



DENİZLİ İL MERKEZİ İÇME SUYU KAYNAKLARININ HİDROKİMYASI VE KALİTE DEĞERLENDİRMESİ

Osman KURT¹, Ali GÖKGÖZ^{2*}, Can BAŞARAN³

¹ Denizli Büyükşehir Belediyesi, Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Denizli, Türkiye

² Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
İçme suyu, Sulama suyu, Hidrokimya, İzotop, WQI.	Bu çalışmanın amacı, Denizli il merkezi yeraltı sularının su kalitesini ve kullanılabilirlik özelliklerini değerlendirmektir. Bu amaçla 6 kaynak ve 18 sondaj ile 2 adet yağmur suyundan alınan örneklerin fizikokimyasal ve izotop analizleri yapılmıştır. Su örneklerinin sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EI) ve pH değerleri sırasıyla 10,4–20,0 °C, 297–890 µS/cm ve 7,11–8,13 arasındadır. Sular genellikle Ca-Mg-HCO ₃ tipinde olup kalsitçe zengin karbonat akiferlerden boşalmaktadır. Örneklenen suların kimyasal kompozisyonu başlıca karbonat çözünmesi ile şekillenmekle birlikte, evaporit çözünmesi, silikat ayrışması ve katyon değişimi reaksiyonlarının da etkisi vardır. Analiz sonuçları Türk İçme Suyu ve Dünya Sağlık Örgütü standartları ile karşılaştırılmış ve tüm suların içilebilir olduğu belirlenmiştir. Örneklenen suların WQI (Su Kalite İndeksi) değerleri 13,7–43,8 arasında değişmekte olup tüm örnekler “çok iyi” içme suyu sınıfındadır. Çeşitli parametrelerle yapılan değerlendirmeler tüm suların sulamaya uygun olduğunu ortaya koymuştur. δ ¹⁸ O, δD ve trityum değerlerine göre sular meteorik kökenli ve genellikle sık dolaşımıdır. δ ¹³ C değerleri karbonun başlıca kaynağının akifer kayalarındaki kalsit ve/veya diğer karbonat minerallerinin çözünmesi olduğunu göstermiştir.

HYDROCHEMISTRY AND QUALITY ASSESSMENT OF DRINKING WATER RESOURCES IN DENİZLİ CITY CENTER

Keywords	Abstract
Drinking water, Irrigation water, Hydrochemistry, Isotope, WQI.	This study aims to evaluate the water quality and usability properties of groundwater in Denizli city center. For this purpose, physicochemical and isotope analyses of samples taken from 6 springs, 18 drillings, and 2 rainwater were carried out. Temperature, electrical conductivity (EC), and pH values of water samples are between 10.4–20.0 °C, 297–890 µS/cm and 7.11–8.13, respectively. Waters are generally of the Ca-Mg-HCO ₃ type and discharged from calcite-rich carbonate aquifers. Although the chemical composition of sampled waters is mainly shaped by carbonate dissolution, evaporite dissolution, silicate dissociation and cation exchange reactions are also effective. Analysis results were compared with Turkish Drinking Water and World Health Organization standards and it was determined that all waters were drinkable. WQI values of sampled waters ranged between 13.7–43.8 and all samples were in the “very good” drinking water class. Evaluations made with various parameters revealed that all waters are suitable for irrigation. According to δ ¹⁸ O, δD and tritium values, the waters are of meteoric origin and generally have shallow circulation. δ ¹³ C values showed that the main source of carbon is the dissolution of calcite and/or other carbonate minerals in the aquifer rocks.

Alıntı / Cite

Kurt, O., Gökgöz, A., Başaran, C., (2025). Denizli İl Merkezi İçme Suyu Kaynaklarının Hidrokimyası ve Kalite Değerlendirmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(3), 957-978.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
O. Kurt, 0000-0002-7072-4843	Başvuru Tarihi / Submission Date
A. Gökgöz, 0000-0002-5238-0207	Revizyon Tarihi / Revision Date
C. Başaran, 0000-0001-6281-6580	Kabul Tarihi / Accepted Date
	Yayın Tarihi / Published Date

*İlgili yazar / Corresponding author: agokgoz@pau.edu.tr, +90-258-296-3373

HYDROCHEMISTRY AND QUALITY ASSESSMENT OF DRINKING WATER RESOURCES IN DENİZLİ CITY CENTER

Osman Kurt¹, Ali Gökgöz^{2†}, Can Başaran³,

¹ Denizli Metropolitan Municipality, General Directorate of Water and Sewerage Administration, Denizli, Türkiye

² Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Denizli, Türkiye

³ Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Afyonkarahisar, Türkiye

Highlights

- Groundwater in Denizli city center is generally of Ca-Mg-HCO₃ type.
- The groundwater in the Denizli city is of meteoric origin and generally has shallow circulation.
- WQI values of sampled waters showed that all samples were in the “very good” drinking water class.
- All waters are suitable for irrigation.

Purpose and Scope

In this study, it was aimed to reveal hydrochemical and isotopic characteristics of the waters in Denizli city center and to determine the usage properties.

Design/methodology/approach

During the field studies carried out to determine the hydrochemical and usage properties and water quality of the selected samples (Denizli). Water points (drilling and spring) that are intensively used as drinking and utility water by the city center are marked as handling points. Temperature, EC and pH were determined in situ by HACH-LANGE HQ40D. Ion and element analyses of water samples were carried out in Denizli Metropolitan Municipality, Denizli Environmental Quality Laboratory. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values were measured at the General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ). Tritium and ^{13}C were analyzed in Hacettepe University, Environmental Isotope Laboratory and Middle East Technical University, Stable Isotope Ratio Mass Spectroscopy Laboratory (DİL), respectively. To determine hydrochemical properties, many diagrams were used and different parameters such as water quality index for usage characteristics were evaluated.

Findings

The main aquifers in the study area are fractured rock aquifers consisting of marble, calc-schist, limestone, dolomitic limestones and Neogene Sazak formation limestones from the basement rocks. Quaternary alluvial fan and alluvium form porous aquifers. These porous aquifers and Sazak formation limestones are fed by lateral flow from basement rocks rather than precipitation in the study area. The temperature, EC and pH values of the waters are between 10.4–20.0 °C, 297–890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 7.11–8.13, respectively. The waters are generally of Ca-Mg-HCO₃ type and their chemical compositions are mainly derived by carbonate dissolution. Evaporite (gypsum) dissolution, silicate weathering and cation exchange reactions are other factors. Isotope values ($\delta^{18}\text{O}$, δD , ^3H and $\delta^{13}\text{C}$) showed that the waters are of meteoric origin and the recharge area altitude is between 900–1350 m, they generally have shallow circulation and the carbon in the waters mainly originates from the dissolution of calcite and/or other carbonate minerals in the aquifer rocks. The majority of the sampled waters are suitable for drinking according to İTASHY (2013) and WHO (2011) standards. WQI values (13.7–43.8) showed that the waters have “very good” drinking water quality. As a result of the evaluations made according to various irrigation water quality parameters (electrical conductivity, total hardness, Na%, sodium adsorption ratio, residual sodium carbonate, magnesium ratio, Kelly ratio, permeability index parameters and Wilcox and US Salinity Laboratory diagrams), it was revealed that all waters are suitable for irrigation.

Practical implications

In this study, the hydrochemical and usage properties of the main drinking water sources of Denizli city. Since the sampled waters are also used as a drinking water source and as irrigation in the region, the obtained data are useful and important, especially for local people and administrators.

Originality

These waters, which are used intensively in a densely populated region, have not been studied in detail before in terms of their hydrochemical, isotopic and usage properties. This study will guide local people and authorities to determine the use of regional waters in more efficient and appropriate conditions.

[†]Corresponding author: agokgoz@pau.edu.tr, +90-258 296 3373

1. Giriş (Introduction)

Küresel ısınma ve buna bağlı olarak atmosfer sıcaklığının ve buharlaşmanın artması ve bölgesel yağış miktarının azalması, ayrıca artan nüfus ve endüstriyel aktivite nedeniyle içme ve kullanma suyu ihtiyacının artması su temininde giderek artan bir strese neden olmaktadır. Yeraltı suyu beslenmesi, yağış miktarı, türü, şiddeti, alansal dağılımı, buharlaşma ve zeminin geçirgenliği gibi faktörlere bağlıdır. Yeraltı sularından sürdürülebilir yararlanmada yeraltı suyu potansiyeli kadar su kalitesi de önem taşımaktadır. Ülkemizde yeraltı suyu kalitesi ve kullanılabilirliği üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Davraz ve Varol, 2012; Bilgin, 2015; Varol ve Davraz, 2016; Karakuş, 2019; Dişli ve Gülyüz, 2020; Şener vd., 2022; Başaran ve Manap, 2023; Ece Karakuş vd., 2023; Yazman vd., 2024). Yeraltı suyu kirliliği üzerine yapılan çalışmalarda doğal ya da antropojenik kirlilik kaynaklarının akifer litolojisi, deniz suyu girişi, gübre ve zirai ilaçlar, maden çıkarma ve işletme prosesleri, endüstriyel faaliyetler ve evsel atıklar olduğu ortaya konmuştur (Baba ve Ayyıldız, 2006; Tarcan vd., 2010; Baba ve Tayfur, 2011; Güler vd., 2012; Gökgöz ve Akdağoglu, 2016; Yolcubal vd., 2016; Güner vd., 2018; Ekemen Keskin ve Özler, 2020; Gökgöz vd., 2022).

Denizli meteoroloji istasyonu verilerine göre 1957–2021 arasında (61 yıl) il merkezi için ortalama sıcaklık 16,2 °C ve yıllık toplam yağış ortalaması 568,7 mm olmuştur. Thornthwaite (1948) yöntemine göre hesaplanan potansiyel ve gerçek buharlaşma-terleme değerleri ise sırasıyla 858,47 ve 385,21 mm'dir. Aynı yöntemle il merkezi için iklim tipi C1,B'3,s2,b'3 (yarı kurak-az nemli, 3. derece mezotermal, su fazlası kış mevsiminde ve çok kuvvetli olan, okyanusala daha yakın iklim tipi) olarak belirlenmiştir (Kurt, 2022). Standart yağış indeksi (SPI) yöntemi ile hazırlanan meteorolojik kuraklık haritasında Denizli ili Nisan 2024-Mart 2025 arasındaki dönemde şiddetli kurak, çok şiddetli kurak ve olağanüstü kurak alanlarda yer almıştır (MGM, 2025).

Denizli Havzası'nda (Denizli Grabeni, Çürüksu Grabeni) (Şekil 1a,b) çoğu kaynak ve sondaj suyunun içilmez özellikte olması içme suyu temininde sorun oluşturmaktadır. Örneğin bu havzadaki 21 mahallenin ("Susuz Köyler Grubu" olarak anılır) su ihtiyacı Pınarkent civarındaki Kazanpınar ve Böceli pınarlarından yaklaşık 40 km uzunluğundaki iletim hattıyla karşılanır (Gökgöz ve Tabancalı, 2021). 2021 yılı TÜİK verilerine göre Denizli il merkezinin toplam nüfusu 662.770'dir. Bu nüfusun içme ve kullanma suyu ihtiyacı il merkezi ve civarındaki sondaj ve kaynak sularından sağlanmaktadır. Son yıllarda artan kuraklık nedeniyle yeraltı su seviyeleri düşmüş ve yüksek debili bir içme suyu kaynağı kurumuştur. Bu durumda güncel hidrokimyasal parametrelerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi oldukça önemli hale gelmiştir.

Bu çalışmanın amacı Denizli il merkezi su kaynaklarının (a) kimyasal ve izotop kompozisyonunun ve su kimyasına etkiyen faktörlerin belirlenmesi, (b) WQI (Su Kalite İndeksi) ile içme suyu kalitesinin değerlendirmesi ve (c) sulamada kullanılabilirliklerinin ortaya konmasıdır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Denizli Belediyesi içme ve kullanma suyu temini amacıyla 1985–1996 yılları arasında DSİ, İller Bankası ve özel firmalara toplam 43 bedelli kuyu açtırmıştır. Bu kuyuların derinlikleri 60-210 m arasında olup verimleri 4–60 l/s arasında değişmektedir (Gökgöz vd., 2005). Denizli il merkezinde bu bedelli kuyular dışında hayırseverler tarafından cadde ve sokak kenarlarında açtırılan, şahısların arazi ya da işyerlerinde bulunan ve devlet kurumlarının bahçelerinde açılan sondaj kuyuları da mevcuttur. Bu kuyuların derinlikleri 6–150 m arasında olmakla birlikte genellikle sığ kuyulardır (30–40 m). 1999 yılı itibarıyla sayıları 365 olan bu kuyuların çoğu pozitif artezyen olup debileri 0,01 ile 1,63 l/s arasında değişmektedir (Kaya, 2000; Gökgöz vd., 2005). Günümüzde bu kuyuların bir kısmı kapatılmış, bir kısmının da akımı kesilmiştir. Bedelli sondaj kuyuları ile artezyen kuyu sularının anyon ve katyon sıralaması genellikle $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ ve $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$ şeklindedir (Gökgöz vd., 2005).

Diğer çalışmalar Denizli il merkezi doğu kesimindeki yeraltı suyu kalitesi ve akifer karakteristikleri üzerine odaklanmıştır. Taşdelen vd. (2017) Gökpınar Kaynağı civarında yeraltı suyu hareketi ve dağılımında normal fayların etkili olduğunu ve Gökpınar Kaynağının Çatalcatepe kireçtaşlarından (Sandak birimi) boşaldığını belirtmişlerdir. Oudeika vd. (2021) Gökpınar Barajı güneyinde yeraltı suyu seviyesinin 3 ile 9 m arasında değiştiğini ve akımın KB, GB ve GD'den göle doğru olduğunu belirtmişler ve Taşdelen (2021), bu havzadaki kaynak sularının başlıca Ca-Mg-HCO₃ tipinde olduğunu ve sulama suyu olarak iyi-mükemmel sınıflarda yer aldığını ifade etmiştir. Diğer bir çalışmada Cankurtaran Havzası'nda yeraltı suyunun akım yönünün Gökpınar Kaynağı'na doğru olduğu ortaya konmuştur (Oudeika vd., 2020). Taşdelen vd. (2016) Cankurtaran'ın kuzeydoğusundaki Çukurköy'de sığ yeraltı sularının en fazla 30 m derinlikte ve yeraltı suyu akım yönünün doğudan kuzeybatıya doğru olduğunu saptamışlardır. Taşdelen (2018) Pınarbaşı Kaynağı yakınındaki Kozlupınar ve Bent Pınarı'nın boşalım katsayısı değerlerini hesaplamış ve kaynak sularının Mesozoyik kireçtaşlarının çatlak ve eklemlerinden boşaldığını belirlemiştir.

Bu çalışma ile Denizli il merkezi yeraltı sularının güncel iyon ve element derişimleri ve ilk kez izotop kompozisyonları ortaya konarak değerdendirilmiş, içme suyu kalitesi ilk kez WQI (Su Kalite İndeksi) yöntemi ile araştırılmış, sulamada kullanılabilirlikleri incelenmiş ve bu konudaki literatüre katkı sağlanmıştır.

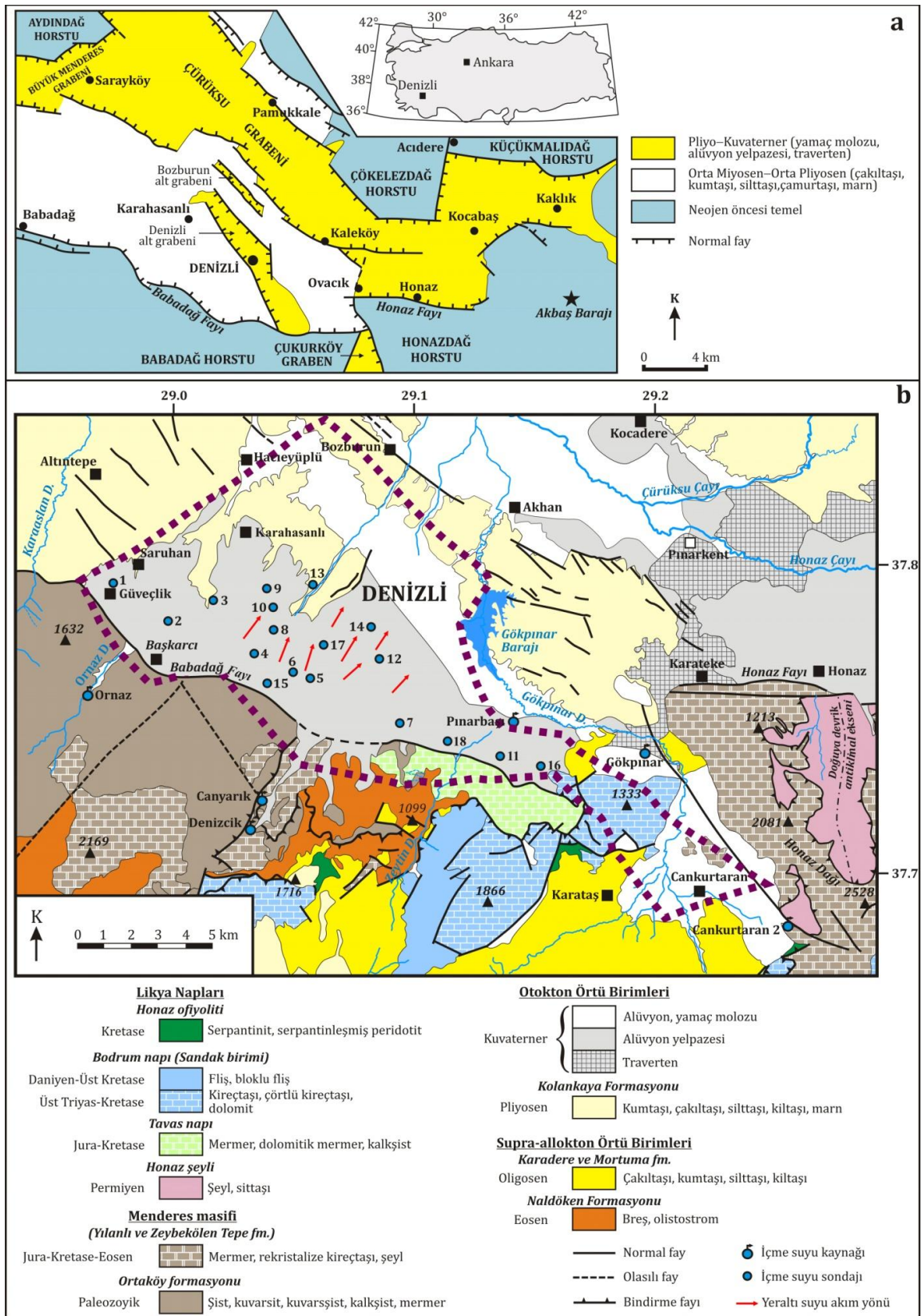
3. Jeoloji (Geology)

Doğu Anadolu'da Miyosen'de Avrasya ve Arap levhalarının çarpışmasıyla başlayan sıkışma rejimi, Anadolu Levhası'nın batıya doğru hareketine yol açmıştır. Bu rejim, Batı Anadolu'da Geç Miyosen'de genişleme rejimine dönüşmüş ve Batı Anadolu'da horst-graben sistemlerinin oluşmasına neden olmuştur (Dewey ve Şengör, 1979; Şengör ve Yılmaz, 1981; Hetzel vd., 1995; Yılmaz vd., 2000; Bozkurt, 2001). Bu grabenlerden biri olan Denizli Grabeni (Denizli Havzası-Çürüksu Grabeni) 62 km uzunluğunda ve 7-28 km genişliğinde olup (Koçyiğit, 2005), doğu kesiminde genellikle D-B, batı kesiminde ise KB-GD uzanımlıdır (Şekil 1a). Koçyiğit (2005) graben dolgusunu eski ve güncel olarak ikiye ayırmış, eski dolgunun Orta Miyosen-Orta Pliyosen yaşlı çakıltası, kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve marndan, güncel dolgunun da Pliyo-Kuvaterner yaşlı yamaç molozu, alüvyon yelpazesi ve travertenden oluştuğunu belirtmiştir. Honaz ve Babadağ fayları grabeni güneyden sınırlayan ve deprem üreten iki önemli aktif faydır (Şekil 1b). İki fay da yaklaşık D-B gidişli olup Honaz Fayı 40-60° kuzeye, Babadağ Fayı 35-45° kuzeydoğuya eğimlidir (Hançer, 2013). İnceleme alanının kuzeyindeki Pamukkale Fay Zonu KB-GD uzanımlı ve 40-60° GB'ye eğimlidir ve uzunluğu 5-15 km olan segmentlerden oluşur (Hançer, 2013).

İnceleme alanındaki kaya birimleri Menderes Masifi metamorfileri, Likya napları, supra-allokon ve otokon örtü birimleridir (Şekil 1b). İnceleme alanında Ortaköy, Yılanlı ve Zeybekölen Tepe formasyonları ile temsil edilen Menderes Masifi temeli oluşturmaktadır. Paleozoyik yaşlı (Sun, 1990) olan ve şist ve mermer türünde kayalardan oluşan Ortaköy formasyonu üzerinde olasılıkla Triyas yaşlı şistler ve Jura-Kretase yaşlı beyaz mermerler yer alır (Çakmaköğlu, 2017). Gastropod fosili içeren ve Üst Kretase yaşlı rekristalize kireçtaşları ise Yılanlı formasyonu olarak adlandırılmıştır (Meşhur ve Akpınar, 1984; Konak vd., 1987; Okay 1989). Zeybekölen Tepe Formasyonu Yılanlı Formasyonunun üzerinde uyumlu olarak bulunur. Olasılıkla Paleosen-Alt Eosen yaşlı olan formasyon rekristalize gri pelajik kireçtaşı, pembe kireçtaşı, şeyl ve karbonatlı şeylden oluşur (Okay, 1989). Menderes Masifi inceleme alanda Honaz Şeyli, Tavas Napı, Bodrum Napı ve Honaz Ofiyoliti ile temsil edilen Likya napları tarafından tektonik dokanakla üzerlenir. Honaz Şeyli başlıca bol kırıklı ve kıvrımlı, hafif metamorfizma geçirmiş, koyu mavimsi yeşil şeyl ve silttaşından yapıldır (Okay, 1989). Yaşı Permiyen olarak kabul edilir (Konak ve Şenel, 2002). Tavas Napı Kretase yaşlı gri, koyu gri, yer yer siyah dolomitik mermer ve çörtlü mermerler ile bunların üzerine uyumsuz olarak gelen Alt Eosen-Paleosen yaşlı bordo renkli mermer ve kalk şistlerden oluşur (Çakmaköğlu, 2017). Bodrum Napı Üst Triyas-Liyas yaşlı (Bernoulli vd., 1974), kalın tabakalı-masif, gri, koyu gri, siyah renkli ve yer yer kalın jips katmanları ile ardalımalı dolomitik kireçtaşı ve dolomitler (Gereme formasyonu) ve bu istif üzerinde uyumlu olarak bulunan Dogger-Üst Kretase yaşlı çört yumrulu kireçtaşı ve filiş biriminden yapıldır (Çatalca Tepe kireçtaşı birimi)(Erakman vd., 1986; Okay, 1989). Bölgedeki nap istifinin en üst tektonik birimini oluşturan ve yaşı Kretase olarak kabul edilen (Gündoğan vd., 2008) Honaz ofiyoliti başlıca serpantinleşmiş peridotitlerden yapıldır. Supra-allokon örtü birimleri olistostromal breşik karakterli çökellerden oluşan Eosen yaşlı Naldöken formasyonu (Konak, 2003; Çakmaköğlu, 2017), koyu kırmızı ve zeytin yeşili renkte çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşından oluşan Oligosen Karadere formasyonu ve sarımsı kahverengi ve gri renkli çakıltası, kumtaşı ve silttaşından oluşan Oligosen Mortuma formasyonudur (Hakyemez, 1989). İnceleme alanındaki otokon örtü birimleri egemen olarak bol mikalı kumtaşı ile çakıltası, silttaşı, kiltası, killi kireçtaşı ve marn birimlerinden oluşan Üst Miyosen-Üst Pliyosen yaşlı (Alçiçek, 2007) Kolankaya formasyonu ve Kuvaterner alüvyon, alüvyon yelpazesi, yamaç molozu ve traverten birimlerinden oluşmaktadır. Stratigrafik olarak Kolankaya formasyonunun altında bulunan Miyosen yaşlı Sazak ve Kızılburun formasyonları harita alanında (Şekil 1b) mostra vermez. Alttan üste Kızılburun formasyonu karbonat çimentolu çakıltası, kumtaşı, kiltası ve silttaşı ardalımasından, Sazak formasyonu ise evaporit içeren (başlıca jips) gölşel kireçtaşı, marn, silttaşı birimlerinden oluşur.

4. Hidrojeoloji (Hydrogeology)

Menderes Masifi'nin Ortaköy formasyonunun mermer, kuvars şist, kalk şist ve kuvarsitlerindeki yoğun kırık ve çatlaklar ve ilaveten Yılanlı formasyonu rekristalize kireçtaşlarının karstik yapısı bu birimlere önemli derecede ikincil gözeneklilik ve geçirgenlik kazandırmıştır. Ortaköy formasyonundan boşalan kaynakların debileri genellikle düşük olup en yüksek debili kaynak Ornaz Kaynağı'dır (< 50 l/s). İnceleme alanının en önemli çatlaklı kaya akiferi görünür kalınlığı 1500 m olan (Okay, 1989) Yılanlı formasyonudur. Formasyon yağmur suyu dışında Honaz Dağı'ndaki yaygın kar örtüsünün erimesinden de beslenir.



Şekil 1. (a) DGHS içinde çalışma alanının konumu (Koçyiğit, 2005'den değiştirilerek), (b) Çalışma alanının sadeleştirilmiş jeoloji haritası ve su örnekleme lokasyonları (Okay, 1989; Konak ve Şenel, 2002; Konak, 2003, 2007a,b; Konak ve Çakmakoglu, 2007a,b, 2009; Konak vd., 2016; Çakmakoglu, 2017'den değiştirilmiştir). Mor noktalı alan içme suyu verilen yerleşim alanlarının sınırlarını göstermektedir. Yeraltısuyu akım yönü Gökgez vd. (2005)'den alınmıştır. ((a) Location of the study area within the DGHS (modified from Koçyiğit, 2005), (b) Simplified geological map of the study area (modified from Okay, 1989; Konak and Şenel, 2002; Konak, 2003, 2007 a,b; Konak and Çakmakoglu, 2007 a,b, 2009; Konak et al., 2016; Çakmakoglu, 2017) and water sampling locations. The purple dotted area indicates the boundaries of the residential areas that receive drinking water. Groundwater flow direction is taken from Gökgez et al. (2005))

Bu formasyondaki yeraltı sularının bir kısmı Honaz Fayı boyunca yüksek debili (1000 l/s'ye kadar) karstik kaynaklardan boşalır (Gökgöz ve Tabancalı, 2021; Gökgöz ve Semerci Aygün, 2023). Fay boyunca açılan ve Yılanlı formasyonunu kesen yüksek verime sahip (70 l/s'ye kadar) sondajların çoğu pozitif artezyen özelliğindedir (Gökgöz vd., 2022). Tavas napının ikincil gözeneklilik ve geçirgenliğe sahip çörtlü mermer, dolomitik mermer ve kalk şistlerinde az sayıda kaynak vardır, ancak Babadağ Fay Düzlemi'ne yakın kesimlerde açılan sondajlarla bu birimlerden yeraltı suyu alınmaktadır. Bodrum Napı'nın Sandak birimine ait Gereme formasyonunun dolomit, dolomitik kireçtaşı ve Çatalcatepe kireçtaşı birimleri bol kırıklı, çatlaklı ve karstik özellikleri nedeniyle inceleme alanındaki önemli akiferlerden biridir. Bu birimden boşalan en yüksek debili karstik kaynak Gökpınar Kaynağı'dır (~500 l/s). Karateke ve Pınarkent mahalleleri civarında yaygın olan ve kalınlığı 90 m'ye erişen travertenlerde (Şekil 1b) açılan sondajlardan yüksek verim alınmıştır (Önhon vd., 1988). İnceleme alanında geniş yayılım gösteren alüvyon ve alüvyon yelpazeleri gözenekli akiferleri oluşturur. Yağış suları ve temel kayalardan olan yanal yeraltı suyu akımı ile beslenirler. Bu birimlerin çakıllı ve kumlu seviyelerini kesen sondajlarla yüksek debilerde yeraltı suyu elde edilmektedir. Alüvyon ve alüvyon yelpazesi birimlerinin yağıştan doğrudan beslenmesi bu birimler üzerinde geniş yayılım gösteren şehirleşme nedeniyle sınırlıdır.

Zeybekölen Formasyonunun çatlaklı kireçtaşları yeraltı suyu içermesine karşın şeyl ve karbonatlı şeyl düzeylerinin yeraltı suyu akımını sınırlaması nedeniyle formasyon yarı geçirimli olarak değerlendirilmiştir. Molas karakterindeki Karadere ve Mortuma formasyonlarının çamurtaşı ve silttaşı seviyeleri yeraltı suyu hareketini kısıtlamakla birlikte kumlu ve çakıllı düzeyleri Karataş Mahallesi ve civarı için yersel akiferi oluşturur. Bu akiferden boşalan az sayıdaki kaynak ve sondajın debileri düşüktür. Sazak formasyonunun kırıklı ve çatlaklı kireçtaşları geçirimli olmakla birlikte yanal yönde devamlılığının olmaması bu özelliğini sınırlar.

Yılanlı formasyonunun altında geçirimsiz bir taban oluşturan Honaz Şeyli, bu Yılanlı formasyondaki yeraltı sularının derine inmeden ovaya yönelmesini sağlar. Honaz ofiyoliti geçirimsizdir, ancak ayrışma derinliğine kadar olan kesimden yersel olarak boşalan düşük debili kaynakların suları da kurak dönemde kesilmektedir. Naldöken Formasyonu baskın kiltası ve silttaşı seviyeleri nedeniyle geçirimsizdir. Kızılburun formasyonları içerdiği yaygın silttaşı ve kiltası seviyeleri nedeniyle geçirimsiz özelliktedir. Çoğunlukla kumtaşı, marn ve kiltası araldanmasından oluşan Kolankaya Formasyonundaki süreksizliklerin geçirgenliğe etkisi yok denecek kadar az olup bu formasyondaki dentritik drenaj ağı geçirimsizliğin göstergesidir (Şimşek, 1984).

Bu çalışma kapsamında içme suyu kuyularından yeraltı su seviyesi ölçmek mümkün olmamıştır. DS-1 kuyusunda açılış tarihinde (1989) 40 m olan statik seviyenin 2020 yılında 76 m'ye düştüğü bilinmektedir. Ancak, 2001 yılının Mayıs, Kasım ve Aralık aylarında üç kez yapılan seviye ölçümlerinde Denizli il merkezi yeraltısuyu seviyelerinin +0,50 ile 81,8 m arasında değiştiği, Kasım ve Aralık aylarındaki su seviyelerinin Mayıs ayına göre 1–3 m düştüğü ve genel yeraltı suyu akım yönünün güneybatıdan kuzeydoğuya doğru olduğu belirlenmiştir (Gökgöz vd., 2005). Şekil 1b'de DS-12, 14 ve 17 nolu kuyuları çevreleyen alan ve civarı artezyen bölgesidir. Bu alanda içme suyu kuyuları dışında hayırseverler tarafından sokak ve cadde kenarlarında açtırılan veya şahıslarca evlerinin bahçelerinde ya da işyerlerinde açtırılmış, büyük çoğunluğu pozitif artezyen olan kuyular mevcuttur. 2000 yılı itibarıyla sayısı 325'in üzerindeki bu kuyuların derinlikleri 6–150 metre arasında değişmekle birlikte genellikle sığ kuyulardır (30–40 m). Pozitif artezyen kuyuların verimleri 0,011–1,625 l/s arasında olup debi değerleri mevsimsel değişim gösterir. Bu kuyulardan yıllık toplam boşalım yaklaşık $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 'tür (Gökgöz vd., 2005). Günümüzde bu kuyuların bir kısmı kurumuş, bir kısmı da kapatılmıştır.

5. Denizli İl Merkezi İçme Suyu Kaynakları (Drinking Water Resources in Denizli City Center)

Denizli Şehir Merkezi'nin içme ve kullanma suyu ihtiyacı, 2021 yılı itibarıyla 36 adet kaynak ve 91 adet sondajdan karşılanmaktadır. Kaynaklar genellikle Mesozoyik kireçtaşlarından boşalır. Gökpınar Kaynağı ortalama 500 l/s ile en yüksek debiye sahip kaynaktır (Şekil 2). İçme suyu kaynaklarından 150 l/s debiye sahip olan Derindere Kaynağı 2024 yılı içerisinde kurumuştur. Bu durumda kaynakların toplam debisi 150 l/s azalmayla 1374 l/s olup su ihtiyacının %52'sini karşılamaktadır. Çalışma kapsamında 6 kaynak örneklenmiştir: Cankurtaran-2 (kot 1057 m), Ornaz (997 m), Canyarık (852 m), Denizcik (840 m), Gökpınar (583 m) ve Pınarbaşı (377 m). Bu kaynakların örnekleme tarihinde ölçülen debileri 5 l/s (Denizcik ve Cankurtaran-2) ile 409 l/s (Gökpınar) arasındadır. Derinlikleri 74 ile 260 m arasında değişen 91 içme suyu sondaj kuyusunun toplam debisi 1261 l/s'dir ve su ihtiyacının %48'ini karşılamaktadır.

Sonuç olarak kaynak ve sondajlardan Denizli İl Merkezi içme suyu sistemine günde 227.664 ton (yılda yaklaşık $83,1 \times 10^6 \text{ ton}$) su verilmektedir. Verilen miktarın 143.158 tonu (%63) tüketilmekte ve bu da yaklaşık %37 oranında su kaçağı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Gökpinar Kaynağı'ndan dron görüntüsü. (Drone image of Gökpinar Spring)

6. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışma kapsamında alansal dağılımı en iyi temsil edebilecek 6 kaynak ve 18 sondaj ile 2 adet yağmur suyu olmak üzere toplam 26 su noktasından ölçüm ve anyon (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , Br^- , NO_2^- , NO_3^- ve PO_4^{3-}), kation (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Li^+ ve NH_4^+), element (Al, As, B, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb ve Se) ve izotop ($\delta^{18}\text{O}$, δD , ^3H ve $\delta^{13}\text{C}$) analizleri için örnekleme yapılmıştır (Şekil 1b). Suların sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), elektriksel iletkenlik (EI, $\mu\text{S}/\text{cm}$) ve pH değerleri sahada ölçülmüştür. İyon, element ve $\delta^{13}\text{C}$ (Çözünmüş inorganik karbon-DIC) dışındaki izotop analizleri için örnekleme 20.10–18.11.2020 tarihleri arasında yapılmıştır. Suların izotop içeriğindeki ($\delta^{18}\text{O}$, δD ve ^3H) mevsimsel değişimleri görmek için 07.03.2021 tarihinde yağmur suyundan ve 29.04.2022 tarihinde bazı kaynak ve sondaj sularından tekrar numune alınmıştır. $\delta^{13}\text{C}$ analizleri için cihaz arızası nedeniyle ilk örnekleme döneminde numune alınamamış, örnekleme 08.11.2021 tarihinde gerçekleştirilmiştir. İyon ve element analizleri için su numuneleri alındığı tarihte ilgili laboratuvara ulaştırılmıştır. Örnekleme yöntemleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Suların iyon ve element analizleri Denizli Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (DESKİ) Genel Müdürlüğü, Denizli Çevre Kalite Laboratuvarı'nda (DENÇEV) gerçekleştirilmiştir. İyon analizleri iyon kromatografi (Thermo Scientific IC) ve element analizleri Perkin Elmer ICP-OES cihazları kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan cihazların en düşük okuma limitleri iyon analizleri için 0,02 ile 0,2 mg/l, element analizleri için ise 0,218 ile 69 $\mu\text{g}/\text{l}$ 'dir. İyon analizlerinde analiz hatası $\% -2,43$ ile $\% +6,45$ arasında olmuştur.

Suların $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri DSİ Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı (TAKK) İzotop Laboratuvarı'nda Picarro L-2130i model "Lazer Spektrometresi" ile, trityum analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası ve Çevresel İzotop Laboratuvarı'nda Perkin Elmer Quantulus 1220 model "Sıvı Sayma Sintilasyon Sistemi" ile ve $\delta^{13}\text{C}$ analizleri ise Ortaoğlu Teknik Üniversitesi, ARGE Eğitim ve Ölçme Merkezi, Duraylı İzotop Oranı Kütle Spektroskopisi Laboratuvarı'nda (DİL) Thermofinnigan DeltaPlus XP marka "İzotop Oranlayıcı Kütle Spektrometresi" cihazı ile belirlenmiştir. Analiz hataları trityum, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ve $\delta^{13}\text{C}$ için sırasıyla ± 1 sigma, $\% \pm 0,2$ (VSMOW), $\% \pm 1$ (VSMOW) ve $\% \pm 0,2$ (VPDB) aralıklarındadır.

Tablo 1. Suların örnekleme yöntemi (Sampling method of waters)

Parametre	Örnekleme yöntemi
T, EI, pH	HACH-LANGE HQ40D model multiparametre cihazı ile sahada ölçülmüştür.
Anyonlar	Su numuneleri 250 ml hacmindeki HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) şişelere filtre (0,45 μm) edilerek alınmıştır. Alkalinite (HCO_3^-) analizi H_2SO_4 titrasyonu ile gerçekleştirilmiştir.
Kasyonlar ve elementler	Su numuneleri 100 ml hacmindeki HDPE şişelere filtre edilerek (0,45 μm) alınmış ve HNO_3 ilavesiyle pH değeri 2'nin altına indirilmiştir.
$\delta^{18}\text{O}$ ve δD	Numuneler 100 ml hacmindeki HDPE şişelere filtre edilerek (0,45 μm) alınmıştır.
Trityum	Numuneler 500 ml hacmindeki HDPE şişelere filtre edilerek (0,45 μm) alınmıştır.
$\delta^{13}\text{C}$	Numuneler 100 ml hacmindeki kahverengi cam şişelere filtre edilerek (0,45 μm) alınmış ve HgCl_2 ilavesiyle mikroorganizmalar ortamdan uzaklaştırılmıştır.

7. Hidrokimya (Hydrochemistry)

7.1. Suların Fizikokimyasal Kompozisyonu (Physicochemical Composition of Waters)

Su örneklerinin fiziksel özellikleri ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur. Suların sıcaklık, Eİ ve pH değerleri sırasıyla kaynak suları için 10,4–16,4 °C (ort. 12,9), 297–663 µS/cm (ort. 471) ve 7,20–8,13 (ort. 7,73) arasında, sondaj suları için ise 14,8–20,0 °C (ort. 17,0), 503–890 µS/cm (ort. 603) ve 7,11–7,90 (ort. 7,43) arasında değişmektedir. Kaynak suları sondaj sularına göre genellikle daha düşük sıcaklık ve Eİ değerlerine sahip olup hafifçe daha baziktir.

Kasyon dizilimi (mek/l) tüm sularda $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$ iken anyon dizilimi Gökpınar ve Pınarbaşı kaynakları ile DS-3–6, 8–11, 13, 14 ve 16 nolu sondaj sularında $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^{-} > \text{Cl}^{-}$, diğer kaynak ve sondaj sularında ise $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-} > \text{NO}_3^{-}$ şeklindedir. Tüm sularda başlıca kasyon Ca^{+2} olup toplam kasyonların %51–73’ünü oluşturur. DS-7 dışında toplam anyonların %59–93’ünü oluşturan HCO_3^{-} egemen anyondur. Schoeller (1934) sınıflamasına göre örneklenen suların tümü olağan klorürlü ($\text{Cl}^{-} < 15$ mek/l), olağan sülfatlı ($\text{SO}_4^{-2} < 6$ mek/l), DS-1 ve DS-2 nolu sondaj suları hiperkarbonatlı ($\text{HCO}_3^{-} > 7$ mek/l) ve diğer sular olağan karbonatlı ($2 < \text{HCO}_3^{-} < 7$ mek/l) sular sınıfına girmektedir.

Yarı logaritmik diyagramdan (Şekil 3) kaynak sularının sondaj sularına göre nispeten daha düşük iyon derişimlerine sahip oldukları ve hemen hemen tüm suların baskın olarak karbonatlı kayalardan geldikleri anlaşılmaktadır. Örneklenen suların 4’ü dışında tümü Ca-Mg- HCO_3 , sülfat miktarları nispeten fazla olan Gökpınar Kaynağı ile DS-7, DS-12 ve DS-15 nolu sondaj suları Ca-Mg- HCO_3 - SO_4 tipindedir. DS-7 örneği dışında tüm sularda ($\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$) ve ($\text{HCO}_3^{-} + \text{CO}_3^{-} > (\text{Cl}^{-} + \text{SO}_4^{-2})$) olup bu sular karbonat sertliği %50’den fazla olan sulardır (Şekil 4).

7.2. Suların Kimyasal Kompozisyonunu Etkileyen Faktörler (Factors Affecting the Chemical Composition of Water)

Sudaki sodyumun ana kaynağının belirlenmesi için molar $\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-}$ oranı iyi bir göstergedir. Bu oranın bire yakın olması halit mineralinin çözünmesine, birden büyükse silikat bozunma reaksiyonlarına işaret eder (Meybeck, 1987). Şekil 5a’da verilen $\text{Na}^{+}-\text{Cl}^{-}$ grafiğinde suların Na^{+} ve Cl^{-} derişimleri arasında kuvvetli bir pozitif korelasyon görülmektedir. Örneklenen suların $\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-}$ oranı 0,76 (Canyarık Kaynağı) ile 2,34 (Cankurtaran-2 Kaynağı) arasında değişmektedir. Klorür miktarı diğer sulara göre oldukça fazla olan DS-1 sondaj suyu ($\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-} = 0,58$), yüksek nitrat derişimi de dikkate alındığında olasılıkla antropojenik kirlenme etkisi altındadır. $\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-}$ oranı > 1 olan suların baz değişim indeksi ($\text{BDI} = (\text{Cl}^{-} - \text{Na}^{+} - \text{K}^{+})/\text{Cl}^{-}$; Schoeller, 1944) değerleri negatiftir ($-0,06$ ile $-1,83$ arasında). Negatif BDI değerleri, minerallerdeki sodyum ve potasyumun sudaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları ile değişimini gösterir. Pozitif BDI değerlerine ($0,01$ ile $0,38$ arasında) sahip olan Canyarık Kaynağı ile DS-1, 2, 3 ve 13 sondaj suları için kil minerallerindeki kalsiyum ve magnezyumun sudaki Na^{+} ve K^{+} ’un ile iyon değişimi yaptığı söylenebilir. Yeraltı suyunu besleyen yağmur suyunda Na^{+} ve Cl^{-} miktarı sırasıyla 0,57 ve 0,92 mg/l’dir. Bunun yanında, örneklenen sulardaki Na^{+} ve Cl^{-} derişimi inceleme alanı kayalardaki silikatların (özellikle kil) ayrışması, Neojen birimlerinde varlığı belirlenen halit mineralinin (Alçıçek vd., 2007) çözünmesi ve iyon değişimi reaksiyonları ile denetlenmektedir.

İnceleme alanındaki mermer, kalk şist, kireçtaşı, dolomite ve dolomitik kireçtaşı gibi karbonatlı kayaların çözünmesi sulardaki Ca^{+2} , Mg^{+2} ve HCO_3^{-} iyonlarının başlıca kaynağıdır. Karbonatlı kayac türü için sudaki molar $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ oranı önemli bir göstergedir. Bu oran > 1 ise kalsit, ~ 1 ise dolomit çözünmesini gösterir (Mayo ve Loucks, 1995). Örneklenen sulardaki $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ oranı 1,31 ile 3,24 arasında olup (Şekil 5b) kalsitçe zengin bir kaynak kayayı gösterir. Benzer şekilde $\text{Ca}^{+2}-\text{HCO}_3^{-}$ grafiğinde (Şekil 5c) suların 05:1 çizgisi civarında yer alması Ca^{+2} ve HCO_3^{-} iyonlarının ana kaynağı olarak kireçtaşı ayrışmasına işaret eder. Suların molar $\text{Ca}^{+2}/\text{HCO}_3^{-}$ oranı 0,34 ile 0,57 arasındadır. Düşük değerler Menderes Masifi metamorfiklerindeki albit ve K-Feldispat gibi silikatların çözünmesiyle sulara ilave HCO_3^{-} girdisini gösterir.

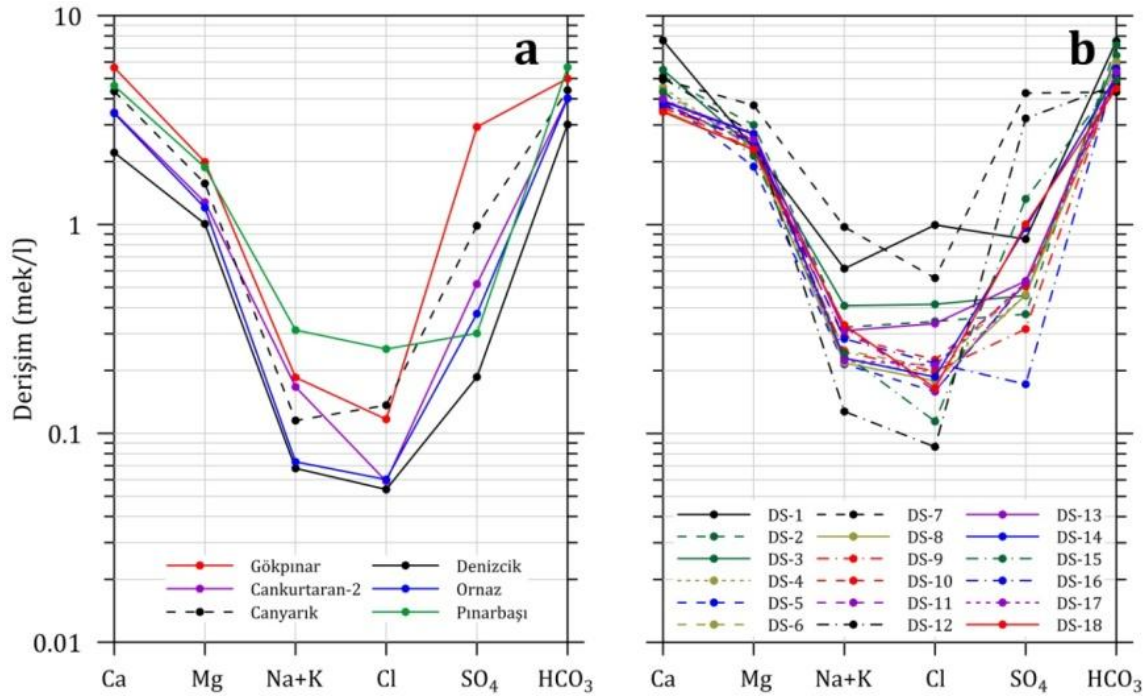
Suların $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{HCO}_3^{-}$ oranları (0,54–1,01) ve $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})-\text{HCO}_3^{-}$ grafiğinde (Şekil 5d) tüm suların 0,5:1 ile 1:1 çizgisi arasına konumlanması sulardaki Ca^{+2} , Mg^{+2} ve HCO_3^{-} iyonlarının başlıca kaynağının karbonat ayrışması (egemen olarak kireçtaşı, dolomit) olduğunu göstermektedir. Sulardaki sülfatın kaynağı Mesozoyik kireçtaşları ve Neojen birimlerindeki jips düzey, mercek ve nodüllerinin çözünmesidir. Suların $\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4^{-2}$ oranının 1,16 ile 32,82 arasında olması ve dolayısıyla $\text{Ca}^{+2}-\text{SO}_4^{-2}$ grafiğinde suların tamamının 1:1 çizgisinin sağında yer alması jips çözünmesiyle yeraltı sularına katılan Ca^{+2} miktarının oldukça düşük olduğuna işaret eder (Şekil 5e).

Tablo 2. Örneklenen suların fizikokimyasal analiz sonuçları (iyon derişimleri mg/l, element derişimleri µg/l)
(Physicochemical analysis results of sampled waters (ions mg/l, elements µg/l))

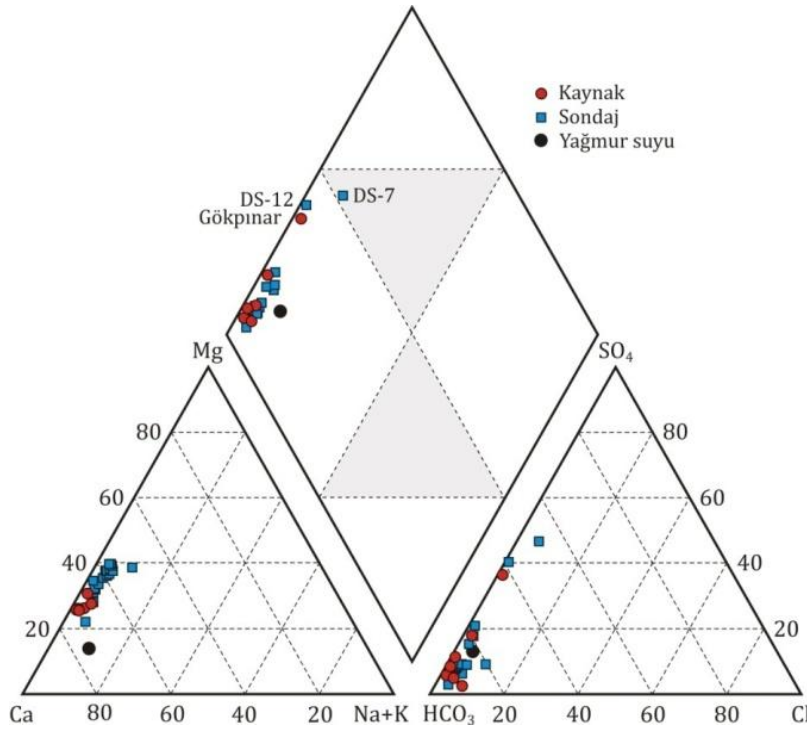
Kaynak Adı/ Sondaj No	Debi (l/s)	T (°C)	Eİ (µS/cm)	pH	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Li ⁺	Br ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻²	Su Tipi
Gökpinar	409	13,9	663	7,48	112,9	24,2	3,78	0,81	4,14	140,8	305,0	<0,02	9,64	0,26	0,05	0,19	<0,025	1,07	Ca-Mg-HCO ₃ -
Çankurtaran-2	5	13,6	412	7,73	68,9	15,6	3,17	1,13	2,09	24,9	245,8	<0,02	0,93	0,06	<0,02	0,14	<0,025	0,79	Ca-Mg-HCO ₃
Pınarbaşı	110	16,4	580	7,20	92,5	22,9	6,49	1,16	8,99	14,5	345,6	<0,02	17,94	0,07	0,04	0,17	0,030	1,34	Ca-Mg-HCO ₃
Çanyarık	40	11,9	442	8,08	87,1	19,1	2,37	0,47	4,83	47,3	268,2	<0,02	0,32	0,03	0,03	0,14	0,230	1,07	Ca-Mg-HCO ₃
Denizcik	5	10,4	297	8,13	44,3	12,3	1,31	0,43	1,91	8,9	183,7	<0,02	0,96	0,03	<0,02	0,07	0,040	0,54	Ca-Mg-HCO ₃
Ornaz	50	11,3	432	7,78	68,3	14,6	1,39	0,49	2,13	17,9	244,2	<0,02	1,18	0,02	0,03	0,13	0,040	1,17	Ca-Mg-HCO ₃
DS-1	4	17,5	890	7,11	152,7	28,3	13,38	1,31	35,31	40,9	461,5	<0,02	43,09	0,07	0,07	0,32	<0,025	1,59	Ca-Mg-HCO ₃
DS-2	5	16,6	696	7,11	102,9	36,5	6,72	1,19	12,20	17,9	441,8	<0,02	11,98	0,04	<0,02	0,26	0,030	1,33	Ca-Mg-HCO ₃
DS-3	8,5	18,0	692	7,12	110,5	28,0	8,83	0,97	14,72	22,0	394,6	<0,02	36,70	0,03	<0,02	0,26	0,030	1,33	Ca-Mg-HCO ₃
DS-4	3,1	14,9	580	7,19	90,9	27,6	4,51	1,04	6,94	22,1	367,1	<0,02	13,94	0,03	0,05	0,20	<0,025	1,06	Ca-Mg-HCO ₃
DS-5	18	15,5	527	7,44	80,4	23,1	4,29	1,09	5,63	25,5	310,7	<0,02	11,15	0,04	0,04	0,17	0,030	1,34	Ca-Mg-HCO ₃
DS-6	15,5	16,5	570	7,30	87,3	28,3	5,06	1,17	7,32	24,6	358,6	<0,02	13,91	0,03	0,05	0,19	<0,025	1,06	Ca-Mg-HCO ₃
DS-7	20	20,0	830	7,56	99,0	45,3	21,43	1,65	19,69	204,9	263,2	<0,02	4,90	0,36	0,07	0,25	0,030	1,33	Ca-Mg-HCO ₃ -
DS-8	10	14,8	503	7,37	70,8	27,6	4,29	1,22	6,33	22,2	304,0	<0,02	12,97	0,02	0,05	0,19	0,030	1,06	Ca-Mg-HCO ₃
DS-9	5	19,0	539	7,32	72,4	31,0	5,17	0,81	7,03	15,2	328,3	<0,02	19,62	0,03	<0,02	0,20	0,040	1,06	Ca-Mg-HCO ₃
DS-10	13,8	16,1	546	7,51	75,0	27,7	5,96	1,28	7,99	24,4	293,3	<0,02	21,72	0,04	0,04	0,17	0,030	1,34	Ca-Mg-HCO ₃
DS-11	14,5	16,5	546	7,45	77,1	29,3	6,72	1,27	5,65	25,7	324,1	<0,02	11,68	0,31	0,05	0,20	<0,025	1,07	Ca-Mg-HCO ₃
DS-12	9	16,6	659	7,63	100,9	33,2	2,39	0,92	3,06	154,9	285,4	<0,02	4,94	0,19	<0,02	0,24	0,030	1,33	Ca-Mg-HCO ₃ -
DS-13	5,8	18,5	568	7,43	78,8	33,2	6,52	1,06	11,92	25,8	314,9	<0,02	25,43	0,04	0,05	0,21	0,130	1,06	Ca-Mg-HCO ₃
DS-14	11,6	17,7	560	7,71	77,8	32,9	4,53	1,27	6,62	46,4	315,6	<0,02	12,55	0,06	0,05	0,19	<0,025	1,06	Ca-Mg-HCO ₃
DS-15	9,9	17,2	555	7,49	86,5	26,0	4,89	1,07	4,05	63,8	301,0	<0,02	5,74	0,13	0,05	0,19	<0,025	1,06	Ca-Mg-HCO ₃ -
DS-16	6,5	16,6	531	7,51	75,2	30,3	5,80	1,24	7,69	8,3	341,2	<0,02	12,27	0,08	0,05	0,20	0,04	1,13	Ca-Mg-HCO ₃
DS-17	15	16,6	560	7,50	80,0	31,1	4,55	1,03	7,52	25,4	328,8	<0,02	18,71	0,03	0,05	0,20	<0,025	1,06	Ca-Mg-HCO ₃
DS-18	30,5	16,5	509	7,90	69,4	27,8	6,99	1,02	5,85	48,2	274,2	<0,02	2,99	0,28	0,05	0,19	<0,025	1,07	Ca-Mg-HCO ₃
Yağmur suyu	-	17,2	61,5	8,56	9,2	1,0	0,57	1,63	0,92	3,2	25,4	0,20	1,62	0,07	<0,02	<0,06	1,240	0,91	Ca-HCO ₃
İTASHY, 2013	-	-	2500	6,5-9,5	-	-	-	200	250	250	-	0,5	50	1,5	-	-	0,5	-	-

Tablo 2. Devamı (continued)

Kaynak Adı/ Sondaj No	Al	As	B	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Se
Gökpınar	<8,04	1,76	<69	<0,95	5,30	<1,56	<1,22	<0,21	<4,62	<4,5	<0,378	0,538
Cankurtaran-2	<8,04	1,57	<69	<0,95	<0,59	<1,56	1,41	<0,21	<4,62	<4,5	<0,378	0,532
Pınarbaşı	<8,04	0,73	<69	<0,95	12,72	<1,56	115,34	1,31	<4,62	6,0	<0,378	0,352
Canyarık	<8,04	<0,37	<69	<0,95	<0,59	<1,56	4,47	0,56	<4,62	6,5	0,560	0,544
Denizcik	<8,04	<0,37	<69	<0,95	1,41	<1,56	3,86	0,53	<4,62	7,3	0,468	0,461
Ornaz	<8,04	<0,37	<69	<0,95	<0,59	<1,56	5,30	0,30	<4,62	8,1	<0,378	0,647
DS-1	<8,04	<0,37	<69	<0,95	1,07	<1,56	2,51	1,41	<4,62	14,0	1,061	0,488
DS-2	<8,04	<0,37	<69	<0,95	<0,59	<1,56	<1,22	0,87	<4,62	8,9	0,587	0,444
DS-3	<8,04	<0,37	<69	<0,95	0,99	<1,56	20,84	6,82	<4,62	9,0	0,614	0,295
DS-4	<8,04	<0,37	<69	<0,95	<0,59	<1,56	<1,22	0,85	<4,62	7,6	<0,378	0,306
DS-5	<8,04	<0,37	<69	<0,95	0,81	<1,56	35,17	1,40	<4,62	7,8	<0,378	0,305
DS-6	<8,04	0,46	<69	<0,95	<0,59	<1,56	<1,22	<0,21	<4,62	<4,5	<0,378	0,549
DS-7	<8,04	0,55	<69	<0,95	1,15	<1,56	204,36	9,15	<4,62	<4,5	<0,378	0,451
DS-8	<8,04	<0,37	<69	<0,95	<0,59	<1,56	15,50	0,89	<4,62	5,4	<0,378	0,248
DS-9	81,90	<0,37	<69	<0,95	1,13	<1,56	182,97	9,84	<4,62	7,0	0,753	0,400
DS-10	<8,04	<0,37	<69	<0,95	1,87	<1,56	17,93	1,16	<4,62	6,3	<0,378	0,336
DS-11	<8,04	1,47	<69	<0,95	7,76	<1,56	<1,22	0,94	<4,62	6,5	<0,378	0,318
DS-12	<8,04	0,59	<69	<0,95	1,17	<1,56	3,11	<0,21	<4,62	<4,5	<0,378	0,435
DS-13	<8,04	<0,37	<69	<0,95	1,57	<1,56	12,50	1,66	<4,62	4,5	<0,378	0,355
DS-14	<8,04	0,58	<69	<0,95	1,09	<1,56	26,01	<0,21	<4,62	<4,5	<0,378	0,660
DS-15	<8,04	0,52	<69	<0,95	<0,59	<1,56	51,21	2,37	<4,62	<4,5	0,553	0,450
DS-16	<8,04	1,56	<69	<0,95	16,50	<1,56	<1,22	<0,21	<4,62	<4,5	<0,378	0,717
DS-17	<8,04	0,79	<69	<0,95	2,65	<1,56	5,46	<0,21	<4,62	<4,5	0,621	0,524
DS-18	<8,04	2,22	<69	<0,95	3,70	<1,56	43,06	1,44	<4,62	<4,5	<0,378	0,518
Yağmur suyu	<8,04	<0,37	<69	<0,95	<0,59	<1,56	<1,22	<0,21	<4,62	<4,5	<0,378	<0,218
ITASHY 2013	200	10	100	0,5	50	200	200	5	20	10	5	10

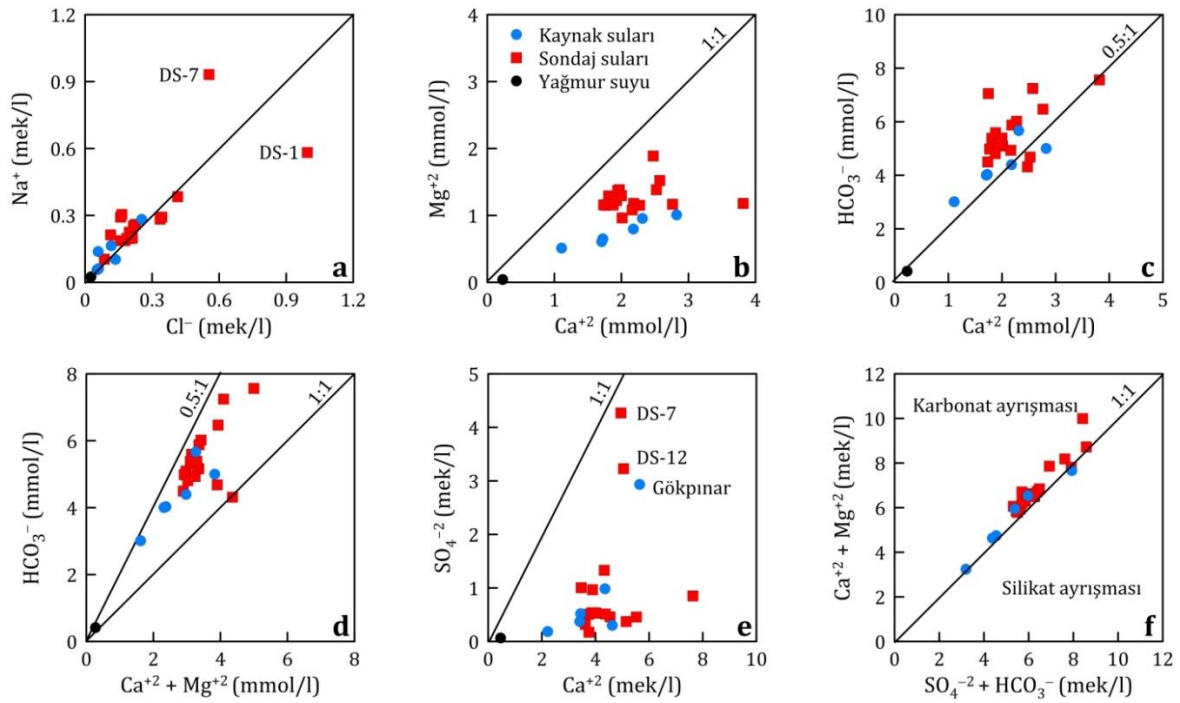


Şekil 3. (a) Kaynak ve (b) sondaj sularının yarı logaritmik diyagramı
(Semi-logarithmic diagram of (a) spring and (b) borehole waters)



Şekil 4. Su örneklerinin Piper diyagramındaki konumu (Piper plot of the water samples)

Sularda 1'e yakın $(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / (SO_4^{-2} + HCO_3^{-})$ oranı Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^{-} ve SO_4^{-2} iyonlarının kaynaklarının kireçtaşı (kalsit), dolomit ve jipsin basit çözünmesi olduğuna işaret eder (McLean vd., 2000). Örneklenen sularda bu oran 0,96 ile 1,19 arasında değişmektedir. $(Ca^{+2} + Mg^{+2}) - (SO_4^{-2} + HCO_3^{-})$ grafiğinden (Şekil 5f) inceleme alanındaki yeraltı sularının kimyasal kompozisyonunun başlıca karbonat çözünmesi ile şekillendiği, evaporit çözünmesi, silikat ayrışması ve katyon değişimi reaksiyonlarının da sulardaki iyon derişimleri üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5. İyonlar arasındaki ilişkileri gösteren grafikler (Graphs showing the relationships between ions)

7.3. Suların Kalsit ve Dolomit Doygunlukları (Calcite and dolomite saturation)

Yeraltı suyunun çıkarılması ve işletilmesi sırasında özellikle iletim borularında oluşabilecek kabuklaşma sorununun giderilmesi işletme maliyetini artırır. Bu nedenle sulara mineral çökelişi olup olmayacağı ve çökeltme eğiliminde olan mineral türlerinin önceden tahmin edilmesi önem taşır. İnceleme alanındaki akifer litolojisi egemen olarak karbonatlı kayalardan oluşmaktadır. Dolayısıyla çökeltme eğilimindeki başlıca mineral türlerinin kalsit ve dolomit olması beklenir. Bu bağlamda örneklenen sular için kalsit ve dolomit örneklem sıcaklığındaki doygunlukları ve kısmi CO₂ gazı basınçları PhreeQC (Versiyon 3) programı (Parkhurst ve Appelo, 1999) ile hesaplanmış ve değerler Tablo 3’de verilmiştir. Tüm suların örneklem koşullarındaki kısmi CO₂ gazı basınçları atmosferdeki değerinden (10^{-3.5} atm.) yüksektir ve bu da, CO₂ gazı kaçıışı nedeniyle suyun pH’ının artmasına yol açar ve mineral çökeltmesi beklenebilir. Tablo 3’de suların kalsit ve dolomitçe doygunluklarına ilişkin pozitif değerler suyun bu minerallerce doymuş ve çöktürmeye eğilimli olduğunu gösterir. Buna göre, örneklenen suların tamamı kalsitçe ve 4 örnek hariç dolomitçe doymuş ve bu mineralleri çöktürme eğilimindedir. Denizli il merkezi içme suyu iletim borularında gözlenen ve zamanla debi azalmasına neden olan kabuklaşma bu sonucu desteklemektedir (Şekil 6). Kabuklaşma sorunu şebeke borularının yenilenmesiyle giderilmektedir. Kabuk örneklerinin mineral kompozisyonu bilinmemekle beraber inceleme alanı sularına benzer şekilde Mesozoyik karstik kireçtaşlarından boşalan Pınarbaşı Kaynağı’ndan (Honaz) çökelten tufaların başlıca kalsitten oluşması (Özkul vd., 2013) Denizli il merkezi şebeke borularında oluşan egemen kabuk mineralinin de (asit döküldüğünde kuvvetli köpürme de dikkate alındığında) kalsit olma olasılığını kuvvetlendirmektedir.

Tablo 3. Suların kalsit (Sc) ve dolomit (Sd) doyma indisleri ve kısmi CO₂ gazı basınçları
(Calcite (Sc) and dolomite (Sd) saturation indices and partial CO₂ gas pressures of waters)

Örnek	Sc	Sd	P _{CO2}	Örnek	Sc	Sd	P _{CO2}	Örnek	Sc	Sd	P _{CO2}
Gökpinar	0,32	0,17	-2,09	DS-3	0,15	-0,03	-1,60	DS-11	0,24	0,29	-2,01
Cankurtaran-2	0,33	0,20	-2,43	DS-4	0,08	-0,16	-1,71	DS-12	0,43	0,61	-2,26
Pınarbaşı	0,10	-0,18	-1,74	DS-5	0,22	0,12	-2,03	DS-13	0,24	0,37	-2,00
Canyarık	0,76	1,02	-2,76	DS-6	0,18	0,11	-1,82	DS-14	0,50	0,87	-2,28
Denizcik	0,40	0,36	-2,96	DS-7	0,34	0,62	-2,21	DS-15	0,29	0,31	-2,08
Ornaz	0,35	0,17	-2,49	DS-8	0,08	-0,04	-1,97	DS-16	0,32	0,47	-2,05
DS-1	0,31	0,14	-1,53	DS-9	0,13	0,16	-1,86	DS-17	0,31	0,44	-2,06
DS-2	0,15	0,07	-1,56	DS-10	0,24	0,28	-2,12	DS-18	0,57	0,97	-2,54



Şekil 6. İçme suyu iletim borularında meydana gelen kabuklaşma (Scaling in drinking water transmission pipes)

7.4. Suların İzotop Kompozisyonu (Isotope Composition of Waters)

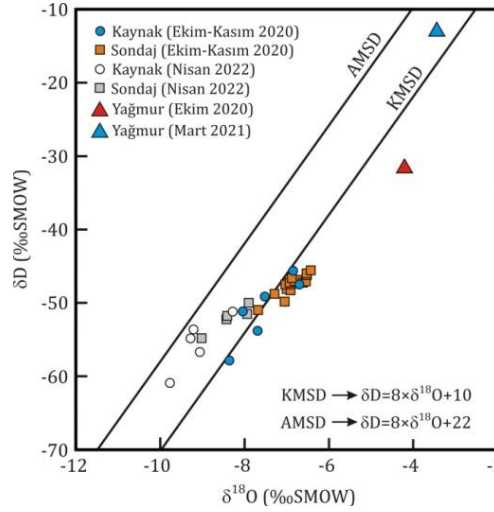
7.4.1. $\delta^{18}\text{O}$ ve δD ($\delta^{18}\text{O}$ and δD)

Yeraltısularının kökenini belirlemede suyun duraylı izotopları (^{18}O ve D) yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneklenen suların $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri kurak dönemde sırasıyla $-6,43$ ile $-8,36$ (ortalama $-7,04$) ve $-45,57$ ile $-57,85$ (ortalama $-48,38$), yağışlı dönemde $-7,90$ ile $-9,77$ (ortalama $-8,73$) ve $-49,99$ ile $-60,90$ ‰VSMOW (ortalama $-53,74$) arasındadır (Tablo 4). Yağışlı dönem örnekleri kurak döneme göre, her iki dönem için de kaynak suları sondaj sularına göre daha negatif değerlere sahiptir.

Tablo 4. Suların izotop içerikleri (Isotopic composition of waters)

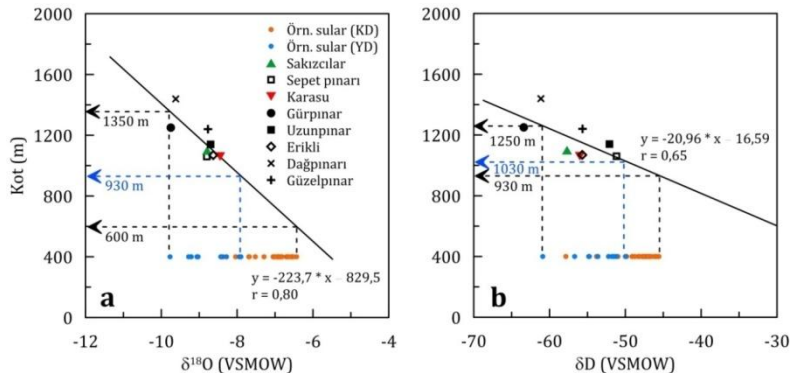
Kaynak adı ve kuyu no	Örnekleme Tarihi	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VSMOW)	Hata ($\pm$)	δD (‰VSMOW)	Hata ($\pm$)	d-fazlası (‰)	Trityum (TU)	Hata ($\pm$)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰VPDB)
Gökpınar	20.10.20	-7,69	0,12	-53,80	0,32	7,72	2,97	0,38	-6,79
	29.04.22	-9,06	0,06	-56,69	0,56	15,79			
Cankurtaran-2	20.10.20	-8,36	0,12	-57,85	0,33	9,03	4,78	0,41	-10,87
	29.04.22	-9,77	0,07	-60,90	0,56	17,26			
Pınarbaşı	03.11.20	-6,70	0,05	-47,49	0,27	6,11	2,23	0,40	-9,14
	29.04.22	-8,28	0,05	-51,18	0,56	15,06			
Canyarık	18.11.20	-6,85	0,04	-45,62	0,27	9,18	3,31	0,41	
Denizcik	18.11.20	-8,04	0,05	-51,16	0,27	13,16	4,95	0,43	
	29.04.22	-9,21	0,05	-53,62	0,56	20,06			
Ornaz	18.11.20	-7,52	0,04	-49,13	0,28	11,03	3,92	0,40	
	29.04.22	-9,28	0,04	-54,83	0,56	19,41			
DS-1	26.10.20	-6,55	0,05	-47,05	0,30	5,35	3,45	0,40	-12,43
	29.04.22	-7,94	0,05	-51,50	0,46	12,02			
DS-2	26.10.20	-6,67	0,05	-46,86	0,30	6,50	2,66	0,37	
DS-3	26.10.20	-6,43	0,05	-45,57	0,30	5,87	3,31	0,39	-10,16
DS-4	26.10.20	-6,93	0,05	-47,21	0,30	8,23	3,45	0,39	
	29.04.22	-8,41	0,05	-51,77	0,46	15,51			
DS-5	03.11.20	-6,90	0,04	-47,46	0,28	7,74	3,09	0,41	
DS-6	20.10.20	-7,02	0,07	-47,72	0,31	8,44	3,22	0,38	
DS-7	20.10.20	-6,91	0,12	-48,28	0,31	7,00	1,58	0,33	-6,93
	29.04.22	-8,43	0,05	-52,22	0,46	15,22			
DS-8	26.10.20	-7,03	0,05	-47,48	0,31	8,76	3,56	0,39	-8,61
DS-9	26.10.20	-6,53	0,05	-45,97	0,30	6,27	2,90	0,38	
DS-10	03.11.20	-6,52	0,04	-46,21	0,27	5,95	3,80	0,41	
	29.04.22	-7,90	0,05	-49,99	0,45	13,21			
DS-11	26.10.20	-7,05	0,10	-49,83	0,28	6,57	2,75	0,38	-9,24
DS-12	20.10.20	-7,29	0,12	-48,76	0,32	9,56	3,19	0,37	-7,92
DS-13	26.10.20	-6,62	0,05	-47,23	0,27	5,73	2,79	0,38	
DS-14	20.10.20	-6,95	0,06	-47,66	0,30	7,94	2,73	0,36	
DS-15	20.10.20	-6,88	0,05	-46,61	0,32	8,43	2,86	0,38	-11,08
DS-16	20.10.20	-7,00	0,12	-48,10	0,31	7,90	2,52	0,36	
DS-17	20.10.20	-6,81	0,05	-47,03	0,31	7,45	4,12	0,39	
DS-18	20.10.20	-7,68	0,12	-50,97	0,31	10,47	2,13	0,35	-8,62
	29.04.22	-9,03	0,05	-54,74	0,45	17,50			
Yağmur suyu	20.10.20	-4,21	0,12	-31,46	0,33	2,22	9,00	0,48	
	07.03.21	-3,44	0,05	-12,77	0,31	14,75	6,05	0,45	

Örneklenen suların $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerleri arasındaki ilişki Şekil 7’de sunulmuştur. Suların tümü Küresel Meteorik Su Doğrusu (KMSD; Craig, 1961) ile Akdeniz Meteorik Su Doğrusu (AMSD; Gat ve Carmi, 1970) arasında ve civarında olup meteorik kökenlidir. Yağışlı dönem yağmur, kaynak ve sondaj suları KMSD ve AMSD arasında kalırken, kurak dönem örnekleri yağmur suyu dahil olmak üzere KMSD’nin sağında yer almaktadır. Bu değişim olasılıkla buharlaşmaya bağlı zenginleşmeden kaynaklanmaktadır. Yağışlı dönem yağışının daha negatif olması, ayrıca bahar aylarında da devam edebilen kar erimesinden (Honaz Dağı ve Babadağ) beslenim bu dönem sularının izotop içeriklerinin daha negatif olmasını sağlamıştır. Kurak dönemdeki beslenim ise buharlaşma etkisiyle daha pozitif izotop değerlerine neden olmaktadır. Bu durum suların D-fazlası değerlerinde de görülmektedir. Yağışlı dönem su örneklerinin d-fazlası değerleri ‰12,02 ile ‰20,06 arasında değişirken (yağmur suyunda 14,75) kurak dönem değerleri ‰5,35 ile ‰13,16 (yağmur suyunda 2,22) arasında yayılım göstermiştir. Buradan beslenmenin yağışlı dönemde Akdeniz kökenli nemden kaynaklanan yağıştan, kurak dönemde ise genellikle buharlaşma etkisi altındaki karasal yağıştan gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 7. Suların $\delta^{18}\text{O}$ - δD grafiği ($\delta^{18}\text{O}$ - δD graph of the waters)

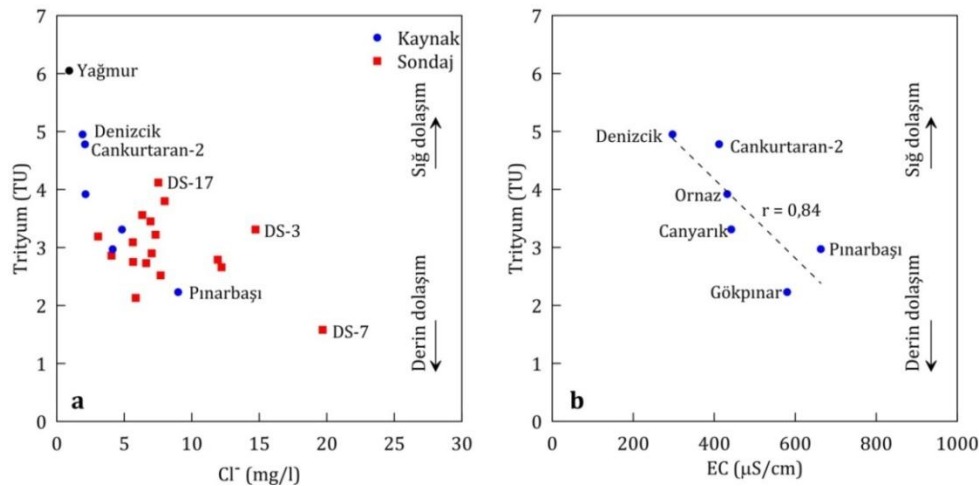
Kaynak ve sondaj sularının beslenme alanı yüksekliklerine bir yaklaşım sağlamak üzere önceki çalışmalardan yüksek kotlardaki kaynak sularının izotop verileri kullanılarak izotop-kot grafikleri çizilmiştir (Şekil 8a, b). Bu grafiklerdeki regresyon doğrularından her 100 metre yükseklik artışı için $\delta^{18}\text{O}$ değerinde ‰-0,46 ve δD değerinde de ‰-5,0 azalma belirlenmiştir. İnceleme alanı suları için $\delta^{18}\text{O}$ -kot grafiği 600-1350metre, δD -kot grafiği de 930-1250metre arasında beslenme alanı yükseklikleri vermiştir. Kurak dönemdeki buharlaşma etkisini bir dereceye kadar elimine etmek için sadece yağışlı dönem izotop değerleri göz önüne alındığında minimum beslenme alanı yükseklikleri artarak $\delta^{18}\text{O}$ -kot grafiğinde 930 m (Şekil 8a) ve δD -kot grafiğinde 1030 m (Şekil 8b) olmuştur. Denizli il merkezinin güney kesiminde yapılaşma alanlarının kotu 600 metrenin üzerindedir. Önemli ölçüdeki betonlaşma nedeniyle 600-650 metrelerde yağıştan süzülme miktarı çok azdır. İnceleme alanında beslenme güneydendir ve kaynakların tümü güney kesimde olup çoğu 800-1060 metre kotlardadır. Bu nedenle bu kesimde kotu 2000 metreyi bulan dağlar da göz önüne alındığında gerçekçi beslenme alanı yüksekliğinin 900-1350 metre aralığında olduğu söylenebilir.



Şekil 8. Suların (a) $\delta^{18}\text{O}$ -kot, (b) δD -kot grafikleri (a: $\delta^{18}\text{O}$ -elevation, b: δD -elevation plots). Regresyon doğrusunun oluşturulduğu kaynaklara ait izotop değerleri Sepet ve Karasu için Günay (1996), Sakızcılar için Önhon vd. (1988), Gürpınar ve Uzunpınar için Yıldırım ve Güner (2002), Erikli için Gökgoz ve Semerci Aygün (2023), Dağpınarı ve Güzelpınar için İnan (2024)’den alınmıştır. Örneklenen (Örn.) suların kotları grafikte verilmemiş, sadece izotop dağılımları gösterilmiştir. (KD, kurak dönem; YD, yağışlı dönem).

7.4.2. Trityum (Tritium)

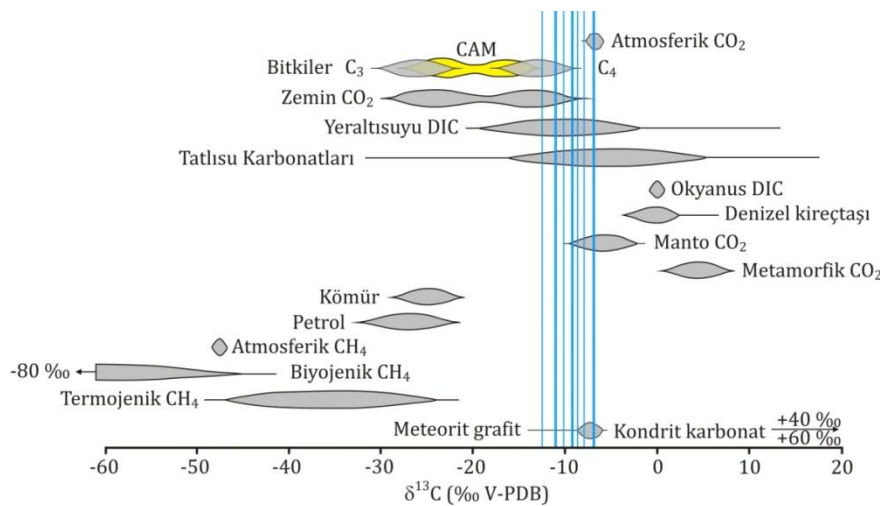
Suyun radyoaktif izotopu olan trityumun (^3H) yarılanma ömrü 12,32 yıldır (Lucas ve Unterweger, 2000). Trityum, suların yeraltındaki sirkülasyon zamanlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir izleyicidir. Trityum değerleri örneklenen kaynak sularında 2,23–4,95 TU, sondaj sularında ise 1,58–4,12 TU arasındadır (Tablo 4). Yağmur suyu örneğindeki (Mart-2021) trityum değeri 6,05 TU olarak ölçülmüştür. İnceleme alanına düşen yağışın yıllık birikimli trityum değerleri bilinmediği için akiferlere giren ortalama trityum miktarı hakkında gerçekçi bir değerlendirme yapılamaz. Ancak 6,05 TU değeri dikkate alındığında Denizcik ve Cankurtaran-2 kaynak sularının güncel yağış katkısı en fazla olan, en sık ve en hızlı dolaşıma sahip güncel sular oldukları söylenebilir (5–10 yıl; Clark ve Fritz, 1997). Diğer suların trityum değerleri genç ve yaşlı suların karışımını yansıtmaktadır (0,8 ile ~4 TU arası; Clark ve Fritz, 1997). Suların trityum–klorür derişimi ilişkisi değerlendirildiğinde yağmur suyundan DS-7’ye doğru sirkülasyon derinliğinin artması nedeniyle suların trityum miktarlarının azaldığı, klorür değerlerinin ise arttığı görülmektedir (Şekil 9a). Benzer şekilde kaynak sularının trityum ve Eİ değerleri arasında kuvvetli bir negatif korelasyon vardır (Şekil 9b). Sık ve hızlı dolaşım yapan ve bu nedenle su–kaya etkileşimi düşük olan kaynak suları yüksek trityum ve düşük EC değerlerine sahipken (Denizcik gibi) özellikle Gökpınar ve Pınarbaşı kaynakları için bunun tersi söylenebilir.



Şekil 9. Suların (a) trityum-Cl⁻, (b) trityum-Eİ grafiği ((a) tritium-Cl and (b) tritium-EC plot of the waters)

7.4.3. $\delta^{13}\text{C}$ (DIC)

İnceleme alanı sularının $\delta^{13}\text{C}$ (DIC) değerleri ‰-12,43 ile ‰-6,79 (‰ VPDB) arasında değişmektedir (Tablo 4). Buna göre örneklenen sulara karbonun başlıca kaynağı akifer kayaçlardaki kalsit ve/veya diğer karbonat minerallerinin çözünmesidir. Ancak olasılıkla bir miktar atmosferik CO₂ ve havalandırma zonundaki organik faaliyetlerden kaynaklanan CO₂’nin de katkısı vardır (Şekil 10).



Şekil 10. Çeşitli jeolojik ortamların $\delta^{13}\text{C}$ değerleri (Clark ve Fritz, 1997’den modifiye edilmiştir). Mavi çizgiler örneklenen suları gösterir ($\delta^{13}\text{C}$ values of various geological environments (modified from Clark and Fritz, 1997). Blue lines indicate sampled waters)

8. Kullanım Özellikleri (Usage Properties)

8.1. İçilebilirlik Özellikleri (Drinkability Properties)

İnceleme alanındaki suların içilebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesinde İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2013) parametreleri ve Schoeller içilebilirlik diyagramından faydalanılmıştır. Tablo 2 incelendiğinde, örneklerin büyük çoğunluğunun analizi yapılan parametreler bakımından standart limitlere uyduğu belirlenmiştir. Buna karşın DS-1 örneği kurşun içeriği bakımından, DS-3 örneği mangan içeriği bakımından ve DS-7 örneği demir ve mangan içerikleri bakımından izin verilen limit değerleri aşmaktadır. Sondaj kuyusu bazında sınır değerleri aşan bazı metalik parametrelerin varlığının sondaj teçhizatındaki yıpranmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Suların kalite durumlarının değerlendirilmesinde ayrıca WQI (su kalite indeksi) değerleri dikkate alınmıştır. Su kalitesi indeksi (WQI) kirleticilerin değerlendirmek için kullanılan önemli bir araçtır. WQI hesaplamasında farklı su kalitesi parametreleri bütünsel olarak değerlendirilmekte ve elde edilen sonuçlar yeraltı suyunun insan tüketimine uygunluğunu göstermektedir (Sahu ve Sikdar, 2008; SubbaRao, 1997; Mishra ve Patel, 2001; Magesh vd., 2013).

WQI hesaplamasının ilk aşamasında, elementlerin sağlık üzerindeki etkileri dikkate alınarak her kimyasal parametreye 1 ila 5 arasında bir nispi (W_i) ağırlık atanır. Çalışma kapsamında NO_2^- , NO_3^- , B, Mn, F, Cr ve Pb için en yüksek ağırlık faktörü 5 belirlenmiştir. Al, As, Fe, SO_4^{2-} , TDS ve pH için 4, Na^+ ve Cl^- için ise 3 değeri faktör olarak belirlenmiştir (Vasanthavignar vd., 2010; Yidana ve Yidana, 2010; Krishna Kumar vd., 2014; Şener vd., 2017). Nispi ağırlık aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$W_i = w_i / \sum_1^n (w_i) \quad (1)$$

İkinci aşamada kalite oranı (q_i) hesaplanmaktadır. Bu formülde C_i : analiz sonucu (mg/l), S_i element için belirlenen içme suyu standardı (mg/l, WHO, 2011) ve S_i alt indekstir.

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

$$Sl_i = W_i \times q_i \quad (3)$$

$$WQI = \sum_1^n Sl_i \quad (4)$$

Analizi yapılan su örneklerinin WQI değerleri 13,7–43,83 arasında değişmekte olup tüm örnekler “çok iyi” sular olarak sınıflandırılmaktadır (Tablo 5).

Tablo 5. Hesaplanan WQI değerleri ve su sınıfları (WQI values and water classes)

Örnek Kodu	WQI	Su Sınıfı	Örnek Kodu	WQI	Su Sınıfı
Gökpinar	16.56	çok iyi	DS-7	26.48	çok iyi
Cankurtaran-2	13.71	çok iyi	DS-8	14.75	çok iyi
Pınarbaşı	20.29	çok iyi	DS-9	43.83	çok iyi
Canyank	16.79	çok iyi	DS-10	17.90	çok iyi
Denizcik	15.71	çok iyi	DS-11	19.03	çok iyi
Ornaz	15.58	çok iyi	DS-12	18.68	çok iyi
DS-1	28.25	çok iyi	DS-13	17.01	çok iyi
DS-2	17.21	çok iyi	DS-14	16.99	çok iyi
DS-3	22.10	çok iyi	DS-15	16.86	çok iyi
DS-4	16.14	çok iyi	DS-16	16.20	çok iyi
DS-5	17.33	çok iyi	DS-17	17.58	çok iyi
DS-6	14.24	çok iyi	DS-18	16.24	çok iyi

8.2. Sulama Suyu Özellikleri (Irrigation Water Properties)

İnceleme alanında sulamada da kullanılan yeraltı sularının sulama suyu kalitesinin belirlenebilmesi için suların pH ve EC (elektriksel iletkenlik) değerleri incelenmiş ve ayrıca kimyasal analiz sonuçlarından hareketle TH (toplam sertlik) %Na, SAR (sodyum adsorbsiyon oranı), RSC (kalıntı sodyum karbonat), MR (magnezyum tehlikesi), PI (geçirgenlik indeksi) ve KR (Kelley oranı) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan formüller ve değerlendirme aralıkları Tablo 6’da verilmiştir.

pH: Suların pH değeri, bitkilerin Ca, Mg ve Al gibi elementleri absorbe edebilme kabiliyetini etkilemektedir. Bu nedenle pH değerinin bitki büyümesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. İncelenen su örneklerinin pH değerleri 7,11–8,13 arasında değişmekte olup, incelenen yeraltı suyu örnekleri pH değerleri bakımından sulamaya uygundur.

Eİ: Suyun yüksek iyon derişimi suyun dal ve yapraklara erişimini engeller ve tarım toprağı ve bitkilere olumsuz etki eder (Şahinci, 1991). İncelenen yeraltı sularının Eİ değerleri 297–890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir. Bu değerlere göre örneklerin büyük bir bölümü “iyi” su sınıfında yer alırken, 2 örnek elektriksel iletkenlik değerine göre “izin verilebilir” olarak sınıflandırılmıştır.

TH: Suların sertliğı doğrudan toprağın sertliğini etkileyen bir parametredir. Sertliğı fazla olan sular (Ca ve Mg bakımından zengin) genellikle yumuşak toprak oluşturduğundan sulama suyu olarak tercih edilirler (Richards, 1954). İnceleme alanındaki sulardan 16 tanesi “çok sert”, 8 tanesi ise “sert” su olarak sınıflandırılmış olup sulamada kullanıma uygun özelliktedirler.

%Na: Hesaplanan düşük %Na değerleri sert suya işaret etmektedir. Sertlik parametresinde olduğu gibi, sert sular yumuşak toprak oluşturduğundan, sulamada kullanılacak suların düşük sodyum yüzdesine sahip olması istenmektedir. İncelenen örneklerin %Na değerleri 1,29–9,67 arasında olup, örneklerin tamamı “mükemmel” olarak sınıflandırılmıştır.

SAR: Suların yüksek sodyum içeriğı toprağın yapısını bozarak geçirgenliğı azaltır ve bitkilerin hava almasını engeller (Richards, 1954). İncelenen su örnekleri için hesaplanan SAR değerleri 0,04–0,45 arasındadır. Bu değerler dikkate alındığında, tüm örnekler “mükemmel” özellikte sulama suyu özelliğı sunmaktadır.

RSC: Suların yüksek kalıntı sodyum karbonat değeri toprakta çoraklaşmaya yol açarak toprağın geçirgenliğini azaltır ve havalanmasını zorlaştırır (Raghunath, 1987; Aghazadeh ve Mogoddam, 2011; Çuhadar ve Tamgaç, 1994). İncelenen suların tamamı 1,25 mek/l'den daha düşük RSC değerine sahiptir. Bu sular kalıntı sodyum karbonat değerleri bakımından “mükemmel” olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 6. Sulama suyu kalite parametreleri ve su sınıfları (Irrigation water quality parameters and water classes)

Parametre	Aralıklar	Su sınıfı	Adet	%
pH^a	6,5–8,4	Uygun	24	100
TH^b (mg/l) 2,497 x Ca + 4,115 x Mg	< 75 75–150 150–300 > 300	Yumuşak Orta sert Sert Çok sert	– – 8 16	– – 33 67
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	< 250 250–750 750–2250 2250–5000 > 5000	Mükemmel İyi İzin verilebilir Şüpheli Uygun değil	– 22 2 – –	– 92 8 – –
%Na^c (mek/l) (Na+K) x 100 / (Ca+Mg+Na+K)	< 20 20–40 40–60 60–80 > 80	Mükemmel İyi İzin verilebilir Şüpheli Uygun değil	24 – – – –	100 – – – –
SAR^d (mek/l) Na / (Ca + Mg) / 2 ^{1/2}	< 10 10–18 18–26 > 26	Mükemmel İyi Şüpheli Uygun değil	24 – – –	100 – – –
RSC^d (mek/l) (CO ₃ + HCO ₃) – (Ca + Mg)	< 1,25 1,25–1,75 > 1,75	Güvenli Normal Uygun değil	24 – –	100 – –
MR^e (mek/l) Mg x 100 / (Ca + Mg)	< 50 > 50	Uygun Uygun değil	24 –	100 –
KR^f (mek/l) Na / (Ca + Mg)	< 1 > 1	İzin verilebilir İzin verilmez	24 –	100 –
PI^g (mek/l) [(Na+(HCO ₃) ^{1/2}) / (Ca + Mg + Na)] x 100	> 75 25–75 < 25	Mükemmel İyi Uygun değil	– 24 –	– 100 –

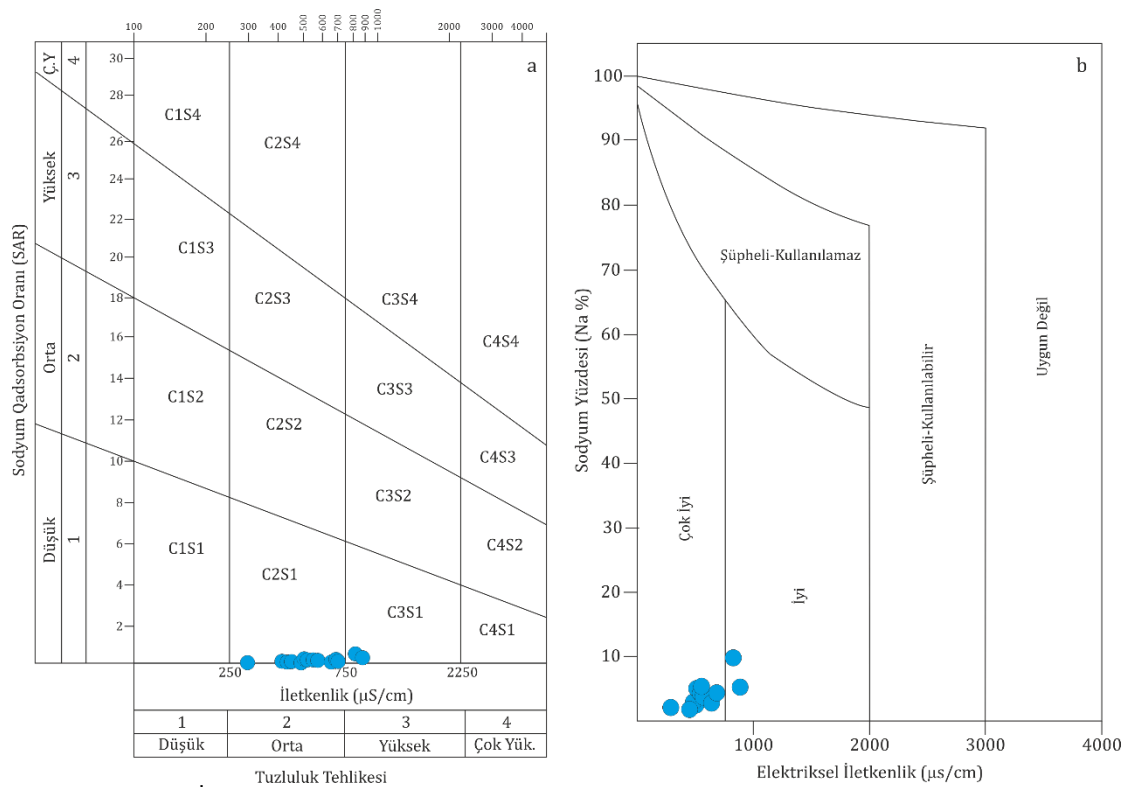
^a Ayers ve Westcod (1985); ^b Todd (1980); ^c Wilcox (1955); ^d Richards (1954); ^e Paliwal (1972); ^f Kelley (1963); ^g Doneen (1964); ^h Sahu ve Sikdar (2008); ⁱ Yidana ve Yidana (2010).

MR: Suların magnezyum içeriğı toprağı tuzlandırmakta, bitki büyümesini ve verimini olumsuz etkilemektedir (Joshi vd., 2009; Venugopal vd., 2009). Çalışma alanındaki sular magnezyum tehlikesi bakımından değerlendirildiğinde örneklerin tamamının “uygun” özellikte sular sınıfında yer aldığı görülmektedir.

KI: Kelly oranının 1’den büyük değeri, sudaki aşırı sodyumu gösterir. Yüksek sodyumun toprağa zararından dolayı Kelley oranı 1’den az olan sular sulama için uygun kabul edilir. Bu değerden hareketle incelenen tüm sular “izin verilebilir” su sınıfına girmektedir.

PI: Bitkinin yetiştiği topraktaki gözenekler ne kadar büyükse, toprak kütlesi o kadar gevşek ve toprak geçirgenliği o kadar güçlüdür (Wang et al., 2021). İncelenen örneklerin PI değerleri, örneklerin bu indeks bakımından “iyi” sular sınıfında yer aldığını göstermektedir.

Suların SAR ve elektriksel iletkenlik değerleri kullanılarak hazırlanan ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramında ise örneklerin C2-S1 (orta tuzlu ve az sodyumlu sular) ve C3-S1 (tuzlu ve az sodyumlu sular) sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Bu sular genel olarak sodyum tehlikesi yaratmadan tüm topraklarda kullanılabilir özelliğindedir (Şekil 11a). %Na ve elektriksel iletkenlik değerleri kullanılarak hazırlanan Wilcox (1955) diyagramında örneklerin büyük bölümünün “çok iyi” DS-1 ve DS-7 kuyu sularının ise “iyi” sular sınıfında yer aldığı görülmektedir (Şekil 11b).



Şekil 11. İncelenen su örneklerinin ABD Tuzluluk (a) ve Wilcox diyagramında (b) gösterimi
(ABD salinity and Wilcox diagram of the waters)

9. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Bu çalışmada Denizli İl Merkezi’ne içme suyu sağlayan kaynak ve sondaj sularından 24 adedinin kimyasal ve izotop bileşimi belirlenmiş, içme ve sulama suyu kalitesi değerlendirilmiştir. İnceleme alanındaki başlıca akiferler temel kayalarından mermer, kalk şist, kireçtaşı, dolomitik kireçtaşları ile Neojen Sazak formasyonunun kireçtaşlarından oluşan çatlaklı kaya akiferleridir. Kuvaterner alüvyon yelpazesi ve alüvyon gözenekli akiferleri oluşturur. Bu gözenekli akiferler ve Sazak formasyonu kireçtaşları inceleme alanında yağıştan çok temel kayalardan olan yanal akımla beslenirler

Suların sıcaklık, Eİ ve pH değerleri sırasıyla 10,4–20,0 °C, 297–890 $\mu\text{S/cm}$ ve 7,11–8,13 arasındadır. Sular genellikle Ca-Mg- HCO_3 tipindedir ve kimyasal kompozisyonları başlıca karbonat çözünmesi ile şekillenmiştir. Evaporit (jips) çözünmesi, silikat ayrışması ve katyon değişimi reaksiyonları diğer faktörlerdir. İzotop değerleri ($\delta^{18}\text{O}$, δD , trityum ve $\delta^{13}\text{C}$) suların meteorik kökenli ve beslenme alanı yüksekliğinin 900–1350 m arasında olduğunu, genellikle sığ dolaşım yaptıklarını ve sularındaki karbonun başlıca akifer kayalardaki kalsit ve/veya diğer karbonat minerallerinin çözünmesinden kaynaklandığını göstermiştir.

DS-1, DS-3 ve DS-7 nolu sondaj suları dışında örneklenen suların tümü İTASHY (2013) ve WHO (2011) standartlarına göre içmeye uygun sulardır. Bu üç sondaj suyundaki sınır değerlere yakın veya bir miktar

üzerindeki Fe, Mn ve Pb derişimlerinin akifer formasyonundan ziyade sondaj teçhizatındaki yıpranmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. WQI değerleri (13,7–43,8) suların “çok iyi” içme suyu kalitesine sahip olduklarını göstermiştir. Çeşitli sulama suyu kalite parametrelerine (EC, TH, %Na, SAR, RSC, MR, KR, PI parametreleri ile Wilcox ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramları) göre yapılan değerlendirmeler sonucunda tüm suların sulamaya uygun olduğu ortaya konmuştur.

Denizli İl Merkezi içme ve kullanma suyu ihtiyacının sürdürülebilir olarak karşılanması için bazı öneriler getirilmiştir. Bunlar: (a) Yağışlı dönemde su ihtiyacı kaynak sularından karşılanmalıdır; kaynak suları yetersiz kaldığında debisi 1000 l/s olarak ölçülen Karahasan Deresi (Şekil 1b) suyunun bir kısmı arıtılarak sisteme verilmelidir, (b) yağışlı dönemde yeterli rezerve ulaşması halinde Akbaş Barajı (Şekil 1a) suyu arıtılarak sistemi takviye edebilir, (c) yaz döneminde park, bahçe ve refüj sulamasında kullanılan su miktarını azaltmak için susuz peyzaj uygulamasına geçilmelidir, (d) tarımsal sulamada vahşi sulamadan damla sulamaya geçiş teşvik edilerek yaz döneminde DSİ'nin sulama suyu olarak tahsis ettiği içilebilir kaynak ve sondaj sularının bir kısmı içme suyu şebekesine verilebilir, (e) şebekedeki kaçaklar minimuma indirilmelidir, (f) çalışma alanı ve civarındaki kaçak sondajlar belirlenerek kapatılmalıdır. Ayrıca kaynak debileri ve yeraltı su seviyesi sürekli izlenmeli ve su kimyasındaki olası değişimleri belirlemek için seçilecek su noktalarında en azından mevsimsel içme suyu analizleri yapılmalıdır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2020FEBE039 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Suların örneklenmesi ve kimyasal analizlerinin yapılmasında destek veren Denizli Büyükşehir Belediyesi, Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'ne, alkalinite analizlerinde yardımlarını esirgemeyen PAÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Dr. Öğr. Üyesi Taylan AKIN'a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (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(1–4), 183–195.
- Alçiçek, H., 2007. Denizli havzası (Sarayköy-Buldan bölgesi, GB Türkiye) Neojen çökellerinin sedimantolojik incelemesi. *Yayınlanmamış Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye*.
- Ayers, R. S., Westcot, D.W., 1985. Water Quality for Agriculture. Food and Agriculture. Organization of the United Nations FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1.
- Baba, A., Ayyıldız, O., 2006. Urban groundwater pollution in Türkiye, *Urban Groundwater Management and Sustainability*. Springer 93-110.
- Baba, A., Tayfur, G., 2011. Groundwater contamination and its effect on health in Türkiye. *Environmental Monitoring and Assessment*, 183 (1-4), 77-94.
- Başaran, C., Manap, H., 2023. Afyon Ovası Kuzeybatı Bölümü Yeraltısularının Hidrojeokimyası, İçme ve Sulama Suyu Özelliklerinin Belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9 (2), 258-267.
- Bernoulli, D., Graciansky, P.C., Monod, O., 1974. The extension of the Lycian Nappes (SW Türkiye) into the Southeastern Aegean Islands. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 67, 39–90.
- Bilgin, A., 2015. An assessment of water quality in the Çoruh Basin (Türkiye) using multivariate statistical techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1–16.
- Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Türkiye – A synthesis. *Geodinamica Acta*, 14, 3–30.
- Çakmakçoğlu, A., 2017. Afrodiasias Çevresinin (Karıncalıdağ-Babadağ ve Tavas arası) Jeolojisi ve Antik Mermer Ocaklarının Tektono-Stratigrafik Yeri. IV. Uluslararası Taş Kongresi, 20-25 Mart 2017, İzmir-Türkiye, Bildiriler Kitabı, 775-795.
- Clark, I.D., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York: Lewis Publishers.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Çuhadar, G. Tamgaç, S., 1994. Hidrojeolojik Etütlerde Su Kimyası Verilerini Toplama ve Değerlendirme Yöntemleri. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, DSİ Yayınları, Ankara, 1-22.
- Davraz, A., Varol, S., 2012. Microbiological risk assessment and sanitary inspection survey of Tefenni (Burdur/Türkiye). *Environmental Earth Sciences*, 66, 1213–1223.
- Dewey, J.F., Şengör, A.M.C., 1979. Aegean and surrounding regions: Complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*. 90, 84–92.
- Dişli, E., Gülyüz, N., 2020. Hydrogeochemical investigation of an epithermal mineralization bearing basin using multivariate statistical techniques and isotopic evidence of groundwater: Kestanelik Sub-Basin, Lapseki, Türkiye. *Geochemistry*, 80 (4), 125661.
- Doneen, L.D., 1964. Notes on Water Quality in Agriculture. Department of Water Science and Engineering, University of California: Oakland, CA, USA.

- Ece Karakuş, F., Güler, C., Kurt, M.A., Yıldırım, Ü., Güven, O., 2023. Erdemli (Mersin) Kıyı Akiferi Su Kalitesinin Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 47, 119-134.
- Ekemen Keskin, T., Özler, E., 2020. Heavy metal contamination in groundwater and surface water due to active Pb-Zn-Cu mine tails and water-rock interactions: A case study from the Küre mine area (Türkiye). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29, 878-895.
- Erakman, B., Meşhur, M., Gül, M.A., Alkan, H., Öztaş, Y., Akpınar, M., 1986. "Fethiye-Köyceğiz-Tefenni-Elmalı- Kalkan arasında kalan alanın jeolojisi", (eds: Güven, A., Dinçer, A., Derman, A.S.), Türkiye Altın Petrol Kong., Jeoloji Bildirileri, Ankara, 23-32.
- Gat, J.R., Carmi, I., 1970. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 75, 3032-3048.
- Gökgöz, A., Tabancalı, Y., 2021. Böceli ve Kazanpınar karst kaynaklarının (Denizli) hidrojeolojik ve hidrokimyasal özellikleri. *Pamukkale Üniv. Müh. Bilim. Derg.*, 27, 3, 420-430). DOI: 10.5505/pajes.2020.04378
- Gökgöz, A., Akdağoğlu, H., 2016. Hydrogeology and hydrogeochemistry of a coastal low-temperature geothermal field: a case study from the Datça Peninsula (SW Türkiye). *Environ Earth Sci.* 75:1143. doi:10.1007/s12665-016-5957-y
- Gökgöz, A., Mutlu, H., Akman, M.A., 2022. Hydrochemical characteristics and geothermometry applications of thermal waters in the Çürüksu Graben, western Türkiye. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31 (3), 260-283.
- Gökgöz, A., Semerci Aygün, B., 2023. Pınarbaşı Karst Kaynağı'nın (Denizli) Boşalım Hidrodinamiği ve Hidrojeokimyasal Özelliklerinin Değerlendirmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (3), 780-796.
- Gökgöz, A., Taşdelen, S., Kaya, M. ve Bülbül, A., 2005. Denizli Belediyesi Mücavir Alanının Hidrojeolojik ve Hidrokimyasal İncelemesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 53-62.
- Güler, C., Kurt, M.A., Alpaslan, M., Akbulut, C., 2012. Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Türkiye) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology* 414, 435-451.
- Günay, G., Şimşek, Ş., Keloğlu, N., Elhatip, H., Yeşertener, C., Dilsiz, C., Güner, İ. N., Bektaş, D., Öncel, E., 1996. Pamukkale Koruma Amaçlı İmar Planında Öngörülen Travertenlerin Korunması ve Geliştirilmesi İle İlgili Bilimsel-Teknik Araştırmalar ve Müşavirlik Hizmetleri (III). Beytepe-Ankara.
- Gündoğan, İ., Helvacı, C. Sözbilir, H., 2008. "Gypsiferous carbonates at Honaz Dağı (Denizli): First documentation of Triassic gypsum in western Türkiye and its tectonic significance", *Journal of Asian Earth Sciences*, 32, 49-65.
- Güner, E.D., Tekin, S., Seckin, G., 2018. An Assessment of Shallow Groundwater Wells in an Agricultural and Coastal Area in Gökusu Delta, Türkiye. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2 (1), 9-16.
- Hakyemez, Y.H., 1989. "Geology and stratigraphy of the Cenozoic sedimentary rocks in the Kale-Kurbalık area, Denizli-southwestern Türkiye", *Mineral Research and Exploration Institute of Türkiye (MTA) Bulletin*, 109, 1-14.
- Hançer, M., 2013. Study of the Structural Evolution of the Babadağ-Honaz and Pamukkale Fault Zones and the Related Earthquake Risk Potential of the Buldan Region in SW Anatolia, East of the Mediterranean. *Journal of Earth Science*, 24 (3), 397-409.
- Hetzl, R., Ring, U., Akal, C., Troesch, M., 1995. Miocene NNE directed extensional unroofing an the Menderes Massif, Southwestern Türkiye. *Journal of the Geological Society*, 152, 639-654.
- İnan, A.B., 2024. Pamukkale Termal Kaynağının (Denizli) Kimyasal ve İzotop Kompozisyonundaki Mevsimsel Değişimlerin İzlenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Türkiye.
- İTASHY, 2013. İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik. *Resmî Gazete*, 07/03/2013, No: 28580.
- Joshi, D.M., Kumar, A., Agrawal, N., 2009. Assessment of the irrigation water quality of river Ganga in Haridwar district. *Rasayan Journal of Chemistry*, 2, 285-292.
- Karakuş, C.B., 2019. Evaluation of groundwater quality in Sivas province (Türkiye) using water quality index and GIS-based analytic hierarchy process. *International Journal of Environmental Health Research*, 29 (5), 500-519.
- Kaya, Y., 2000. Denizli (Merkez) Yeraltı Sularının Jeokimyasal İncelemesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Türkiye.
- Kelley, W.P., 1963. Use of Saline Irrigation Water. *Soil Science*, 95, 385-391.
- Koçyiğit, A., 2005. Denizli Graben-Horst System and the eastern limit of the west Anatolian continental extension: Basin fill, structure, deformational mode, throw amount and episodic evolutionary history, SW Türkiye. *Geodinamica Acta*, 18, 167-208.
- Konak, N., Şenel, M., 2002. 1/500.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası-Denizli Paftası Ankara, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Konak, N., 2003. "Menderes Masifi'nin Güneydoğusundaki Naplı Yapılar"; 56. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri, 304-306.
- Konak, N., 2007a. "Menderes Masifi Kolokyumu; "Menderes Masifi'nin Güney ve Güneydoğusundaki Naplı Yapılar", Menderes Masifi Teknik Gezi Kitabı, JMO Teknik Gezi Kitapları Serisi, No: 5, Ankara, 33-48.
- Konak, N., 2007b. "Menderes Masifi Kolokyumu; "Menderes Masifi'nin Prekambriyen-Paleozoyik İstiflerinin Tektonik Üniteler Bazında Tartışılması", Menderes Masifi Kolokyumu Bildiriler Kitabı, , Ankara, 17-23.
- Konak, N., Akdeniz, N., Öztürk, E.M., 1987. Geology of the south of Menderes Massif. *Guide Book for the Field Excursion along Western Anatolia, Türkiye*, 42-53.
- Konak, N., Alan, İ., Bakırhan, B., Bedi, Y., Dönmez, M., Pehlivan, Ş., Sevin, M. Türkecan, A., Yusufoglu, H., 2016. "Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü 1/1.000.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası".
- Konak, N., Çakmakoglu, A., 2007a. Menderes Masifi Kolokyumu; "Göktepe Napı-Bodrum Napı", Menderes Masifi Teknik Gezi Kitabı, JMO Teknik Gezi Kitapları Serisi, No: 5, Ankara, 55-64.
- Konak, N., Çakmakoglu, A., 2007b. "Menderes Masifi Kolokyumu; "Menderes Masifi ve Yakın Çevresindeki Mesozoyik-Alt Tersiyer İstiflerinin Tektonik Üniteler Bazında Tartışılması", Menderes Masifi Kolokyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 56-64.
- Konak, N., Çakmakoglu, A., 2009. "Menderes Masifi ve Tavas Napı'ndaki Geç Kretase-Erken Tersiyer Olayları"; 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri, 948-949.

- Krishnakumar, P., Lakshumanan, C., Kishore, V.P., Sundararajan, M., Santhiya, G., Chidambaram, S., 2014. Assessment of groundwater quality in and around Vedaraniyam, South India. *Environmental Earth Sciences*, 71, 2211–2225.
- Kurt, O., 2022. Denizli İl Merkezi İçme Suyu Kaynaklarının Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelemesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Türkiye.
- Lucas, L.L., Unterwieser, M.P., 2000. Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 105 (4), 541–549.
- Magesh, N.S., Jitheshlal, K.V., Chandrasekar, N., Jini, K.V., 2013. Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. *Applied Water Science*, 3, 467–477.
- Mayo, A.L., Loucks, M.D., 1995. Solute and isotopic geochemistry and ground water flow in the central Wasatch Range. *Utah. Journal of Hydrology*, 172, 31–59.
- McLean, W., Jankowski, J., Lavitt, N., 2000. "Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia", In: Sililo O et al. (editors). *Groundwater, Past Achievements and Future Challenges*. Rotterdam, The Netherlands: A.A. Balkema, pp. 567–573.
- Meşhur, M., Akpınar, M., 1984. Yatağan-Milas-Bodrum ve Karacasu-Kale-Acıpayam-Tavas civarlarının jeolojisi ve petrol olanakları. TPAO Arama Grubu, Teknik Rapor No: 1963, Ankara, Türkiye.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), 2025. Kuraklık Analizi. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/kuraklik-analizi.aspx> Erişim tarihi: 17.09.2025.
- Meybeck, M., 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, 287 (5), 401–428.
- Mishra, P.C., Patel, R.K., 2001. Quality of Drinking water in Rourkela, out side the steel town ship. *Journal of Environment and Pollution*, 8 (2), 165–169.
- Okay, A.I., 1989. Denizli'nin güneyinde Menderes Masifi ve Likya naplarının jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 109, 45–58.
- Önhon, E., Ertan, I., Güler, S., Nazik, M., Kaplan, A., 1989. Research on the Origin of the Karst Waters in Yukarı Çürüksu Plain Using Isotope Techniques. State Hydraulic Works of Türkiye, Final Report. Ankara, Türkiye.
- Oudeika, M.S., İlkinen, E.M., Taşdelen, S., Aydın, A., 2020. Distinguishing Groundwater Flow Paths in Fractured Rock Aquifers Formed Under Tectonic Stress Using Geophysical Techniques: Cankurtaran Basin, Denizli, Türkiye. *International Journal of Environmental Research*, 14 (5), 1–15.
- Oudeika, M.S., Taşdelen, S., Güngör, M., Aydın, A., 2021. Integrated vertical electrical sounding and hydrogeological approach for detailed groundwater pathways investigation: Gökpinar Dam Lake, Denizli, Türkiye. *Journal of African Earth Sciences*, 182, 104273.
- Özkul, M., Kele, S., Gökğöz, A., Shen, C.C., Jones, B., Baykara, M.O., Fórizs, I., Németh, T., Chang, Y., Alçiçek, M.C., 2013. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli Extensional Basin based on their depositional and geochemical data. *Sedimentary Geology*, 294, 179–204.
- Paliwal, K. V., 1972. Irrigation with saline water. Monogram No. 2, new series, New Delhi. IARI.
- 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, 312 pp.
- Raghunath, H.M., 1987. *Groundwater* (2nd ed.), Wiley Eastern Ltd, New Delhi, 563p.
- Richards, L. A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils. Agriculture, Handbook 60, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C..
- Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası. Reform Matbaası, İzmir.
- Sahu, P., Sikdar, P.K., 2008. Hydrochemical Framework of the Aquifer in and around East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Environmental Geology*, 55, 823–835.
- Schoeller, H., 1944. Les échanges de bases dans les eaux souterraines; trois exemples es Tunisie. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 4, 389–420.
- Şener, Ş., Şener, E., Davraz, A., 2017. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Türkiye). *Science of the Total Environment*, 584–585, 131–144.
- Şener, Ş., Varol, S., Şener, E., 2022. Akşehir (Konya) Ovası Yeraltısuyu Kalitesi ve Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi. *Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research*, 8 (1), 80–91.
- Şengör, A.M.C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Türkiye: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181–241.
- Şimşek, Ş., 1984. Denizli-Sarayköy-Buldan Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji. Olanakları. İstanbul Üniversitesi Yer Bilimleri Fakültesi Yayın Organı, 3, 145–162.
- Subba Rao, N., 1997. Studies on Water Quality Index in Hard Rock Terrain of Guntur District, Andhra Pradesh, India. National Seminar on Hydrology of Precambrian Terrains and Hard Rock Areas, pp. 129–134.
- Sun, S., 1990. Denizli-Uşak arasındaki jeolojisi ve linyit olanakları. MTA Raporu, Rapor No: 9985, Ankara, Türkiye.
- Tarcan, G.; Akıncı, G.; Danışman, M.A., 2010. Assessment of the pollution from tannery effluents upon waters and soils in and Around Kula Vicinity, Türkiye. *Water Air Soil Pollut.* 213, 199–210.
- Taşdelen, S., 2018. Hydrogeological and Geophysical Characterization of Kozlupınar and Bentpınarı Water Springs (Denizli, SW Türkiye). *IJRDO-Journal Application Science*. 4 (12), 8–21.
- Taşdelen, S., 2021. Hydrogeochemical Characteristics of Spring Waters for Irrigation, Gökpinar Basin Case, Denizli, Türkiye. *Journal of Agricultural Sciences (Tarım Bilimleri Dergisi)*, 27 (4), 516 – 525.
- Taşdelen, S., Akyol, E., Aydın, A., Kaya, A., 2017. Relation Between Hydrodynamics of Gökpinar Springs and Fault Zones Denizli. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, 5 (3). 68–73.
- Taşdelen, S., Güngör, M., Aydın, A., 2016. Çukurköy (Denizli) dolayının sığ yeraltı suyu hidrojeoloji incelemesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (3), 206–212.
- Thornthwaite, C., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55–94.
- Todd, D. K., 1980. *Groundwater Hydrology*. (2nd ed.), John Wiley and Sons.

- Varol, S., Davraz, A., 2016. Evaluation of potential human health risk and investigation of drinking water quality in Isparta city center (Türkiye). *Journal of Water and Health*, 14 (3), 471-488.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv Ganthi, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R., Vasudevan, S., 2010. Application of Water Quality Index for Groundwater Quality Assessment: Thirumanimuttar Sub-Basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171, 595-609.
- Venugopal, T., Giridharan, L., Jayaprakash, M. and Periakali, P., 2009. Environmental Impact Assessment and Seasonal Variation Study of the Groundwater in the Vicinity of River Adyar, Chennai, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 149, 81-97.
- Wang, S., Fu, J., Zhang, C., Yang, J. 2021. Chapter 4- Shield machine selection, *Shield Tunnel Engineering*, 115-171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823992-6.00004-7>
- WHO, 2011. *Guidelines for Drinking Water Quality*. 4th Edition World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Wilcox, L. 1955. *Classification and Use of Irrigation Waters*; Agriculture Circular: Washington, DC, USA, p. 19.
- Yazman, M.M., Yüksel, B., Ustaoglu, F., Şen, N., Tepe, Y., Tokatlı, C., 2024. Investigation of groundwater quality in the Southern Coast of the Black Sea: application of computational health risk assessment in Giresun, Türkiye. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31 (39), 52306-52325.
- Yidana, S.M., Yidana, A., 2010. Assessing Water Quality Using Water Quality Index and Multivariate Analysis. *Environmental Earth Sciences*, 59, 1461-1473.
- Yıldırım, N., Güner, İ.N., 2002. Isotopic and hydrogeochemical properties of waters encountered in the geothermal area, eastern Menderes graben. *Hidrojeolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu*, 79-97.
- Yılmaz, Y., Genc, S.C., Gurer, O.F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, S., Elmas, A., 2000. When did the western Anatolian grabens begin to develop? In *Tectonics and Magmatism in Türkiye and the Surrounding Area*; Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D.A., Eds.; Geological Society of London: London, UK, 2000; Volume 173, pp. 353-384.
- Yolcubal, İ., Gündüz, Ö.C., Sönmez F., 2016. Assessment of impact of environmental pollution on groundwater and surface water qualities in a heavily industrialized district of Kocaeli (Dilovası), Türkiye. *Environmental Earth Sciences*, 75, 170.