⁺²	HCO ₃	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	AH
		(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(%)
Yığıtlar (Tekman)	YSK-1A	3.04	5.52	1.71	0.23	8.97	1.02	0.70	0.84
	YSK -1K	10.44	5.34	1.62	0.21	14.46	0.93	0.67	4.61
	YSK-2A	9.70	4.90	1.57	0.22	13.50	0.86	0.59	4.59
	YSK -2K	9.52	4.71	1.50	0.21	13.59	0.83	0.57	3.09
	YÇ-1A	0.34	0.10	0.07	0.05	0.46	0.03	0.02	3.99
	YÇ-1K	0.33	0.10	0.07	0.04	0.45	0.03	0.01	4.13
	YD-1A	1.69	0.90	0.14	0.25	2.51	0.08	0.25	2.46
	YD-1K	1.85	1.09	0.14	0.03	2.75	0.10	0.03	4.00
Çimenözü (Çat)	ÇSK-1A	7.11	4.29	2.94	0.39	12.54	0.61	1.72	0.46
	ÇSK -1K	7.01	4.16	2.89	0.27	11.25	0.61	1.62	3.11
	ÇSK-2A	1.95	4.55	3.26	0.32	7.42	0.66	1.83	0.83
	ÇSK -2K	6.83	4.39	3.14	0.29	12.59	0.61	1.77	1.04
	ÇÇ-1A	0.50	0.18	0.11	0.02	0.75	0.03	0.02	0.34
	ÇÇ-1K	0.47	0.17	0.11	0.01	0.67	0.03	0.01	3.82
	ÇD-1A	1.55	0.93	0.39	0.07	2.54	0.10	0.26	0.71
	ÇD-1K	1.31	0.90	0.41	0.05	2.25	0.10	0.25	1.26

AH: Analiz hatası

Suların hidrokimyasal karakterizasyonu, suyun kimyasal bileşimini oluşturan başlıca iyonların (majör iyonlar) belirlenmesi ve bu iyonların göreceli oranlarının incelenmesi ile gerçekleştirilir. Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻ ve Cl⁻ iyonları, doğal sulardaki toplam iyon içeriğinin %90'ından fazlasını oluşturduğundan, hidrokimyasal sınıflandırmalarda en sık kullanılan iyon türleridir. Bu iyonların su içerisindeki konsantrasyonları, suyun kaynaklandığı jeolojik birimlerin litolojisi, yeraltı su akifer sistemlerinin karmaşıklığı ve hidrojeokimyasal süreçler tarafından belirlenir. Sıcak ve soğuk yeraltı sularının iyonik bileşimleri, suyun kökeni, akifer sistemlerindeki karışım oranları ve su-kayaç etkileşimleri hakkında önemli bilgiler sağlar.

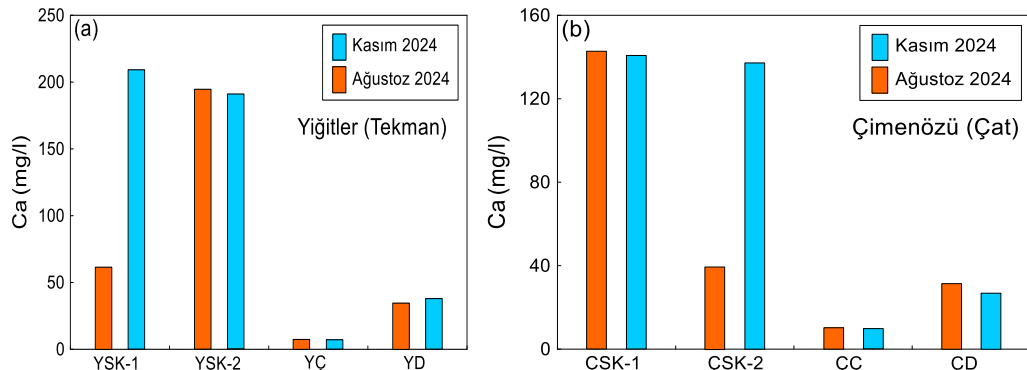
4.6.1.1. Kalsiyum (Ca^{2+})

Kalsiyum, biyolojik süreçler ve doğal sulardaki jeokimyasal döngülerde önemli bir role sahip olan toprak alkali metallerin en önemlilerinden biridir. Kalsiyumun suda çözünürlüğü, sıcaklık ve basınç gibi çevresel faktörlerden etkilenir.

Doğal sulardaki kalsiyum iyonlarının (Ca^{2+}) kaynağı, çoğunlukla karbonatlı kayaçlar (kalsit, dolomit ve aragonit), sülfatlı kayaçlar (jips ve anhidrit), silikat mineralleri (piroksen, plajiyoklas, amfibol) ve kil mineralleri (montmorillonit) gibi çeşitli minerallerdir (Hounslow, 1995). Bu minerallerin çözünürlüğü, jeotermal akışkanların sıcaklığı, basıncı, pH değeri ve karbondioksit (CO_2) kısmi basıncı gibi faktörlerden etkilenir. Özellikle CO_2 basıncı, kalsiyumun çözünürlüğünde önemli bir rol oynar. Kaynama gibi süreçler sonucu CO_2 kaybı, çözeltideki pH'ı artırarak kalsit çökmesine neden olur. Yüksek sıcaklıklı jeotermal akışkanlarda, genellikle düşük kalsiyum konsantrasyonları gözlenir. Ancak, asitlik ve tuzluluk arttıkça kalsiyum çözünürlüğü de artar.

Çalışma alanı dahilinde bulunan kireçtaşları ve jipslerin, sularda bulunan kalsiyumun temel kaynağı olduğu düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Ca^{2+} değerleri Şekil 27'de verilmiştir.



Şekil 27. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Ca^{2+} değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesinde ölçülen Ca^{2+} değerleri kaynak türüne göre değişiklik göstermektedir. Kaynak 1'de Ağustos ayında 60,81 mg/lt olan Ca^{2+} değeri Kasım ayında ciddi bir artışla 208,76 mg/lt'ye yükselmiştir. Kaynak 2'de Ağustos ayında 194,06 mg/lt olarak ölçülen değer Kasım ayında hafif bir düşüşle 190,47 mg/lt olmuştur. Soğuk kaynak sularında Ca^{2+} değerleri Ağustos ayında 6,76 mg/lt iken Kasım ayında 6,54 mg/lt'ye düşmüştür. Yüzey sularında ise Ağustos ayında 33,84 mg/lt olan Ca^{2+} değeri, Kasım ayında 37,03 mg/lt'ye yükselmiştir.

Çimenözü (Çat) bölgesi Ca^{2+} değeri Çimenözü (Çat) Kaynak 1'de Ağustos ayında

142,24 mg/l olarak ölçülen Ca^{2+} değeri Kasım ayında 140,14 mg/l'te hafifçe düşmüştür. Kaynak 2'de ise Ağustos ayında 39,08 mg/l olan Ca^{2+} değeri Kasım ayında belirgin bir artış göstererek 136,68 mg/l'te yükselmiştir. Soğuk kaynak sularında Ca^{2+} değeri Ağustos ayında 9,9 mg/l iken Kasım ayında 9,42 mg/l'te düşmüştür. Yüzey sularında ise Ağustos ayında 31,05 mg/l olan Ca^{2+} değeri Kasım ayında 26,29 mg/l'te düşmüştür.

Sodyum/kalsiyum ($\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$) oranı, jeotermal akışkanın rezervuar ile olan etkileşimini değerlendirmede önemli bir parametredir. Yüksek $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ oranları, genellikle rezervuar ile daha direkt bir ilişkiyi gösterir.

Yiğitler (Tekman) jeotermal su kaynağının Ca^{+2} konsantrasyonu 60.81-208.76 mg/l arasında, Na konsantrasyonu ise 34.58-39.41 mg/l arasında ölçülmüştür. $\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$ oranı 0.16-0.56 arasında değişmektedir.

Çimenözü (Çat) jeotermal su kaynağında ise Ca^{+2} konsantrasyonu 39.08-142.24 mg/l, Na^+ konsantrasyonu ise 66.5-74.88 mg/l arasında değişmekte olup, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$ oranı 0.41-1.67 aralığında hesaplanmıştır.

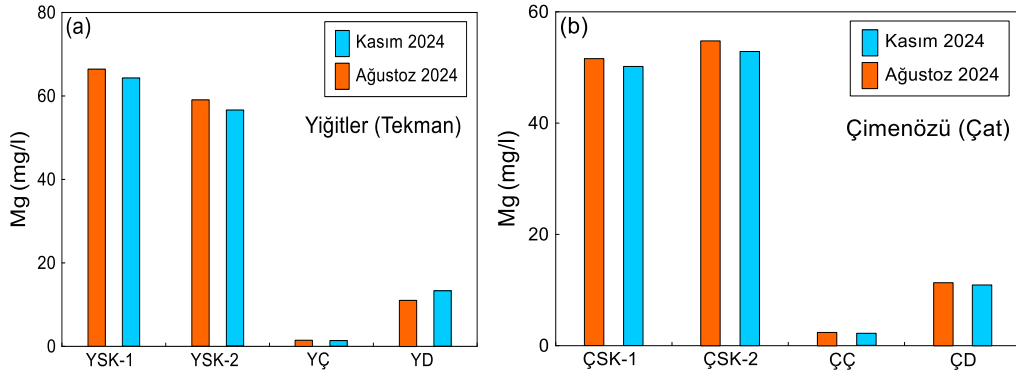
4.6.1.2. Magnezyum (Mg^{+2})

Yeraltı sularındaki magnezyum iyonu, çoğunlukla dolomit, evaporitler, mafik ve ultramafik kayalarındaki mineraller (olivin, ojit, hornblend, biyotit) ve serpantinleşme süreçleri sonucu oluşan magnezyum karbonatın çözünmesiyle suya katılır (Nicholson, 1993). Yeraltı sularındaki Mg konsantrasyonları genellikle 1-40 mg/l arasında değişir ve genellikle Ca iyonu konsantrasyonundan daha düşüktür. Yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde, magnezyum iyonları illit, montmorillonit ve özellikle klorit gibi kil minerallerince tutulduğundan, suda çok düşük seviyelerde (0.1 mg/l) bulunabilir. Jeotermal suların daha yüksek Mg içerikleri, genellikle soğuk sularla karışım veya kayalarla etkileşim sonucu ortaya çıkar. Magnezyum tuzları yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan, çökelme sonrasında bile çözeltide kalma eğilimindedirler. Doğal sular bünyesinde 100 ppm'e kadar ulaşabilen magnezyum, kalsiyum ile suyun sertliğini oluşturan başlıca iyonlardan birini oluşturur. Ca^{+2} ve Mg^{2+} iyonları insan sağlığı açısından zehirleyici değildir (Doğan, 1981).

Yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde Mg^{2+} konsantrasyonları genellikle oldukça düşüktür (0,01-0,1 mg/kg). Bunun nedeni, Mg^{2+} iyonlarının illit, montmorillonit ve özellikle klorit gibi ikincil minerallerin yapısına kolayca katılmasıdır. Yüksek Mg^{2+} konsantrasyonları, genellikle yüzeye yakın kayalarından magnezyumun yıkanması veya magnezyumca zengin yeraltı sularıyla karışımın bir sonucu olarak görülür (Nicholson,

1993).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Mg^{2+} değerleri Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Mg^{2+} değerleri.

Yiğitler (Tekman) Bölgesi Kaynak 1’de Ağustos ayında 66,27 mg/lt olarak ölçülen Mg^{2+} değeri, Kasım ayında hafif bir düşüşle 64,11 mg/lt olmuştur. Kaynak 2’de ise Ağustos ayında 58,82 mg/lt olan Mg^{2+} değeri, Kasım ayında 56,53 mg/lt’ye düşmüştür. Soğuk kaynak suyunda Mg^{2+} değeri Ağustos ayında 1,2 mg/lt iken, Kasım ayında 1,15 mg/lt’ye düşmüştür. Yüzey suyunda ise Mg^{2+} değeri ise Ağustos ayında 10,82 mg/lt iken Kasım ayında 13,09 mg/lt’ye yükselmiştir.

Çimenözü (Çat) Bölgesi Kaynak 1’de Mg^{2+} değeri Ağustos ayında 51,47 mg/lt iken Kasım ayında hafif bir azalışla 49,97 mg/lt olmuştur. Kaynak 2’de Ağustos ayında 54,59 mg/lt olarak ölçülen Mg^{2+} değeri Kasım ayında 52,7 mg/lt’ye düşmüştür. Soğuk kaynak suyunda Mg^{2+} değeri Ağustos ayında 2,18 mg/lt, Kasım ayında ise 2,05 mg/lt olarak ölçülmüştür. Yüzey suyunda ise Mg^{2+} değeri Ağustos ayında 11,12 mg/lt iken Kasım ayında hafif bir düşüşle 10,79 mg/lt olmuştur.

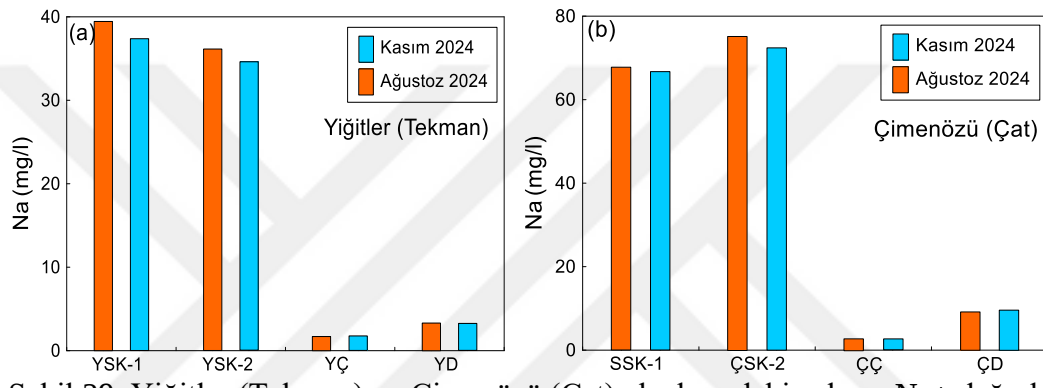
4.6.1.3. Sodyum (Na^+)

Yerkabuğunda sodyum (Na^+) iyonunun başlıca kaynakları arasında magmatik kayalarındaki feldispat ve feldispatoid mineralleri, kil mineralleri ve evaporitlerdeki halit ($NaCl$) ve mirablit ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) gibi sodyum mineralleri yer alır. Özellikle halit ve mirablit gibi minerallerin yüksek çözünürlüğü nedeniyle, doğal sulardaki sodyum iyonlarının önemli bir kısmı bu minerallerden kaynaklanır (Tarcan, 2004). Deniz suyunda bol miktarda bulunan sodyum iyonları, yeraltı sularına kayalarındaki plajiyoklaz feldispatlarının ayrışması veya kil minerallerindeki iyon değişim reaksiyonları yoluyla geçebilir (Tarcan, 2004). Yeraltı sularındaki sodyum iyonu konsantrasyonu, kayaların mineralojik yapısı, pH, kayaların bozunma süresi, yeraltı

suyunun akış hızı, ortamın kalsiyum iyon derişimi, doğal ve antropojen kaynaklı kirlenme gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Özellikle kış aylarında yolların tuzlanması gibi insan faaliyetleri, yüzey ve yeraltı sularındaki sodyum kirliliğini artıran önemli bir faktördür. Sodyum, jeotermal rezervuar akışkanının temel katyonu olup, konsantrasyonu yaklaşık olarak 200-2000 mg/l aralığında değişmektedir (Nicholson, 1993).

Çalışma alanında yer alan andezit, bazalt ve yer yer de dasit gibi magmatik kayaların, sularındaki sodyum (Na) elementinin kaynağını oluşturduğu düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Na⁺ değerleri Şekil 29'de verilmiştir.



Şekil 29. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Na⁺ değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesi Kaynak-1'de Na⁺ değeri Ağustos ayında 39,41 mg/l, Kasım ayında 37,3 mg/l; Kaynak-2'de ise Ağustos ayında 36,05 mg/l, Kasım ayında 34,58 mg/l olarak ölçülmüştür. Soğuk kaynak sularında Na⁺ değeri Ağustos ayında 1,62 mg/l, Kasım ayında 1,71 mg/l; yüzey sularında ise Ağustos ayında 3,26 mg/l, Kasım ayında 3,21 mg/l olarak belirlenmiştir.

Çimenözü (Çat) bölgesi Kaynak-1'de Na⁺ değeri Ağustos ayında 67,6 mg/l, Kasım ayında 66,5 mg/l; Kaynak-2'de ise Ağustos ayında 74,88 mg/l, Kasım ayında 72,28 mg/l olarak ölçülmüştür. Soğuk kaynak suyunda Na⁺ değerleri Ağustos ayında 2,54 mg/l, Kasım ayında 2,57 mg/l; yüzey suyunda ise Ağustos ayında 9,07 mg/l, Kasım ayında 9,44 mg/l olarak tespit edilmiştir.

Sodyum/potasyum (Na⁺/K⁺) oranları, yüksek sıcaklıklı alanlar için önemli bir belirteçtir. Düşük Na⁺/K⁺ oranı (~15), yüksek sıcaklığı işaret eder ve yüzeye hızlı bir şekilde ulaşan suları gösterir. Bu durum, yüksek akışa sahip sistemlerle veya daha geçirgen zonlarla ilişkilidir. Yüksek Na⁺/K⁺ oranı ise yanal akışı, yüzeye yakın reaksiyonları ve jeotermal sularındaki iletken soğumayı ifade eder (Nicholson, 1993).

Yiğitler (Tekman) jeotermal su kaynağında Na⁺ konsantrasyonu 34,58-39,41

mg/l, K^+ konsantrasyonu ise 8.05-8.95 mg/l arasında ölçülmüştür. Na^+/K^+ oranı ise 7.28-7.47 arasında hesaplanmıştır.

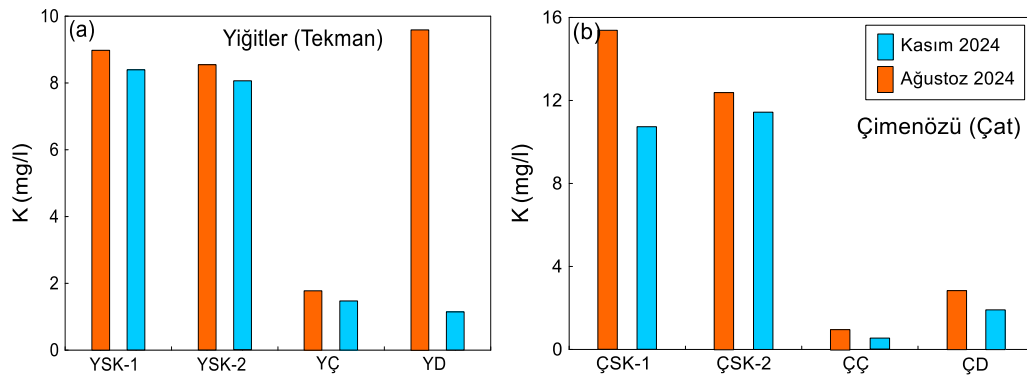
Çimenözü (Çat) jeotermal su kaynağında ise Na^+ konsantrasyonu 66.5-74.88 mg/l, K^+ konsantrasyonu 10.7-12.35 mg/l arasında değişmekte olup, Na^+/K^+ oranı 10.28-10.54 aralığında bulunmuştur.

4.6.1.4. Potasyum (K^+)

Yer kabuğunda potasyum (K) tortul kayalarda daha zengindir. Feldispat mineralleri, yer kabuğundaki potasyumun önemli bir kaynağıdır, ancak çökel kayaları, mikalar, feldispatoidler ve kil mineralleri de potasyum içerir (Tarcan, 2004). Doğal sulardaki potasyum konsantrasyonu genellikle 20 mg/l'yi aşmazken, jeotermal sulara bu değer 200 mg/l'ye kadar çıkabilir (Doğan, 1981). Jeotermal rezervuarlarda sodyum iyonu, genellikle 200-2000 mg/l arasında değişen konsantrasyonlarla ana katyon olarak bulunur. Jeotermal sulardaki potasyum ve sodyum iyonlarının konsantrasyonları, sıcaklık ve mineral-su etkileşimleri gibi faktörlere bağlı olarak değişir (Nicholson, 1993).

Çalışma alanında bulunan kumtaşı, kireçtaşı, silttaşı gibi tortul kayaların, sulardaki potasyumun kaynağı rolünü üstlendiği düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların K^+ değerleri Şekil 30'de verilmiştir.



Şekil 30. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların K değerleri.

Yiğitler (Tekman) Kaynak-1'de K değerleri Ağustos ayında 8,95 mg/l, Kasım ayında ise 8,38 mg/l; Kaynak-2'de Ağustos ayında 8,53 mg/l, Kasım ayında 8,05 mg/l ölçülmüştür. Soğuk kaynak suyunda Ağustos ayında 1,76 mg/l, Kasım ayında 1,46 mg/l; yüzey suyunda ise Ağustos ayında 9,57 mg/l, Kasım ayında 1,12 mg/l olarak belirlenmiştir.

Çimenözü (Çat) Kaynak-1'de potasyum (K^+) değeri Ağustos ayında 15,36 mg/l,

Kasım ayında 10,07 mg/l; Kaynak-2'de Ağustos ayında 12,35 mg/l, Kasım ayında 11,41 mg/l olarak ölçülmüştür. Soğuk kaynak suyunda K^+ değerleri sırasıyla Ağustos ayında 0,93 mg/l, Kasım ayında 0,54 mg/l; yüzey suyunda ise Ağustos ayında 2,79 mg/l, Kasım ayında 1,85 mg/l şeklinde tespit edilmiştir.

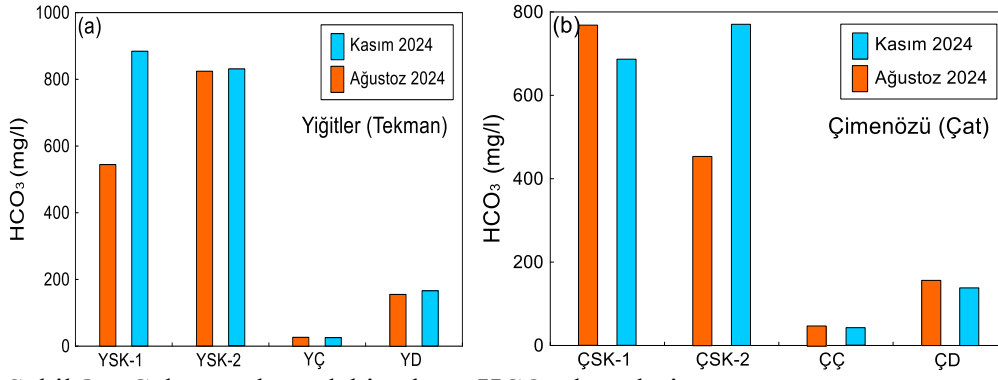
Görüldüğü üzere, en yüksek Na^{+2} ve K^+ değerleri Çimenözü (Çat) Kaynaklarında ölçülmüştür. Kaynak sularındaki Na^{+2} ve K^+ değerleri çevredeki jeolojik birimlerin bileşiminden etkilenmektedir.

4.6.1.5. Bikarbonat (HCO_3^-) (Alkalinite)

Doğal sulardaki alkalinite, büyük ölçüde atmosferik CO_2 'nin suda çözünmesi ve toprak ile doymamış bölgedeki diğer gazların etkileşimi sonucu oluşur. Suyun asitleri nötralize etme kapasitesi olarak tanımlanan alkalinite, genellikle karbonat ve hidroksit iyonlarının varlığına bağlıdır. Doğal sulardaki alkalinite değeri genellikle 500 mg/l $CaCO_3$ 'ü aşmaz. Jeotermal sistemlerde, toplam çözünmüş karbonat (HCO_3^- , CO_3^{2-} , H_2CO_3 , CO_2) konsantrasyonu, karbondioksit kısmi basıncı (PCO_2) ve çözeltinin pH değeri ile doğrudan ilişkilidir. Atmosferik koşullarda karbondioksit kısmi basıncı oldukça düşüktür. Kaynama gibi süreçler, çözeltinin pH değerini artırarak alkali bir ortam oluşturur. pH değerine bağlı olarak, çözeltinin başlıca karbonat türü HCO_3^- , H_2CO_3 veya CO_3^{2-} olarak değişir.

Jeotermal sistemlerde, rezervuara yakın kaynaklarda bikarbonat (HCO_3^-) konsantrasyonu düşüktür. HCO_3^-/SO_4^{2-} oranı, suyun akış yönü ve kayaçlarla etkileşiminin bir göstergesi olarak kabul edilir. Yüksek akım hızına sahip bölgelerde su-kayaç etkileşimi artarak bikarbonat üretimi artar. Yanal akımın olduğu bölgelerde ise su-kayaç etkileşimi daha yoğunlaşır ve H_2S kaybı ile birlikte HCO_3^-/SO_4^{2-} oranı yükselir (Nicholson, 1993). Yüksek bikarbonat (HCO_3^-) değerine sahip sulara su-kayaç etkileşimi baskındır. Kalsiyum (Ca^{+2}) ve bikarbonat (HCO_3^-) içerikli sular kireçtaşları ile, kalsiyum (Ca^{+2}), magnezyum (Mg^{+2}) ve bikarbonat (HCO_3^-) içerikli sular ise dolomitlerle jeotermal suların etkileşimini göstermektedir. Yüksek potasyum (K^+) içerikli sodyum (Na^+) ve bikarbonat (HCO_3^-) tipi sular ise feldispat, plajiyoklas ve piroksen içeren plutonik ve volkanik kayaçlar ile jeotermal suların etkileşimini gösterir (Mazor, 1997).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların HCO_3^- değerleri Şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31. Çalışma alanındaki suların HCO₃ değerleri.

Yiğitler (Tekman) Bölgesi Kaynak 1’de HCO₃⁻ değerleri, Ağustos ayında 547.17 mg/l, Kasım ayında ise 882.06 mg/l olarak ölçülmüştür. Kaynak 2’de ise Ağustos ayında 823.50 mg/l, Kasım ayında 828.99 mg/l değerleri gözlemlenmiştir. Bu değerler, kaynak sularındaki HCO₃⁻ konsantrasyonunun yüksekliğini ve mevsimsel değişkenlikleri yansıtmaktadır. Yüzey ve Soğuk kaynak sularında ise HCO₃⁻ değerleri daha düşük bulunmuştur. Soğuk kaynak sularında HCO₃⁻ değeri Ağustos ayında 28.28 mg/l, Kasım ayında ise 27.45 mg/l olarak ölçülmüştür. Yüzey sularında ise bu değer Ağustos ayında 153.11 mg/l, Kasım ayında ise 167.75 mg/l olarak ölçülmüştür.

Çimenözü (Çat) Bölgesi Kaynak 1’deki HCO₃⁻ değerleri ise oldukça yüksektir ve Ağustos ayında 764.94 mg/l, Kasım ayında ise 686.25 mg/l olarak tespit edilmiştir. Bu durum, Kaynak 1’in HCO₃⁻ açısından zengin bir su kaynağı olduğunu göstermektedir. Kaynak 2’deki değerler ise Ağustos ayında 452.62 mg/l iken Kasım ayında 767.99 mg/l’ye yükselmiştir, bu da mevsimsel etkilerin açık bir göstergesidir. Yüzey ve soğuk kaynak sularında ise HCO₃⁻ değerleri daha düşük bulunmuştur. Soğuk (çeşme) sularında Ağustos ayında 45.75 mg/l, Kasım ayında ise 40.87 mg/l’dir. Yüzey sularında ise bu değer Ağustos ayında 154.94 mg/l, Kasım ayında ise 137.25 mg/l olarak ölçülmüştür. Bu durum, yüzey ve soğuk kaynak sularının, kaynak sularına kıyasla daha düşük alkaliniteye sahip olduğunu göstermektedir.

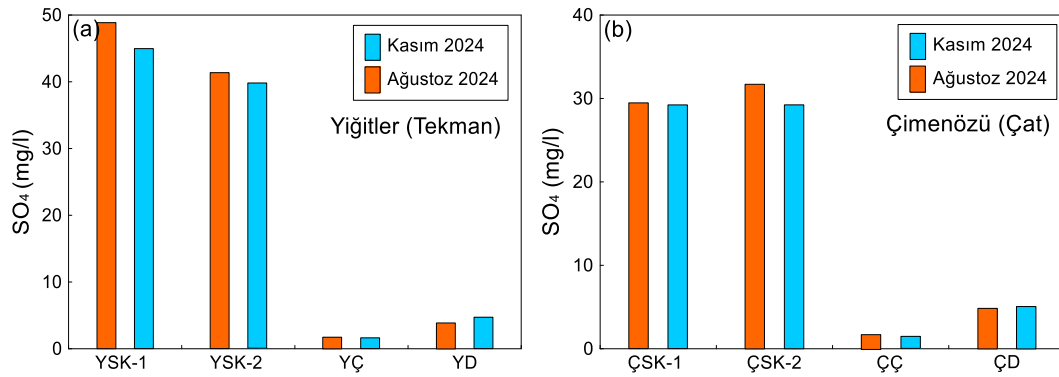
Sonuç olarak, kaynak sularındaki HCO₃⁻ değerleri genellikle yüzey ve soğuk kaynak sularından daha yüksektir. Ayrıca, farklı mevsimlerde HCO₃⁻ değerlerinde belirgin değişimler gözlenmiş, özellikle kaynak sularında daha yüksek değerler tespit edilmiştir. Bu durum, suyun kaynağı, mevsimsel etkiler ve çevresel faktörlerle ilişkilendirilebilir.

4.6.1.6. Sülfat (SO_4^{2-})

Kükürt elementi, magmatik ve tortul kayalarda genellikle indirgenmiş formda metal sülfür mineralleri olarak bulunur. Bu mineraller suyla temas ettiğinde oksidasyon reaksiyonlarına uğrar ve sülfat iyonları (SO_4^{2-}) oluşturarak suya geçer (Hem, 1985). Jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve anhidrit (CaSO_4) mineralleri, yeraltı sularındaki sülfat iyonlarının başlıca kaynaklarıdır. Pirit (FeS_2) mineralinin oksidasyonu da yeraltı sularına sınırlı miktarda sülfat katkısı sağlayabilir (Tarcan, 2004).

Derin kaynaklı jeotermal suların karakteristik özelliklerinden biri, genellikle düşük sülfat (SO_4^{2-}) konsantrasyonlarına sahip olmalarıdır. Bu durum, derin rezervuarlardaki indirgeyici koşullar nedeniyle hidrojen sülfür (H_2S) gazının hâkim olmasından kaynaklanır. Ancak, jeotermal akışkanın yüzeye doğru hareket ederken okside olması durumunda hidrojen sülfürün sülfata dönüşümü ile sülfat konsantrasyonunda artış gözlenir. Diğer yandan, klorür (Cl^-) konsantrasyonuna yakın veya daha yüksek sülfat konsantrasyonlarına sahip sular, genellikle yüzeye yakın seviyelerde buharlaşma süreçlerinin gerçekleştiğini gösterir. Bu durum, sülfatın buharlaşma sırasında çökme eğiliminin daha düşük olması ve dolayısıyla çözeltide birikmesine yol açmasından kaynaklanır.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların SO_4 değerleri Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 32. Çalışma alanındaki suların SO_4 değerleri.

İncelenen Yiğitler (Tekman) alanı SO_4 değeri Kaynak 1’de Ağustos ayında 48,75 mg/l, Kasım ayında ise 44,86 mg/l olarak belirlenmiştir. Kaynak 2’de bu değerler Ağustos ayında 41,27 mg/l, Kasım ayında ise 39,72 mg/l’dir. Soğuk kaynak sularında Ağustos ayında 1,55 mg/l, Kasım ayında 1,47 mg/l; yüzey sularında ise Ağustos ayında 3,77 mg/l, Kasım ayında 4,6 mg/l olarak tespit edilmiştir.

Çimenözü (Çat) Bölgesi Kaynak 1’de SO_4 değeri Ağustos ayında 29,33 mg/l, Kasım ayında 29,13 mg/l; Kaynak 2’de Ağustos ayında 31,67 mg/l, Kasım ayında 29,13

mg/l olarak ölçülmüştür. Soğuk kaynak sularında bu değer Ağustos ayında 1,59 mg/l, Kasım ayında ise 1,41 mg/l; yüzey sularında Ağustos ayında 4,78 mg/l, Kasım ayında ise 4,97 mg/l olarak belirlenmiştir.

Bölgedeki suların sülfat içerikleri, kayaçların mineral yapısı ve özellikle jipsli düzeylerin su ile teması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, bölgedeki sülfat miktarının kaynağa ve mevsimsel değişimlere bağlı olarak farklılık göstermesine neden olmaktadır.

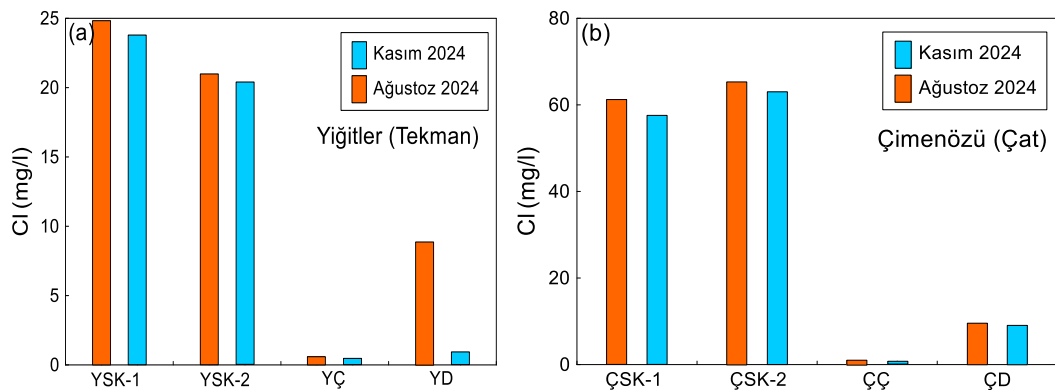
4.6.1.7. Klorür (Cl⁻)

Yeraltı sularındaki klorür iyonlarının başlıca kaynakları arasında deniz suları, yağış suları, evaporitler ve atmosfer sayılabilir. Oysa, yeraltı sularındaki klorürün en önemli kaynağı deniz suyudur. Bu nedenle, kıyı bölgelerinden uzaklaştıkça yeraltı sularındaki klorür konsantrasyonu genellikle azalır. Yeraltı sularında klorürün ortalama konsantrasyonu yaklaşık 1 mg/l iken, deniz suyunda bu değer 20.000 mg/l'ye kadar çıkabilir. Klorür içeriği, genellikle yağışlı bölgelerde, kurak bölgelere nazaran daha yüksektir (Tarcan, 2004).

Yüksek klorür konsantrasyonları, jeotermal akışkanın derin bir rezervuardan geldiğini ve soğuma veya seyrelme gibi süreçlerin sınırlı olduğunu gösterir. Aksine, düşük klorür konsantrasyonları, akışkanın yüzey suları ile karıştığını veya soğumaya uğradığını düşündürür. Deniz suyu kontaminasyonu da yüksek klorür konsantrasyonlarına neden olabilir. 1000 mg/l'nin üzerindeki klorür konsantrasyonları, akışkanın klorür tipi olduğunu gösterir.

Çalışma alanında bulunan su kaynaklarında tespit edilen klorürün (Cl) temel kaynağının kar ve yağmur suları olduğu düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Cl⁻ değerleri Şekil 33'de verilmiştir.



Şekil 33. İnceleme alanındaki suların Cl değerleri.

Yiğitler (Tekman) Bölgesi Kaynak 1'in Cl⁻ değeri Ağustos ayında 24,79 mg/l, Kasım ayında ise 23,76 mg/l dır. Kaynak 2'nin Cl⁻ değeri Ağustos ayında 20,98 mg/l, Kasım ayında ise 20,31 mg/l dır. Soğuk kaynak sularında ve yüzey suları ise çok daha düşük Cl⁻ değerlerine sahiptir. Soğuk kaynak suyu Ağustos ayında 0,54 mg/l, Kasım ayında 0,41 mg/l'dir. Yüzey suyu ise Ağustos ayında 8,84 mg/l, Kasım ayında ise 0,90 mg/l'dir. Mevsimsel değişiklik soğuk kaynak sularında ve yüzey sularında çok etkili olmuştur.

Çimenözü (Çat) Bölgesi Kaynak 1'in Cl⁻ değeri Ağustos ayında 61 mg/l, Kasım ayında ise 57,38 mg/l dır. Kaynak 2'de bu değerler Ağustos ayında 64,99 mg/l, Kasım ayında ise 62,9 mg/l olarak tespit edilmiştir. Soğuk kaynak ve yüzey suları ise çok daha düşük klorür değerlerine sahiptir. Soğuk kaynak suyu Ağustos ayında 0,79 mg/l, Kasım ayında ise 0,41 mg/l; yüzey suyu ise Ağustos ayında 9,38 mg/l, Kasım ayında ise 8,93 mg/l'dir.

Bu değerler, sıcak ve mineralli suların yüksek Cl⁻ içeriğiyle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür ve tipik soğuk su özellikleri sergiler.

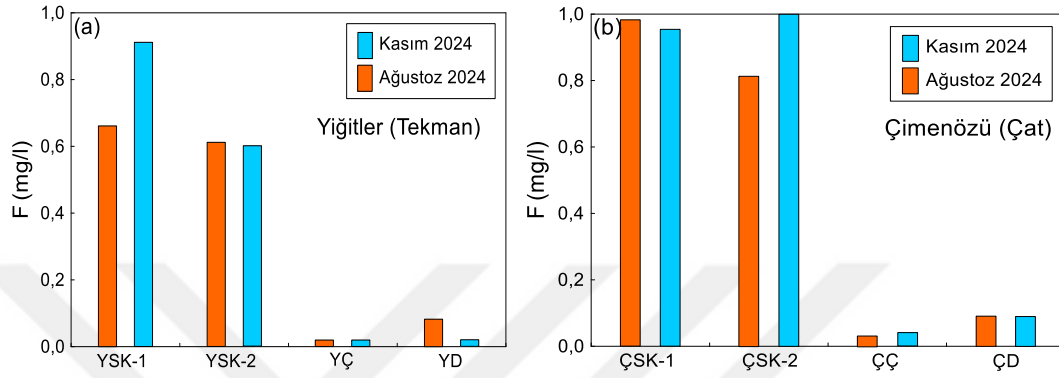
4.6.1.8. Florür (F⁻)

Yeraltı sularındaki florürün (F) başlıca kaynakları arasında florit, apatit, mika ve amfibol gibi mineraller yer alır. Özellikle kil minerallerinin anyon değişim kapasitesi sayesinde florür iyonları bu minerallere adsorbe olabilir. Adsorpsiyonun en yüksek olduğu pH değeri 6 civarındadır. pH değeri 4'ün altına veya 7.5'in üzerine çıktığında ise desorpsiyon yani florür iyonlarının minerallerden ayrılması gerçekleşir. Alkalın özellikteki sularda genellikle yüksek F (florür) konsantrasyonları görülür. Deniz sularında ise F içeriği genellikle 1 mg/l'nin altında konsantrasyonlara sahiptir (Hem, 1992). Hounslow ve Back (1985)'e göre kaolinit gibi bazı kil minerallerinin adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle bazı alkali sularda beklenenden düşük florür konsantrasyonları görülebilir.

Jeotermal sistemlerde F konsantrasyonları genellikle düşük (10 mg/ l'den düşüktür) seviyelerdedir. Florür, kayaç-su etkileşimleri sırasında çeşitli minerallerin yapısında iz element olarak bulunabilir. Yüksek CO₂ basınçları, kalsiyum ile F arasında bileşik oluşumunu teşvik eder, bu da çözeltildeki serbest florür miktarını azaltır (Nicholson, 1993). Yüksek F konsantrasyonları, genellikle düşük kalsiyum konsantrasyonları ile birlikte görülür. Bazı durumlarda, volkanik bölgelerde meteorik suların volkanik gazlarla etkileşimi sonucu yüksek florür konsantrasyonları oluşabilir.

Bu durumda, florür genellikle yüksek klorür ve sülfat konsantrasyonları ile birlikte bulunur. Yüksek F içerikleri, tortul kayaçlara göre volkanik kayaçların (riyolit, obsidiyen, pomza) su-kayaç etkileşimlerinin daha önemli olduğunu gösterir (Mahon,1964).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların F⁻ değerleri Şekil 34’de verilmiştir.



Şekil 34. Çalışma alanındaki suların F değerleri.

Yiğitler (Tekman) Bölgesi Kaynak 1’in flor (F⁻) değeri Ağustos ayında 0,66 mg/l, Kasım ayında ise 0,91 mg/l dir. Kaynak 2’nin flor (F⁻) değeri Ağustos ayında 0,61 mg/l, Kasım ayında ise 0,60 mg/l’dir. Soğuk kaynak ve yüzey suları ise çok daha düşük klorür değerlerine sahiptir. Soğuk kaynak suyu Kasım ve Ağustos aylarında sabit olup, 0,02 mg/l’dir. Yüzey suyu Ağustos ayında 0,08 mg/l, Kasım ayında ise 0,02 mg/l’dir.

Çimenözü (Çat) Bölgesi Kaynak 1’in flor (F⁻) değeri Ağustos ayında 0,98 mg/l, Kasım ayında ise 0,95 mg/l dir. Kaynak 2’nin flor (F⁻) değeri Ağustos ayında 0,81 mg/l, Kasım ayında ise 1,0 mg/l’dir. Soğuk kaynak ve yüzey suları ise çok daha düşük F⁻ değerlerine sahiptir. Soğuk kaynak suyu Ağustos ayında 0,03 Kasım ayında ise 0,04 mg/l’dir. Yüzey suyu ise Ağustos ve Kasım aylarında sabit olup, 0,09 mg/l’dir.

İncelenen suların flor değerleri 0,02-1,0 mg/l arasında değişmektedir. Bu düşük F⁻ oranlarının, bölgedeki bazalt kayaçlarda bulunan amfibol minerallerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.7. Suların İz Element İçerikleri (Ağır metal analizleri)

Doğal sulardaki iz elementlerin konsantrasyonları, su kaynaklarının kökeni, hidrojeokimyasal evrimi ve kullanım amaçları hakkında önemli bilgiler sunar. Genellikle 1 mg/l'den daha düşük değerlerde bulunan bu elementler, su sistemlerindeki minör bileşenler olarak kabul edilir. Fe (demir) hariç, diğer ağır metaller de sularda genellikle 1 ppm'den daha düşük konsantrasyonlarda bulunurlar (Freze ve Cherry,

1979). Ancak, evsel ve endüstriyel atık sular, madencilik faaliyetleri ve suyun temas ettiği kayaçların mineralojik yapısı gibi faktörler, doğal sulardaki ağır metal yükünü önemli ölçüde artırabilir.

Bu çalışmada Tablo 8'te verilen sıraya göre Be, B, Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Hg, Pb ve Th gibi elementler analiz edilmiştir.

İz element analiz sonuçları incelendiğinde, alüminyum (Al), manganez (Mn), demir (Fe), stronsiyum (Sr), baryum (Ba) ve bor (B) elementlerinin yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu tespit edilmiştir. Th, Pb, Hg, Sn, Cd ve Se elementlerinin değerleri analiz limitlerinin altındadır ve <0.000 ile gösterilmiştir.

Tablo 8. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların iz element içerikleri

Ölçülen Kısa ad	Yiğitler (Tekman)				Çimenözü (Çat)			
	YSK-1K	YSK-2K	YÇ-1E	YD-1E	ÇSK-1K	ÇSK-2K	ÇÇ-1K	ÇD-1K
Be	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.036	<0.000	<0.000
B	183.2	171.4	7.59	10.65	936.8	1031	31.88	54.71
Al	9.54	19.26	28.26	106.5	6.74	44.37	101.8	127.1
Cr	<0.000	<0.000	0.39	0.3	<0.000	<0.000	0.48	0.44
Mn	52.76	167.6	2.62	13.54	10.27	60.49	2.96	9.72
Fe	762.8	1311	105.7	132.2	141	1033	229	183
Ni	<0.000	2.81	<0.000	0.016	16.52	24.44	0.24	1.99
Cu	<0.000	<0.000	2.8	<0.000	<0.000	0.21	1.64	<0.000
Zn	<0.000	58.73	86.69	<0.000	<0.000	<0.000	119.1	<0.000
As	3.98	12.45	<0.000	<0.000	5.34	6.04	<0.000	<0.000
Se	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Rb	40.29	42.75	3.7	0.47	54.92	56.92	2.27	3.69
Sr	1087	906.9	29.05	142.2	706	732.5	41.72	131.1
Ag	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	17.36	<0.000
Cd	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Sn	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Sb	<0.000	<0.000	<0.000	0.004	<0.000	0.015	0.005	0.006
Ba	298.6	263.3	1.95	56.27	338.3	391.7	3.31	26.94
La	<0.000	0.027	<0.000	0.058	<0.000	0.015	0.003	0.003
Ce	<0.000	0.018	0.014	1.65	<0.000	0.102	0.117	0.073
Hg	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Pb	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Th	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000

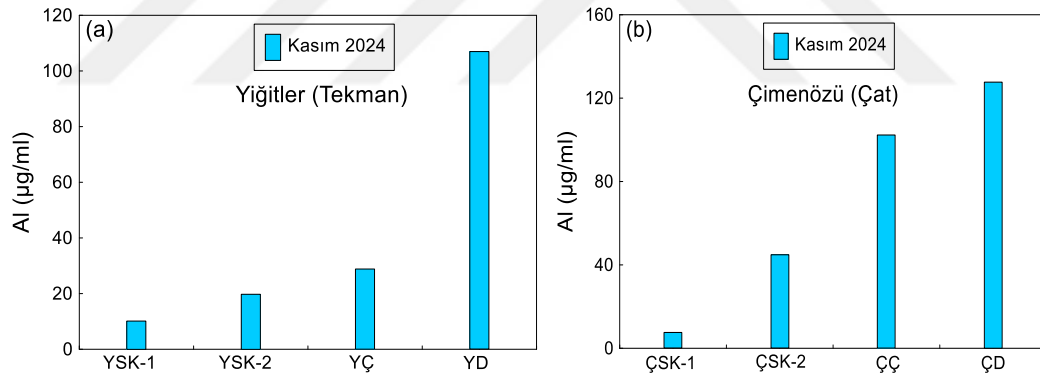
4.7.1. Alüminyum (Al)

Al (alüminyum), feldspat, feldspatoid, amfibol ve mika gibi minerallerin yapılarında bulunur. Tortul kayaçlarda ise alüminyumca zengin kil mineralleri aracılığıyla yer alır (Hem, 1992). Yerkabuğunda bol miktarda bulunmasına rağmen,

alüminyumun suda çözünürlüğü oldukça düşüktür. Bu nedenle, pH değeri 5-9 aralığında olan doğal sularda alüminyum konsantrasyonu genellikle 1 mg/l'nin altındadır. Yeraltı sularında alüminyum miktarı genellikle 0.005-0.3 mg/l arasında değişirken, asidik sularda bu değer 100 mg/l'ye kadar çıkabilir (Şahinci, 1991). Su ortamındaki alüminyum konsantrasyonu, suyun kökeni ve çevredeki maden yatakları hakkında önemli bilgiler sunar (Şahinci, 1991). Jeotermal rezervuarlardaki akışkanlarda alüminyum iyonu konsantrasyonu genellikle 2 mg/kg'ın altında olup, genellikle silis ile birlikte hareket eden hareketsiz bir element olarak kabul edilir. Asidik sularda ise alüminyum iyonu konsantrasyonu yaklaşık 100 mg/l'ye kadar çıkabilir (Nicholson, 1993). Alüminyum, doğal olarak genelde tüm gıdalarda ve içme sularında bulunur (Akgiray, 2003). Klorit mineralleri ile dengede olan sularda alüminyum (Al^{3+}) konsantrasyonları oldukça düşüktür ($<0,02$ mg/kg).

İncelenen su numunelerindeki alüminyumun kaynağını tortul kayaçlardaki marnlar ile magmatik kayaçların oluşturduğu düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Al^{3+} değerleri Şekil 35'de verilmiştir.



Şekil 35. Çalışma alanındaki suların Al değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda alüminyum (Al^{3+}) değerleri 9,54 mg/l ile 19,26 mg/l arasındadır. Bu değerler soğuk kaynak ve yüzey sularında çok daha yüksek olup, soğuk kaynak sularında 28,26 mg/l, yüzey sularında 106,51 mg/l'dir.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda alüminyum (Al^{3+}) değerleri 6,74 mg/l ile 44,37 mg/l arasındadır. Bu değerler soğuk kaynak ve yüzey sularında çok daha yüksek olup, soğuk kaynak sularında 101,78 mg/l, yüzey sularında 127,14 mg/l'dir.

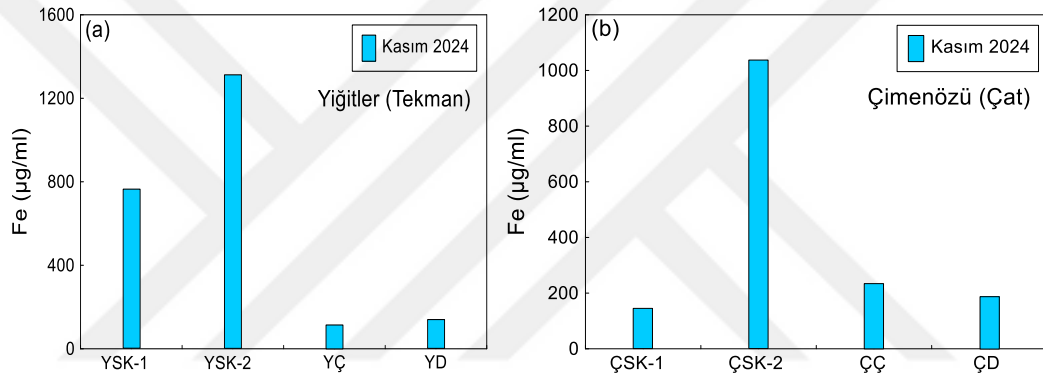
4.7.2. Demir (Fe)

Piroksen, amfibol, magnetit, pirit, granat ve biyotit gibi minerallerin bozunması, doğal ortamlarda demir kaynağı olarak öne çıkar. Yeraltı sularında demir, çoğunlukla

Fe^{2+} iyonu formunda bulunurken, asidik ortamlarda Fe^{3+} iyonu olarak varlığını sürdürür. Karbonatlı kayaçlarla etkileşim halindeki sular, yüksek pH değerleri nedeniyle genellikle yüksek demir iyonu konsantrasyonlarına sahiptir. Kireçtaşı ve dolomit gibi karbonatlı kayaçlarla temas halindeki sular pH'ı 7'nin üzerinde olması sebebiyle özellikle zengin demir içeriğine sahiptir. Bazı sedimanter akiferlerde, farklı redoks potansiyeline sahip suların karışımı veya demir minerallerinin çözünme-çökme reaksiyonları sonucu demir konsantrasyonları değişkenlik gösterir (Hem, 1985).

Su numunelerinin bünyesinde bulunan demirin kaynağı suların Bingöldağı Volkanitleri içindeki andezit ve bazaltlar ile etkileşime girmesi sonucudur.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Fe^{2+} değerleri Şekil 36'da verilmiştir.



Şekil 36. Çalışma alanındaki suların Fe değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda demir değerleri 762,76 mg/l ile 1311 mg/l arasındadır. Bu değerler soğuk kaynak ve yüzey sularında çok daha düşük olup, soğuk kaynak sularında 105,69 mg/l, yüzey sularında 132,22 mg/l'dir.

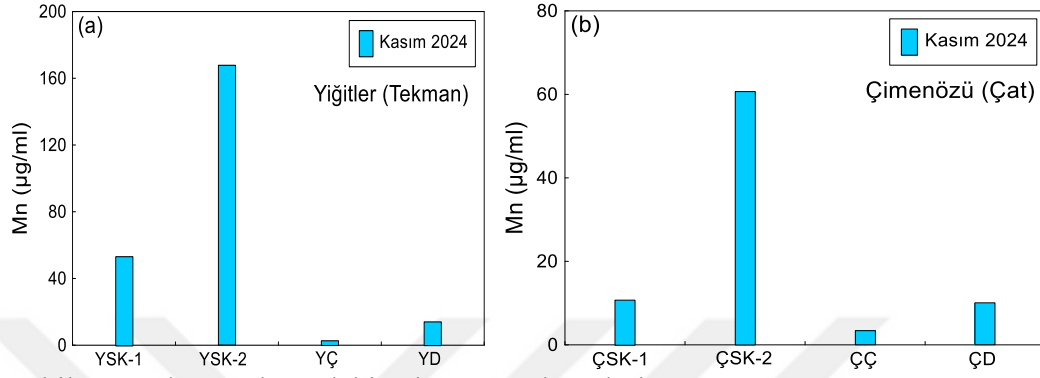
Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda demir değerleri 141 mg/l ile 1033,3 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 228,98 mg/l, yüzey sularında 183,04 mg/l'dir.

4.7.3. Mangan (Mn)

Mangan, içme sularında istenmeyen bir elementtir. Yüksek mangan konsantrasyonları, suya istenmeyen bir bulanıklık ve renk kazandırır. Ayrıca, içme suyu şebekesindeki borularda çökerek tıkanmalara ve boru çaplarının küçülmesine neden olur (Akıray, 2003). Mn, özellikle düşük oksidasyon potansiyeline sahip ve oksijensiz koşullarda bulunan yeraltı ve yerüstü sularda doğal olarak bulunur. İçme sularındaki mangan konsantrasyonu için belirlenen sınır değer, 0.4 mg/l olarak ifade edilmiştir (Anonim, 2006).

Su numunelerinde bulunan manganın (Mn) kaynağının, Memişkomu Formasyonu içerisindeki volkanojenik kumtaşı seviyelerinin sularla temasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların mangan değerleri Şekil 37’de verilmiştir.



Şekil 37. Çalışma alanındaki suların Mn değerleri.

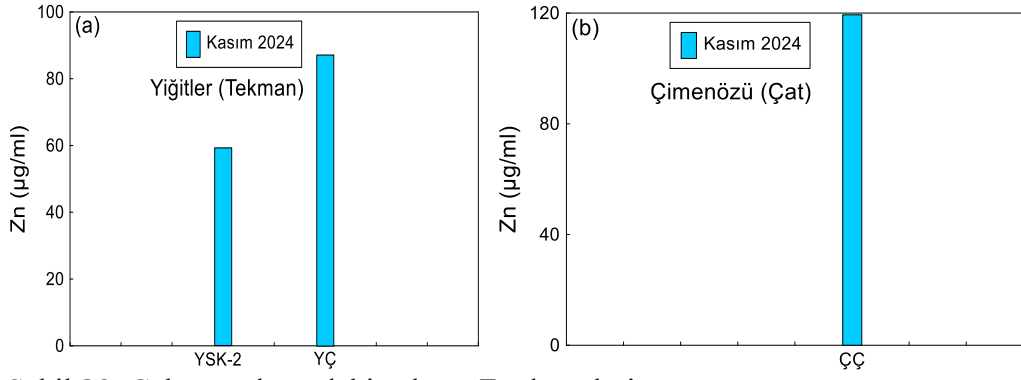
Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Mn değerleri 52,76 mg/l ile 167,64 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak ve yüzey sularında çok daha düşük olup, soğuk kaynak sularında 2,62 mg/l, yüzey sularında 13,54 mg/l'dir.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda mangan (Mn) değerleri 10,27 mg/l ile 60,49 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 2,96 mg/l, yüzey sularında 9,72 mg/l'dir.

4.7.4. Çinko (Zn)

Doğal sulardaki çinko (Zn) kirliliği, çoğunlukla suyun temas ettiği kayalar, gübreler, endüstriyel atıklar ve atmosferik çökelti gibi çeşitli kaynaklardan kaynaklanır. İçme sularında çinko konsantrasyonu 5 mg/l'yi aştığında suya acı ve buruk bir tat verir. Galvanize boruların korozyonu da sulardaki çinko miktarını artıran önemli bir faktördür. Ağır metaller arasında en az toksik olarak kabul edilen çinko olsa da, yüksek konsantrasyonlarda suyun tadını olumsuz etkiler. Çinko, insan sağlığı üzerinde nispeten düşük bir toksisiteye sahip olup, 25 ppm'e kadar olan konsantrasyonlarda olumsuz bir etki göstermediği belirtilmiştir (McNeely vd., 1979).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Zn değerleri Şekil 38’de verilmiştir.



Şekil 38. Çalışma alanındaki suların Zn değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Zn değeri 58,73 mg/l'dir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 86,69 mg/l'dir. Kaynak 2 ve yüzey sularında analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

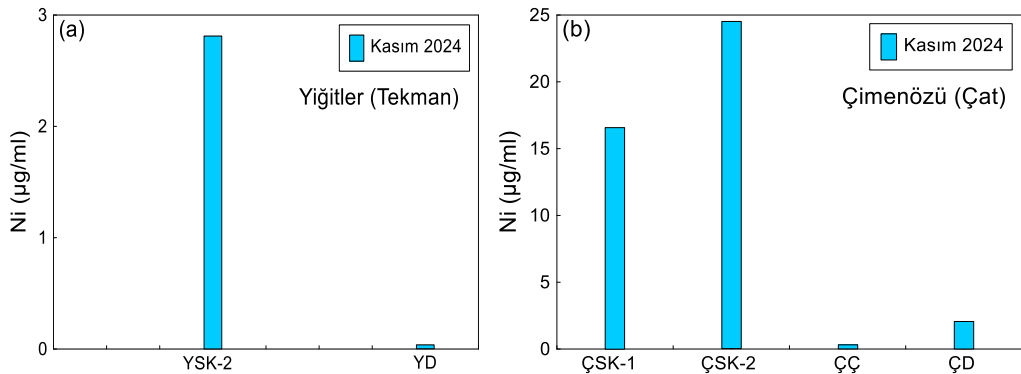
Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Zn değerleri analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler. Bu değerler soğuk kaynak sularında 119,08 mg/l'dir. Yüzey sularında analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

4.7.5. Nikel (Ni)

Nikel, pek çok magmatik kayaç oluşturan mineralin yapısında önemli bir bileşen olarak yer alır. Doğal sularda nikel konsantrasyonu, genellikle 0.005-0.02 ppm aralığında seyretmekle birlikte, bazı durumlarda 1 ppm'e kadar çıkabilir. Bu durum, nikelin doğal çevredeki dağılımı ve su-kayaç etkileşimleri ile yakından ilişkilidir (WHO, 2008).

Suların bünyesindeki nikel elementi kaynağının çalışma alanında bulunan magmatik kayalar olduğu düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Ni değerleri Şekil 39'da verilmiştir.



Şekil 39. Çalışma alanındaki suların Ni değerleri.

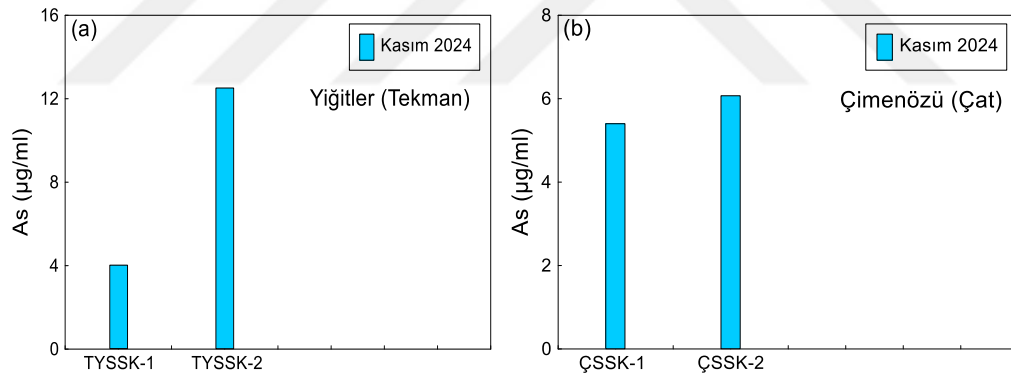
Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Ni değeri 2,81 mg/l'dır. Bu değerler yüzey sularında 0,016 mg/l'dır. Kaynak 2 ve soğuk kaynak sularında analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Ni değerleri 16,52 mg/l ila 24,44 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 0,24 mg/l, yüzey sularında ise 1,99 mg/l'dır.

4.7.6. Arsenik (As)

Arsenik, pirit, arsenopirit, demir ve bakırlı şeyler ile fosfatlı kayaların oksidasyonu gibi jeokimyasal süreçler sonucu jeotermal sulara kolaylıkla geçebilen bir elementtir. Kanserojen etkisi nedeniyle düşük konsantrasyonlarda bile önemli bir sağlık riski oluşturan arsenik, son yıllarda su kaynaklarının kirlenmesi konusunda en çok araştırılan konular arasında yer almaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme sularındaki arsenik limitini 0.05 mg/l olarak belirlemiştir (WHO, 2008).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Arsenik değerleri Şekil 40'da verilmiştir.



Şekil 40. Çalışma alanındaki suların As değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Arsenik değerleri 3,98 mg/l ila 12,45 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak ve yüzey sularında analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Arsenik değerleri 5,34 mg/l ila 6,04 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak ve yüzey sularında analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

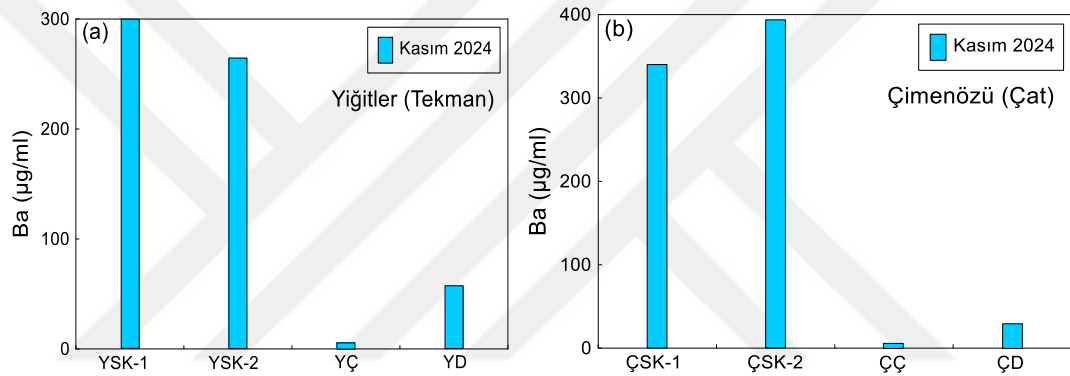
Bölgedeki arsenik seviyelerinin farklılık göstermesi, jeolojik yapı ve hidrotermal süreçlerle ilişkilendirilmiştir.

4.7.7. Baryum (Ba)

Baryum, doğada çoğunlukla barit minerali içerisinde bulunur ve toprak alkali metaller grubunda yer alır. Element halinde değil, bileşikler halinde bulunan baryum (Ba), yeraltı suları ile etkileşime girerek hidrojen ve hidroksit iyonlarının oluşmasına neden olur. Baryum bileşiklerinin büyük bir kısmı insan sağlığı için ciddi riskler taşımaktadır. Bu nedenle, içme suyu kaynaklarında baryum konsantrasyonunun mümkün olduğunca düşük seviyelerde olması gerekmektedir (Tarcan, 2004).

Çalışma alanında bulunan su numunelerindeki baryumun kaynağının, kireçtaşları olabileceği düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Ba^{+2} değerleri Şekil 41’de verilmiştir.



Şekil 41. Çalışma alanındaki suların Ba değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Ba^{+2} değerleri 298,61 mg/l ile 263,31 mg/l arasındadır. Bu değerler soğuk kaynak sularında 1,95 mg/l, yüzey sularında 56,27 mg/l’dir.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Ba^{+2} değerleri 338,25 mg/l ile 391,69 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 3,31 mg/l ve yüzey sularında 26,94 mg/l’dir.

Bu veriler, Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda baryum konsantrasyonunun Yiğitler (Tekman) bölgesine göre genel olarak daha yüksek olduğunu göstermektedir.

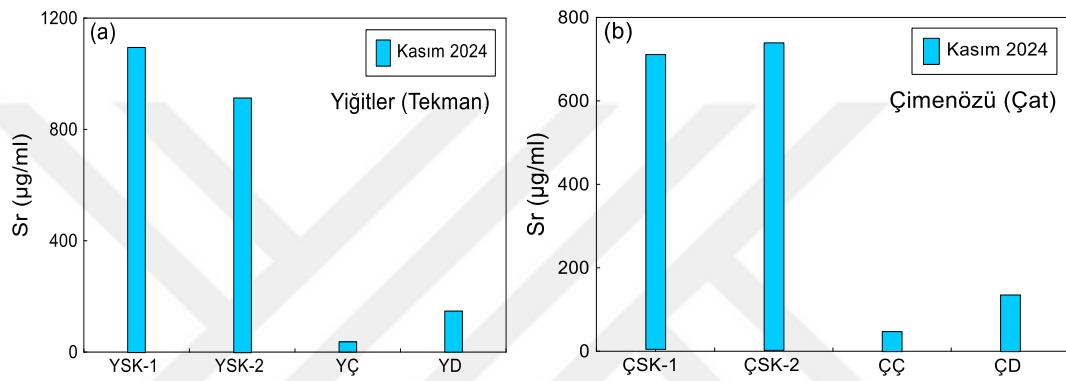
4.7.8. Stronsiyum (Sr)

Stronsiyum, doğal ortamlarda çoğunlukla strontianit, sölestin ve aragonit mineralleri aracılığıyla sulara geçer. Aragonitte bulunan kalsiyum iyonları (Ca^{2+}), stronsiyum iyonları (Sr^{2+}) ile yer değiştirerek suda çözünürlüğü artırır. Ancak, aragonit diyajenez süreciyle daha kararlı bir polimorf olan kalsite dönüştüğünde, bağlı kalan

stronsiyum iyonları serbest kalarak su ortamına karışır (Hounslow, 1995). Stronsiyum, toprak alkali metaller grubunda yer alan ve su ile reaksiyona girerek hidrojen ve hidroksit iyonları oluşturan oldukça reaktif bir elementtir. Bu kimyasal özelliği, stronsiyumun doğal ortamlardaki davranışını ve su sistemlerindeki hareketliliğini önemli ölçüde etkiler (Tarcan, 2004).

İncelenen örneklerde bulunan stronsiyum (Sr) elementi kaynağının, Ağcakoca Formasyonu içindeki marn, kireçtaşları ve jipsler olduğu düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Sr^{+2} değerleri Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 42. Çalışma alanındaki suların Sr değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Sr^{+2} değerleri 1087,1 mg/l ile 906,86 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 29,05 mg/l, yüzey sularında 142,17 mg/l’dir.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Sr^{+2} değerleri 706,01 mg/l ile 732,53 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 41,72 mg/l, yüzey sularında 131,11 mg/l’dir.

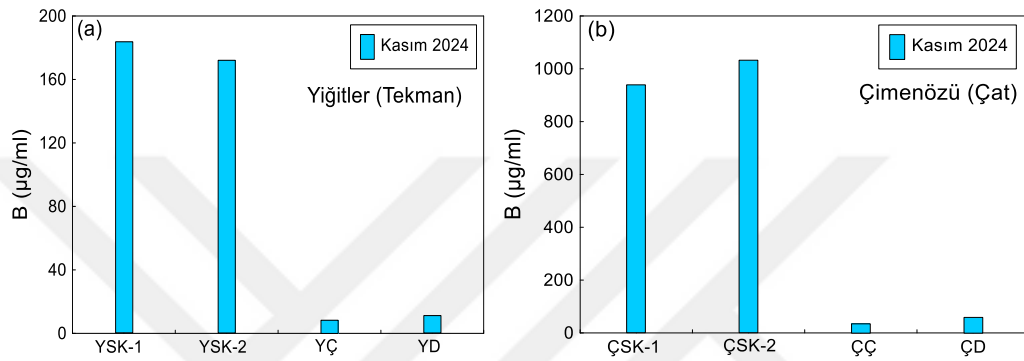
4.7.9. Bor (B)

Bor elementi, doğal ortamlarda magmatik ve tortul kayalar, toprak, endüstriyel ve evsel atık sular gibi çeşitli kaynaklardan sulara geçer. Volkanik faaliyetler sonucu oluşan gazlar da bor bileşiklerini içerebileceğinden, volkanik bölgelerdeki sular ve sıcak kaynaklar genellikle yüksek bor konsantrasyonlarına sahiptir (Dikmen, 2001). Borun toksik seviyelerde olduğu sulara sıklıkla fay hatları yakınındaki kuyular, jeotermal su kaynakları ve tuzlu-alkali toprakların bulunduğu bölgelerdeki yeraltı ve taban suları örnek gösterilebilir (Eryurt, 1999). Suyun pH değeri, sudaki borun kimyasal türünü belirleyen önemli bir faktördür. Asit koşullarda ($pH < 6$) borik asit, nötr ve alkali koşullarda ($pH > 11$) ise daha karmaşık poliborat iyonları hakimdir. Boratların

çözünürlüğü sıcaklık ile artar, bu nedenle hidrotermal sistemlerde borun hareketliliği oldukça yüksektir. Jeotermal sistemlerde bor (B^{3+}) ve klor (Cl^-) iyonlarının oranı, suların kökeni ve karışım derecesi hakkında önemli bilgiler verir (Arnorsson ve Andresdottir 1995; Truesdell 1975-1991).

İncelenen jeotermal sulardaki yüksek bor konsantrasyonu kaynağının, alandaki genç volkanik kayalardaki bor içeren mineraller olduğu düşünülmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların B^{3+} değerleri Şekil 43'de verilmiştir.



Şekil 43. Çalışma alanındaki suların B değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda B^{3+} değerleri 183,16 mg/l ile 171,39 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 7,59 mg/l, yüzey sularında 10,65 mg/l'dir.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda B^{3+} değerleri 936,75 mg/l ile 1030,8 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 31,88 mg/l, yüzey sularında 54,71 mg/l'dir.

Jeotermal sistemlerde bor (B^{3+}) ve klor (Cl^-) iyonlarının göreceli ve mutlak oranları, bu sistemlerin kökeninin ve farklı rezervuarlar arasındaki karışım oranlarının belirlenmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Truesdell 1975, 1991; Arnorsson 1985; Arnorsson ve Andrésdóttir 1995). Her iki elementin de mutlak ve göreceli oranları önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir ve bu nedenle de farklı rezervuarlar karakteristik Cl^-/B^{3+} oranlarına sahiptir. Deniz suları yüksek Cl^-/B^{3+} oranına sahipken, magmatik uçucular düşük Cl^-/B^{3+} oranına sahiptir. Bazaltların yıkanması (leaching) ile oluşan sular orta düzeyde Cl^-/B^{3+} oranına sahipken, yüzey suları değişken ancak genellikle yüksek Cl^-/B^{3+} oranlarına sahiptirler (Aggarwal vd., 2000). Klor (Cl^-) ve bor (B^{3+}), jeotermal sularda çözünürlüğü yüksek olan elementlerdir. Cl^- ve B^{3+} , özellikle >100 °C üzerindeki jeotermal sularda ikincil mineral olarak bulunabilirler (Ellis ve Mahon 1964, 1967). Düşük sıcaklıklarda ise B^{3+} , adsorpsiyon

yoluyla kil mineralleri veya ikincil minerallerden taşınabilirler (Seyfried vd., 1984; Keren ve Mezuman, 1981).

Yiğitler (Tekman) jeotermal su kaynağında B^{+3} konsantrasyonu 183.2 mg/l gibi yüksek bir değere sahiptir. İyonik güç ve denge etkileri göz önünde bulundurularak meq/L cinsinden yapılan hesaplamalar sonucunda Cl^{-}/B^{+3} oranı 0.04-0.03 aralığında değişmektedir. Bunun sebebi kaynak sularının yüzey sularına yakın bir bileşimde olmadığını, aksine daha derin bir kökeni olduğunu gösterebilir.

Çimenözü (Çat) jeotermal su kaynağında ise B^{+3} konsantrasyonu 936.8 mg/l gibi yüksek bir değerde ölçülmüştür. İyonik güç ve denge etkileri göz önünde bulundurularak meq/L cinsinden yapılan hesaplamalar sonucunda Cl^{-}/B^{+3} oranı 0,02 gibi düşük değerde olması, yüzeyden çok daha derin ve termal süreçlere maruz kalan bir yapıda olduğunu ifade etmektedir. Cl^{-}/B^{+3} değerleri her iki kaynakta da deniz suyu bileşimlerinden düşük bir seviyede bulunmuştur. Bu da suların deniz kökenli olmadığını veya deniz suyu ile sınırlı bir etkileşimi olduğunu ifade edebilir.

4.7.10. Silisyum (Si)

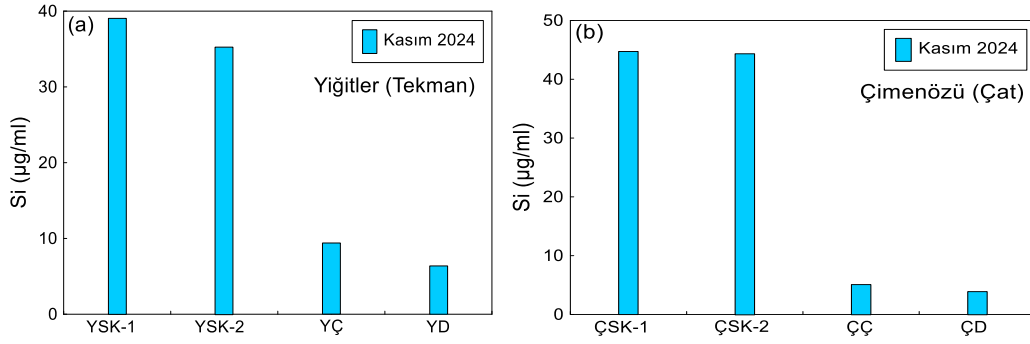
Doğal sulardaki silika (Si) konsantrasyonları genel olarak 1-30 mg/l arasında değişmekle birlikte, bazı alanlarda bu değer 100 mg/l'ye kadar çıkabilmektedir (Hem, 1992). Davis'in (1964) araştırmasına göre, silika konsantrasyonunun yüzey sularında ortalama 14 mg/l, yeraltı sularında ise 17 mg/l olduğu belirtilmiştir. Bu farklılıklar, su-kayaç etkileşimleri, biyolojik aktivite ve insan kaynaklı kirlilik gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır.

Normal yeraltı suyu sıcaklıklarında kuvars gibi kristal yapılı silikat minerallerinin çözünürlüğü oldukça düşüktür. Ancak jeotermal suların yüksek sıcaklıkları, kuvarsın çözünürlüğünü önemli ölçüde artırır (Truesdell, 1984).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların silisyum değerleri Şekil 44'de verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda silisyum değerleri 38,9 mg/l ile 35,1 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 9,2 mg/l, yüzey sularında 6,2 mg/l'dir.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda silisyum değerleri 44,5 mg/l ile 44,1 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 4,7 mg/l, yüzey sularında 3,6 mg/l'dir.



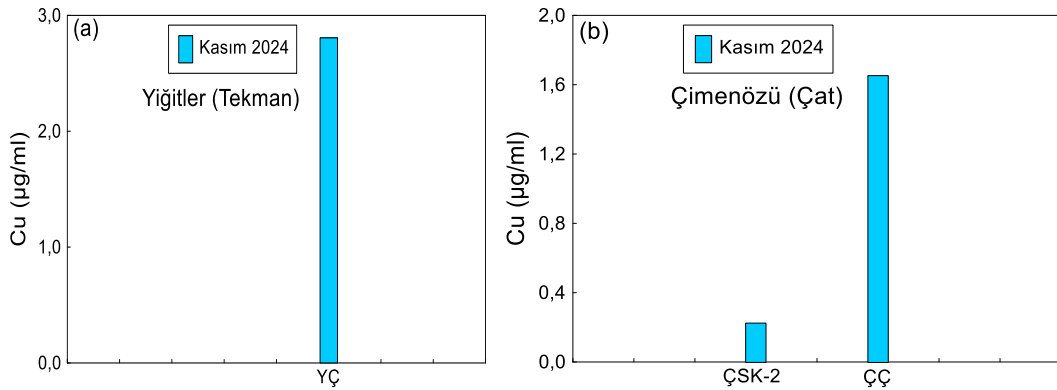
Şekil 44. Çalışma alanındaki suların Si değerleri.

Genel olarak bakıldığında, Tekman yöresinde yer alan sular, Çat yöresindekilere nazaran biraz daha yüksek Si değerlerine sahiptirler (Şekil 44).

4.7.11. Bakır (Cu)

Doğal ortamlarda bakır (Cu), genellikle yeraltı suları ile temas halinde bulunan sülfür ve karbonat mineralleri içinde veya saf halde kayalarda bulunur. Bu minerallerin düşük çözünürlükleri nedeniyle, su ortamlarındaki bakır konsantrasyonları doğal olarak oldukça düşüktür (Hem, 1985). Biyolojik önemi büyük olan bakır, birçok canlı organizmanın metabolik süreçlerinde hayati bir rol oynar. Ancak, suda 1 mg/l'yi aşan bakır konsantrasyonları, suya hoş olmayan metalik bir tat verir. Gıda ve içme suları, bakır kirliliği açısından sıklıkla incelenen matrislerdir. İçme sularındaki yüksek bakır düzeyleri, genellikle su dağıtım sistemlerindeki bakır boruların korozyonundan kaynaklanır. Asidik veya yüksek karbonat iyonu içeren sular, bakırın çözünürlüğünü artırarak suda daha yüksek konsantrasyonlarda bulunmasına neden olabilir (Anonim, 2006).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların bakır değerleri Şekil 45'de verilmiştir.



Şekil 45. Çalışma alanındaki suların Cu değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki soğuk kaynak suyunda bakır değeri 2,8 mg/l'dir. Bu değerler jeotermal sularda ve yüzey sularında analiz limitlerinin altındadır.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda bakır değerleri 0,21 mg/l olup, bu değer soğuk kaynak sularında 1,64 mg/l'dir. Yüzey sularında analiz limitlerinin altındadır.

4.7.12. Krom (Cr)

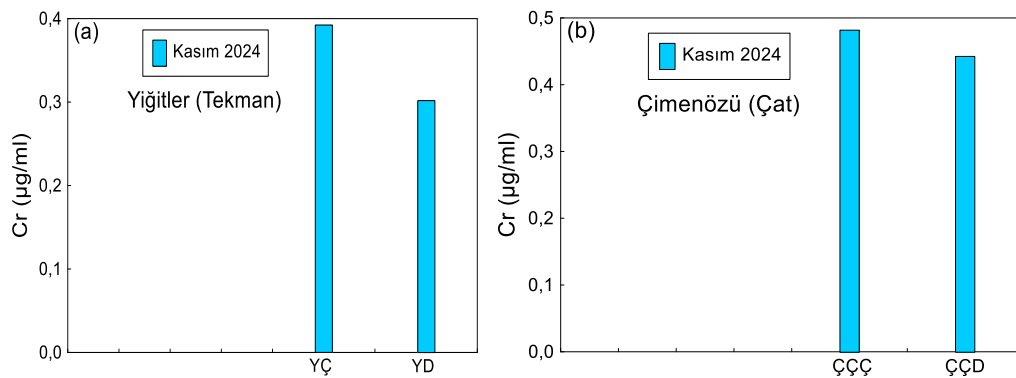
Krom (Cr) elementinin altı değerlikli iyonu (Cr^{+6}) bilinen bir kanserojen olup, içme sularında bulunması ciddi sağlık riskleri taşımaktadır. Su ortamlarındaki krom kirliliği, doğal kaynaklar (kayaçlar), endüstriyel atıklar ve tarımsal faaliyetler gibi çeşitli antropojenik ve doğal kaynaklardan kaynaklanabilir. Bu durum, su kaynaklarının kalitesinin bozulduğunun bir göstergesi olarak kabul edilir.

Çalışma alanının ve çevresinde yaygın olarak görülen ultramafik kayaçlar önemli bir krom kaynağını oluşturur.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların krom değerleri Şekil 46'da verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki soğuk kaynak suyunda krom içeriği 0,39 mg/l, yüzey suyunda 0,3 mg/l'dir. Bu değerler jeotermal sularda analiz limitlerinin altındadır.

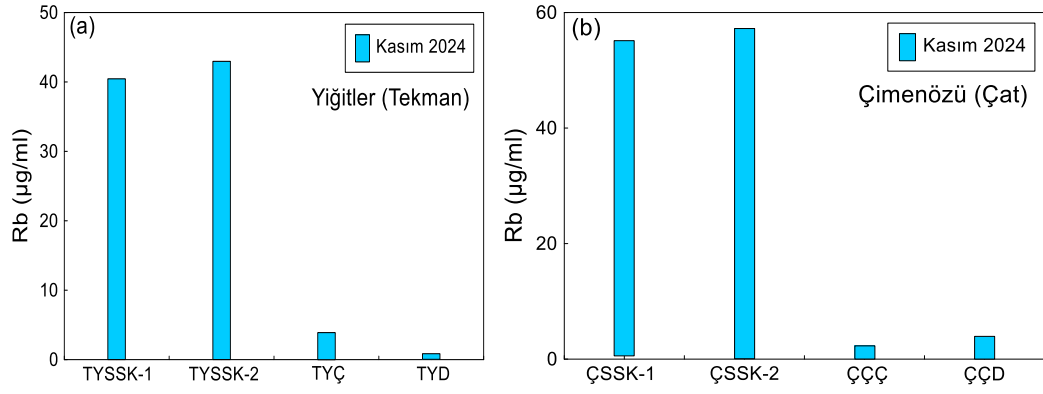
Çimenözü (Çat) bölgesindeki soğuk kaynak suyunda krom içeriği 0,48 mg/l, yüzey suyunda 0,44 mg/l'dir. Bu değerler jeotermal sularda analiz limitlerinin altındadır.



Şekil 46. Çalışma alanındaki suların Cr değerleri.

4.7.13. Rubidyum (Rb)

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Rb değerleri Şekil 47'de verilmiştir.



Şekil 47. Çalışma alanındaki suların Rb değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Rb^+ değerleri 40,29 mg/l ila 42,75 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 3,7 mg/l, yüzey sularında 0,47 mg/l'dir.

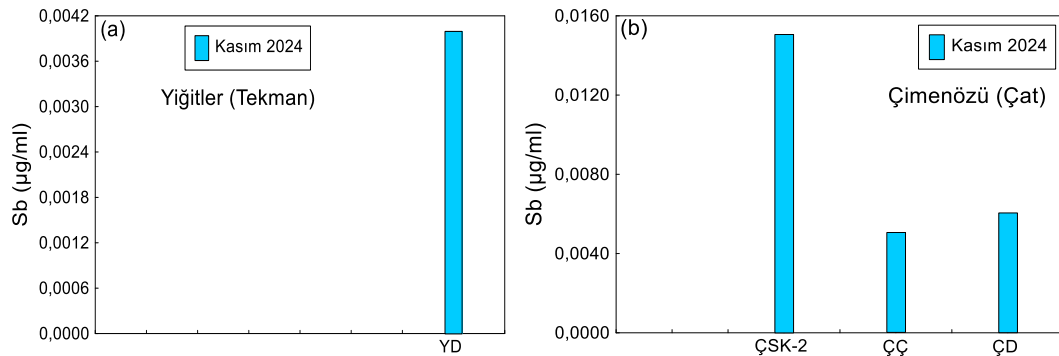
Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Rb^+ değerleri 54,92 mg/l ila 56,92 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 2,27 mg/l, yüzey sularında 3,69 mg/l'dir.

4.7.14. Antimuan (Sb)

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Sb değerleri Şekil 48'de verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki yüzey suyunda Sb değeri 0,004 mg/l'dr. Bu değerler jeotermal sularda (Kaynak-1 ve Kaynak-2) ve soğuk kaynak sularında analiz limitlerinin altındadır.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Sb değerleri 0,015 mg/l olup, bu değer soğuk kaynak sularında 0,005 mg/l, yüzey suyunda 0,006 mg/l'dir.



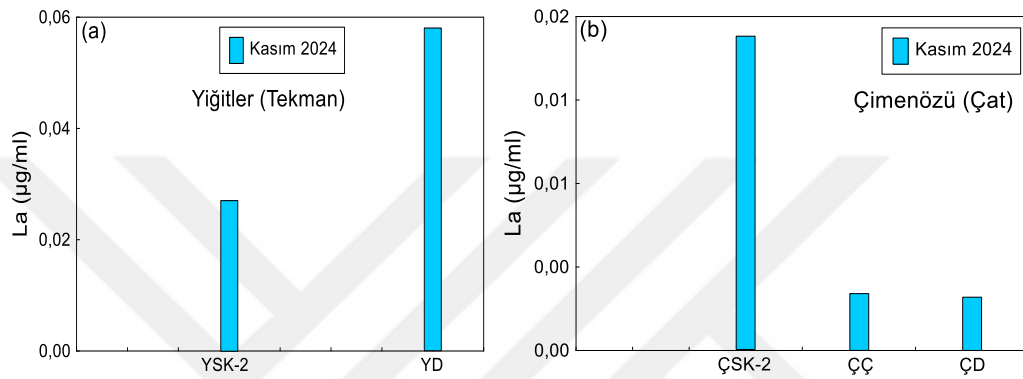
Şekil 48. Çalışma alanındaki suların Sb değerleri.

4.7.15. Lantanyum (La)

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların La^{+3} değerleri Şekil 49'da verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda La^{+3} içeriği 0,027 mg/l, yüzey suyunda 0,058 mg/l'dir. Bu değerler soğuk kaynak sularında analiz limitlerinin altındadır.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda La^{+3} değeri 0,015 mg/l olup, yüzey ve soğuk kaynak sularında 0,003 mg/l'dir.



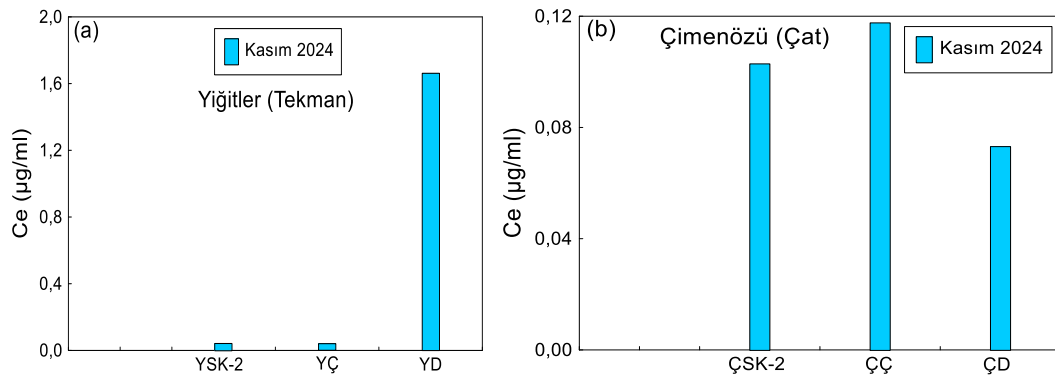
Şekil 49. Çalışma alanındaki suların La değerleri.

4.7.16. Seryum (Ce)

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların Ce^{+3} değerleri Şekil 50'de verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sularda Ce^{+3} değeri düşük olup 0,018 mg/l, soğuk kaynak suyunda ise 0,014 mg/l'dir. Söz konusu değerler yüzey suyunda çok daha yüksek olup 1,65 mg/l'dir.

Çimenözü (Çat) bölgesindeki jeotermal sularda Ce^{+3} değeri 0,102 mg/l'dir. Bu değerler soğuk kaynak suyunda 0,117 mg/l ve yüzey suyunda 0,073 mg/l'dir.



Şekil 50. Çalışma alanındaki suların Ce değerleri.

4.7.17. Be, Se, Ag, Cd, Sn, Hg, Pb ve Th

Be⁺² değerleri, Çimenözü (Çat) jeotermal su Kaynak-2 noktası (Be⁺² =0,036 mg/l) hariç, diğer sularda analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler. Yiğitler (Tekman) yöresindeki tüm sularda Be⁺² konsantrasyonları analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

Ag⁺ değerleri, Çimenözü (Çat) soğuk kaynak suyu noktası (Ag⁺=17,36 mg/l) hariç, diğer sularda analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler. Yiğitler (Tekman) yöresindeki tüm sularda Ag⁺ konsantrasyonları analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

Se, Cd, Sn, Hg, Pb ve Th değerleri, Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki tüm sularda analiz limitlerinin altında değerlere sahiptirler.

4.8. Kirlilik Analizleri

Su kaynaklarının kalitesi ve içme suyu uygunluğu değerlendirilmesinde amonyum (NH₄⁺), nitrit (NO₂⁻), nitrat (NO₃⁻) ve fosfat (PO₄³⁻) gibi besin tuzlarının varlığı ve miktarları önemli bir göstergedir. Bu çalışmada incelenen su noktalarında, söz konusu parametrelerin analiz sonuçları Tablo 9'da sunulmuştur. Elde edilen veriler ışığında, su örneklerinin besin tuzu kirliliği açısından değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

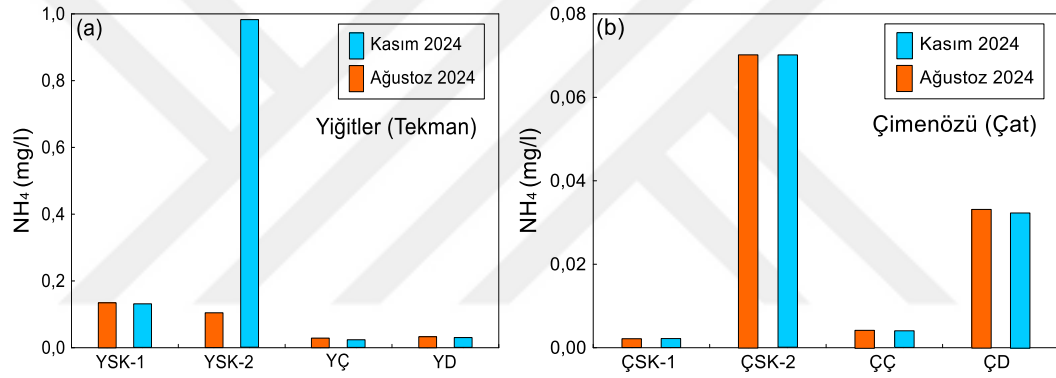
Tablo 9. Tekman-Çat (Erzurum) jeotermal sahasındaki suların kirlilik analiz değerleri

Lokasyon / Yer İsmi	Örnek Türü	Örnek Adı	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	YSK-1A	0.01	11.69	0.04	0.133
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	YSK-1K	0.01	0.46	0.02	0.13
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	YSK-2A	0.01	0.02	0.08	0.102
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	YSK-2K	0.01	1.61	0.06	0.98
Yiğitler (Tekman)	Çeşme	YÇ-1A	0.002	4.56	0.03	0.028
Yiğitler (Tekman)	Çeşme	YÇ-1E	0.002	4.22	0.03	0.022
Yiğitler (Tekman)	Dere	YD-1A	0.002	0.78	0.003	0.031
Yiğitler (Tekman)	Dere	YD-1E	0.002	0.09	0.09	0.029
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	ÇSK-1A	0.07	7.54	0.003	0.002
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	ÇSK-1K	0.06	7.23	0.01	0.002
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	ÇSK-2A	0.08	1.3	0.01	0.07
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	ÇSK-2K	0.05	0.1	0.01	0.07
Çimenözü (Çat)	Çeşme	ÇÇ-1A	0.002	1.43	0.01	0.004
Çimenözü (Çat)	Çeşme	ÇÇ-1K	0.002	1.4	0.01	0.004
Çimenözü (Çat)	Dere	ÇD-1A	0.01	1.82	0.03	0.033
Çimenözü (Çat)	Dere	ÇD-1K	0.01	10.06	0.02	0.032

4.8.1. Amonyum (NH₄)

Yeraltı sularında amonyak konsantrasyonlarının genellikle düşük olması, toprak tanecikleri ve kil mineralleri tarafından adsorpsiyon ile tutulmasından kaynaklanır (APHA vd., 1981). Amonyak, hem doğal (metabolik süreçler, kayaç ayrışması, hidrotermal aktiviteler) hem de antropojenik (gübreler, endüstriyel atıklar) kaynaklarla suya karışabilir (Aiuppa vd., 2003). NH₄ (amonyum) iyonunun amonyak molekülüne dönüşüm oranı (NH₄/NH₃), pH ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Özellikle pH 8.5'in üzerindeki değerlerde amonyak oranı hızla artar (Uslu ve Türkman, 1987).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların amonyum (NH₄) değerleri Şekil 51'de verilmiştir. Şekil 51 incelendiğinde, Yiğitler ve Çimenözü bölgelerindeki NH₄⁺ (amonyum) konsantrasyonlarının genel olarak düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 51. Çalışma alanındaki suların NH₄ değerleri.

Yiğitler (Tekman) yöresindeki kaynak sularında NH₄ değerleri 0,98 mg/l – 0,133 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak suyunda 0,022-0,028 mg/l, yüzey sularında 0,029-0,031 mg/l arasındadır.

Çimenözü (Çat) yöresindeki kaynak sularında NH₄ değerleri 0,002– 0,07 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak suyunda 0,004 mg/l, yüzey sularında 0,032-0,033 mg/l arasındadır.

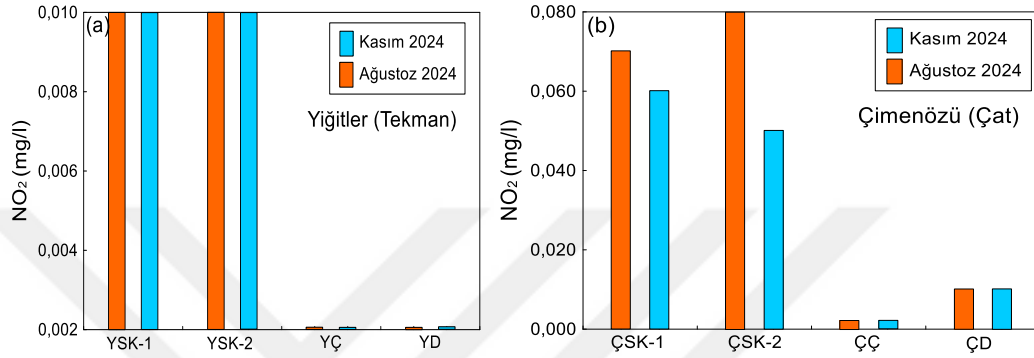
4.8.2. Nitrit (NO₂⁻)

Nitrit iyonu (NO₂⁻), sularda genellikle düşük konsantrasyonlarda bulunan ve azot döngüsünde önemli bir ara ürün olan bir bileşiktir. Oksijenli ortamlarda kararsız olması nedeniyle, amonyak (NH₃) ve nitrat (NO₃⁻) arasında geçiş süreçlerinde (nitrifikasyon ve denitrifikasyon) bulunmaktadır. Sudaki nitrit varlığı, organik maddelerin bakteriler tarafından parçalanması sonucu oluşan bir ara ürün olduğundan, su ortamında aktif biyolojik süreçlerin varlığına işaret eder (McNeely vd., 1979).

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların NO_2^- değerleri Şekil 52’de verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) yöresindeki tüm sularında nitrit (NO_2^-) değerleri 0,01 mg/l ile 0,002 mg/l arasında değişmektedir.

Çimenözü (Çat) yöresindeki kaynak sularında nitrit (NO_2^-) değerleri 0,05 mg/l - 0,08 mg/l arasında değişmektedir. Bu değerler soğuk kaynak sularında 0,002 mg/l, yüzey sularında 0,01 mg/l’dir.

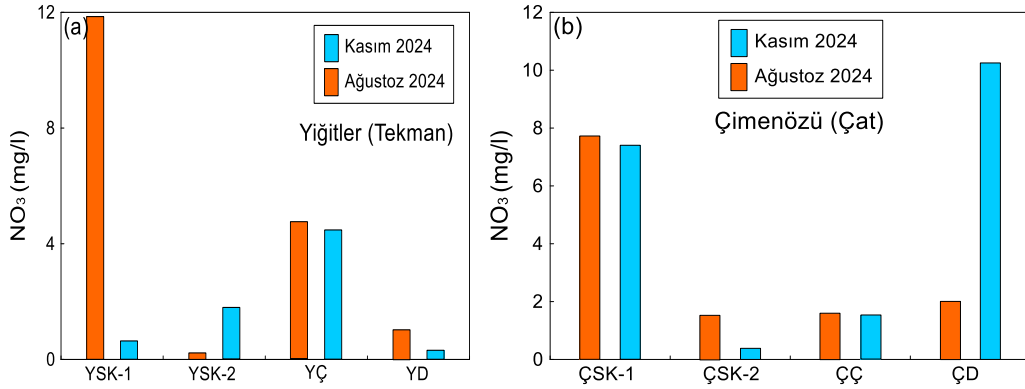


Şekil 52. Çalışma alanındaki suların NO_2 değerleri.

4.8.3. Nitrat (NO_3^-)

Sularda en yaygın bulunan bağlı azot bileşiği nitrattır. Nitratin doğal kaynakları arasında magmatik kayalar ve volkanik faaliyetler sonucu ortaya çıkan buhar ve gazlar sayılabilir. Ancak yeraltı ve yüzey sularındaki nitratin başlıca kaynakları antropojeniktir ve tarımsal faaliyetlerden (gübre kullanımı, sulama suları), atık su deşarjlarından ve atmosferik çökelmelerden kaynaklanır (Dikmen, 2001). Sularda bulunan nitrat konsantrasyonu genellikle 20 mg/l'nin altında olup, bazı su kaynaklarında 45 mg/l'yi aşabilmektedir. Yüksek nitrat konsantrasyonu çoğunlukla yeraltı sularında gözlemlenmektedir. Yüzey sularında bulunan nitrat (NO_3^-) ise sucul bitkiler tarafından kullanılarak konsantrasyonu azaltılmaktadır (WHO, 1984). Bir kısım yüzey suları 450 mg/l'den fazla nitrat içerebilmekle birlikte, bu konsantrasyon nadiren 20 mg/l'ye ulaşmakta, çoğunlukla 5 mg/l'nin altında kalmaktadır. Özellikle tarımsal alanlarda azotlu gübre kullanımı ile yeraltı sularındaki nitrat (NO_3^-) konsantrasyonu 1000 mg/l'yi aşabilmektedir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların NO_3^- değerleri Şekil 53’de verilmiştir.



Şekil 53. Çalışma alanındaki suların NO₃ değerleri.

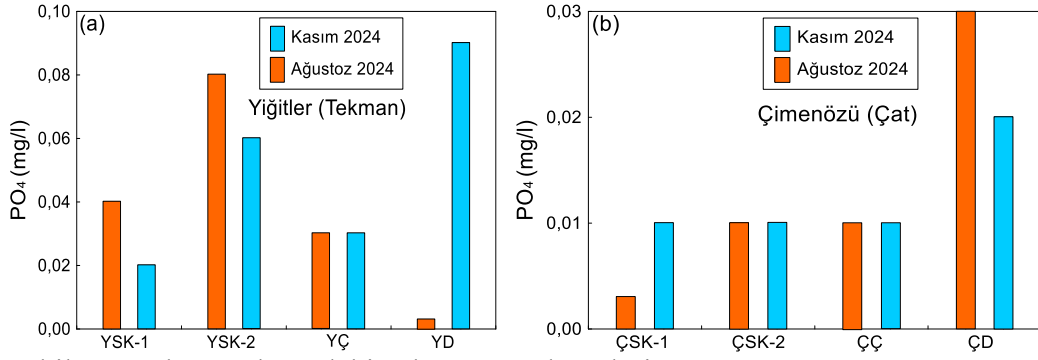
Yiğitler (Tekman) bölgesinde NO₃⁻ konsantrasyonu kaynak sularında 0,02-11,69 mg/l arasında, soğuk kaynak sularında 4,56-4,22 mg/l, yüzey sularında ise 0,09-0,78 mg/l arasında ölçülmüştür.

Çimenözü (Çat) bölgesinde ise NO₃⁻ konsantrasyonu kaynak sularında 0,1-7,54 mg/l arasında, soğuk kaynak sularında 1,40-1,43 mg/l arasında ve yüzey sularında 1,82-10,06 mg/l olarak tespit edilmiştir.

4.8.4. Fosfat (PO₄)

Fosfor, magmatik kayaçların önemli bir bileşeni olup, özellikle apatit minerali formunda yaygın olarak bulunur. Sedimanter kayaçlarda da bulunmasına rağmen, bu kayaçlardaki fosfor konsantrasyonları genellikle 1 mg/l'yi aşmamaktadır (Hem, 1985). Su ortamlarında yeterli miktarda azot bulunursa, 0.1 mg/l'nin üzerindeki fosfor konsantrasyonları ötrofikasyona neden olarak su kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu durum, çamur oluşumu ve alg patlamaları gibi sorunlara yol açarak suyun çeşitli kullanımlarını sınırlar (McNeely vd., 1979). Yeraltı ve yüzey sularındaki fosforun başlıca kaynakları arasında kayaçlar ve toprak, bozunan organik maddeler, evsel ve endüstriyel atıklar, arıtma tesisleri çıkış suları, katı atık depolama alanları ve tarımsal faaliyetlerde kullanılan gübreler sayılabilir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların PO₄ değerleri Şekil 54'de verilmiştir.



Şekil 54. Çalışma alanındaki suların PO₄ değerleri.

Yiğitler (Tekman) bölgesinde PO₄ konsantrasyonu kaynak sularında 0,02 ila 0,08 mg/l arasında, soğuk kaynak sularında 0,03 mg/l, yüzey sularında ise 0,003-0,09 mg/l arasındadır.

Çimenözü (Çat) bölgesinde ise PO₄ konsantrasyonu kaynak sularında 0,003-0,01 mg/l arasında, soğuk kaynak sularında 0,01 mg/l, yüzey sularında ise 0,02 ila 0,03 mg/l olarak tespit edilmiştir.

4.9. İnceleme Alanındaki Suların Sınıflandırılması

Çalışma alanındaki jeotermal sulardan, soğuk su kaynaklarından ve yüzey (dere) sularından alınan su numunelerine ait analiz sonuçları değerlendirilerek, incelenen suların hidrokimyasal sınıfları belirlenmiştir.

Bir su örneğindeki toplam çözünmüş madde miktarının yarısından fazlasını oluşturan anyon ve katyon türleri, suyun hidrokimyasal fasiyesini belirler. Eğer hiçbir iyon, toplam çözünmüş maddenin %50'sini aşmıyorsa, su karışık bir fasiyese sahip olarak sınıflandırılır. Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH) tarafından geliştirilen bir başka sınıflamada ise, toplam çözünmüş maddenin %20'sinden fazlasını oluşturan anyon ve katyon türleri dikkate alınarak su tipi belirlenir (Başkan ve Canik, 1983). Bu sınıflamada, önce katyonlar sonra anyonlar sırasıyla belirtilerek suyun hidrokimyasal karakteri tanımlanır.

Çalışma alanındaki su örneklerinin hidrokimyasal karakterizasyonu için Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979) tarafından önerilen sınıflama yöntemi tercih edilmiştir (Tablo 10). Yüzey suları, soğuk ve sıcak yeraltı sularının hidrojeokimyasal özellikleri ve işlevlerinin daha iyi anlaşılması amacıyla Piper diyagramı (Piper, 1944) ve Schoeller diyagramı (Schoeller, 1962) gibi grafiksel yöntemlerden yararlanılmıştır. Piper diyagramı, su örneklerinin kimyasal bileşimlerini görsel olarak karşılaştırırken, Schoeller diyagramı ise suyun kimyasal içeriğini daha detaylı bir şekilde incelemeye olanak tanır. Ayrıca, çalışma alanında tarımsal sulama

faaliyetlerinin yaygın olması nedeniyle, sulama sularının tuzluluk durumunu değerlendirmek için ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramı kullanılmıştır.

4.9.1. Piper Diyagramı Değerlendirmesi

Piper diyagramı, su örneklerinin hidrokimyasal karakterizasyonunda sıklıkla kullanılan bir grafiksel yöntemdir. Bu diyagram, anyon ve katyonların mili eşdeğer (meq/l) cinsinden oranlarının ayrı ayrı gösterildiği iki üçgen ve bu iki üçgenin birleştirilmesiyle oluşan bir eşkenar dörtgenden oluşur. Üçgen diyagramlar, su örneklerinin hidrokimyasal fasiyeslerini görsel olarak karşılaştırmada ve sınıflandırmada önemli bir araçtır. Eşkenar dörtgen ise su örneklerini dokuz farklı hidrokimyasal sınıfa ayırmak için kullanılır. Bu sayede, su örneklerinin kimyasal bileşimleri arasındaki benzerlik ve farklılıklar daha kolay anlaşılır hale gelir.

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki suların katyon-anyon sıralaması ve tipleri, analiz değerleri (ilgili tablolar) dikkate alınarak Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki suların IAH (1979)'a göre Su Tipi sınıflaması

Örnek Adı	Türü	Tarih	Katyon sıralaması	Anyon sıralaması	Su Tipi
YSK-1A	Jeotermal su	Ağustos	Mg-Ca-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Mg-Ca-Na-HCO ₃ - SO ₄
YSK-1K	Jeotermal su	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ - SO ₄
YSK-2A	Jeotermal su	Ağustos	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ - SO ₄
YSK-2K	Jeotermal su	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ - SO ₄
YÇ-1A	Soğuk su	Ağustos	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ - SO ₄
YÇ-1K	Soğuk su	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ - SO ₄
YD-1A	Yüzey suyu	Ağustos	Ca-Mg-K-Na	HCO ₃ -Cl- SO ₄ -F	Ca-Mg-K-HCO ₃ -Cl
YD-1K	Yüzey suyu	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ - SO ₄
ÇSK-1A	Jeotermal su	Ağustos	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -Cl- SO ₄ -F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl
ÇSK-1K	Jeotermal su	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -Cl- SO ₄ -F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl
ÇSK-2A	Jeotermal su	Ağustos	Mg-Na-Ca-K	HCO ₃ -Cl- SO ₄ -F	Mg-Na-Ca-HCO ₃ -Cl
ÇSK-2K	Jeotermal su	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -Cl- SO ₄ -F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl
ÇÇ-1A	Soğuk su	Ağustos	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄
ÇÇ-1K	Soğuk su	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -SO ₄ -Cl-F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄
ÇD-1A	Yüzey suyu	Ağustos	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -Cl- SO ₄ -F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl
ÇD-1K	Yüzey suyu	Kasım	Ca-Mg-Na-K	HCO ₃ -Cl- SO ₄ -F	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl

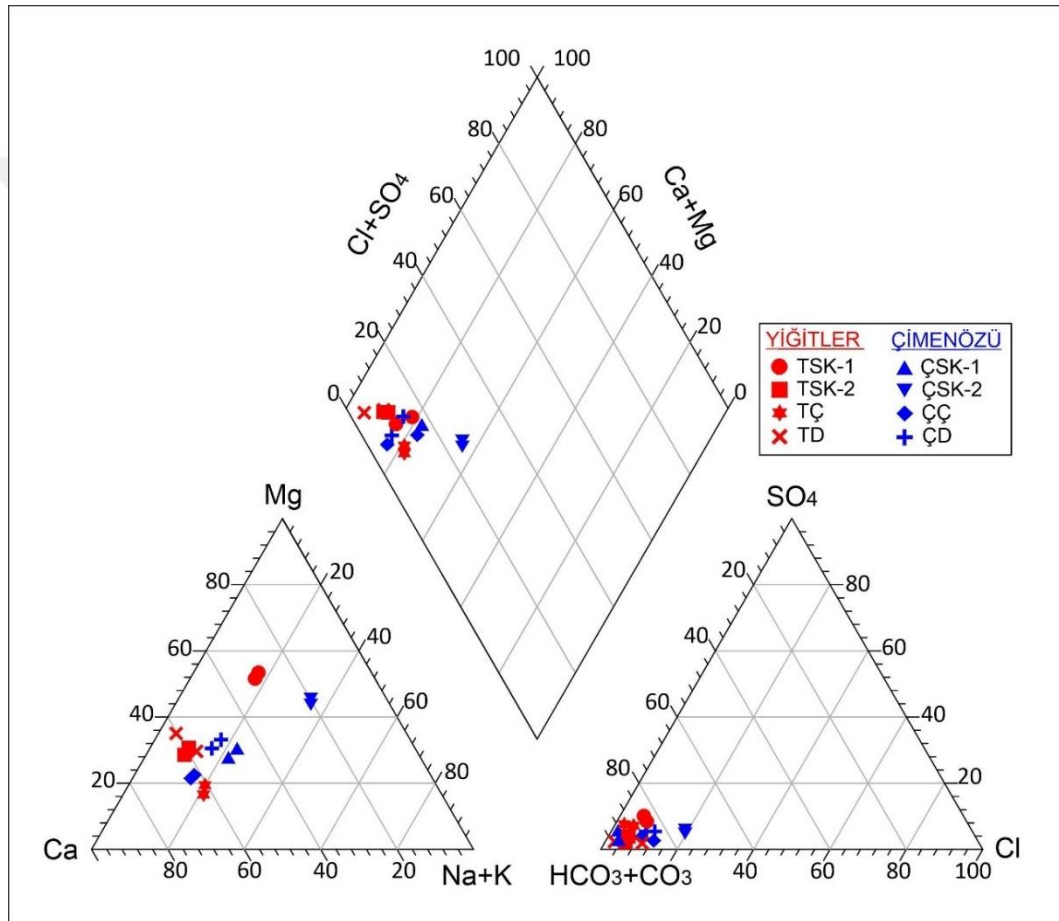
Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki su örneklerine ait Piper diyagramı Şekil 55'de verilmiştir.

Piper Diyagramı değerlendirilmesine göre, çalışma alanındaki jeotermal sular dahil tüm sularda alkali toprak elementler (Ca+Mg) alkali elementlerden (Na+K); zayıf asit kökleri (CO₃+HCO₃) ise güçlü asit köklerinden (Cl+SO₄) daha fazladır (Şekil 55). Tüm sular kalsiyum bikarbonatlı sular alanında yer alırlar (Şekil 55).

Yiğitler jeotermal su kaynaklarından YSK-1A nolu örnekte Mg-Ca-Na-HCO₃-

SO₄ sular sınıfında yer alırken, diğer sıcak su kaynakları ve soğuk sular Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄'lü sular sınıfında yer almaktadır. Yüzey sularından YD-1A nolu örnekte Ca-Mg-K-HCO₃-Cl sınıfında yer alırken, YD-1K nolu örnekte Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄'lü sular sınıfında yer almaktadır (Şekil 55).

Çimenözü jeotermal su kaynaklarından ÇSK-2A nolu örnekte Mg-Ca-Na-HCO₃-Cl sınıfında yer alırken, diğer sıcak su kaynakları Ca-Mg-Na-HCO₃-Cl'lü sular sınıfında yer aırlar. Soğuk su kaynakları Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄'lü sular ve yüzey suları ise Ca-HCO₃-Cl'lü sular sınıfındadır (Şekil 55).



Şekil 55. Çalışma alanındaki (Yiğitler ve Çimenözü) su örneklerine ait Piper diyagramı (Piper, 1944).

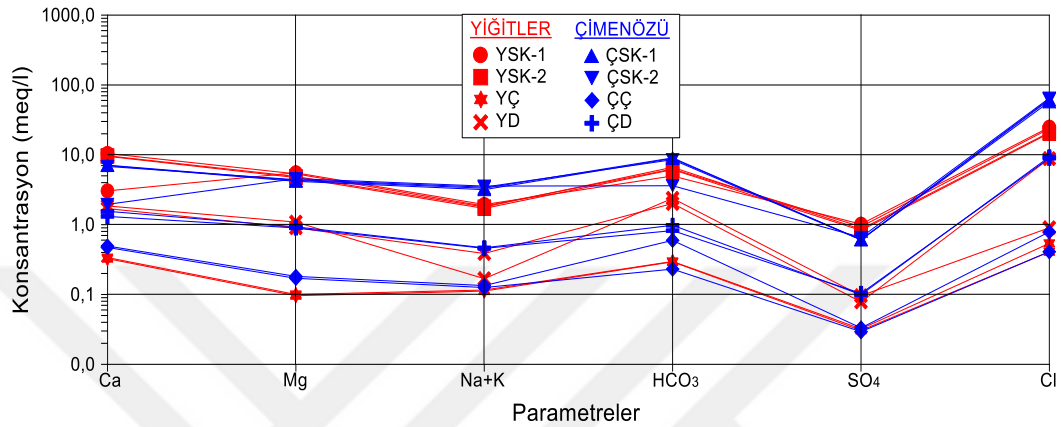
4.9.2. Schoeller Diyagramı Değerlendirmesi

Schoeller diyagramı (Schoeller, 1955), su örneklerindeki iyon konsantrasyonlarının görsel olarak karşılaştırılmasında kullanılan bir grafiksel yöntemdir. Diyagramın dikey eksen, iyon konsantrasyonlarını mili eşdeğer (meq/l) cinsinden logaritmik ölçekte gösterirken, yatay eksen ise Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ ve HCO₃⁻ iyonlarını içerir.

Bu diyagram, aynı anda birden fazla iyonun konsantrasyonunu gösterme özelliği

sayesinde, su örneklerinin kimyasal bileşimleri arasındaki benzerlik ve farklılıkları belirlemede oldukça faydalıdır. Özellikle, aynı kökene sahip su örneklerinin iyon dağılımlarının paralellik göstermesi beklenir. Bu durum, su örneklerinin ortak bir kaynaktan beslendiğini gösterir.

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarına ait suların Schoeller diyagramındaki konumları Şekil 56’da verilmiştir.



Şekil 56. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarına ait suların Schoeller Diyagramı (Schoeller, 1955)’ndaki konumları

Schoeller diyagramına (Şekil 56) göre, genel olarak tüm suların iyonlarının miliekivalan/litre (meq/l) değerlerini birleştiren doğruların birbiriyle çakıştığı veya paralel olarak ilerlediği görülmektedir. Bu durum, incelenen suların aynı kaynaktan beslendiğini ve mevsimsel değişimlerden etkilenmediğini göstermektedir. Ayrıca, incelenen jeotermal sular, soğuk sulara oranla daha yüksek iyon konsantrasyonlarına sahiptir.

4.9.3. Schoeller Sınıflaması

Schoeller (1955), suları klorür, sülfat ve bikarbonat miktarına göre sınıflamış olup, Schoeller sınıflaması Tablo 11’de verilmektedir.

Tablo 11’deki sınıflama dikkate alınarak incelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularının klorür, sülfat ve bikarbonat miktarına göre Schoeller (1955) sınıflaması değerleri Tablo 12’de verilmiştir.

Yapılan değerlendirmelere göre, Yiğitler jeotermal su numuneleri, Schoeller (1955) su sınıflamasına göre “olağan klorürlü su - olağan sülfatlı su - hiperkarbonatlı su” sınıfına girmektedir. Yiğitler (Tekman) soğuk su kaynakları “olağan klorürlü su - olağan sülfatlı su - hipokarbonatlı su” sınıfında yer almaktadır ve yüzey suları ise “olağan klorürlü su - olağan sülfatlı su - olağan karbonatlı su” olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 11. Suların klorür, sülfat ve bikarbonat miktarına göre Schoeller (1955) sınıflaması

Su Sınıflaması	Su Sınıfı	Cl Miktarı (meq/l)
Klorür Sınıflaması	Olağan klorürlü su	<15
	Oligoklorürlü su	15-40
	Orta klorürlü su	40-140
	Klorürce zengin su	140-420
	Kloratalastik su	420-700
	Hiperklorürlü su	700 <
	Su Sınıfı	SO ₄ Miktarı (meq/l)
Sülfat Sınıflaması	Olağan sülfatlı su	< 6
	Oligosülfatlı su	6-24
	Sülfatlı su	24-58
	Hiposülfatlı su	58 <
	HCO ₃ -CO ₃ Miktarı (meq/l)	HCO ₃ -CO ₃ Miktarı (meq/l)
Karbonat-Bikarbonat Sınıflaması	Hipokarbonatlı su	< 2
	Olağan karbonatlı su	2-7
	Hiperkarbonatlı su	7 <

Çimenözü (Çat) jeotermal su numuneleri Schoeller (1955) su sınıflamasına göre “olağan klorürlü su - olağan sülfatlı su - hiperkarbonatlı su” sınıfına girmektedir. Çimenözü (Çat) soğuk su kaynakları “olağan klorürlü su - olağan sülfatlı su - hipokarbonatlı su” sınıfında yer almaktadır ve yüzey suları ise “olağan klorürlü su - olağan sülfatlı su - olağan karbonatlı su” olarak sınıflandırılmıştır.

Yukarıdaki veriler dikkate alındığında, su kaynaklarının kimyasal bileşiminde bölgesel farklılıklar bulunduğunu ve numunelerin genellikle karbonat/bikarbonat açısından zengin olduğunu göstermektedir. Her bir sınıfın özellikleri, bölgedeki jeolojik ve hidrojeolojik koşulları belirtmektedir.

Tablo 12. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularının klorür, sülfat ve bikarbonat miktarına göre Schoeller (1955) sınıflaması değerleri.

Örnek no	HCO ₃	SO ₄	Cl	Cl Sınıfı	SO ₄ Sınıfı	HCO ₃ Sınıfı
YSK-1A	8.97	1.02	0.70	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
YSK-1E	14.46	0.93	0.67	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
YSK-2A	13.50	0.86	0.59	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
YSK-2E	13.59	0.83	0.57	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
YÇ-1A	0.46	0.03	0.02	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hipokarbonatlı su
YÇ-1E	0.45	0.03	0.01	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hipokarbonatlı su
YD-1A	2.51	0.08	0.25	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Olağan karbonatlı su
YD-1E	2.75	0.10	0.03	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Olağan karbonatlı su
ÇSK-1A	12.54	0.61	1.72	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
ÇSK-1E	11.25	0.61	1.62	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
ÇSK-2A	7.42	0.66	1.83	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
ÇSK-2E	12.59	0.61	1.77	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hiperkarbonatlı su
ÇC-1A	0.75	0.03	0.02	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hipokarbonatlı su
ÇC-1E	0.67	0.03	0.01	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Hipokarbonatlı su
ÇD-1A	2.54	0.10	0.26	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Olağan karbonatlı su
ÇD-1E	2.25	0.10	0.25	Olağan klorürlü su	Olağan sülfatlı su	Olağan karbonatlı su

4.9.4. Wilcox Diyagramının Değerlendirilmesi

Çalışma alanındaki su örneklerinin sulama suyu olarak uygunluğunu değerlendirmek amacıyla Wilcox diyagramı (Wilcox, 1955) kullanılmıştır. Bu diyagramda, su örneklerinin sodyum yüzdesi (%Na) ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri kullanılarak sulama suyu kalitesi sınıflaması yapılmıştır. Sodyum yüzdesi, suyun toplam majör katyonları içindeki sodyum iyonunun (Na) oranını ifade eder ve aşağıdaki formül ile hesaplanır:

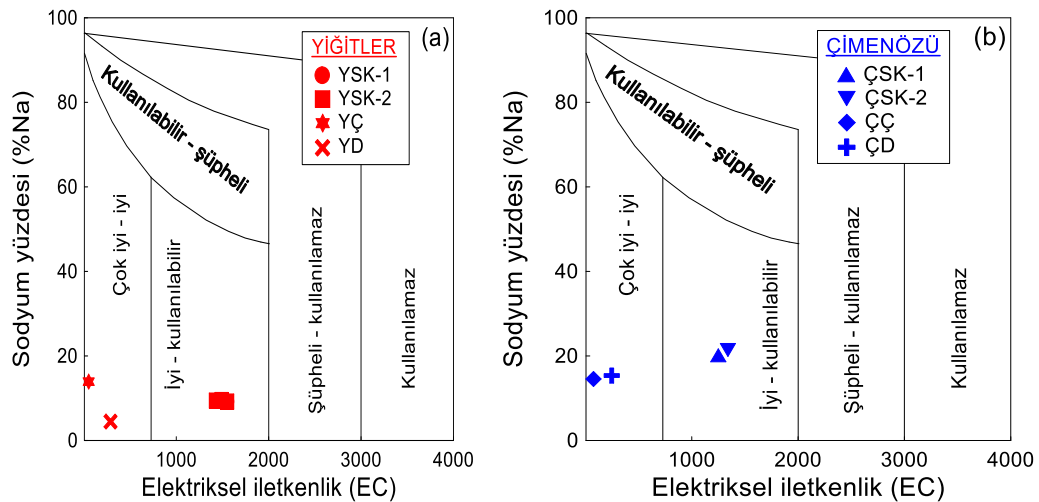
$$\%Na = 100 \times [Na / (Na + K + Ca + Mg)]$$

Formülde, Na, K, Ca ve Mg iyonlarının konsantrasyonları mili eşdeğer (meq/l) cinsinden ifade edilir. Wilcox diyagramı, sulama suyu örneklerini “çok iyi-iyi”, “iyi kullanılabilir”, “şüpheli kullanılabilir”, “şüpheli kullanılamaz” ve “uygun değildir” gibi sınıflara ayırarak, suyun bitki büyümesi üzerindeki potansiyel zararlı etkilerini değerlendirmeye olanak tanır.

Yiğitler ve Çimenözü yörelerinden derlenen su örneklerine ait Wilcox diyagramı Şekil 57’de gösterilmiştir.

Yiğitler (Tekman) yöresindeki jeotermal su kaynakları iyi-kullanılabilir su alanında yer alırken, soğuk su kaynakları ve yüzey suları çok iyi-iyi kullanılabilir su alanında yer alır (Şekil 57).

Çimenözü (Çat) yöresindeki jeotermal su kaynakları iyi-kullanılabilir su alanında, soğuk su kaynakları ve yüzey suları ise çok iyi-iyi kullanılabilir su alanında yer alır (Şekil 57).



Şekil 57. İncelenen sulara ait Wilcox diyagramı (Wilcox, 1955), (a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat)

4.9.5. ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı

Sulama sularının sınıflandırması için kullanılan Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), iyonların meq/l değerleri dikkate alınarak,

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

formülü ile hesaplanmıştır.

Konduktivite (D) değeri ise,

$$D = EC \times (Ca^2 + Mg^2 + Na)$$

formülünden hesaplanır.

Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Sodyum Adsorpsiyon Oranları (SAR) (Şahinci, 1991) Tablo 13’de sunulmuştur.

Tablo 13. Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Sodyum Adsorpsiyon Oranları (SAR) (Şahinci, 1991)

SAR (%)	Suyun Özelliği
< 10	Çok iyi özellikte sulama suları
10-18	İyi özellikte sulama suları
18-26	Orta özellikte sulama suları
> 26	Kötü özellikte sulama suları

Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Genel Tuzluluk Özellikleri Tablo 14’de verilmiştir.

Tablo 14. Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Genel Tuzluluk Özellikleri

Sınıfı	EC değerleri	Kullanılabilir
C1	250 µS/cm’den az	Az tuzlu sular, her türlü toprakta ve tüm bitkilerin sulamasında güvenle kullanılabilir
C2	250-750 µS/cm arası	Orta tuzlu sular, orta akaçlama özelliği olan topraklarda tuzluluk tehlikesi yaratmadan tüm bitkilerin sulanmasına olanak sağlar
C3	750-2250 µS/cm arası	Tuzlu sular, akaçlama sorunu olan arazilerde kullanılmamalı; eğer kullanılması gerekirse tuza dayanıklı bitkiler seçilmelidir
C4	2250 µS/cm’den büyük	Çok tuzlu sular, geçirgenliği ve akaçlaması iyi olan topraklarda, zeminin yıkanmasını sağlamak için bol su kullanılarak ve tuza dayanıklı bitki türleri seçilerek kullanılabilir

Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Genel Sodyum Tehlikesi Özellikleri Tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 15. Genel Sodyum Tehlikesi Özellikleri

Sınıfı	Sodyum değerleri	Özellikleri
S1	Az sodyumlu sular	Tüm topraklarda sodyum tehlikesi yaratmadan kullanılabilir.
S2	Orta sodyumlu sular	Geçirgen ya da bol jips içeren topraklarda kullanılabilir.
S3	Yüksek sodyumlu sular	Birçok toprakta sodyum tehlikesi oluşturabilir.
S4	Çok yüksek sodyumlu sular	Genelde sulama için uygun değildir; ancak tuz içeriği düşük olduğunda dikkatle kullanılabilir.

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularının yukarıdaki formüller dikkate alınarak hesaplanan Konduktivite ve SAR değerleri Tablo 16’da verilmiştir.

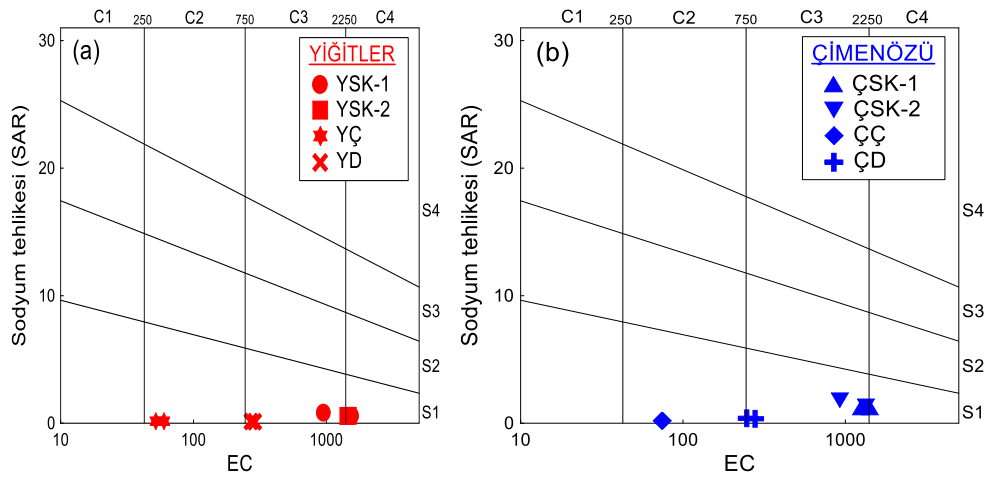
Yiğitler yöresindeki tüm suların SAR değerleri 10’dan küçük (0.12-0.83) olup (Tablo 16), Tablo 13’de yer alan SAR sınıflamasına göre, çok iyi özellikte sulama suları grubunda yer alırlar.

Çimenözü yöresinde tüm suların SAR değerleri 10’dan küçük (0.19-0.81) olup (Tablo 16), Tablo 13’de yer alan SAR sınıflamasına göre, çok iyi özellikte sulama suları grubunda yer alırlar.

Tablo 16. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularının SAR ve Konduktivite (D) değerleri

Ölçülen	Örnek tipi	Kısa ad	%Na	D (konduktivite)	SAR
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-1A	16.31	9762.65	0.83
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-1K	9.21	26973.47	0.58
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-2A	9.56	24096.37	0.58
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-2K	9.43	22473.59	0.56
Yiğitler (Tekman)	Soğuk su	YÇ-1A	12.72	30.51	0.15
Yiğitler (Tekman)	Soğuk su	YÇ-1E	13.91	25.85	0.16
Yiğitler (Tekman)	Yüzey suyu	YD-1A	4.76	741.29	0.12
Yiğitler (Tekman)	Yüzey suyu	YD-1E	4.49	890.67	0.12
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-1A	19.95	20291.52	1.23
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-1K	20.17	17578.09	1.22
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-2A	32.31	9026.91	1.81
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-2K	21.44	19253.49	1.33
Çimenözü (Çat)	Soğuk su	ÇÇ-1A	13.62	58.25	0.19
Çimenözü (Çat)	Soğuk su	ÇÇ-1K	14.56	56.52	0.20
Çimenözü (Çat)	Yüzey suyu	ÇD-1A	13.39	798.84	0.35
Çimenözü (Çat)	Yüzey suyu	ÇD-1K	15.36	648.15	0.39

İnceleme alanındaki sular, SAR ve EC değerleri dikkate alınarak ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramına (Şekil 58) göre değerlendirilmiştir.



Şekil 58. İnceleme alanındaki suların ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı, (a) Tekman, (b) Çat

Diyagramlarda (Şekil 58), yatay eksen EC (tuzluluk), dikey eksen ise SAR (sodyum tehlikesi) değerleri yer almakta ve sular toplamda 16 ayrı sınıfa ayrılmaktadır.

Yiğitler (Tekman) yöresindeki jeotermal su kaynakları C3-S1 sınıfında, soğuk su kaynakları C2-S1 ve yüzey suları da C3-S1 sınıflarında yer almaktadır. SAR değerleri incelendiğinde, Yiğitler yöresi jeotermal su kaynakları sodyum değerleri düşük ve az sodyum tehlikesine (S1) sahip olduğu görülmektedir. Soğuk su kaynakları ve yüzey suları da az sodyum tehlikesine (S1) sahiptir. EC değerlerine göre, Yiğitler yöresi jeotermal su kaynakları ve yüzey suları tuzlu sular (C3), soğuk su kaynakları ise orta tuzlu sular (C2) grubunda yer almaktadırlar.

Çimenözü (Çat) yöresindeki jeotermal su kaynakları ve yüzey suları C3-S1 sınıfında yer almaktadır. Soğuk su kaynakları ise C2-S1 sınıflarında yer almaktadır. SAR değerleri incelendiğinde, tüm suların sodyum değerleri düşük ve az sodyum tehlikesine (S1) sahip olduğu görülmektedir. EC değerlerine göre, jeotermal su kaynakları ve yüzey suları tuzlu sular (C3), soğuk su kaynakları ise orta tuzlu sular (C2) grubunda yer almaktadırlar.

Sonuç olarak, inceleme alanındaki suların sulama amaçlı kullanımının uygunluğu, toprak özelliklerine, akaçlama kapasitesine ve bitki türlerine bağlıdır. C3-S1 özellikteki sular tuza dayanıklı bitkilerle kullanıma uygunken, C2-S1 özellikteki sular daha geniş bir kullanım alanına sahiptir. Toprak geçirgenliği ve akaçlama sistemleri dikkate alınarak gerekli önlemler alındığında bu suların sulama için güvenle kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

4.10. Jeotermometre Uygulamaları

Yeraltı jeotermal sularının ısı kayıplarının başlıca nedenleri arasında, kayaçlarla olan ısı alışverişi, geçirimsiz örtü kayacının inceliği veya bulunmaması ve soğuk sularla karışma sayılabilir. Jeotermal sistemlerde akifer sıcaklığının doğru bir şekilde belirlenmesi, bu kaynakların sürdürülebilir kullanımı için büyük önem taşır. Ancak, akifer sıcaklıklarının doğrudan ölçülmesi genellikle maliyetli ve zaman alıcı bir işlem olduğu için, dolaylı yöntemlere başvurulur. Bu bağlamda, jeotermometreler olarak adlandırılan yöntemler, jeotermal su örneklerinin kimyasal ve izotopik özelliklerini analiz ederek akifer sıcaklığını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Kimyasal jeotermometreler, su örneklerinin kimyasal bileşimindeki sıcaklığa bağlı değişimleri incelerken; izotopik jeotermometreler, su, gaz ve mineral fazları arasındaki izotopik dengeyi temel alır.

Rezervuar sıcaklıklarının tahmini için bu çalışmada yalnızca silis ve katyon kimyasal jeotermometre hesaplamaları yapılmış ve kullanılmıştır.

Kimyasal jeotermometreler, yeraltındaki yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında mineral-su etkileşimleri sonucu oluşan kimyasal denge prensibine dayanır. Bu yöntemlerde, suyun yer yüzüne çıkış sürecinde kimyasal bileşiminin korunduğu varsayımı altında, su örneklerinin kimyasal analizleri kullanılarak rezervuar sıcaklığı tahmin edilir. Kimyasal jeotermometreler, kantitatif ve kalitatif olmak üzere ikiye ayrılır.

Kalitatif jeotermometrelerin büyük bir kısmı, uçucu elementlerin sıcak akışkanlarda ve zeminde rölatif miktarlarına, dağılımlarına ya da zemin gazlarındaki oranlarına dayanmaktadır (Fournier, 1977). Silis (Si), hazne kaya sıcaklığı ile ilgili en iyi bilgiyi vermektedir. Silis (Si) çökelişi, yaklaşık 180 °C sıcaklığa erişen sularda başlamakta, sıcaklığın düşmesiyle birlikte hızlı bir şekilde artmaktadır. Doğal gayzerlerde yüzeyde gözlenen silis çökelleri, hazne kaya sıcaklığının 180 °C veya daha yüksek olabileceğine işaret etmektedir. 150 °C üzerinde bulunan hazne kaya sıcaklığına sahip jeotermal sularda genellikle klorür (Cl) miktarı 150 ppm'den fazla, 200 °C'nin üzerindeki sistemlerde ise 40 ppm'den az bulunmaktadır. Cl (klorür) değeri 50 ppm'in üzerinde ise, bu durum jeotermal su sistemlerinin varlığını göstermektedir. Bor (B), amonyum (NH₄), hidrojen sülfür (H₂S), cıva (Hg), klorür (Cl⁻), sodyum (Na⁺), potasyum (K⁺), lityum (Li), rubidyum (Rb), sezyum (Cs) ve arsenik (As) gibi element ve bileşiklerin bir veya daha fazlasının suda yüksek miktarda bulunmuş olması, hazne kaya sıcaklığının yüksek olabileceğine işaret etmektedir (Şahinci, 1991). Kantitatif kimyasal jeotermometreler çözünürlüğe ve iyon değişimine dayalı olarak geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, çözünürlüğe bağlı jeotermometrelerden silis (Si); iyon değişimine bağlı jeotermometrelerden ise Na/K jeotermometreleri kullanılmıştır.

4.10.1. Çözünürlüğe Dayalı Jeotermometreler

4.10.1.1. Silis Jeotermometreleri

Silis jeotermometreleri, rezervuar sıcaklığının belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir, ancak bu yöntemin etkinliği sıcaklık aralığı ile sınırlıdır. 225 °C'nin altındaki sıcaklıklarda kuvars jeotermometreleri oldukça güvenilir sonuçlar verir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise, jeotermal su yüzeye doğru hareket ederken hızlı silis çökmesi meydana gelir ve bu durum jeotermometre hesaplamalarında belirsizliğe neden olur. Silis jeotermometre denklemleri, rezervuar sıcaklığı ve jeotermal suyun soğuma sürecindeki kimyasal değişimleri dikkate alarak oluşturulur. Çalışmalarda, silis çözünürlüğünün pH 9.5'in üzerindeki değerlerde belirgin şekilde etkilendiği, ancak iyonlaşma gücünün ise silis çözünürlüğü üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir.

Akifer sıcaklıklarının tahmin edilmesi için kullanılan kimyasal jeotermometre hesaplamalarına ait formüller Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. Akifer sıcaklığının tahmininde kullanılan kimyasal jeotermometre formülleri

Uygulanan Jeotermometreler	Bağıntılar	Değinen Belgeler
1 SiO ₂ (Amorf silis)	$t = 731 / (4,52 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier, (1997)
2 SiO ₂ (α Kristobalit)	$t = 1000 / (4,78 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier, (1997)
3 SiO ₂ (β Kristobalit)	$t = 781 / (4,51 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier, (1997)
4 SiO ₂ (Kalsedon)	$t = 1032 / (4,69 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier, (1997)
5 SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t = 1309 / (5,19 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier, (1997)
6 SiO ₂ (Kalsedon, kondaktif soğuma)	$t = 1522 / (5,75 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier, (1997)
7 SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t = 1112 / (4,91 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Amorsson vd., (1983)
8 SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t = 1264 / (5,31 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Amorsson vd., (1983)
9 SiO ₂ (α Kristobalit)	$t = 1021 / (4,69 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Amorsson vd., (1983)
10 SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t = 1164 / (4,9 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Amorsson vd., (1983)
11 SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t = 1498 / (5,7 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Amorsson vd., (1983)

Tablo 17'de yer alan formüller kullanılarak, Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresindeki jeotermal suların sıcaklık değerleri Tablo 18'de verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal suların kimyasal analiz verileri, farklı silis jeotermometre bağıntıları kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 18). Amorf silis ve Beta kristobalit silis bağıntıları (Fournier, 1977) ile hesaplanan hazne kaya sıcaklık (t₁ ve t₃) değerleri, tüm jeotermal su örnekleri için eksi değerler verdiği için dikkate alınmamış ve Tablo 18'de de gösterilmemiştir. Alfa kristobalit silis formülü (Fournier,

1977) kullanılarak hesaplanan hazne kaya sıcaklık (t2) değerleri yüzeyde ölçülen sıcaklık değerlerinden daha düşük olduklarından dikkate alınmamıştır. Kaynak-1 ve Kaynak-2 jeotermal sularının rezervuar (hazne kaya) sıcaklık değerleri, kalsedon silis bağıntısı (Fournier, 1977)'na (t4) göre yapılan hesaplamalarda 59.75-55.02 °C arasında; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Fournier, 1977)'na (t5) göre 90.46-86 °C; kalsedon (kondaktif soğuma) silis bağıntısı (Fournier, 1977)'na (t6) göre 92.71-88.83 °C; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t7) göre 61.78-57.34 °C; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t8) göre 66.63-62.6 °C; alfa kristobalitsilis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t9) göre 56.2-51.52 °C; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t10) göre 78.51-73.83 °C ve kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t11) göre de 91.32-87.41 °C arasındadır (Tablo 18).

Tablo 18. Çalışma alanında yer alan jeotermal sulara ait silis jeotermometre hesaplama sonuçları (Tablo 17'deki formüller kullanılmıştır)

Örnek tipi	Yiğitler (Tekman)		Çimenözü (Çat)	
Su türü	Jeotermal su	Jeotermal su	Jeotermal su	Jeotermal su
Kısa ad	YSK-1K	YSK-2K	ÇSK-1K	ÇSK-2K
t4 (°C)	59.75	55.02	66.14	65.7
t5 (°C)	90.46	86	96.45	96.04
t6 (°C)	92.71	88.83	97.92	97.57
t7 (°C)	61.78	57.34	67.78	67.37
t8 (°C)	66.63	62.6	72.05	71.68
t9 (°C)	56.2	51.52	62.52	62.09
t10 (°C)	78.51	73.83	84.82	84.39
t11 (°C)	91.32	87.41	96.58	96.22

Çimenözü (Çat) bölgesinde yer alan jeotermal suların kimyasal analiz verileri, farklı silis jeotermometre bağıntıları kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 18). Amorf silis ve Beta kristobalit bağıntıları (Fournier, 1977) ile hesaplanan hazne kaya sıcaklık (t1 ve t3) değerleri tüm jeotermal su örnekleri için eksi değerler verdiği için; Alfa kristobalit silis bağıntısı (Fournier, 1977) ile hesaplanan hazne kaya sıcaklık (t2) değerleri ise yüzeyde ölçülen sıcaklık değerlerinden düşük olduklarından dikkate alınmamış ve Tablo 18'de gösterilmemiştir. Kaynak-1 ve Kaynak-2 jeotermal sularının rezervuar (hazne kaya) sıcaklık değerleri, kalsedon silis bağıntısı (Fournier, 1977)'na (t4) göre yapılan hesaplamalarda 66.14-65.7 °C arasında; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Fournier, 1977)'na (t5) göre 96.45-96.04 °C; kalsedon (kondaktif soğuma) silis bağıntısı (Fournier, 1977)'na (t6) göre 97.92-97.57 °C; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t7) göre 67.78-67.37 °C; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t8) göre 72.05-71.68 °C; alfa kristobalitsilis bağıntısı

(Arnorsson vd. 1983)'na (t₉) göre 62.52-62.09 °C; kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t₁₀) göre 84.82-84.39 °C ve kuvars buhar kaybı silis bağıntısı (Arnorsson vd. 1983)'na (t₁₁) göre de 96.58-96.22 °C arasındadır (Tablo 18).

Tüm değerler dikkate alındığında, Yiğitler (Tekman) yöresindeki jeotermal suların rezervuar sıcaklıkları 51.5-91.3 °C arasında; Çimenözü (Çat) yöresindeki jeotermal suların rezervuar sıcaklıkları da 62.1-97.9 °C arasında değişmektedir (Tablo 18).

4.10.1.2. İyon Değişimine Bağlı Jeotermometreler

Jeotermal sistemlerde, su ile mineral arasındaki iyon değişim reaksiyonları sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu sıcaklık bağımlılığı, mineral-su dengesini etkileyerek çözeltilerdeki iyon oranlarında değişikliklere neden olur. Bu prensipten yola çıkarak, farklı sıcaklıklarda mineral-su denge koşullarını inceleyen çeşitli jeotermometreler geliştirilmiştir (Gemici, 1999). Bu jeotermometreler, su örneklerindeki iyon oranlarını analiz ederek, suyun kaynağındaki rezervuar sıcaklığını tahmin etmeyi amaçlar.

4.10.1.3. Na/K Jeotermometreleri

Na/K jeotermometreleri, jeotermal suların rezervuar sıcaklığını tahmin etmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu yöntemin doğru sonuçlar vermesi için belirli koşulların sağlanması gerekmektedir. Su örneklerinin pH değeri nötre yakın veya hafif alkali olmalı, karbonat çökmesi olmamalı, Ca/Na oranı düşük olmalı ve $\log(\sqrt{\text{Ca/Na}})$ değeri 0.5 mg/l'den az olmalıdır. Özellikle yüksek Ca iyon içeriğine sahip sularda Na/K jeotermometreleri, rezervuar sıcaklığını olduğundan yüksek gösterebilir. Bu durum, Na ve K iyonlarının iyon değişim reaksiyonlarında kireçtaşları gibi karbonatlı minerallerle etkileşime girerek, jeotermometre hesaplamalarını etkilemesinden kaynaklanır. Bu sorunu aşmak için Fournier ve Truesdell (1973, 1974) tarafından geliştirilen bir koreksiyon faktörü içeren bir bağıntı önerilmiştir:

$$t (^{\circ}\text{C}) = [1647 / (\log (\text{Na/K}) + \beta \log (\sqrt{\text{Ca/Na}}) + 2.249) - 273.15]$$

Bu bağıntıda yer alan β katsayısı, $\log(\sqrt{\text{Ca/Na}})$ değerinin işaretine göre belirlenmektedir. Eğer bu değer negatif ise $\beta=1/3$, pozitif ise $\beta=4/3$ olarak alınmaktadır. Ancak, $\beta=4/3$ kullanılarak hesaplanan hazne kaya sıcaklığı 100°C'nin üzerinde bir değer veriyorsa, bu durumun fiziksel olarak mümkün olmaması nedeniyle $\beta=1/3$ alınarak

hesaplama tekrar yapılmaktadır. Eğer hesaplanan sıcaklık 100 °C'nin altında ise, başlangıçta kabul edilen $\beta=4/3$ değeri ile hesaplama geçerli sayılmaktadır (Şahinci, 1991).

Çalışma alanında yer alan jeotermal sulara ait hesaplanan $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}})$ değerleri Tablo 19'da verilmiştir. İnceleme alanındaki jeotermal suların pH değerleri nötre yakın olup, $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}})$ değerleri -0,22 ile 1,12 arasındadır (Tablo 19).

Yapılan hesaplamalarda bulunan hazne kaya sıcaklıkları çok yüksek olduğundan, Na/K jeotermometresi bu çalışmada dikkate alınmamıştır.

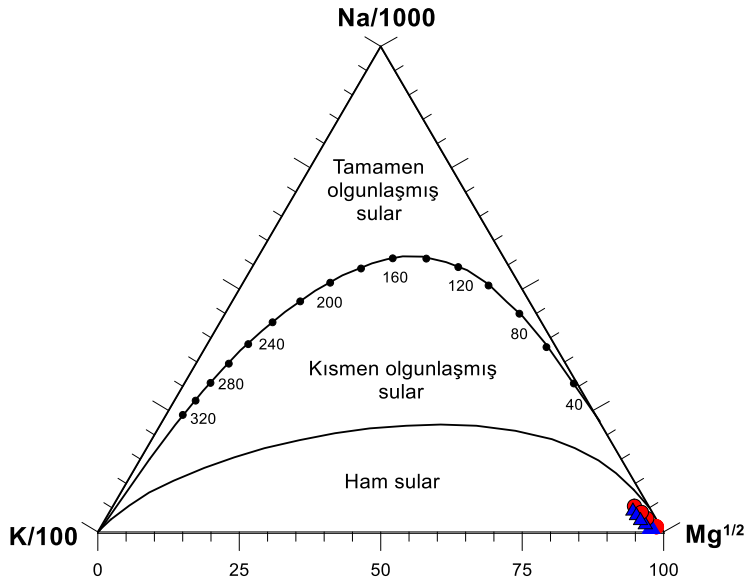
Jeotermal sistemlerin sıcaklık karakteristiklerinin ve suların kayalarla etkileşiminin daha iyi anlaşılması için Giggenbach (1991) tarafından geliştirilen Na-K-Mg birleşik jeotermometresi önemli bir araçtır. Bu yöntem, sodyum (Na), potasyum (K) ve magnezyum (Mg) iyonlarının termal sulardaki konsantrasyonları arasındaki ilişkileri değerlendirerek, hem diğer katyon jeotermometrelerinin sonuçlarının doğrulanmasına olanak tanır hem de hazne kaya sıcaklıklarının hızlı bir şekilde tahmin edilmesine imkân verir.

Tablo 19. Çalışma alanında yer alan jeotermal suların $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}})$ değerleri

Ölçülen	Örnek tipi	Kısa ad	Ph	$\log \sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}$
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-1A	8.33	0.25
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-1K	8.33	0.81
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-2A	7.03	0.79
Yiğitler (Tekman)	Jeotermal su	YSK-2K	7.03	0.80
Yiğitler (Tekman)	Soğuk su	TYÇ-1A	8.62	0.68
Yiğitler (Tekman)	Soğuk su	TYÇ-1E	8.59	0.64
Yiğitler (Tekman)	Yüzey suyu	TYD-1A	8.61	1.08
Yiğitler (Tekman)	Yüzey suyu	TYD-1E	8.6	1.12
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-1A	8.2	0.38
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-1K	8.19	0.38
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-2A	8.68	-0.22
Çimenözü (Çat)	Jeotermal su	ÇSK-2K	8.69	0.34
Çimenözü (Çat)	Soğuk su	ÇÇ-1A	7.85	0.65
Çimenözü (Çat)	Soğuk su	ÇÇ-1K	7.84	0.62
Çimenözü (Çat)	Yüzey suyu	ÇD-1A	7.65	0.60
Çimenözü (Çat)	Yüzey suyu	ÇD-1K	7.66	0.51

İnceleme alanındaki sulara ait Giggenbach diyagramı (Giggenbach, 1991) Şekil 59'da verilmiştir.

Giggenbach diyagramı dikkate alındığında (Şekil 59), inceleme alanındaki termal suların olgunlaşmamış (ham) su kategorisinde yer aldığı görülür. Bu durum, suların kayalarla yeterince etkileşime girmediğini ve kimyasal dengeye ulaşmadığını işaret eder. Bu nedenle, Na/K jeotermometresi gibi kimyasal dengeye dayanan yöntemler, bu sulara rezervuar sıcaklığının tahmininde güvenilir sonuçlar vermeyebilir. Dolayısıyla, bu çalışmada Na/K jeotermometreleri kullanılmamıştır.



Şekil 59. Çalışma alanındaki sulara ait Giggenbach diyagramı (Giggenbach, 1991)

4.10.1.4. Karışım Modelleri

Jeotermal sistemlerde, sıcak akışkanlar yüzeye doğru hareket ederken soğuk yeraltı suları ile karışabilir. Bu karışımın varlığı, farklı kaynaklardaki su örneklerinin sıcaklıkları ve klorür (Cl), bor (B), sodyum (Na), potasyum (K) gibi iyonların konsantrasyonları ile bu iyonların birbirlerine oranları (Cl/B, Cl/As, Cl/Cs, Cl/F, Cl/(HCO₃+CO₃), Na/K) arasındaki önemli farklılıklar ile belirlenebilir (Şahinci, 1991).

Fournier ve Truesdell (1974) tarafından geliştirilen modeller, sıcak-soğuk su karışımından yararlanarak hazne kaya sıcaklıklarının belirlenmesinde önemli bir araç olmuştur. Bu modeller, karışımın derinlerde mi yoksa yüzeyde mi gerçekleştiği ve karışım öncesi buhar kaybı olup olmadığı gibi farklı senaryoları değerlendirerek, hazne kaya sıcaklığına dair bir aralık sunar. Genellikle, karışımın derinlerde gerçekleştiği ve buhar kaybı olmadığı varsayımıyla yapılan hesaplamalar en yüksek; karışımın yüzeyde gerçekleştiği ve buhar kaybı olduğu varsayımıyla yapılan hesaplamalar ise en düşük hazne kaya sıcaklıklarını vermektedir. Jeotermal sistemlerin daha iyi anlaşılması için, farklı karışım modelleri geliştirilerek sıcaklık ve karışım oranları daha kesin bir şekilde belirlenmeye çalışılmaktadır (Şahinci, 1991).

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) bölgelerindeki jeotermal sistemlerin karakteristiklerini daha iyi anlamak amacıyla, bu çalışmada silis-entalpi ve entalpi-klor diyagramları kullanılarak hazne kaya sıcaklıkları ve soğuk su karışımı oranları belirlenmiştir (Şekil 60, 61 ve 62, Tablo 20).

Silis-entalpi karışım modeli, karışım öncesi ve sonrası sistemdeki buhar kaybı ve ısı kaybı gibi farklı senaryoları değerlendirerek, akifer sıcaklığına dair tahminler sunar.

Bu modelin temel varsayımları arasında; karışım sonrası sıcaklık kaybının olmaması, kuvarsın çözünürlüğünün sistemdeki silis içeriğini kontrol etmesi ve karışım sonrası silis çökme veya çözünme olayının gerçekleşmemesi sayılabilir. Özellikle derinlerde bulunan jeotermal akışkanların kuvarsa doymun olması nedeniyle ikinci varsayım genellikle geçerlidir. Ancak, çok yüksek sıcaklıklı sistemlerde kuvarsın hızlı çökmesi nedeniyle üçüncü varsayım her zaman geçerli olmayabilir ve bu durum, elde edilen sonuçlarda belirli ölçüde hatalara neden olabilir (Nicholson, 1993).

Fournier (1977b) tarafından geliştirilen Entalpi-Silis karışım modeli, jeotermal sistemlerde hazne kaya sıcaklıkları ve sıcaklık-buhar kayıpları gibi önemli parametrelerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Bu modelde, diyagramın düşey ekseninde suda çözünmüş silika (Si) miktarı (mg/l), yatay ekseninde ise suyun entalpi değeri (cal/g) yer alır. Diyagram üzerinde, kuvars minerali ile su arasındaki dengeyi gösteren bir "kuvars çözünürlüğü" eğrisi, sistemdeki maksimum buhar kaybını temsil eden bir "azami buhar kaybı" eğrisi ve entalpi değeri 100 cal/g olan sabit bir doğru çizilir. Bu çizgilerin kesişimleri ve su örneklerinin diyagram üzerindeki konumları, hazne kaya sıcaklığı ve sistemdeki buhar kaybı hakkında önemli bilgiler sağlar.

Karışım modellerinde kullanılmak üzere Yiğitözü (Tekman) ve Çimenözü (Çat) su örneklerinin sıcaklık değerleri, bilgisayar programı yardımıyla entalpi (cal/g) değerlerine dönüştürülmüş ve Tablo 20’de sunulmuştur.

Tablo 20. İnceleme alanında bulunan suların sıcaklık ve hesaplanan entalpi değerleri

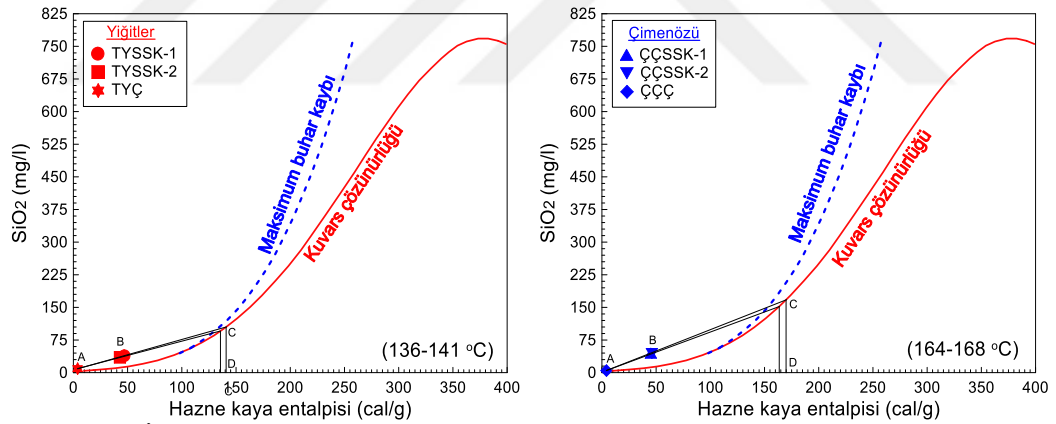
	Kaynak	Kısa ad	Ölçüm Ayı	Sıcaklık (°C)	Entalpi (cal/gr)
Yiğitler	Jeotermal Kaynak 1	YSK-1A	Ağustos	48.8	48.79
	Jeotermal Kaynak 1	YSK -1K	Kasım	47	46.99
	Jeotermal Kaynak 2	YSK-2A	Ağustos	44.5	44.5
	Jeotermal Kaynak 2	YSK -2K	Kasım	42.9	42.91
	Soğuk (Çeşme) su	YÇ-1A	Ağustos	10.9	10.93
	Soğuk (Çeşme) su	YÇ-1K	Kasım	4	4.02
Çimenözü	Jeotermal Kaynak 1	ÇSK-1A	Ağustos	52.1	52.08
	Jeotermal Kaynak 1	ÇSK -1K	Kasım	45.1	45.10
	Jeotermal Kaynak 2	ÇSK-2A	Ağustos	54	53.98
	Jeotermal Kaynak 2	ÇSK -2K	Kasım	46.1	46.10
	Soğuk (Çeşme) su	ÇÇ-1A	Ağustos	10.2	10.23
	Soğuk (Çeşme) su	ÇÇ-1K	Kasım	4.2	4.21

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) bölgelerindeki jeotermal suların karakterizasyonu amacıyla kullanılan silis-entalpi karışım modeli Şekil 60’da sunulmuştur. Bu modelde, bölgedeki soğuk suların silis (Si) ve entalpi değerleri, diyagram üzerinde A noktası olarak işaretlenir. Çalışma alanındaki jeotermal suların silis değerleri ve ölçülen sıcaklıklarına karşılık gelen noktalar (B noktası) ise, A noktası

ile birleştirilerek kuvars çözünürlük eğrisine kadar uzatılır ve kestirilir (C noktası). Bu sayede, C noktasında kesişen doğru, karışım öncesi sıcak ve mineralli suyun entalpi ve silis değerlerini verir. Eğer jeotermal su doğruları kuvars çözünürlük eğrisini kesmezse, 100 cal/g sabit doğrusu ile kesiştikleri noktadan yatay bir çizgi çizilerek kuvars çözünürlük eğrisi ile kesişimi bulunur. Bu kesişim noktası (C), dik olarak aşağıya doğru takip edilerek hazne kaya sıcaklığına ulaşılır (D noktası). Ayrıca, jeotermal suların soğuk sularla olan karışım oranlarını belirlemek için, karışım çizgisi üzerinde yer alan AB ve AC doğru parçalarının birbirlerine oranları kullanılır (Tarcan, 2002).

Entalpi-silis karışım modeli diyagramı (Şekil 60a) üzerinde Yiğitler (Tekman) jeotermal sularına ait en yüksek rezervuar kayaç sıcaklığı 141 °C ve en düşük 136 °C olarak belirlenmiştir. Aynı modelde saptanan sıcak karışım oranı (%) 46.27-32.5 arasında değişmektedir.

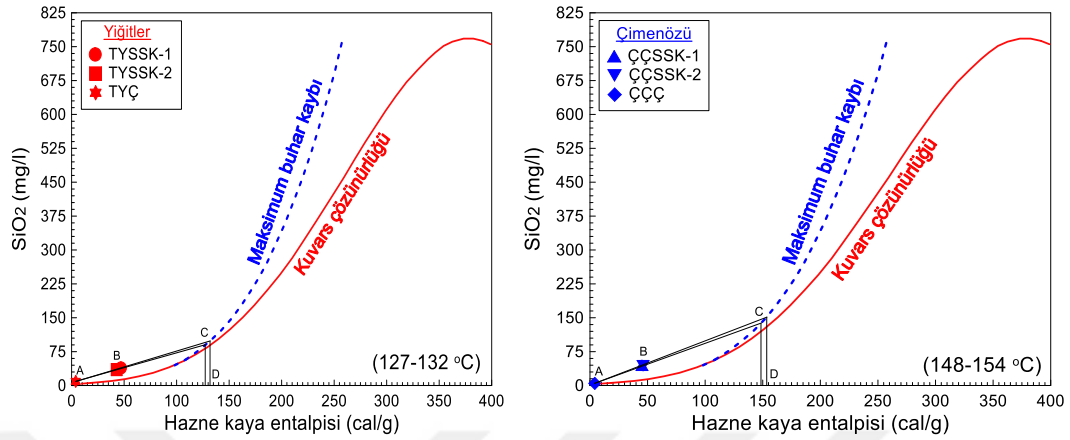
Entalpi-silis karışım modeli diyagramı (Şekil 60b) üzerinde Çimenözü (Çat) jeotermal sularına ait en yüksek rezervuar kayaç sıcaklığı 168 °C ve en düşük sıcaklık değeri 164 °C olarak saptanmıştır. Aynı modelde saptanan sıcak karışım oranı (%) 25.5-26.6 arasında değişmektedir.



Şekil 60. İnceleme alanındaki jeotermal suların entalpi-silis diyagramı, (a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat)

Silis-entalpi diyagramında (Şekil 61), buhar kaybı durumunu incelemek için bölgedeki soğuk suların silis (Si) ve entalpi değerleri, diyagram üzerinde A noktası olarak işaretlenir. Çalışma alanındaki jeotermal suların silis değerleri ve ölçülen sıcaklıklarına karşılık gelen noktalar (B noktası) ise, A noktası ile birleştirilerek maksimum buhar kaybı eğrisine kadar uzatılır ve kestirilir (C noktası). C noktasının düşey ekseni üzerindeki izdüşümü, karışım öncesi akiferin sıcaklığını, yatay ekseni üzerindeki izdüşümü ise akışkanın başlangıçtaki silis içeriğini temsil eder. Bu yöntem, özellikle buhar kaybının olduğu durumlarda, daha doğru hazne sıcaklığı tahminleri

yapmamıza olanak sağlar. Karışım çizgisi üzerinde yer alan AB ve AC doğru parçalarının analiziyle, sıcak ve soğuk suların karışım oranları belirlenebilir (Tarcan, 2002).



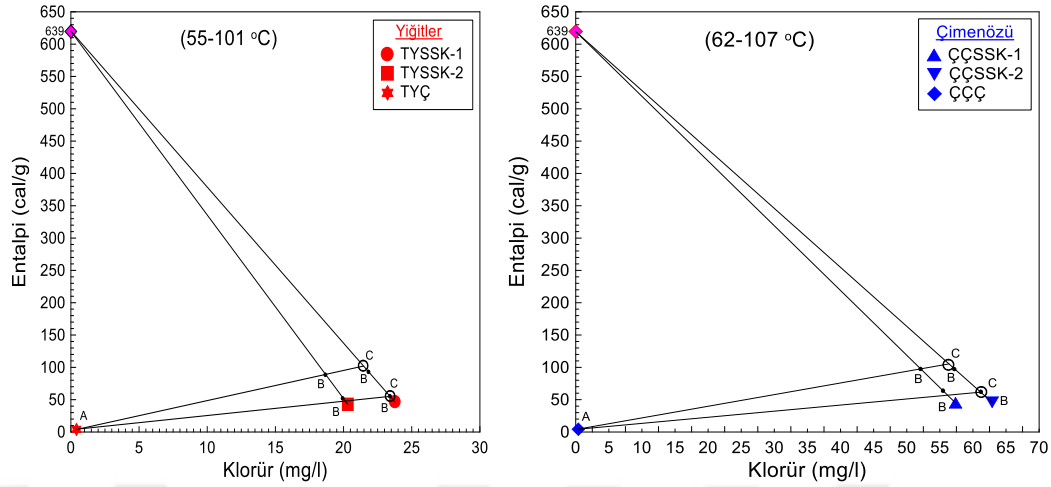
Şekil 61. Çalışma alanındaki jeotermal suların entalpi-silis diyagramı, a) Yiğitler (Tekman), b) Çimenözü (Çat)

Entalpi-silis karışım modeli diyagramı üzerinde maksimum buhar kaybı dikkate alındığında (Şekil 61), Tekman jeotermal sularına ait en yüksek rezervuar kayaç sıcaklığı 132 °C ve en düşük 127 °C olarak saptanmıştır. Aynı modelde saptanan sıcak karışım oranı (%) 27.7-31.6 arasında değişmektedir.

Entalpi-silis karışım modeli diyagramı (Şekil 61) üzerinde maksimum buhar kaybı dikkate alındığında, Çat jeotermal sularına ait en yüksek rezervuar kayaç sıcaklığı 154°C ve en düşük sıcaklık değeri 148 °C olarak belirlenmiştir. Aynı modelde saptanan sıcak karışım oranı (%) 30.5-34.2 arasında değişmektedir.

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal alanlarındaki jeotermal suların karakterizasyonu için entalpi-klorür diyagramı (Şekil 62) kullanılmıştır. Diyagramın düşey ekseninde suyun entalpi değeri (cal/g veya kJ/kg), yatay ekseninde ise klorür iyonu konsantrasyonu (mg/l) yer alır. Suyun buharlaşma entalpisi (639 cal/g; 2775 kJ/kg) diyagram üzerinde buhar noktası olarak belirlenir. Her bir jeotermal su numunesinin entalpi ve klorür değerleri diyagram üzerinde işaretlenerek bu noktalar buhar noktası (639) ile birleştirilir. Elde edilen doğru üzerinde, her bir jeotermal su numunesinin kuvars-buhar kaybı jeotermometresi ile hesaplanan hazne sıcaklıkları (B noktası) işaretlenir. B noktası, inceleme alanındaki soğuk suların ortalama değerini gösteren A noktası ile birleştirilerek karışım çizgisi oluşturulur. Bu karışım çizgisi uzatılarak en yüksek klorür değerine sahip numunenin doğrusu ile kesiştirilir (C noktası). Bu doğru üzerinde elde edilen en yüksek ve en düşük değerler, sırasıyla jeotermal sistemin olası maksimum ve minimum hazne sıcaklığını verir. Ayrıca, karışım

çizgisi üzerindeki AB ve AC doğru parçalarının birbirlerine oranları kullanılarak, jeotermal suların soğuk sularla olan karışım oranları belirlenir (Tarcan, 2002).



Şekil 62. Çalışma alanındaki jeotermal suların entalpi klorür diyagramı, a) Yiğitler (Tekman), b) Çimenözü (Çat)

Entalpi-klorür karışım modeli diyagramı (Şekil 62) üzerinde Yiğitler (Tekman) jeotermal sularına ait en yüksek rezervuar kayaç sıcaklığı 101 °C ve en düşük sıcaklık değeri 55 °C olarak saptanmıştır. Aynı modelde saptanan sıcak karışım oranı (%) 42.3-77.09 arasında değişmektedir.

Aynı diyagramda (Şekil 62) Çimenözü (Çat) jeotermal sularına ait en yüksek rezervuar kayaç sıcaklığı 107 °C ve en düşük sıcaklık değeri 62 °C olarak belirlenmiştir. Aynı modelde saptanan sıcak karışım oranı (%) 48.4-82.8 arasında değişmektedir.

4.11. Çevresel İzotop Hidrolojisi

Jeotermal sistemlerin daha iyi anlaşılması için izotop teknikleri, sunduğu benzersiz avantajlar sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Radyoaktif trityum (^3H) ve karbon-13 (^{13}C) izotopları, yeraltı sularının yaş tayininde kullanılırken; kararlı oksijen-18 (^{18}O) ve döteryum (^2H) izotopları, suyun kökeni, akış yolları ve sıcaklık gibi hidrolojik parametrelerin belirlenmesinde etkin bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada duraylı izotoplardan trityum (^3H) analizleri yapılmış ve suların bağlı yaş ve geçiş süreleri belirlenmiştir. Çalışma bölgesindeki jeotermal suların izotop analizleri Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanındaki kaynak sularını kapsamaktadır (Tablo 21).

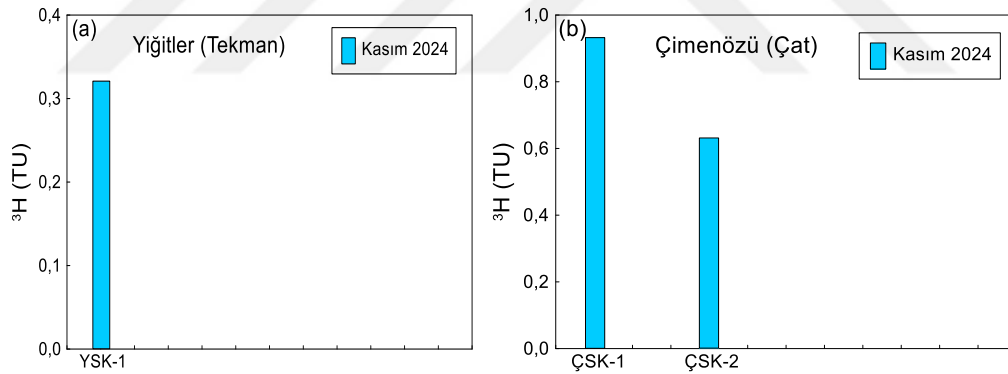
Yiğitler (Tekman) bölgesindeki $\delta^3\text{H}$ (trityum) izotop değerleri Kaynak-1 için Ağustos ayı ölçümlerinde 0.32 değeri bulunmuş, Kasım ayı ölçümünde ise değerin analiz limitlerinin altında ($<\text{MDA}=0,27$) kaldığı tesbit edilmiştir (Tablo 21). Kaynak-

2'nin her iki ay için yapılan ölçümlerinde değerler analiz limitlerinin altında ($<MDA=0,27$ ve $<MDA=0,28$) bulunmuştur (Tablo 21).

Tablo 21. Çalışma alanında bulunan jeotermal sulara ait trityum (3H) izotop verileri.

Lokasyon	Tür	3H (Trityum)	Belirsizlik ($\pm$)
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	0.32	0.30
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	$< MDA = 0.27$	-
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	$< MDA = 0.28$	-
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	$< MDA = 0.27$	-
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	0.93	0.34
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	$< MDA = 0.28$	-
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	0.63	0.34
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	$< MDA = 0.27$	-

Çimenözü (Çat) bölgesine ait sulara δ^3H izotop değerleri Ağustos ayı ölçümlerinde kaynak 1'de 0,63 ve kaynak 2'de 0,93 olarak bulunmuş, Kasım ayı ölçümlerinde ise hem kaynak 1 ve hem de kaynak 2'de değerleri analiz limitlerinin altında ($<MDA=0,28$ ve $<MDA=0,27$) kalmıştır (Tablo 21). Tablo 21'de belirtildiği gibi, Çimenözü (Çat) yöresindeki sular, Yiğitler (Tekman) yöresindeki sulara nazaran biraz daha yüksek 3H izotop değerlerine sahiptir.



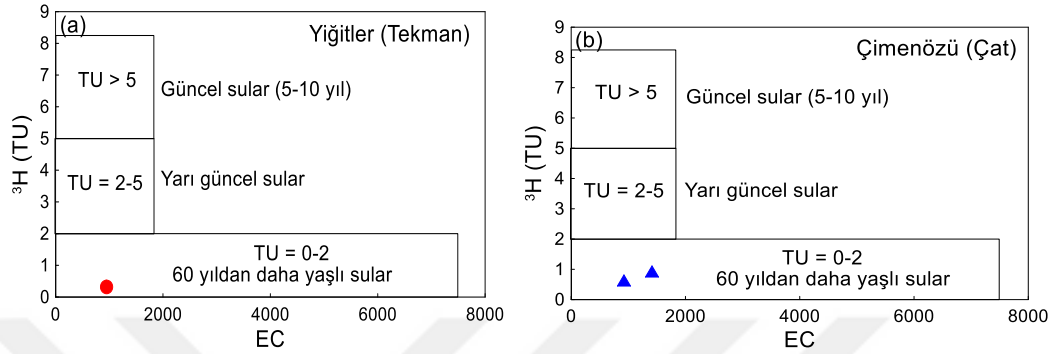
Şekil 63. Çalışma alanında bulunan suların 3H değerleri, a) Yiğitler (Tekman), (b) Çimenözü (Çat)

Trityum (3H) analiz sonuçlarına göre, yer altı suları 3 grupta toplanır (Şekil 64). 1. gruptaki sulara trityum değeri 5'den büyük ($TU>5$) olup, bu sular genç yağışlardan oluşan 5-10 yıllık güncel sulardır. 2. grup suların trityum değerleri 0-2 arasında değişmektedir ve bu sular “nükleer denemeler” öncesi (1952 öncesi) yağışlardan beslenen 60 yıldan daha yaşlı sulardır. Üçüncü grubu oluşturan sular ise trityum değerleri 2-5 içeriği ile “nükleer denemeler” öncesindeki (1952) yağış suları ile “nükleer denemeler” sonrası yağış sularından etkilenmiş yarı güncel sulardır.

Yiğitler alanındaki jeotermal suların 3H değerleri 0.32, EC değerleri 950-1550 arasında olup, ikinci grupta yer alan 60 yıldan daha yaşlı sular gurubunda yer

almaktadır (Şekil 64).

Çimenözü alanındaki jeotermal sulardan Kaynak-1 ve Kaynak-2 sularının $\delta^3\text{H}$ değerleri 0.63-0.93, EC değerleri 925-1415 arasındadır. Çimenözü yöresindeki tüm jeotermal sular ikinci grupta yer alan 60 yıldan daha yaşlı sular gurubunda yer almaktadır (Şekil 64).

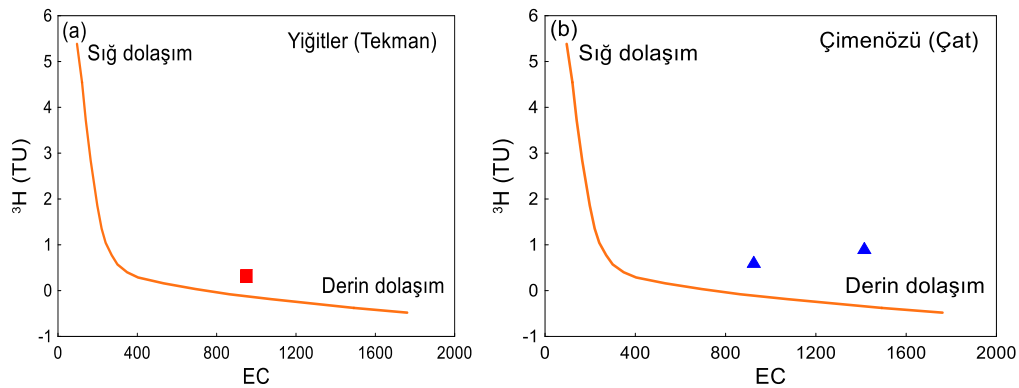


Şekil 64. Çalışma alanında bulunan suların EC- ^3H diyagramı

4.11.1. Trityum-EC İlişkisi

Trityum (^3H) izotopu, radyoaktif bozunma süresi sayesinde yeraltı sularının rezidans sürelerinin belirlenmesinde oldukça değerli bir araçtır. Yeraltında belirli bir süre kalan trityum, radyoaktif bozunmaya uğrar ve bu bozunma oranı, suyun sistemde kaldığı süreyi yansıtır. Dolayısıyla, trityum izotopu konsantrasyonları, yeraltı sularının yaşı ve akiferlerdeki dolaşım süreleri hakkında önemli bilgiler sağlar (Mazor, 2004). Benzer şekilde, elektriksel iletkenlik (EC) değeri de yeraltı sularının rezidans süresi ile pozitif bir korelasyon gösterir. Yani, yeraltı suyu bir akiferde ne kadar uzun süre kalırsa, EC değeri o kadar artar.

Yığıtler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki jeotermal sular düşük ^3H ve orta-yüksek EC değerlerine sahiptir (Şekil 65).



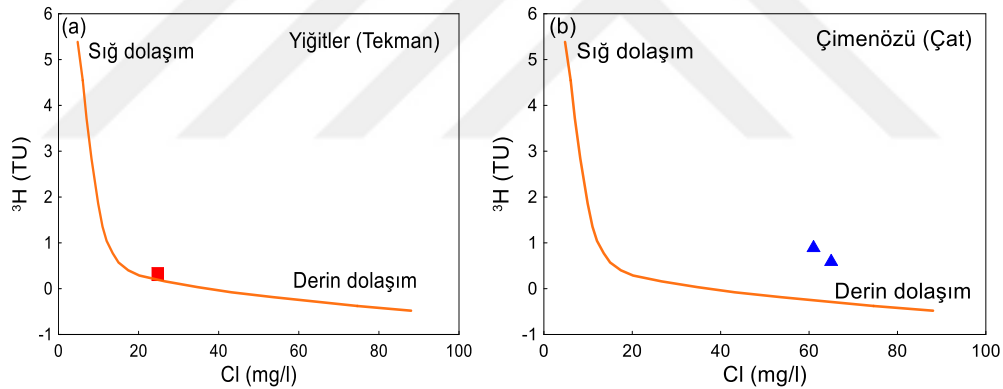
Şekil 65. Çalışma alanında bulunan suların ^3H ve EC ilişkisi

4.11.2. Trityum – Klorür (Cl) İlişkisi

Trityum (^3H) izotopu ve klorür iyonu konsantrasyonları arasındaki ilişki, yeraltı sularının dolaşım derinliğini belirlemek için sıkça kullanılan bir hidrojeokimyasal yöntemdir (Çelmen ve Çelik, 2009; Ravikumar ve Somashekar, 2011). Genellikle jeotermal suların düşük trityum, yüksek klorür ve elektriksel iletkenlik (EC) değerlerine sahip olması, bu suların daha derin akiferlerde uzun süredir dolaşımında olduğunu ve bu süreçte kayalarla etkileşim sonucu mineralizasyonun arttığını gösterir. Buna karşın, soğuk suların yüksek trityum ve düşük klorür-EC değerleri, sıg seviyelerde dolaşım gösterdiklerini ve güncel yağışlarla daha yakın ilişkili olduklarını ifade eder. Jeotermal suların trityum içermemesi veya çok düşük trityum değerleri göstermesi, bu suların akiferde kalış sürelerinin uzun olduğunu ve atmosferik yağışların etkilerinden uzaklaştığını gösterir.

Bu durum, jeotermal suların jeotermal sistemlerin derin kısımlarından geldiğini destekler.

Çalışma alanında bulunan suların ^3H ve Cl ilişkisi Şekil 66’da verilmiştir.



Şekil 66. Çalışma alanında bulunan suların ^3H ve Cl ilişkisi

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki jeotermal sular düşük ^3H ve orta Cl değerlerine sahip olup (Şekil 66), bu durum suların derin dolaşımında olduğunu ifade eder.

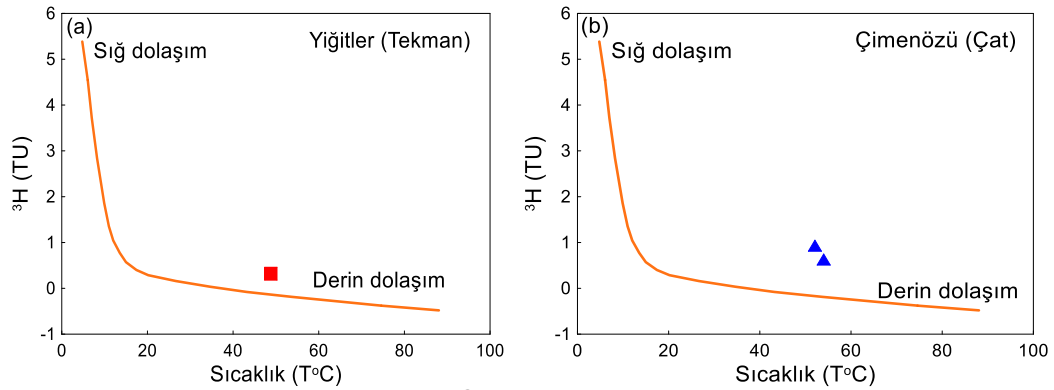
4.11.3. Trityum - Sıcaklık İlişkisi

İnceleme alanına ait suların ^3H ve sıcaklık ilişkileri Şekil 67’de verilmiştir.

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki jeotermal sular düşük ^3H ve orta-yüksek sıcaklık değerlerine sahiptir (Şekil 67).

Her iki alandaki jeotermal sularının sıcaklık değerleri birbirine yakın olsa da Çimenözü (Çat) yöresindeki jeotermal suların daha yüksek trityum değerlerine sahip

olması, bu suların yeraltında kalış süresinin daha kısa süre dolaşımında olduğunu gösterir.



4.12. Radyoaktivite

Radyoaktivite, atom çekirdeğinin kararlı hale gelme çabasıyla gerçekleşen bir doğal süreçtir. Çekirdekdeki nötron sayısının fazla olması, kararsızlığı tetikler ve bu durum çekirdeğin parçalanmasına yol açar. Bu parçalanma sırasında alfa (α), beta (β) ve gama (γ) gibi iyonlaştırıcı ışınlar yayılır. Alfa parçacıkları, helyum çekirdeği ile aynı olan büyük ve ağır parçacıklardır. Bu nedenle madde içine penetrasyonları zayıftır. Beta parçacıkları ise elektron veya pozitronlardan oluşur ve alfa parçacıklarına göre daha küçük ve daha hızlıdır. Gama ışınları ise elektromanyetik spektrumun yüksek enerjili bölgesinde yer alan fotonlardan oluşur ve madde içine en derin nüfuz eden radyasyon türüdür. Radyoaktif bozunma olaylarının ölçümünde kullanılan temel birim Becquerel (Bq) olup, bir saniyede gerçekleşen radyoaktif bozunma sayısını ifade eder (Dilaver vd., 2002). Alfa, beta ve gama ışınlarının farklı enerji ve iyonlaştırma özellikleri, radyoaktif maddelerin çevre ve canlılar üzerindeki etkilerini belirleyen önemli faktörlerdir (Şahinci, 1991; Keller, 2005).

4.12.1. Sulardaki Radyoaktivitenin Kaynağı

Yeraltı sularının radyoaktif elementlerle zenginleşmesi, büyük ölçüde geçiş yaptığı kayaçların mineralojik yapısı ve radyoaktif madde içeriği ile ilişkilidir. K^{40} , Rb^{87} , Th^{235} , U^{235} ve U^{238} gibi doğal radyonüklitler, yeraltı sularında yaygın olarak bulunan radyoaktif elementler arasındadır. Özellikle uranyum (U) ve toryum (Th^{235}) gibi elementlerin bozunma ürünleri olan radon (Rn) ve radyum (Ra) gibi radyoaktif gazlar da yeraltı sularında önemli miktarlarda bulunabilir. Metamorfik, granit, tortul (organik madde içeren, kumtaşı, karbonatlı) kayaçlar ve bu kayaçlardaki fay zonları, radyoaktif elementlerin zenginleştiği başlıca jeolojik ortamlardır. Fay zonları,

kayaçların kırılma ve parçalanması sonucu oluşan boşluklar sayesinde radyoaktif elementlerin suya geçişini kolaylaştırır. Magmatik kayaçlar, özellikle granitler, yüksek uranyum ve toryum içerikleri nedeniyle yeraltı sularının radyoaktivitesine önemli katkılar sağlar. Magmatik kayaçlardaki uranyum ve toryum miktarları, magmanın kaynağı ve soğuma koşulları ile yakından ilişkilidir. Asit karakterli magmatik kayaçlar, bazik kayaçlara göre daha yüksek uranyum ve toryum içerirler. Mineralizasyonun yoğun olduğu bölgelerde ise yeraltı sularındaki uranyum konsantrasyonları daha da artabilir (Kaplan, 1978; Hem, 1971; Davis vd., 1966; Kumru vd., 2002; Gültekin ve Dilek, 2005). Kaplıca amaçlı kullanılan jeotermal suların radyoaktivite düzeyleri önemli bir parametre oluşturur.

Bu çalışmada, inceleme alanındaki jeotermal sular ile soğuk kaynak ve yüzey sularının toplam alfa ve beta radyoaktivite düzeyleri belirlenmiştir (Tablo 22, Şekil 68 ve 69).

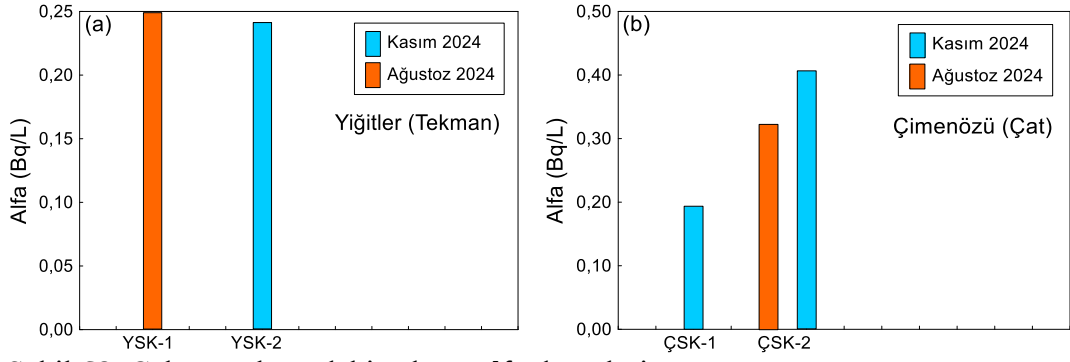
Tablo 22. Çalışma alanından toplanan jeotermal su örneklerinde toplam alfa ve beta radyoaktivite düzeyleri

Lokasyon	Kaynak	Örnek adı	Alfa (Bq/l)	(±)	Beta (Bq/l)	(±)
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	YSK-1A	< 0.137	-	0.336	0.054
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 1	YSK-1K	0.249	0.089	0.444	0.062
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	YSK-2A	< 0.13	-	0.367	0.058
Yiğitler (Tekman)	Kaynak 2	YSK-2K	0.241	0.085	0.418	0.06
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	ÇSK-1A	< 0.123	-	0.426	0.061
Çimenözü (Çat)	Kaynak 1	ÇSK-1K	0.193	0.076	0.557	0.068
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	ÇSK-2A	0.321	0.091	0.723	0.079
Çimenözü (Çat)	Kaynak 2	ÇSK-2K	0.406	0.1	0.682	0.078

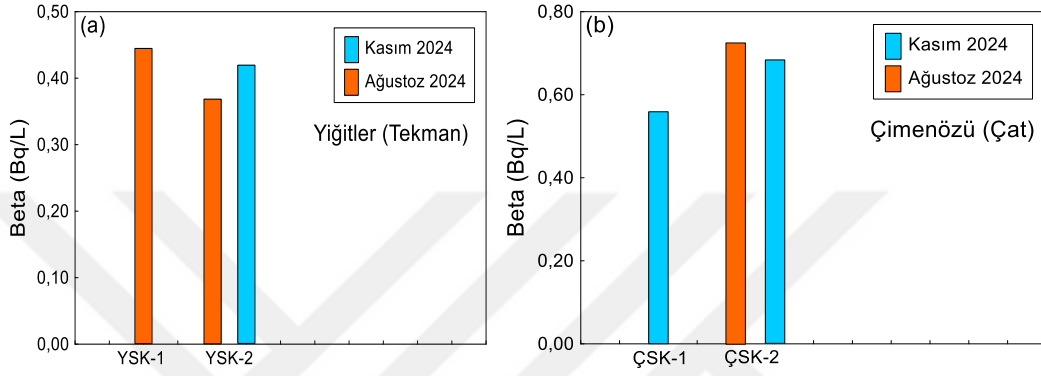
Yiğitler (Tekman) bölgesindeki jeotermal sulardan Kaynak-1'den elde edilen alfa değeri 0.249 Bq/l dir. Beta değerleri ise 0.336 Bq/l ile 0.444 Bq/l arasında değişkenlik göstermektedir (Tablo 22, Şekil 68).

Çimenözü (Çat) bölgesinde jeotermal suların alfa değerleri 0.193 Bq/l ile 0.406 Bq/l arasında, beta konsantrasyonları ise 0.426 Bq/l ile 0.723 Bq/l arasında değişiklik göstermektedir (Tablo 22, Şekil 69).

Elde edilen veriler, jeotermal suların alfa ve beta değerlerinin sıcaklık değişime bağlı olarak yeraltı sularının bu radyoaktif elementler açısından zenginleştiğini göstermektedir.



Şekil 68. Çalışma alanındaki suların alfa değerleri.



Şekil 69. Çalışma alanındaki suların beta değerleri.

4.13. Su-Kayaç Etkileşimi

Jeolojik olarak karmaşık bölgelerdeki yeraltı sularının kimyasal bileşimi, farklı kaynaklı suların karışımı ve kayaçlarla olan etkileşimi sonucu oldukça çeşitlilik gösterir. Derinlik arttıkça suların kimyasal özellikleri de değişir; örneğin, alt kabuk kökenli sular klorürce zenginleşirken, yüzeye yakın sular kalsiyum, sodyum ve bikarbonat iyonları bakımından daha zengindir (Frape vd., 2003). Su-kayaç etkileşimi, yeraltı sularının kimyasal evriminde belirleyici bir rol oynar. Bu sürecin daha iyi anlaşılması için iz elementler ana elementlere ek olarak kullanılabilir. Nadir toprak element (NTE)'lerin kayaçlardaki dağılımı, magmatik, hidrotermal ve düşük sıcaklıklı süreçler tarafından kontrol edilir (Lipin ve McKay, 1989). Yapılan çalışmalar (Banks vd., 1999; Leybourne vd., 2000), yeraltı sularındaki NTE konsantrasyonlarının ana kayaç bileşimi ile ilişkili olduğunu gösterir. Rubidyum (Rb) ve sezyum (Cs) gibi büyük iyon yarıçaplı litofil elementler, potasyum (K) ile benzer kimyasal davranışlar sergiler ve kil minerallerinde adsorpsiyon veya Rb ile birleşme yoluyla fraksiyonlaşmaya uğrayabilirler (Berger vd., 1988; Brouwer vd., 1983; Viellard, 2000). Bu elementlerin davranışları, su-kayaç etkileşim süreçlerinin daha iyi anlaşılmasında önemli bir araçtır.

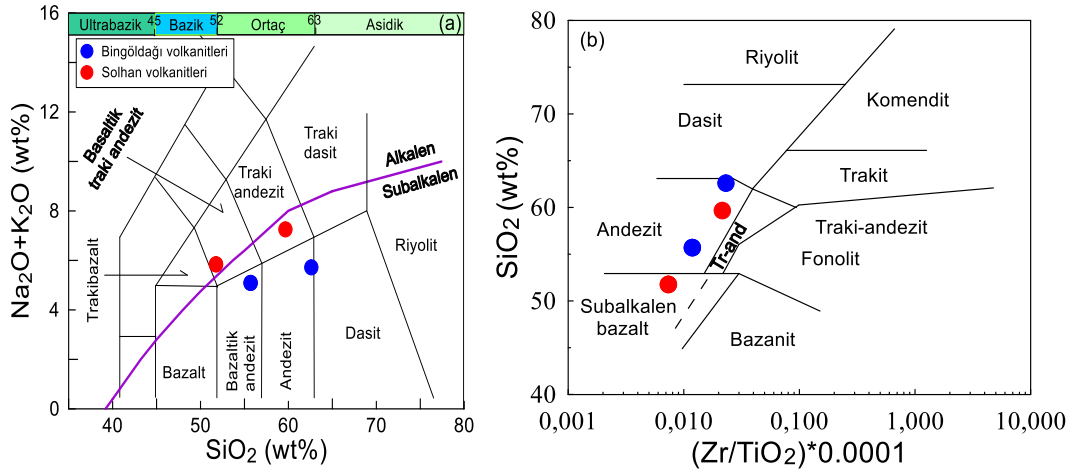
4.13.1. Kayaç Jeokimyası

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal sahası ve çevresinde yer alan Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik kayaçların kimyasal bileşimleri, bölgedeki jeotermal suların kökeni ve evrimi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmada, volkanik kayaçların ana oksit oranları (Tablo 23) detaylı bir şekilde incelenerek, bu kayaçların jeotermal suların kimyasal özelliklerini ne derece etkilediği araştırılmıştır. Bu yaklaşım, volkanik kayaçlar ile jeotermal sular arasındaki potansiyel ilişkiyi ortaya koyarak, sahadaki hidrojeokimyasal süreçlerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

İnceleme alanındaki genç volkanik kayaçları isimlendirmek için SiO_2 'ye karşı ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (Le Maitre et al., 1989) ve SiO_2 'ye karşı Zr/TiO_2 (Irvine ve Baragar, 1971) sınıflama diyagramları kullanılmıştır (Şekil 70). SiO_2 'ye karşı ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) diyagramında (Şekil 70a) örnekler bazaltik andezit, andezit, bazaltik traki andezit ve traki andezit alanlarında yer alırlar. SiO_2 'ye karşı Zr/TiO_2 diyagramında (Şekil 70b) ise incelenen örnekler subalkalen bazalt ve andezit alanlarında yer alırlar. İncelenen kayaçlar, inceleme alanının kuzey bitişiğinde yer alan Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik kayaçlara (4.4-13.9 My; Kaygusuz 2009; Kaygusuz vd., 2015) benzer özellik gösterirler.

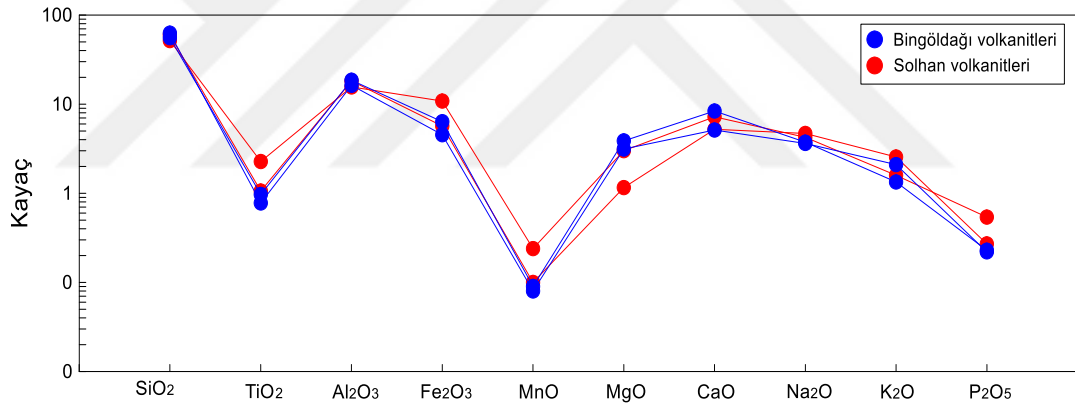
Tablo 23. İnceleme alanından toplanan kayaç örneklerine ait ana oksit (%) değerleri

Birim	Bingöldağı volkanitleri		Solhan volkanitleri	
Örnek no	4	2	13	11
Kayaç ismi	Bazaltik andezit	Andezit	Bazaltik traki andezit	Traki andezit
SiO_2	55.7	62.6	51.76	59.66
TiO_2	0.97	0.78	2.27	1.06
Al_2O_3	18.57	16.28	15.59	18.19
Fe_2O_3	6.36	4.54	10.86	5.68
MnO	0.09	0.08	0.24	0.1
MgO	3.87	3.14	3.01	1.16
CaO	8.4	5.14	7.21	5.23
Na_2O	3.75	3.62	4.25	4.69
K_2O	1.34	2.1	1.59	2.56
P_2O_5	0.23	0.22	0.54	0.27
LOI	0.5	1.3	2.4	1.2
Toplam	99.78	99.8	99.72	99.8



Şekil 70. Çalışma alanındaki Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı kayaçların (a) SiO₂'ye karşı (Na₂O+K₂O) sınıflaması (Le Maitre et al., 1989), (b) SiO₂'ye karşı Zr/TiO₂ sınıflama diyagramı (Irvine ve Baragar, 1971)

Çevre kayaçların kimyasına göre tüm kayaçlarda (bazaltik andezit, andezit, bazaltik traki andezit ve traki andezit) en bol bulunan oksit SiO₂'dir. İkinci sırada ise Al₂O₃ yer almaktadır (Şekil 71).



Şekil 71. Kayaçlarda bulunan ana element konsantrasyonları

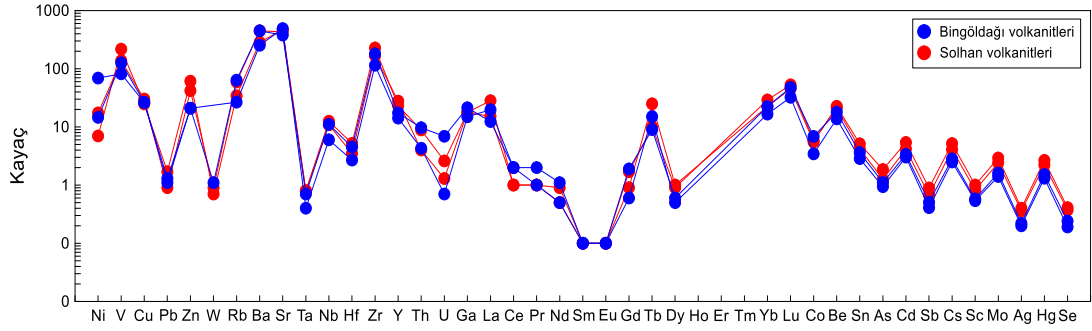
İnceleme alanındaki Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik kayaçların iz element değerleri ise Tablo 24'de ve Şekil 72'de verilmiştir.

Kayaçların iz element değerleri dikkate alındığında (Tablo 24), Sr, Ba, V ve Zr elementlerinin belirgin şekilde yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Özellikle Sr değerleri 378.90 ile 491.1 arasında değişirken, Ba içerikleri 253 ile 448 arasında değişkenlik göstermektedir. V elementi 126 ile 217 arasında değişkenlik göstermektedir. Zr elementinin 115 ile 228.1 arasında değişmesi, kayaçların zenginleşmiş mineral yapısını işaret etmektedir. Bununla birlikte, Cu ve Zn gibi elementlerin de orta-yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, Hg (<0.01), Se (<0.5) ve Ag (<0.01) gibi elementler oldukça düşük seviyelerde tespit edilmiştir. Bu farklılıklar, kayaçların oluşum ortamındaki jeokimyasal süreçlerin

çeşitliliğini yansıtmakta ve farklı magmatik evrelerden kaynaklandığını düşündürmektedir.

Tablo 24. Kayaçlarda bulunan iz element analiz sonuçları

Örnek no	Bingöldağı volkanitleri		Solhan volkanitleri	
Örnek no	4	2	13	11
Kayaç türü	Bazaltik traki andezit	Traki andezit	Bazaltik andezit	Andezit
Ni	14.60	69.00	7.00	17.40
V	126.00	82.00	217.00	138.00
Cu	26.50	26.40	24.90	30.20
Pb	1.30	1.10	1.70	0.90
Zn	21.00	21.00	61.00	42.00
W	0.5	1.10	0.70	0.90
Rb	26.70	63.70	34.30	59.40
Ba	253.00	450.10	285.00	448.00
Sr	491.10	378.90	472.50	431.00
Ta	0.40	0.70	0.80	0.80
Nb	6.00	11.10	10.90	12.50
Hf	2.70	4.50	3.50	5.20
Zr	115.00	180.40	167.00	228.10
Y	14.20	17.40	27.70	23.00
Th	4.30	9.70	4.00	8.90
U	0.70	6.90	1.30	2.60
Ga	14.90	21.30	17.80	17.60
Co	19.80	12.40	28.30	15.30
Be	2.00	2.00	1.00	1.00
Sn	1.00	2.00	1.00	1.00
As	0.50	1.10	0.50	0.90
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10
Sb	0.10	0.10	0.10	0.10
Cs	0.60	1.90	0.90	1.70
Sc	15.00	9.00	25.00	10.00
Mo	0.50	0.60	1.00	0.90
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Hg	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
La	16.60	22.30	22.50	29.10
Ce	32.40	47.50	45.30	52.80
Pr	3.45	6.85	5.52	5.82
Nd	13.80	17.90	22.60	21.20
Sm	2.85	3.60	5.13	4.23
Eu	0.94	1.11	1.85	1.25
Gd	3.03	3.37	5.40	4.17
Tb	0.41	0.51	0.89	0.67
Dy	2.50	2.82	5.19	4.09
Ho	0.54	0.58	1.00	0.82
Er	1.41	1.61	2.92	2.43
Tm	0.20	0.22	0.40	0.36
Yb	1.31	1.52	2.66	2.22
Lu	0.19	0.24	0.41	0.37



Şekil 72. Kayaçlarda bulunan iz element konsantrasyonları

4.13.2. Su-Kayaç İlişkisi

Yeraltı ve yüzey sularının kimyasal bileşimi, kayaçların mineralojik yapısı, sıcaklık, pH, redoks potansiyeli (Eh) gibi inorganik faktörlerin yanı sıra iklim koşulları gibi çevresel faktörler tarafından da belirlenir. Kayaç-su etkileşimleri sırasında meydana gelen çözünme, çökelme ve iyon değişimi gibi süreçler, suyun kimyasal özelliklerini şekillendirir. İklim koşulları, kayaçların ayrışma hızını ve türünü etkileyerek, dolaylı olarak da suyun kimyasal bileşimini belirler. İncelenen jeotermal sistemde, jeotermal suların majör ve iz element konsantrasyonları, soğuk sulara kıyasla belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu durum, jeotermal suların farklı bir kökene sahip olduğunu veya farklı jeokimyasal süreçlerden etkilendiğini düşündürmektedir.

İnceleme alanındaki jeotermal sularda Si miktarı 38.9-44.1 mg/l arasında olup, normal yeraltı sularına (9.2-4.7 mg/l) oranla çok fazladır. Kayaçlarda da SiO₂, en yüksek konsantrasyona sahip oksidi oluşturur. Bu durum, çalışma alanında gözlenen volkanik kayaçların kimyasal özelliklerinin, suların kimyası üzerinde etkili olduğunu gösterir.

Majör iyonların hangi kimyasal olaylar sonucunda su-kayaç etkileşimi ile suya geçmiş olabileceği, Hounslow (1995) tarafından belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiş (Tablo 25) ve bu değerlendirme sonucunda elde edilen bulgular Tablo 26'da sunulmuştur.

Tablo 25. Su-kayaç etkileşimine bağlı olarak belirlenen olası sonuçlar (Hounslow, 1995)

Parametreler	Değer aralıkları	Olası Sonuçlar
$(Na^+ + K^+ - Cl^-) /$	> 0.2 ve < 0.8	Olası plajyoklas ayrışması
$(Na^+ + K^+ - Cl^- + Ca^{2+})$	< 0.2 ya da > 0.8	Plajyoklas ayrışması
$Na^+ / (Na^+ + Cl^-)$	> 0.5	Halit- albit dışındaki farklı sodyum iyon değişimi
	$= 0.5$	Halit çözeltisi
	< 0.5 TDS $5.5 > 500$	Tatılılaşmaya dönüş. deniz suyu
	< 0.5 TDS $5.5 < 500 > 50$	Analiz hatası
	< 0.5 TDS $5.5 < 50$	Yağmur suyu
$Mg^{2+} / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$	$HCO_3^- / SiO_2 > 10$	Karbonat ayrışması
	$= 0.5$	Dolomit ayrışması
	< 0.5	Kireçtasi- dolomit ayrışması
	> 0.5	Dolomit ayrışması. kalsit çökelimi veya deniz suyu
	$HCO_3^- / SiO_2 < 5$	Silikat ayrışması
	> 0.5	Ferromagnezyum mineraller
	< 0.5	Granit ayrışması
$Ca^{2+} / (Ca^{2+} + SO_4^{2-})$	$= 0.5$	Jips çözeltisi
	< 0.5 pH < 5.5	Pirit oksidasyonu
	< 0.5 nötr	Kalsiyum ayrışması-iyon değişimi veya kalsit çökelimi
	> 0.5	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı karbonat veya silikatlar
$SiO_2 / (Na + K + Cl)$	< 1	Katyon değişimi
	> 1 ve < 2	Albit ayrışması
	> 2	Ferromagnezyen mineraller
TDS	> 500	Karbonat ayrışması. tuzlu sular veya deniz suyu
	< 500	Silikat ayrışması
$Cl^- / \sum \text{anyon}$	> 0.8 TDS > 500	Deniz suyu. tuzlu sular veya evaporitler
	> 0.8 TDS < 100	Yağmur suyu
	< 0.8	Kayaç ayrışması
$HCO_3^- / \sum \text{anyon}$	> 0.8	Silikat veya karbonat ayrışması
	< 0.8 Yüksek sülfat	Jips çözeltisi
	< 0.8 Düşük sülfat	Deniz suyu veya tuzlu sular
Doygunluk indeksi	Pozitif	Kalsitçe aşırı doymun çözelti
	0	Kalsitçe doymun çözelti
	Negatif	Kalsitçe doymamış çözelti

Hounslow, (1995) tarafından önerilen sınıflama (Tablo 25) dikkate alınarak, Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi su-kayaç etkileşimi Tablo 26'da gösterilmiştir.

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularındaki K, Na, Mg ve Ca katyonları ile Cl^- , HCO_3^- ve SO_4^{2-} gibi anyonların değişimleri ile ilişkili kaya-su etkileşimi ve kalsit doymunluk indeksi ile ilişkili kimyasal olaylar Tablo 27 ve Tablo 28'de gösterilmiştir.

Tablo 26. Hounslow, (1995) tarafından önerilen sınıflama (Tablo 25) dikkate alınarak, Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi su-kayaç etkileşimi değerleri

Ölçülen	Yiğitler (Tekman)							
Parametreler	YSK-1A	YSK-1K	YSK-2A	YSK-2K	YÇ-1A	YÇ-1K	YD-1A	YD-1K
(Na ⁺ +K ⁺ -Cl ⁻) /	0.28	0.10	0.11	0.10	0.30	0.30	0.11	0.08
(Na ⁺ +K ⁺ -Cl ⁻ +Ca ²⁺)								
Na ⁺ /(Na ⁺ +Cl ⁻)	0.61	0.61	0.63	0.63	0.75	0.81	0.27	0.78
Mg ²⁺ /(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)	0.52	0.23	0.23	0.23	0.15	0.15	0.24	0.26
Ca ²⁺ /(Ca ²⁺ +SO ₄ ²⁻)	0.56	0.82	0.82	0.83	0.81	0.82	0.90	0.89
SiO ₂ /(Na+K+Cl)	0.53	0.00	0.54	0.00	2.35	0.00	0.29	0.00
Cl ⁻ /Σanyon	0.07	0.05	0.04	0.05	0.03	0.02	0.07	0.01
HCO ₃ ⁻ /Σanyon	0.88	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.92	0.97
Kalsit SI	-7.90	-7.36	-7.39	-7.40	-8.85	-8.87	-8.15	-8.11
Ölçülen	Çimenözü (Çat)							
Parametreler	ÇSK-1A	ÇSK-1K	ÇSK-2A	ÇSK-2K	ÇÇ-1A	ÇÇ-1K	ÇD-1A	ÇD-1K
(Na ⁺ +K ⁺ -Cl ⁻) /	0.13	0.12	0.36	0.13	0.21	0.22	0.07	0.08
(Na ⁺ +K ⁺ -Cl ⁻ +Ca ²⁺)								
Na ⁺ /(Na ⁺ +Cl ⁻)	0.53	0.54	0.54	0.53	0.76	0.86	0.49	0.51
Mg ²⁺ /(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)	0.27	0.26	0.58	0.28	0.18	0.18	0.26	0.29
Ca ²⁺ /(Ca ²⁺ +SO ₄ ²⁻)	0.83	0.83	0.55	0.82	0.86	0.87	0.87	0.84
SiO ₂ /(Na+K+Cl)	0.31	0.00	0.29	0.00	10.49	0.00	0.17	0.00
Cl ⁻ /Σanyon	0.10	0.09	0.21	0.10	0.02	0.03	0.13	0.14
HCO ₃ ⁻ /Σanyon	0.89	0.89	0.82	0.89	0.95	0.96	0.92	0.91
Kalsit SI	-7.53	-7.53	-8.09	-7.55	-8.69	-8.71	-8.19	-8.26

Tablo 27. Tekman sularındaki Na, K, Ca ve Mg katyonları ile Cl, SO₄ ve HCO₃ anyon değişimlerine bağlı olarak kaya-su etkileşimi ve kalsit doygunluk indeksine göre kimyasal olaylar

Parametreler	YSK-1A	YSK-1K	YSK-2A	YSK-2K
(Na ⁺ +K ⁺ -Cl ⁻) /	Olası Plajiyoklas	Plajiyoklas	Plajiyoklas	Plajiyoklas
(Na ⁺ +K ⁺ -Cl ⁻ +Ca ²⁺)	ayırışması	ayırışması	ayırışması	ayırışması
Na ⁺ / (Na ⁺ +Cl ⁻)	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı. iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı. iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı. iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı. iyon değişimi
Mg ²⁺ / (Ca ²⁺ +Mg ²⁺)	Silikat ayırışması	Kireçtaşı ve dolomit ayırışması	Kireçtaşı ve dolomit ayırışması	Kireçtaşı ve dolomit ayırışması
Ca ²⁺ / (Ca ²⁺ +SO ₄ ²⁻)	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar
SiO ₂ / (Na+K+Cl)	Kasyon Değişimi	Kasyon Değişimi	Kasyon Değişimi	Kasyon Değişimi
Cl ⁻ / Σanyon	Kayaç ayırışması	Kayaç ayırışması	Kayaç ayırışması	Kayaç ayırışması
HCO ₃ ⁻ / Σanyon	Silikat ve karbonat ayırışması	Silikat ve karbonat ayırışması	Silikat ve karbonat ayırışması	Silikat ve karbonat ayırışması
Kalsit SI	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti

Tablo 27. (Devamı)

Parametreler	TÇ-1A	TÇ-1K	TD-1A	TD-1K
$(Na^++K^+-Cl^-) / (Na^++K^+-Cl^-+Ca^{+2})$	Olası plajiyoklas ayrışması	Olası plajiyoklas ayrışması	Plajiyoklas ayrışması	Plajiyoklas ayrışması
$Na^+/(Na^++Cl^-)$	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi
$Mg^{+2}/(Ca^{+2}+Mg^{+2})$	Silikat ayrışması	Silikat ayrışması	Silikat ayrışması	Silikat ayrışması
$Ca^{+2}/(Ca^{+2}+SO_4^{-2})$	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar
$SiO_2/(Na+K+Cl)$	Ferromagnezyen mineraller	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi
$Cl^-/\sum anyon$	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması
$HCO_3^-/\sum anyon$	Silikat ve karbonat ayrışması	Silikat ve karbonat ayrışması	Silikat ve karbonat ayrışması	Silikat ve karbonat ayrışması
Kalsit SI	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti

Tablo 28. Çat sularındaki Na, K, Ca ve Mg katyonları ile Cl, SO₄ ve HCO₃ anyon değişimlerine bağlı olarak kaya-su etkileşimi ve kalsit doygunluk indeksine göre kimyasal olaylar

Parametreler	ÇÇ-1A	ÇÇ-1K	ÇD-1A	ÇD-1K
$(Na^++K^+-Cl^-) / (Na^++K^+-Cl^-+Ca^{+2})$	Olası Plajiyoklas ayrışması	Olası Plajiyoklas ayrışması	Plajiyoklas ayrışması	Plajiyoklas ayrışması
$Na^+ / (Na^++Cl^-)$	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit çözeltisi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi
$Mg^{+2} / (Ca^{+2}+Mg^{+2})$	Silikat ayrışması	Silikat ayrışması	Karbonat ayrışması	Karbonat ayrışması
$Ca^{+2} / (Ca^{+2}+SO_4^{-2})$	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar
$SiO_2 / (Na+K+Cl)$	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi
$Cl^- / \sum anyon$	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması
$HCO_3^- / \sum anyon$	Silikat ve karbonat ayrışması	Silikat ve karbonat ayrışması	Silikat ve karbonat ayrışması	Deniz suyu ve tuzlu su
Kalsit SI	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti

Tablo 28. (Devamı)

Parametreler	ÇÇ-1A	ÇÇ-1K	ÇD-1A	ÇD-1K
$(Na^++K^+-Cl^-) / (Na^++K^+-Cl^-+Ca^{+2})$	Olası plajiyoklas ayrışması	Olası plajiyoklas ayrışması	Plajiyoklas ayrışması	Plajiyoklas ayrışması
$Na^+/(Na^++Cl^-)$	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit çözeltisi	Halit-albit dışındaki sodyum kaynağı, iyon değişimi
$Mg^{+2}/(Ca^{+2}+Mg^{+2})$	Silikat ayrışması	Silikat ayrışması	Silikat ayrışması	Silikat ayrışması
$Ca^{+2}/(Ca^{+2}+SO_4^{+2})$	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kaynağı karbonat veya silikatlar
$SiO_2/(Na+K+Cl)$	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi	Katyon Değişimi
$Cl^-/\sum anyon$	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması	Kayaç ayrışması
$HCO_3^-/\sum anyon$	Silikat ve karbonat ayrışması	Silikat ve karbonat ayrışması	Silikat ve karbonat ayrışması	Deniz suyu ve tuzlu su
Kalsit SI	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti	Kalsitçe doymamış çözelti

Çalışma alanındaki sulara Na'un kaynağı, olası plajiyoklas ayrışması ve halit-albit dışındaki sodyum kaynaklı iyon değişimiyle bağlantılıdır. Mg, bölgedeki karbonat, dolomit veya silikat ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Ca'un kökeni, karbonat ve silikat minerallerinin çözünmesi ile açıklanırken, Cl kayaç ayrışmasından sulara geçiş yapmıştır. HCO_3^- konsantrasyonları ise karbonat ayrışması veya jipsin çözünmesi sonucu ortaya konulmuştur.

Çalışma alanındaki farklı su tipleri (örneğin soğuk kaynak suları, yuzey suları ve jeotermal sular kaynakları) incelendiğinde, kimyasal parametrelerin kaynak çeşitliliğine göre değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Na, K, Cl ve Ca gibi iyonların dağılımı, kayaç-sıvı etkileşimlerini ve bu süreçlerdeki kimyasal ayrışmayı göstermektedir. Örneğin, jipsin ve karbonatın çözünmesi Mg ve HCO_3^- konsantrasyonlarını artırarak, silikat mineralleri SiO_2 içeriğinin temel kaynağını oluşturmuştur.

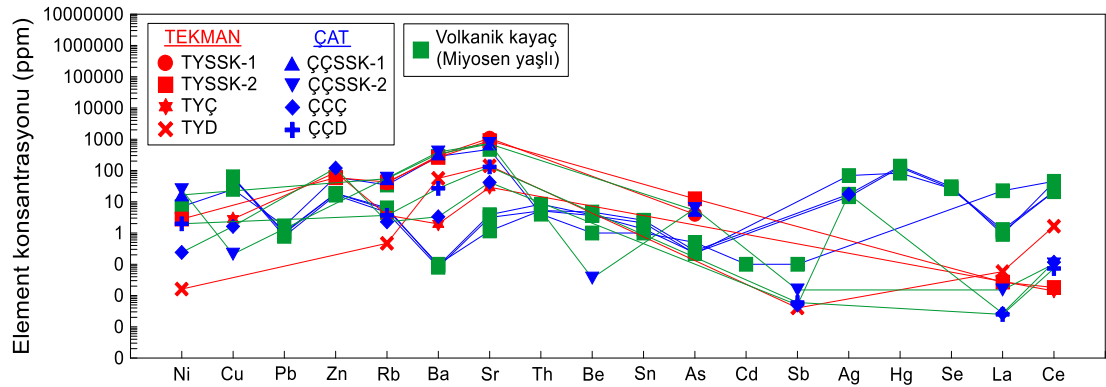
Tablodaki verilere göre, kayaç kimyası ve su kimyası arasındaki ilişki ortadadır. Na, Ca ve Mg'nin konsantrasyonlarının hem iyon değişimi hem de kayaç ayrışması süreçleriyle ilişkilendirildiği görülmüştür. Katyon değişimi ve kayaç ayrışmasının su kimyasına olan etkisi, inceleme alanındaki hidrojeokimyasal süreçleri anlamada önemli bir etkidir.

İnceleme alanından derlenen su ve kayaç örneklerine ait iz element analiz sonuçları Tablo 29'da verilmiştir.

Tablo 29. İnceleme alanındaki jeotermal su ve volkanik kayaç örneklerine ait iz element analiz sonuçları (su örnekleri ppb, kayaç örnekleri ppm)

Element	Kayaç örnekleri				Sıcak (Jeotermal) su örnekleri							
	Solhan Volkanitleri		Bingöldağı Volkanitleri		Yiğitler (Tekman)				Çimenözü (Çat)			
	13	11	4	2	YSK-1A	YSK-1K	YSK-2A	YSK-2K	ÇSK-1A	ÇSK-1K	ÇSK-2A	ÇSK-2K
Ni	7.00	17.40	14.60	69.00	<0.000	2.810	<0.000	0.016	16.520	24.440	0.240	1.990
Cu	24.90	30.20	26.50	26.40	<0.000	<0.000	2.800	<0.000	<0.000	0.210	1.640	<0.000
Pb	1.70	0.90	1.30	1.10	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Zn	61.00	42.00	21.00	21.00	<0.000	58.73	86.69	<0.000	<0.000	<0.000	119.08	<0.000
Rb	34.30	59.40	26.70	63.70	40.290	42.750	3.700	0.470	54.920	56.920	2.270	3.690
Ba	285.0	448.0	253.0	450.1	298.61	263.31	1.95	56.27	338.25	391.69	3.31	26.94
Sr	472.5	431.0	491.1	378.9	1087.12	906.86	29.05	142.17	706.01	732.53	41.72	131.11
Th	4.00	8.90	4.30	9.70	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Be	1.00	1.00	2.00	2.00	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.036	<0.000	<0.000
Sn	1.00	1.00	1.00	2.00	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
As	0.50	0.90	0.50	1.10	3.980	12.450	<0.000	<0.000	5.340	6.040	<0.000	<0.000
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Sb	0.10	0.10	0.10	0.10	<0.000	<0.000	<0.000	0.004	<0.000	0.015	0.005	0.006
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	17.360	<0.000
Hg	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
La	22.50	29.10	16.60	22.30	<0.000	0.027	<0.000	0.058	<0.000	0.015	0.003	0.003
Ce	45.30	52.80	32.40	47.50	<0.000	0.018	0.014	1.650	<0.000	0.102	0.117	0.073

İncelenen sulardaki iz element içerikleri ile kayaçlardaki iz element içerikleri karşılaştırıldığında (Şekil 73), Sr, Ba ve As gibi elementlerin sulara yüksek, ancak volkanik kayaçlarda düşük olduğu görülmektedir. Bu durum suların kimyasını belirleyen volkanik kayaçlardan başka kayaç türleriyle ya dahidrotermal kaynaklardan beslendiğini gösterir (Şekil 73).



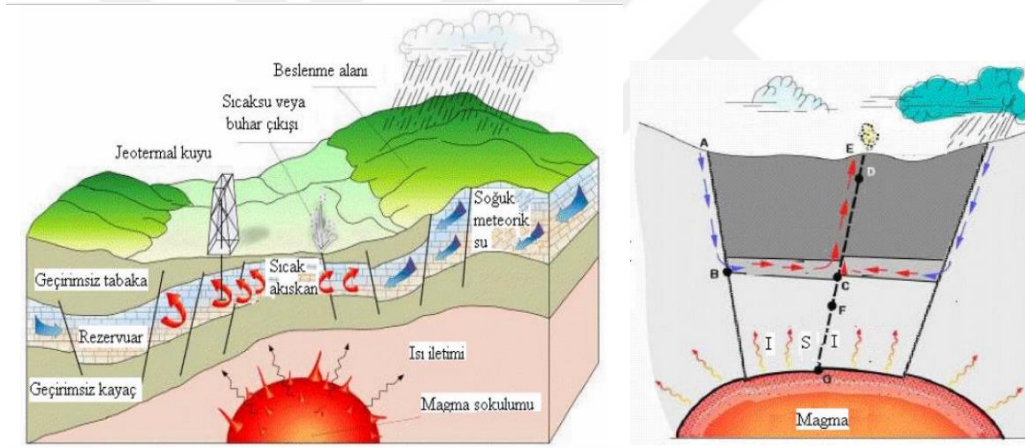
Şekil 73. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarındaki kayaç ve sularda bulunan iz element konsantrasyonları

4.14. Hidrojeoloji

Su, doğada sürekli olarak döngü halindedir. Bu döngüde, yağış yoluyla yeryüzüne ulaşan suların bir kısmı gözenekli ortamlardan yeraltına sızarak farklı ortamlarda yeraltı suyunu oluştururken, bir kısmı da doğrudan akışa geçerek yüzey sularını oluşturur. Bu sular, yüzey akışı ile sulak alanlara ve denizlere ulaşır. Yağışın buharlaşma, akış ve sızılma şeklinde dağılımını içeren bu olaya hidrolojik döngü denir.

4.14.1. Jeotermal Sistemlerin Oluşum Şekilleri

Jeotermal sistemler, yerkürenin iç ısısının, uygun jeolojik koşullar altında yüzeye yakın seviyelere taşınması ve depolanması sonucu oluşan doğal sistemlerdir. Bu sistemler, bir ısı kaynağı, ısı taşıyan bir akışkan, bir rezervuar ve bir örtü kaya olmak üzere temel dört bileşenden oluşur (Şekil 74). Yerkürenin iç ısısının temel kaynakları, yeryüzünün oluşumu sırasında açığa çıkan ısı ve radyoaktif elementlerin bozunması sonucu ortaya çıkan ısıdır. Tektonik hareketler, magmatik aktiviteler ve volkanizm gibi jeolojik süreçler, bu ısının yer kabuğunda daha sıkı derinliklere taşınmasına ve jeotermal sistemlerin oluşmasına neden olur. Yağış suları, yeraltına sızdıktan sonra bu ısı kaynakları tarafından ısıtılır ve daha sonra yer kabuğundaki gözenekli ve geçirgen birimlerde depolanır (Şekil 74). Bu birimler, jeotermal rezervuar olarak adlandırılır. Rezervuarın üstünde yer alan geçirimsiz kayaçlar ise, ısının ve akışkanın kaybını önleyerek jeotermal sistemin korunmasını sağlar.



Şekil 74. Jeotermal enerji sistem modeli (Whiting and Ramey, 1969)

4.14.2. Yiğitler-Çimenözü Jeotermal Sistemi

Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu fay zonlarının hemen kuzeydoğusunda konumlanan inceleme alanındaki jeotermal su kaynakları, bu faylar tarafından oluşturulan ve söz konusu fay zonlarına paralel uzanan ikincil makaslama faylarının etkisiyle yüzeye çıkmaktadır. İnceleme alanı dahilindeki jeotermal sular, tektonizma ve volkanizma etkisinde olup, alandaki jeotermal belirtileri yüzeye çıkan ve sıcaklığı yaklaşık 45.8-49.3 °C olan jeotermal su kaynakları oluşturmaktadır. Jeotermal sistemin beslenme alanları, güney ve kuzeyindeki yükseltiler ile sınırlanan alana düşen yağış sularının yerin derinliklerine sızmasıyla meydana gelmektedir.

Beslenme alanında yüzeylenen birimlerin geçirimsizlikleri, antiklinal yapıları, faylar ve faylara bağlı gelişen kırık yapıları etkili olmuştur. Yüzeyden yerin

derinliklerine ilerleyen yağış suları, termal gradyanla ısınmakta ve ısınan sular yoğunlukları nedeniyle yukarıya doğru hareket etmektedir. Bu hareketleri esnasında yine antiklinal ve kırık hatlarını kullanmaktadırlar.

Çalışma alanındaki birimlerin litolojik özellikleri geçirimsizlik açısından incelendiğinde, alandaki en yaşlı birimler olan Şahvelet/Hınıs Ofiyolitleri'ni oluşturan peridotit, serpantin ve gabro türü kayaçların, çok düşük geçirimsizlik özelliği nedeniyle hidrojeolojik açıdan geçirimsiz kayaç özelliği taşıdığı görülmektedir. İnceleme alanının özellikle kuzeybatısında ve güneydoğusunda yüzeylenen altere olmamış, masif yapıdaki Üst Miyosen ve Pliyosen yaşlı volkanitler (Bingöldağı ve Solhan volkanitleri) düşük geçirgenlikli özelliğiyle örtü kayaç niteliğindedir. Eosen yaşlı Memişkomu ve Ağakoca Formasyonları, yarı geçirgen birim özelliği taşımaktadır. Eosen yaşlı Kösehasan/Kozlu Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı birimler ise yüksek geçirgenlik özellikleri ile çalışma alanındaki geçirgen birimler olup, akifer özelliği göstermektedir. Ayrıca, Kösehasan Formasyonu içindeki kireçtaşları, kırık ve çatlaklarıyla jeotermal sular için rezervuar kayaç özelliği taşımaktadır.

Yiğitler (Tekman) jeotermal sahası için silis jeotermometreleri ile hesaplanan entalpi-silis ve entalpi-klorür karışım modelleri ile 55-141 °C aralığında değişen hazne kaya sıcaklıkları hesaplanmıştır. Bu değer, sahanın düşük-orta entalpili saha olarak sınıflandırılmasına olanak sağlamaktadır (Benderitter ve Cormy, 1990; Muffler ve Cataldi, 1978; Haenel vd, 1988; Hochstein, 1990).

Çimenözü (Çat) jeotermal sahası için silis jeotermometreleri ile hesaplanan entalpi-silis ve entalpi-klorür karışım modelleri ile 62-168 °C arasında değişen hazne kaya sıcaklıkları hesaplanmıştır. Bu değerler ile saha düşük-orta entalpili saha olarak sınıflandırılır.

İnceleme alanının yaklaşık 50 km kuzeyindeki Pasinler (Erzurum) bölgesinde gerçekleştirilen jeofizik, jeolojik ve jeotermal çalışmalar neticesinde, Pasinler jeotermal alanındaki akışkaların ısınmasını sağlayan kaynağın varlığına ilişkin iki farklı yorum ortaya konmuştur. Aynalı ve Bulut (2002)'e göre, Pasinler Havzası kuzey-güney yönlü sıkışma ve doğrultu atımlı fayların etkisi altında gelişmiştir. K-G yönlü bu sıkışma ve doğrultu atımlı faylar, havzanın özellikle kuzey bölgesinde volkanik olaylara neden olmuştur. Havzanın kuzeyinde yer alan jeotermal su çıkışlarının yoğun olduğu alanlarda farklı bileşimdeki kayaç türlerine ait domsal çıkışlar ve fissür tipi volkanizma gelişmiştir. Bu nedenle, Pasinler Havzası'nda jeotermal su kaynaklarının yoğun olduğu sahanın kuzeyinde yer alan Hasanbaba Domu'nu oluşturan magma, ısıtıcı kütle olarak düşünülmüştür (Aynalı ve Bulut, 2002). Pasinler jeotermal alanındaki ısıtıcı kütle için

bir diğer görüş ise, Pasinler Havzasındaki jeotermal su kaynaklarının yoğun olduğu alan ve yakınlarında yapılan jeofizik çalışmaların, bir magma kütlelerinin varlığını gösterebilecek anomaliler ortaya koyması nedeniyle bu tür sokulumların sahadaki ısı kaynağını oluşturabileceği yönündedir. Pasinler Havzası'nda yapılan önceki çalışmalar ve MTA tarafından gerçekleştirilen sondaj çalışmaları, alanda hazne kayayı Erzurum-Kars volkanitlerinin oluşturduğu varsayımını ortaya koymuştur. Bu varsayım, Hatipoğlu-Temizel (2014) tarafından da benimsenmiş ve Pasinler jeotermal sistemin ısı kaynağının Üst Miyosen yaşlı genç volkanitler (Erzurum-Kars volkanitleri) olabileceği sonucuna varılmıştır.

Yukarıda bahsedilen genç (Üst Miyosen-Pliyosen) volkanik kayalar, incelenen Yiğitler ve Çimenözü alanlarında da sırtlar ve domlar şeklinde yüzeylenmekte olup, bazaltik andezit, andezit, trakiandezit ve piroklastikleri ile temsil edilmektedir (Bingöldağı ve Solhan volkanitleri). Önceki çalışmalar da dikkate alınarak, bu genç volkanik faaliyetlerin inceleme alanında jeotermik gradyanın yükselmesine neden olduğu, alandaki jeotermal sistemlerin ısı kaynağını bu genç volkanik etkinliklerin oluşturabileceği düşünülmektedir.

4.14.3. Jeotermal Akışkanların Çevresel Etkileri

Jeotermal enerji kaynaklarının geliştirilmesi öncesinde, çevresel etkilerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Düşük ve yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerin çevresel etkileri, Hunt (2001) tarafından incelendiği üzere, farklılıklar göstermektedir. Tablo 30'da sunulan bulgular, jeotermal faaliyetlerin potansiyel çevresel etkilerini detaylı olarak ortaya koymaktadır. Jeotermal enerjinin sürdürülebilir bir şekilde kullanılması ve çevresel etkilerin minimize edilmesi için yeniden enjeksiyon, çok amaçlı kullanım, ısı pompaları ve mineral kazanımı gibi yöntemler ön plana çıkmaktadır.

Jeotermal enerji üretimi ve kullanımı hem araştırma aşamasında hem de işletme sürecinde çevre üzerinde çeşitli etkiler yaratmaktadır. Sondaj faaliyetleri, elektrik üretimi ve atık yönetimi gibi süreçler, yüzeysel ve yer altı ekosistemlerinde tahribata neden olabilmektedir. Jeotermal akışkanların içindeki bor, civa, arsenik, kurşun, amonyak, lityum, karbondioksit, hidrojen sülfür ve tuz gibi kimyasallar, atmosfere ve çevreye salındığında önemli bir kirlilik kaynağı oluşturmaktadır. Özellikle arsenik ve civa gibi ağır metallerin biyolojik birikimi, toprak ve su ekosistemleri üzerindeki olumsuz etkileri ve insan sağlığına yönelik riskleri nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Yüksek bor konsantrasyonları ise bitkisel üretim üzerinde olumsuz etkiler

yaratmaktadır.

Jeotermal sistemlerin yüzeyde oluşturduğu doğal güzellikler ve tarihi yerler, bölgenin kültürel mirası ve ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Travertenler, gayzerler, çamur havuzları ve jeotermal su kaynakları gibi jeotermal oluşumlar, turizm potansiyeliyle birlikte bölge halkının geçim kaynaklarına da katkı sağlamaktadır. Jeotermal enerji üretimi süreçlerinde bu doğal ve kültürel değerlerin korunması önem arz etmektedir. Jeotermal akışkanların çıkarılması, yüzeydeki bu oluşumların fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek tahribata neden olabilmektedir. Bu nedenle, jeotermal projelerin planlanması ve işletilmesi sırasında, bu değerlerin korunması için gerekli önlemlerin alınması ve bu alanların yasal koruma altına alınması şarttır.

Tablo 30. Jeotermal gelişmenin olası çevresel etkileri (Hunt, 2001)

Çevresel etkenler	Düşük Sıcaklıklı Sistemler	Yüksek Sıcaklıklı Sistemler	
	Sondaj Çalışmaları	Buhar egemen	Sıvı egemen
Erozyon ve ormanlık alanların Hasarı	Az etkili		Orta etkili
Gürültü	Orta etkili	Orta etkili	Orta etkili
Işıklandırma	Az etkili	Az etkili	Az etkili
Sondaj çamurunun yer altı suyuna etkisi	Az etkili		
	Akiferden su Çekimi		
Termal özelliklerin bozulması	Az etkili	Orta etkili	Yüksek etkili
Zeminde oturmalarda	Az etkili	Orta etkili	Yüksek etkili
Yer altı su seviye düşmeleri	Etkisiz	Az etkili	Orta etkili
Hidrotermal çıkışlar	Etkisiz	Az etkili	Orta etkili
Yüzeydeki sıcaklık değişimleri	Etkisiz	Az etkili	Orta etkili
	Atık Su Boşalımı		
Yüzeysel depolanmanın organizmalara etkisi	Az etkili	Az etkili	Yüksek etkili
Re-enjeksiyon	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz
Yüzeysel depolanmanın su yollarına etkisi	Az etkili	Az etkili	Orta etkili
Yer altı suyu kirliliği sismik etkiler	Az etkili Etkisiz	Az-Orta Etkili	Az-Orta Etkili
	Atık Gaz Boşalımı		
Organizmalar üzerine etkili	Etkisiz	Az etkili	Orta etkili
Sera etkisi	Etkisiz	Az etkili	Az etkili

Yiğitler ve Çimenözü jeotermal sahaları, düşük sıcaklıklı jeotermal sistem sınıfında yer alırlar. Tablo 30'da sunulan parametreler dikkate alındığında, günümüzdeki kullanım haliyle çevreye olumsuz etkileri bulunmamaktadır. İncelenen jeotermal alanlarında akan jeotermal sular, Çimenözü Çayı'na doğrudan deşarj edilmektedir. Sahadaki jeotermal suların düşük değerlerde iz elementler içermeleri, çevre kirliliği açısından bir tehdit oluşturmamaktadır. Kaynak ve kuyu başlarında yoğun hidrojen sülfür (H₂S) gazı hissedilmekte olup, bunun çevreye olan etkisi araştırılmalıdır. Çimenözü jeotermal sahasında, jeotermal akışkanlardan kaynaklanan traverten çökelişi ve gayzerler gibi doğal güzellikleri oluşturacak unsurlar bulunmaktadır.

5. İRDELEME VE TARTIŞMA

Tekman ve Çat yöresi jeotermal su kaynaklarının fiziksel, kimyasal ve izotopik özelliklerinin değerlendirilmesi ve standartlar ile karşılaştırılması amacıyla, analiz sonuçlarına ait minimum, maksimum ve ortalama değerlerleri aşağıda Tablo 31’de verilmiştir.

Tablo 31. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yörelerindeki jeotermal su kaynaklarının analiz sonuçlarına ait minimum, maksimum ve ortalama değerlerleri

Ölçülen	Yiğitler (Tekman)			Çimenözü (Çat)		
	Min	Max	Ortalama	Min	Max	Ortalama
Sıcaklık	42.90	48.80	45.80	45.10	54.00	49.33
Ph	7.03	8.33	7.68	8.19	8.69	8.44
EC	950.00	1550.00	1354.50	925.00	1415.00	1232.50
DO	0.69	3.93	1.82	0.76	2.76	1.74
Ca	60.81	208.76	163.53	39.08	142.24	114.54
Mg	56.53	66.27	61.43	49.97	54.59	52.18
Na	34.58	39.41	36.84	66.50	74.88	70.32
K	8.05	8.95	8.48	10.70	15.36	12.46
HCO ₃	547.17	882.06	770.43	452.62	767.99	667.95
SO ₄	39.72	48.75	43.65	29.13	31.67	29.82
Cl	20.31	24.79	22.46	57.38	64.99	61.57
F	0.60	0.91	0.70	0.81	1.00	0.94
SiO ₂	35.10	38.90	37.00	44.10	44.50	44.30
NO ₂	0.01	0.01	0.01	0.05	0.08	0.07
NO ₃	0.02	11.69	3.45	0.10	7.54	4.04
PO ₄	0.02	0.08	0.05	0.00	0.01	0.01
NH ₄	0.10	0.98	0.34	0.00	0.07	0.04
Be	0.00	0.00		0.04	0.04	0.04
B	171.39	183.16	177.28	936.75	1030.81	983.78
Al	9.54	19.26	14.40	6.74	44.37	25.56
Mn	52.76	167.64	110.20	10.27	60.49	35.38
Fe	762.76	1311.00	1036.88	141.00	1033.27	587.14
Ni	2.81	2.81	2.81	16.52	24.44	20.48
Cu	0.00	0.00		0.21	0.21	0.21
Zn	58.73	58.73	58.73	0.00	0.00	
As	3.98	12.45	8.22	5.34	6.04	5.69
Rb	40.29	42.75	41.52	54.92	56.92	55.92
Sr	906.86	1087.12	996.99	706.01	732.53	719.27
Sb	0.00	0.00		0.02	0.02	0.02
Ba	263.31	298.61	280.96	338.25	391.69	364.97
La	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Ce	0.02	0.02	0.02	0.10	0.10	0.10

Tablo 31. (Devamı)

Ölçülen	Yiğitler (Tekman)			Çimenözü (Çat)		
	Min	Max	Ortalama	Min	Max	Ortalama
Alfa	0.24	0.25	0.25	0.19	0.41	0.31
Beta	0.34	0.44	0.39	0.43	0.72	0.60
³ H	0.32	0.32	0.32	0.63	0.93	0.78
t4 (°C)	55.02	59.75	57.38	65.70	66.14	65.92
t5 (°C)	86.00	90.46	88.23	96.04	96.45	96.25
t6 (°C)	88.83	92.71	90.77	97.57	97.92	97.74
t7 (°C)	57.34	61.78	59.56	67.37	67.78	67.58
t8 (°C)	62.60	66.63	64.62	71.68	72.05	71.87
t9 (°C)	51.52	56.20	53.86	62.09	62.52	62.31
t10 (°C)	73.83	78.51	76.17	84.39	84.82	84.61
t11 (°C)	87.41	91.32	89.36	96.22	96.58	96.40

5.1. İncelenen jeotermal suların sıcaklıklarının değerlendirilmesi

Jeotermal sistemlerin enerji potansiyeli, büyük ölçüde akışkanların sıcaklıkları ve kimyasal bileşimleri ile belirlenir. Dickson ve Fanelli (1990) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, jeotermal sahalar rezervuar sıcaklıklarına bağlı olarak düşük, orta ve yüksek entalpili sistemler olarak üç ana grupta incelenir (Tablo 32). Bu genel sınıflandırmanın yanı sıra, rezervuardaki dominant akışkanın (buhar veya sıvı), akışkanın kimyasal bileşiminin veya araştırmanın özel amaçlarının dikkate alındığı daha spesifik sınıflandırmalar da mevcuttur.

Tablo 32. Jeotermal alanların akışkan sıcaklıklarına göre sınıflandırılmaları (Dickson ve Fanelli, 1990)

Kaynaklar	Düşük Entalpi Sahalar	Orta Entalpi Sahalar	Yüksek Entalpili Sahalar
(1)	<90°C	90-150	>150
(2)	<125°C	<125-225	>225
(3)	<100°C	100-200	>200
(4)	<150°C	-	>150

(1) Muffler ve Cataldi 1978; (2) Hochstein 1990; (3) Benderitter ve Corny 1990; (4) Haenel vd. 1988

Tablo 32'deki sınıflandırmalar dikkate alındığında, Yiğitler (Tekman) jeotermal alanındaki jeotermal suların düşük sıcaklıklı (42.9-48.8 °C) sahalar olduğu ve bu nedenle de günümüz şartlarında elektrik üretimi için uygun olmadığı anlaşılmaktadır. Ancak ısıtmacılık (konut ve sera), soğutmacılık, kurutmacılık, kâğıt ve tekstil sanayii, kimyasal madde üretimi gibi birçok alanda kullanıma uygun olabilecek Tekman jeotermal sularından, bölgede sadece kaplıca amaçlı yararlanılmaktadır.

Çimenözü (Çat) jeotermal alanındaki jeotermal suların sıcaklık değerleri 45.1-54 °C aralığında olup, Tablo 32'deki sınıflandırmalar dikkate alındığında, düşük sıcaklıklı sahalar kapsamında yer almaktadır. Bu nedenle, günümüz koşullarında elektrik üretimi için yeterli değildir. Ancak, ısıtmacılık (konut ve sera), soğutmacılık, kurutmacılık,

kâğıt ve tekstil sanayi ve kimyasal madde üretimi gibi çok değişik alanlarda kullanıma uygundur. Çat jeotermal suları, bölgede yalnızca kaplıca amaçlı olarak kullanılmaktadır.

5.1.1. İncelenen jeotermal suların fiziksel, kimyasal ve izotopik özelliklerinin standartlara göre değerlendirilmesi

İncelenen jeotermal suların kimyasal içeriklerinin (Tablo 31) yönetmelik sınırları içinde olup olmadığının tesbiti için Tablo 33’de yer alan Kaplıcalar Yönetmeliği (2004) sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ülkemizde suların kullanımı açısından Sağlık Bakanlığı ve TSE tarafından hazırlanan standartlar vardır. İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi sular, bu standartlardan Kaplıcalar Yönetmeliği (2001), TSE-266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular (2005) Standardı ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (2004) ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 33. Ulusal ve uluslararası içmesuyu standartlarının karşılaştırılması ve kaplıca yönetmeliği

Parametreler	İnsani Amaçlı Sular (2005)	Tüketim Dünya Sağlık Örgütü (WHO) (2008)	Avrupa Birliği (EU 1998)	Kaplıcalar Yönetmeliği (2004)
Ph	6.5-9.5	6.5-8.5	6.5-9.5	-
Bulanıklık	1	5	1	-
Renk	20	15	-	-
Tds (mg/l)	-	1000	-	-
Kalsiyum (mg/l)	-	-	-	-
Magnezyum (mg/l)	-	-	-	-
Potasyum(mg/l)	-	-	-	-
Sodyum (mg/l)	200	200	200	-
Nitrat (mg/l)	50	50	50	45
Nitrit (mg/l)	0.50	0.50	0.50	0.05
Amonyum (mg/l)	0.50	1.50	0.50	-
Sülfat (mg/l)	250	250	250	-
Klorür (mg/l)	250	250	250	-
Florür (mg/l)	1.5	1.5	1.5	-
Alüminyum (mg/l)	0.20	0.20	0.20	0.2
Kurşun (mg/l)	0.01	0.01	0.01	0.01
Bakır (mg/l)	2	2	2	-
Demir (mg/l)	0.2	-	0.2	-
Mangan (mg/l)	0.05	0.4	0.05	-
Çinko (mg/l)	-	-	-	-
Baryum (mg/l)	-	0.7	-	-
Kadmiyum (mg/l)	0.005	0.003	0.005	0.003
Krom (mg/l)	0.05	0.05	0.05	0.05
Selenyum (mg/l)	0.01	0.01	0.01	-
Gümüş (mg/l)	-	-	-	-
Antimon (mg/l)	0.005	0.005	0.005	0.005
Berilyum (mg/l)	-	-	-	-
Civa (mg/l)	0.001	0.001	0.001	0.001
Bor (mg/l)	1	0.5	1	-
Nikel (mg/l)	0.02	0.02	0.02	0.05
Bromat (mg/l)	0.01	0.01	0.01	-
Serbest klor (mg/l)	-	5	-	-

Yiğitler (Tekman) jeotermal su kaynağının amonyum (NH_4) içerikleri 0.10-0.98 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.00-0.07 mg/l arasındadır (Tablo 31). Her iki bölgedeki değerler, genel olarak suyun temiz su sınıfında yer aldığını ve kullanım açısından uygunluk potansiyeli taşıdığını göstermektedir. TSE-266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standardı'na göre, amonyum (NH_4) konsantrasyonu sınır değer olan 0.5 mg/l'nin altında olduğundan, kaynak suyu olarak kullanılabilir niteliktedir. Kıtaîçi Yeraltı Suyu Kaynaklarının Genel Kimyasal ve Fizikokimyasal Parametreler Açısından Sınıflarına ve Kalite Kriterleri'ne göre ise yüksek kaliteli su sınıfında yer almışlardır.

Yiğitler jeotermal su kaynağının nitrat (NO_3) içerikleri 0.02-11.69 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.10-7.54 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Nitrat'ın (NO_3) insan sağlığı açısından zararları dikkate alınarak, Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme sularındaki nitrat konsantrasyonu için 50 mg/l'lik bir sınır belirlemiştir (WHO, 1984). Bu veriler ışığında nitrat konsantrasyonlarına göre her iki bölgedeki jeotermal su kaynaklarının kullanma suyu potansiyeline sahip olduğu görülür.

Yiğitler jeotermal su kaynağının nitrit (NO_2) içerikleri 0.01-0.01 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.05-0.08 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Nitrit (NO_2) için 0.1 mg/l sınır değerleri verilmiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının fosfat (PO_4) içerikleri 0.02-0.08 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.00-0.01 mg/l arasındadır (Tablo 31). Türkiye Yerüstü Sularının Sınıflarına göre sınır değeri belirtilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Cl içerikleri 20.31-24.79 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 57.38-64.99 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). TSE-266 standardında Cl değerinin 250 mg/l'yi aşmaması gerekir. Kaplıca Yönetmeliği (2001)'e göre Cl için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının flor (F) içerikleri 0.6-0.91 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.81-1.00 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Yönetmelikte F için 1.5 mg/l'yi aşmamalıdır.

Yiğitler jeotermal su kaynağının SO_4 değerleri 39.72-48.75 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 29.13-31.67 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Kaplıca Yönetmeliği (2001)'e göre SO_4 için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının HCO_3 değerleri 547.17-882.06 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 452.62-767.99 mg/l arasındadır (Tablo 31). Kaplıca Yönetmeliği (2001)'e göre HCO_3 için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Ca, değerleri 60.81-208.76 mg/l arasında,

Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 39.08-142.24 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). TSE-266 standardında Ca için sınır değer 200 mg/l olarak verilmiştir. Kaplıca Yönetmeliği (2001)'ne göre Ca için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Mg değerleri 56.53-66.27 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 49.97-54.59 mg/l arasındadır (Tablo 31). TSE-266 standardında magnezyum (Mg) için sınır değeri 50 mg/l olarak verilmiştir. Kaplıca Yönetmeliği (2001)'ne göre ise Mg için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının F değerleri 0.60-0.91 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.81-1.00 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). TSE-266 standardında F miktarı 1.5 mg/l'yi aşmaması gerekir. Kaplıca Yönetmeliği (2001)'ne göre F için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Al değerleri 9.54-19.26 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 6.74-44.37 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Kaplıca Yönetmeliği (2001)'ne göre Al için 0.2 mg/l sınır değeri verilmiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Si değerleri 35.10-38.90 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 44.10-45.50 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Kaplıca Yönetmeliği (2001)'ne göre Si için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal su kaynakları, Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik (DMSY-2004) kapsamında değerlendirilmiş olup, bu yönetmelik çerçevesinde doğal mineralli sularda majör iyonlar için sınır değeri verilmemiştir.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Mn içerikleri 52.76-167.64 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 10.27-60.49 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). DMSY-2004'e göre Mn için 500 µg/L sınır değeri verilmiştir. Bu yönetmeliğe göre incelenen sulardaki Mn değerleri sınır değerinin altındadır.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Cu içerikleri analiz limitlerinin altında yer almaktadır. Çimenözü (Çat) su kaynağının Cu değerleri 0.21-0.21 mg/l arasındadır (Tablo 31). DMSY-2004'e göre Cu için 2 µg/L sınır değeri verilmiştir. Bu yönetmeliğe göre incelenen sulardaki Cu değerleri sınır değerinin altındadır.

Yiğitler jeotermal su kaynağının As içerikleri 3.98-12.45 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 5.34-6.04 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). DMSY-2004'e göre As için 0.01 µg/L sınır değeri verilmiştir. Bu yönetmeliğe göre incelenen sulardaki As değerleri sınır değerinin altındadır.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Ni içerikleri 2.81 mg/l olup, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 16.52-24.44 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 31). DMSY-

2004'e göre Ni için 0.02 µg/L sınır değeri verilmiştir. Bu yönetmeliğe göre incelenen sulardaki Ni değerleri sınır değerinin altındadır.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Zn içerikleri 58.73-58.73 mg/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise analiz limitlerinin altındadır (Tablo 31). Kaplıca Yönetmeliği (2001)'ne göre Zn için sınır değeri verilmemiştir.

İçme sularında izin verilen radyoaktivite değerleri Tablo 34'de verilmiştir. Tablo 34'e bakıldığında, Dünya Sağlık Örgütü (WHO), TSE ve Sağlık Bakanlığı tarafından içme ve kullanma sularında bulunan radyoaktif maddeler için bir üst sınır verilmemiştir.

Tablo 34. İçme sularında izin verilen radyoaktivite değerleri

Kurum	İzin Verilen Üst Sınır
Dünya Sağlık Örgütü (WHO) (1996)	Alfa: 0.10 Bq/L Beta: 1.00 Bq/L
Türk Standartları Enstitüsü (TSE) (TS 266) (2005)	Alfa: 0.10 Bq/L Beta: 1.00 Bq/L
Sağlık Bakanlığı (2005)	Alfa: 0.10 Bq/L Beta: 1.00 Bq/L

Yiğitler jeotermal su kaynağının Alfa değerleri 0.24-0.25 Bq/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.19-0.41 Bq/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Tablo 34'de yer alan izin verilen üst sınır değerlerine göre, incelenen sular, içme sularında izin verilen radyoaktivite değerlerine göre üst sınır değerlerinin üstünde kalmıştır.

Yiğitler jeotermal su kaynağının Beta değerleri 0.34-0.44 Bq/l arasında, Çimenözü (Çat) su kaynağının değerleri ise 0.43-0.72 Bq/l arasında değişmektedir (Tablo 31). Tablo 34'de yer alan izin verilen üst sınır değerlerine göre, incelenen sular içme sularında izin verilen radyoaktivite değerlerine göre üst sınır değerlerinin altında kalmıştır.

5.1.2. İncelenen soğuk suların (çeşme) içme suyu standartlarına göre değerlendirilmesi

İncelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) alanlarında bulunan soğuk kaynak suyu (çeşme) örneklerine ait analiz sonuçları Tablo 35'deki standartlara göre değerlendirilmiştir.

Tablo 35. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi soğuk sularına ait analizlerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri

Ölçülen	Yiğitler (Tekman)			Çimenözü (Çat)		
	Min	Max	Ortalama	Min	Max	Ortalama
Sıcaklık	4.00	10.90	7.45	4.20	10.20	7.20
Ph	8.59	8.62	8.61	7.84	7.85	7.85
EC	52.00	60.00	56.00	74.00	75.00	74.5
Ca	6.54	6.76	6.65	9.42	9.90	9.66
Mg	1.15	1.20	1.18	2.05	2.18	2.12
Na	1.62	1.71	1.67	2.54	2.57	2.56
K	1.46	1.76	1.61	0.54	0.93	0.74
HCO ₃	27.45	28.28	27.86	40.87	45.75	43.31
SO ₄	1.47	1.55	1.51	1.41	1.59	1.50
Cl	0.41	0.54	0.48	0.41	0.79	0.60
F	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
SiO ₂	9.20	9.20	9.20	4.70	4.70	4.70
NO ₂	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
NO ₃	4.22	4.56	4.39	1.40	1.43	1.42
PO ₄	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
NH ₄	0.02	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
B	7.59	7.59	7.59	31.88	31.88	31.88
Al	28.26	28.26	28.26	101.78	101.78	101.78
Cr	0.39	0.39	0.39	0.48	0.48	0.48
Mn	2.62	2.62	2.62	2.96	2.96	2.96
Fe	105.69	105.69	105.69	228.98	228.98	228.98
Ni	-	-	-	0.24	0.24	0.24
Cu	2.80	2.80	2.80	1.64	1.64	1.64
Zn	86.69	86.69	86.69	119.08	119.08	119.08
Rb	3.70	3.70	3.70	2.27	2.27	2.27
Sr	29.05	29.05	29.05	41.72	41.72	41.72
Ag	-	-	-	17.36	17.36	17.36
Sb	-	-	-	0.01	0.01	0.01
Ba	1.95	1.95	1.95	3.31	3.31	3.31
La	-	-	-	0.003	0.003	0.003
Ce	0.01	0.01	0.01	0.12	0.12	0.12

Yiğitler soğuk kaynak suyu kimyasal parametrelerin genel olarak yönetmelik sınırlarına uygun olduğunu göstermektedir. F konsantrasyonu 0.02 mg/l ile yönetmelikte belirtilen 5 mg/l sınır değerinin oldukça altındadır. NO₂ konsantrasyonu 0.002 mg/l ve NO₃ konsantrasyonu 4.22-4.56 mg/l aralığındadır, bu da sırasıyla 0.1 mg/l ve 50 mg/l sınır değerlerinin çok altında kaldığını göstermektedir. Suyun pH değeri 8.59-8.62 arasında olup, hafif alkali grubundadır. Bor (B) 7.59 mg/l konsantrasyonu tarımsal sulama için uygun seviyededir ve Fe içeriği 105.69 mg/l olarak ölçülmesiyle, mineral zenginliği açısından önemli bir potansiyel olduğunu göstermektedir. İncelenen suların Cr içeriği 0,39 mg/l olup, içme ve kullanma sularında krom için belirlenen maksimum izin verilebilir değer (50 µg/L; TS-266, 2005)'in altındadır.

Çimenözü soğuk kaynak suyu analizinde kimyasal parametrelerin çoğu yönetmelik standartlarına uygundur. NO₂ konsantrasyonu 0.002 mg/l ve NO₃ konsantrasyonu 1.4-1.43 mg/l arasında değişmektedir, bu da sınır değerlerin oldukça altındadır. F konsantrasyonu 0.03-0.04 mg/l ile güvenli sınırlardadır. Suyun pH değeri

7.84-7.85 arasında ölçülmüştür ve hafif nötr bir özellik göstermektedir. Bor konsantrasyonu 31.88 mg/l olup, bu değer oldukça yüksek bir seviyeyi işaret etmektedir ve tarımsal uygulamalar açısından toksik etki yaratır. Fe konsantrasyonu ise 228.98 mg/l ile Çat suyu için belirgin bir mineral zenginliğini ortaya koymaktadır. İncelenen suların Cr içeriği 0,48 mg/l olup, içme ve kullanma sularında krom için belirlenen maksimum izin verilebilir değer (0,05 µg/L; TS-266, 2005)'in biraz altındadır.

Yiğitler ve Çimenözü soğuk (çeşme) suları, TSE 266:2005 ve WHO-2011 standartlarına göre genel olarak pH, Na, K, Ca, Mg, HCO₃, Cl, F, SO₄ gibi majör iyonlar açısından belirlenen sınır değerlerin içerisinde bulunmamaktadır. Yiğitler (Tekman) soğuk kaynak suyunda pH değeri (8.59-8.62) standart sınırlar olan 6.5-9.5 aralığındayken, Çimenözü (Çat) soğuk kaynak suyu da pH (7.84-7.85) değeriyle nötre yakın bulunmuştur. Her iki kaynaktaki NO₂ ve NO₃ konsantrasyonları da standartların (NO₂ 0.002 mg/l, NO₃ 1.4-4.56 mg/l) altında kalmıştır. Bu da bu değerler açısından suyun güvenli olduğunu göstermektedir.

Fakat, Çimenözü (Çat) soğuk kaynak suyunda Fe konsantrasyonu (228.98 mg/l), TSE 266:2005'te belirtilen 0.2 mg/l sınır değerini aşmış, demir içeriği açısından standart dışı olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde, Çimenözü (Çat)'daki bor konsantrasyonu (31.88 mg/l), içme suyu standartlarında belirtilen 1 mg/l sınırını önemli ölçüde aşmaktadır. Yiğitler (Tekman) soğuk kaynak suyu ise bor (7.59 mg/l) açısından sınır değeri aşmıştır.

Yiğitler ve Çimenözü soğuk suların genel olarak içme suyu standartlarına uygundur, ancak Çimenözü Bölgesi'nde yüksek Fe ve Bor içeriği kontrol edilmelidir. Bu elementlerin insan sağlığı üzerindeki etkileri göz önüne alınarak gerekli arıtma işlemleri önerilmektedir.

5.1.3. İncelenen yüzey (dere) suların kirlilik açısından değerlendirilmesi

İnceleme alanında yer alan dere (yüzey) sularına ait minimum, maksimum ve ortalama değerler Tablo 36'da verilmiştir. Tablo 36'deki değerler Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (2004)'ne (Tablo 37) göre değerlendirilmiş olup, aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 36. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) yöresi yüzey (dere) sularına ait minimum, maksimum ve ortalama değerleri

Ölçülen	Yiğitler (Tekman)			Çimenözü (Çat)		
	Min	Max	Ortalama	Min	Max	Ortalama
Sıcaklık	1.30	11.50	6.40	1.50	11.80	6.65
Ph	8.60	8.61	8.61	7.65	7.66	7.66
EC	271.00	289.00	280.00	274.00	278.00	262.50
Ca	33.84	37.03	35.44	26.29	31.05	28.67
Mg	10.82	13.09	11.96	10.79	11.12	10.96
Na	3.21	3.26	3.24	9.07	9.44	9.26
K	1.12	9.57	5.35	1.85	2.79	2.32
HCO ₃	153.11	167.75	160.43	137.25	154.94	146.09
SO ₄	3.77	4.60	4.19	4.78	4.97	4.88
Cl	0.90	8.84	4.87	8.93	9.38	9.16
F	0.02	0.08	0.05	0.09	0.09	0.09
SiO ₂	6.20	6.20	6.20	3.60	3.60	3.60
NO ₂	0.002	0.002	0.002	0.010	0.010	0.010
NO ₃	0.09	0.78	0.44	1.82	10.06	5.94
PO ₄	0.00	0.09	0.05	0.02	0.03	0.03
NH ₄	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
B	10.65	10.65	10.65	54.71	54.71	54.71
Al	106.51	106.51	106.51	127.14	127.14	127.14
Cr	0.30	0.30	0.30	0.44	0.44	0.44
Mn	13.54	13.54	13.54	972.00	972.00	972.00
Fe	132.22	132.22	132.22	183.04	183.04	183.04
Ni	0.02	0.02	0.02	1.99	1.99	1.99
Rb	0.47	0.47	0.47	3.69	3.69	3.69
Sr	142.17	142.17	142.17	131.11	131.11	131.11
Ba	56.27	56.27	56.27	26.94	26.94	26.94
La	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00
Ce	1.65	1.65	1.65	0.07	0.07	0.07

Yiğitler ve Çimenözü yüzey suları, Su Kalite Sınıfları (YSKY-2021) tablosu dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. pH değeri Yiğitler (Tekman)'de 8.61, Çimenözü (Çat)'nde ise 7.66 olarak ölçülmüş olup, her iki bölge de I-II. kalite sınıfına (pH sınırı: 6.5-8.5) girmektedir. Klorür (Cl) konsantrasyonları Yiğitler (Tekman)'de 4.87 mg/l ve Çimenözü (Çat)'nde 9.16 mg/l olarak ölçülmüş ve her iki bölge de I. kalite sınıfında (sınır: <200 mg/l) yer almıştır. SO₄ konsantrasyonları Yiğitler (Tekman)'de 4.19 mg/l, Çimenözü (Çat)'nde 4.88 mg/l olup, her iki değer de I. kalite sınıfına (sınır: <200 mg/l) uygundur.

Demir (Fe) konsantrasyonu Çimenözü (Çat)'nde 183 mg/l olarak belirlenmiş ve IV. kalite (sınır: >5 mg/l) olarak sınıflandırılmıştır. Manganez (Mn) konsantrasyonu Çimenözü (Çat)'nde 972 mg/l olarak ölçülmüş ve bu da IV. kalite sınıfına (sınır: >3000 mg/l) girmektedir. Bor (B) konsantrasyonu Yiğitler (Tekman)'da 10.65 mg/l, Çimenözü (Çat)'da ise 54.71 mg/l olup, bu parametreye göre her iki bölge de III. kalite (sınır: <1000 mg/l) sınıfındadır.

Sonuç olarak, Yiğitler (Tekman) yüzey suyu genel olarak I-II. kalite sınıfında yer alırken, Çimenözü (Çat) yüzey suyu demir ve manganez konsantrasyonları nedeniyle

IV. kalite sınıfına girmektedir. Çat bölgesindeki sular içme ve kullanma amacıyla takip edilmeli ve gerekli tedbirler alınmalıdır.

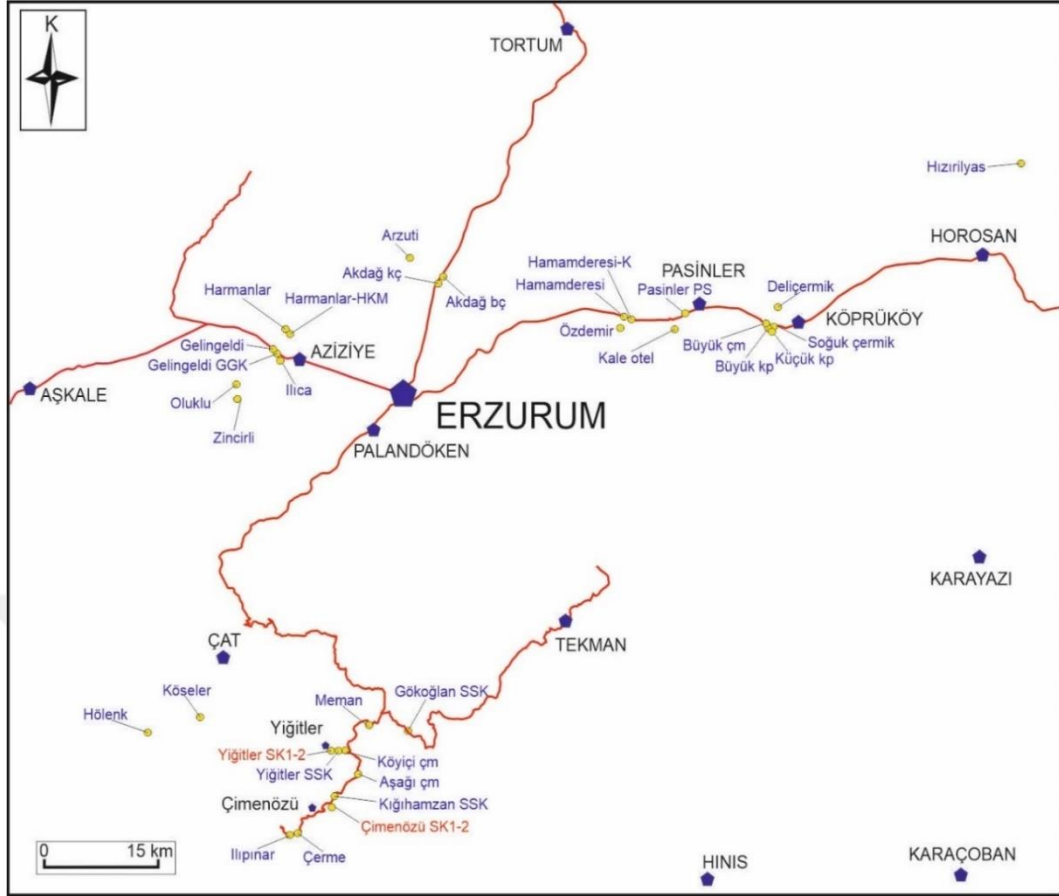
Tablo 37. Su kirliliği kontrolü yönetmeliği (2004)

Su Kalite Parametreleri	Su Kalite Sınıfları			
	I	II	III	IV
Sıcaklık (°C)	25	25	30	>30
Ph	6.5-8.5	6.5-8.5	6.0-9.0	6.0-9.0 dışında
Çözünmüş oksijen (mg O ₂ /l) ^a	8	6	3	<3
Oksijen doygunluğu (%) ^a	90	70	40	<40
Klorür iyonu (mg Cl/l)	25	200	400 ^b	>400
Sülfat iyonu (mg SO ₄ /l)	200	200	400	>400
Amonyum azotu (mg NH ₄ ⁺ -N/l)	0.2 ^c	1 ^c	2 ^c	>2
Nitrit azotu (mg NO ₂ ⁻ -N/l)	0.002	0.01	0.05	>0.05
Nitrit azotu (mg NO ₃ ⁻ -N/l)	5	10	20	>20
Toplam fosfor (mg P/l)	0.02	0.16	0.65	>0.65
Toplam çözünmüş madde (mg/l)	500	1500	5000	>5000
Renk (Pt-Co birimi)	5	50	300	>300
Sodyum (mg Na ⁺ /l)	125	125	250	>250
Civa (µg Hg/L)	0.1	0.5	2	>2
Kadmiyum (µg Cd/l)	3	5	10	>10
Kurşun (µg Pb/l)	10	20	50	>50
Arsenik (µg As/l)	20	50	100	>100
Bakır (µg Cu/l)	20	50	200	>200
Krom (toplam) (µg Cr/l)	20	50	200	>200
Krom (µg Cr ⁶⁺ /l)		20	50	>50
Kobalt (µg Co/l)	10	20	200	>200
Nikel (µg Ni/l)	20	50	200	>200
Çinko (µg Zn/l)	200	500	2000	>2000
Siyanür (toplam) (µg CN/l)	10	50	100	>100
Florür (µg F/l)	1000	1500	2000	>2000
Serbest klor (µg Cl ₂ /l)	10	10	50	>50
Sülfür (µg S/l)	2	2	10	>10
Demir (µg Fe/l)	300	1000	5000	>5000
Mangan (µg Mn/l)	100	500	3000	>3000
Bor (µg B/l)	1000 ^d	1000 ^d	1000 ^d	>1000
Selenyum (µg Se/l)	10	10	20	>20
Baryum (µg Ba/l)	1000	2000	2000	>2000
Alüminyum (mg Al/l)	0.3	0.3	1	>1
Radyoaktivite (pCi/l)	-	-	-	-
Alfa-aktivitesi	1	10	10	>10
Beta-aktivitesi	10	100	100	>100

5.1.4. Erzurum yöresi jeotermal suların karşılaştırılması

Erzurum il merkezi ve ilçelerinde yer alan jeotermal su kaynaklarının konumlarını gösteren harita Şekil 75’de gösterilmiştir. Ayrıca, Erzurum yöresindeki jeotermal suları karşılaştırmak için, literatürde mevcut analizlere ait ortalama değerler ile incelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) sularına ait ortalama değerler Tablo 38’de verilmiştir.

Erzurum ilindeki jeotermal kaynakların su kimyasal özellikleri, literatürde yer alan ortalama değerler ile incelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) bölgelerinden alınan örneklerin ortalama değerleri karşılaştırılarak Şekil 76’da sunulmuştur.



Şekil 75. Erzurum yöresi jeotermal suları gösteren harita

Tablo 38. Erzurum yöresindeki jeotermal sulara ait ortalama analiz değerleri

Ölçülen	Sıcaklık	Ph	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃
Ilıpınar SSK	29.00	6.80	21100.00	1154.00	2.30	3158.00	180.00	429.00
Çerme SSK	34.65	6.98	19600.00	1139.50	143.50	3181.00	48.50	622.50
Çimenözü SK1-2	49.33	8.44	1232.50	114.54	52.18	70.32	12.46	667.95
Kığıhamzan SSK	56.60	6.64	1275.00	105.50	48.85	67.00	10.85	578.00
Yiğitler SK1-2	45.80	7.68	1354.50	163.53	61.43	36.84	8.48	770.43
Yiğitler SSK	51.60	6.46	1515.00	190.00	55.00	40.00	11.00	942.00
Köyiçi çermiği	54.00	6.75	1.0.10 ⁻³	94.80	12.60	182.10	108.50	1001.56
Aşağı çermik	49.00	6.68	1.0.10 ⁻³	74.79	12.80	165.70	68.10	787.45
Memar SSK	53.00	6.70	1407.00	194.00	60.00	38.50	9.00	912.00
Gökoğlan SSK	34.50	6.54	1829.00	185.00	98.00	76.25	15.50	1166.00
Hölenk	32.5	6.40	1.2.10 ⁻³	169.48	19.60	356.80	38.10	1533.30
Köseler	32.00	6.65	4419.54	476.00	38.88	391.00	11.70	1647.00
Zincirli	39.00	6.50	8.5.10 ⁻³	65.50	54.60	1713.20	285.60	1951.50
Oluklu	39.00	6.50	8.4.10 ⁻³	61.60	37.80	1731.35	226.50	1876.50
Ilıca	36.76	6.60	7003.33	99.71	62.40	1023.03	41.52	1944.42
Gelingeldi GSK	31.82	7.19	6173.33	90.82	64.44	1304.17	52.19	2183.95
Gelingeldi	38.00	7.40	3.8.10 ⁻³	218.60	78.20	891.40	181.40	2022.50
Harmanlar HKM	37.15	6.91	5898.67	98.58	76.70	1299.91	40.36	2298.42
Harmanlar	41.00	6.40	4.0.10 ⁻³	176.60	72.20	895.50	221.50	1830.61
Akdağ küçük çermik	29.5	6.45	2.0.10 ⁻³	80.00	48.40	485.30	65.40	1546.96
Akdağ büyük çermik	27.5	6.60	1.9.10 ⁻³	51.80	83.40	456.40	82.50	1653.95
Arzuti	34.5	6.55	1.4.10 ⁻³	12.10	23.10	483.30	61.80	1153.88
Özdemir	22.92	6.27	1497.33	100.43	61.03	58.70	9.93	740.33
Hamanderesi	44.00	6.55	1.4.10 ⁻³	12.10	23.10	483.30	61.80	1153.88
Hamamderesi-K	34.08	6.45	5075.25	287.57	170.93	382.67	44.69	1895.83
Kale otel	39.00	6.20	3.95.10 ⁻³	295.00	101.00	910.80	138.03	2022.22
Pasinler PS	38.82	6.30	5762.91	183.42	89.77	871.60	71.95	1682.55
Büyük kaplıca	41.00	6.40	4.0.10 ⁻³	176.60	72.20	895.50	221.50	1830.61
Büyük çermik	39.00	6.55	8.3.10 ⁻³	56.10	77.00	1704.30	292.50	1985.70
Küçük kaplıca	38.00	7.40	3.8.10 ⁻³	218.60	78.20	891.40	181.40	2022.50
Soğuk çermik	39.00	6.20	3.95.10 ⁻³	73.83	25.50	488.30	124.50	2022.22
Deliçermik	39.00	6.20	3.95.10 ⁻³	73.83	25.50	488.30	124.50	2022.22
Hızırilyas	49.00	6.90	3.16.10 ⁻³	54.03	38.80	1716.10	23.06	3890.03

Tablo 38. (Devamı)

Ölçülen	SO ₄	Cl	F	NO ₃	NH ₄	Al	Mn	Fe	Si
Ilıpınar SSK	1790.0	6500.00	-	-	-	-	-	-	8.60
Çerme SSK	1941.0	6128.50	-	-	3.70	-	0.13	4.66	31.00
Çimenözü SK1-2	29.82	61.57	0.94	4.04	0.04	25.56	35.38	587.14	44.30
Kığıhamzan SSK	57.70	73.50	-	-	2.52	-	0.05	0.95	59.50
Yiğitler SK1-2	43.65	22.46	0.70	3.45	0.34	14.40	110.20	1036.88	37.00
Yiğitler SSK	77.68	40.00	-	-	-	-	0.13	1.91	45.00
Köyiçi çermiği	24.20	6.20	0.36	48.40	0.03	1.12	0.01	0.09	-
Aşağı çermik	14.20	6.80	0.25	28.50	-	0.83	0.05	0.82	-
Meman SSK	75.30	35.00	-	-	3.10	-	0.18	1.80	47.00
Gökoğlan SSK	81.50	68.50	-	-	1.24	-	0.04	0.45	57.00
Hölenk	49.18	2.71	0.88	50.20	0.00	1.25	0.50	6.40	-
Köseler	333.12	367.78	0.50	0.01	0.08	-	-	-	-
Zincirli	4.10	2028.50	0.83	10.40	0.88	2.15	0.65	5.70	-
Oluklu	2.50	1988.20	0.83	9.61	1.65	0.24	0.98	1.22	-
Ilıca	2.67	1534.39	-	-	-	-	-	-	99.00
Gelingeldi GKG	4.31	1069.67	-	-	-	-	-	-	71.00
Gelingeldi	8.30	984.63	0.45	0.03	0.01	0.13	0.60	5.51	-
Harmanlar HKM	4.56	1053.93	-	-	-	-	-	-	107.00
Harmanlar	9.60	1051.30	0.28	11.80	0.15	0.91	1.75	2.80	-
Akdağ küçük çermik	8.65	212.80	0.85	3.70	-	2.08	0.26	111.60	-
Akdağ büyük çermik	13.40	185.40	1.09	0.83	-	2.14	0.81	18.40	-
Arzuti	20.10	205.18	1.06	0.51	-	0.12	-	1.31	-
Özdemir	2.56	20.47	0.33	0.32	2.72	-	-	-	141.70
Hamanderesi	20.10	205.18	1.06	0.51	-	0.12	-	1.31	-
Hamanderesi-K	0.57	532.28	0.47	1.40	7.36	-	-	-	182.13
Kale otel	11.20	1085.50	0.40	5.60	0.24	0.29	0.02	24.90	-
Pasinler PS	5.58	1112.18	1.25	1.17	10.63	-	-	-	169.31
Büyük kaplıca	9.60	1051.30	0.28	11.80	0.15	0.91	1.75	2.80	-
Büyük çermik	3.10	2076.40	0.03	1.01	0.83	0.13	0.96	3.85	-
Küçük kaplıca	8.30	984.63	0.45	0.03	0.01	0.13	0.60	5.51	-
Soğuk çermik	25.80	514.70	0.50	3.10	0.24	0.29	0.02	18.80	-
Deliçermik	25.80	514.70	0.50	3.10	0.24	0.29	0.02	18.80	-
Hızırilyas	155.12	512.60	0.50	0.30	0.00	2.99	0.01	0.26	-

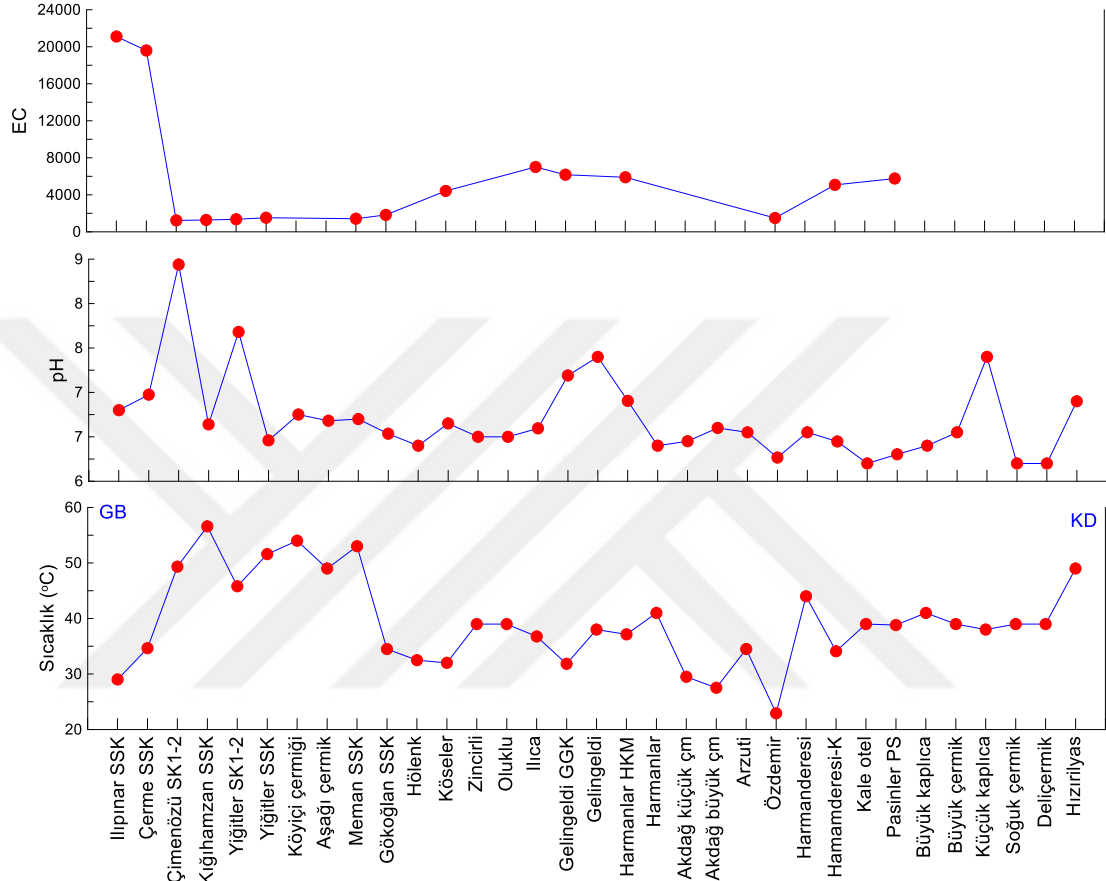
Kaynaklar: Özdemir. 1974; Ünal. 2003; Taşkıran. 2006; Emel vd.. 2008; Toy vd.. 2010; Hatipoğlu-Temizel. 2014; Bayram. 2015

Erzurum ilindeki jeotermal kaynakların literatürde yer alan ortalama sıcaklık, pH ve EC değerleri ile incelenen Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) bölgelerinden alınan örneklerin ortalama değerleri karşılaştırılarak Şekil 76'da sunulmuştur.

Sıcaklık açısından, Çimenözü SK1-2, Kığıhamzan SSK, Yiğitler SK1-2, Yiğitler SSK, Köyiçi çermiği, Aşağı çermik, Meman, Hamanderesi ve Hızırilyas bölgelerindeki sular en yüksek sıcaklıklara sahipken; Ilıpınar, Çerme, Akdağ küçük çermik, Akdağ büyük çermik ve Özdemir bölgelerindeki sular en düşük sıcaklık değerleri gösterirler (Şekil 76).

pH değeri bakımından, Çimenözü SK1-2, Yiğitler SK1-2, Gelingeldi GKG, Gelingeldi, Küçük kaplıca ve Hızırilyas bölgelerindeki sular en yüksek pH değerlerine sahipken; Yiğitler SSK, Özdemir, Kale Otel, Deliçermik ve Hızırilyas bölgelerindeki sular en düşük pH değerlerine sahiptir. Bu durum, söz konusu bölgelerdeki suların alkali özellikte olduğunu göstermektedir (Şekil 76).

Elektriksel iletkenlik (EC) açısından, Ilıpınar ve Çerme bölgelerindeki sular en yüksek EC değerlerine; Çimenözü SK1-2, Kığıhamzan, Yiğitler SK1-2, Yiğitler, Meman, Gökoğlan ve Özdemir bölgelerindeki sular ise en düşük EC değerlerine sahiptir. Yüksek EC değeri, suda çözünmüş madde miktarının fazla olduğunu gösterir (Şekil 76).



Şekil 76. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama sıcaklık (°C), pH ve EC değerleri

Erzurum yöresindeki jeotermal suların ortalama Ca, Mg, Na ve K iyon konsantrasyonları Şekil 77'de sunulan diyagramlar aracılığıyla karşılaştırılmıştır.

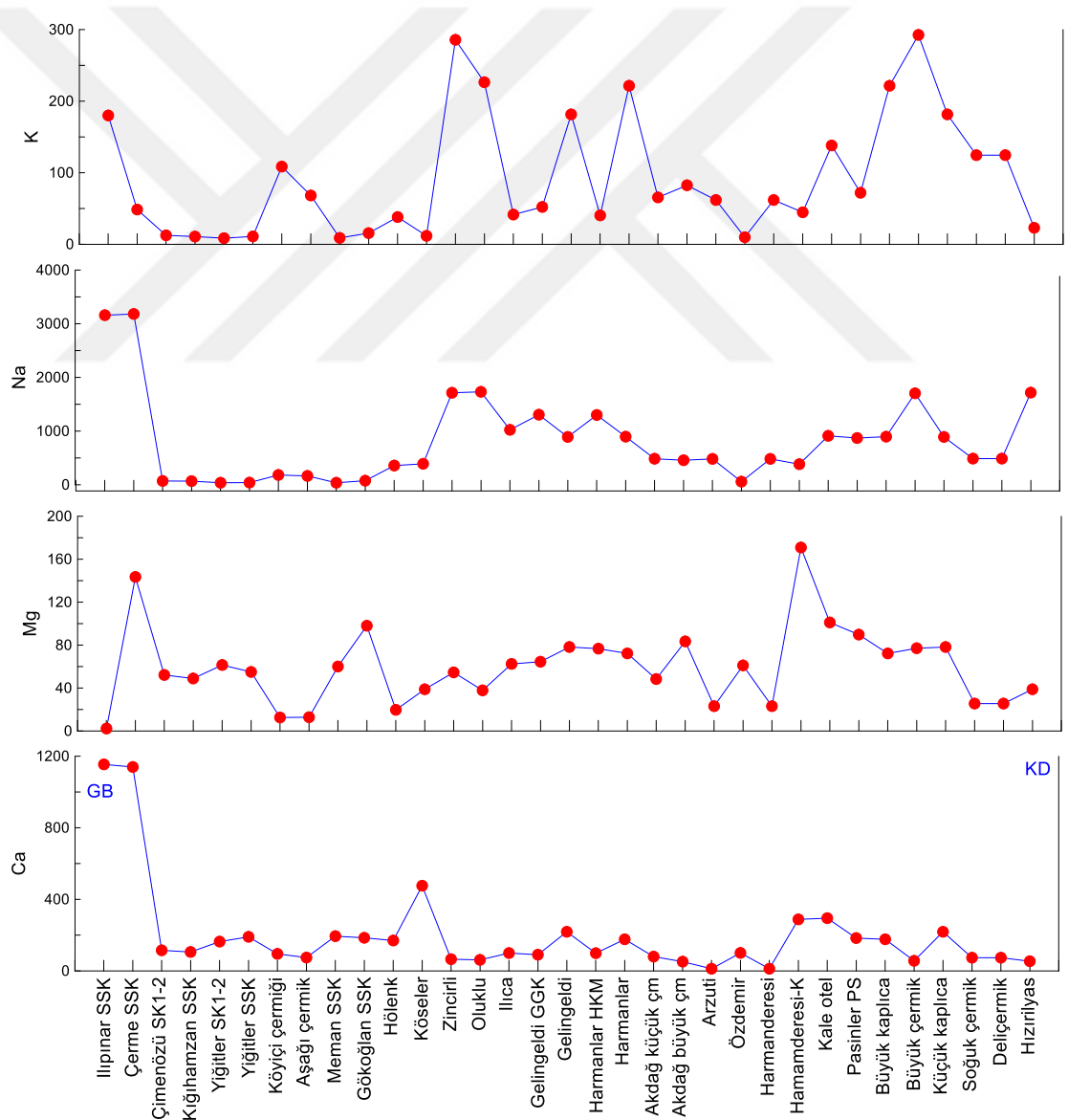
Kalsiyum (Ca) iyonu konsantrasyonları incelendiğinde, Ilıpınar, Çerme, Köseler, Hamamderesi-K, Kale Otel ve Küçük kaplıca bölgelerindeki sular en yüksek Ca içeriğine sahipken; Zincirli, Oluklu, Arzuti, Hamamderesi, Büyük çermik, Soğuk Çermik, Deliçermik ve Hızırılıyas bölgelerindeki sular en düşük Ca içeriğine sahiptir (Şekil 77).

Magnezyum (Mg) iyonu konsantrasyonları açısından değerlendirildiğinde, Çerme, Gelingeldi GGK, Gökoğlan SSK, Hamamderesi-K, Kale Otel, Pasinler PS, Büyük kaplıca, Büyük çermik ve Küçük kaplıca bölgelerindeki sular en yüksek Mg içeriğine sahipken; Ilıpınar, Köyiçi Çermiği, Aşağı Çermik, Soğuk Çermik, Arzuti,

Hamanderesi, Deliçermik ve Hızırilyas bölgelerindeki sular en düşük Mg içeriğine sahiptir (Şekil 77).

Sodyum (Na) iyonu konsantrasyonları incelendiğinde, Ilıpınar, Çerme, Zincirli, Oluklu, Hızırilyas ve Büyük çermik bölgelerindeki sular en yüksek Na içeriğine sahipken; Çimenözü SK1-2, Kığıhamzan, Yiğitler SK1-2, Yiğitler SSK, Meman, Gökoğlan ve Özdemir bölgelerindeki sular en düşük Na içeriğine sahiptir (Şekil 77).

Potasyum (K) iyonu konsantrasyonları açısından değerlendirildiğinde, Ilıpınar, Zincirli, Oluklu, Gelingeldi GSK, Harmanlar, Büyük kaplıca, Büyük çermik ve Küçük kaplıca bölgelerindeki sular en yüksek K içeriğine sahipken; Çimenözü SK1-2, Kığıhamzan, Yiğitler SK1-2, Yiğitler SSK, Meman, Gökoğlan, Köşeler, Özdemir ve Hızırilyas bölgelerindeki sular en düşük K içeriğine sahiptir (Şekil 77).

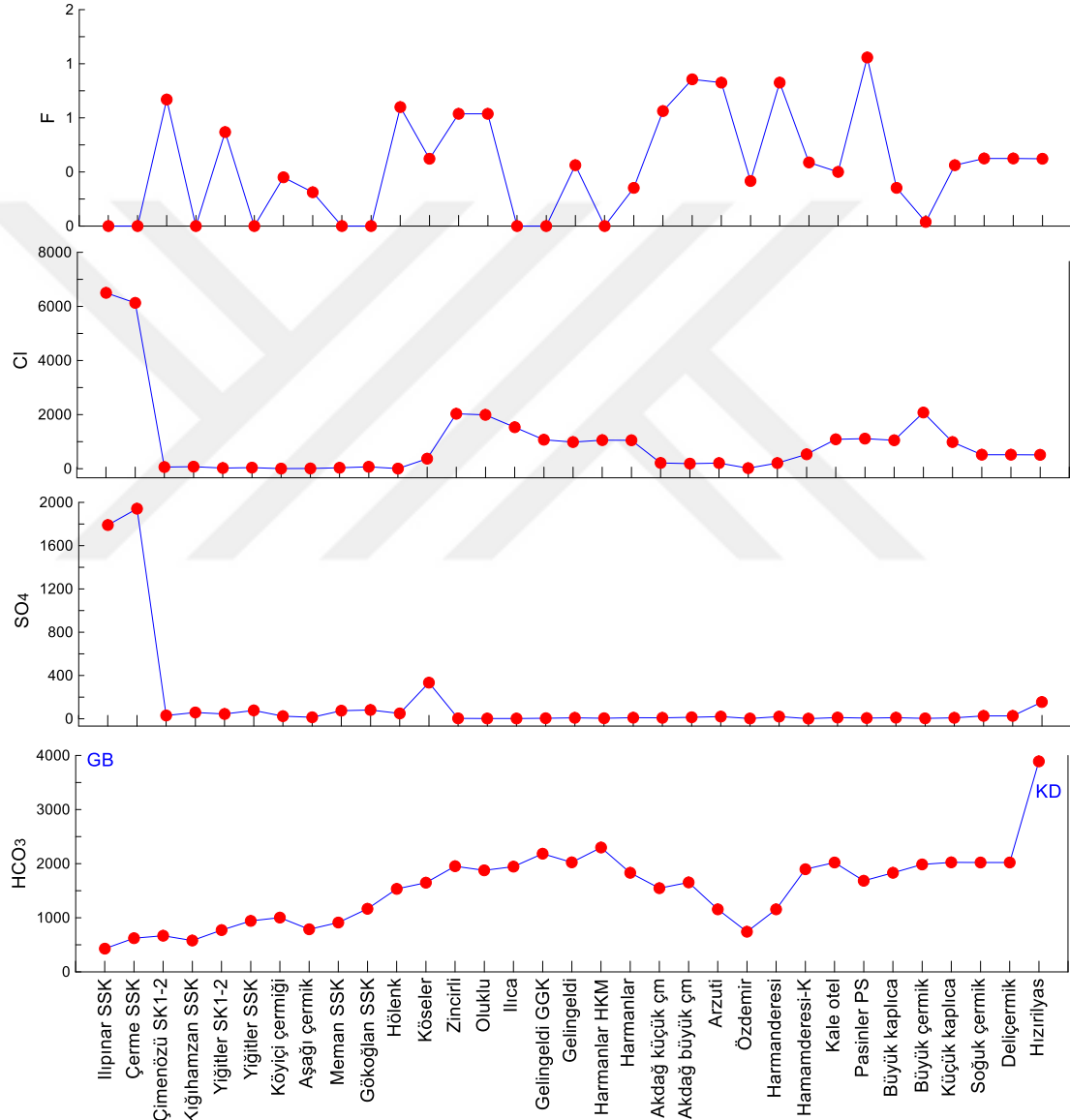


Şekil 77. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama Ca, Mg, Na ve K değerleri

Erzurum yöresindeki jeotermal sular bikarbonat (HCO_3), sülfat (SO_4), klorür (Cl)

ve florür (F) iyon konsantrasyonları açısından incelendiğinde, Şekil 78'de sunulan diyagramlarda belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir.

Bikarbonat (HCO_3) iyonu konsantrasyonları, Hızırilyas yöresindeki sularda en yüksek seviyelere ulaşırken; Ilıpınar, Çerme, Özdemir, Çimenözü SK1-2, Kığıhamzan ve Yiğitler SK1-2 bölgelerindeki sularda en düşük seviyelerdedir. Coğrafi olarak batıdan doğuya (GB'dan KD'ya) doğru incelendiğinde, HCO_3 iyon konsantrasyonlarında sistematik bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 78).



Şekil 78. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama HCO_3 , SO_4 , Cl ve F değerleri

Sülfat (SO_4) iyonu konsantrasyonları ise Ilıpınar, Çerme, Köseler ve Hızırilyas bölgelerindeki sularda en yüksek seviyelerdedir (Şekil 78).

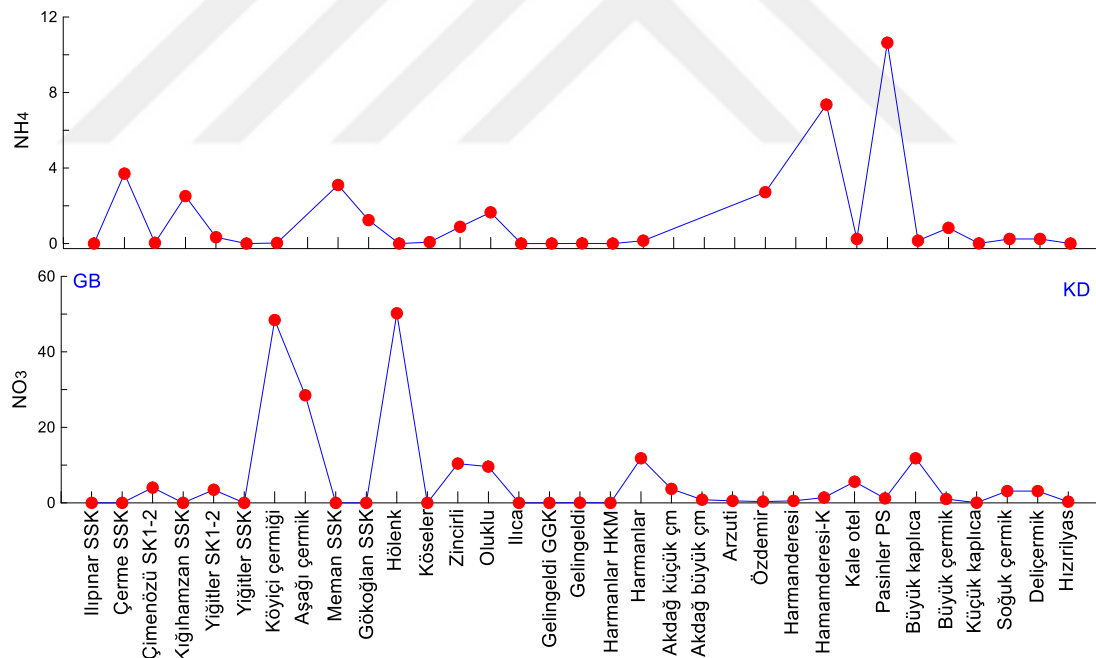
Klorür (Cl) iyonu bakımından, Ilıpınar, Çerme ve Büyük çermik bölgelerindeki sular en yüksek Cl içeriğine sahipken; Çimenözü SK1-2, Kığıhamzan, Yiğitler SK1-2,

Yiğitler SSK, Köyiçi çermiği, Aşağı çermik, Meman, Gökoğlan, Hölenk, Özdemir ve Köşeler bölgelerindeki sular en düşük Cl içeriğine sahiptir (Şekil 78).

Florür (F^-) iyonu konsantrasyonları incelendiğinde ise Çimenözü SK1-2, Yiğitler SK1-2, Hölenk, Köşeler, Zincirli, Oluklu, Akdağ Küçük Çermik, Akdağ Büyük Çermik, Arzuti, Hamanderesi, Pasinler PS ve Büyük çermik bölgelerindeki sular en yüksek F^- içeriğine sahipken; Kığıhamzan, Yiğitler, Meman, Gökoğlan, Ilıca, Gelingeldi GGK ve Büyük Çermik, Harmanlar HKM bölgelerindeki sular en düşük F^- içeriğine sahiptir (Şekil 78).

Erzurum yöresindeki jeotermal suların kimyasal bileşimleri içerisinde yer alan nitrat (NO_3) ve amonyum (NH_4) iyon konsantrasyonları, Şekil 79'da sunulan diyagramlar aracılığıyla incelenmiştir.

Nitrat (NO_3) iyonu konsantrasyonları, Köyiçi Çermiği, Aşağı Çermik, Hölenk, Zincirli, Oluklu, Kale Otel, Harmanlar ve Büyük kaplıca bölgelerindeki sularda en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu bölgelerdeki sular, diğer bölgelerdeki sulara kıyasla daha yüksek miktarda nitrat içermektedir (Şekil 79).



Şekil 79. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama NO_3 ve NH_4 değerleri

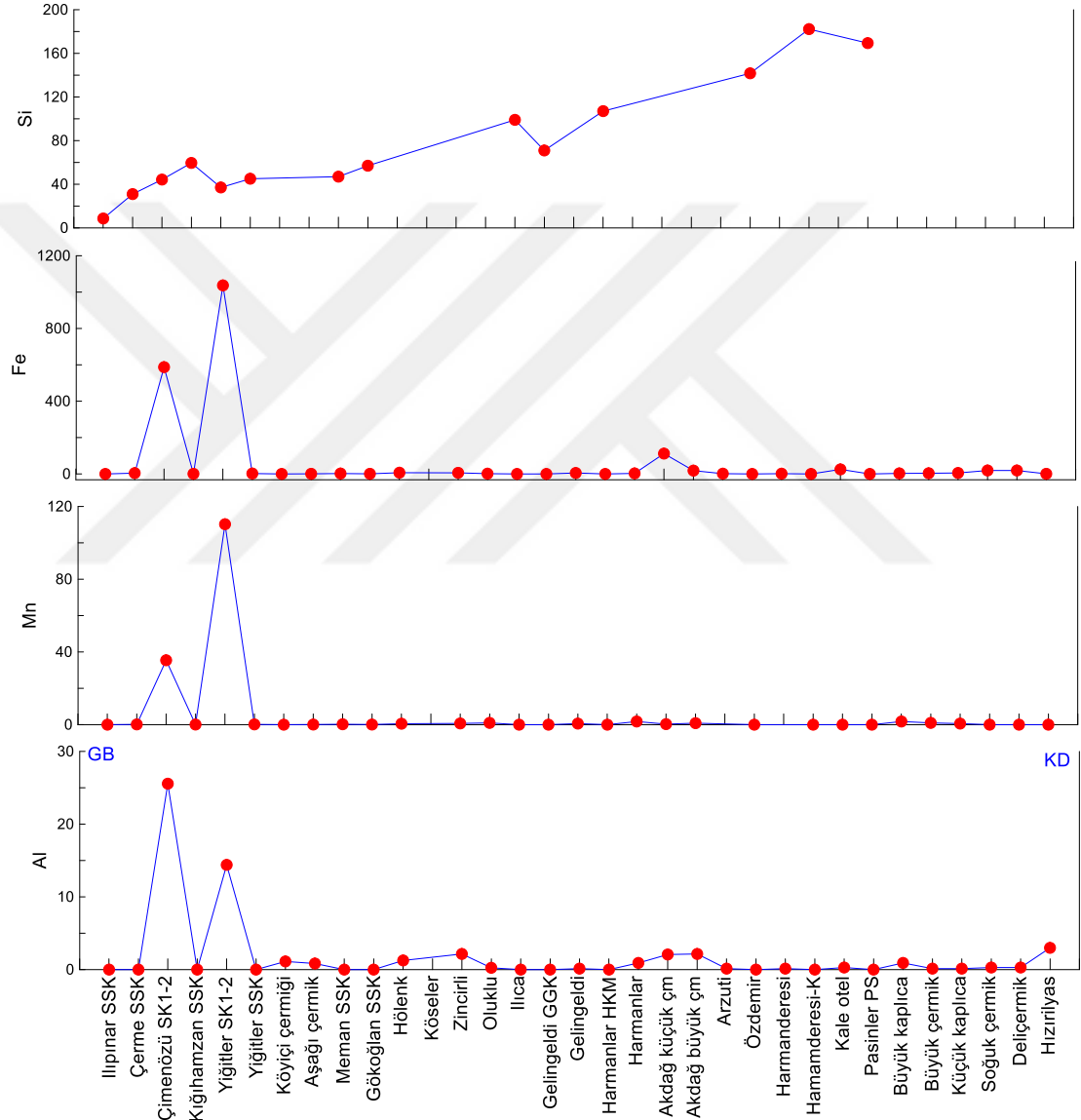
Amonyum (NH_4^+) iyonu konsantrasyonları ise Çerme, Kığıhamzan, Meman, Zincirli, Oluklu, Özdemir ve Hamamderesi-K bölgelerindeki sularda en yüksek seviyelere ulaşmaktadır (Şekil 79). Bu durum, söz konusu bölgelerdeki suların organik madde bozunması gibi süreçler sonucu daha fazla amonyum içerdiğini göstermektedir.

Erzurum yöresindeki jeotermal suların kimyasal bileşimleri içerisinde yer alan alüminyum (Al), manganez (Mn), demir (Fe) ve silisyum (Si) elementlerinin

konsantrasyonları, Şekil 80'de sunulan diyagramlar aracılığıyla incelenmiştir.

Alüminyum (Al) elementi konsantrasyonları, Çimenözü SK1-2, Yiğitler SK1-2, Hızırilyas, Zincirli, Akdağ Küçük Çermik ve Akdağ Büyük Çermik bölgelerindeki sulara en yüksek seviyelere ulaşmaktadır (Şekil 80). Bu bölgelerdeki sular, diğer bölgelerdeki sulara kıyasla daha yüksek miktarda alüminyum içermektedir.

Manganez (Mn) elementi konsantrasyonları ise Çimenözü SK1-2 ve Yiğitler SK1-2 bölgelerindeki sulara en yüksek seviyelere ulaşmaktadır (Şekil 80).



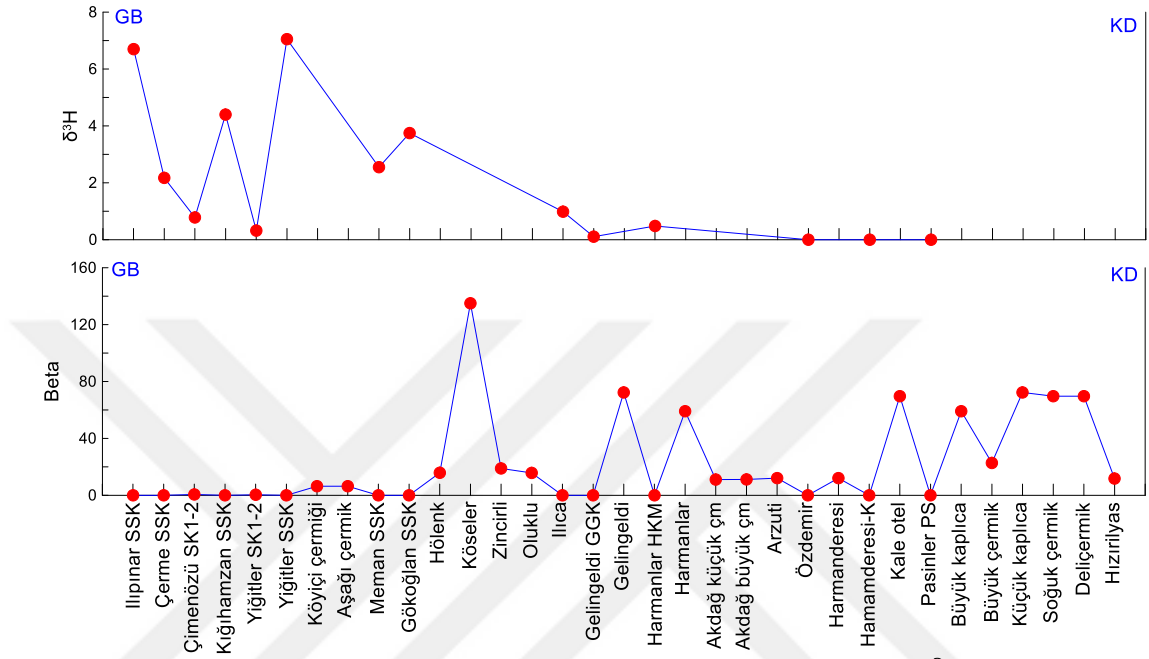
Şekil 80. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama Al, Mn, Fe ve Si değerleri

Demir (Fe) açısından değerlendirildiğinde, Çimenözü SK1-2, Yiğitler SK1-2 ve Akdağ Küçük Çermik bölgelerindeki sular en yüksek demir içeriğine sahiptir (Şekil 80).

Silisyum (Si) elementi konsantrasyonları incelendiğinde ise Özdemir, Hamanderesi-K, Kale Otel, Harmanlar HKM, Ilıca ve Pasinler PS bölgelerindeki sular

en yüksek silisyum içeriğine sahipken; Ilıpınar ve Çerme bölgelerindeki sular en düşük silisyum içeriğine sahiptir (Şekil 80).

Erzurum yöresindeki jeotermal suların izotopik bileşimleri, özellikle beta radyoaktivite ve trityum (^3H) izotopu açısından incelendiğinde, Şekil 81'de sunulan diyagramlarda belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir.



Şekil 81. Erzurum bölgesindeki jeotermal sulara ait ortalama Beta ve ^3H değerleri

Beta radyoaktivite açısından, Köseler, Gelingeldi, Harmanlar HKM, Kale Otel, Büyük Kaplıca, Küçük Kaplıca, Soğuk Çermik, Deliçermik ve Hızırilyas bölgelerindeki sular en yüksek beta radyoaktivite değerlerine sahipken; Ilıpınar, Çerme, Çimenözü SK1-2, Kığıhamzan, Yiğitler SK1-2, Yiğitler, Meman, Gökoğlan, Ilıca, Gelingeldi GGK, Harmanlar HKM, Özdemir, Hamamderesi-K ve Pasinler PS bölgelerindeki sular en düşük beta radyoaktivite değerlerine sahiptir (Şekil 81).

Trityum (^3H) izotopu açısından incelendiğinde ise Ilıpınar, Çerme, Kığıhamzan ve Meman bölgelerindeki sular en yüksek trityum içeriğine sahipken; Yiğitler SK1-2 ve Gelingeldi GGK bölgelerindeki sular en düşük trityum içeriğine sahiptir. Coğrafi olarak batıdan doğuya (GB'dan KD'ya) doğru incelendiğinde, trityum izotop konsantrasyonlarında belirgin bir düşüş olduğu görülmektedir (Şekil 81).

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmanın temel amacı, Erzurum ili sınırları içinde yer alan Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal sahalarındaki jeotermal su kaynaklarının ve çevresinin hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özelliklerini detaylı bir şekilde incelemek ve bu su kaynaklarının kökenini belirlemektir. Bu hedef doğrultusunda, saha içerisindeki jeotermal suların oluşum mekanizması, fiziksel ve kimyasal özellikleri, radyoaktif madde içerikleri ve doğal izotop bileşimleri çeşitli analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Elde edilen veriler, aynı alanlarda bu çalışmada analizleri yapılmış soğuk su (çeşme) kaynakları ve yüzey (dere) sularıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kimyasal sonuçlara dayalı jeotermometreler kullanılarak jeotermal suların rezervuar sıcaklığı tahmin edilmiş ve alanın jeotermal potansiyeli değerlendirilmiştir. Ayrıca, çalışılan Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) jeotermal suları, Erzurum yöresindeki diğer çalışılmış jeotermal sular ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bulguları aşağıda sunulmuştur.

1. Erzurum ilinin Tekman ve Çat ilçeleri içinde yer alan Çimenözü ve Yiğitler Jeotermal Sahaları ve çevresinde yaklaşık 143 km²'lik bir alanda kapsamlı jeolojik ve hidrojeolojik araştırmalar yürütülmüştür. Çalışma alanındaki birimler yaşlıdan gence doğru sırasıyla Sahvalat/Hınıs Ofiyolitleri, Kösehan/Kozlu Formasyonu, Memişkomu Formasyonu, Ahlat Formasyonu, Ağakoca Formasyonu, Solon Formasyonu, Bingöldağı Volkanitleri, Traverten ve Alüvyonlardan oluşur.

2. Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fay zonlarının hemen kuzeydoğusunda yer alan inceleme alanındaki jeotermal su kaynakları, tektonizma ve volkanizmanın etkisinde kalmıştır. Yiğitler jeotermal sahasındaki jeotermal su kaynakları, KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı faylar tarafından oluşan ve bu fay zonlarına paralel ikincil makaslama fayların etkisiyle yüzeye çıkmaktadır. Çimenözü jeotermal sahasında, yüzeyde bir vadi boyunca uzanan ve traverten çökeltileriyle karakterize olan jeotermal su kaynakları bulunmaktadır. Bu jeotermal su kaynaklarının yüzeye çıkışında, vadi boyunca uzanan fay (veya kırık sistemleri) önemli bir rol oynamaktadır.

3. Yiğitler jeotermal sahasında iki kaynaktan Ağustos ve Kasım aylarında alınan su örneklerinin analiz sonuçlarına göre, sıcaklık değerleri 48.8-47 ve 44.5-42.9 °C, pH değerleri 8.33-7.03 ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri 950-1490 ve 1428-1550 µS/cm arasında değişmektedir. Alan içerisindeki soğuk su kaynağında yapılan ölçümlerde ise sıcaklık 10.9-4 °C, pH 8.62-8.59 ve EC 52-60 µS/cm olarak

belirlenmiştir. Yüzey suyunda ise sıcaklık 11.5-13 °C, pH 8.61-8.6 ve EC 271-289 µS/cm aralığında değerler elde edilmiştir.

4. Çimenözü jeotermal sahasında iki kaynaktan Ağustos ve Kasım aylarında alınan su örneklerinin analiz sonuçlarına göre, sıcaklık değerleri 52.1-45.1 ve 54-46.1 °C, pH değerleri 8.2-8.19 ve 8.68-8.69 ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri 925-1415 ve 1250-1340 µS/cm arasında değişmektedir. Alan içerisindeki soğuk su (çeşme) kaynağında yapılan ölçümlerde ise sıcaklık 10.2-4.2 °C, pH 7.85-7.84 ve EC 74-75 µS/cm olarak belirlenmiştir. Yüzey suyunda ise sıcaklık 11.8-1.5 °C, pH 7.65-7.66 ve EC 247-278 µS/cm aralığında değerler elde edilmiştir.

5. Piper Diyagramına göre, Yiğitler ve Çimenözü alanlarındaki jeotermal sular, soğuk sular ve yüzey sularının tümünde, alkali toprak elementler (Ca+Mg) alkali elementlerden (Na+K); zayıf asit kökleri (CO₃+HCO₃) ise güçlü asit köklerinden (Cl+SO₄) daha fazladır. Tüm sular kalsiyum bikarbonatlı sular alanında yer alırlar.

6. Yiğitler jeotermal su kaynaklarından YSK-1A nolu örnek Mg-Ca-Na-HCO₃-SO₄ sular sınıfında yer alırken, diğer sıcak su kaynakları ve soğuk sular Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄'lü sular sınıfında yer almaktadır. Yüzey sularından YD-1A nolu örnek Ca-Mg-K-HCO₃-Cl sınıfında yer alırken, YD-1K nolu örnek Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄'lü sular sınıfında yer almaktadır.

7. Çimenözü jeotermal su kaynaklarından ÇSK-2A nolu örnek Mg-Ca-Na-HCO₃-Cl sınıfında yer alırken, diğer sıcak su kaynakları Ca-Mg-Na-HCO₃-Cl'lü sular sınıfında yer alırlar. Soğuk su kaynakları Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄'lü sular ve yüzey suları ise Ca-HCO₃-Cl'lü sular sınıfındadır.

8. Yiğitler ve Çimenözü alanlarındaki jeotermal su numuneleri Schoeller (1955) su sınıflamasına göre “olağan klorürlü su-olağan sülfatlı su-hiperkarbonatlı su” sınıfına girmektedir. Yiğitler soğuk su kaynakları “olağan klorürlü su-olağan sülfatlı su-hipokarbonatlı su” sınıfında yer almaktadır ve yüzey suları ise “olağan klorürlü su-olağan sülfatlı su-olağan karbonatlı su” olarak sınıflandırılmıştır.

9. Yiğitler ve Çimenözü alanlarındaki jeotermal sularında, Schoeller yarı logaritmik diyagramına göre her iki jeotermal su kaynağının benzer kökenli olduğu, soğuk ve yüzey sularının ise kendi aralarında benzer kökenli oldukları belirlenmiştir. Suların elektriksel iletkenlik (EC) değerleri yüksek olup, Kaynak 1 ve Kaynak 2'deki jeotermal sular kullanılamaz özellikteyken, diğer sular kullanılabilir ve iyi özelliktedir. Yöredeki jeotermal suların pH değerleri genellikle 7'nin üzerinde olup, Yiğitler alanında 7.03 ile 8.30 arasında, Çimenözü alanında 7.65 ile 8.69 arasında değişkenlik göstermektedir.

10. Wilcox diyagramına göre, Yiğitler ve Çimenözü alanlarındaki jeotermal su kaynakları iyi-kullanılabilir su alanında yer alırken, soğuk su kaynakları ve yüzey suları çok iyi-iyi kullanılabilir su alanında yer alır.

11. ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramına göre, Yiğitler (Tekman) yöresindeki jeotermal su kaynakları C3-S1, soğuk su kaynakları C2-S1 ve yüzey suları da C3-S1 sınıflarında yer almaktadır. Çimenözü (Çat) yöresindeki jeotermal su kaynakları ve yüzey suları C3-S1, soğuk su kaynakları ise C2-S1 sınıflarında yer almaktadır. SAR değerleri incelendiğinde, tüm suların sodyum değerleri düşük ve az sodyum tehlikesine (S1) sahip olduğu görülmektedir. EC değerlerine göre, Yiğitler ve Çimenözü alanlarındaki jeotermal su kaynakları ve yüzey suları tuzlu sular (C3), soğuk su kaynakları ise orta tuzlu sular (C2) grubunda yer almaktadırlar.

12. Jeotermal su örneklerinde nitrit (NO_2), nitrat (NO_3), amonyum (NH_4) ve fosfat (PO_4) gibi besin tuzu konsantrasyonları belirlenerek su kalitesi değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Yiğitler su örneklerinin "Kıtaçi Yerüstü Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri"nde belirtilen sınır değerler içerisinde yer aldığını ve su kalitesinin I-II. kalite sınıfında olduğunu göstermektedir. Çimenözü su örneklerinin de "Kıtaçi Yerüstü Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri"nde yer almıştır, ancak yüzey suyu demir ve manganez konsantrasyonları nedeniyle IV. kalite sınıfına girmektedir. Çat bölgesindeki suyun içme ve kullanma amacıyla takip edilmeli ve gerekli tedbirler alınmalıdır.

13. Yiğitler ve Çimenözü jeotermal su örneklerinin mineral doygunluk durumlarını belirlemek amacıyla yapılan hesaplamalar, farklı minerallere göre değişen sonuçlar ortaya koymuştur. Aynı tarihlerden alınan jeotermal su örneklerinde; Mangan, Stronsiyum, Rubidyum, Berilyum ve Baryum mineralleri açısından doygunluk gösterirken, Gümüş, Kadmiyum, Selenyum, Civa ve Kalay mineralleri açısından doygunluk göstermemiştir. Aynı dönemde alınan soğuk kaynak suyu örneği ise hiçbir minerale doygunluk göstermemiştir.

14. Yiğitler jeotermal su örneklerinin alfa değerleri 0.241 ile 0.249 Bq/l arasında değişmektedir. Beta değerleri 0.336 Bq/l ile 0.444 Bq/l arasında değişkenlik göstermektedir. Çimenözü jeotermal su örneklerinin alfa değerleri 0.193 ile 0.406 Bq/l arasında, beta konsantrasyonları ise 0.426 Bq/l ile 0.723 Bq/l arasında değişiklik göstermektedir.

15. Yiğitler jeotermal su örneklerinin trityum (^3H) izotop değerleri 0.32, Çimenözü jeotermal su örneklerinin ise 0.63 ila 0.93 arasında olup, düşük trityum ve orta-yüksek elektriksel iletkenlik (EC) değerleri, jeotermal suların derinlerde uzun süreli

bir dolaşım s¼recine sahip olduğunu ve kayaçlarla etkileşimde bulunduğunu ortaya koymaktadır. Trityum değerlerine g¼re jeotermal sular derin dolaşımlı sular olarak yorumlanmıştır.

16. Yiğitler (Tekman) jeotermal sahası i¼in silis jeotermometreleri kullanılarak, entalpi-silis ve entalpi-klor¼r karışım modelleri ile 55-101 °C arasında değişen hazne kaya sıcaklıkları, ¼imen¼z¼ (¼at) jeotermal sahası i¼in ise 62-107 °C arasında değişen hazne kaya sıcaklıkları hesaplanmıştır.

17. Yiğitler (Tekman) ve ¼imen¼z¼ (¼at) jeotermal sahalarında bulunan Paleozoyik/¼st Kretase yaşlı şahvelet/Hınıs Ofiyolitleri'ni oluşturan peridotit ve gabro gibi kayaçlar, ¼ok d¼ř¼k ge¼irimsizlik ¼zellięi nedeniyle hidrojeolojik a¼ıdan ge¼irimsiz kayaç ¼zellięi taşımaktadırlar. Altere olmamış, masif yapıdaki ¼st Miyosen ve Pliyosen yaşlı Bing¼ldaęı ve Solhan volkanitleri, d¼ř¼k ge¼irgenlikli ¼zellięiyle ¼rt¼ kayaç niteliğindedir. Eosen yaşlı Ağakoca ve Miyosen yaşlı Ahlat Formasyonları yarı ge¼irgen birim ¼zellięine sahiptirler. Eosen yaşlı Memişkomu ve K¼sehasan/Kozlu Formasyonları ile Kuvaterner yaşlı al¼vyon ve travertenler, y¼ksek permeabilite ¼zellikleri ile inceleme alanlarındaki ge¼irgen birimler olup, akifer ¼zellięi g¼stermektedirler. K¼sehasan Formasyonu i¼indeki kire¼tařları, kırık ve ¼atlaklı yapılarıyla jeotermal sular i¼in rezervuar kayaç ¼zellięi taşımaktadır. Bing¼ldaęı ve Solhan lavlarının ¼ıktıęı magma odaları ise ısıtıcı k¼tle ¼zellięi taşımaktadır.

18. Tekman ve ¼at y¼resi jeotermal sularının kimyasal i¼erikleri Kaplıcalar Y¼netmelięi (2004)'ne g¼re değerlendirilmiş olup, bu y¼netmelięe g¼re kaplıca sularında pH (hidrojen iyonu aktivitesi), maj¼r iyonlar (Na, Ca, K, Mg, Cl, SO₄ ve HCO₃) ve bazı iz elementler (Mn, Fe, B, Br, Cu, Zn, As, Ba) i¼in analizlerin yapılması ¼nerilmekte, ancak herhangi bir sınır değeri belirtilmemektedir. İncelenen jeotermal sulardaki Pb, Ni, Al ve Cd iyonlarına ait ¼l¼¼len değerler, y¼netmelikteki Pb, Ni, Al ve Cd iyonları i¼in belirtilen değerlere uyumludur. Ayrıca incelenen sulardaki amonyum (NH₄), nitrit (NO₂) ve nitrat (NO₃) konsantrasyonları, y¼netmelikte verilen sınır değerlerinin altındadır.

19. Yiğitler jeotermal alanındaki Kaynak-1 ve Kaynak-2 jeotermal su kaynaklarının Mg ve HCO₃ değerleri, ¼imen¼z¼ jeotermal alanındaki Kaynak-1 ve Kaynak-2 sıcak su kaynaklarının ise Ca ve HCO₃ değerleri y¼ksektir.

20. Erzurum ilindeki t¼m jeotermal kaynakların su kimyası ¼zellikleri dikkate alındığında, coğrafi olarak batıdan doğuya (GB'dan KD'ya) doğru HCO₃ ve Si iyon konsantrasyonlarında sistematik bir artış, trityum (³H) değerlerinde de sistematik bir d¼ř¼ř g¼zlenmiřtir.

21. Yiğitler (Tekman) ve Çimenözü (Çat) bölgelerindeki jeotermal kaynaklar, sağlık turizmi ve enerji üretimi gibi alanlarda hem ekonomik kalkınmaya hem de çevreye olumlu etki sağlayacaktır. Ancak, tüm jeotermal kaynakların verimli ve uzun vadeli kullanımı için rezervuarın beslenme ve boşalım dengesi dikkatle korunmalıdır. Aksi takdirde, aşırı su çekimi rezervuar basıncının düşmesine yol açabilir ve bu durum, termal suyun azalmasının yanı sıra zeminde çökme ve deformasyon gibi olumsuz jeolojik riskleri beraberinde getirebilir.



KAYNAKLAR

- Aiuppa, A., Belomo, S., Brusca, L., D'Alessandro, W. ve Federico, C. (2003). *Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano mt, applied geochemistry*, Etna, Italy, 18, 863-882.
- Akbaba, U. (2003). *Erzurum civarındaki bazı kaplıcalarda radyoizotop tayini*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Akgiray, Ö. 2003. İçme suyu ve su arıtımı suyumuzun geleceği ve türkiye su politikaları, 22 Mart Dünya Su Günü Paneli, Mart, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 62-75.
- Akkuş, İ., Akıllı, H., Ceyhan, S., Dilemre, A. ve Tekin, Z. (2005). *Türkiye jeotermal kaynakları envanteri, maden teknik arama genel müdürlüğü envanter serisi- 201*, Ankara.
- Anonim, 2006. World Health Organisation (WHO), *Guidelines for Drinking Water Quality*, First Addendum to Third Edition, Recommendations, WHO Publ., Geneva, 1, 494.
- APHA-AWWA-WPCF. (1981). Standart methods for the examination of water and wastewater fifteenth ed., *American Public Health Association*, Washington, USA, 1134.
- Arnorsson, S. ve Andresdottir, A. (1995). *Processes controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland*, *Geochim Cosmochim Acta*, 20, 59, 4125-4146.
- Atalay, E., Baysak, M., Ertürk, A. ve Dirik, M. (1972). *Pasinler Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu*, D.S.İ., Rapor No: 5029, Ankara.
- Aydın, A. ve Özmen, M. (1998). *Erzurum Pasinler Korucuk Köyü Münferit Hidrojeolojik Etüd Raporu*, D.S.İ., Erzurum.
- Aynalı, Z. (2000a). *Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-4 Sıcaksu Kuyusu Sondaj Faaliyet Raporu*, M.T.A., Ankara.
- Aynalı, Z. (2000b). *Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-5 Sıcaksu Kuyusu Sondaj Faaliyet Raporu*, M.T.A., Ankara.
- Aynalı, Z. ve Bulut, H. (2002). *Pasinler (Erzurum) Belediyesi Jeotermal Ön Etüt Raporu*, Ankara (yayımlanmamış).
- Aziz, A. (1971). Erzurum İ46-b ve İ46-c, *Paftalarının Detay Jeolojisi ve Petrol Olanakları*, M.T.A. Raporları, No. 5222, Ankara (yayımlanmamış).

- Banks, D., Hall, G., Reimann, C. ve Siewers, U. (1999). *Distribution of rare earth elements in crystalline bedrock groundwaters oslo and bergen regions*, Norway, Appl. Geochem. 14, 27–39.
- Başkan, M. E. ve Canik, B. (1983). I.A.H. map of mineral and thermal waters of Turkey aegean region, M.T.A. Raporları, No:189, Ankara, 80 s.
- Bayraktutan, S. (1987). Tekman havzasının sedimanter litofasiyesleri ve çökelme tarihçesi. *Türkiye Jeoloji Kurultayı 1987 Bildiri Özleri Kitabı*, 69-70.
- Villa, I. M. (1986). Geochronology and geochemistry of paleogene volcanic basement of the narman basin, eastern turkey. *Terra Cognita*, 6(2), 168.
- Bektas, O., Ravat, D., Büyüksarac, A., Bilim, F. ve Ateş, A. (2007). Regional geothermal characterization of East Anatolia from aeromagnetic, heat flow and gravity data, *Pure and Applied Geophysics*, 164, 975-998.
- Benderitter, Y. ve Cormy, G. (1990). Possible Approach to Geothermal Research and Relative Cost Estimate. In: Dickson, M.H., Fanelli, M. (Eds.), *Small Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources*, Rome, Italy, 61-71.
- Berger, G., Schott, J. ve Guy, C. (1988). *Behavior of Li, Rb and Cs during basalt glass and olivine dissolution and chlorite, smectite and zeolite precipitation from seawater, experimental investigations and modelization between 50 °C and 300 °C*, Chem. Geol., 71, 297-312.
- Bigazzi, G., Yegingil, Z., Ercan, T., Oddone, M. ve Özdoğan, M. (1994). Provenance studies of prehistoric artifacts in Eastern Anatolia: Interdisciplinary research results. *Miner. Petrogr. Acta*, 37, 17-36.
- Bilgen, S., Keleş, S., Kaygusuz, A., Sarı, A. ve Kaygusuz, K. (2008). Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(2), 372-396.
- Bozkuş, C. (1993). *Pasinler-Horasan Havzasının Doğusunun Stratigrafisi*, M.T.A. Dergisi, Ankara, 115, 43-53.
- Brouwer, E., Baeyens, B., Maes, A. ve Cremers, A. (1983). *Cesium and rubidium ion equilibria in illite clay*, J. Phys. Chem., 87, 1213–1219.
- Clark, I. ve Fritz, P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology, *Lewis publishers*, New York, 328.

- Collins, P. E. F., Rust, D. J., Bayraktutan, M. S. ve Turner, S. D. (2005). Fluvial stratigraphy and palaeoenvironments in the Pasinler Basin, eastern Turkey. *Quaternary International* 140-141, 121-134.
- Collins, P. E. F., Rust, D. J. ve Bayraktutan, M. S. (2008). Geomorphological evidence for a changing tectonic regime, Pasinler Basin, Turkey, *Journal of the Geological Society*, 165, 849-857.
- Çelmen, O. ve Çelik, M. (2009), Hydrochemistry and environmental isotope study of the geothermal water around Beypazarı granitoids, Ankara, Turkey, *Environ. Geol.* 58:8, 1689-1701.
- Davis, S. N. (1964). Silica in Streams and Groundwater, *American Journal of Science*, 262, 870-891.
- Demirtaşlı, E. ve Pisoni, C. (1965). Ahlat-Adilcevaz Bölgesinin Jeolojisi (Van Gölü Kuzeyi), *M.T.A. Dergisi*, Ankara, 64, 22-23.
- Demirtaşlı, E., Tütüncü, K. ve Gedik, A. (1965). Tekman Havzası'nın 1:25 000 ölçekli Jeoloji Haritası, *M.T.A. Enerji Hammadde Etüt ve Araştırma Dairesi Arşivi*, Ankara.
- Dickson, M. H. ve Fanelli, M. (1990). Geothermal Energy and its Utilization, In: Dickson, M. H., Fanelli, M. (Eds.), *Small Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources*, Rome, Italy, 1-29.
- Dikmen, B. (2001). *Ulubat gölü ve gölü besleyen su kaynaklarında organoklorlu pestisit kirliliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Dilaver, A.T., Çifter, C., ve Altay, T. (2002) Türkiye'deki öçme ve kullanma sularının radyoaktivite yönünden kalitesinin belirlenmesi, *Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu*, T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, 21-25 Ekim Adana, s: 301-318.
- Dilek, R. (1973). *Akiferlerin matematiksel modellenmesi, pasinler (erzurum) ve çamlıbel (tokat) ovalarına uygulamalar*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Doğan, L. (1981). Hidrojeolojide su kimyası, *DSİ yayınları*, Ankara, 178 s.
- Duru, O. ve Keskin, M. (2014). Kars volkanik platosu'nun çıldır (Ardahan ili) kuzeyindeki bölümünün volkanostratigrafisi, Petrografisi ve Magmatik Ayrışma Süreçleri. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 27(1), 17-38.

- Emre, A. (1962). *Erzurum Pasinler İzirmik – Sos – Muceldi Köylerinin Hidrojeolojik Etüd Raporu*, D.S.İ., Erzurum.
- Ercan, S. (1956). *Erzurum Pasinler Ovası Hidrojeolojik Etüd Raporu*, D.S.İ., Erzurum.
- Ercan, T., Fujitani, T., Matsuda, J., Notsu, K., Tokel, S. ve Ui, T. (1990). Doğu ve Güneydoğu Anadolu Neojen-Kuvaterner volkanitlerine ilişkin yeni jeokimyasal, radyometrik ve izotopik verilerin yorumu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* 110, 143-164, Ankara.
- Erdoğan, T. (1972). Erzurum-Karayazı Bölgesinin Jeolojisi ve Petrol İmkanları (Erzurum I-47 c1, c2 ve Karaköse I-48 d1, d4), *M.T.A. Derleme Rapor* No: 4845 Ankara, (yayımlanmamış).
- Erentöz, C. (1949). *Hınıs 65/2 paftasının raporu*, M.T.A. Der. Rap No: 2159 Ankara (yayımlanmamış).
- Erguvanlı, K. ve Yüzer, E. (1987). *Yeraltı suları Jeolojisi*, İTÜ, İstanbul, No: 23, s. 339.
- Ersoy, A. F. ve Sönmez, S. Ç. (2014). Hydrogeochemical and isotopic characteristics of the İlica geothermal system (Erzurum, Turkey). *Environ Earth Sci* 72, 4451–4462.
- Eryurt, A. (1999). *Manisa bölgesi yeraltı sularının bileşiminde mevsimsel değişiklikler üzerine bir araştırma*, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Esen, O.C. (2001). *Pasinler (Erzurum) Hidrolojik ve Hidrojeolojik Etüt Raporu*, D.S.İ., Ankara.
- Evens, N. M., Hamilton, P. J. ve O’Nions, R. K. (1978). Rare Earth Abundances in Chondritic Meteorite, *Geochim. Cosmochim Acta*, 42,1199-1212.
- Fırat Ersoy, A. (2007). *Gümüşhacıköy (Amasya) akiferi’nin yeraltı suyu akım modeli*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Fournier, R. O. (1977). A review of Chemical and Isotopic Geothermometers for Geothermal Systems, Proceedings of the Symp. On Geoth. Energy, *Cento Scientific Programme*, Ankara, 133-143.
- Fournier, R. O. (1979). Geochemical and hydrological considerations and the use of enthalpy-chloride diagrams in the prediction of underground conditions in hot spring systems, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 5, 1-16.

- Fournier, R. O. ve Truesdell, A. H. (1974). Geochemical Indicators of Subsurface Temperature, Estimation of Temperature and Fraction of Hot Water Mixed with Cold Water, *J. Res. U.S. Geol. Survey*, 2, 263-270.
- Frape, S. K., Blyth, A., Blomqvist, R., McNutt, R. H. ve Gascoyne, M. (2003). Deep fluids in the continents: II. Crystalline rocks. In: Drever, J.I. (Ed.), Surface and ground water, Weathering, and Soils. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, vol. 5. Elsevier, Amsterdam, 541-580.
- Freze, R. A. ve Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*, Prentice-Hall, USA, 604.
- Gedik, A. (1978). Doğu Anadolu'da açılan stratigrafik istikşaf (açınsama) sondajları, *Yeryuvarı ve İnsan*, 3, 31-35.
- Gedik, A. (1985). Tekman (Erzurum) Havzasının Jeolojisi ve Petrol Olanakları, *M.T.A. Dergisi*, 104, 1-24. Ankara.
- Gelişli, K. ve Maden, N. (2006). Analysis of Potential Field Analysis in Pasinler-Horasan Basin, Eastern Turkey, *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 9,1, 1-7.
- Gemici, Ü. (1999). *Çeşme yarımadası'nın hidrojeolojisi ve jeotermal enerji olanakları*, Doktora Tezi, D.E.Ü., İzmir.
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria, derivatin of Na-K-Mg-Ca geoindicators, *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765.
- Giggenbach, W. F. (1991). Chemical techniques in geothermal exploration. In: D'Amore, F., Coordinator, Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development, *UNITAR/UNDP Publications*, Rome, 119-143.
- Göçtü, S., Kaynak, M. ve Şahin, H. (1992). Pasinler (Erzurum) Havzası'nda yapılan Jeofizik (Gravite, Manyetik ve Elektriksel) Etüd Raporu, *M.T.A. Derleme Raporları*, Rapor No: 9681, Ankara.
- Gökmenoğlu, O., Öziçli, F. M. ve Çatal, Z. (2009). *Erzurum-Pasinler EHD-1 Jeotermal Sondajı Kuyu Bitirme Raporu*, No: EHD-1-33-13-07.
- Haenel, R., Rybach, L. ve Stegena, L. (1988). Fundamentals of Geothermics. In: Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L.A. (Eds.), Handbook of Terrestrial Heat- Flow Density Determination, *Kluwer Academic*, Dordrecht, Netherlands, 9-57.
- Haskin, L. A., Wildeman, T. R. ve Haskin, M. A. (1968). An Accurate Procedure for the Determination of the Rare Earths by Neutron Activation, *Journal of Radioanalytical Chemistry* 1, 337-348.

- Hatipoğlu-Temizel, E. (2014). Pasinler (Erzurum) jeotermal sisteminde akışkan akımının modellenmesi ve jeotermal suların hidrojeokimyası. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Havur, E. (1972). Erzurum İ 47-c1, c4, d2, d3 Paftalarının jeolojisi ve petrol olanakları, *M.T.A. Rap.*, 4851, Ankara (yayımlanmamış).
- Hem, D. J. (1971). Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water, *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, Second Edition, 93.
- Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, *USGS Water Supply Paper* 2254, US Gov. Print. Office, 263.
- Hem, J. D. (1992). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, *U.S. Geol Surv.*, Water- Supply, 2254.
- Hochstein, M. P. (1990). Classification and assessment of geothermal resources In: Dickson, M.H., Fanelli, M. (Eds.), *Small Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources*, Rome, Italy, 31-59.
- Hounslow, A. W. ve Back, D. B. (1985). Evaluation of chemical data from water supplies in southwestern oklahoma, *Final Report to the Oklahoma Water Resources Board*, 125-130.
- Hounslow, A. W. (1995). Water Quality Data: Analysis and Interpretation, *Lewis Publishers*, 54.
- Hunt, T. M. (2001). Five lectures on environmental effects of geothermal utilization, united nation university, *Geothermal Training Programme*, Reykjavik, Iceland.
- IAH (International Association of Hydrogeologists) (1979). *Map of Mineral and Thermal Water of Europe*, Scale: 1:500.000, IAH, United Kingdom.
- Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, Q. G., Radicati Di Brozola, F. ve Villari, L. (1976). Evolution of volcanism in the area of interaction between the Arabian, Anatolian and Iranian plates (Lake Van, Eastern Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 1, 103–112.
- İlker, S. (1966). Erzurum-Muş Bölgesinde Karaköse J 48 a4 ve J48 d1 Paftalarının 1 :25 000 Ölçekli Detay Petrol Etüdü Hakkında Rapor, *M.T.A. Rap.*, 4177, Ankara (yayımlanmamış).
- Irvine, T. N. ve Baragar, W. R. A. (1971). A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Journal Earth Sciences*, 8, 523-548.Ç

- Kılıç, O., Kurt, H., Asan, K. ve Kansun, G. (2009). Pasinler (Erzurum) Kuzeyindeki Volkanik Kayaçların Mineral Kimyası ve Jeokimyası. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 253-262.
- Karslı, O., Chen, B., Uysal, I., Aydın, F., Wijbrans, J. R. ve Kandemir, R. (2008). Elemental and Sr–Nd–Pb isotopic geochemistry of the most recent Quaternary volcanism in the Erzincan Basin, Eastern Turkey: framework for the evaluation of basalt–lower crust interaction. *Lithos*, 106(1-2), 55-70.
- Kaplan, H. (2004). Nükleer enerji hammaddelerinin aranması ve arama yöntemleri, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, s:11-26, Ekim 1978. [12]
- Kleinschmidt, R. I., Gross alpha and beta activity analysis in water-a routine laboratory method using liquid scintillation analysis, *Applied Radiation and Isotopes*, 61, 333–338, 2004.
- Kaygusuz, A. (2009). K/Ar ages and geochemistry of the post-collisional volcanic rocks in the Ilıca (Erzurum) area, eastern Turkey. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie*, 186/1, 21–36.
- Kaygusuz, A. (2019). Geothermal energy for clean and sustainable development in Turkey. *Journal of Engineering Research and Applied Science* 8 (1), 1041-1050.
- Kaygusuz, A., Aslan, Z., Aydınçakır, E., Yücel, C., Gücer, M. A. ve Şen, C. (2018). Geochemical and Sr-Nd-Pb isotope characteristics of the Miocene to Pliocene volcanic rocks from the Kandilli (Erzurum) area, Eastern Anatolia (Turkey): Implications for magma evolution in extension-related origin. *Lithos*, 296-299, 332-351.
- Kaygusuz, K. (2010). Wind energy status in renewable electrical energy production in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1372-1386.
- Kaygusuz, K. (2011). Energy services and energy poverty for sustainable rural development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 936-947.
- Kaygusuz, K. (2012). Energy for sustainable development: a case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1116-1126.
- Kaygusuz, K. ve Kaygusuz, A. (2002). Geothermal energy: Power for a sustainable future. *Energy Sources*, 24, 937–947.

- Kaygusuz, K. ve Kaygusuz, A. (2004). Geothermal energy in Turkey: the sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 545–563.
- Kaygusuz, K. ve Sarı, A. (2011). Sustainable energy policies in Turkey. *Energy Sources, Part B*; 6, 207-219.
- Kaygusuz, K., Kargı, H. ve Kaygusuz, A. (1996). Role of the clean energy potential for energy savings and air pollution control in Turkey. *Energy Sources*, 18, 885–901.
- Keskin, M. (1997). Pasinler platosu’ndaki çarpışma kökenli volkanik istifin volkano-stratigrafisi, jeokimyası ve magma odası işlemlerinin petrolojik modellenmesi; Erzurum-Kars Platosu, KD Anadolu. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, Cilt: 10, 59-77.
- Keskin, M. (2003). Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: An alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Geophysical Research Letters*, 30, 8046-8050.
- Keskin, M. (1994). *Genesis of Collision-Related Volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, Northeastern Turkey*, Ph. D. Thesis, University of Durham, U.K.
- Keskin, M., Pearce, J. A. ve Mitchell, J. G. (1998). Volcano-stratigraphy and geochemistry of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, North Eastern Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 355-404.
- Keskin, M., Pearce, J. A., Kempton, P. D. ve Greenwood, P. (2006). Magma–crust interactions and magma plumbing in a postcollisional setting: Geochemical evidence from the Erzurum-Kars volcanic plateau, eastern Turkey, In: Dilek, Y. ve Pavlides, S. (editör) *Postcollisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and Asia. Geological Society of America, Special Papers* 409, 475-505.
- Keller, E.A. (2005). Introduction to Environmental Geology, executive editor: Patrick Lynch, *Pearson Education*, Part 14, p: 362, New Jersey (USA).
- Ketin, İ. (1949). Artvin Bölgesinin Jeolojik Etüdü Hakkında Memuar. *Rapor No: 6785*, Ankara.
- Ketin, İ. (1966). Anadolu’nun tektonik birlikleri, *MTA Dergisi*, 66,20-34

- Kılıc, O. (2006). *Pasinler (Erzurum) kuzeyindeki volkanik kayaçların petrografik ve jeokimyasal incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Kumru, M. N., Aydın, B. ve Bakaç, M. (2002). Gediz Nehri'nden Ege Denizi'ne Taşınan Doğal Radyoaktivitenin (Radyum) Belirlenmesi, *Ekoloji Çevre Dergisi*, 10(43), 22-25.
- Koçak, A. (2003). Jeotermal enerji ders notları, *M.T.A. Yayınlar*, İzmir. 53 s.
- Koçyiğit, A. (1985). Muratbağı-Balabantaş (Horasan) arasında Çobandede fay kuşağının jeotektonik özellikleri ve Horasan-Narman depremi yüzey kırıkları, *C.Ü. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, Sivas, 2, 17-33.
- Konak, N. ve Hakyemez, H. Y. (2008). 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Tortum H-47 Paftası, *M.T.A.*, Ankara.
- Korkmaz, S., Gedik, A. ve Pelin, S. (1991). Türkiye'deki bazı tortul havzalara petrol potansiyeli açısından bir bakış, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Ankara, 39, 5-14.
- Krouse, H. R. (1980). Sulphur Isotopes in Our Environment. In: P. Fritz and J.-Ch. Fontes (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry I, The Terrestrial Environment*, A. Elsevier, Amsterdam, *The Netherlands*, 435-472.
- Küçük, O. 1991. Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS1-A Sıcaksu Kuyusu Sondaj Bitirme Raporu, *M.T.A.*, Proje No: 91-103, Ankara.
- Lebedev, V. A., Sharkov, E. V., Ünal, E. ve Keskin, M. (2016). Late Pleistocene Tendürek volcano (Eastern Anatolia, Turkey): I. Geochronology and petrographic characteristics of igneous rocks. *Petrology*, 24, 127-152.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M. J., Sabine, P. A., Schimid, R., Sorenson, H., Streckeisen, A., Woolley, A. R. ve Zanettin, B. (1989). *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Blackwell, Oxford, pp, 193.
- Leybourne, M. I., Goodfellow, W. D., Boyle, D. R. ve Hall, G. M. (2000). Rapid Development of Negative Ce Anomalies in Surface Waters and Contrasting REE Patterns in Groundwaters Associated with Zn-Pb Massive Sulphide Deposits. *Appl. Geochem.*, 15, 695-723.
- Lipin, B. R. ve McKay, G. A. (1989). Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy, vol. 21. *Mineralogical Society of America*, Washington D.C.

- Mamontov, V. K., Yakovlev, A. G. ve Bayraktutan, S. M. (2005). Formation of the Geothermal Resources of the North-Eastern Part of Turkey, *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey
- Mazor, E. (1997). Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, *Applied Approach*, s: 158.
- McNeely, R. N., Neimanis, V. P. ve Dwyer, L. (1979). Water Quality Sourcebook- A Guide to Water Quality Parameters: Inland Waters Directorate, *Water Quality Branch*, Ottawa, Canada, 88 p.
- Mercier, J. (1948). Hınıs 65/2 paftasının raporu, *M.T.A. Der.* Rap No: 2258 Ankara (yayımlanmamış).
- Muffler, P. ve Cataldi, R. (1978). Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources, *Geothermics*, 7, 53-89.
- Nicholson, K. (1993). Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques, *Springer-Verlag*, Berlin, 263 p.
- Oyan, V., Keskin, M., Lebedev, V. A., Chugaev, A. V. ve Sharkov, E. V. (2016). Magmatic evolution of the Early Pliocene Etrüsk stratovolcano, eastern Anatolian collision zone, Turkey. *Lithos*, 256, 88-108.
- Oyan, V., Keskin, M., Lebedev, V. A., Chugaev, A. V., Sharkov, E. V. ve Ünal, E. (2017). Petrology and geochemistry of the Quaternary mafic volcanism to the NE of Lake Van, Eastern Anatolian Collision Zone, Turkey. *Journal of Petrology*, 58(9), 1701-1728.
- Özmutaf, M. ve Gündüz, M. (2001). Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-4 ve PS-5 Sıcak Su Sondajları Kuyu Bitirme Raporu, *M.T.A. Der.* Rap No: 10475, Ankara (yayımlanmamış).
- Pamir, H. N. ve Baykal, F. (1943). Bingöl bölgesi ile buranın şimal ve cenubundaki jeolojik yapı: *M.T.A. Rap* No: 1447 (yayımlanmamış), Ankara.
- Pearce, J. A., Bender, J. F., Delong, S. E., Kidd, W. S. F., Low, P. J., Güner, Y., Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., Moorbath, S. ve Mitcheil, J. G. (1990). Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. In: Le Fort, P., Pearce, J. A. ve Pecher, A. (eds), Collision Magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 44, 189–229.
- Pelin, S. (1970). Pasinler-2 kuyu bitirme raporu. *MTA Rap* No: 4532, Ankara (yayımlanmamış).

- Pelin, S. (1981). Pasinler (Erzurum) havzasında anakaya özelliklerinin ve petrol oluşumunun açıklanması, *KTÜ Yer Bilimleri Dergisi*, 1(2), 127-143.
- Piper, A. M. (1944). A Graphic Procedure in Geochemical Interpretation of Water Analyses, *American Geophysical Union Transactions*, 25, 914–923.
- Polat, C. (2010). *Numerical modeling of balcova geothermal field*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Polat, S. ve Elmastaş, N. (2005). Tekman-Kığı Hamzan (Çimenözü) termal su kaynakları (Erzurum). *Doğu Coğrafya Dergisi*, 14, 235-251.
- Polat, S., Erşen, A. ve Hadimli, H. (2005). Hölenk Çayı Havzasında termal kaynaklar ve travertenler. *Ulusal Coğrafya Kongresi Bildirileri*, İstanbul, Türkiye.
- Ravikumar, P. ve Somashekar, R. K. (2011). Environmental tritium (^3H) and hydrochemical investigations to evaluate groundwater in Varahi and Markandeya river basins, Karnataka, India. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(2), 153-162.
- Schoeller, H. (1962). Les Eaux Souterraines, *Mason et cie*, Paris, 642 p.
- Shaw, D. M. ve Sturchio, N. C. (1992). Boron-Lithium Relationships in Rhyolites and Associated Thermal Waters of Young Silicic Calderas, with Comments on Incompatible Element Behavior, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 3723-3731.
- Smethurts, G. (1979). Basic Water Treatment, *Thomas Telford Ltd.*, London.
- Soytürk, N. (1973). Murat Baseni Jeolojisi ve Hidrokarbon İmkanları Raporu: TPAO, Arama Grubu Başkanlığı, Jeoloji Müdürlüğü, Rapor No: 791, 22 s.
- Stevens, H. H., Ficke, J. F. ve Smoot, G. F. (1975). Water Temperature-Influential Factors, Field Measurement and Data Presentation, Techniques of Water- Resources Investigations of the United States Geol. Survey, Chapter D1, Book 1, 65 p.
- Şahinci, A. (1991). Jeotermal Sistemler ve Jeokimyasal Özellikleri, *Reform Matbaası*, İzmir, 247s.
- Şaroğlu, F. ve Yılmaz, Y. (1986). Doğu Anadolu’da neotektoniğin gelişime başlıca etkileri, TJK 1986, *Bildiri Özetleri*, s. 5.
- Şaroğlu, F. (1985). *Doğu anadolu'nun neotektonik döneminde jeolojik ve yapısal evrimi*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

- Şengör, A. M. C. (1980). Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları (Fundamentals of the neotectonics of Turkey), *Publication of Geological Society of Turkey*, 40 p.
- Şimşek, M. (2012), *Erzurum-Pasinler Uzunahmet-Hamamderesi 2012/17 Numaralı Ruhsata İlişkin İşletme Faaliyet Raporu*, Rapor No:4839, Trabzon.
- Şimşek, Ş. (2015). Dünya'da ve Türkiye'de jeotermal gelişmeler. In III. *Geothermal Resources Symposium Proceedings*, Ankara, Turkey (pp. 1-17).
- T.C. Resmî Gazete, (2004). *Kaplıcalar Yönetmeliği*, 4. Bölüm, 24472, 25.7.2001.
- T.C. Resmî Gazete, (2004). *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*, 3. Bölüm, 25687, 31.12.2004.
- Tarcan, G. (2002). Jeotermal Su Kimyası, Jeotermal Enerji ve Araştırma ve Uygulama Merkezi (Jenarum) *Yaz Okulu Ders Notları*, İzmir, 198-230.
- Tarhan, N. (1989). *Hınıs-Varto (Erzurum-Muş) dolayının jeolojisi ve petrolojisi* (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Tarhan, N. (1990). 1/100000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye jeoloji haritaları serisi G-33 paftası (Rapor No. 35). Ankara: *MTA Jeoloji Etütleri Dairesi*.
- Tarhan, N. (1998). 1/100000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye jeoloji haritaları serisi F-31 paftası (Rapor No. 56). Ankara: *MTA Jeoloji Etütleri Dairesi*.
- Taşcı, A. ve Yurtseven, D. (1995). Pasinler (Erzurum) PS-3 Sondajı Kuyu Bitirme ve Koruma Alanları Raporu *M.T.A. Derleme Raporları*, No: 9863, Ankara.
- Taşkıran, L. (2006). *Tekman (Erzurum) güneybatısındaki sıcak su kaynaklarının hidrojeokimyasal incelemesi* (Master's thesis).
- Temizel, E. H., Gültekin, F. ve Ersoy, A. F. (2019). Rare earth elements and yttrium geochemistry of the geothermal fields in the Eastern Black Sea Region (Ordu, Rize, Artvin), NE Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 160(160), 135-153.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate, *Geograph.*, Rev. 38, 55-94.
- Toy, S., Çatakçı, S., Eymirli, E. B. ve Karapınar, M. (2010). Erzurum Termal Turizm Potansiyeli, Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı, *Turizm Raporları*, No:3, Erzurum.

- Truesdell, A. H. (1975). Summary of Section III Geochemical Techniques in Exploration, In: *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, 25-50.
- Trusdell, A. H. (1991). *Effects of Physical Processes on Geothermal Fluids, In Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (Coordinator F. D'Amore), 71-92.
- TS 266, (2005). İnsani Tüketim Amaçlı Sular, Ankara.
- Türkecan, A. (2017). Türkiye'nin Doğu Bölgelerinde Gözlenen Kuvaterner Yaşlı Volkanik Etkinlikleri. *Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 22, 63-78.
- Uluşahin, A. (1992). Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-2 Nolu Sıcaksu Sondajı Kuyu Bitirme ve Koruma Alanları Raporu, *M.T.A. Derleme Raporu*, No: 9442, Ankara.
- URL-1 <http://www.jeotermaldernegi.org.tr>. TJD (Türkiye Jeotermal Derneği), Jeotermal Enerji. (Erişim Tarihi: 08.11.2004).
- Uslu, O. ve Türkman, A. (1987). *Su Kirliliği ve Kontrolü, Çevre Genel Md. Yay. Eğitim Dizisi*, 1, 364 s.
- Ünal, Ç. (1994). *Pasinler ilçesi'nin coğrafi etüdü*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Whiting, R. L. ve Ramey, H. J. (1969). Application of material and energy balance geothermal steam production. *Journal of Petroleum Technology*, 21(07), 893-900.
- W.H.O. (1984). Guidelines for Drinking Water Quality, Health Criteria and Other Supporting Information, *WHO Publ.*, Geneva, Switzerland, 2, 335.
- Viellard, P. (2000). A New Method for the Prediction of Gibbs Free Energies of Formation of Hydrated Clay Minerals Based on the Electronegativity Scale, *Clays Clay Miner.* 48, 459-473.
- Yerdok. A., Papak. G., Mengi. H., Karaköse. C., Kara. H., Dalkılıç. H. ve Diğerleri (1994). Ardahan-Posof Dolayının Jeolojisi, *MTA Genel Müdürlüğü*, Rapor No:9962, 117 (yayımlanmamış).
- Yıldırım, N. (2008). *Tekman-Pasinler (Erzurum) arasında yüzeyleyen ofiyolitik birimlerin jeolojisi ve petrografik özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

- Yılmaz, A., Terlemez, İ. ve Uysal, Ş. (1986). Erzurum GD'sunda yer alan Hınıs-Tekman ve Karayazı arasının jeolojisi, *M.T.A yayınları* Rap No: 8089, Ankara.
- Yılmaz, A., Terlemez, İ. ve Uysal, Ş. (1989). 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Erzurum F-33 Paftası, *M.T.A.*, Ankara.
- Yılmaz, O. ve Şener, M. (1984). Erzurum-Pasinler, Erzincan-Çayırlı, Kars-Tuzluca, Malatya-Hacılar stratigrafik açınısama kuyulanna ait örneklerin x ışınları tekniği ile incelenmesi, *TJK Bülteni*, 27,1, 31-40.
- Yılmaz, Y., Güner, Y. ve Şaroğlu, F. (1998). Geology of the Quaternary volcanic centres of the east Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 85, 173–210.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamlayarak 2008 Yılında Nenehatun Kız Lisesi’nden mezun oldu. 2009 yılında Selçuk Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2015 yılında mezun oldu. 2022 yılında Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Jeoloji Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Yazar evli olup, orta seviyede İngilizce bilmektedir.

