



DAVRAZ DAĞI (ISPARTA) VE ÇEVRESİNDE KARBONAT AKİFERDE BULUNAN YERALTISUYUNUN HİDROJEOKİMYASAL GELİŞİMİ

Selma DEMER^{1*}

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Davraz Dağı,
Isparta,
Karbonat Akifer,
Hidrojeokimyasal Proses,
Kavramsal Model.*

Öz

Bu çalışmada Davraz Dağı (Isparta) karbonat akiferindeki yeraltısuyunun hidrojeokimyasal evrimini belirlemek amacıyla, bölgenin tektonik ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak suların hidrojeokimyasal kavramsal modeli tanımlanmıştır. İnceleme alanından toplam 21 adet temsili yeraltısuyu örneği alınmış ve suların üç farklı fasiyeste olduğu belirlenmiştir: (a) Ca-HCO₃, (b) Ca-Mg-HCO₃ ve (c) Ca-Mg-HCO₃-SO₄. Ölçülen kısmen yüksek SO₄²⁻ ve NO₃⁻ konsantrasyonları evsel ve tarımsal faaliyetlerle ilişkilidir. İnceleme alanında yeraltısuyu kimyasını denetleyen temel faktör su-kayaç etkileşimidir ve kalsit ve dolomit çözünmesi baskın jeokimyasal süreçlerdir. Çalışma alanındaki yeraltısuyu örneklerinin pCO₂ değerlerinin, atmosferik pCO₂'den daha yüksek olması karbonat çözünmesini hızlandırmış, su-kaya etkileşimi ile akiferdeki başlıca mineral fazları olan kalsit ve dolomit çözünerek suların Ca ve Mg konsantrasyonlarını artırmıştır. Suların SI_{kalsit} ve SI_{dolomit} değerlerinin pozitif olması bu minerallerin akifer ortamda yeraltısuyunun hidrojeokimyasal bileşimini kontrol ettiğini göstermektedir. Karbonat sistemi için mineral stabilite diyagramı çalışma alanındaki suların, Mg-kalsit ile dengede olduğunu ve bu mineralin derin rezervuarlardaki ana karbonat minerali olduğunu göstermektedir. Hidrojeokimyasal kavramsal modele göre karbonat kayalar üzerine düşen yağış suları, atmosferden bir miktar karbondioksiti alarak karbonik asit oluşturmuştur. Bu su yeraltına süzülürken, içinde dolaşım yaptığı karbonat kayalarda bulunan Ca²⁺, Mg²⁺ ve HCO₃⁻ü çözerek Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ karakterinde suların oluşmasını sağlamıştır.

HYDROGEOCHEMICAL EVOLUTION of GROUNDWATER in DAVRAZ MOUNTAIN (ISPARTA) CARBONATE AQUIFER AND ITS SURROUNDING

Keywords

*Davraz Mountain,
Isparta,
Carbonate Aquifer,
Hydrogeochemical Process,
Conceptual Model.*

Abstract

In this study, to determine the hydrogeochemical evolution of the groundwater in the Davraz Mountain (Isparta) carbonate aquifer, the hydrogeochemical conceptual model of the waters was defined depending on the tectonic and geological characteristics of the region. A total of representative twenty-one groundwater samples were collected from the study area and it was determined that the waters were divided into three different groundwater facies: (a) Ca-HCO₃, (b) Ca-Mg-HCO₃, and (c) Ca-Mg-HCO₃-SO₄. In some samples partially high SO₄²⁻ and NO₃⁻ concentrations are associated with domestic and agricultural activities. The main factor controlling the groundwater chemistry in the study area is the water-rock interaction and the dissolution of calcite and dolomite is the dominant geochemical process. The pCO₂ values of the groundwater samples in the study area were higher than the atmospheric pCO₂ also accelerated the carbonate dissolution. Thus, calcite and dolomite, the main mineral phases in the aquifer were dissolved by the water-rock interaction and increasing the Ca and Mg concentrations of the waters. The positive SI_{calcite} and SI_{dolomite} values of the waters show that these minerals control the hydrochemical composition of the groundwater in the aquifer. The mineral stability diagram for the carbonate system shows that the waters in the study area

* İlgili yazar / Corresponding author: selmademer@sdu.edu.tr, +90-246-211-1329

are in equilibrium with Mg-calcite and that Mg-calcite is the main carbonate mineral in deep reservoirs. According to the hydrogeochemical conceptual model, precipitation waters falling on carbonate rocks took some carbon dioxide from the atmosphere and formed carbonic acid. While this water was infiltrated underground, it dissolved Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- in the carbonate rocks in which it circulated, resulting in the formation of Ca-HCO_3 and Ca-Mg-HCO_3 waters.

Alıntı / Cite

Demir, S., (2023). Davraz Dağı (Isparta) ve Çevresinde Karbonat Akiferde Bulunan Yeraltısuyunun Hidrojeokimyasal Gelişimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(2), 669-692.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Demir, 0000-0003-4031-9633

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.02.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	09.03.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	09.03.2023
Yayın Tarihi / Published Date	28.06.2023

Hydrogeochemical Evolution of Groundwater in Davraz Mountain (Isparta) Carbonate Aquifer and Its Surrounding

Selma Demer^{1†}

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Highlights

- Carbonate aquifers have important in the water supply of drinking water.
- The waters in the Davraz Mountain (Isparta) carbonate aquifer are generally in the composition of Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃.
- Carbonate weathering is the dominant geochemical process in the waters in the study area.
- Calcite and dolomite minerals control the hydrogeochemical composition of the groundwater in the aquifer media.

Purpose and Scope

The aim of this study is to investigate the hydrogeochemical properties and hydrogeochemical evolution of the waters associated with the carbonate rocks in Davraz Mountain and to define the hydrogeochemical conceptual model of the waters depending on the tectonic and geological characteristics of the region.

Design/methodology/approach

To determine hydrogeochemical properties a total of representative twenty-one groundwater samples were collected from the study area. In-situ measurements, such as temperature (Thermometer-Testo-95-1), hydrogen ion activity (pH meter-WTW pH 330i), electrical conductivity (Electrical conductivity meter-WTW cond 330i), and redox potential (WTW pH 330i with ORP electrode) were measured in the field by means of portable instruments. The titrimetric method was used for the determination of the HCO₃⁻ concentrations. The collection and analysis of the samples followed the conventional Standard Methods. Hydrogeochemical analyzes were carried out at Süleyman Demirel University, Department of Geological Engineering, Water-Rock and Mineral Analysis Laboratory. An inductively coupled plasma-optic emission spectrometry (ICP-OES Perkin Elmer 2100 DV) was used for cations (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), and trace elements (such as Li, Pb, Zn, Cu, Al, Fe, Mn, Sb, As, Ba, Cr, Ni, Sr, and Si), and ion chromatography (IC-Dionex ICS 3000) was used for anions (Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, NO₃⁻). Hydrogeochemical analysis results were evaluated using AquaChem v.3.7 software package. For determining the chemical equilibrium between minerals and water, saturation indices (SI) of various minerals were obtained using the aqueous speciation SOLMINEQ.88 software. By interpreting the hydrogeochemical analysis data, the hydrogeochemical properties and hydrogeological processes of the waters were determined, and the conceptual model of waters interrelated with Davraz Mountain carbonate rocks was revealed.

Findings

It has been determined that the groundwaters in the study area are in three groundwater facies: (a) Ca-HCO₃, (b) Ca-Mg-HCO₃, and (c) Ca-Mg-HCO₃-SO₄. The fact that the waters are in Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃ facies is related to the Kuyubaşı dolomite and Beydağları formation belonging to the Beydağları autochthon, which has carbonate rock lithology in the study area. Based on the ionic ratios of waters such as Ca/Mg, Ca/HCO₃, Ca+Mg/HCO₃, and graphical evaluations, it has been determined that the main factor controlling the groundwater chemistry in the study area is the water-rock interaction and the dissolution of calcite and dolomite is the dominant geochemical processes. The mineral stability diagram for the carbonate system shows that the waters in the study area are in equilibrium with Mg-calcite and that Mg-calcite is the main carbonate mineral in deep reservoirs. According to the hydrogeochemical conceptual model of water samples, precipitation waters falling on the carbonate rocks took some carbon dioxide from the atmosphere and formed carbonic acid. While this water was percolated underground, it dissolved Ca²⁺, Mg²⁺, and HCO₃⁻ in the carbonate rocks in which it circulated, resulting in the occurrence of Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃ waters.

Originality

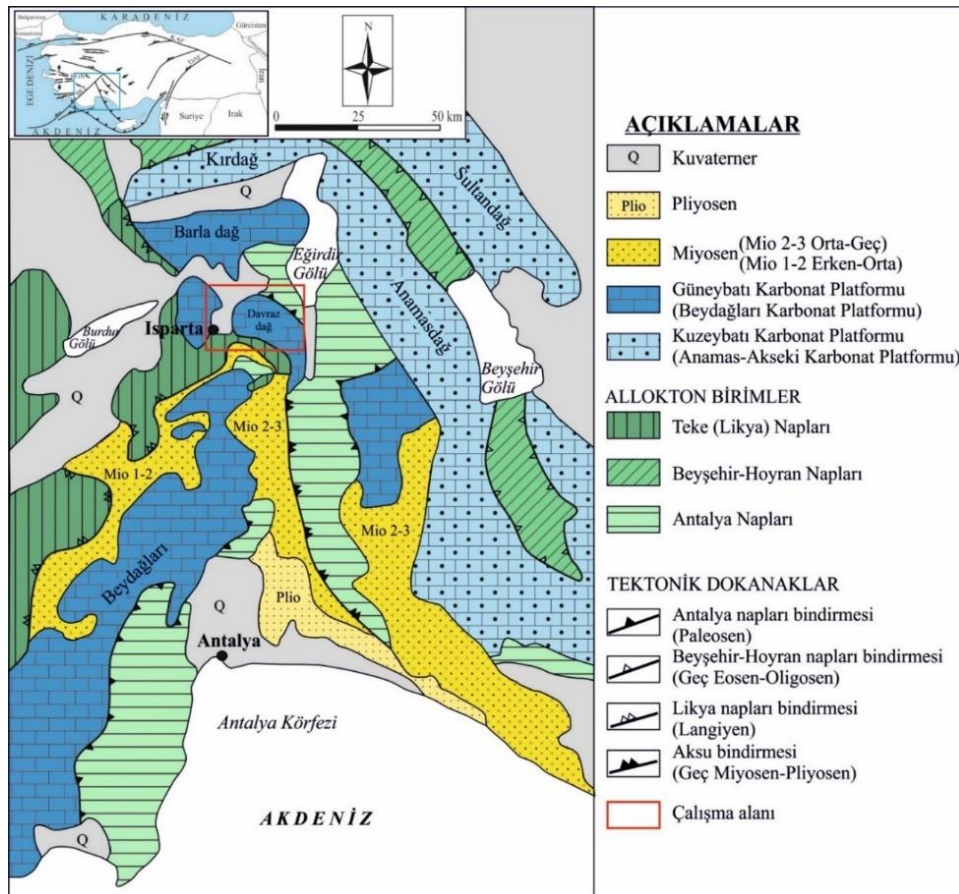
In previous studies in the study area, there are no studies on the hydrogeochemical properties and hydrogeochemical processes of the waters in the Davraz Mountain carbonate aquifer. In this study, the hydrogeochemical properties and hydrogeochemical evolution of the waters associated with the carbonate rocks in Davraz Mountain were clarified and the hydrogeochemical conceptual model of the waters was defined depending on the tectonic and geological characteristics of the region.

[†] Corresponding author: selmademer@sdu.edu.tr, +90-246-211-1329

1. Giriş (Introduction)

Karbonat akiferler, dünyada su temin edilen en önemli kaynaklardan biridir ve karstik akiferler birçok araştırmaya konu olmuştur (Moral vd., 2008; Leventeli, 2010; Bahir vd., 2021; Hoaghia vd., 2021; Benamina vd., 2022). Karstik akiferler, çözünebilir kayaların kimyasal olarak bozunmasıyla oluşur. Kireçtaşı ve dolomit gibi karbonat kayalar en önemli karstik kayalardır. Karstlaşma, karbonatik konglomeralar, karbonatik metamorfik kayalar (mermer) ve evaporitik oluşumlar (jips veya anhidrit) gibi farklı kaya türlerinde de meydana gelebilir (Ford ve Williams, 2007; Goepfert vd., 2011; Skoglund ve Lauritzen, 2011; Gil-Márquez vd., 2019; Goldscheider vd., 2020). Karbonat kayaları söz konusu olduğunda, atmosferden ve/veya toprak bölgesinden gelen CO₂ karstlaşmada kilit bir rol oynar. Yeraltına süzülen yağmur suyu veya çözülmüş CO₂ içeren su, karbonat kayaların çatlaklarında ve kırıklarında dolaşarak karstlaşmaya neden olur (Ford ve Williams, 2007; Goldscheider vd., 2020). Karst yeraltısuyunun fiziko-kimyasal özelliklerini yöneten birbiriyle ilişkili bir dizi süreç ve faktör vardır. Kalsit ve dolomit minerallerinin kayadaki oranları ve çözünme kinetikleri temel faktörlerden biridir. CO₂ kısmi basıncı (pCO₂) çözünme dengesini belirleyen önemli bir faktördür (Plummer vd., 1978; Buhmann ve Dreybrodt, 1985). Karbonat kayaların yaygın olduğu bölgelerde yeraltısuyunun hidrojeokimyası, su-kayaç etkileşimlerinin sürekli olarak meydana gelmesi ve karbonat minerallerinin nispeten hızlı çözünme ve çökeltme kinetiğine sahip olması nedeniyle dinamikdir (Back vd., 1966; Daniele vd., 2013). Karbonatlı kayalarda uzun mesafeler boyunca dolaşan yeraltısuyu hızla karbonat mineralleri ile dengeye ulaşır.

Alp-Himalaya dağ kuşağı üzerinde bulunan Türkiye'nin % 40'ı çözünmeye uygun karbonatlı ve evaporitik kayalardan meydana gelmektedir. Yeraltı karstlaşması dikkate alındığında ise bu oran % 60'ları bulmaktadır (Nazik ve Tuncer, 2010; Nazik ve Poyraz, 2017). Türkiye yüzey ve yeraltı karstlaşmasının morfojenetik ve morfometrik özelliklerine göre altı karst bölgesine ayrılmış olup (Nazik ve Poyraz, 2017) Isparta bölgesi Toros Dağları Karst Bölgesinde Batı Toroslar Karst alanı içinde yer almaktadır. Türkiye'nin güneyinde yaklaşık doğu-batı uzanımlı Toros kuşağı literatürde "Toros karbonat platformu", "Toros karbonat eksenini", "Toros kireçtaşı eksenini" gibi isimlerle de tanımlanmaktadır. Ayrıca Toroslar Türkiye'nin güncel buzulları ve Geç Kuvaterner buzullaşması ile ilgili çökeltilerin bulunduğu önemli alanları içerisinde bulundurmaktadır. İnceleme alanı, Batı Toroslarda ve Isparta Büklümü'nün batı kanadını oluşturan Beydağları karbonat ekseninin kuzeydoğu ucunda yer alan ve karbonatlı kayalardan oluşan Davraz Dağı civarını kapsamaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı ve çevresinin bölgesel jeolojisini gösteren yerbulduru haritası (Poisson vd., 2003'ten yararlanarak) (Location map showing regional geology of the study area and surroundings (from Poisson et al., 2003))

Isparta Büklümü kuzey kesiminde Dedegöl Dağı 2992 metre yüksekliği ile bölgenin en yüksek dağıdır. Davraz Dağı 2635 metre yüksekliği ile diğer önemli bir yükseltiyi oluşturmaktadır. Bu iki dağın özelliği genelde yılın kış ve yaz dönemlerinin önemli bir bölümünde karların erimeden kalabilmesidir. Bu nedenle Davraz Dağı diğer karbonat kayaların hakim olduğu bölgelerden yükselti farkı ve yıl içerisinde daha uzun süreli kar bulundurması özelliği ile ayrılır. Bu çalışma Davraz Dağındaki karbonatlı kayalarla ilişkili suların yeraltısuyu akış yolu boyunca hidrojeokimyasal özelliklerini ve hidrojeokimyasal evrimini araştırmayı ve bölgenin tektonik ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak suların hidrojeolojik kavramsal modelini tanımlamayı amaçlamaktadır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

İnceleme alanını içine alan Batı Torosların jeolojik ve tektonik yapısı ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalarda (Poisson vd., 1984; Şenel vd., 1996; Şenel, 1997; Poisson vd., 2003) bölgede otokton ve allokton konumlu kayaların tanımlaması, tektonik özellikleri konularına açıklık getirilmiştir. İrlayıcı (1993), Karagüzel ve İrlayıcı (1998), Demir (2008) Isparta Ovası drenaj alanı içindeki kuyu ve kaynak sularının kalitesi, kirliliği ve kullanımı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda drenaj alanı içinde kireçtaşları ve alüvyonun hidrolojik olarak akifer özelliğine sahip olduğu ve Isparta Ovası akım yönünün kuzeydoğudaki Atabey ovasına doğru olduğunu ifade edilmiştir. Demir (2008 ve 2010) Isparta Ovası beslenme alanı içerisinde bulunan kuyu ve kaynaklardan alınan örneklerde iyon değişimi, karbonat ve silikat ayrışma süreçlerinin etkili olduğunu ve izotop verilerine göre atmosferik suları temsil ettiğini belirtmiştir. Leventeli (2010), karbonatlı kayalardan oluşan Tahtalı Dağı'nın (Antalya) karstik özelliğinden dolayı önemli yeraltısuyu kaynağı olduğunu, ancak buraya yapılacak kayak tesisi ile morfolojik yapının, hidrolojik dengenin bozulacağı, yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının kirleneceği, endemik bitki ve hayvan türlerinin zarar göreceğini belirtmiştir. Moral vd. (2008), İspanya'da Sierra de Segura karbonat akiferindeki yeraltısuyunun jeokimyasal gelişimini incelemiş ve hidrokimyasal evrimin su-kayaç etkileşiminin süresiyle belirlendiğini ifade etmiştir. Çalışmaya göre suların Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ fasiyesinde olduğu ve CO₂, kalsit ve dolomit çözünmesi nedeniyle, suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerini kazandığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde Benamina vd. (2022) Cezayir Sidi Kada Dağları'ndaki karstik akiferin hidrokinamik ve hidrokimyasal özelliklerini araştırmış ve bölgedeki yaygın dolomitlere bağlı olarak Mg-HCO₃ bileşiminde suların oluştuğunu belirtmiştir. Bu karstik akiferde suların gelişiminde beslenme ve su-kayaç etkileşimine ve antropojenik etkilere değinilmektedir. İnceleme alanında yapılan önceki çalışmalarda Davraz Dağı karbonat akiferindeki suların hidrojeokimyasal özellikleri ve hidrojeokimyasal prosesleri ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma ile Davraz Dağındaki karbonat kayalar ile ilişkili suların hidrojeokimyasal özelliklerine ve hidrojeokimyasal gelişimine açıklık getirilmiş ve bölgenin tektonik ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak suların hidrojeokimyasal kavramsal modeli tanımlanmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada Isparta ilinin D-GD'sunda yer alan Davraz Dağı karbonat akiferi ile ilişkili olan yeraltısuları incelenmiştir. Toplam 21 adet temsili su örneği alınmıştır. Örnek alınan lokasyonlar Şekil 2 ve 5'te görülmektedir. Sıcaklık (T: Termometre-Testo-95-1), hidrojen iyonu aktivitesi (pH metre-WTW pH 330i), elektriksel iletkenlik (EC: Elektriksel iletkenlik ölçer-WTW cond 330i) ve redoks potansiyeli (Eh-WTW pH 330i ORP elektrotlu) gibi yerinde ölçümler arazide taşınabilir aletlerle gerçekleştirilmiştir. HCO₃⁻ konsantrasyonunu belirlemek için titrimetrik yöntem kullanılmıştır. Katyonların tayini için alınan örnekler 45 µm membran filtre ile süzülükten sonra HNO₃ ilave edilerek pH<2 olması sağlanmış, anyon analizleri için alınan örneklere ilave işlem yapılmamıştır. Örnekler polipropilen numune şişelerine alınarak etiketlenmiş ve buz paketleri içeren bir taşınabilir buz kutusu ile 4 °C'de laboratuvara nakledilmiştir. Örneklerin toplanması ve analizi sırasında standart yöntemler (APHA-AWWA-WEF, 2005) kullanılmıştır. Hidrojeokimyasal analizler Süleyman Demirel Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Su-Kayaç ve Mineral Analiz Laboratuvarında yapılmıştır. Katyon (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) ve eser element (Li, Pb, Zn, Cu, Al, Fe, Mn, Sb, As, Ba, Cr, Ni, Sr, Si) ölçümleri için indüktif eşleştirilmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES Perkin Elmer 2100 DV) ve anyon ölçümleri (Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, NO₃⁻) için iyon kromatografisi (IC-Dionex ICS 3000) kullanılmıştır. Analiz sonuçları için herhangi bir doğruluk ve kesinlik deneyleri yapılmamış olmakla beraber, suların yük-denge oranları %5'in altında olduğu için sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içindedir. Hidrojeokimyasal analiz sonuçları AquaChem v.3.7 yazılım paketi (Calmbach, 1999) kullanılarak değerlendirilmiştir. Mineraller ve su arasındaki kimyasal dengeyi belirlemek için çeşitli minerallerin doygunluk indisleri (SI) SOLMINEQ.88 (Kharaka vd., 1988) bilgisayar programı ile hesaplanmıştır.

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

4.1. Jeolojik Özellikler (Geological Properties)

Isparta Büklümü, Antalya körfezinin kuzeyinde, Batı Toros karbonat ekseninin ters V şeklinde bükülmesi ile meydana gelmiş, farklı stratigrafik kaya istiflenmelerine sahip bir bölgedir. Bölgede Mesozoyik yaşlı karbonat

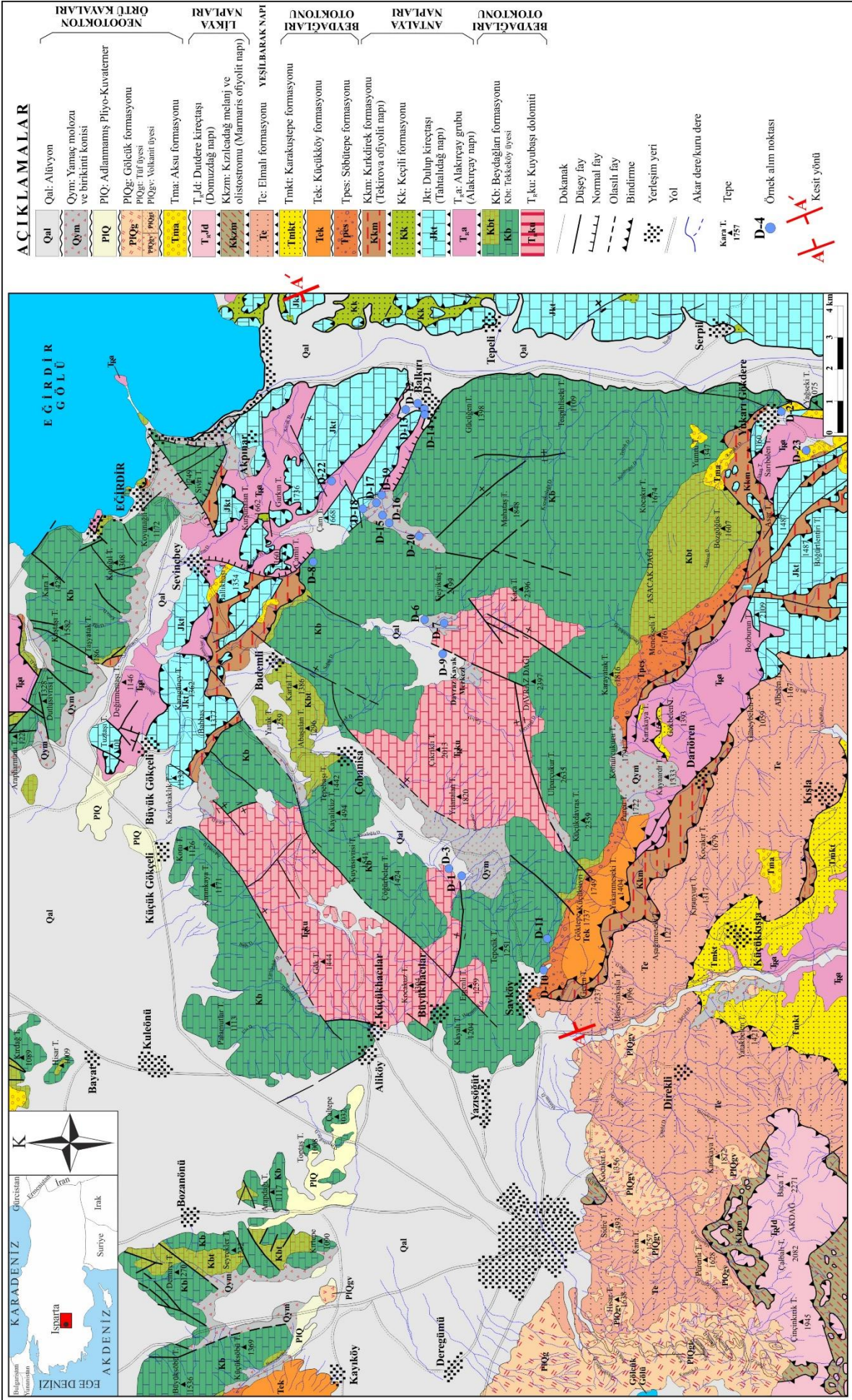
kayaçlar ve bunlara eşlik eden Tersiyer yaşlı tortul ve volkanik kaya birimleri genellikle otokton birimleri meydana getirir. Ofiyolitler ve bunlara eşlik eden pelajik kaya toplulukları ise allokton birimlerdir (Şekil 1). Isparta Büklümünün doğu kanadında Anamas-Akseki otokton karbonat platformu ve bunu tektonik olarak üzerleyen Beyşehir-Hoyran ofiyolitik napları yer alırken, Isparta Büklümünün batı kanadında otokton Beydağları karbonatları ile bunu üstleyen Antalya napları ve Likya napları bulunmaktadır (Şenel, 1984; Robertson ve Woodcock, 1984; Abubakar ve Yağmurlu, 2017). Tüm birimler üzerinde ise neotokton örtü birimleri yer alır (Şenel, 1997; Şekil 1-2).

Batı Torosların otokton kaya birimlerini oluşturan Beydağları otoktonu çalışma alanında Kuyubaşı dolomiti, Beydağları formasyonu, Söbütepe formasyonu, Küçükköy formasyonu ve Karakuştepe formasyonu ile temsil edilir (Şenel, 1997; Şekil 2). Orta-Üst Triyas yaşlı Kuyubaşı dolomiti (TRku) dolomit ve dolomitik kireçtaşlarından, Üst Kampaniyen-Maastrihtiyen (Üst Kretase) yaşlı Beydağları formasyonu (Kb) neritik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Beydağları formasyonunda sık erime boşlukları olup, karstlaşma yaygındır. Beydağları formasyonunun üst kesiminde yer alan Tekkeköy üyesi (Kbt), yerel olarak çört yumrulu ve kalkarenit ara düzeyli mikritlerden oluşur. Üst Paleosen-Alt Eosen yaşlı Söbütepe formasyonu (Tpes), kireçtaşı, killi kumlu kireçtaşı, marn, kiltası, siltaşı, kumtaşı vb. oluşur. Marn, kiltası, kireçtaşı ve killi kireçtaşlarından oluşan Küçükköy formasyonunun (Tek) yaşlı Üst Lütesiyen-Priaboniyen (Eosen) olarak belirlenmiştir. Burdigaliyen (Miyosen) yaşlı Karakuştepe formasyonu (Tmkt), kumtaşı, kiltası ve siltaşı ardalanmasından oluşur (Şenel, 1997).

Antalya napları, Beydağları otoktonu üzerine Geç Kretase-Erken Paleosen zaman aralığı içinde, daha çok K-G yönlü daralmaya bağlı olarak yerleşmiştir. Bu nap sistemi, bölgenin tektonik gelişimine bağlı olarak Isparta büklümü kesiminde karmaşık bir yapı kazanmıştır. Antalya napları Şenel vd. (1996) tarafından alttan üste doğru (i) Çataltepe napı, (ii) Alakırçay napı, (iii) Tahtalıdağ napı ve (iv) Tekirova ofiyolitik napı olarak bölümlendirilmiştir. Bu allokton kütleler Üst Senoniyen yaşlı ofiyolit kırıntılı olistostromlarla (Keçili formasyonu) sonlanmaktadır. Keçili formasyonu (Kk), ofiyolit ve diğer allokton kütlelerin bloklarını içermekte ve ince-orta tabakalı marn, kiltası, siltaşı, killi-kumlu kireçtaşı, mikrit, konglomera, kumtaşı ve çeşitli olistolitlerden oluşmaktadır (Şenel, 1997). Çalışma alanında Alakırçay napı, Tahtalıdağ napı ve Tekirova ofiyolitik napına ait birimler gözlenmektedir (Şekil 2). Orta-Üst Triyas yaşlı Alakırçay napı (Alakırçay grubu-TRa), yanal ve düşey yönde birbirleriyle geçişli halobial mikrit, çörtlü mikrit, radyolarit, çört şeyl, bitkili kumtaşı, yastık yapılı bazalt, spilit, silisleşmiş bazalt vb. kaya türlerinden oluşur. Aşırı kıvrımlanma ve faylanma nedeniyle çok fazla karışmış ve kaotik bir yapı kazanmıştır. Yapısal olarak Alakırçay napı üzerinde bulunan Tahtalıdağ napı (Dulup kireçtaşı-Jkt) genelde Kambriyen-Üst Kretase yaşlı dolomit, dolomitik kireçtaşları ve neritik kireçtaşlarıdır (Şenel, 1997). Tekirova ofiyolit napı, mafik ve ultramafik kayaçlar ile ofiyolit ve ofiyolitli melanjdandan oluşmaktadır. Çalışma alanında ofiyolit melanj olan Kırkdirek formasyonu (Kkm) ile temsil edilir. Yerleşim yaşlı Üst Senoniyen olan Kırkdirek formasyonu, serpantin hamur içinde değişik boyutta kireçtaşı, bitkili kumtaşı, şeyl, tabakalı çört, radyolarit, bazik volkanit, gabro, diyabaz vb. bloklar içermektedir (Şenel, 1997).

Alt Langiyen'de Beydağları otoktonu üzerine yerleşen Likya napları (i) Tavas napı, (ii) Bodrum napı, (iii) Domuzdağ napı, (iv) Gülbahar napı ve (v) Marmaris ofiyolit napı olmak üzere 5 ana tektonik birliğe ayrılmıştır. Ayrıca Beydağları otoktonu ile Likya napları arasında yanal yönlerde süreklilik gösteren Yeşilbarak napı gözlenmektedir. Çalışma alanında Marmaris ofiyolit napı Kızılcaadağ melanj ve olistostromu, Domuzdağ napı ise Dutdere kireçtaşı ile temsil edilir (Şenel, 1997; Şekil 2). Yeşilbarak napı çalışma alanında, Eosen yaşlı kumtaşı ve şeyllerden oluşan Elmalı formasyonu (Te) ile temsil edilmektedir. Birimin alt ve üst ilişkisi tektonik olup, aşırı deformasyonla makaslanmış, kendi içinde kıvrımlı, kırıklı bir yapı kazanmıştır. Marmaris ofiyolit napının Kızılcaadağ melanj ve olistostromundaki melanj kesimi (Kkzm), serpantin bir hamur içinde radyolarit, çört, kireçtaşı, bazalt, spilit, tüf, tüfit, gabro, diyabaz, harzburjit, dünit gibi bloklar içerir. Olistostrom kesimi, kaotik bir yapı gösterir ve konglomera, kumtaşı, kiltası ve siltaşı matrikslidir ve değişik türde ofiyolit kökenli olistolitler ile değişik yaşta karbonat, çörtlü kireçtaşı, volkanit, radyolarit, çört vb. olistolitler kapsamaktadır. Senoniyen döneminde oluşan birim, Eosen sonu Alt Langiyen sürüklenimi sırasında tekrar güneye aktarılmıştır. Rekrystalize kireçtaşlarından oluşan Domuzdağ napı (Dutdere kireçtaşı-TRjd), Orta Triyas-Liyas yaşlıdır (Şenel, 1997).

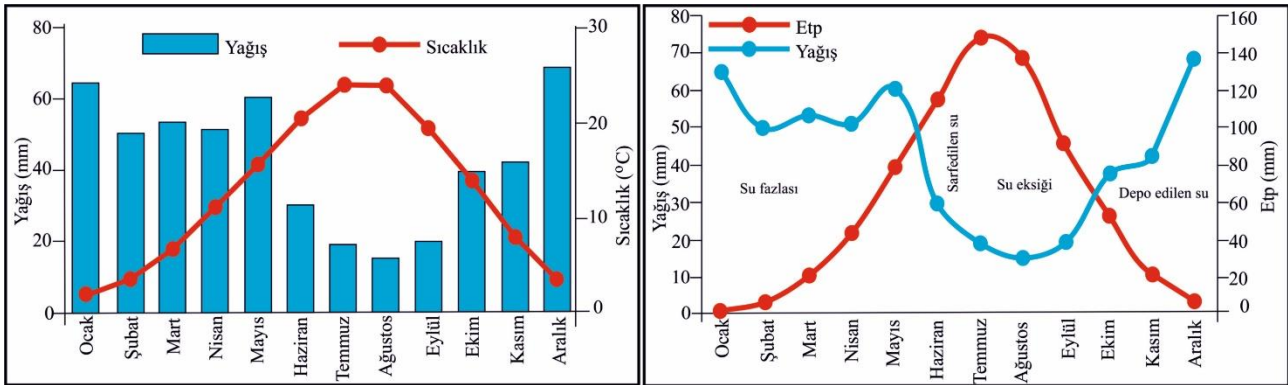
Aksu formasyonu, Gölcük formasyonu, adlanmamış Pliyo-Kuvaterner ve Kuvaterner yaşlı alüvyon ve yamaç molozu bölgenin neotokton örtü birimleridir (Şekil 2). Konglomeralardan oluşan Aksu formasyonu (Tma) Serravaliyen (Tortoniyen?) yaşlıdır. Yer yer kumtaşı, kiltası, siltaşı ve marn seviyeleri de gözlenen birim, çalışma alanında çok az yüzeyleme vermektedir. Pliyo-Kuvaterner yaşlı Gölcük formasyonu (PIQg), (i) kalın tüf düzeylerinden oluşan Tüf üyesi (PIQt) ve (ii) andezitik ve trakiandezitik lav akıntılarında oluşan Volkanit üyesi (PIQv) olmak üzere iki üyeden oluşmaktadır. Adlanmamış Pliyo-Kuvaterner (PIQ), gevşek tutturulmuş konglomera, kumtaşı ve çamurtaşlarından oluşur. Genel olarak düzlük alanlarda ve dere yataklarında yüzeylenen alüvyon (Qal) gevşek tutturulmuş kil, silt, kum, çakıl ve blokta oluşan güncel çökellerdir. Yamaç molozu (Qym) ise dağ yamaç ve eteklerinde bulunur ve çoğunlukla gevşek çakıl ve bloklardan oluşmaktadır (Şenel, 1997).



Şekil 2. Çalışma alanının jeolojî haritası (Şenel, 1997' den yararlanılmıştır) (Geological map of the study area (from Şenel, 1997))

4.2. Hidrolojik Parametreler ve Hidrojeolojik Özellikler (Hydrological Parameters and Hydrogeological Properties)

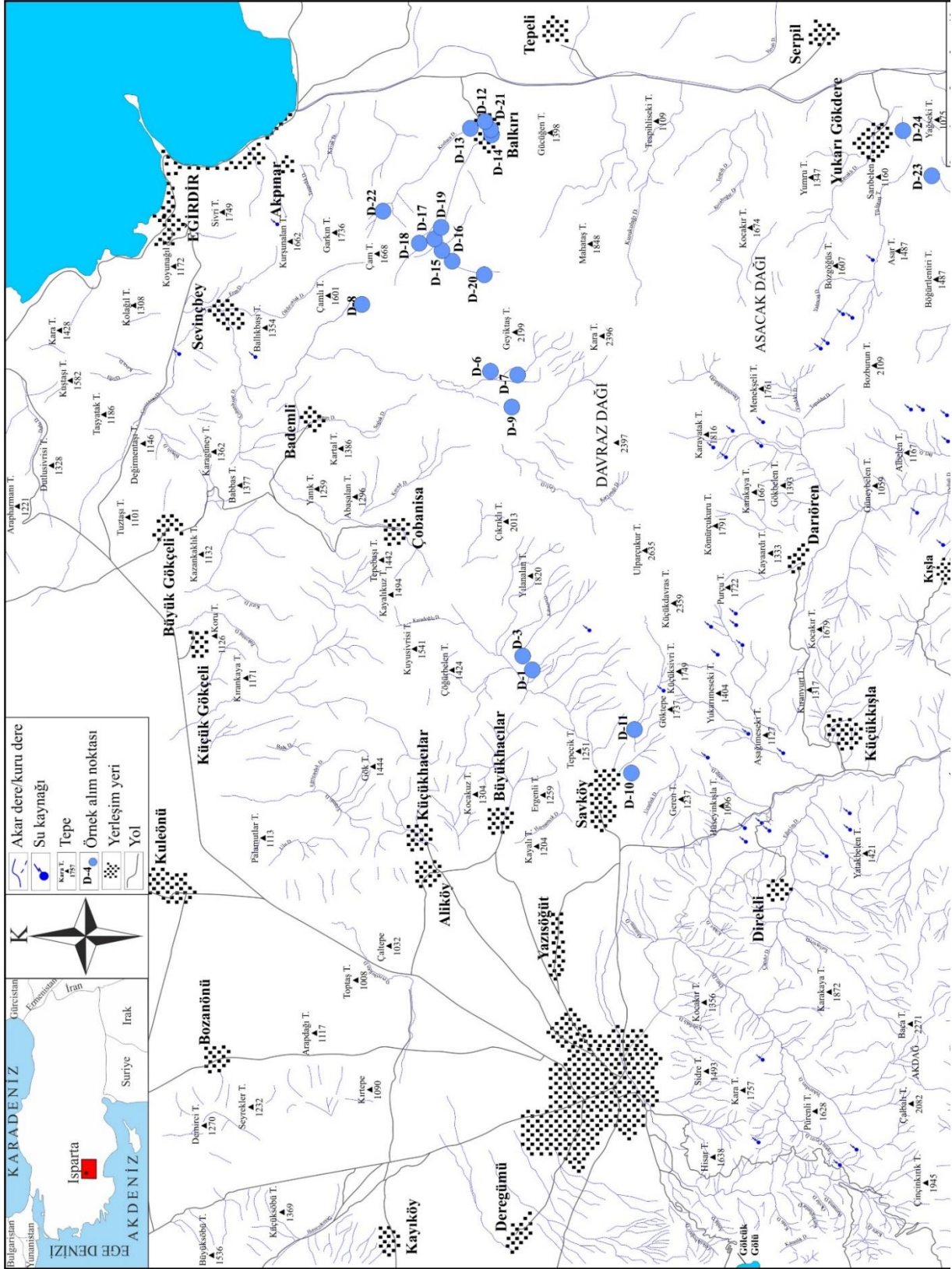
Çalışma alanı Akdeniz iklimi ile Orta Anadolu karasal iklimi arasında geçiş bölgesinde yer alması nedeniyle, bölgede her iki iklimin özellikleri gözlenir. Yılın en soğuk ayları Ocak-Şubat, en sıcak ayları ise Temmuz ve Ağustos'tur. Yağışlar genellikle yağmur, kış aylarında ise zaman zaman kar, bahar ve yaz aylarında ise sağanak yağışlar şeklinde gözlenir. Isparta-Merkez Devlet Meteoroloji İstasyonu 1990-2020 ölçüm periyoduna göre aylık sıcaklık ve yağış değerleri grafiği Şekil 3'te görülmektedir. Bu verilere göre yıllık ortalama sıcaklık 12,5 °C, yıllık toplam yağış miktarı 511,70 mm, yıllık potansiyel buharlaşma 725,40 mm, yıllık gerçek buharlaşma 383,26 mm olarak belirlenmiştir. Yağışın fazla olduğu aylarda 145,81 mm su fazlası, diğer aylarda ise 342,16 mm su eksikliği olduğu belirtilmektedir (Dursun ve Yazıcı, 2022; Şekil 3). Davraz Dağı çalışma alanının en yüksek dağı olup, bölgede kar yağışı genel olarak Aralık ayında başlamakta, Nisan-Mayıs aylarına kadar devam etmektedir. Kış ayları boyunca kar ile kaplı olması (Şekil 4) nedeniyle Davraz Dağı kış mevsiminde yoğun ilgi görmektedir. Yaklaşık 2200 m kodunda bulunan Isparta-Davraz Meteoroloji İstasyonunun 2017-2022 ölçüm periyoduna göre ortalama sıcaklık 7,3 °C, toplam yağış miktarı 581,28 mm'dir. 1000 m kotundaki Isparta-Merkez Meteoroloji İstasyonunun verilerine göre sıcaklık verileri düşük, yağış verileri ise yüksektir. Davraz Meteoroloji İstasyonu verilerine göre Ocak-Nisan aylarında ortalama karla örtülü gün sayısı 27 gün, ortalama kar yüksekliği 85 cm, en fazla kar yüksekliği 2022 Mart ayında 201,4 cm olarak kaydedilmiştir. Kar örtüsünün uzun süre yerde kalması için sıcaklığın 0 °C altında olması gerekir. Meteorolojik verilere göre yaklaşık 2 ay sıcaklık değerleri 0 °C'nin altındadır. Çalışma alanında Isparta-Antalya karayolu boyunca uzanan Isparta Çayı en büyük yüzeysel akışa sahip olan deredir. Doğu kesimde ise Eğirdir ve Kovada Gölü arasında uzanan Kovada kanalı önemli akışa sahiptir. Bölgedeki diğer dereler çoğunlukla yağışlarla akışa geçen mevsimsel derelerdir (Şekil 5).



Şekil 3. Isparta Meteoroloji İstasyonuna ait 1990-2020 yılları arası meteorolojik veriler (a) yağış-sıcaklık ve (b) yağış-potansiyel buharlaşma (Etp) aylık değişim grafiği (Dursun ve Yazıcı, 2022). (Meteorological data of Isparta Meteorology Station between 1990-2020 (a) precipitation-temperature and (b) precipitation-potential evaporation (Etp) monthly variation graph (Dursun and Yazıcı, 2022).)



Şekil 4. Davraz Dağı'ndan (Isparta) görünüm (a) Kuzeybatıdan bakış, (b) Güneybatıdan bakış (Kb: Beydağları formasyonu, Tek: Küçükköy formasyonu, Te: Elmalı formasyonu, Kkzm: Kızılcadağ melanj ve olistostromu, plQgv: Gölcük formasyonu volkanit üyesi, Qal: Alüvyon) (Views of Davraz Mountain (Isparta) (a) View from the northwest, (b) View from the southwest (Kb: Beydağları formation, Tek: Küçükköy formation, Te: Elmalı formation, Kkzm: Kızılcadağ melange and olistostrome, plQgv: Gölcük formation volcanite member, Qal: Alluvium))



Şekil 5. Çalışma alanı civarına ait drenaj ağı haritası ve örnek lokasyonları (Drainage network map and sample locations of the study area and surrounding)

Çalışma alanında bulunan jeolojik birimler hidrojeolojik özelliklerine göre değerlendirilmiş ve akifer olabileme özelliklerine göre akifer, akitart, akifüj ortamlar olarak sınıflandırılmıştır (Tablo 1). Çalışma alanında bulunan alüvyon, yamaç molozu birimleri gözenekli ve gevşek yapısından dolayı “geçirimsiz birim-taneli ortam akiferi” olarak adlandırılmıştır. Bu birimler içerdikleri çakıl, kum, kil, silt gibi tutturulmamış ve kırıntılı malzemeler arasındaki gözeneklerde önemli miktarlarda yeraltısuyu bulundurmaktadır. Isparta ovası içinde açılan sondaj kuyularında bu seviyelerden yeraltısuyu alınmaktadır. Kireçtaşı, dolomit ve dolomitik kireçtaşı gibi karbonat kayalar içeren Kuyubaşı dolomiti, Beydağları formasyonu ve Tekkeköy üyesi, Dulup kireçtaşı ve Dutturdere kireçtaşı “geçirimsiz birim-erimli çatlaklı karstik akifer” olarak sınıflandırılmıştır. Bu karbonat kayalar sahip olduğu kırıklı

çatlaklı yapısı ile karstik özellik göstermektedir ve hidrojeolojik olarak çalışma alanında önemli akifer olarak değerlendirilir. Beydağları formasyonu ve Kuyubaşı dolomiti çalışma alanında geniş bir alanı kaplar (Şekil 2) ve uygun hidrojeolojik koşullara yol açar. Kıvrımlar ve faylar, karstik sistemlerin yeraltı drenajı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve besleme ve deşarj alanları arasındaki dinamik akış sisteminin önemli bir bölümünü oluşturur (Goldscheider, 2005; Petalas, 2017). Çalışma alanı içinde, faylar ve kırık-çatlak sistemleri bulunmaktadır. Aksu formasyonu, Gölcük formasyonu ve Alakırçay grubu “yarı geçirimli birim-akitart ortam” olarak sınıflandırılmıştır. Aksu formasyonu, genel olarak konglomeralardan oluşmasına rağmen yer yer yeraltısuyunun hareketini kısıtlayabilecek kumtaşı, kıltaşı, siltaşı ve marn seviyeleri içermektedir. Bu nedenle iletkenliği düşük olabilmektedir (Şener ve Şener, 2016). Gölcük formasyonuna ait andezit ve trakiandezitler kırıklı çatlaklı olduğunda ve geniş alanlar kapladığı durumlarda yeraltısuyu bulundurabilir. Tüfler ise içerdiği pomza seviyelerine bağlı olarak az miktarda su bulundurduğu için “akitart ortam” olarak değerlendirilirken (Karagüzel ve İrlayıcı, 1998), Alakırçay grubu tektonik hareketlere bağlı olarak gelişen kıvrım ve faylar nedeniyle “akitart ortam” özelliği göstermektedir. Genel olarak filiş karakterinde gözlenen Söbütepe, Küçükköy, Karakuştepe, Elmalı ve Keçili formasyonları bünyelerinde bulundurdukları kıltaşı, siltaşı ve marn seviyelerinin akifer olabilmeye potansiyellerinin bulunmaması nedeniyle “geçirimsiz birim-akifüj ortam” olarak sınıflandırılmıştır. Benzer şekilde serpantin, gabro, diyabaz, çört, radyolarit ve kireçtaşı bloklarının kuvvetli tektonizma ile karışması sonucu oluşan Kırkdirek formasyonu ve Kızılcaadağ melanj ve olistostromu da “akifüj ortam” olarak ayrılmıştır. Mikrit, killi-kumlu mikrit ara seviyeli kumtaşı, kıltaşı, siltaşı ve konglomeralardan oluşan Keçili formasyonu içerisindeki kıltaşı seviyeleri bu birimlerin akifer olma özelliğini kısıtlamaktadır. Bu tip litolojiler geçirimsizlikleri çok düşük olduğundan su bulundurmazlar ve hidrojeolojik olarak geçirimsiz özellik gösterirler.

Tablo 1. Çalışma alanındaki jeolojik birimler ve hidrojeolojik özellikleri
(Geological units and hydrogeological properties of the study area)

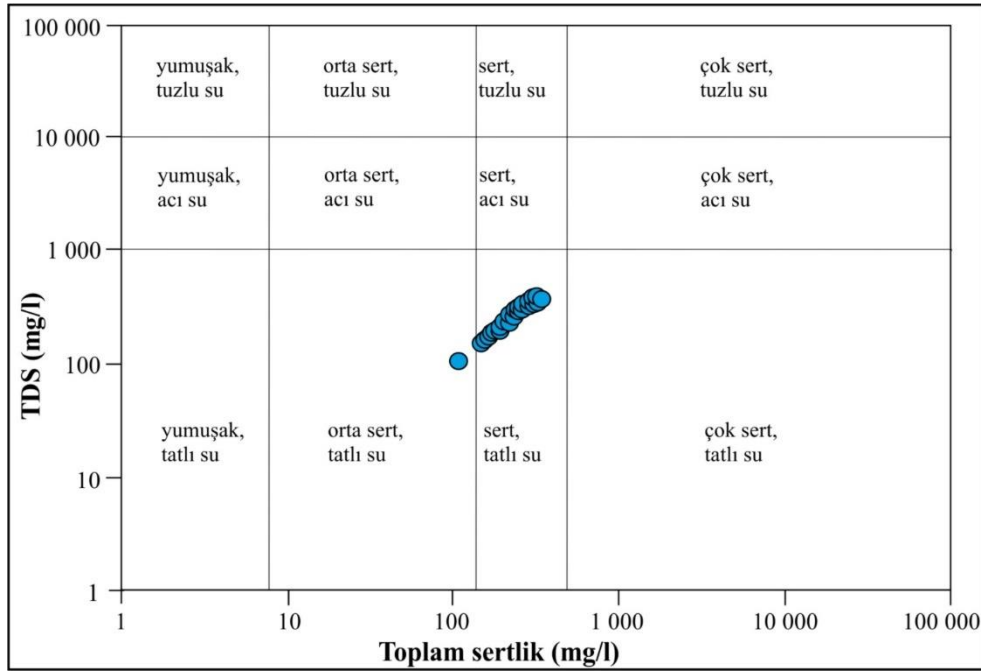
	Formasyon	Litoloji	Hidrojeolojik özellikleri
Neotokton örtü kayaları	Alüvyon (Qal)	Kil, silt, kum, çakıl ve blok boyutunda malzeme	Geçirimli (taneli akifer)
	Yamaç molozu (Qym)	Gevşek çakıl ve blok boyutunda malzeme	Geçirimli (taneli akifer)
	Adlanmamış Pliyo-Kuvaterner (PIQ)	Gevşek tutturulmuş konglomera, kumtaşı ve çamurtaşları	Geçirimli (taneli akifer)
	Gölcük formasyonu (PIQg) Volkanit üyesi (PIQgv) Tüf üyesi (PIQgt)	Andezitik ve trakiandezitik lav akıntıları ile kalın tüf düzeyleri	Yarı geçirimli (akitart)
	Aksu formasyonu (Tma)	Konglomera, yer yer kumtaşı, kıltaşı, siltaşı ve marn seviyeleri	Yarı geçirimli (akitart)
	Dutdere kireçtaşı (TRId)	Rekristalize kireçtaşı	Geçirimli (karstik akifer)
Likya napları	Kızılcaadağ melanj ve olistostromu (Kkzm)	Melanj kesimi, serpantin bir hamur içinde radyolarit, çört, kireçtaşı, bazalt, split, tüf, tüfit, gabro, diyabaz, harzburjit, dünit olistostrom kesimi, karbonat, çörtlü kireçtaşı, volkanit, radyolarit, çört vb.	Geçirimsiz (akifüj)
	Elmalı formasyonu (Te)	Kumtaşı ve şeyl	Geçirimsiz (akifüj)
Beydağları otoktonu	Karakuştepe formasyonu (Tmkt)	Kumtaşı, kıltaşı ve siltaşı	Geçirimsiz (akifüj)
	Küçükköy formasyonu (Tek)	Marn, kıltaşı, kireçtaşı ve killi kireçtaşları	Geçirimsiz (akifüj)
	Söbütepe formasyonu (Tpes)	Kıltaşı, siltaşı, kumtaşı, kireçtaşı	Geçirimsiz (akifüj)
Antalya napları	Kırkdirek formasyonu (Kkm)	Serpantin hamur içinde değişik boyutta kireçtaşı, bitkili kumtaşı, şeyl, tabakalı çört, radyolarit, bazik volkanit, gabro, diyabaz vb. bloklar	Geçirimsiz (akifüj)
	Keçili formasyonu (Kk)	Marn, kıltaşı, siltaşı, killi-kumlu kireçtaşı, mikrit, konglomera, kumtaşı ve çeşitli olistolitler	Geçirimsiz (akifüj)
	Dulup kireçtaşı (Jkt)	Dolomit, dolomitik kireçtaşları ve neritik kireçtaşları	Geçirimli (karstik akifer)
	Alakırçay grubu (TRa)	Mikrit, çörtlü mikrit, radyolarit, çört şeyl, bitkili kumtaşı, yastık yapılı bazalt, split, silisleşmiş bazalt vb. kaya türleri	Yarı geçirimli (akitart)
Beydağları otoktonu	Beydağları formasyonu (Kb) Tekkeköy üyesi (Kbt)	Neritik kireçtaşları	Geçirimli (karstik akifer)
	Kuyubaşı dolomiti (TRku)	Dolomit	Geçirimli (karstik akifer)

Davraz Dağı'nın büyük bir bölümünde kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşları yüzeylenmektedir. Bu bölgede yağış, yeraltısularının ana beslenme kaynağıdır. Isparta Ovası'nda yeraltısuyunun alındığı seviye genel olarak tutturulmamış kil, silt, kum, çakıl ve tüflerin oluşturduğu kırıntılı malzemelerden oluşan birim içindedir (Şekil 2). Isparta ovasının doğu kesimlerinde yüzeyleyen kireçtaşlarının yakınında açılmış kuyularda (Aliköy, Küçükhaçlar, Büyükhaçlar civarı) 70 m civarında kireçtaşları kesilmiş olup yeraltısuyu kireçtaşlarından alınmaktadır (İrlayıcı, 1993; Karagüzel ve İrlayıcı, 1998; Demer ve Hepdeniz, 2018).

4.3. Hidrojeokimyasal Özellikler (Hydrogeochemical Properties)

Akiferin mineralojik ve kimyasal özellikleri, suyun yeraltında kalış süresi ve sıcaklık, karbonat çözünme süreçlerinin ve yeraltısuyu kimyasal bileşiminin anlaşılması için temel faktörlerdir (Moral vd., 2008; Gao vd., 2020). Çalışma alanındaki suların hidrojeokimyasal analizleri Tablo 2'de, tanımlayıcı istatistiksel analizleri Tablo 3'te görülmektedir. Su sıcaklıkları 7,30-14,60 °C arasında değişmektedir. Bölgede sular düşük mineralizasyon

değerleri (TDS: 106 ile 380 mg/l arasında) sunmaktadır. Dolayısıyla bu sulara 176-633 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişen EC değerleri ölçülmüştür. Suların pH değeri ise 7,11 ile 8,19 arasında (ortalama 7,57) değişmekte olup nötr ile zayıf alkali koşulları gösterir. Bu durum çözülmüş karbonatın egemen olarak HCO_3^- formunda olduğunu ve bölgedeki kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşlarının çözünmesinin önemini gösterir. Çalışma alanında sulara Ca^{2+} konsantrasyonu 35,21-105,10 mg/l arasında değişmektedir (ortalama 67,49 mg/l). Sulara Ca^{2+} miktarı kalsit, aragonit, dolomit, jips, anhidrit, fluorit, plajiyoklas (anortit), piroksen (diyopsit), amfibol ve feldspat çeşitlerindeki kalsiyumun çözünmesinden kaynaklanabilir (Hounslow, 1995). Sulara ikinci egemen katyon olan Mg^{2+} konsantrasyonu ortalama 9,97 mg/l olup 2,80-19,33 mg/l arasında değişmektedir. Doğal sulara Mg kaynağı sedimanter kayalarda dolomitten yada magmatik ve metamorfik kayalar içinde bulunan ferromagnezyen minerallerden (olivin, diyopsit, biyotit, hornblend) gelmektedir (Hounslow, 1995). Sulara sodyum Na-plajiyoklasın ayrışması ya da ters iyon değişimine bağlıdır (Meybeck, 1987; Zhang vd., 2020). Çalışma alanında sulara Na^+ düşük konsantrasyondadır (Na^+ : 0,37-3,87 mg/l; ortalama 1,37 mg/l). Benzer şekilde sular 0,02-1,74 mg/l arasında değişen düşük K^+ içeriğine sahiptir. Tarım alanlarına uygulanan gübreler, ilaçlar vs. nitrat, sülfat ve potasyum gibi parametrelerde artışa neden olabilir (Dar vd., 2015). Çalışma alanındaki sulara SO_4^{2-} değerleri 1,63-21,90 mg/l (ortalama 5,75 mg/l) dir. D-22 örnek noktasında ölçülen yüksek SO_4^{2-} (99,84 mg/l) değeri yakınında bulunan meyve bahçelerinde kullanılan tarım ilaçları ile ilişkili olabilir. D-14 nolu su örneği ise köy meydanında bulunan keson kuyuya ait olup, bu kuyudan 2 l/s ile su alınmaktadır (SO_4^{2-} : 21,90 mg/l; NO_3^- : 25,32 mg/l). Buradaki kısmen yüksek SO_4^{2-} ve NO_3^- 'in evsel ve tarımsal faaliyetlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Klorür (Cl^-), yeraltısularına deniz suyundan, evaporitlerden, yağmur ve kar sularından katılmaktadır. Yağmur suyunda klor miktarı 1-10 mg/l arasında iken deniz suyunda 20.000 mg/l düzeyine ulaşmaktadır. Yeraltısularında ise bu değer 200 mg/l'yi geçmez (Hounslow, 1995). Cl^- konsantrasyonu 0,79-9,19 mg/l arasında (ortalama 2,77 mg/l) değişmekte iken, HCO_3^- konsantrasyonu 115,90-427,00 mg/l arasında (ortalama 250,97 mg/l) değişmektedir. Karbonat ve silikat ayrışması yeraltısuyunda HCO_3^- konsantrasyonlarını artırabilir (Nasher ve Ahmed, 2021). Toplam sertlik (TH), 126 mg/l CaCO_3 ile 468 mg/l CaCO_3 arasında (ortalama 255,43 mg/l) değişmektedir. TH değerine göre sular sert sular sınıfında, toplam çözülmüş madde (TDS) içeriğine göre tatlı su sınıfındadır. Sadece bir örnek (D-11) düşük TDS miktarı nedeniyle orta sertlikte ve tatlı su sınıfında yer almaktadır (Şekil 6). Çalışma alanındaki tüm sulara eser element konsantrasyonları (Li, Pb, Zn, Cu, Al, Fe, Mn, Sb, As, Ba, Cr ve Ni) analitik tekniğin ölçüm sınırları altında (<0,01 mg/l) olup analiz tablosunda gösterilmemiştir.



Şekil 6. TDS ve TH'ye göre yeraltısuyu sınıflaması (Mthembu vd., 2020'den yararlanarak)
(Classification of groundwater based on TDS and TH (from Mthembu et al., 2020))

Tablo 2. Çalışma alanındaki suların hidrojeokimyasal analiz sonuçları (Hydrogeochemical analysis results of waters in the study area)

Örnek	T (°C)	pH	Eh (mV)	EC (µS/cm)	TDS (mg/l)	TH (mg/l CaCO ₃)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Sr (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)	logpCO ₂ (atm)	İyon dengesi (%)
D-1	10,0	8,19	193	313	188	180	2,97	0,40	8,84	54,35	15,89	0,11	26,07	207,4	1,25	3,58	0,02	-2,93	-4,7
D-3	11,7	8,18	202	347	208	216	1,14	0,48	11,71	55,49	12,75	0,08	33,63	213,5	1,15	2,99	0,02	-2,91	-4,3
D-6	9,8	7,86	237	381	229	234	1,58	0,57	7,76	67,91	11,23	0,10	1,94	268,4	0,79	1,78	0,01	-2,48	-4,4
D-7	7,3	7,81	261	363	218	234	1,05	0,17	16,05	52,98	5,78	0,07	9,61	256,2	0,97	1,63	0,01	-2,46	-4,7
D-8	9,0	8,14	235	395	237	270	0,93	0,16	11,24	67,58	15,51	0,10	5,87	274,5	0,86	2,39	0,01	-2,76	-3,6
D-9	8,8	8,15	250	314	188	180	1,67	0,50	10,59	50,97	9,11	0,15	15,90	213,5	1,84	2,65	0,02	-2,88	-4,9
D-10	11,8	7,97	234	423	254	270	1,71	0,27	11,86	69,19	14,05	0,33	12,01	280,6	2,11	3,48	0,01	-2,58	-4,3
D-11	9,1	8,02	267	176	106	126	0,87	0,13	4,96	35,21	3,23	0,04	4,90	115,9	1,05	1,98	0,01	-3,00	3,7
D-12	12,5	7,86	211	309	185	216	0,51	1,74	12,66	48,37	3,68	0,09	2,46	195,2	2,53	6,16	0,07	-2,62	1,2
D-13	11,8	7,48	237	314	188	198	0,53	0,32	12,29	46,52	3,72	0,09	2,31	183,0	2,45	6,44	0,08	-2,26	1,8
D-14	12,0	7,36	272	590	354	360	3,87	1,68	10,35	91,21	10,99	0,28	25,32	305,0	9,19	21,9	0,10	-1,93	-4,3
D-15	12,3	7,37	276	494	296	270	1,25	0,58	9,48	81,93	10,08	0,28	7,38	305,0	3,83	8,45	0,11	-1,94	-4,5
D-16	11,4	7,36	274	494	296	288	1,05	0,71	7,19	85,73	10,87	0,22	17,54	292,8	5,28	6,19	0,04	-1,95	-4,1
D-17	11,6	7,45	287	432	259	306	0,95	0,60	8,76	78,79	9,59	0,22	7,03	292,8	3,08	6,57	0,08	-2,04	-4,3
D-18	10,1	7,84	281	263	158	180	1,35	0,54	5,07	53,87	6,53	0,15	6,79	158,6	1,53	7,12	0,08	-2,69	-4,5
D-19	12,1	7,24	285	633	380	468	1,46	0,33	16,22	105,10	23,81	0,36	4,43	427,0	4,44	7,04	0,12	-1,67	-4,9
D-20	9,3	7,50	244	311	187	216	<0,01	0,02	2,80	63,36	7,22	0,09	0,60	201,3	2,10	2,49	0,08	-2,24	-0,4
D-21	13,4	7,11	288	566	340	378	1,92	0,54	7,37	102,67	17,67	0,19	2,82	353,8	6,86	17,01	0,28	-1,61	-4,7
D-22	9,2	7,34	296	597	358	378	1,05	0,61	19,33	92,87	4,42	0,62	0,76	292,8	2,24	99,84	0,27	-1,93	-5,0
D-23	11,9	7,38	210	268	161	162	0,37	0,16	5,92	50,97	9,88	0,08	2,41	189,1	2,15	1,93	0,04	-2,15	-3,4
D-24	14,6	7,49	228	335	201	234	1,16	0,23	8,88	62,14	8,58	0,10	2,16	244,0	2,54	3,27	0,05	-2,15	-3,6

Varyasyon katsayısı (CV), örneklerin dağılım değişim derecelerini yansıtır ve örneklerin standart sapma değerinin (SD) ortalama değere oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak CV değeri % 10'dan düşük ise düşük değişkenlik, % 10-100 arasında ise orta düzeyde değişkenlik ve % 100'den büyük ise yüksek düzeyde değişkenliği gösterir (Zhou vd., 2012; Ağca, 2014). Hesaplanan varyasyon katsayısı (CV) değerleri en yüksek parametre SO₄ (% 206,70), en küçük parametre pH (% 4,62)'dir (Tablo 3). Bu sınıflamaya göre suların pH değeri düşük değişkenlik, SO₄²⁻ ve NO₃⁻ değeri yüksek değişkenlik, diğer parametreler ise orta derecede değişkenlik göstermektedir. Yüksek CV değerleri homojen olmayan dağılımı gösterirken, düşük CV değerleri parametrelerin homojen dağıldığını gösterir (Ağca, 2014).

Tablo 3. Çalışma alanındaki yeraltısularının hidrojeokimyasal analizlerinin tanımlayıcı istatistiksel verileri (n=21)
(Descriptive statistical data of hydrogeochemical analysis of groundwaters in the study area (n=21))

	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart sapma (SD)	Varyasyon katsayısı (CV)
T (°C)	7,30	14,60	10,94	11,6	1,78	16,28
pH	7,11	8,19	7,57	7,5	0,35	4,62
EC (µS/cm)	176	633	396	363	124,37	31,40
Eh (mV)	193	296	251	250	31,03	12,37
Toplam Sertlik (CaCO ₃ mg/l)	126	468	255,43	234	84,35	33,02
TDS mg/l	106	380	238	217,8	74,62	31,40
SiO ₂ (mg/l)	3,23	23,81	10,22	9,88	5,19	50,75
Ca ²⁺ (mg/l)	35,21	105,10	67,49	63,36	19,60	29,04
Mg ²⁺ (mg/l)	2,80	19,33	9,97	9,48	4,03	40,47
Na ⁺ (mg/l)	0,37	3,87	1,37	1,15	0,82	60,09
K ⁺ (mg/l)	0,02	1,74	0,51	0,48	0,44	86,32
Cl ⁻ (mg/l)	0,79	9,19	2,77	2,15	2,13	76,96
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0,60	33,63	9,14	5,87	9,37	102,55
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1,63	99,84	10,23	3,58	21,15	206,70
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	115,90	427,00	250,97	256,20	70,70	28,17

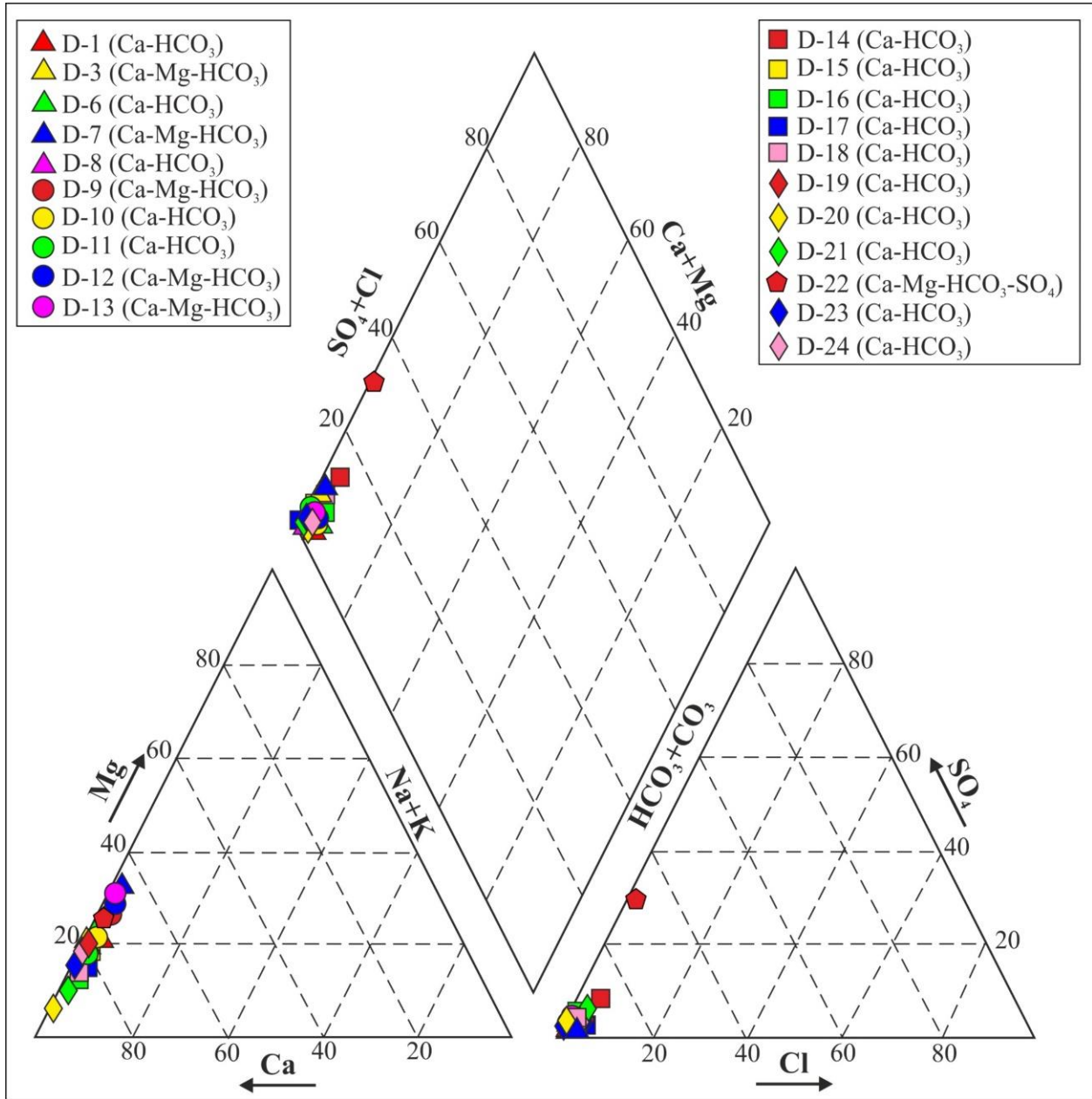
Yeraltısuyundaki çözülmüş bileşenlerin korelasyon ilişkisini incelemek için 21 parametre arasındaki korelasyon matrisi hesaplanmış ve Tablo 4'te sunulmuştur. Pozitif korelasyon iki değişken arasındaki doğru orantıyı, negatif korelasyon ters orantıyı, 0'a yakın değerler ise değişkenlerin arasında ilişki olmadığını gösterir. Korelasyon katsayısı (r) <0,5 ise parametreler arasında önemli bir doğrusal ilişki olmadığı, r =0,5 ile 0,8 arasında ise parametreler arasında önemli bir doğrusal korelasyon olduğu ve r>0,8 olduğunda ise parametreler arasında güçlü bir doğrusal korelasyon olduğunu ifade eder (Ashwin vd., 2022). Su içinde çözülmüş iyonların konsantrasyonunun artması EC değerini ve dolayısıyla TDS'yi artırır. Bu nedenle EC ve TDS parametreleri arasında yüksek korelasyon vardır (r=1,00). Çalışma alanındaki kireçtaşları ile etkileşim nedeniyle Ca ve HCO₃ yüksek derecede pozitif korelasyon vermektedir. Bu durum suların Ca-HCO₃, Ca-Mg-HCO₃ karakteri kazanmasında etkin rol oynamaktadır. Ca-EC ve Ca-TDS (r=0,96), Ca-HCO₃(r=0,92), HCO₃-EC ve HCO₃-TDS(r=0,93), HCO₃-TH (r=0,93), EC-TH (r= 0,96), Ca-TH (r= 0,95) parametre çiftleri arasında güçlü doğrusal korelasyon olduğu görülmektedir. Mg-EC, Mg-TDS ve Mg-TH (r= 0,50), Mg-SO₄ (r=0,52), Ca-Cl (0,70), EC-Cl ve EC-TDS (0,69), EC-SO₄ ve EC-TDS (0,51), Na-Cl (0,53), Na-NO₃ (0,57), K-Cl (0,55) parametre çiftleri arasında önemli sayılabilecek doğrusal korelasyon gözlenirken, diğer parametreler arasında anlamlı bir ilişki yoktur. TH'nin Ca ve HCO₃ ile güçlü korelasyona sahip olması (r>0,8) su sertliğinin Ca ve HCO₃ ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Na ve Ca arasındaki düşük korelasyon, kation değişim sürecinin ek bir sodyum kaynağı olmadığını gösterir (Petalas, 2017).

Tablo 4. Çalışma alanındaki yeraltısularının hidrojeokimyasal parametrelerine ait korelasyon matrisi (Correlation matrix of hydrogeochemical parameters of groundwaters in study area)

	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	pH	T	Yükseklik	EC	TDS	TH	pCO ₂
Ca	1,00	0,28	0,36	0,22	0,70	-0,04	0,44	0,92	-0,68	0,33	-0,12	0,96	0,96	0,95	0,86
Mg		1,00	-0,05	0,18	-0,01	0,05	0,52	0,44	-0,03	-0,10	0,12	0,50	0,50	0,50	0,16
Na			1,00	0,36	0,53	0,57	0,06	0,29	0,02	0,03	-0,04	0,38	0,38	0,29	0,17
K				1,00	0,55	0,25	0,20	0,14	-0,13	0,30	-0,35	0,31	0,31	0,25	0,12
Cl					1,00	0,16	0,17	0,57	-0,69	0,52	-0,53	0,69	0,69	0,64	0,74
NO ₃						1,00	-0,16	-0,02	0,41	-0,03	0,10	0,05	0,05	-0,07	-0,22
SO ₄							1,00	0,24	-0,34	-0,11	-0,02	0,51	0,51	0,46	0,31
HCO ₃								1,00	-0,55	0,31	-0,02	0,93	0,93	0,93	0,79
pH									1,00	-0,49	0,49	-0,62	-0,62	-0,62	-0,85
T										1,00	-0,83	0,28	0,28	0,30	0,48
Yükseklik											1,00	-0,11	-0,11	-0,14	-0,37
EC												1,00	1,00	0,96	0,80
TDS													1,00	0,96	0,80
TH														1,00	0,82
pCO ₂															1,00

Çalışma alanındaki sular alkali toprak elementleri (Ca+Mg), alkali elementlerden (Na+K) büyük olan ve zayıf asit kökleri (HCO₃+CO₃), güçlü asit köklerinden (SO₄+Cl) büyük olan sulardır. Su kimyasını kontrol eden jeokimyasal süreçleri değerlendirmek ve hidrokimyasal fasiyelerdeki değişimi tanımlamak için Piper (1944) diyagramı kullanılmıştır. Piper diyagramına göre çalışma alanındaki suların 3 farklı fasiyeste olduğu belirlenmiştir: (a) Ca-HCO₃ (15 örnek), (b) Ca-Mg-HCO₃ (5 örnek) ve (c) Ca-Mg-HCO₃-SO₄ (1 örnek) (Şekil 7). Suların Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ fasiyesinde olması, inceleme alanında bulunan kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı formasyonları ile ilişkilidir. Sadece D-22 nolu örnekte yüksek SO₄²⁻ konsantrasyonu gözlenmiştir. Bu yüksek SO₄²⁻ içeriği yapılan tarımsal faaliyetler ile ilgilidir. Karbonat kayaçların bulunduğu litolojideki sular, ayrışma reaksiyonları sonucunda dolomit veya kireçtaşının çözünmesinden kaynaklanan başlıca kalsiyum, bikarbonat ve magnezyum iyonları içermektedir

(Krawczyk ve Ford, 2006). Çalışma alanındaki Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ su fasiyesleri, suların kimyasal bileşiminin kalsit ve dolomit varlığıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

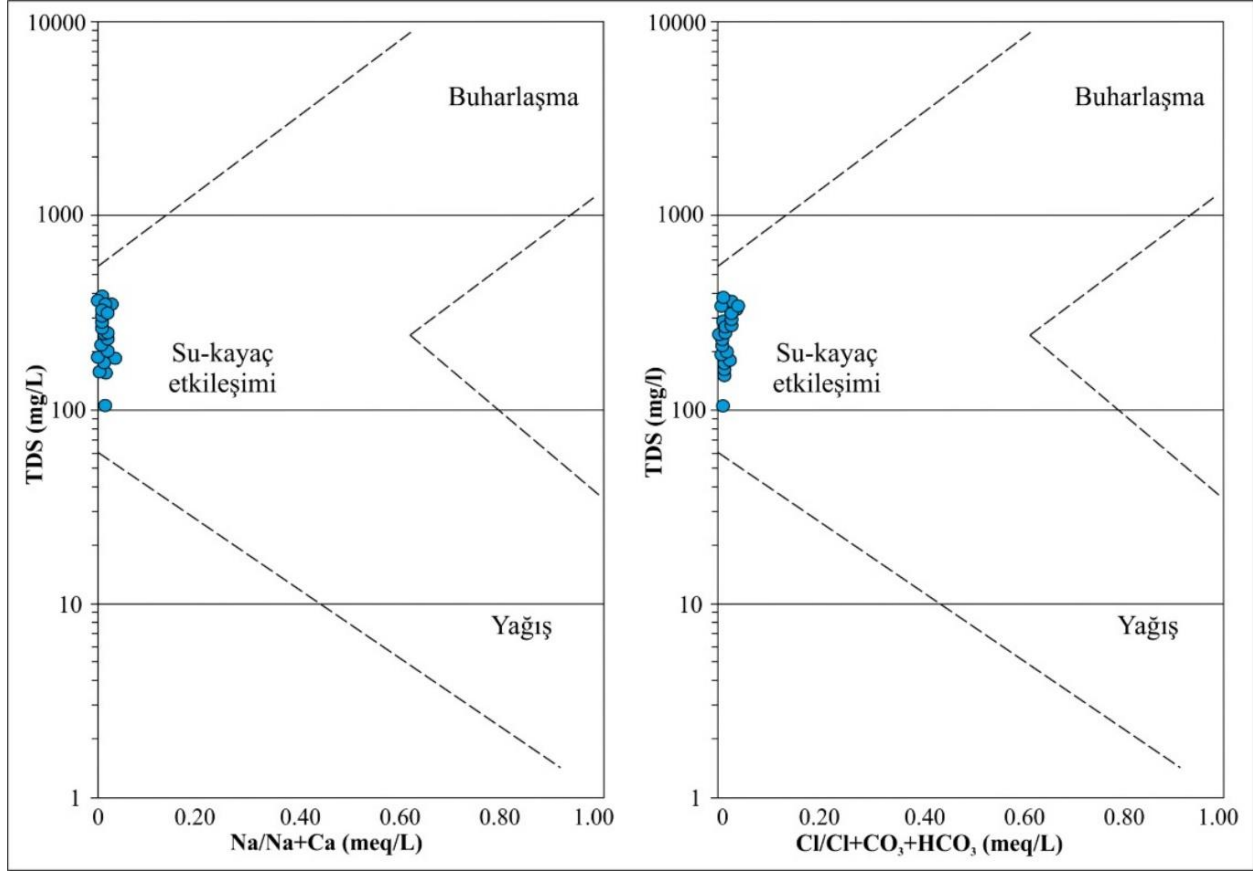


Şekil 7. Çalışma alanındaki yeraltısularının Piper diyagramı (Piper diagram of groundwaters in the study area)

4.4. Hidrojeokimyasal Prosesler (Hydrogeochemical Processes)

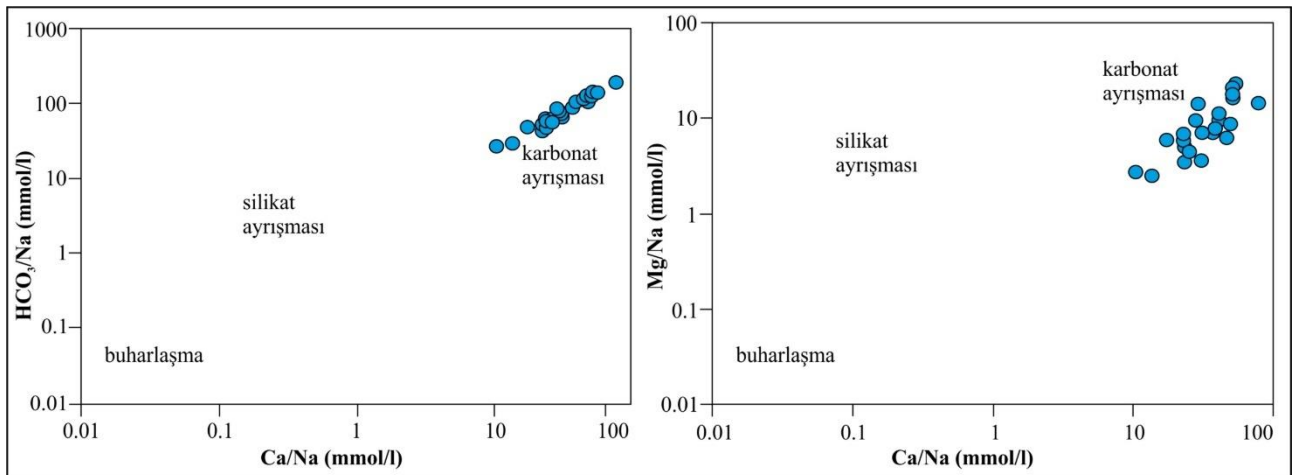
Sularda bulunan iyonların konsantrasyonu, yeraltısuyu ve akifer mineralleri arasında meydana gelen hidrojeokimyasal reaksiyonlara bağlıdır. Bu reaksiyonlar, yeraltısuyu majör iyon konsantrasyonu dengeye ulaştığında meydana gelir. Bu nedenle yeraltısuyundaki çeşitli majör iyon konsantrasyonları hidrojeokimyasal prosesleri tanımlamakta yararlıdır (Singh ve Hasnain, 2002; Laksmanan vd., 2003). Atmosferik CO₂'nin su içinde çözünmesi ve sülfürlerin oksidasyonu, karbonatların, silikatların ve alüminosilikat minerallerinin ayrışması için kullanılan protonların büyük kısmını sağlayan ana reaksiyonlardır. Karbonat kayaçlarının çözünmesi, silikat parçalanmasından daha hızlı ilerler ve sularda çözünen element konsantrasyonlarının elde edilmesinde meydana gelen mekanizmalardan biridir. Silikat ayrışmasının çözelti ürünlerini ölçmek zordur. Çünkü silikatların bozunması, çözülmüş türlerle birlikte çeşitli katı fazlar (çoğunlukla killer) oluşturur. Çözeltideki çeşitli iyonların nispi oranları, çözünürlüklerinin yanı sıra ana kayadaki nispi bolluklarına da bağlıdır (Singh vd., 2008; Dişli, 2018). Ayrışmanın doğası ve sudaki çözülmüş iyonların kaynağı, kütle dengesi yaklaşımı uygulanarak ve iyonların nispi bolluğu, çözünen maddeler arasındaki korelasyonlar ve bölgenin jeolojisi dikkate alınarak değerlendirilebilir (Singh ve Hasnain, 2002). TDS'nin Na/(Na+Ca) ve Cl/(Cl+HCO₃) oranlarına göre çizilen Gibbs diyagramı (Gibbs, 1970), sudaki iyonik oranları kullanarak, su-kayaç etkileşimi ile kimyasal prosesleri tanımlamada

kullanılmaktadır. Bu grafikte, kayaç baskın, evaporasyon/kristalizasyon baskın ve atmosferik yağış baskın olmak üzere üç alan tanımlanmıştır. Gibbs diyagramına göre çalışma alanındaki su örnekleri ana hidrojeokimyasal sürecin su-kayaç etkileşimi olduğunu gösteren kayaç ayrışma bölgesindedir (Şekil 8).



Şekil 8. Çalışma alanındaki yeraltısularının Gibbs diyagramı (Gibbs diagram of groundwaters in the study area)

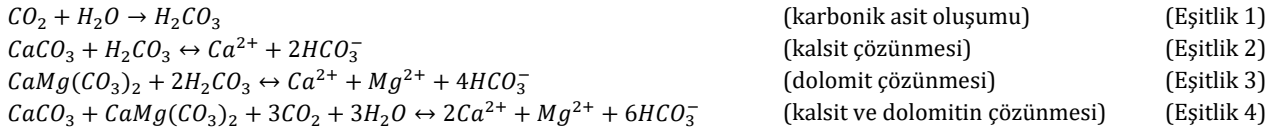
Litolojinin yeraltısuyundaki iyonlar üzerindeki potansiyel etkisi Na-normalize molar oranı ile açıklanabilir (Gaillardet vd., 1999). Ca/Na ile HCO_3/Na ve Mg/Na arasındaki dağılım grafikleri, üç ana ayrışma mekanizmasının (silikat ayrışması, karbonat ayrışması ve buharlaşma) yeraltısuyunun çözünen konsantrasyonuna nispi katkısını belirlemek için kullanılır. Şekil 9, karbonat minerallerinin ayrışmasının yeraltısuyu kalitesini etkileyen en baskın hidrojeokimyasal süreç olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 9. Çalışma alanındaki yeraltısularının (a) Ca/Na'a karşı HCO_3/Na ve (b) Ca/Na'a karşı Mg/Na grafiği (Bivariate diagrams of groundwaters in the study area (a) Ca/Na vs HCO_3/Na and (b) Ca/Na vs Mg/Na)

4.4.1. Karbonat Minerallerinin Su Kimyasına Katkısı (Contribution of Carbonate Minerals to Water Chemistry)

Suların $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ oranı, akiferde meydana gelen ayrışma sürecinin türünü ortaya çıkarabilir. $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2 < 5$ oranı silikat ayrışma sürecini gösterirken, $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2 > 10$ oranı karbonat ayrışma sürecini gösterir (Hounslow, 1995). Bu çalışmadaki yeraltısularının $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ oranları > 10 olup, karbonat ayrışmasının ana ayrışma süreci olduğunu göstermektedir. Kalsit ve dolomitin saf sudaki çözünürlüğü çok düşüktür, ancak asidik çözeltilerde kolayca çözünür. Karstik süreçlerdeki en önemli asit ise, genellikle edafik kökenli gaz halindeki CO_2 'nin çözünmesinden oluşan karbonik asittir (Eşitlik 1; Parkhurst ve Appelo, 1999; Moral vd., 2008). Karbonat minerallerinin (kalsit ve dolomit) ayrışması genellikle sulara Ca ve Mg konsantrasyonunda önemli bir artışa neden olur. Çalışma alanında karbonat mineralleri egemen olup, su kalitesini kontrol eden kimyasal reaksiyon aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir (Eşitlik 2, 3, 4):



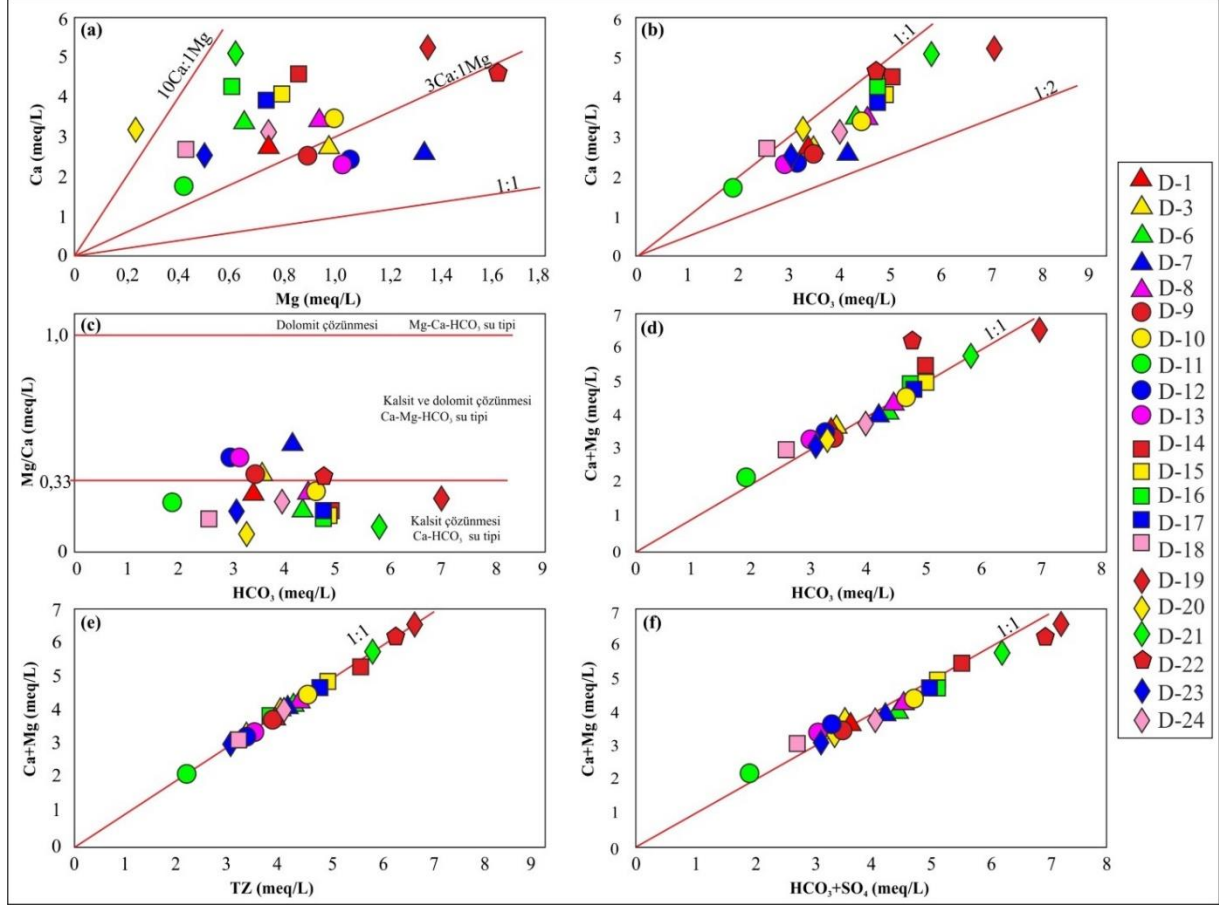
Kalsit ve dolomitin karbonat ayrışma süreçlerindeki nispi katkısı, rCa/rMg oranına bakılarak ele alınabilir. rCa/rMg=1 olması saf dolomit katkısını gösterir (Eşitlik 3), $1 < \text{rCa}/\text{rMg} < 3$ ise, bir miktar kalsit katkısıyla birlikte dolomit çözünmesinin baskınlığını gösterir. rCa/rMg=3 ise hem kalsitin hem de dolomitin çözünmesini gösterir (Eşitlik 4). rCa/rMg oranının daha büyük değerleri, kalsit çözünmesinin baskınlığına ilave olarak belirli dolomit katkısı anlamına gelir ve rCa/rMg=10 olması ise kalsitin toplam katkısını temsil eder (Herms vd., 2021). Şekil 10a'da rCa/rMg oranının 1:1 çizgisinin yukarısında olduğu ve kalsit ve dolomit çözünmesinin baskın jeokimyasal süreçler olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, rCa/rMg oranındaki değişimin, bölgedeki kayaç ayrışmasıyla ilişkili olduğu görülmektedir. Yeraltısuyunda Ca^{2+} ve HCO_3^- sadece kalsitten kaynaklanıyorsa, Ca/ HCO_3^- oranı 1:2, eğer dolomit ayrışmasından kaynaklanıyorsa bu oran 1:4 olmaktadır (Eşitlik 2 ve 3; Nasher ve Ahmed, 2021). Ca- HCO_3^- diyagramında, örneklerin 1:2 çizgisi üstünde bulunması suyun kimyasal evriminin karbonat kayaçlarıyla etkileşimle karakterize edildiğini gösterir (Şekil 10b). Benzer şekilde saf dolomit çözünmesinde Mg/Ca=1, kalsit ve dolomit çözünmesinde Mg/Ca≈0,33, kalsitin çözünmesi durumunda ise Mg/Ca oranı 0,1'den küçük sular üretilir (Mayo ve Loucks, 1995; Szramek vd., 2011; Dişli, 2018). Şekil 10c'ye göre Mg/Ca =0,33 çizgisinin altında kalan örnekler kalsit çözünmesinin baskın süreç olduğu Ca- HCO_3^- su tipinde suları gösterirken, Mg/Ca=0,33 çizgisinin üstünde kalan örnekler Ca-Mg- HCO_3^- su tipinde olup dolomit çözünmesinin etkisini göstermektedir. (Ca+Mg)/ HCO_3^- oranının yaklaşık 1 olması da Ca^{2+} ve Mg^{2+} 'un karbonatların çözünmesinden kaynaklandığını desteklemektedir (Şekil 10d; Nasher ve Ahmed, 2021; Wu vd., 2021; Eşitlik 2 ve 3). Çözünmüş CO_2 , akiferdeki karbonat kayaçları ile reaksiyona girerek kalsit ve dolomiti çözer (Eşitlik 2 ve 3; Nasher ve Ahmed, 2021). Tüm bu veriler karbonatların çözünme ve çökme işlemlerinin baskınlığını yansıtır ve katyon değişim işlemlerinin önemli bir katkısı olmadığını göstermektedir (Moral vd., 2008). Toplam katyonlara (TZ) karşı Ca+Mg dağılım diyagramında da (Şekil 10e) örneklerin 1:1 çizgisi boyunca doğrusal dağılım göstermesi, Ca^{2+} ve Mg^{2+} 'un yeraltısuyu kimyasını oluşturan ana katyonlar olduğunu ve majör iyon kimyasına karbonat ayrışmasının katkısını belirtmektedir (Demir vd., 2019; Su vd., 2020).

İyon değişimi, akiferlerin çeşitli koşullarına bağlı olarak tek değerli katyonlar (Na^+ ve K^+) ve iki değerli katyonların (Ca^{2+} ve Mg^{2+}) birbirleri ile yer değiştirdiği akiferde önemli bir hidrokimyasal işlemidir (Nasher ve Ahmed, 2021). Yeraltısularındaki Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} ve HCO_3^- konsantrasyonları, genel olarak karbonat (kalsit ve dolomit) ve sülfat (jips ve anhidrit) minerallerinin ayrışma süreçleri ile ilişkili olması durumunda örnekler 1:1 çizgisi boyunca dizilmektedir. 1:1 çizgisi altında kalan örnekler silikat ayrışması yada iyon değişimini gösterir. Bu durumda $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ göre Ca+Mg tükenir (McLean ve Jankowski, 2000). 1:1 çizgisi yukarısında kalan örnekler ise Ca ve Mg'a katkı sağlayacak ters iyon değişimi gibi diğer bazı reaksiyonların varlığını göstermektedir (Dişli, 2018; Nasher ve Ahmed, 2021). Ca+Mg ile $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ grafiğinde (Şekil 10f) inceleme alanındaki yeraltısuyu örneklerinin denge çizgisi (1:1) boyunca ve etrafında dizilim göstermesi karbonat kayaçların yaygın bulunması nedeniyle bölgede karbonat ayrışmasının önemli bir hidrojeokimyasal süreç olduğunu göstermektedir.

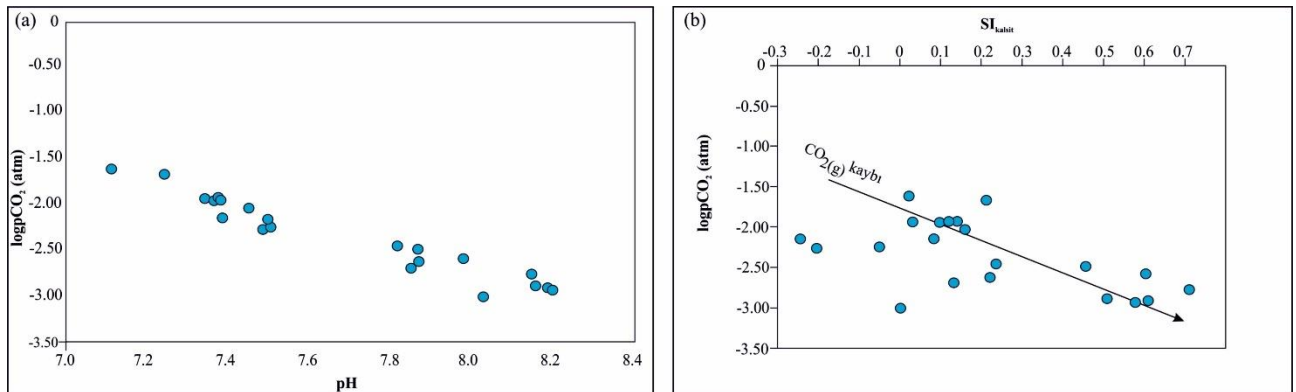
4.4.2. Karbondioksit Kısmi Basıncı (pCO_2) ve Doygunluk İndeksi (Partial Pressure of Carbon Dioxide (pCO_2) and Saturation Index)

İnceleme alanındaki yeraltısuyu esasen doğrudan yağıştan süzülmeden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle hidrojeokimyasal süreçleri değerlendirirken açık sistem koşullarındaki pCO_2 ($10^{-3,5}$ atm) ile dengede olan suların kireçtaşı-dolomit mostralalarına sızdığı kabul edilir (Moral vd., 2008). Kısmi karbondioksit basıncı (pCO_2) değerleri, SOLMINEQ.88 (Kharaka vd., 1988) jeokimyasal bilgisayar kodu ile hesaplanmıştır. Çalışma alanındaki yeraltısularının pCO_2 değerleri $10^{-1,61}$ ile $10^{-3,00}$ atm arasında değişmektedir (ortalama pCO_2 : $10^{-2,34}$ atm) ve

hesaplanan pCO_2 değerleri, atmosferik pCO_2 'den ($10^{-3.5}$ atm) daha yüksektir. Bu durum, topraktaki organik madde bozuşmasının ve kök solunumunun muhtemelen akifer sistemindeki ana CO_2 kaynakları olduğunu göstermektedir (Njitchoua vd., 1997; Van der Weijden ve Pacheco, 2003; Akpataku vd., 2019). pCO_2 'nin bu değerleri asidik koşulları artırabilir ve karbonat çözünmesi proseslerini büyük ölçüde hızlandırılabilir (Akpataku vd., 2016). Nispeten yüksek pCO_2 değerleri, CO_2 'ye göre açık sistemi gösterir (Benamina vd., 2022). Suların pH değeri ile pCO_2 değerleri negatif korelasyona sahiptir ve pH değeri arttıkça pCO_2 azalmaktadır (Adams vd., 2001; Liu vd., 2015; Şekil 11a).



Şekil 10. Çalışma alanındaki suların iyonik karşılaştırma grafikleri (a) Ca ve Mg, (b) Ca ile HCO_3 , (c) Mg/Ca ile HCO_3 , (d) Ca+Mg ile HCO_3 , (e) Ca+Mg ile toplam katyon (TZ) (f) Ca+Mg ile HCO_3+SO_4 (Ionic scatter diagrams of groundwaters in the study area (a) Ca vs Mg, (b) Ca vs HCO_3 , (c) Mg/Ca vs HCO_3 , (d) Ca+Mg vs HCO_3 , (e) Ca+Mg vs total cation (TZ) (f) Ca+Mg vs HCO_3+SO_4)



Şekil 11. Çalışma alanındaki su örneklerinin (a) CO_2 kısmi basıncı-pH, (b) CO_2 kısmi basıncı- SI_{kalsit} grafiği (Plots of partial pressure of CO_2 vs pH (a), and partial pressure of CO_2 vs $SI_{calcite}$ (b) groundwaters in the study area)

Minerallerin doygunluk indeksi (SI) değerleri ile yeraltısuyunun hidrokimyasal bileşimini kontrol eden reaktif mineralin rolü belirlenebilir. SI aşağıdaki formüle göre hesaplanır (Su vd., 2021; Wu vd., 2021):

$$SI = \log \left(\frac{IAP}{K} \right)$$

burada,

SI : doyunluk indeksi

IAP: çözeltilinin iyon aktivite ürünü

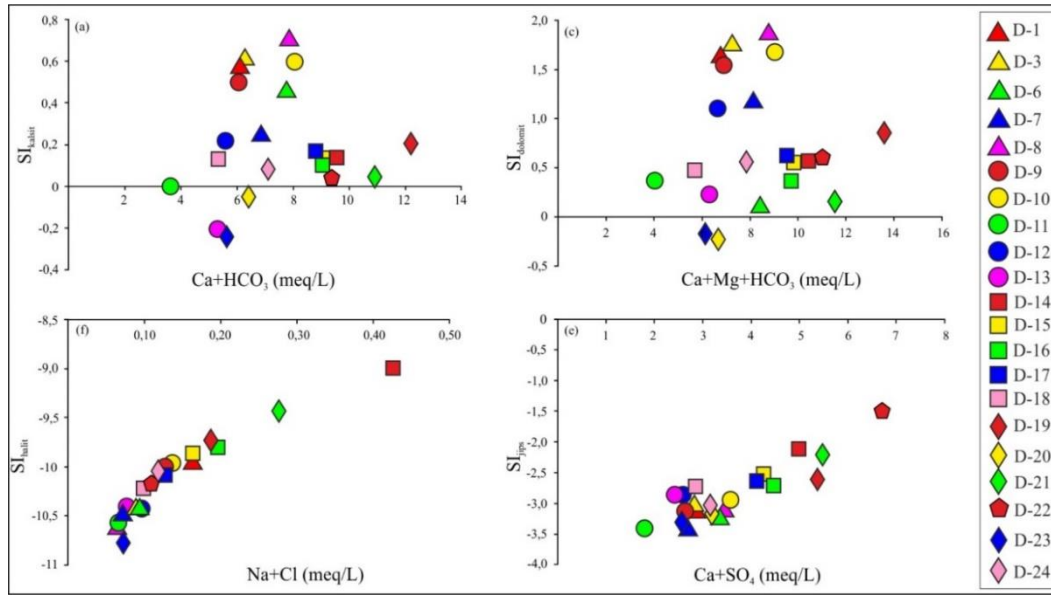
K : reaksiyonun denge sabitidir.

Termodinamik olarak pozitif SI değerleri ($SI > 0$), mineralin yeraltısuyunda aşırı doyun olduğunu ve çökme potansiyelini, negatif SI değerleri ($SI < 0$), mineralin yeraltısuyunda doymamış olduğunu ve bu nedenle çözünme potansiyelini temsil eder. $SI = 0$ ise mineralin denge durumunda olduğu kabul edilir (Appello ve Postma, 1996; Wu vd., 2021). Doyunluk indeksi değerlerini belirlemek için SOLMINEQ.88 (Kharaka vd., 1988) yazılımı kullanılmıştır. Çalışma alanından alınan su örneklerinin çeşitli mineral fazlarına göre hesaplanan doyunluk indeksleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Jeokimyasal modellemenin sonuçları, su örneklerinin genel olarak kalsit (SI : -0,243 ile 0,712 arasında, ortalama: 0,211) ve dolomit (SI : -0,229 ile 1,873 arasında, ortalama: 0,754) minerallerine göre doyun olduğunu göstermektedir. Süzülen meteorik su, akiferdeki başlıca mineral fazları olan kalsit ve dolomit ile reaksiyona girerek, çözülmüş Ca ve Mg konsantrasyonlarını artırır. Dolayısıyla yeraltısuyunda doyun olan bu mineraller yeraltısuyu kimyasal bileşimine karbonat mineral katkısını göstermektedir. Ayrıca bu minerallere göre doyunluk durumunun olması, yeraltısuyunun kalsit ve dolomit çökeltilerini üretebileceğini göstermektedir. Kalsit ve dolomit minerallerine göre doyun yeraltısuyu örnekleri kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı litolojisine sahip olan Kuyubaşı dolomiti, Beydağları formasyonu, Dulup kireçtaşı birimleri ile ilişkilidir. Buna karşın, tüm örnekler, çalışma alanı litolojisinde bulunmayan halit (SI : -10-763 ile -8,997 arasında) ve jips (SI : -3,407 ile -1,493 arasında) minerallerine göre doyunluk altındadır ve yeraltısuyunda bu minerallerin çözünmesi beklenir. Karbonat kayaçlar için yüksek çözünme hızı, suların kalsit ve dolomit açısından doyun/doyunluğa yakın olmasına ve jips, halit gibi minerallerin doyunluk altı kalmasına neden olarak, bu minerallerin akış yolları boyunca sürekli çözümlerini sağlar (Stumm ve Morgan, 1996; Sappa vd., 2012). pCO_2 , karbonat minerallerinin doyunluk durumunda önemli bir rol oynar (Chidambaram vd., 2011). Yeraltısuyu sistemine $CO_2(g)$ girişi ile pCO_2 artmakta ve SI_{kalsit} azalmaktadır. Yani, kireçtaşıdan süzülen yağış suları, yeraltısuyunu seyreltmekte ve SI_{kalsit} 'in azalmasını ve $\log pCO_2$ 'nin artmasını sağlamaktadır (Chidambaram vd., 2011; Adji vd., 2017). Şekil 11b'de düşük CO_2 kısmi basıncına, yüksek SI_{kalsit} değerlerinin eşlik ettiği görülmektedir. Bu durum, bu yeraltısularının CO_2 kaybetmiş ve kalsiti çökeltilmiş olabileceğini gösterir (Su vd., 2020). Ancak değerlerin doyunluk sınırına yakın olması yağış suları ile $CO_2(g)$ eklenmesinden kaynaklandığı daha olasıdır ve kalsit çökelişinin bundan dolayı az olduğu düşünülmektedir.

Mineral çözünmesi veya çökmesi ile yeraltısuyundaki iyonlar arasındaki ilişkileri daha iyi göstermek için (Wu vd., 2021), her mineral için SI ve karşılık gelen iyonların konsantrasyonları Şekil 12'de sunulmuştur. Kalsit ve dolomit için SI değerleri doyunlukla pozitifdir (Şekil 12 a ve b). Bu durum, bu minerallerin akifer ortamda var olduğunu ve yeraltısuyunun hidrokimyasal bileşimini kontrol ettiğini düşündürmektedir. Kalsit ve dolomit doyunluk indeksi değerlerinin pozitif olması, yeraltısuyu akış yolları boyunca çözünme ve güçlü mineralizasyona işaret eder ve bu minerallerin yeraltısuyunda çökme eğiliminde olduğunu düşündürür. Sadece SI_{kalsit} üç örnekte ve $SI_{dolomit}$ iki örnekte negatiftir. Şekil 12c'de görüldüğü gibi, SI_{halit} ile $Na+Cl$ pozitif olarak ilişkilidir ve yeraltısuyundaki $Na+Cl$ konsantrasyonu arttıkça, SI_{halit} , önce keskin bir şekilde artar ve sonra belirli bir $Na+Cl$ konsantrasyonuna ulaşıldıktan sonra daha yavaş artmaktadır. Aynı şekilde SI_{jips} ile $Ca+SO_4$ pozitif ilişkili olup artan çözünürlük ile doyunluğa yaklaşma eğilimindedir (Şekil 12d). Karbonat kayaçların yüksek çözünme hızı, kalsit ve dolomit açısından doyun/doyunluğa yakın suların oluşmasını sağlarken, jips ve halit mineralleri doyunluk altında kalarak, akış yolları boyunca çözülmeye devam eder. Bu, yeraltısuyunun akış yolları boyunca jips ve haliti çözme kapasitesine sahip olduğunu ve dolayısıyla çözeltilerdeki Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ ve Cl^- konsantrasyonlarının artacağını gösterir (Langmuir, 1971; Sappa vd., 2012).

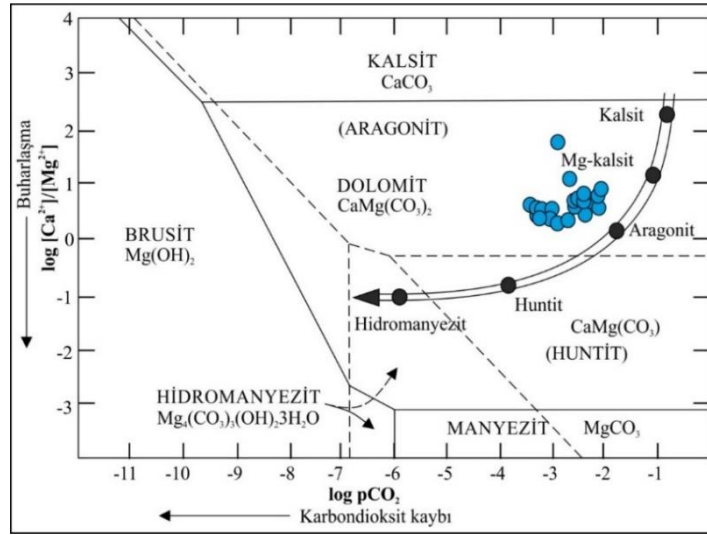
Tablo 5. Çalışma alanındaki suların seçilmiş mineral fazlarına göre doygunluk indisleri (SI) (Saturation indices (SI) with respect to selected mineral phases of waters in the study area)

	SI _{kalsit}	SI _{dolomit}	SI _{jips}	SI _{halit}
D-1	0,578	1,598	-3,042	-9,954
D-3	0,610	1,783	-3,129	-10,415
D-6	0,457	0,124	-3,250	-10,428
D-7	0,236	1,173	-3,407	-10,509
D-8	0,712	1,873	-3,156	-10,623
D-9	0,509	1,560	-3,192	-10,031
D-10	0,605	1,683	-2,998	-9,981
D-11	0,001	0,375	-3,403	-10,545
D-12	0,222	1,101	-2,859	-10,422
D-13	-0,205	0,247	-2,846	-10,415
D-14	0,140	0,571	-2,121	-8,997
D-15	0,122	0,546	-2,557	-9,864
D-16	0,102	0,362	-2,668	-9,797
D-17	0,161	0,604	-2,672	-10,073
D-18	0,132	0,466	-2,720	-10,205
D-19	0,213	0,854	-2,590	-9,743
D-20	-0,050	-0,229	-3,117	-
D-21	0,024	0,147	-2,192	-9,435
D-22	0,032	0,605	-1,493	-10,173
D-23	-0,243	-0,185	-3,314	-10,763
D-24	0,083	0,571	-3,048	-10,074



Şekil 12. Çalışma alanındaki yeraltı suları için SI grafikleri (a) SI_{kalsit} ile Ca+HCO₃, (b) SI_{dolomit} ile Ca+Mg+HCO₃, (c) SI_{halit} ile Na+Cl ve (d) SI_{jips} ile Ca+SO₄ (SI plots for the groundwater in the study area (a) SI_{calcite} vs Ca+HCO₃, (b) SI_{dolomite} vs Ca+Mg+HCO₃, (c) SI_{halite} vs Na+Cl and (d) SI_{gypsum} vs Ca+SO₄)

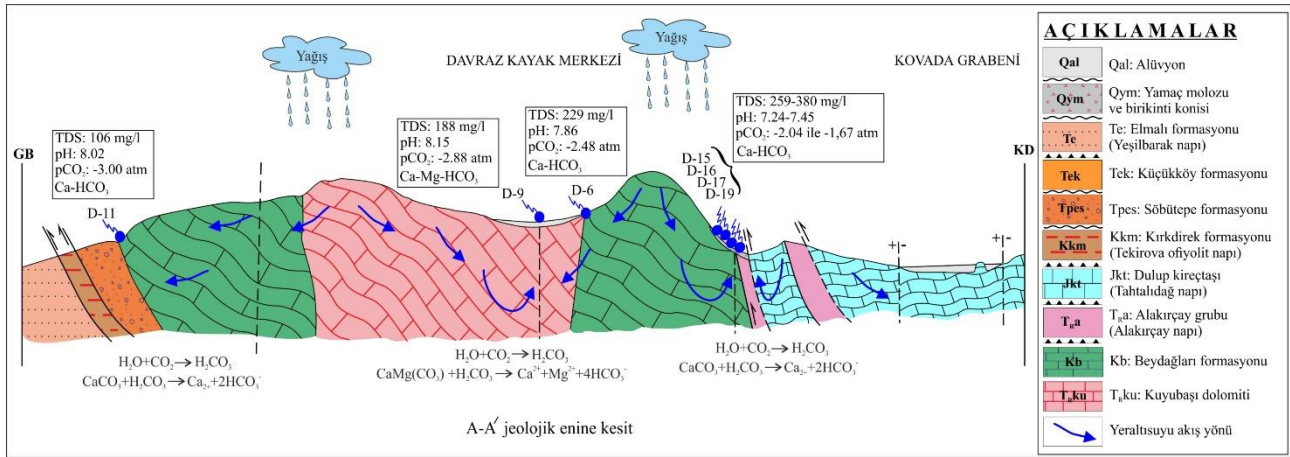
Suyun kimyasal dengesine ait termodinamik ilişkilerden yararlanarak hazırlanan mineral stabilite diyagramları, hidrojeokimyasal süreçleri değerlendirmekte yararlıdır ve suyun bileşiminin ayrışma bölgesindeki ana kaya ile ilişkili olduğu düşüncesine dayanmaktadır. 25°C'de CaCO₃-MgCO₃-H₂O sisteminin faz diyagramından karbonat minerallerinin oluşum sırası tahmin edilmektedir (Şekil 13; Lippmann, 1973; Hill ve Forti, 1997). Karbonat sistemi için mineral stabilite diyagramında CO₂'nin ortamdan uzaklaşmasıyla, önce kalsit çökelmekte ve magnezyum iyonu kalsiyum iyonuna göre artmaktadır. Daha sonra sırayla yüksek magnezyumlu kalsit (Mg-kalsit), aragonit, huntit ve son olarak da hidromanyezit çökelişi olduğu görülmektedir (Ford ve Willams, 2007; Aly vd., 2011; Kumar vd., 2016). Bu diyagramda çalışma alanındaki suların, Mg-kalsit ile dengede olduğu görülmektedir. Bu denge, Mg-kalsitin derin rezervuarlardaki ana karbonat minerali olduğu anlamına gelir (Aly vd., 2011; Kumar vd., 2016).



Şekil 13. Karbonat sistemi için mineral stabilite diyagramı (Ford ve Williams, 2007)
(Mineral stability diagrams for the carbonate system (Ford and Williams, 2007))

4.5. Çalışma Alanındaki Suların Hidrojeokimyasal Kavramsal Modeli (Hydrogeochemical Conceptual Modeling of Waters in the Study Area)

Çalışma alanındaki jeolojik, tektonik ve hidrojeokimyasal verilere dayanarak şematik kavramsal model oluşturulmuştur (Şekil 14). Suların oluşumunu sağlayan hidrojeokimyasal süreçlerin tanımlanmasında çeşitli grafikler ve iyonik oranlara göre yapılan değerlendirmelerle Ca^{2+} , Mg^{2+} ve HCO_3^- 'ün yeraltısuyu kimyasını oluşturan ana bileşenler olduğu ve kalsit ve dolomit çözünmesinin baskın jeokimyasal süreçler olduğu belirlenmiştir. Su-kaya etkileşimi sırasında karbondioksit kısmi basıncındaki bir artış, mineral çözünme sürecini etkiler. Çalışma alanındaki yeraltısuyu örneklerinin hesaplanan pCO_2 değerlerinin, atmosferik pCO_2 'den ($10^{-3.5}$ atm) daha yüksek olması da asidik koşulları artırarak karbonat çözünme proseslerini hızlandırmıştır. Karbonat kayalar üzerine düşen yağış suları, atmosferden bir miktar karbondioksiti ve hatta süzüldeği topraktaki organik maddeden de karbondioksiti emerek zayıf karbonik asit oluşturmuştur. Bu asidik su yeraltına süzülürken, gözenekler ve çatlaklar gibi önceden var olan açıklıkları genişleterek karbonat kayaları çözmüştür. Oluşan bu boşluklar birbiri ile bağlantılı olabilen ağlar oluşturur. Dolayısıyla yeraltında dolaşım yapan sular bölgedeki karbonat kayalardan Ca^{2+} , Mg^{2+} ve HCO_3^- 'ü çözerek bünyesine katmış ve Ca-HCO_3 ve Ca-Mg-HCO_3 karakterinde suların oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 14. Davraz Dağı (Isparta) çevresinde bulunan yeraltısularının hidrojeokimyasal kavramsal modeli
(Hydrogeochemical conceptual model of groundwaters in Davraz Mountain (Isparta) and surrounding)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, Davraz Dağındaki (Isparta) karbonatlı kayalarla ilişkili suların hidrokimyasal özellikleri ve hidrokimyasal evrimi araştırılmıştır. Bölgede yağış, yeraltısuyunun ana beslenme kaynağıdır ve çalışma alanında bulunan kireçtaşları ve dolomitik kireçtaşları, iklimsel özellikler, bitki örtüsü vb unsurlardan etkilenerek suların hidrojeokimyasal özellikleri kazanmasını sağlamıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. İnceleme alanından alınan su örneklerinin majör iyon içerikleri Piper diyagramı ile değerlendirilmiş ve suların (a) Ca-HCO₃, (b) Ca-Mg-HCO₃ ve (c) Ca-Mg-HCO₃-SO₄ olmak üzere 3 farklı fasiyeste olduğu belirlenmiştir. Suların Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ fasiyesinde olması, inceleme alanında bulunan kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı litolojisine sahip olan Beydağları otoktonuna ait Kuyubaşı dolomiti ve Beydağları formasyonu ile ilişkilidir. Bazı örneklerde ölçülen kısmen yüksek SO₄²⁻ ve NO₃⁻ konsantrasyonları ise evsel ve tarımsal faaliyetlerle ilişkilidir.
2. İnceleme alanında yeraltısuyu kimyasını denetleyen temel faktör su-kayaç etkileşimi olup, kalsit ve dolomit çözünmesi baskın jeokimyasal süreçlerdir.
3. Kalsit ve dolomit için doygunluk indeksi değerlerinin çoğunlukla pozitif olması, bu minerallerin akifer ortamda yeraltısuyunun hidrokimyasal bileşimini kontrol ettiğini göstermektedir.
4. Karbonat sistemi için mineral stabilite diyagramı çalışma alanındaki suların, Mg-kalsit ile dengede olduğunu ve Mg-kalsitin derin rezervuarlardaki ana karbonat minerali olduğunu göstermektedir.
5. Tüm verilerden yararlanarak hazırlanan hidrojeokimyasal kavramsal modele göre karbonat kayaçlar üzerine düşen yağış suları, atmosferden bir miktar karbondioksiti alarak karbonik asit oluşturur ve bu asidik su yeraltına süzülürken, gözenekler ve çatlaklar gibi önceden var olan açıklıkları genişleterek karbonat kayaçların çözünmesini sağlamıştır. Dolayısıyla yeraltında dolaşım yapan sular bölgedeki karbonat kayaçlardan Ca²⁺, Mg²⁺ ve HCO₃⁻'ü çözerek bünyesine katmış ve Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-HCO₃ karakterinde suların oluşmasını sağlamıştır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazar, değerli yorum ve görüşleri ile makaleye katkılarından dolayı Prof. Dr. Ömer Elitok (SDÜ) ve Prof. Dr. Ayşen Davraz'a (SDÜ), arazi ve laboratuvar çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Jeoloji Mühendisi Ümit Memiş (SDÜ)'e teşekkür eder.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Abubakar, İ.İ., Yağmurlu, F., 2017. Isparta Güneyindeki Tersiyer Kaya Birimlerinin Petrol Olanaklarının Araştırılması (GB-Türkiye). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21, 1, 38-50, doi: 10.19113/sdufbed.04704
- Ağca, N., 2014. Spatial Variability of Groundwater Quality and Its Suitability for Drinking and Irrigation in the Amik Plain (South Turkey). Environmental Earth Science, 72, 4115-4130, doi: 10.1007/s12665-014-3305-7.
- Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., Tredoux, G., Harris, C., 2001. Hydrochemical Characteristics of Aquifers Near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. Journal of Hydrology, 241, 91-103, doi:10.1016/S0022-1694(00)00370-X.
- Adji, T.N., Haryono, E., Fatchurohman, H., Oktama, R., 2017. Spatial and Temporal Hydrochemistry Variations of Karst Water in Gunung Sewu, Java, Indonesia. Environmental Earth Science, 76, 709, doi: 10.1007/s12665-017-7057-z
- Akpataku, K.V., Gnazou, M.D.T., Bawa, L.M., Djaneye-Boundjou, G., Faye, S., 2016. Etude hydrogéochimique du système aquifère granito-gneissique dans la préfecture du Moyen-Mono, Togo. Afrique Science, 12 (2), 38-53. <http://www.afriquescience.info/document.php?id=5978>. ISSN 1813-548X.
- Akpataku, K.V., Rai, S.P., Gnazou, M.D.T., Tampo, L., Bawaa, L.M. Boundjou, G.D., Faye, S., 2019. Hydrochemical and Isotopic Characterization of Groundwater in the Southeastern part of the Plateaux Region, Togo. Hydrological Sciences Journal, 64, 8, 983-1000. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1615067>
- Aly, A.A., Abbas, A.A., Benaabidate, L., 2011. Hydrochemistry and Quality of Groundwater Resources in Egypt: Case Study of the Egyptian Southern Oases. Water Security in the Mediterranean region: An International Evaluation of Management, Control and Governance Approaches, Chapter 17, 239254. Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-1623-0_17
- APHA-AWWA-WEF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). In: American Public Health Association (eds) Eaton A D, Clesceri L S, Rice E W and Greenberg A E, Washington, DC.
- Appello, C.A.J., Postma, D., 1996. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Balkema, Rotterdam, 536p.
- Ashwin, K. R. N, Arulmozhi, S., Gopalan, A., Mageshkumar, P., Rangaraj, A., Panneerselvam, M., Nirmala Devi, B., Aravindhan, C., Prasath, E., David Ladu, N. S., 2022. Correlation, Regression Analysis, and Spatial Distribution Mapping of WQI for an Urban Lake in Noyyal River Basin in the Textile Capital of India. Advances in Materials Science and Engineering, 1687-8434, 3402951, <https://doi.org/10.1155/2022/3402951>
- Back, W., Cherry, R.N., Hanshaw, B.B., 1966. Chemical equilibrium between the water and minerals of carbonate aquifer. Bulletin of the National Speleological Society, 28, 119-126.
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., Ouazar, D., Chehbouni, A., Ouarani, M., El Mountassir, O., 2021. Groundwater Quality of the Alluvial and Carbonate Aquifers of Essaouira Basin (Morocco). Carbonates and Evaporites, 36, 23, <https://doi.org/10.1007/s13146-021-00697-7>
- Benamina, B., Azzaz, H., Benzater, B., Hamimed, A., 2022. The Hydrogeological Functioning of the Karstic Aquifer in Sidi Kada Mountains (North-Western Algeria) from Hydrochemical Records. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 40, 252-267, DOI: 10.14744/sigma.2022.00030
- Buhmann, D., Dreybrodt, W., 1985. The Kinetics of Calcite Dissolution and Precipitation in Geologically Relevant Situations of Karst Areas. Chemical Geology, 48, 189-211. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90024-5).

- Calmbach, L., 1999. AquaChem Computer Code-Version 3.7: Aqueous Geochemical Analyses, Plotting and Modelling; Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Ontario, Canada, 184p.
- Chidambaram, S., Prasanna M.V., Karmegam, U., Singaraja, C., Pethaperumal, S., Manivannan, R., Anandhan, P., Tirumalesh, K., 2011. Significance of pCO₂ Values in Determining Carbonate Chemistry in Groundwater of Pondicherry Region, India. *Frontiers of Earth Science*, 5 (2), 197-206 DOI 10.1007/s11707-011-0170-5
- Daniele, L., Vallejos, A., Corbella, M., Molina, L., Pulido-Bocsh, A., 2013. Hydrogeochemistry and Geochemical Simulations to Assess Water-rock interactions in Complex Carbonate Aquifers: The case of Aguadulce (SE Spain), *Applied Geochemistry*, 29, 43-54. doi:10.1016/j.apgeochem.2012.11.011
- Dar, F.A., Perrin, J., Ahmed, S., Narayana, A. C., Riotte, J., 2015. Hydrogeochemical Characteristics of Karst Aquifer from a Semi-arid Region of Southern India and Impact of Rainfall Recharge on Groundwater Chemistry. *Arabian Journal of Geoscience*, 8, 2739-2750. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1440-9>
- Demer, S., 2008. Isparta ve Yakın Çevresi Yeraltısularının Hidrojeolojik, Hidrojeokimyasal ve İzotop Jeokimyasal İncelenmesi ve İçme Suyu Kalitesinin İzlenmesi. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 171s., Isparta.
- Demer, S., 2010. Isparta Ovası Yeraltısularının İzotop Jeokimyası. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14-3, 285-292.
- Demer, S., Hepdeniz, K., 2018. Isparta Ovasında (GB-Türkiye) Sulama Suyu Kalitesinin İstatistik ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 70, 109-122. DOI: 10.17211/tcd.397876.
- Demer, S., Elitok, Ö., Memiş, Ü., 2019. Origin and Geochemical Evolution of Groundwaters at the Northeastern Extend of the Active Fethiye-Burdur Fault Zone within the Ophiolitic Teke Nappes, SW Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 783, <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4963-2>
- Dişli, E., 2018. Evaluation of Hydrogeochemical Processes for Waters' Chemical Composition and Stable Isotope Investigation of Groundwater/Surface Water in Karst-Dominated Terrain, the Upper Tigris River Basin, Turkey. *Aquatic Geochemistry*, 24, 363-396. <https://doi.org/10.1007/s10498-019-09349-8>
- Dursun, İ., Yazıcı, N., 2022. Köppen-Trewartha ve Thornthwaite Yöntemlerine Göre Isparta Yöresi İklim Tipinin Belirlenmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8 (2), 264-279, DOI: 10.21324/dacd.1025029
- Ford, D., Williams, P. W., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester, pp 562
- Gaillardet, J., Dupre, B., Louvat, P., Alle'gre, C.J., 1999. Global Silicate Weathering and CO₂ Consumption Rates Deduced from the Chemistry of Large Rivers. *Chemical Geology*, 159 (1), 3-30. doi:10.1016/S0009-2541(99)00031-5
- Gao, X., Li, X., Wang, W., Li, C., 2020. Human Activity and Hydrogeochemical Processes Relating to Groundwater Quality Degradation in the Yuncheng Basin, Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 867. doi:10.3390/ijerph17030867
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms Controlling World's Water Chemistry. *Science*, 170, 1088-1090.
- Gil-Márquez, J.M., Andreo, B., Mudarra, M., 2019. Combining Hydrodynamics, Hydrochemistry, and Environmental Isotopes to Understand the Hydrogeological Functioning of Evaporite-karst Springs. *Journal of Hydrology*, 576, 299-314. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.055>.
- Goepfert, N., Goldscheider, N., Scholz, H., 2011. Karst Geomorphology of Carbonatic Conglomerates in the Folded Molasse Zone of the Northern Alps (Austria/Germany). *Geomorphology*, 130, 289-298. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.04.011.
- Goldscheider, N., 2005. Karst Groundwater Vulnerability Mapping: Application of a New Method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal*, 13 (4), 555-564. DOI: 10.1007/s10040-003-0291-3.
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., Veni, G., 2020. Global Distribution of Carbonate Rocks and Karst Water Resources. *Hydrogeology Journal*, 28, 1661-1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
- Herms, I., Jódar, J., Soler, A., Lambán, L.J., Custodio, E., Núñez, J.A., Arnó, G., Parcerisa, D., Jorge-Sánchez, J., 2021. Identification of Natural and Anthropogenic Geochemical Processes Determining the Groundwater Quality in Port del Comte High Mountain Karst Aquifer (SE, Pyrenees). *Water*, 13, 2891. <https://doi.org/10.3390/w13202891>
- Hill, C.A., Forti, R., 1997. *Cave Minerals of the World*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama, 238 pp.
- Hoaghia, M.A., Moldovan, A., Kovacs, E., Mirea, I.C., Kenesz, M., Brad, T., Cadar, O., Micle, V., Levei, E.A., Moldovan, O.T., 2021. Water Quality and Hydrogeochemical Characteristics of Some Karst Water Sources in Apuseni Mountains, Romania. *Water*, 13, 857. <https://doi.org/10.3390/w13060857>
- Hounslow, A.W., 1995. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. Lewis Publishers.
- Irlayıcı, A., 1993. Isparta Ovası Hidrojeolojisi ve Yeraltısuları ile İlgili Çevre Sorunları. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Karagüzel, R., Irlayıcı, A., 1998. Groundwater Pollution in the Isparta Plain, Turkey. *Environmental Geology*, 34, 4, 303-308.
- Kharaka, Y.K., Gunter, W.D., Aggarwal, P.K., Perkins, E.H., Debraal, J.D., 1988. SOLMINEQ.88: A computer Program for Geochemical Modeling of Water-Rock Interactions. US Geol Surv Water-Resources Investigation Report 88-4227: 420 p.
- Krawczyk, W.E., Ford, D.C., 2006. Correlating Specific Conductivity with Total Hardness in Limestone and Dolomite Karst Waters. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2), 221-234. doi:10.1002/esp.1232
- Kumar, M., Herbert, R., Pawan Kumar Jha, P., Deka, J.P., Rao, M.S., Ramanathan, A.L., Kumar, B., 2016. Understanding the Seasonal Dynamics of the Groundwater Hydrogeochemistry in National Capital Territory (NCT) of India Through Geochemical Modelling. *Aquatic Geochemistry*, 22, 211-224. <https://doi.org/10.1007/s10498-016-9289-z>
- Lakshmanan, E., Kannan, R., Senthil Kumar, M., 2003. Major Ion Chemistry and Identification of Hydrogeochemical Processes of Ground Water in a part of Kancheepuram District, Tamil Nadu. *India Environmental Geosciences*, 10(4), 157-166. <https://doi.org/10.1306/eg100403011>
- Langmuir, D., 1971. The Geochemistry of Some Carbonate Ground Waters in Central Pennsylvania. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 1023-1045.
- Leventeli, Y., 2010. Tahtalı Dağı'nın (Antalya) Hidrojeolojik Geleceği. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1), 139-144.
- Lippmann, E., 1973. *Sedimentary Carbonate Minerals*. Springer-Verlag, Berlin, 228 pp.

- Liu, F., Song, X., Yang, L., Zhang, Y., Han, D., Ma, Y., Bu, H., 2015. Identifying the Origin and Geochemical Evolution of Groundwater Using Hydrochemistry and Stable Isotopes in the Subei Lake Basin, Ordos Energy Base, Northwestern China. *Hydrology Earth System Sciences*, 19, 551–565. <https://doi.org/10.5194/hess-19-551-2015>.
- Mayo, A.L., Loucks, M.D., 1995. Solute and Isotopic Geochemistry and Groundwater Flow in the Central Wasatch Range, Utah, USA. *Journal of Hydrology*, 172, 31-59. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02748-E](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02748-E)
- McLean, W., Jankowski, J., 2000. Groundwater Quality and Sustainability in an Alluvial Aquifer, Australia. In: Sililo et al (eds) Proc XXX IAH Congress on Groundwater: Past Achievements and Future Challenges. Cape Town South Africa 26th November-1st December 2000. AA Balkema, Rotterdam, Brookfield
- Meybeck M., 1987. Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River Dissolved Loads. *American Journal of Science*, 287, 401-428. <https://doi.org/10.2475/ajs.287.5.401>
- Moral, F., Cruz-Sanjulian, J.J., Olias, M., 2008. Geochemical Evolution of Groundwater in the Carbonate Aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 360, 281-296. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.012
- Mthembu, P.P., Elumalai, V., Brindha, K., Li, P., 2020. Hydrogeochemical Processes and Trace Metal Contamination in Groundwater: Impact on Human Health in the Maputaland Coastal Aquifer, South Africa. *Exposure and Health*, 12, 403-426. <https://doi.org/10.1007/s12403-020-00369-2>
- Nasher, N.M.R., Ahmed, M.H., 2021. Groundwater Geochemistry and Hydrogeochemical Processes in the Lower Ganges-Brahmaputra-Meghna River Basin Areas, Bangladesh. *Journal of Asian Earth Sciences*, 6, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100062>
- Nazik, L., Tuncer, K., 2010. Türkiye Karst Morfolojisinin Bölgesel Özellikleri. *Türk Speleoloji Dergisi, Karst ve Mağara Araştırmaları Dergisi*, 1, 7-19.
- Nazik, L., Poyraz, M., 2017. Türkiye Karst Jeomorfolojisi Genelini Karakterize Eden Bir Bölge: Orta Anadolu Platoları Karst Kuşağı. *Türk Coğrafya Dergisi*, 68, 43-56. <https://doi.org/10.17211/tcd.300414>.
- Njitchoua, R., Devera L., Fontesa, J.Ch., Naah, E., 1997. Geochemistry, Origin and Recharge Mechanisms of Groundwaters from the Garoua Sandstone Aquifer, Northern Cameroon. *Journal of Hydrology*, 190 (1), 123-140. doi:10.1016/S0022-1694(96)03049-1
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2)-A Computer Program for Speciation, Batch reaction, One-dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 99-4259, p. 310.
- Petalas, C., 2017. Analysis of the Hydrogeological and Hydrochemical Characteristics of an Immature Karst Aquifer System. *Environmental Processes*, 4, 603–624. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0250-y>
- Piper, A.M., 1944. A Graphical Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis. *Transactions American Geophysical Union*, 25, 6, 914–928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L., Parkhurst, D.L., 1978. The Kinetics of Calcite Dissolution in CO₂ Water Systems at 5–60 °C and 0.0-1.0 atm CO₂. *American Journal of Science*, 278, 179-216.
- Poisson, A., Akay, E., Dumont, J.F., Uysal, Ş., 1984. The Isparta Angle: A Mesozoic Paleorift in the Western Taurides. In: Tekeli, O., and Göncüoğlu, M.C. (eds.). *Geology of the Taurus Belt International Symposium*. 11-26, Ankara/Turkey.
- Poisson, A., Yağmurlu, F., Bozcu, M., Şentürk, M., 2003. New Insights on the Tectonic Setting and Evolution Around the Apex of the Isparta Angle (SW Turkey). *Geological Journal*, 38, 257-282.
- Robertson, A.H.F., Woodcock, N.H., 1984. The SW Segment of the Antalya Complex, Turkey as a Mesozoic–Tertiary Tethyan Continental Margin. In *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*, Dixon J.F., Robertson A.H.F. (eds). Special Publications 17. Geological Society, London, 251–271.
- Sappa, G., Barbieri, M., Ergul, S., Ferranti, F., 2012. Hydrogeological Conceptual Model of Groundwater from Carbonate Aquifers Using Environmental Isotopes (¹⁸O, ²H) and Chemical Tracers: A Case Study in Southern Latium Region, Central Italy. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 695-716. doi:10.4236/jwarp.2012.49080
- Singh, A.K., Hasnain, S.I., 2002. Aspects of Weathering and Solute Acquisition Processes Controlling Chemistry of Sub-Alpine Proglacial Streams of Garhwal Himalaya, India. *Hydrological Processes*, 16, 835-849. <https://doi.org/10.1002/hyp.367>
- Singh, A.K., Mondal, G.C., Kumar, S., Singh T.B., Tewary, B.K., Sinha, A., 2008. Major Ion Chemistry, Weathering Processes and Water Quality Assessment in Upper Catchment of Damodar River basin, India. *Environmental Geology*, 54, 745-758. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0860-1>
- Skoglund, R.Ø., Lauritzen, S.E., 2011. Subglacial Maze Origin in Low-dip Marble Stripe Karst: Examples from Norway. *Journal of Cave and Karst Studies*, 73, 1, 31-43. DOI: 10.4311/jcks2009ES0108
- Stumm, W., Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. 3rd Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Su, H., Geng, D., Zhang, Z., Luo, Q., Wang, J., 2020. Assessment of the Impact of Natural and Anthropogenic Activities on the Groundwater Chemistry in Baotou City (North China) Using Geochemical Equilibrium and Multivariate Statistical Techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 27651-27662, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09117-0>
- Su, Y., Yang, F., Chen, Y., Zhang, P., Zhang, X., 2021. Optimization of Groundwater Exploitation in an Irrigation Area in the Arid Upper Peacock River, NW China. Implications for Sustainable Agriculture and Ecology. *Sustainability*, 13, 8903. <https://doi.org/10.3390/su13168903>.
- Szramek, K., Walter, L.M., Kanduč, T., Ogrinc, N., 2011. Dolomite versus Calcite Weathering in Hydrogeochemically Diverse Watersheds Established on Bedded Carbonates (Sava and Soca Rivers, Slovenia). *Aquatic Geochemistry*, 17, 357-396. DOI 10.1007/s10498-011-9125-4
- Şenel, M., 1984. Discussion on the Antalya Nappes. In: Tekeli, O., and Göncüoğlu, M.C. (eds.). *Geology of the Taurus Belt International Symposium*. 41-51, Ankara/Turkey.
- Şenel, M., 1997. 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Isparta-J11 paftası, No: 14. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Şenel, M., Gedik, I., Dalkılıç, H., Serdaroğlu, M., Bilgin, A.Z., Uğuz, M.F., Bölükbaşı, A.S., Korucu, M., Özgül, N., 1996. Isparta Bükümlü Doğusunda, Otokton ve Allohton Birimlerin Stratigrafisi (Batı Toroslar). *MTA Dergisi*, 118, 111-160.

- Şener, Ş., Şener, E., 2016. Kovada Gölü'nün (Isparta) Hidrojeokimyasal İncelemesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 4(2), 49-58, DOI: 10.21923/jesd.92987.
- Van der Weijden, C.H., Pacheco, F.A.L., 2003. Hydrochemistry, Weathering and Weathering Rates on Madeira Island. Journal of Hydrology, 283, 122-145, doi:10.1016/S0022-1694(03)00245-2.
- Wu, C., Wu, X., Lu, C., Sun, Q., He, X., Yan, L., Qin, T., 2021. Hydrogeochemical Characterization and Its Seasonal Changes of Groundwater Based on Self-Organizing Maps. Water, 13, 3065. <https://doi.org/10.3390/w13213065>
- Zhang, B., Zhao, D., Zhou, P., Qu, S., Liao, F., Wang, G., 2020. Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Dominant Water-Rock Interactions in the Delingha Area, Qaidam Basin, Northwest China. Water, 12(3), 836. <https://doi.org/10.3390/w12030836>
- Zhou, Z., Zhang, G., Yan, M., Wang, J., 2012. Spatial Variability of the Shallow Groundwater Level and Its Chemistry Characteristics in the Low Plain Around the Bohai Sea, North China. Environmental Monitoring and Assessment, 184, 3697-3710. DOI: 10.1007/s10661-011-2217-1.