



BOĞAZLIYAN (YOZGAT) TERMAL VE SOĞUK SU KAYNAKLARININ HİDROJEOKİMYASAL KARAKTERİZASYONU

Eda AYDEMİR POLAT^{1*}, Şehnaz ŞENER¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Jeotermal, Yeraltı suyu, Hidrojeokimya, Jeokimyasal Süreçler, Boğazlıyan.</i>	Bu çalışma, Yozgat ili Boğazlıyan ilçesinde yer alan termal ve soğuk su kaynaklarının hidrojeokimyasal özelliklerini ve kullanılabilirliğini belirlemek, suyun kökenini ve jeokimyasal evrimini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında, bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik yapısı detaylı şekilde incelenmiş; arazi çalışmalarında toplam 10 adet su örneği toplanarak fiziksel parametreler yerinde ölçülmüş ve kimyasal analizler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, termal suların Na-Cl ve Ca-HCO₃ tipi karakteristikler sergilediği, soğuk suların ise genellikle Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ fasiyesinde olduğu belirlenmiştir. Piper, Schoeller ve Gibbs diyagramları ile yapılan sınıflandırmalar, bölgede farklı kaynaklardan beslenen en az iki ayrı hidrojeokimyasal sistemin varlığına işaret etmektedir. (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) diyagramı, Ca/Mg oranları, HCO₃/SiO₂ ve Ca+Mg/HCO₃ oranları gibi çok sayıda parametreye dayalı değerlendirmeler, bölgede silikat minerallerinin ayrışmasının baskın jeokimyasal süreç olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca termal suların içme amaçlı kullanıma uygun olmadığı, ancak doğrudan kullanım açısından potansiyel taşıdığı; soğuk suların ise genel olarak içme suyu standartlarını karşıladığı belirlenmiştir.

HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THERMAL AND COLD WATER RESOURCES IN BOĞAZLIYAN (YOZGAT, TURKEY)

Keywords	Abstract
<i>Geothermal, Groundwater, Hydrogeochemistry, Geochemical processes, Boğazlıyan.</i>	This study was carried out to determine the hydrogeochemical characteristics and usability of thermal and cold waters in Boğazlıyan (Yozgat), and to identify their origins and geochemical evolution. The region's geological and hydrogeological structures were examined; 10 water samples were collected during fieldwork, with physical parameters measured on-site and chemical analyses conducted in the laboratory. As a result of the analyses, it was determined that the thermal waters exhibit Na-Cl and Ca-HCO₃ type characteristics, whereas the cold waters are generally of the Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃ facies. Classifications made using Piper, Schoeller, and Gibbs diagrams indicate the presence of at least two distinct hydrogeochemical systems fed by different sources in the region. Evaluations based on multiple parameters such as the (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) diagram, Ca/Mg ratios, HCO₃/SiO₂, and Ca+Mg/HCO₃ ratios reveal that the dominant geochemical process is the weathering of silicate minerals. Furthermore, thermal waters were found to be unsuitable for drinking purposes but hold potential for direct use, whereas cold waters generally complies with drinking water quality standards.

Alıntı / Cite

Aydemir Polat, E., Şener, Ş. (2025). Boğazlıyan (Yozgat) Termal ve Soğuk Su Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Karakterizasyonu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarımları Dergisi, 13(3), 944-956.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Aydemir Polat, 0000-0003-0148-285X
Ş. Şener, 0000-0003-3191-2291

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	22.03.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	23.06.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	24.06.2025
Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: edaaydmr@gmail.com, +90-246-211-1332

HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THERMAL AND COLD WATER RESOURCES IN BOĞAZLIYAN (YOZGAT, TÜRKİYE)

Eda AYDEMİR POLAT^{1†}, Şehnaz ŞENER²

¹Süleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geological Engineering, Isparta, Turkey

²Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geological Engineering, Isparta, Türkiye

Highlights

- Piper, Schoeller and Gibbs diagrams reveal two distinct hydrogeochemical systems in the region.
- Thermal waters exhibit Na-Cl and Ca-HCO₃ types, while cold waters are Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃.
- The dominant geochemical process in the region is the weathering of silicate minerals.

Purpose and Scope

This study aims to determine the hydrogeochemical properties and assess the usability of geothermal and cold groundwater resources in the Boğazlıyan district and surrounding areas, by evaluating geological, hydrogeological and hydrogeochemical data within an integrated framework.

Design/methodology/approach

In this study, a multidisciplinary approach combining fieldwork, laboratory analysis, and geological interpretation was employed to investigate the hydrogeochemical characteristics of geothermal and cold groundwater resources in the Boğazlıyan district and surrounding areas. Field sampling was conducted in June 2023, during which water samples were collected from geothermal and cold water sources across selected locations. In-situ physicochemical parameters such as temperature, pH, electrical conductivity (EC), and total dissolved solids (TDS) were measured on site using portable instruments. Collected water samples were subsequently analyzed in the laboratory to determine major ion concentrations, as well as trace elements and other relevant parameters. The chemical data were interpreted using graphical methods (e.g., Piper, Schoeller, and Gibbs diagrams) and hydrogeochemical modeling techniques to classify water types and evaluate water-rock interaction processes. Geological and hydrogeological maps were used to understand the structural control on groundwater flow and geochemical evolution. Furthermore, the (Ca + Mg) – (HCO₃ + SO₄) diagram was utilized to evaluate the mineral dissolution and decomposition processes affecting the groundwater chemistry. This methodological framework enables the correlation of geochemical signatures with subsurface geological conditions, contributing to the assessment of the usability and sustainability of the region's geothermal and groundwater resources.

Findings

The hydrogeochemical evaluation of thermal and cold waters in Boğazlıyan revealed three main water types: Na-Cl, Ca-HCO₃, and Ca-Mg-HCO₃. Na-Cl type geothermal waters reflect deep circulation and prolonged interaction with evaporitic or magmatic rocks, supported by high TDS levels and Gibbs diagram results. Cold waters, dominated by Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃ facies, indicate shallow flow systems influenced by carbonate dissolution. Negative chloroalkaline index values suggest prevalent cation exchange, while the (Ca + Mg) – (HCO₃ + SO₄) plot and ionic ratios highlight silicate weathering as a key process. Water quality analysis showed that most geothermal waters exceed drinking standards due to high Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Fe, and As concentrations, whereas cold waters are generally suitable for consumption. Observations of temperature drops and closed wells underscore the need for reinjection and sustainable management of geothermal resources.

Practical implications (if applicable)

Sustainable management of Boğazlıyan's geothermal resources requires reinjection systems and regulated extraction to prevent depletion while maximizing their potential for thermal tourism and heating applications.

Social Implications (if applicable)

Boğazlıyan's geothermal resources offer significant economic opportunities through thermal tourism and agriculture, but participatory management is essential to balance exploitation with long-term sustainability for local communities.

Originality

This study presents the first detailed hydrogeochemical assessment of Boğazlıyan's thermal and cold waters, identifying their unique Na-Cl and Ca-HCO₃ characteristics, demonstrating their origins from deep hydrothermal systems and shallow carbonate aquifers, and revealing critical sustainability issues through observed reservoir pressure decline and cooling effects—offering essential insights for local water resource managers and geothermal energy/thermal tourism investors aiming to develop these resources sustainably.

[†] Corresponding author: edaaydmr@gmail.com, +90-246-211-1332

1. Giriş (Introduction)

Yeraltısuları, doğal çevrimleri içerisinde hem termal hem de soğuk formlarda yüzeye ulaşabilen önemli hidrojeolojik sistemlerdir. Özellikle Türkiye gibi genç tektonik kuşaklar üzerinde yer alan ülkelerde, farklı sıcaklıklarda yüzeye çıkan bu akışkanların hidrojeokimyasal karakteristiklerinin belirlenmesi, hem suyun kökenine ve dolaşım derinliğine dair bilgi sunmakta hem de çevresel ve ekonomik kullanım olanaklarının ortaya konması açısından kritik öneme sahiptir. Jeotermal sular, sürdürülebilir, yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olmalarının yanı sıra, doğrudan kullanım olanakları (kaplıca turizmi, seracılık, konut ısıtması vb.) ve dolaylı ekonomik katkıları nedeniyle günümüzde stratejik kaynaklar arasında değerlendirilmektedir (Lund ve Boyd, 2016).

Türkiye, Tersiyer dönemi boyunca yaygın bir volkanik faaliyet süreci geçirmiş olup, bu süreç Pliyosene kadar devam etmiş ve kalk-alkalen karakterli volkanik ürünlerle temsil edilmiştir. Söz konusu volkanizma, Geç Miyosen'den itibaren etkin olan Afrika-Anadolu levha sistemine bağlı olarak gelişmiştir (Şengör ve Canitez, 1982; Temel vd., 1998). Senozoyik volkanizması, Anadolu genelinde geniş ölçekli jeotermal aktivitenin ortaya çıkmasına zemin hazırlamış ve bu durum çok sayıda sıcak su kaynağının oluşumuna neden olmuştur (Pasvanoğlu ve Chandrasekharam, 2011). Türkiye, jeotermal kaynaklar bakımından dünya genelinde ön sıralarda yer almakta olup, sahip olduğu genç tektonik rejim ve volkanik geçmiş sayesinde zengin bir jeotermal potansiyele sahiptir (Akkuş ve Alan, 2016). Bu potansiyelin önemli bir kısmı Batı Anadolu'da yoğunlaşmış olsa da, İç Anadolu Bölgesi de özellikle doğrudan kullanım açısından dikkat çeken alanlar arasında yer almaktadır. Özellikle Kapadokya çevresinde yer alan İç Anadolu'nun genç volkanik alanları, sahip oldukları ısı kaynağı sayesinde bu bölgeyi potansiyel bir jeotermal kaynak haline getirmektedir (Froger vd., 1998; Maden, 2012; Şener vd., 2017).

Bu kapsamda Yozgat ilinin Boğazlıyan ilçesi, sahip olduğu jeotermal kaynaklarla bölgesel kalkınma potansiyeli taşıyan önemli sahalardan biridir. Boğazlıyan'daki sıcak ve soğuk yeraltısularının hidrojeokimyasal özelliklerinin ayrıntılı olarak incelendiği bu çalışmada, araştırma alanının jeolojik ve hidrojeolojik yapısı ele alınmış; bölgedeki termal ve soğuk suların mevcut kalite durumu ve kullanım potansiyeli, çeşitli hesaplamalar, diyagramlar ve ilgili mevzuatlarda belirtilen sınır değerler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Boğazlıyan ilçesi ve çevresindeki jeotermal sistemler, İç Anadolu Bölgesi'nin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri açısından incelenmiş olup, bölgede geçirimli birimler olarak Beycedere Formasyonu kireçtaşları ve alüvyonlar, yarı geçirimli birim olarak Bozçaldağ Formasyonu'na ait kristalize kireçtaşı ve mermerler, geçirimsiz birim olarak ise Kızılırmak Formasyonu belirlenmiştir (Çelik, 1995). Boğazlıyan jeotermal sahasında yapılan çalışmalarda, kaplıca ısıtmasında kullanılan jeotermal kuyudan alınan su örneğinin sıcaklığı 52,5 °C, EC değeri 5040 µS/cm, TDS değeri 2630 mg/l ve pH'sı 7,97 olarak ölçülmüş olup, su kimyası Na-Ca-Cl-HCO₃ olarak belirlenmiştir. Ayrıca bölgedeki suların kimyasal bileşiminde sodyumun baskın olması, kaya-su etkileşimine bağlı olarak plajiyoklaz ve alkali feldispatların ayrışmasıyla ilişkilendirilmiştir (KOP, 2020). Boğazlıyan ve çevresindeki termal sahaların hidrojeokimyasal özelliklerinin anlaşılmasında, bölgenin jeolojik yapısına benzerlik gösteren Yerköy, Saraykent, Şefaati ve Sorgun gibi komşu jeotermal sistemlerde yapılan önceki çalışmalardan önemli ölçüde yararlanılmıştır. Bu çalışmalar, bölgedeki termal suların kökeni, rezervuar sıcaklıkları ve su-kayaç etkileşimleri hakkında kritik veriler sağlamıştır. Yakın çevredeki Şefaati'de yapılan çalışmalarda yeraltısularının Na-Ca-HCO₃, Ca-Mg-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃-SO₄ fasiyesinde olduğu, kimyasal ayrışmanın hidrojeokimyayı kontrol ettiği belirlenmiştir (Şener ve Şener, 2021). Yılmaz Turalı vd. (2016) Yerköy'deki jeotermal suların Na-Cl tipinde olduğunu ve δ¹⁸O-δ²H izotop verilerinin derin sirkülasyonlu bir sistemi işaret ettiği tespit etmiştir. Saraykent'te ise jeotermal suların Na-Cl ve Na-SO₄ tipinde olduğu, rezervuar sıcaklığının 108-157 °C aralığında olabileceği ve mineral doygunlukları nedeniyle kabuklaşma riski taşıdığı belirtilmiştir (Özulukale ve Şimşek, 2015). Sorgun'daki jeotermal kuyularda sıcaklık 75-81 °C arasında ölçülmüş olup, re-enjeksiyonun sistemin sürdürülebilirliğine katkı sağladığı vurgulanmıştır (Yılmaz ve Şimşek, 2013). Bölgedeki en önemli jeotermal sahalardan olan Kozaklı'da ise rezervuar sıcaklığının 105-125 °C olduğu, soğuk su karışımının sistem dinamiklerini etkilediği ve mineral doygunluklarının kabuklaşma riski oluşturduğu bildirilmiştir (Koçak, 1997; Ok, 2007). Yozgat genelinde jeotermal kaynakların düşük sıcaklıklı olması nedeniyle ısıtma ve termal turizm amaçlı kullanıldığı, ancak aşırı üretim ve re-enjeksiyon eksikliği gibi sorunların sıcaklık düşüşlerine yol açtığı belirtilmiştir (Kolay vd., 2017). Bu bulgular, Boğazlıyan ve çevresindeki jeotermal potansiyelin değerlendirilmesinde re-enjeksiyonun önemini ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Boğazlıyan bölgesinde termal ve soğuk suların hidrojeokimyasal özelliklerine ve bu suların etkileşim süreçlerine dair literatürdeki mevcut bilgiler sınırlıdır. Bu eksiklik, bölgedeki jeotermal kaynakların tam potansiyelinin değerlendirilmesi ve doğru bir şekilde yönetilmesi açısından önemli bir boşluk oluşturmaktadır. Bu nedenle, Boğazlıyan'daki hidrojeokimyasal özellikler ve süreçlerin detaylı incelenmesi, bölgenin jeotermal potansiyelinin ortaya konulması ve kaynakların sürdürülebilir yönetimi için gerekli verilerin sağlanması açısından büyük önem taşımakta ve bu çalışmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışma alanı olarak seçilen Boğazlıyan ve yakın çevresindeki jeotermal ve soğuk su kaynaklarının hidrojeokimyasal özelliklerini ve su kalitesini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen arazi çalışmaları kapsamında, öncelikle bölgenin jeolojik özellikleri incelenmiştir. Bu doğrultuda, yüzeylenen jeolojik birimler ile bunların litolojik özellikleri ve birbirleriyle olan stratigrafik ve yapısal ilişkileri değerlendirilmiştir. Yapılan arazi gözlemleri doğrultusunda önceki araştırmalar değerlendirilmiş ve Dönmez vd. (2005) tarafından hazırlanan 1/100.000 ölçekli jeoloji haritası revize edilerek güncellenmiştir (Şekil 1). Ayrıca litolojik birimlerin akifer olabilme potansiyelleri belirlenerek bölgenin hidrojeolojik durumu ortaya konmuş ve buna göre örnekleme noktaları seçilmiştir. 12 Haziran 2023 tarihinde gerçekleştirilen arazi çalışmaları kapsamında belirlenen örnekleme noktalarından su örnekleri toplanmıştır. Numune alma işlemleri sırasında; sıcaklık (T), elektriksel iletkenlik (EC), hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH), ve toplam çözünmüş madde (TDS; mg/l) gibi su kalitesi parametreleri, YSI Professional Plus model çok parametrelili taşınabilir cihaz kullanılarak yerinde ölçülmüştür. Numuneler, sızdırmaz polietilen şişelerde +4 °C' de muhafaza edilerek, kimyasal analizlerin gerçekleştirileceği Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı (TAKK)'na ulaştırılmıştır.

Hidrojeokimyasal özelliklerin değerlendirilmesinde, örneklerin majör iyon konsantrasyonları Piper (1944), Schoeller ve Gibbs diyagramları üzerinde gösterilerek yorumlanmıştır. Ayrıca, sulara meydana gelen minerallerin ayrışma ve çözünme süreçlerini anlamak amacıyla (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) diyagramından ve bazı iyon oranlarından yararlanılmıştır. Suların içme suyu olarak uygunluğunu belirlemek amacıyla, ülkemizde geçerli olan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2005) ile belirlenen sınır değerler esas alınmış, aynı zamanda analiz sonuçları Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2022) standartlarıyla da karşılaştırılmıştır.

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

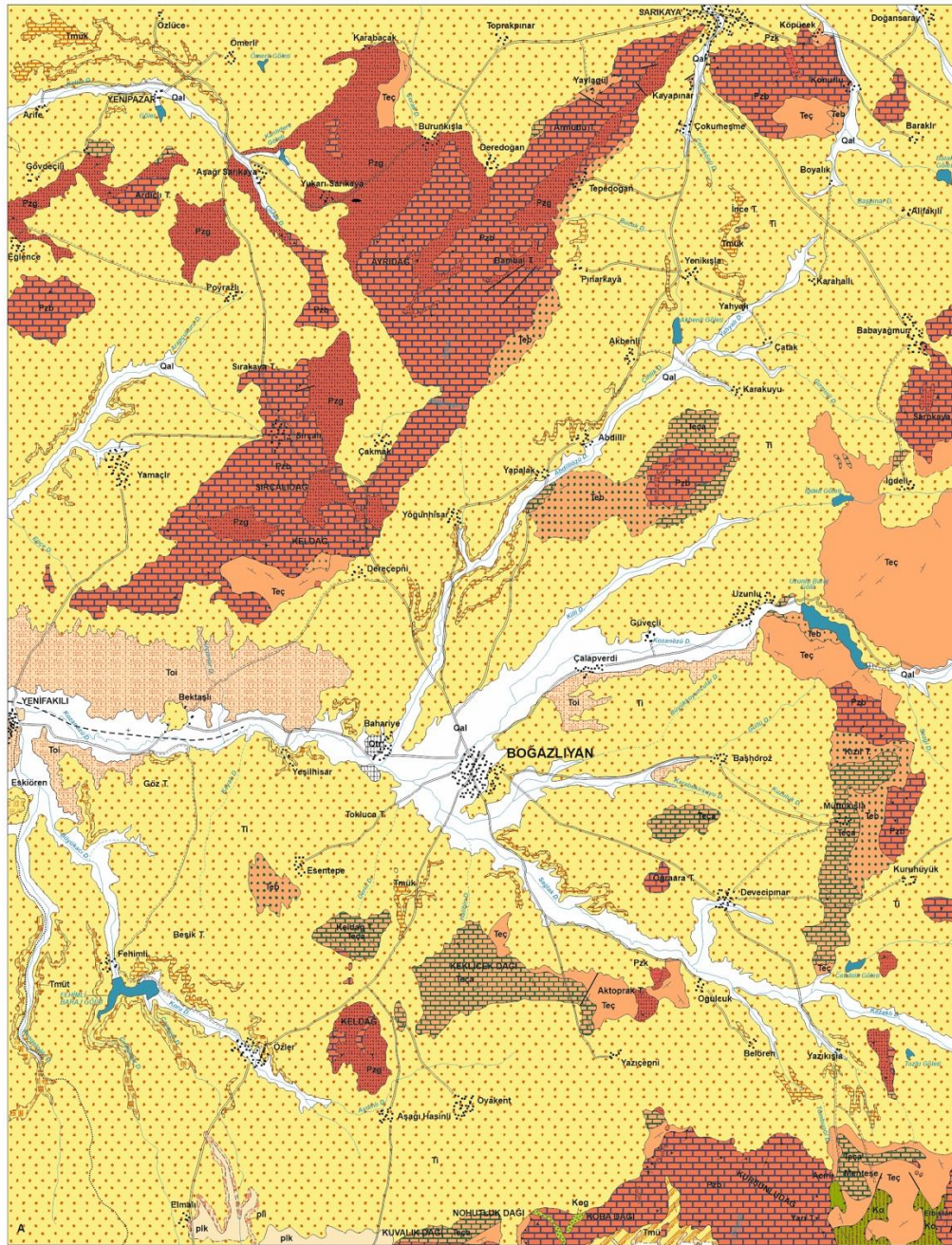
4.1. Çalışma Alanının Jeolojisi (Geology of the Study Area)

Çalışma alanı, Orta Anadolu Bölgesi'nde yer alan Boğazlıyan ve çevresinin karmaşık jeolojik yapısını yansıtmaktadır. Bölgenin stratigrafik çerçevesi, Paleozoyik yaşlı Kırşehir Masifi ile başlamakta olup, bu birim gnays, mikaşist, mermer ve kuvarsit gibi metamorfik kayalardan oluşmaktadır (Ketin, 1955; Seymen, 1982; Dönmez vd., 2005). Masifin üzerinde Geç Kretase yaşlı Otlukaya Ofiyolitli Melanjı ve Orta Anadolu Granitoidleri yer almaktadır. Granitoidlerin Kırşehir Masifi ile dokanaklarında kontakt metamorfizma gelişmiştir (Ayan, 1963; Ataman, 1972). Tersiyer dönemine ait birimler arasında Alt-Orta Eosen yaşlı Baraklı Formasyonu (karasal çakıtaşı, kumtaşı ve çamurtaşı) ile denizel Çayraz Formasyonu (kireçtaşı, marn ve kırıntılı kayalar) bulunmaktadır. Çayraz Formasyonu içindeki Arzılar Kireçtaşı Üyesi, bol fosil içeriği ile Orta-Geç Eosen dönemini temsil etmektedir (Dönmez vd., 2005). Üst Eosen-Alt Miyosen aralığında çökelmiş İncik Formasyonu ise evaporitli karasal çökellerden oluşmaktadır. Neojen dönemine ait İç Anadolu Grubu, Orta Miyosen-Pliyosen yaşlı göl ve akarsu çökellerini kapsamaktadır. Bu grupta yer alan Ürgüp Formasyonu, Tahar İgnimbirit Üyesi ve Kozaklı Kireçtaşı Üyesi ile temsil edilmektedir (Pasquare, 1968). Üst Pliyosen dönemine ait İncesu İgnimbiriti ve Kışladağ Formasyonu (gölsel kireçtaşları) bölgedeki volkanik ve sedimanter süreçleri yansıtmaktadır. Kuvaterner yaşlı travertenler ise genç tektonik aktivite ve sıcak su sistemlerinin varlığına işaret etmektedir (Dönmez vd., 2005).

Yapısal jeoloji açısından bölge, Anatolid tektonik kuşağında yer almakta olup, Alpin orojenezinin etkisiyle kıvrılma ve faylanma göstermiştir. Özellikle Miyosen sonrası gelişen normal faylar ve Erciyes volkanizmasının tetiklediği yüksek jeotermal gradyan, bölgenin hidrotermal sistemlerini kontrol etmektedir.

4.2. Çalışma Alanının Hidrojeolojisi (Hydrogeology of the Study Area)

Çalışma alanındaki litolojik birimler, hidrojeolojik davranışlarına göre sınıflandırılmış ve geçirimsiz, yarı geçirimli, az geçirimli, gözenekli geçirimli ve karstik akifer olmak üzere beş ana grup altında incelenmiştir. Gümüşler Formasyonu metamorfik kökenli gnays, kuvarsit ve şistlerden oluşması nedeniyle, Otlukaya Ofiyolitli Melanjı bazik bileşimli diyabaz ve metabazitlerin sert yapısından dolayı, İncik Formasyonu ise filiş karakterli ince taneli çamurtaşı ve kıltaşı içeriğiyle geçirimsiz özellik göstermekte ve akifer oluşturma potansiyelleri oldukça düşüktür. Yarı geçirimli birimlerden Ürgüp Formasyonu çakıtaşı-kumtaşı-ignimbirit ardalanmasına sahip heterojen yapısıyla sınırlı akifer özelliği göstermekte, İç Anadolu Granitoidleri ise granitik bileşimi ve gelişmiş kırık-çatlak sistemleri sayesinde orta derecede akifer potansiyeli sergilemektedir. İncesu ignimbiriti kaynaklanmış tüf yapısıyla, Çayraz ve Baraklı formasyonları ise ince taneli kıltaşı ve silttaşı seviyeleri içermeleri nedeniyle az geçirimli davranış göstermekte ve düşük akifer potansiyeline sahiptir. Ancak bu birimlerdeki lokal kırık sistemleri sınırlı su depolama imkanı sağlamaktadır.



HARİTA BİRİMLERİNİN AÇIKLAMASI

Qal	Alüvyon
Qtr	Traverten
Tl	İç Anadolu grubu: Ayrılmamış Orta Miyosen- Pliyosen karasal çökeller
plk	Kışladağ formasyonu: Kilitaşı, kireçtaşı
pld	İncesu ignimbriti: Gri, pembe, siyah renkli ignimbirit
Tmu	Ürgüp formasyonu: Çakıtaşı, kumtaşı, çamurtaşı, kireçtaşı, ignimbirit
Tmuk	Kozaklı kireçtaşı üyesi: Gölsel kireçtaşı
Tmüt	Tahar ignimbrit üyesi: Sarı, pembe ignimbirit
Toi	İncik formasyonu: Karasal çakıtaşı, kumtaşı, çamurtaşı
Tec	Çayraz formasyonu: Çakıtaşı, kumtaşı, kireçtaşı, çamurtaşı
Tco	Arzilar kireçtaşı üyesi: Nummulitli kireçtaşı
Tdb	Baraklı formasyonu: Karasal çakıtaşı, kumtaşı, çamurtaşı
Kog	Orta Anadolu granitoyitleri: Granit, granodiyorit, monzonit
Ko	Otlukaya ofiyolitli melan: Metabazit, serpantinli, split, diyabaz
Pz	Bozçaldağ formasyonu: Mermer
Pzk	Kabaktepe formasyonu: Kuvarsit
PKÜ	Gümüşler formasyonu: Kalkışit, mikaşit, kuvarşist, gnays

2 0 2 4 6 8 10
KM
ÖLÇEK / SCALE : 1 / 100 000

İŞARETLER

—	Dokanak , yaklaşık dokanak
—	Tanımlanmamış fay, yaklaşık tanımlanmamış fay
- - -	Olasılı fay
—	Düşey fay, yaklaşık düşey fay
—	Doğrultu atımlı fay, yaklaşık doğru atımlı fay
▲▲	Bindirme fayı
—	Tabaka doğrultu ve eğimi
▲	Yapraklanma
—	Birinci derece karayolu
—	İkinci derece karayolu
—	Demiryolu
●	Yerleşim yeri

Şekil 1. İnceleme alanının jeoloji haritası (Geology map of the study area)

Karstik akiferler önemli yeraltı suyu rezervuarları oluşturmaktadır. Traverten yüksek karbonat içeriği ve karstik boşluk gelişimi sayesinde, Kışladağ Formasyonu gösel kireçtaşlarının çözünme boşluklarıyla, Bozcaada Formasyonu ise mermerlerin karstik yapısı ve çatlak sistemleri nedeniyle yüksek akifer potansiyeli sergilemektedir. Alüvyon, çakıl ve kum gibi iri taneli malzemelerden oluşan yüksek gözeneklilik ve geçirgenlik özelliğiyle gözenekli geçirimli bir birimdir. Kil tabakaları yerel geçirimsiz zonlar oluştursa da, genel olarak önemli bir yeraltı suyu akiferi olarak işlev görür. Bu hidrojeolojik sınıflandırma, çalışma alanındaki su taşınımı ve depolanmasını kontrol eden ana faktörleri ortaya koymaktadır. Geçirimsiz ve az geçirimli birimler suyun hareketini kısıtlarken, karstik ve gözenekli birimler yeraltı suyu rezervuarları olarak önem taşımaktadır.

4.3. Su Noktaları (Water Points)

Bu araştırma kapsamında, Boğazlıyan (Yozgat) jeotermal sahasında hidrojeokimyasal değerlendirmeler yapmak amacıyla sistematik bir örnekleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında mevcut üç aktif jeotermal kuyudan (TS-1, TS-2, TS-3) termal su örnekleri ile yedi farklı soğuk su kaynağından (kaynak ve kuyular) örnekler alınarak toplam on adet su numunesi analiz edilmiştir. Jeotermal sistemin tarihsel gelişimine bakıldığında, bölgede daha önceki yıllarda daha fazla sayıda işletme kuyusunun bulunduğu ancak aşırı su çekimi ve kontrolsüz kuyu açılması gibi antropojenik etkenler nedeniyle rezervuar basıncında meydana gelen düşüşler sonucunda birçok kuyunun kapatıldığı gözlemlenmiştir. Aktif çalışan 3 jeotermal kuyunun ölçülen kuyu çıkış sıcaklıkları 32-37 °C aralığında değişim göstermekte olup, özellikle TS-1 ve TS-3 kuyularından elde edilen düşük sıcaklıktaki sular doğrudan kullanıma uygun bulunmuştur. TS-2 kuyusuna ait sondaj loglarında 575 m derinlikte 58,28 °C olarak rapor edilen sıcaklık değerinin, kuyu başında yapılan ölçümlerde 36,4 °C'ye düştüğü tespit edilmiştir. Jeotermal kuyuların kullanım alanları incelendiğinde; TS-1 kuyusunun Boğazlıyan Belediyesi'ne ait Bahariye (eski adıyla Cavlak) kaplıca tesislerine, TS-2 ve TS-3 kuyularının ise özel sektöre ait sera ısıtma sistemlerine hizmet verdiği bilinmektedir. Coğrafi dağılım açısından, TS-1 ve TS-3 kuyuları Boğazlıyan ilçe merkezinin 4 km batısında konumlanırken, TS-2 kuyusu Yozgat-Kayseri il sınırı yakınlarındaki Elmalı-Düver hattında yer almaktadır.

Çalışmanın hidrojeokimyasal boyutunda, jeotermal sistemin yüzey ve yeraltı suları ile olan etkileşim mekanizmalarını ortaya koyabilmek amacıyla yedi farklı soğuk su kaynağından kontrollü örneklemeler yapılmıştır. Soğuk su kaynaklarından elde edilen kimyasal veriler, jeotermal rezervuarın sınırlarının belirlenmesi, akifer dinamiğinin anlaşılması ve sistemin jeokimyasal evriminin değerlendirilmesi açısından kritik rol oynamaktadır. Özellikle soğuk suların hidrojeokimyasal karakterizasyonu, rezervuar kayalarla olan mineral dengelerinin yorumlanmasına ve sistemin beslenme mekanizmalarının aydınlatılmasına önemli katkılar sağlamıştır.

4.4. Hidrojeokimyasal Değerlendirmeler (Hydrogeochemical Evaluations)

12 Haziran 2023 tarihinde Boğazlıyan jeotermal sistemindeki termal ve yeraltı sularının fizikokimyasal karakterizasyonunu belirlemek için örnekleme yapılmıştır. Saha çalışmaları kapsamında, su örneklerinin temel fiziksel parametreleri olan pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve sıcaklık değerleri, örnekleme noktalarında in-situ olarak ölçülmüştür. Ayrıca hidrojeokimyasal karakterizasyonun detaylandırılması amacıyla, tüm su örneklerinde majör iyon ve ağır metal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, jeotermal sistemin kimyasal bileşiminin anlaşılması, su-kayaç etkileşimlerinin değerlendirilmesi ve hidrotermal süreçlerin yorumlanması için temel veri setini oluşturmaktadır. Tablo 1' de 10 örneğe ait fiziksel parametrelerin ve kimyasal analizlerin minimum ve maksimum değerleri verilmektedir.

Sıcaklık, jeotermal sistemlerin fizikokimyasal dinamiklerini kontrol eden temel parametrelerden biridir. Termal suların sıcaklığı, jeotermal gradyan etkisiyle derinlerde ısınan suların mineral çözünürlük dengesini, kimyasal bileşimini ve alkalinitesini doğrudan etkilemektedir. Boğazlıyan jeotermal sahasında ölçülen termal su sıcaklıkları 32,9-36,9 °C aralığında değişmekte olup, düşük entalpili (20-70 °C) jeotermal sistemler sınıfına girmektedir. Soğuk su kaynaklarında ölçülen sıcaklık değerleri ise 0,4-8,1 °C aralığında değişmektedir. Boğazlıyan sahasında ölçülen EC değerleri, jeotermal sular için 3451-7136 µS/cm, soğuk sular için ise 103,6-1370 µS/cm aralığında tespit edilmiştir. Aradaki bu belirgin farklılık jeotermal suların daha yüksek mineralizasyon seviyesine sahip olduğunu ve formasyonlarla daha uzun süreli etkileşim içinde olduğunu göstermektedir. pH, suyun aşındırıcı veya kabuk bağlayıcı karakterini belirleyen önemli bir faktördür. Boğazlıyan sahasında termal suların pH değerleri 7,26-7,7, soğuk suların ise 8,18-8,63 aralığında ölçülmüştür. Şahinci (1991)' de belirtilen pH sınıflamasına göre termal sular bazik karakterli, soğuk sular ise bazik ve bazik karakterli olarak sınıflandırılmıştır.

4.4.1. Suların sınıflandırılması (Classification of waters)

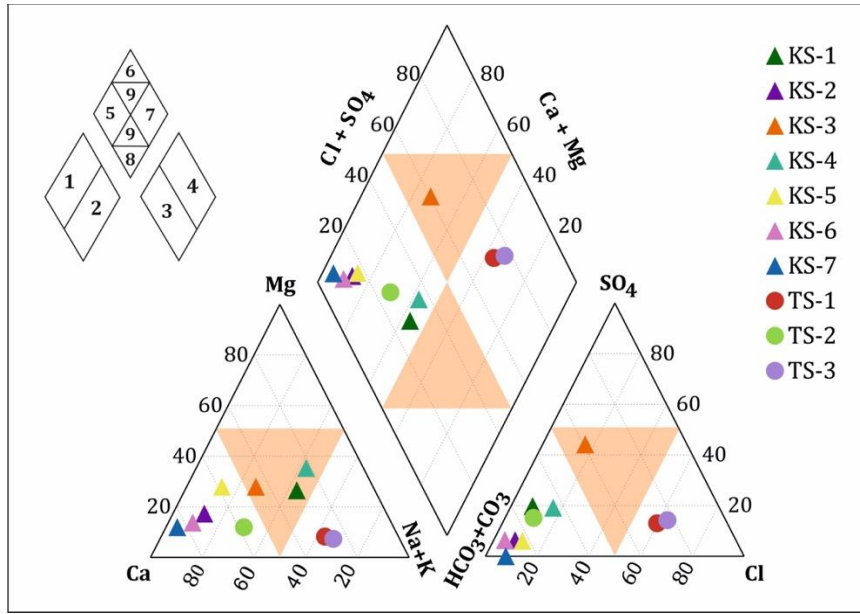
Suların kimyasal bileşimlerinin sınıflandırılması, hidrojeolojik sistemlerin anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, su örneklerinin hidrojeokimyasal karakterizasyonu için Piper ve Schoeller diyagramları kullanılmıştır. Piper diyagramı, suların anyon ve katyon kompozisyonlarını görselleştirerek hidrojeokimyasal fasiyelerin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Schoeller diyagramı ise farklı su örneklerinin iyonik bileşimlerini karşılaştırmak ve benzerliklerini ortaya koymak için etkili bir yöntem sunmaktadır.

Piper diyagramı, Ca^{+2} , Mg^{+2} , $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ katyonları ile HCO_3^{-} , SO_4^{-2} , Cl^{-} anyonlarının oransal dağılımını görselleştirerek su türlerinin sınıflandırılmasını ve mineralizasyon süreçlerinin izlenmesini sağlayan rombik bir sistemdir (Piper, 1944). Şekil 2' de verilen Piper diyagramı, çalışma alanındaki suların üç farklı hidrojeokimyasal gruba ayrıldığını ortaya koymaktadır. Termal su örneklerinden TS-1 ve TS-3 Na-Cl tipi su karakteri sergilerken, TS-2 örneği Ca- HCO_3 tipi su özellikleri göstermektedir. Soğuk sular ise genel olarak Ca- HCO_3 ve Ca-Mg- HCO_3 tipleri ile karışım karakterli sular olarak gruplandırılmıştır. Bölgedeki suların kimyasal bileşimi, temas ettikleri kayaç türleri ve su-kayaç etkileşim süreçleriyle şekillenmektedir. Na-Cl tipindeki termal sular (TS-1 ve TS-3), derin dolaşım sistemlerinde evaporitik veya magmatik kayalarla etkileşime işaret ederken, Ca- HCO_3 tipi sular (TS-2 ve soğuk sular) karbonat kayalarının çözünmesiyle oluşmuştur. Ca-Mg- HCO_3 tipi sular ise dolomitik birimlerin varlığını yansıtmaktadır. TS-1 ve TS-3 termal su örneklerinin diyagram üzerinde yakın konumlanması, bu suların benzer hidrojeolojik kökene sahip olduğunu ve ortak bir rezervuar sisteminden beslendiğini düşündürmektedir. Bu bulgular, bölgedeki hidrotermal sistemin heterojen yapısını ve farklı su kimyası evrim süreçlerini yansıtmaktadır.

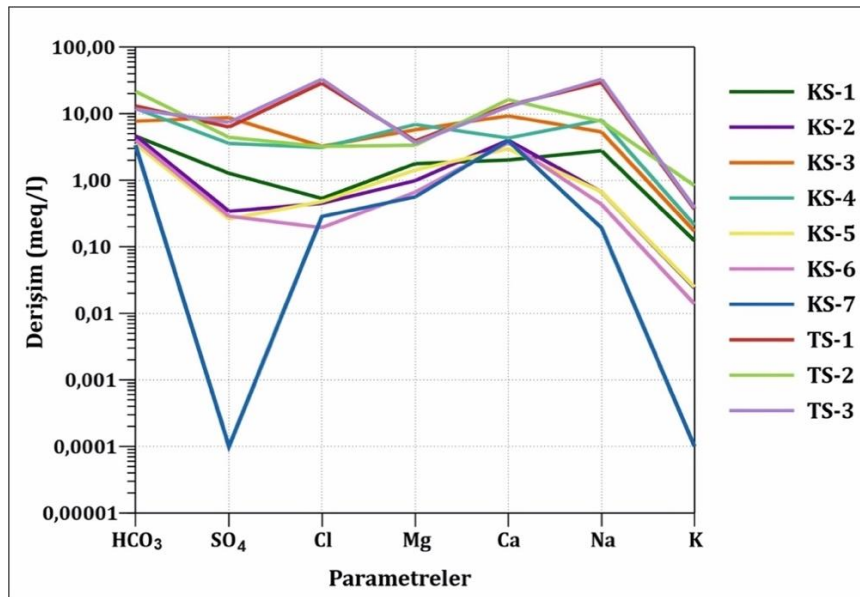
Tablo 1. Su örneklerinin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları (Physical and chemical analysis results of water samples).

Parametreler	TERMAL SULAR		SOĞUK SULAR		İTASHY, 2005	WHO, 2022
	Minumum	Maksimum	Minumum	Maksimum		
T (°C)	32,9	36,9	4,0	8,1	6,5-8,5	6,5-8,5
pH	7,26	7,7	8,18	8,63		
EC (µS/cm)	3451	7136	103,6	1370	2500	
Na (mg/l)	175,13	753,97	4,4	184,66	200	200
K (mg/l)	14,36	32,26	<0,497	8,25		
Ca (mg/l)	254,1	325,05	40,37	185,54		200
Mg (mg/l)	40,73	47,19	6,81	83,34		150
CO ₃ (mg/l)	0	0	0	0		
HCO ₃ (mg/l)	712,83	1314,58	203,26	731,35		
Cl (mg/l)	113,88	1161,28	6,86	114,44	250	250
SO ₄ (mg/l)	211,6	354,1	<7,327	416,62	250	250
NO ₃ (mg/l)	<4,175	<4,175	32,58	78,57		
NO ₂ (mg/l)	<0,028	2,84	<0,028	<0,028		
F (mg/l)	2,7	3,02	<0,277	0,92		
SiO ₂ (mg/l)	48,62	53,94	23,35	59,55		
Al (µg/l)	<7,00	11,2	<7,00	8,66	200	200
Cr (µg/l)	<0,08	<0,08	0,08	5,21	50	50
Cu (µg/l)	<0,10	0,49	<0,10	2,1	2	2
Fe (µg/l)	26,47	864,57	<7,00	12,29	200	300
Ni (µg/l)	<1,00	7,75	<1,00	1,98	20	70
As (µg/l)	6,23	26,04	1,85	23,14		10
TDS (mg/l)	2243,15	4638,4	56,98	753,5		1000

Su örneklerinin iyonik bileşimlerini karşılaştırmak için kullanılan Schoeller diyagramında, her bir su örneğinin iyon konsantrasyonları (meq/l) yarı logaritmik eksenle gösterilerek birbirine bağlanır ve böylece her su için karakteristik bir kimyasal profil oluşturulur. Benzer hidrojeolojik kökene sahip suların profilleri paralel eğilimler gösterirken, farklı kaynaklardan gelen sular belirgin şekilde ayrılmaktadır. Çalışma alanındaki su örneklerinin Schoeller diyagramı Şekil 3' te verilmiştir.



Şekil 2. Piper diyagramı (Piper diagram)



Şekil 3. Schoeller yarı logaritmik diyagramı (Schoeller semi-logarithmic diagram)

Bu diyagrama göre TS-1 ve TS-3 termal sularının Na-Cl tipi su karakteristiğini koruduğunu, diğer suların ise Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ tiplerinde gruplandığını doğrulamaktadır. Bu görsel analiz, suların kökeni ve hidrojeokimyasal evrimi hakkında nicel bir karşılaştırma imkanı sunarak, Piper diyagramı sonuçlarını destekleyici niteliktedir. Özellikle paralel profiller, suların ortak bir rezervuar sistemi veya benzer kayaç-su etkileşim süreçlerinden geçtiğine işaret etmektedir.

Schoeller (1955) sınıflamasına göre sular, içerdiği başlıca anyonlar olan karbonat, bikarbonat, klorür ve sülfat miktarlarına göre değerlendirilir. Bu sınıflamaya göre, TS-1 ve TS-3 termal suları düşük klorür içerikleriyle "oligoklorürlü", diğerleri ise "olağan klorürlü" sulardır. Sülfat açısından TS-1, TS-3 ve KS-3 suları "oligosülfatlı", diğerleri "olağan sülfatlı" sınıfındadır. Karbonat-bikarbonat oranları dikkate alındığında ise tüm termal sular ile KS-3 ve KS-4 soğuk suları "hiperkarbonatlı", kalan soğuk sular "olağan karbonatlı" olarak değerlendirilmiştir.

4.4.2. Hidrojeokimyasal prosesler (Hydrogeochemical processes)

Yeraltısularında bulunan majör iyonlar, toplam çözünmüş katı maddelerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır ve bu iyonların konsantrasyonları, akifer sisteminde meydana gelen hidrojeokimyasal süreçler doğrultusunda önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Yeraltısuyunun kimyasal bileşimini belirleyen başlıca süreçler; karbonat ve silikat minerallerinin ayrışması, iyon değişim reaksiyonları ve buharlaşma gibi doğal jeokimyasal

mekanizmalardır (Lakshmanan vd., 2003). Bu süreçlerin etkinliği ise, akifer sisteminin jeolojik özelliklerine, suyun temas ettiği kayaç ve minerallerin türüne, mineral çözünürlüklerine, ortam sıcaklığına ve hidrodinamik koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Freeze ve Cherry, 1979).

Gibbs (1970) diyagramı, doğal sulara gözlenen kimyasal bileşimin kökenini açıklamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu diyagramı, $Na^+/(Na^++Ca^{+2})$ ve $Cl^-(Cl^-+HCO_3^-)$ oranları ile toplam çözünmüş madde (TDS) konsantrasyonlarını karşılaştırarak, su örneklerinin jeokimyasal karakterini belirlemede kullanılır. Bu diyagram sayesinde, suyun bileşimini kontrol eden yağış, kayaç-su etkileşimi ve buharlaşma gibi doğal süreçlerin hangisinin baskın olduğunu ayırt etmek mümkündür. Bu çalışmada, termal ve soğuk su örneklerinin hidrojeokimyasal kökenleri, Şekil 4'te sunulan Gibbs diyagramı kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, TS-1 ve TS-3 termal su örnekleri yüksek toplam çözünmüş madde (TDS) içeriği ve yüksek $Na^+ - Cl^-$ konsantrasyonları içermeleri sebebiyle buharlaşmanın baskın olduğu alanda yer almaktadır. Bu da söz konusu suların daha derin akifer sistemlerinden beslendiğini ve uzun süreli yeraltı sirkülasyonuna maruz kaldığını göstermektedir. Buharlaşma süreci, suyun iyonik konsantrasyonunu artırarak tuzluluk seviyesini yükseltmektedir (Subba Rao, 2006). Diğer su örnekleri ise düşük TDS değerleri ve zayıf iyon derişimi ile karakterize edilmiş olup, Gibbs diyagramında kayaç baskın bölgede dağılım göstermektedir. Bu sonuçlar, çalışma sahasındaki yeraltısuyunun kimyasal bileşiminde temel belirleyici faktörün kayaç-su etkileşimleri olduğunu göstermektedir.

Yeraltısularının jeokimyasal bileşimini, suyun yeraltında temas ettiği kayaçlarla gerçekleştirdiği kimyasal etkileşimleri belirlemek için Schoeller (1965) kloroalkalin indekslerini (CAI-I ve CAI-II) geliştirmiştir. Bu indeksler, başlıca Na^+ , K^+ gibi alkali iyonlar ile Ca^{+2} , Mg^{+2} gibi toprak alkali iyonlar arasındaki yer değiştirme reaksiyonlarını tespit etmek amacıyla kullanılır. Schoeller'in formülleri, suyun dolaşımı sırasında iyon değişiminin gerçekleşip gerçekleşmediğini ve eğer varsa bu sürecin hangi yönde ilerlediğini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Schoeller, 1965; 1967). CAI-I ve CAI-II indekslerinin negatif değerler göstermesi, yeraltısuyundaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının, akifer kayaçlarındaki Na^+ ve K^+ iyonlarıyla yer değiştirdiğini, yani klasik katyon değişim sürecinin gerçekleştiğini ifade eder (Schoeller, 1967; Aghazadeh ve Mogaddam, 2011; Davraz vd., 2024). Buna karşılık, indekslerin pozitif çıkması, ters yönde bir iyon değişiminin varlığına işaret eder ve bu durumda yeraltısuyundaki Na^+ ve K^+ iyonları, kayaçlardan Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarını serbest bırakacak şekilde reaksiyona girmektedir. Negatif indeks değerleri aynı zamanda sistemde bir kloroalkalin dengesizliği olduğunu gösterir ve bu durum genellikle katyon-anyon değişim reaksiyonlarıyla bağlantılıdır (Davraz vd., 2024).

Bu çalışmada yer alan su örneklerinin KS-7 hariç tamamında CAI-I ve CAI-II değerlerinin negatif olduğu tespit edilmiştir (Tablo 2). Bu bulgu, bölgedeki hidrojeokimyasal süreçlerin temel olarak normal katyon değişimi mekanizması ile kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle, akifer kayaçlarında bulunan Na^+ ve K^+ iyonları ile yeraltısuyundaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları arasında yer değişim reaksiyonları gerçekleşmektedir. Ancak KS-7 numunesinde her iki indeksin de pozitif değerler sergilemesi, bu lokasyonda ters yönde bir iyon değişim sürecinin aktif olduğunu göstermektedir. Bu durum, yeraltısuyundaki Na^+ ve K^+ iyonlarının akifer matriksindeki Ca^{+2} ve Mg^{+2} ile yer değiştirdiği anlamına gelmektedir. Söz konusu anomalinin nedeni olarak; bölgesel litolojik farklılıklar, su-kayaç etkileşimlerinin az gelişmiş veya erken olması ve antropojenik kökenli dışsal kontaminasyon etkileri gibi faktörler düşünülebilir.

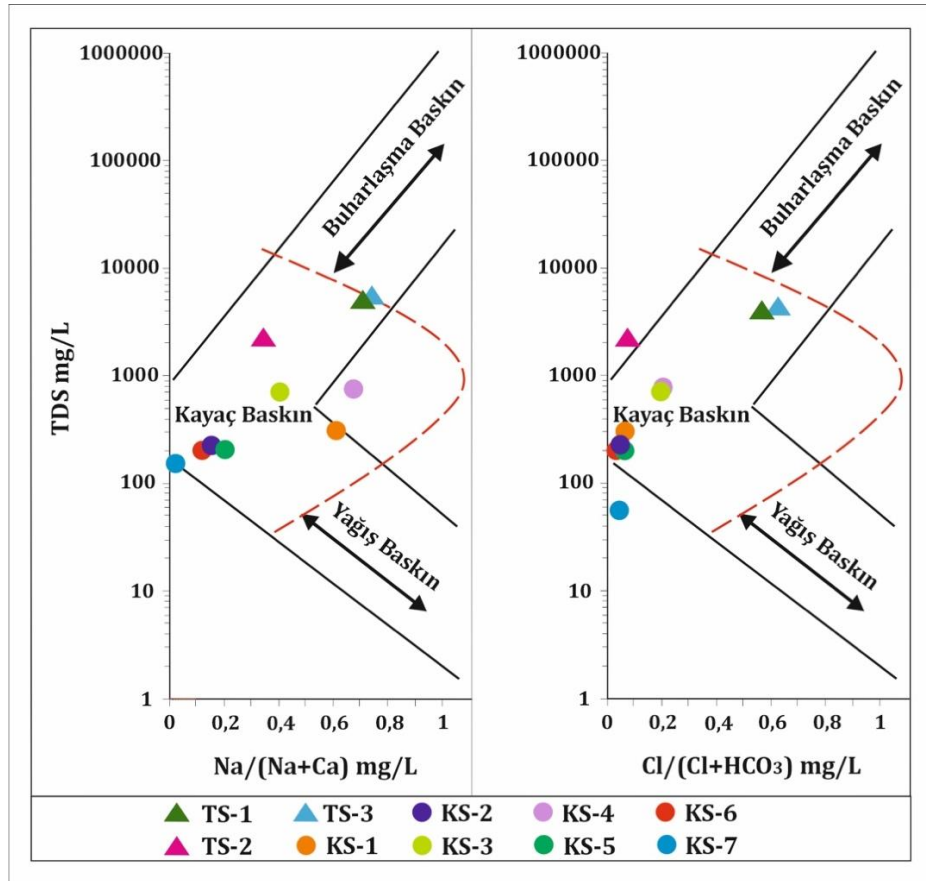
Yeraltısularının kimyasal bileşimini şekillendiren mineral çözünme ve ayrışma süreçleri $Ca^{+2}+Mg^{+2} - HCO_3^-+SO_4^{+2}$ iyonlarının meq/l oranlarını gösteren grafikler yardımıyla analiz edilebilmektedir. Bu tür diyagramlar, su-kayaç etkileşimlerinde hangi mineral türlerinin baskın rol oynadığını görsel olarak değerlendirme imkanı sunmaktadır. McLean ve Jankowski (2000) tarafından belirtildiği üzere, veri noktalarının 1:1 stokiyometrik doğru üzerinde veya yakınında yer alması, sistemde kalsit, aragonit, dolomit ve jips minerallerinin çözünmesinin hakim olduğunu göstermektedir. Diyagramda 1:1 doğrusunun üst kısmında kalan örnekler karbonat ayrışmasının, alt kısımda kalan örnekler ise silikat ayrışmasının baskınlığına işaret etmektedir (Datta ve Tyagi, 1996; Rajmohan ve Elango, 2004; Kumar vd., 2006). Çalışma alanına ait su örneklerinin Şekil 5' te sunulan diyagramdaki dağılımı incelendiğinde, örneklerin büyük çoğunluğunun 1:1 doğrusunun alt bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Bu dağılım, bölgedeki hidrojeokimyasal süreçlerde silikat ayrışmasının baskın süreç olduğunu ortaya koymaktadır.

Yeraltısularında kalsit ve dolomit minerallerinin çözünme mekanizmaları, Ca/Mg molar oranına bağlı olarak yorumlanabilmektedir. Ca/Mg oranının 1 olması dolomit çözünmesinin, 1'den büyük olması ise kalsit çözünmesinin baskın olduğunu göstermektedir (Maya ve Loucks, 1995). Ca/Mg oranının 2'nin üzerinde ise silikat minerallerinin çözünmesinin bir göstergesidir (Katz vd., 1998). Ca/Mg oranının 1'den küçük olduğu durumlarda ise karbonat ayrışması baskındır (Kumar vd., 2009). Çalışma alanındaki su örneklerinin Ca/Mg oranları incelendiğinde, hem termal hem de soğuk suların büyük çoğunluğunda bu oranın 2'nin üzerinde olduğu ve dolayısıyla silikat mineral ayrışmasının hakim süreç olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 2). Bununla birlikte, KS-1 ve KS-4 numunelerinde Ca/Mg oranının 1'e yakın olması, bu örneklerde dolomit çözünmesinin önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Rajesh vd., 2011; Aksever ve Davraz, 2024).

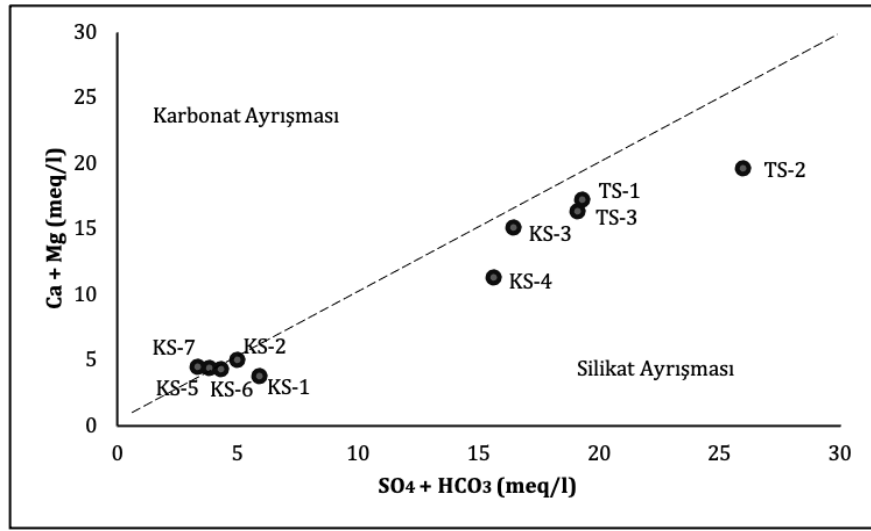
Yeraltısularının kimyasal bileşiminde önemli bir gösterge olan $\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2}/\text{HCO}_3^-$ molar oranının 1'den büyük olması karbonat minerallerinin çözünmesinin, 1'den küçük olması ise silikat minerallerinin ayrışmasının baskın olduğunu göstermektedir (Kumar Singh vd., 2012; Pazant vd., 2012). Çalışma alanından elde edilen su örneklerinin analiz sonuçları incelendiğinde, $\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2}/\text{HCO}_3^-$ oranının bütün örneklerde 1'in altında kaldığı gözlemlenmiştir (Tablo 2). Bu bulgu, bölgedeki yeraltısularında gözlenen Ca^{+2} , Mg^{+2} ve yüksek HCO_3^- içeriğinin kaynağının karbonat minerallerinden ziyade silikat minerallerinin ayrışması olduğunu ortaya koymaktadır.

Yeraltısularında $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ oranı, akiferde gerçekleşen ayrışma mekanizmasının türünü belirlemede önemli bir gösterge. $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ molar oranının 5'in altında olması silikat ayrışmasının, 10'un üzerinde olması ise karbonat ayrışmasının baskın hidrojeokimyasal mekanizma olduğunu göstermektedir (Tay, 2012). Çalışma alanından alınan örneklerde 6,92-27,03 aralığında ölçülen $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ oranları (Tablo 2), ilk bakışta karbonat çözünmesinin hakim süreç olduğunu düşündürmektedir. Ancak diğer jeokimyasal göstergeler bu sonuçla çelişmektedir. $\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2}/\text{HCO}_3^-$ değerleri ve $\text{Ca}+\text{Mg} - \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4$ grafikleri gibi çoklu parametreler, sistemde silikat ayrışmasının asıl baskın süreç olduğuna işaret etmektedir. Bu görünür çelişkinin olası nedenleri; minerallerinin yüksek çözünürlüğü nedeniyle kısa vadede HCO_3^- konsantrasyonunda hızlı artışlar gözlenmesi, silikanın (SiO_2) ortam koşullarına bağlı olarak çökmesi veya kil mineralleri tarafından tutulması sonucu gerçek ayrışma oranlarını tam yansıtmaması olabilir.

Yeraltısuyunda buharlaşma süreçlerinin anlaşılmasında Na/Cl oranı da önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. Buharlaşma, suyun toplam çözünmüş katı madde (TDS) miktarını artırmasına rağmen Na/Cl oranında genellikle bir değişiklik yaratmaz; bu sebeple sabit kalan Na/Cl oranı buharlaşmanın varlığını göstermektedir (Subramani vd., 2010). Na/Cl oranının 1'e eşit ya da daha yüksek olması, sodyumun muhtemelen silikat minerallerinin ayrışması sonucu ortaya çıktığını göstermektedir (Mayback, 1987; Kumar vd., 2006; Tay, 2012). Çalışma alanındaki örneklerde bu oranın genellikle 1'in üzerinde olması (Tablo 2), sodyumun kökeninin silikat ayrışmasıyla ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Gibbs diyagramı (Gibbs diagram)

Şekil 5. (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) grafiği ((Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) graph)

Tablo 2. Su örneklerinin iyon oranları (The ionic ratios of water samples)

Örnek No	Ca/Mg	Na/Cl	HCO ₃ /SiO ₂	Ca+Mg/HCO ₃	CAI-I	CAI-II
TS-1	3,44	1,02	15,09	0,66	-0,031	-0,047
TS-2	4,83	2,37	27,03	0,45	-1,626	-0,2
TS-3	3,48	1	13,21	0,69	-0,012	-0,02
KS-1	1,14	5,22	8,15	0,4	-4,452	-0,367
KS-2	4,06	1,46	8,23	0,53	-1,266	-0,103
KS-3	1,62	1,64	17,68	0,96	-0,698	-0,129
KS-4	0,63	2,59	12,28	0,46	-1,658	-0,31
KS-5	2,08	1,39	8,17	0,62	-0,447	-0,044
KS-6	5,45	2,26	10,51	0,53	-1,336	-0,051
KS-7	6,96	0,67	6,92	0,67	0,321	0,018

4.4.3. Suların kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi (Assessment of water usability)

Boğazlıyan jeotermal sahasındaki termal ve soğuk su örneklerinin kimyasal analiz sonuçları, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2005) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2022) tarafından belirlenen içme suyu limit değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elektriksel iletkenlik (EC) için İTASHY (2005) tarafından belirlenen üst sınır 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olup, çalışma alanındaki termal su örneklerinde bu değerin oldukça üzerinde ölçümler kaydedilmiş ve bu nedenle söz konusu termal sular içme suyu açısından uygun bulunmamıştır. Na^+ değeri için hem WHO (2022) hem de İTASHY (2005) tarafından 200 mg/l sınır değeri önerilmiş; ancak termal sular bu değerler aşılmıştır. Ca^{2+} için WHO (2022) tarafından belirlenen 200 mg/l sınır değerinin üzerinde sonuçlar sadece termal sularda gözlemlenmiştir. Mg^{2+} için WHO (2005)'nin belirlediği 150 mg/l limitine hem termal hem de soğuk suların uyduğu görülmektedir. Cl^- parametresi için her iki mevzuat da 250 mg/l sınırını esas almış olup, bazı termal sular bu limitin aşıldığı tespit edilmiştir (TS-1, TS-3). SO_4^{2-} için de benzer şekilde hem İTASHY (2005) hem WHO (2022) tarafından 250 mg/l sınır değeri belirlenmiş olup, bazı soğuk (KS-3) ve termal su (TS-1, TS-3) örneklerinde bu değerin aşıldığı gözlemlenmiştir. Fe içeriği ise yalnızca termal sulara hem İTASHY (2005) hem WHO (2022) tarafından belirlenen sınır değerlerin üzerinde bulunmuştur. As için WHO (2022) tarafından önerilen 10 $\mu\text{g}/\text{l}$ değerinin, bazı soğuk (KS-1, KS-4, KS-7) ve termal su (TS-2, TS-3) örneklerinde aşıldığı belirlenmiştir. Toplam çözünmüş katı madde (TDS) açısından WHO (2022)'nin önerdiği 1000 mg/l sınırı yalnızca termal su örneklerinde aşılmıştır. Bu veriler, termal suların birçok parametre bakımından içme suyu standartlarının üzerinde değerlere sahip olduğunu, buna karşılık soğuk suların genel olarak daha uygun nitelikler taşıdığını ortaya koymaktadır.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma, Yozgat'ın Boğazlıyan ilçesindeki termal ve soğuk suların hidrojeokimyasal özelliklerini, kökenini ve kullanım potansiyelini detaylı bir şekilde inceleyerek bölgenin jeotermal sisteminin dinamiklerini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, termal suların hidrokimyasal kompozisyonunun derin dolaşımli bir hidrotermal sistemle ilişkili olduğunu göstermektedir. Piper ve Schoeller diyagramları, Na-Cl tipi termal sular (TS-1 ve TS-3), Ca-HCO₃ tipi termal su (TS-2), ve Ca-HCO₃ ile Ca-Mg-HCO₃ tipi soğuk sular bölgedeki suların üç ana hidrokimyasal gruba ayrıldığını göstermiştir. Piper ve Schoeller diyagramlarına göre, TS-1 ve TS-3 numuneleri Na-Cl tipi su karakteristiği sergilerken, bu durum evaporitik veya magmatik kayalarla uzun süreli etkileşimin bir sonucu olarak yorumlanmıştır. Gibbs diyagramında bu suların, buharlaşma baskın bölgeye daha yakın yer alması

ve yüksek TDS değerleriyle birlikte derin bir rezervuar kaynaklı olduklarını desteklemektedir. Buna karşılık, Ca-HCO_3 ve Ca-Mg-HCO_3 tipi suların varlığı, karbonat ve dolomitik birimlerin çözünmesiyle şekillenen sığ akifer sistemlerini işaret etmektedir. Hidrojeokimyasal süreçlerin değerlendirilmesinde, kloroalkalin indekslerinin (CAI-I ve CAI-II) çoğunlukla negatif değerler göstermesi, normal katyon değişim mekanizmalarının bölgede hakim olduğunu ortaya koymuştur. Ancak KS-7 numunesinde pozitif değerlerin gözlenmesi, bu lokasyonda ters yönde bir iyon değişim sürecinin aktif olduğunu ve muhtemelen litolojik farklılıklar veya antropojenik etkilerin bu duruma yol açtığını düşündürmektedir. Ayrıca, $(\text{Ca}+\text{Mg})-(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$ grafiği ve çeşitli iyon oranları (Ca/Mg , $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$), bölgedeki su kimyasının şekillenmesinde silikat ayrışmasının baskın rol oynadığını göstermiştir.

Su kalitesi açısından yapılan değerlendirmeler, termal suların birçoğunun İTASHY (2005) ve WHO (2022) standartlarını aştığını ve içme suyu olarak kullanıma uygun olmadığını göstermiştir. Özellikle Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Fe ve As konsantrasyonlarının yüksek olması, bu suların doğrudan tüketim için risk oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, soğuk sular genel olarak içme suyu standartlarına uygunluk göstermiştir. Termal suların yüksek TDS ve iyon içeriği, bu kaynakların kaplıca kullanımı, balık yetiştiriciliği, sera ısıtma vb. gibi kullanım amaçları için daha uygun olduğunu göstermektedir.

Jeotermal sistemin sürdürülebilirliği açısından, çalışma alanındaki bazı kuyuların kapatılmış olması, aşırı su çekimi ve rezervuar basıncındaki düşüşlerin sistem üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir. Özellikle TS-2 kuyusunda derinlikte ölçülen 58,28 °C'lik sıcaklığın yüzeyde 36,4 °C'ye düşmesi, soğuk su karışımı veya rezervuar soğuması gibi sorunların varlığına işaret etmektedir. Bu nedenle, jeotermal kaynakların uzun vadeli ve verimli kullanımı için re-enjeksiyon sistemlerinin zorunlu hale getirilmesi, kuyu verimliliğini artırmak amacıyla sürekli izleme çalışmalarının yapılması ve aşırı çekimi önleyecek kuyu işletme stratejilerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK 2022-8804 no'lu doktora projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, çalışmayı finansal olarak destekleyen SDÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynakça (References)

- Aghazadeh, N., Mogaddam, A. A., 2011. Investigation of Hydrochemical Characteristics of Groundwater in the Harzandat Aquifer, Northwest of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1), 183-195.
- Akkuş, İ., Alan, H., 2016. Turkey's Geothermal Resources, Projections, Problems and Suggestions Report (Report No. 123), TMMOB Chamber of Geological Engineers.
- Aksever, F., Davraz, A., 2024. Jeokimyasal Süreçler ve Yeraltısuyu Kimyası: Akçşehir Ovası (Karaman) Örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1526-1537.
- Ataman, G., 1972. Ankara'nın Güneydoğusundaki Granitik/ Granodiyorit Kütlelerden Cefalık Dağ Radyometrik Yaşı Hakkında Ön Çalışma, Hacettepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2 (1).
- Ayan, M., 1963. Contribution a etude petrographique et geologique de la region situee au Nord- Est de Kaman (Turquie) MTA yayını No. 115, 332.
- Çelik, H., 1995. Boğazlıyan Havzası (Yozgat) Hidrojeoloji İncelemesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Türkiye.
- Datta, P.S., Tyagi, S.K., 1996. Major Ion Chemistry of Groundwater in Delhi Area: Chemical Weathering Processes and Groundwater Flow Regime. *Journal of Geological Society India*, 47:179-188.
- Davraz, A., Şener, Ş., Şener, E., 2024. Dağbeli Köyü (Antalya) Güneyi Kireçtaşı Akiferinin Hidrojeokimyasal Özellikleri, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 12(3), 544-556.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Kara, H., Yergök, A.F., Esentürk, K., 2005. Yozgat J34 Paftası, No:48. MTA Jeoloji Etüt Dairesi.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979. *Groundwater* (p. 604). Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Froger, J.L., Lénat, J.F., Chorowicz, J., Le Pennec, J.L., Bourdier, J.L., Köse, O., Zimitoglu, O., Gündoğdu, N.M., Gourgau, A., 1998. Hidden Calderas Evidenced by Multisource Geophysical Data: Example of Cappadocian Calderas, Central Anatolia. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 85, 99-128.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanism Controlling World Water Chemistry. *Sciences* 170, 795-840.
- İ.T.A.S.H.Y., 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular. Türk İçme Suyu Standartları TS 266 sayılı standart, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Katz B.G., Coplen T.B., Bullen T.D., Davis J.H., 1998. Use of Chemical and Isotopic Tracers to Characterize the Interaction between Groundwater and SurfaceWater in Mantled Karst. *Groundwater*, 35, 1014-1028.
- Ketin, İ., 1955. Yozgat Bölgesinin Jeolojisi ve Orta Anadolu Masifinin Tektonik Durumu. *Türkiye Jeoloji Kurumu (TJK) Bülteni*, 6:1, 1-40.
- Koçak, A., 1997. Kozaklı Jeotermal Alanının Su kimyası ve Rezervuar Sıcaklığının İncelenmesi. Doktora Tezi. Hacettepe

- Üniversitesi, Türkiye.
- Kolay, E., Koçak, İ., Temiz, U., 2017. Jeotermal Sahalarda Karşılaşılan Sorunlara Yozgat' tan Örnekler. II. Uluslar Arası Bozok Sempozyumu, Bildiri Kitabı, 4-6 Mayıs 2017, 51-70.
- KOP Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı, 2020. Jeotermal Kaynakların Değerlendirilmesi Projesi, Yozgat İli Raporu, [Çevrimiçi] Erişim: <https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/dokumanflipbook/jeotermal-kaynakların-değerlendirilmesi-projesi-yozgat-ili-raporu/2013>.
- Kumar Singh, A., Mondal, G.C., Singh, T.B., Singh, S., Tewary, B.K., Sinha, A., 2012. Hydrogeochemical Processes and Quality Assessment of Groundwater in Dumka and Jamtara Districts, Jharkhand, India. *Environmental Earth Science*, 67, 2175–2191.
- Kumar, M., Kumari, K., Singh, U.K., Ramanathan, A.L. 2009. Hydrogeochemical Processes in the Groundwater Environment of Muktsar, Punjab: Conventional Graphical and Multivariate Statistical Approach. *Environmental Geology*, 57, 873–884.
- Kumar, M., Ramanathan, A.L., Rao, M.S., Kumar, B., 2006. Identification and Evaluation of Hydrogeochemical Processes in the Groundwater Environment of Delhi, India. *Environmental Geology*, 50, 1025–1039.
- Lakshmanan, E., Kannan, R., Senthil Kumar, M., 2003. Major Ion Chemistry and Identification of Hydrogeochemical Processes of Round Water in a Part of Kancheepuram District, Tamil Nadu, India. *Environmental Geosciences*, 10(4), 157–166.
- Lund, J., Boyd, T., 2016. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. *Geothermics*, 60, 66–93.
- Maden, N., 2012. Geophysical Approach for the Detection and Evaluation of Geothermal Energy Potential Stimulated from Geology and Tectonics in Cappadocia Region (Central Turkey). *Geothermal Energy, Technology and Geology*, 6, 169–192.
- Maya A.L., Loucks M.D., 1995. Solute and Isotopic Geochemistry and Groundwater Flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, 172 (1-4), 31-59.
- Mayback, M., 1987. Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River-Dissolved Loads. *American Journal of Science*, 287, 401–428.
- McLean, W., Jankowski, J., 2000. Groundwater Quality and Sustainability in an Alluvial Aquifer, Australia. In: Sililo et al (eds) *Proceedings of XXX IAH Congress on Groundwater: Past Achievements and Future Challenges*. Cape Town, South Africa, 26th November-1st December, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Ok, G., 2007. Kozaklı (Nevşehir) ve Terme (Kırşehir) Sıcak Ve Mineralli Sularının Su Kimyası Ve İzotopik Yöntemlerle Karşılaştırılması, Tıbbi ve Biyoiklimsel Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi, Türkiye.
- Özulukale, S., Şimşek, Ş., 2015. Saraykent (Yozgat) Jeotermal Sularının Hidrojeokimyasal Değerlendirilmesi. *Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu*, 3-5 Eylül 2015, Bildiri Kitabı: 513-520 Trabzon, Turkey.
- Pasquare, G., 1968. Geologie of the Cenozoic Volcanic Area of Central Anatolia, *Atti della Acad No. Delince; menorie serie VIII*, IX, 55 – 204 Roma.
- Pasvanoğlu, S., Chandrasekharam, D., 2011. Hydrogeochemical and Isotopic Study of Thermal and Mineralized Waters from the Nevşehir (Kozaklı) Area, Central Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202, 241-250.
- Pazand, K., Hezarkhani, A., Ghanbari, Y., Aghavali, N., 2012. Geochemical and Quality Assessment of Groundwater of Marand Basin, East Azarbaijan Province, Northwestern Iran. *Environmental Earth Science*, 67, 1131–1143.
- Piper, A. M., 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 25, 914-923.
- Rajesh, R., Brindha, K., Murugan, R., Elango, L., 2011. Influence of Hydro-geochemical Processes on Temporal Changes in Groundwater Quality in a part of Nalgonda District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 65, 1203–1213.
- Rajmohan, N., Elango, L., 2004. Identification and Evolution of Hydrogeochemical Processes in the Groundwater Environment in an Area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. *Environmental Geology*, 46, 47–61.
- Schoeller, H., 1955. *Gechemie des Eaux Souterraines*. Rev. Inst. Franc. Petrole, Paris, 10. No. 3-4.
- Schoeller, H., 1965. Qualitative Evaluation of Groundwater Resources. In: *Methods and Techniques of Groundwater Investigations and Development*. Water Resources Series, 33, 54-58, UNESCO, Paris.
- Schoeller, H., 1967. Qualitative Evaluation of Groundwater Resources. In *Methods and techniques of Groundwater Investigation and Development*. Water Research Series, 44–52, UNESCO, Paris.
- Seymen, İ., 1982. Kaman Dolayında Kırşehir Masifinin Jeolojisi. *Doçentlik Tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Subba Rao, N., 2006. Seasonal Variation of Groundwater Quality in a part of Guntur District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Geology*, 49, 413–429.
- Subramani, T., Rajmohan, N., Elango, L., 2010. Groundwater Geochemistry and Identification of Hydrogeochemical Processes in a Hard Rock Region, Southern India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 162, 123–137.
- Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası, Reform Matbaası, 548s, İzmir.
- Şener, M.F., Şener, M., Uysal, I.T., 2017. The Evolution of the Cappadocia Geothermal Province, Anatolia (Turkey): Geochemical and Geochronological Evidence. *Hydrogeology*, 25, 2323–2345.
- Şener, Ş., Erhan, Ş., 2021. Şefaati (Yozgat) Doğusu Su Kaynaklarının Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelemesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 126-138.
- Sengör, A.M.C., Canitez, N., 1982. The North Anatolian Fault. In: Berckhemer, H., Hsu, K. (Eds.), *Alpine–Mediterranean Geodynamics*. Am. Geophys. Union, Geodynamic Series, 7, 205–216.
- Tay, C.K., 2012. Hydrochemistry of Groundwater in the Savelugu–Nanton District, Northern Ghana. *Environmental Earth Science*, 67, 2077–2087.
- Temel, A., Gundogdu, M.N., Gourgaud, A., 1998. Petrological and Geochemical Characteristics of Cenozoic Alkaline Volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 327–354.
- WHO, 2022. World Health Organization, Guidelines for Drinking-Water Quality, Fourth Edition Incorporating the First and Second addenda. ISBN 978-92-4-004506-4.
- Yılmaz Turalı, E., Şimşek, Ş., Koç, K., 2016. Hydrogeochemical Investigation of Yerköy (Yozgat-Turkey) Geothermal Waters. *European Geothermal Congress*, 19-24 September 2016, Strasbourg, France.
- Yılmaz, E., Şimşek, Ş., 2013. Observation Studies of Wells in Sorgun Geothermal Field (Yozgat-Turkey). *European Geothermal Congress*, 3-7 June 2013, Pisa, Italy.