

Araştırma Makalesi / Research Article

Pınarbaşı Karst Kaynağı'nın (Denizli) Boşalım Hidrodinamiği ve Hidrojeokimyasal Özelliklerinin DeğerlendirmesiAli GÖKGÖZ^{1*}, Bilge SEMERCİ AYGÜN²^{1,2}Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Denizli.

Sorumlu yazar e-posta*: agokgoz@pau.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5238-0207>

bilgesemerci@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6138-7075>

Geliş Tarihi: 26.11. 2022

Kabul Tarihi: 02.05.2023

Öz

Pınarbaşı Kaynağı, Denizli ilindeki yüksek debili karstik kaynaklardan biridir. Menderes Masifi'nin Mesozoyik yaşlı rekristalize kireçtaşlarından boşalan ve debisi genellikle 1000 l/s'den fazla olan kaynak sulamada kullanılmaktadır. Bu çalışmada Ekim-2017 ve Eylül-2018 arasında aylık olarak Pınarbaşı Kaynağı'nın debi ve fizikokimyasal kompozisyonundaki değişimler izlenmiş ve değerlendirilmiştir. Kaynak boşalımının analizi, Pınarbaşı Kaynağı'nın geldiği karstik akifer için, hidrolik iletkenlik katsayısının düşük-orta, etkin gözenekliliğin yüksek ve akiferin depolama kapasitesinin büyük olduğunu, aynı zamanda kaynak boşalımının tabaka, kırık ve çatlaklar yoluyla gerçekleştiğini göstermektedir. İzleme periyodunda Pınarbaşı Kaynağı'nın sıcaklık, pH ve elektriksel iletkenlik değerlerindeki değişim sırasıyla 18,6–18,9°C, 7,09–7,42 ve 611–657 µS/cm aralığında olmuştur. Kaynağın kimyasal kompozisyonunda önemli bir mevsimsel değişim gözlenmemiştir. Pınarbaşı Kaynağı ve civarındaki sondaj suları Ca-Mg-HCO₃-SO₄ tipinde iken beslenme alanındaki kaynak suları Ca-HCO₃ tipindedir. Pınarbaşı Kaynağı'nın izleme döneminde toplam sertlik değerleri için elde edilen değişim katsayısı yaygın akımlı akifer tipine işaret etmektedir. İzotop ($\delta^{18}\text{O}$, δD ve trityum) verilerine göre inceleme alanı suları meteorik kökenli ve nispeten güncel yağışlarla beslenen sulardır. Pınarbaşı Kaynağı suyu C₂S₁ sulama suyu sınıfında olup orta akaçlama özelliğindeki topraklarda tüm bitkilerin sulamasında kullanılabilir. Ancak yüksek arsenik miktarı nedeniyle içilmez özelliktedir.

Anahtar kelimeler

Karst kaynağı;
Boşalım katsayısı;
Hidrojeokimya;
İzotop;
İzleme.

Assessment of Discharge Hydrodynamics and Hydrogeochemical Properties of Pınarbaşı Karst Spring (Denizli)**Abstract**

Pınarbaşı spring is one of the high flow karstic springs in Denizli. The source, which is discharged from the Mesozoic aged recrystallized limestones of the Menderes Massif and whose flow rate is generally more than 1000 L/s, is used in agricultural irrigation. In this study, monthly changes in the flow rate and physicochemical composition of Pınarbaşı spring between October-2017 and September-2018 were monitored and evaluated. The analysis of the spring discharge shows that for the karst aquifer from which Pınarbaşı spring comes, the hydraulic conductivity coefficient is low-medium, the effective porosity is high and the storage capacity of the aquifer is large. During the monitoring period, the changes in temperature, pH and electrical conductivity values of Pınarbaşı spring were in the range of 18.6–18.9 °C, 7.09–7.42 and 611–657 µS/cm, respectively. No significant seasonal fluctuation was observed in the chemical composition of the spring. While the borehole waters in and around Pınarbaşı spring are of Ca-Mg-HCO₃-SO₄ type, the spring waters in the recharge area are of Ca-HCO₃ type. The coefficient of variation obtained for the total hardness values of the Pınarbaşı spring during the monitoring period indicates the diffuse flow-type aquifer. According to the isotope ($\delta^{18}\text{O}$, δD and tritium) data, the waters of the study area are of meteoric origin and fed by relatively recent precipitation. Pınarbaşı spring water is in C₂S₁ irrigation water class and can be used for irrigation of all plants in moderately drained soils. However, it is undrinkable due to its high arsenic content.

Keywords

Karst spring;
Recession coefficient;
Hydrogeochemistry;
Isotope;
Monitoring.

1. Giriş

Günümüzde küresel ısınma etkileri ve hızla artan nüfus nedeniyle yeterli miktarda içme, kullanma ve sulama suyu temininde güçlük yaşanmaktadır. Yeraltısu seviyelerinin düşmesi, kaynak debilerinin azalması ve antropojenik kirlenme tatlı su kaynaklarından sürdürülebilir yararlanmayı kısıtlayan başlıca faktörlerdir. Bu nedenle su kaynaklarının hidrojeolojisi, hidrodinamiği, hidrojeokimyası ve kirliliği üzerine yapılan çalışmalar daha fazla önem kazanmıştır. Su temininde genellikle yüksek debili olmaları nedeniyle karstik kaynakların önemli bir yeri vardır. Ancak karstlaşmanın ilerlediği akiferlerde kirlilik taşınımının hızlı ve kaynak debilerindeki mevsimsel değişimin fazla olması su teminini olumsuz yönde etkileyebilecek öğelerdir.

Karstik kaynakların boşalım hidrodinamiğinin ve su kimyasındaki değişimlerin bilinmesi ve izlenmesi kaynak debilerinde ve kimyasal kompozisyonlarında gözlenen olası değişimlerin hangi faktörlere bağlı olduğunu açıklığa kavuşturacak ve su temini çalışmalarında gerçekçi bir değerlendirme yapılmasını sağlayacaktır. Bu bağlamda karst akiferleri ve kaynakları üzerine birçok çalışma vardır (Atkinson 1977, Lopez-Chicano et al. 2001, Ekmekçi 2005, Yüce 2007, Hershey et al. 2010, Gabrovsek et al. 2011, Bicalho et al. 2012, Kaçaroğlu 2012, Malík and Vojtková 2012, Jemcov 2014, Paiva and Cunha 2020, Çeliker et al. 2021).

Pınarbaşı Kaynağı Denizli il merkezine 15 km mesafedeki Honaz yerleşim alanının ~2km batısında, aktif Honaz Fayı üzerinde yer almaktadır. Bir hat boyunca boşalan kaynağın suyu bir havuzda toplanmakta ve oradan açık kanallarla sulamaya verilmektedir. Denizli il merkezi için yaz aylarında bazı dönemlerde görülen su sıkıntısını gidermek için Pınarbaşı Kaynağı'ndan da yararlanılması düşünülmektedir. Bu durumda kaynağın hidrodinamik özelliklerinin, kimyasal kompozisyonunun ve bunların mevsimsel değişimlerinin bilinmesi önem taşımaktadır. Bu

çalışmanın amacı Pınarbaşı Kaynağı'nın boşalım analizini yaparak akiferin hidrodinamik özelliklerini belirlemek, su kimyasındaki olası mevsimsel değişimleri incelemek ve kaynağın suyunun içmeye uygunluğunu ortaya koymaktır.

2. Materyal ve Metod

Örneklenen suların fizikokimyasal kompozisyonlarını ve bu kompozisyonlardaki mevsimsel değişimleri araştırmak amacıyla Pınarbaşı Kaynağı ve yakınındaki iki sondaj ile beslenme alanındaki dört kaynaktan yerinde ölçüm, örnekleme ve analiz çalışması yapılmıştır. Ölçüm ve örnekleme çalışması Pınarbaşı Kaynağı'ndan 1 yıl boyunca (2018 yılı Ocak ve Haziran ayları eksik olmak üzere aylık periyotlarla), diğer sulardan Ekim 2017 ve Mayıs 2018 olmak üzere iki dönemde gerçekleştirilmiştir.

Suların sıcaklıkları, pH ve elektriksel iletkenlik (Eİ) değerleri HACH-LANGE HQ40D model çoklu parametre ölçüm cihazıyla ile ölçülmüştür.

Anyon ve katyon (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , Br^- , F^- , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^+ , K^+ , Li^+ , NH_4^+) analizleri için örnek alımı 250 ml hacmindeki yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) şişelere filtre edilerek ($0,45 \mu\text{m}$) yapılmıştır. Element analizleri için örnekler 100 ml hacimli HDPE şişelere filtrelenerek alınmış ve nitrik asit ilave edilerek pH değerleri 2 veya altına indirilmiştir. Duraylı izotop (^{18}O ve ^2H) ve ^3H analizleri için su örnekleri sırasıyla 50 ml ve 500 ml hacmindeki HDPE şişelere toplanmıştır.

Suların katyon, anyon ve ^3H analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası ve Çevresel Tritiyum Laboratuvarları'nda, element analizleri AcmeLab'da yapılmıştır. ^{18}O ve ^2H izotop analizleri D.S.İ. Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı (TAKK) İzotop Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. İyon analizlerinde elektronötralite hatası %–2,47 ile %4,87 arasındadır.

Hidrojeokimyasal değerlendirmeler için PhreeqC (Parkhurst and Appelo 1999) yazılımı kullanılmıştır. Pınarbaşı Kaynağı'nın hidrodinamik özelliklerini belirlemek için kaynaktan Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 212. Şube Müdürlüğü tarafından yapılan aylık debi ölçüm değerleri kullanılmıştır. Eylül–2017 ve Eylül–2018 arasında 13 aylık periyodu içeren debi değerleri Mailliet (1905) Yöntemi'yle değerlendirilmiştir.

3. Jeoloji

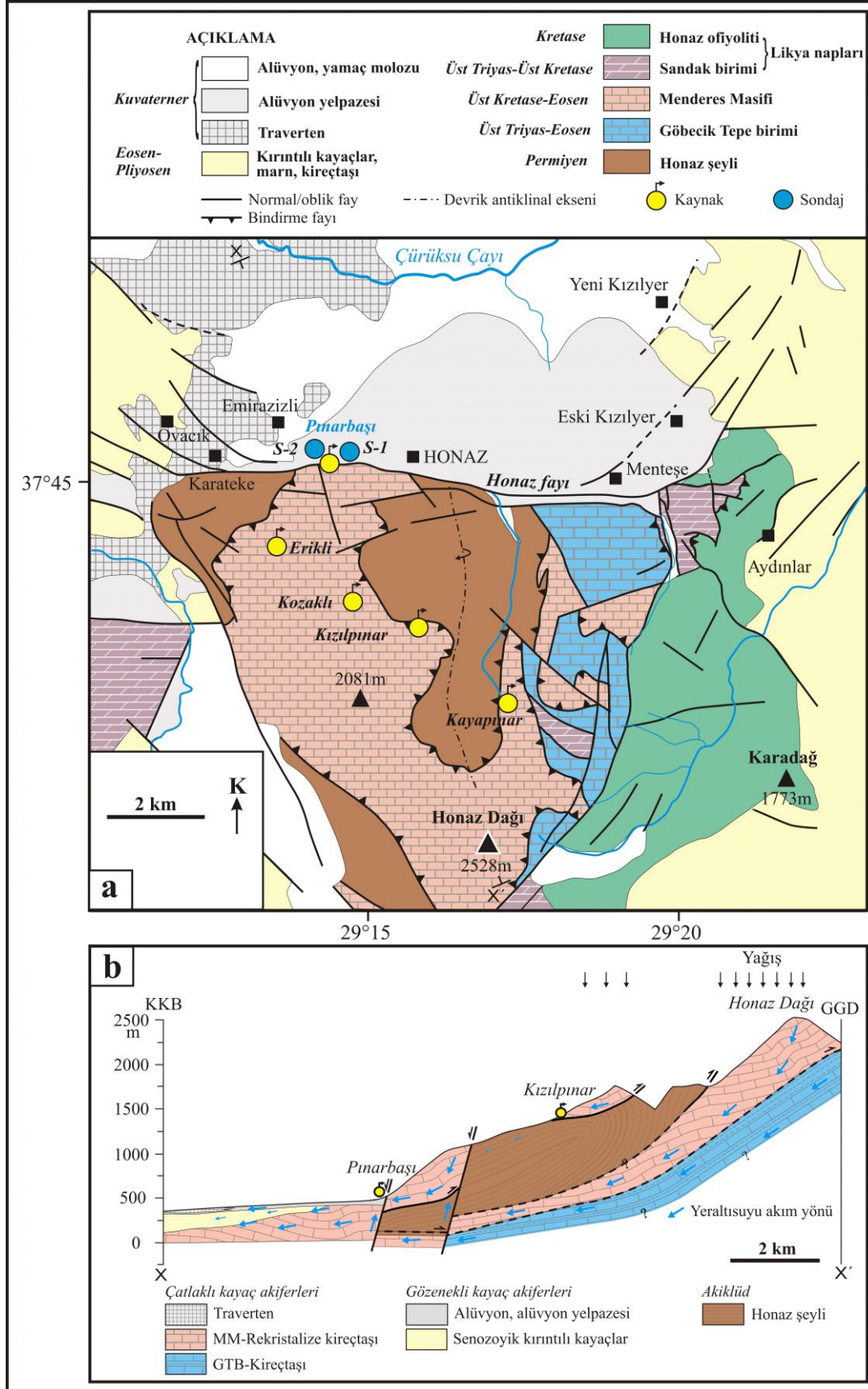
Çalışma alanının temel kayaçlarını Likya Napları, Menderes Masifi metamorfileri, Göbecik Tepe birimi ve Honaz şeyli oluşturur. Honaz Şeyli egemen olarak koyu mavi – yeşilimsi renkli şeyl ve siltaşından oluşur. Kırıklı ve kıvrımlı bir yapıya sahip olan ve hafif metamorfizma geçiren (Okay 1989) birim olasılıkla Permiyen yaşlıdır (Konak ve Şenel 2002). Honaz şeyli üzerinde allokon olarak Menderes Masifi'ne ait birimler yer alır. İnceleme alanında Menderes Masifi Yılanlı ve Zeybekölen Tepe formasyonları ile temsil edilir. Yılanlı formasyonu gri renkte, genellikle kalın katmanlı, ince taneli rekristalize kireçtaşlarından oluşur (Meşhur ve Akpınar 1984, Konak vd. 1987, Okay 1989). Görünür kalınlığı yaklaşık 1500 metre olan formasyonun yaşı Üst Kretase'dir (Okay 1989). Yılanlı Formasyonunun üzerine Paleosen-Alt Eosen yaşlı Zeybekölen Tepe Formasyonu gelir. Formasyon, kireçtaşı, şeyl ve rekristalize kireçtaşından oluşur ve 1000 metreyi aşan görünür kalınlığa sahiptir (Okay 1989). Bu kayalar Likya Napları'na ait Sandak birimi (Gereme formasyonu ve Çatalca Tepe kireçtaşı birimi) ve Honaz ofiyoliti tarafından nap dokanağı ile üzerlenir. Honaz Dağı'nın doğu yamacında gözlenen Üst Triyas-Kretase yaşlı (Bernoulli vd. 1974, Erakman vd. 1986) Gereme formasyonu gri, koyu gri, siyah renkli ve masif-kalın tabakalı dolomit, dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşlarından oluşur. Menteşe Köyü'nün güneydoğusunda siyah dolomit ve dolomitik kireçtaşları ile kalın jips katmanları ardalanmalıdır (Gündoğan vd. 2008). İnceleme alanının B-GB'sinde gözlenen Dogger-Üst Kretase yaşlı Çatalca Tepe kireçtaşı birimi gri, koyu gri, kalın katmanlı-masif kireçtaşlarından yapıldır (Okay 1989). Nap

silsilesinin en üstteki tektonik birimi olan Honaz ofiyoliti egemen olarak koyu yeşil renkli, kısmen serpantinleşmiş harzburjitlerle temsil edilir (Okay 1989) ve Kretase yaşlıdır (Gündoğan vd. 2008). Menderes Masifi kayaçlarının veya Honaz şeylinin altında tektonik dokanakla yer alan Üst Triyas-Eosen yaşlı Göbecik Tepe birimi ise mikritik kireçtaşı, mikrit, kireçtaşı, şeyl, çakıltası, kumtaşı ve siltaşından oluşur (Okay 1989). Temel kayaçları üzerine uyumsuz olarak Eosen-Pliyosen yaşlı birimler gelir. Eosen birimleri başlıca türbidit istiften oluşur. İstifte, tabanda biyoklastik kireçtaşları ve çakıltası, üste doğru ise siltaşı-kiltaşı-kumtaşı ardalanması izlenir (Poisson 1977, Göktaş 1990, Sun 1990). Oligosen birimleri alüvyon yelpazesi çökellerinden oluşan çamurtaşı, kumtaşı, çakıltası ardalanması sunar (Hakyemez 1989, Göktaş 1990). Miyosen-Pliyosen istif yersel olarak linyit ve jips düzeyleri içeren çamurtaşı-kumtaşı-çakıltası ardalanması ile gösel kireçtaşı, killi kireçtaşı, kiltası ve siltaşı çökellerinden meydana gelir (Şimşek 1984, Taner 2001). Traverten, yamaç molozu, alüvyon yelpazesi ve alüvyon ile temsil edilen Kuvaterner yaşlı çökeller altlayan birimleri uyumsuzlukla örter (Şekil 1a).

4. Hidrojeoloji

4.1 Jeolojik Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri

Çalışma alanında çatlaklı karbonat akiferi ve gözenekli akifer olmak üzere iki tür akifer bulunur. Menderes Masifi'nin Yılanlı formasyonu ve ayrıca Sandak ve Göbecik Tepe birimleri ile traverten birimi çatlaklı karbonat akiferleri oluşturur (Şekil 1b). Maruz kaldıkları yoğun tektonik aktivite nedeniyle bu birimlere ait Mesozoyik–Eosen yaşlı rekristalize kireçtaşı, kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomitler çok kırıklı ve çatlaklıdır. Buna ilaveten süreksizlik yüzeyleri boyunca gelişmiş ve ilerlemiş karstik boşluklara sahiptirler. Bu nedenle ikincil gözeneklilik ve geçirgenlikleri yüksektir. Aynı zamanda bu birimlerin kalınlıklarının fazla ve yayılımlarının geniş olması yağmur ve eriyen kar sularının süzülmesiyle önemli miktarda beslenmelerine ve yüksek hacimde yeraltısu depolamalarına olanak sağlar. Bu akiferlerden gelen yeraltısu yüksek debili karstik kaynakları



Şekil 1. a) İnceleme alanının jeoloji haritası ve örneklenen kaynak ve sondajların lokasyonu (jeoloji haritası Okay 1989, Bozkuş vd. 2001, Konak ve Şenel 2002, Emre vd. 2011, Gökgöz et al. 2022'den modifiye edilmiştir), b) kavramsal hidrojeolojik kesit (MM: Menderes Masifi, GTB: Göbecik Tepe Birimi).

oluşturur ve ayrıca yanal akımla diğer akiferleri (Neojen'in geçirimli birimleri, traverten, alüvyon, alüvyon yelpazesi) besler. Yılanlı formasyonunu kesen sondajlar genellikle pozitif artezyen özellikte olup verimleri yüksektir. Bol kırıklı, çatlaklı ve faylı olan travertenlerde süreksizlik düzlemleri boyunca çözünme boşlukları gelişmiştir. Alüvyonun altındaki toplam traverten kalınlığı 90 metreyi bulmakta olup (Önhon vd. 1988) ve bu birimde açılan sondajlar yüksek verime sahiptir.

Alüvyal çökeller inceleme alanındaki en önemli gözenekli akiferleri oluştururlar. Alüvyal çökeller doğrudan yağış suları ve dolaylı olarak da Mesozoyik karbonatlı kayalardan gelen yeraltı suları ile beslenir. Alüvyonda ve alüvyon yelpazelerinin memba tarafında açılan ve bu birimlerin çakıllı-kumlu düzeylerini kesen sondajlardan yüksek debilerde yeraltı suyu alınmaktadır (Önhon vd. 1988).

Menderes Masifi'ne ait Zeybekölen Tepe formasyonunun çok çatlaklı karbonatlı şeyl ve şeyl birimleri akitard özelliğindedir. Bu birimler bünyesindeki suları alttaki Yılanlı formasyonuna iletir. Eosen yaşlı çökellerden çakıldaşları ve az karstik kireçtaşları geçirimli, kumtaşı, çakıldaşı ve marn aralanması ise yarı geçirimli özelliktedir (Özler 1996). Honaz şeyli, Honaz ofiyoliti ve Neojen birimlerinin kil ve silttaşlarının egemen olduğu kesimleri pratik olarak geçirimsiz ya da az geçirimlidir.

4.2. Kaynaklar

İnceleme alanı ve yakın çevresindeki karstik akiferler genellikle Çürüksu Ovası'nın doğu kesiminde Honaz Fayı ve ovadaki olası gömülü faylar boyunca karstik kireçtaşlarından boşalan çok sayıda yüksek debili kaynağı sonuçlamıştır. Bu havzada debileri 157 l/s ile >1000 l/s arasında değişen en önemli karstik kaynaklar Pınarbaşı, Böceli, Kazanpınar, Kaynarca, Halkabaşı ve Kokarsu'dur.

Bu çalışma kapsamında örneklenen Pınarbaşı, Kayapınar, Kızılıpınar, Kozaklı ve Erikli kaynakları Yılanlı formasyonundaki yeraltı sularını

boşaltmaktadır. Yeraltına süzülen yağış sularının bir kısmı sığ dolaşım yapar ve genellikle mevsimsel kaynakları oluşturur. Yüksek kesimlerde bulunan düşük debili Erikli, Kozaklı, Kızılıpınar ve Kayapınar kaynakları yıl boyu akışlıdır. Bu kaynaklardan kaptaja alınan Kayapınar (Q=3 l/s) ve Kızılıpınar (Q=0,5 l/s) kaynakları Honaz ilçe merkezine içme suyu olarak verilmektedir. Kozaklı (Q=0,15 l/s) ve Erikli (Q=0,04 l/s) kaynakları ise düşük debileri nedeniyle içme suyu şebekesine dahil edilmemiştir. Daha derine süzülen sular su tablasına erişir. Honaz Fayı önündeki kil boyutlu malzeme ağırlıklı yamaç molozu yeraltı suları için geçirimsiz zon oluşturarak fay boyunca birçok kaynak çıkışına olanak sağlar. Pınarbaşı Karst Kaynağı bu kaynaklar içinde debisi en yüksek olan (genellikle >1000 l/s) kaynaklardan biridir (Şekil 2).

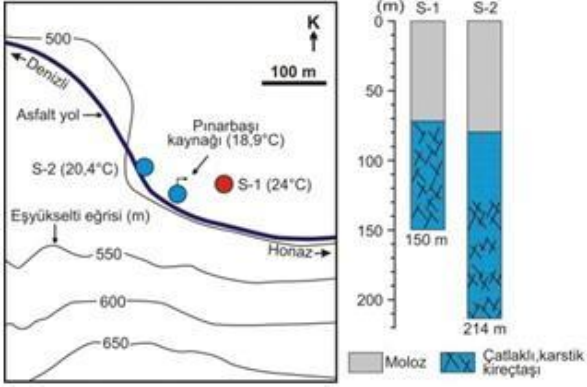
4.3 Sondajlar

Çalışma alanı ve civarında Denizli Büyükşehir Belediyesi, DSİ Genel Müdürlüğü, İller Bankası, Köy Hizmetleri gibi kurumlar ve şahıslar tarafından açılan ve derinlikleri 60–246 m arasında değişen çok sayıda sondaj mevcuttur. Traverten, alüvyal çökeller ve karstik kireçtaşlarında açılan sondajların verimi yüksektir.

Pınarbaşı Kaynağı'nın oldukça yakınındaki iki lokasyonda 490–491 m zemin kotunda açılmış 2 DSİ kuyusu da (S–1: 44153 ve S–2: 20019 nolu kuyular) artezyen kuyulardır (Şekil 2). Bu kuyularda yaklaşık 70–80 m kalınlıkta yamaç molozu kesilmiş, daha sonra bol kırık ve çatlaklı ve karstik seviyeler içeren kireçtaşlarına (Yılanlı formasyonu) girilmiştir (Şekil 3). Kuyu loglarındaki açıklamalara göre yamaç molozu egemen olarak kil boyutlu malzemedir oluşmaktadır. Bu durumda yamaç molozu Honaz Fayı önünde, güneyden kuzeye akan yeraltı suları için geçirimsiz bir bariyer oluşturmaktadır. Açıldıkları tarih itibarıyla S–1 kuyusunda (1993 yılı) basınç yüzeyi +0,5 m ve artezyen debisi 60 l/s, S–2 kuyusunda (1975 yılı) bu değerler sırasıyla +6,4 m ve 50 l/s'dir. Pompa testleri sonundaki düşüm miktarları 20 m civarındadır.



Şekil 2. Bazı örneklemeye noktalarından görünüşler. a) Pınarbaşı Kaynağı, b) S-1 ve c) S-2 sondaj kuyuları.



Şekil 3. Pınarbaşı Kaynağı ve sondajların lokasyonu ve kuyuların jeoloji logları. (mavi ve kırmızı daireler sırasıyla soğuk ve sıcak su sondajlarını göstermektedir).

5. Bulgular ve Tartışma

5.1 Pınarbaşı Kaynağı'nın boşalım rejimi

Sürekli akışlı karstik kaynaklar sulama, içme ve kullanma suyu temini planlamalarında önemli bir yer tutarlar. Bunun başlıca nedeni bu kaynakların genellikle yüksek debili olmalarıdır. Ancak karst akiferlerinin olumsuz tarafı kirlenmeye gözenekli akiferlerden daha açık olmalarıdır. Bu da genellikle hızlı bir kirlilik taşınımını sonuçlar. Bundan dolayı bu tür kaynaklardan su temininde yararlanılması planlandığında kullanım amacı ile de ilişkili olarak uzun dönem periyodik su kimyası ve debi verisine ihtiyaç duyulur. Pınarbaşı kaynağının debisi D.S.İ. tarafından bazı yıllar ve aylar kesintiye uğrasa da 1973 yılından itibaren aylık dönemlerle düzenli olarak ölçülmektedir. Kaynağın 1973–2010 yılları arasındaki debi değerleri 1140 l/s ortalama ile 880 ile 1440 l/s arasında değişmiştir. Bu çalışmada Eylül–2017 ile Eylül–2018 arasındaki debi değerleri 998–1385 l/s aralığında olup Meinzer (1923) sınıflamasına göre Pınarbaşı Kaynağı “fazla yüksek debili kaynaklar” sınıfında yer alır.

Pınarbaşı Kaynağı'nın Eylül–2017 ile Eylül–2018 arasındaki debi değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Kurak dönem başlangıç debisi (Q_0) ile kurak dönem sonu debisi (Q_t) farkının Q_0 'a oranı debi değişim yüzdesini (Q_d) tanımlar. Uzun dönem ölçüm sonuçlarına göre debi değişim yüzdesi 13,5–22,3 arasında olan Pınarbaşı Kaynağı “debi değişimi orta kaynaklar” sınıfında yer alır (Gökğöz vd. 2015). Çalışma dönemindeki debi değişim yüzdesi 20,6 olup bu değer uzun dönem verilerden hesaplanan değerlerle benzerdir. Debi maksimum değerine 2018–Nisan ayında ulaşmış (kurak dönem başlangıcı) ve daha sonra Ağustos ayına kadar azalmıştır (Şekil 4a). Denizli il merkezi için Haziran ayı toplam yağış ortalaması 26,9 mm iken 2018 yılı Haziran ayı için aylık toplam yağış miktarı 154,2 mm olmuştur. Kaynak debileri ile aylık toplam yağış değerleri dikkate alındığında Pınarbaşı Kaynağı debisinin aylık yağışların etkisinde olmadığı söylenebilir (Şekil 4a).

Pınarbaşı Kaynağı'nın gerçek rejimdeki boşalım rejimini ve karst akiferin depolama kapasitesini belirlemek için çekilme eğrisi analizi yapılmıştır. Gerçek rejimde, bir karstik kaynağın debisi akiferde depolanan yeraltısuyunun fonksiyonudur ve Eşitlik (1) ile ifade edilir (Maillet 1905):

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1)$$

Eşitlikte Q_0 ve Q_t sırasıyla gerçek rejimin başlangıcındaki (t_0 anındaki) ve t zamanına karşılık gelen debi (m^3/s), α boşalım katsayısı ($gün^{-1}$), e doğal logaritma tabanı (2,718) ve $t-t_0$ boşalımın başlangıcından itibaren geçen zamandır (gün). Eşitlik (1)'den boşalım katsayısı çekilerek Eşitlik (2) elde edilir.

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{t \cdot \log e} \quad (2)$$

Akiferin depolama kapasitesi (V_s) ile t zamanda hazneden boşalan su miktarı (V_d) sırasıyla Eşitlik (3) ve (4)'den hesaplanabilir.

$$V_s = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (3)$$

$$V_d = \frac{Q_0}{-\alpha} [e^{-\alpha \cdot t}]_0^t \quad (4)$$

Pınarbaşı Kaynağı'nın gerçek rejimdeki boşalım grafiğinde çekilme tek bir doğruyla temsil edilmektedir (Şekil 4b) ve Eşitlik (2)'den α değeri $0,0020 \text{ gün}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Kaynağın geçmiş yıllar için belirlenen α değerleri $8,4 \times 10^{-4}$ ile $2,81 \times 10^{-3} \text{ gün}^{-1}$ aralığında değişmektedir (Gökğöz vd. 2015). Bu durum olasılıkla akiferin beslenme rejiminin, yeraltı su seviyesinin, akım yollarının ve depolanma zonlarının yıllara göre farklılık göstermesi nedeniyledir. Boşalım katsayısı değerinden akiferin depolama kapasitesinin büyük, su hacminin fazla, hidrolik iletkenlik katsayısının düşük-orta, etkin porozitesinin yüksek ve kaynaktaki boşalmanın egemen olarak kireçtaşının tabaka, kırık ve çatlakları yoluyla olduğu söylenebilir.

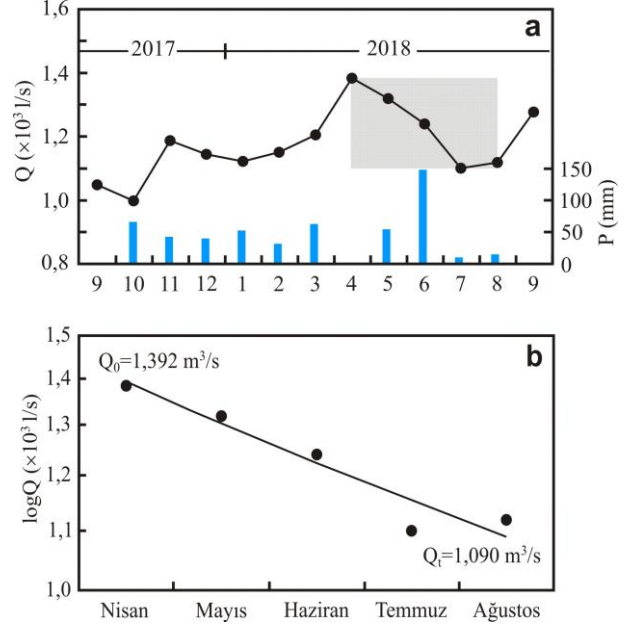
Çizelge 1. Pınarbaşı Kaynağı'nın debi değerleri (DSİ'den alınmıştır).

Tarih	Q (l/s)	Tarih	Q (l/s)
12.09.2017	1049	12.03.2018	1205
19.10.2017	998	16.04.2018	1385
10.11.2017	1188	02.05.2018	1319
25.12.2017	1146	08.06.2018	1242
15.01.2018	1123	12.07.2018	1100
05.02.2018	1151	10.08.2018	1119
		12.09.2018	1279

Eşitlik (3) ve (4)'den akiferin depolama kapasitesi $60,13 \times 10^6 \text{ m}^3$ ve 120 günde hazneden boşalan su miktarı $16,31 \times 10^6 \text{ m}^3$ ve haznede kalan su hacmi miktarı $43,82 \times 10^6 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Başka bir deyişle kurak dönemde Pınarbaşı Kaynağı'ndan boşalan su hacmi akiferdeki su hacminin %27'sidir.

Pınarbaşı Kaynağı α ve debi değerleri dikkate alındığında boşalım katsayısı orta değişken bir kaynaktır. Bu tür kaynakların debileri ve boşalttıkları yıllık su miktarları, uzun yıllar yağış ortalamasından yıllık eklenik sapmaların kurak ve yağışlı dönemlerdeki değerleri ile paralellik gösterir

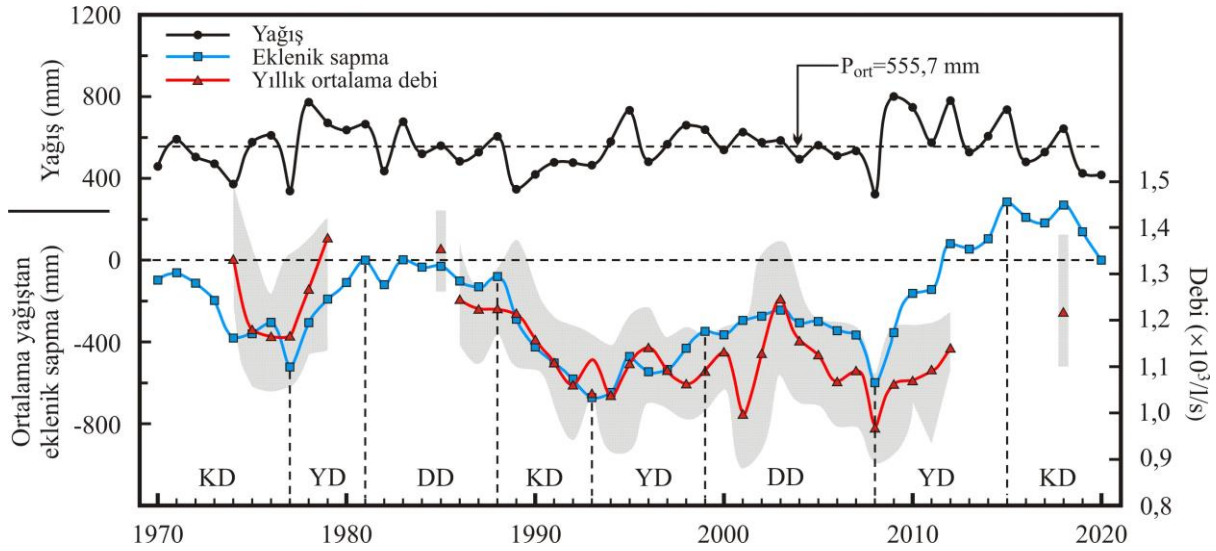
(Korkmaz 1989). Şekil 5'de ortalama yağıştan eklenik sapma grafiği ile Pınarbaşı Kaynağı'nın debi-zaman grafiğinin uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durumda, kaynağın debisinin anlık, mevsimsel veya yıllık yağışların etkisinde olmadığı ve debinin yıllık ortalama yağıştan eklenik sapma değerleri ile kontrol edildiği söylenebilir.



Şekil 4. Pınarbaşı Kaynağı'nın (a) debi-zaman (mavi çizgiler aylık toplam yağış miktarını göstermektedir) ve (b) gerçek rejimdeki boşalım grafikleri.

5.2 Suların fizikokimyasal özellikleri

Örneklenen suların sıcaklık, E_i ve pH değerleri ile kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Çalışma alanında, hidrojeolojik sistemin beslenme alanını temsil eden yüksek kesimlerdeki kaynakların (Erikli, Kozaklı, Kızılpınar ve Kayapınar) sıcaklıkları $9,3$ ile $11,2^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. Pınarbaşı Kaynağı'nın sıcaklığı izleme döneminde hemen hemen sabit olup $18,6$ – $18,9^\circ\text{C}$ aralığında ölçülmüştür. S-1 ve S-2 sondaj suları ise daha sıcaktır ve iki örnekleme döneminde sıcaklıkları sırasıyla $19,8^\circ\text{C}$ ile $20,4^\circ\text{C}$ ve $23,7^\circ\text{C}$ ile 24°C olarak ölçülmüştür (Çizelge 2). Çürüksu Grabeni'nin doğu kısmında ılık suların varlığı (Kaklık Mağarası kaynakları ve sondajları gibi) bilinmektedir. Kaklık-Honaz bölgelerindeki travertenleri oluşturan sularda jeotermal su katkısının olduğu ortaya



Şekil 5. İnceleme alanının 1970-2020 dönemindeki yağış, ortalama yağıştan eklenik sapma ve Pınarbaşı Kaynağı'nın 1973-2012 aralığındaki debi-zaman grafikleri. Gri ton minimum ve maksimum debi aralığını göstermektedir (1974-1979 yılları arası ve 1985 yılı debi değerleri Öhnon vd. (1988), diğerleri DSİ'den alınmıştır).

Çizelge 2. Su örneklerinin fizikokimyasal analiz sonuçları (iyonlar mg/l).

Adı	Örnekleme tarihi	T (°C)	Eİ (µS/cm)	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Su tipi
Pınarbaşı	10/2017	18,6	657	7,31	102,0	31,4	5,90	0,95	2,70	111,6	293,5	0,30	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	11/2017	18,7	645	7,28	101,6	30,6	6,12	1,14	2,56	111,3	291,8	0,30	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	12/2017	18,7	636	7,22	103,9	33,2	6,35	1,01	2,91	113,8	308,8	0,36	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	02/2018	18,7	620	7,15	104,7	31,9	6,38	0,97	2,96	122,6	295,3	0,29	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	03/2018	18,6	625	7,42	103,6	31,0	6,46	1,02	3,29	119,9	311,2	0,29	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	04/2018	18,7	623	7,15	96,7	31,7	6,55	1,01	3,15	124,6	276,2	0,39	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	05/2018	18,9	625	7,30	105,2	31,1	6,32	0,99	2,88	118,5	299,1	0,28	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	07/2018	18,7	617	7,09	81,1	29,8	5,94	0,96	3,71	119,8	239,7	0,37	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	08/2018	18,7	618	7,13	100,5	31,0	6,06	0,92	3,61	120,5	312,5	0,44	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	08/2018	18,8	611	7,09	103,6	31,3	6,21	0,99	2,85	121,7	300,8	0,28	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
Kayapınar	10/2017	9,3	259	8,28	50,0	4,1	3,00	0,51	1,89	4,4	161,5	0,04	Ca-HCO ₃
	05/2018	7,8	188	7,80	34,1	5,4	1,57	0,48	1,98	6,5	126,1	0,02	Ca-HCO ₃
Kızılınar	10/2017	10,7	258	7,59	47,8	4,4	3,24	0,51	1,76	4,5	176,9	0,02	Ca-HCO ₃
	05/2018	14,9	288	7,40	56,7	5,4	4,69	0,61	2,02	5,4	192,1	0,04	Ca-HCO ₃
Erikli	10/2017	11,2	397	8,26	59,4	19,3	3,02	1,33	2,95	8,3	256,2	0,07	Ca-Mg-HCO ₃
	05/2018	13,0	361	7,73	56,4	17,7	2,61	1,12	2,59	8,2	246,8	0,06	Ca-Mg-HCO ₃
Kozaklı	10/2017	9,8	316	8,50	56,5	4,9	2,44	0,36	2,29	6,6	176,9	0,05	Ca-HCO ₃
	05/2018	11,3	303	7,75	52,4	5,1	2,21	0,35	2,42	6,6	170,8	0,03	Ca-HCO ₃
Sondaj-1	10/2017	23,7	1065	6,79	184,1	43,7	15,98	2,37	4,61	200,6	516,6	0,56	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	05/2018	24,0	1009	6,81	179,8	44,5	16,61	2,43	5,05	220,2	500,4	0,47	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
Sondaj-2	10/2017	19,8	795	7,11	133,0	36,2	8,60	1,36	3,78	134,0	384,8	0,43	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
	05/2018	20,4	766	7,09	136,0	36,0	9,09	1,39	3,37	140,9	402,7	0,40	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄

konmuştur (Özkul vd. 2013). Aktif Honaz Fayı üzerinde açılan S-1 nolu sondaj suyu sıcak su sınıfına girer (24°C; Denizli il merkezindeki hava sıcaklığı ortalamasının 8°C üzerinde). Suların elektriksel iletkenliği 188–1065 µS/cm, pH değerleri de 6,79–8,50 arasında değişmektedir. Beslenme alanı soğuk suları daha düşük Eİ değerlerine sahip ve daha bazik,

sondaj suları ise daha yüksek Eİ ve nötre yakın pH değerlerine sahiptirler (Çizelge 2). Suların sıcaklık ve Eİ değerleri arasında pozitif ($R^2=0,91$), sıcaklık-pH ($R^2=0,93$) ve Eİ-pH ($R^2=0,88$) değerleri arasında ise negatif korelasyon vardır.

Pınarbaşı Kaynağı'nda majör iyonlar için ortalama değerler Ca^{+2} : 100,3 mg/l, Mg^{+2} : 31,3 mg/l, Na^{+} : 6,2 mg/l, K^{+} : 1 mg/l, HCO_3^{-} : 292,9 mg/l, SO_4^{-2} : 118,4 mg/l ve Cl^{-} : 3,1 mg/l'dir. Bu değerler S-2 sondaj suyunda bir miktar daha yüksektir. En yüksek iyon derişimleri S-1 sondaj suyunda görülür. Diğer kaynak sularının iyon miktarları düşük olup Ca^{+2} : 34,1–59,4 mg/l, Mg^{+2} : 4,1–19,3 mg/l, Na^{+} : 1,57–4,69 mg/l, K^{+} : 0,35–1,33 mg/l, HCO_3^{-} : 126,1–256,2 mg/l, SO_4^{-2} : 4,4–8,2 mg/l ve Cl^{-} : 1,76–2,95 mg/l aralığındadır (Çizelge 2). Tüm sulara ana katyon Ca^{+2} , ana anyon HCO_3^{-} 'dir. Pınarbaşı ve Erikli kaynakları ile sondaj sularında Ca^{+2} iyonunun derişimi %65 (mek/l) ve HCO_3^{-} derişimi Erikli kaynağı (%94) hariç olmak üzere %66 civarındadır. Diğer kaynaklarda bu iyonlar için ortalama değerler sırasıyla %82 ve %94'dür. Tüm sulara katyon ve anyon dizilimi $Ca^{+2}>Mg^{+2}>Na^{+}>K^{+}$ ve $HCO_3^{-}>SO_4^{-2}>Cl^{-}$ şeklindedir. Uluslararası Hidrojeologlar Birliği sınıflamasına göre Pınarbaşı Kaynağı ve sondaj suları $Ca-Mg-HCO_3-SO_4$, Erikli Kaynağı $Ca-Mg-HCO_3$ ve diğer sular $Ca-HCO_3$ tipindedir (Çizelge 2).

Suların yarı logaritmik diyagramından Pınarbaşı Kaynağı ve sondaj sularının aynı akiferden gelip benzer jeokimyasal süreçlerden geçtiği anlaşılmaktadır (Şekil 6a ve 6b). Bu sulara Pınarbaşı Kaynağı, S-2 ve S-1 sondaj suyu sırasıyla su sıcaklıkları, Eİ değerleri, iyon derişimleri ve özellikle As (20, 26 ve 98 $\mu g/l$), B (30, 65 ve 160 $\mu g/l$), Li (7, 12 ve 30 $\mu g/l$), SiO_2 (12, 13 ve 15 mg/l) ve Sr (1150, 1400 ve 1750 $\mu g/l$) miktarları artmıştır. Çürüksu Grabeni'nin doğusundaki yeraltısularının sıcaklıkları graben kenar faylarından, grabenin orta kesimine doğru azalmaktadır (Gökğöz et al. 2022). Pınarbaşı Kaynağı'nın sıcaklığı da (ortalama 18,7°C) graben orta kesimindeki kaynak ve sondaj sularından yaklaşık 2°C daha fazladır. S-1 ve S-2 sondaj sularının sıcaklıkları da dikkate alındığında (sırasıyla 20,4°C ve 24°C) bu sulara derindeki düşük sıcaklıklı bir jeotermal sistemden (Özler 2000) değişik oranlarda jeotermal su katkısı olduğu (Gökğöz et al. 2022) söylenebilir. Beslenme alanındaki kaynak suları daha düşük iyon ve element derişimlerine sahiptirler ve kimyasal kompozisyonları benzerdir. Sadece Erikli Kaynağı'nda Mg^{+2} miktarı daha

yüksektir. Tüm suların kurak ve yağışlı dönemdeki iyon derişimleri arasında önemli bir farklılık yoktur.

Sondaj suları ve Pınarbaşı Kaynağı'ndaki florür miktarı diğer kaynak sularından 10-20 kat daha yüksektir. Flor karbonatlı tortul kayalarda florit olarak bulunur, kireçtaşları 200 ppm, şeyller 1000 ppm'e kadar flor içerir (Frencken et al. 1992). Örneklenen sulardaki florürün kaynağı inceleme alanı akifer kayalarında (Yılanlı formasyonu) olasılı olarak bulunan floritin çözünmesidir. Honaz şeylinden de bir miktar katkı olasıdır. Sondaj suları ve Pınarbaşı Kaynağı su-kaya etkileşimi sürelerinin diğer sulara göre göreceli olarak uzun olması ve termal su katkısı nedeniyle daha fazla F^{-} içerirler. Sulardaki diğer iyonların derişimleri oldukça düşüktür ve maksimum değerler NO_3^{-} : 3,35 mg/l, Br^{-} : 0,023 mg/l ve Li^{+} : 0,30 mg/l'dir (Semerci Aygün 2019).

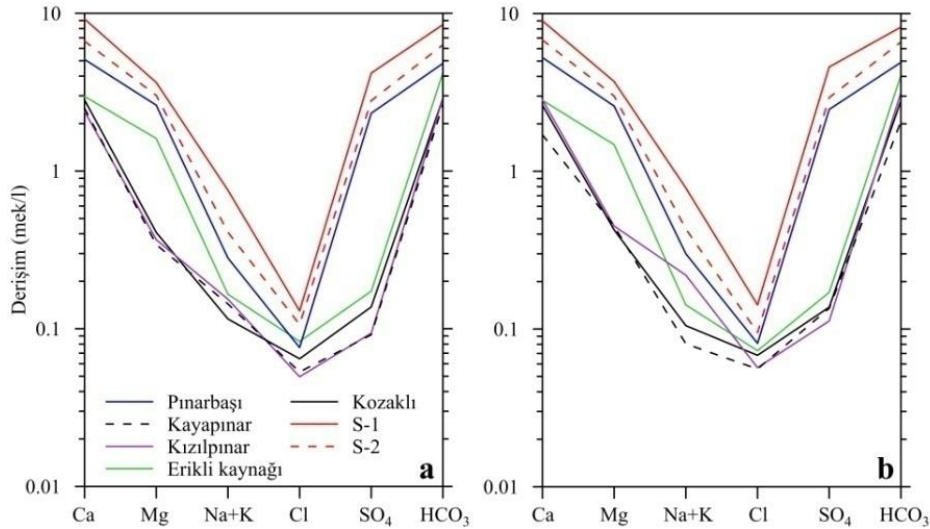
Sulardaki molar Na^{+}/Cl^{-} oranı 1 civarında ise sudaki sodyumun kaynağı halit çözünmesidir, bu oran 1'den büyükse sodyumun kökeni tipik olarak silikat ayrışma reaksiyonlarıdır (Meybeck 1987). İnceleme alanı sularında bu oran 1,22 ile 5,35 ve baz değişim indeksi de $(bei=(Cl-(Na+K))/Cl)$, Schoeller 1934) – 0,44 ile –4,81 arasında değişmektedir. Metamorfik ve tortul kayalardan gelen suların bei değerleri silikatların bozunumundan ortaya çıkan Cl^{-} iyonlarından daha fazla alkali iyonlarının suya karışması nedeniyle genellikle negatiftir (Şahinci 1991). Ayrıca negatif bei değeri sudaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının akifer kayalarda bulunan kil minerallerindeki Na^{+} ve K^{+} iyonları ile değişiminden kaynaklanır. $Na^{+}/(Na^{+}+Cl^{-})$ oranı 0,6'dan büyük olduğunda yeraltısuyundaki sodyumun kaynağı silikat ayrışması yanı sıra katyon değişimidir (Adomako et al. 2011). Buradan hareketle sulardaki Na^{+} fazlalığının Yılanlı ve Zeybekölen formasyonlarındaki kil ve şeylerin ayrışması ve katyon değişiminden kaynaklandığı söylenebilir. İnceleme alanında örneklenen sulardaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının başlıca kaynağı karbonatlı kayaların çözünmesidir. Sulardaki molar Ca^{+2}/Mg^{+2} oranı 1 ise dolomit çözünmesinin egemen olduğunu, daha yüksek oranlar ise kalsit mineralinin çözünmesinin daha fazla katkı sağladığını gösterir

(Mayo and Loucks 1995). Pınarbaşı ve Erikli kaynakları ile S-1 ve S-2 sondaj sularında bu oran 1,63 ile 2,53 arasında olup diğer kaynak sularında daha yüksektir (3,79–7,32). Sular Ca^{+2} – Mg^{+2} diyagramında 1:1 çizgisinin sağında yer alırlar ve kalsitçe zengin bir karbonat kaynak kayayı işaret ederler (Şekil 7a). Benzer şekilde suların Pınarbaşı ve Kozaklı kaynakları ile sondaj sularının Ca^{+2}/HCO_3^- oranları 0,47 ile 0,55 arasındadır. Kayapınar, Kızılpınar ve Erikli kaynak sularının Ca^{+2}/HCO_3^- oranları daha düşüktür (0,35–0,47). Suların Ca^{+2} – HCO_3^- diyagramındaki konumlarının 0,5:1 çizgisi üzerinde ve civarında olması Ca^{+2} ve HCO_3^- kaynağı için egemen reaksiyonun kireçtaşı (kalsit) ayrışması olduğunu gösterir (Şekil 7b).

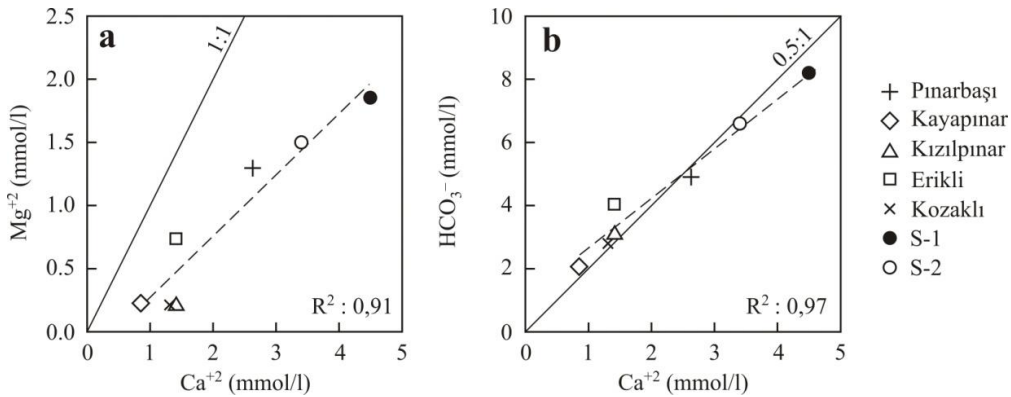
Beslenme alanı sularının Ca^{+2}/SO_4^{-2} oranları 12,6 ile 27,3 arasında olup bu suların kimyasal kompozisyonunda jips çözünmesinin etkin olmadığına işaret eder. Pınarbaşı Kaynağı ve sondaj

suları için daha düşük olan oranlar (1,62–2,38) sularındaki Ca^{+2} ve SO_4^{-2} iyon derişimlerinin jips çözünmesiyle bir miktar arttığını göstermektedir. İnceleme alanındaki karst akiferi oluşturan denizel kökenli karbonatlı kayaların içerisindeki jips çökelleri sularındaki sülfat iyonunun başlıca kaynağıdır.

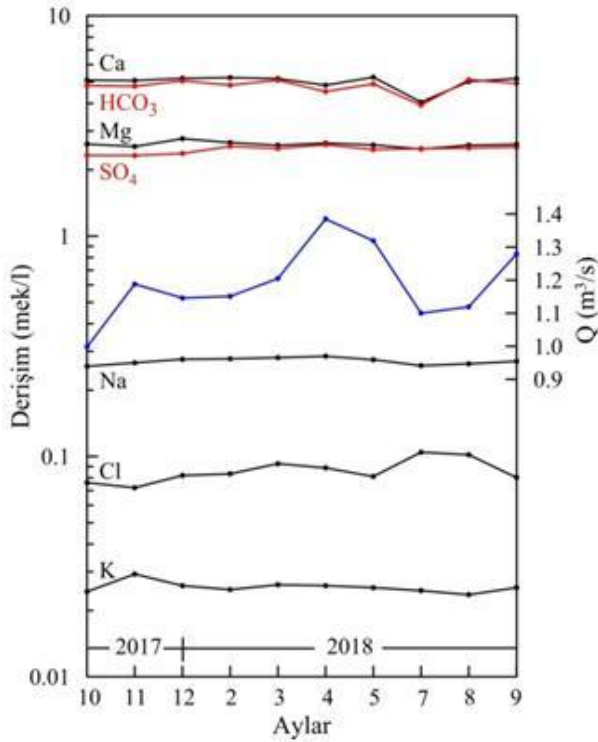
Pınarbaşı Kaynağı'nın iyon miktarlarının aylara göre değişimi ve bu değişimin kaynak debisi ile ilişkisi Şekil 8'de verilmiştir. Ca^{+2} ve HCO_3^- iyon derişimleri hemen hemen aynı olup izleme periyodu boyunca birbiriyle çakışmışlardır. En düşük miktarlar kurak dönem sonundadır (Temmuz-Ağustos 2017). Mg^{+2} ve SO_4^{-2} iyonları da birbirine benzer miktarlarda olup zaman içinde ve debiye bağlı bir değişim göstermemişlerdir. Diğer iyonların sudaki miktarları çok düşük olduğundan derişim-debi ilişkisi kurmak gerçekçi olmayacaktır.



Şekil 6. Suların yarı logaritmik diyagramı. (a) Ekim-2017, (b) Mayıs-2018.



Şekil 7. Örneklenen suların (a) Ca^{+2} – Mg^{+2} ve (b) Ca^{+2} – HCO_3^- diyagramı.



Şekil 8. Pınarbaşı kaynağı iyon derişiminin mevsimsel değişimi.

Schuster and White (1971) karst kaynaklarındaki en önemli kimyasal değişkenin toplam sertlik olduğu varsayımı ile kaynak kimyasındaki mevsimsel değişimlerin toplam sertlik için değişim katsayısının (CV) hesaplanarak sayısal olarak ifade edilebileceğini ve CV değerine göre (CV=standart sapma×100/aritmetik ortalama) kaynakların yaygın akımlı (diffuse flow) ve kanal akımlı (conduit flow) olarak sınıflanabileceğini belirtmişlerdir. Schuster and White (1971)'a göre çok düşük CV değerleri (<5) yaygın akım tipini gösterirken White (1999) %3'den küçük CV değerlerinin kırıklı bir akiferden boşalan kaynağı, %20'den büyük değerlerin ise açık kanallar içeren bir akiferden boşalan kaynağı işaret ettiğini belirtmiştir. Pınarbaşı Kaynağı'nın toplam sertliği 381 mg/l CaCO₃ aritmetik ortalama ve 20,4 mg/l CaCO₃ standart sapmayla, 327 (Temmuz 2018) ile 398 (Aralık 2017) mg/l CaCO₃ arasında değişmektedir. Buradan hesaplanan CV değeri %5,34'dür. Bu değer Schuster and White (1971) tarafından yaygın akım için verilen değere oldukça yakındır. Buna göre Pınarbaşı Kaynağı boşalım katsayısı ile de uyumlu şekilde egemen olarak kırıklı, çatlaklı ve dar çözünme boşluklu bir akiferden (Yılanlı formasyonu) boşalmaktadır. Kaynağın iyon derişiminde önemli bir mevsimsel değişimin

olmayışı akiferin depolama kapasitesinin büyük olduğunu göstermektedir.

Örneklenen suların örnekleme sıcaklığı ve pH'ındaki kalsit doygunlukları (Sc) PhreeQC programı (Parkhurst and Appelo 1999) ile hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir. Çizelgedeki negatif değerler (doygunluk altı) suyun kalsit mineralini çözüdürmeye, pozitif değerler (doygunluk üstü) ise çökelmeye eğilimli olduğunu göstermektedir. Pınarbaşı Kaynağı genellikle kalsitçe doğun veya dengededir. Sadece debisinin en düşük Ca²⁺ ve HCO₃⁻ miktarının en az olduğu dönemde doğun değildir. Kızılpınar ve Kayapınar (Mayıs–2018 örneği) dışındaki kaynak ve sondaj suları kalsitçe doğundur. İnceleme alanı ve yakın çevresindeki yaygın ve kalın travertenler geçmişte kalsitçe doğun yüksek debili kaynakların varlığını göstermektedir. Pınarbaşı Kaynağı ve S–1 sondaj suyu karışarak 1595 m uzunluğundaki bir açık kanalla sulamaya verilmektedir. Kanal başı ve kanal sonunda pH değeri 7,16'dan 7,98'e yükselmekte, Ca²⁺ ve serbest CO₂ değerleri sırasıyla 106 mg/l'den 84 mg/l'ye ve 69 mg/l'den 38 mg/l'ye düşmekte (Horvatinčić et al. 2005) ve kanal sonundaki yapay şelalede su tufa çökeltilmektedir.

Çizelge 3. İnceleme alanı sularının kalsit doygunluğu.

Adı	Tarih	Sc	Adı	Tarih	Sc
Pınarbaşı	10/2017	0,17	Kayapınar	10/2017	0,51
	11/2017	0,14		05/2018	-0,22
	12/2017	0,11	Kızılpınar	10/2017	-0,10
02/2018	0,02	05/2018		-0,13	
	03/2018	0,31	Erikli	10/2017	0,77
	04/2018	-0,04		05/2018	0,25
	05/2018	0,18	Kozaklı	10/2017	0,83
	07/2018	-0,22		05/2018	0,08
	08/2018	0,19	S–1	10/2017	0,15
	08/2018	-0,03		05/2018	0,15
			S–2	10/2017	0,19
				05/2018	0,21

5.3 Suların izotop kompozisyonları

5.3.1 δ¹⁸O ve δD (δ²H)

Çalışma kapsamında suların kökeni ve nitel olarak beslenme alanı yüksekliklerine yaklaşımlar sağlamak için su örneklerinden δ¹⁸O ve δD analizi yapılmış ve sonuçları Çizelge 4'de sunulmuştur. Örneklenen

suların $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ‰-8,43 ile ‰-9,66 ve δD değerleri ‰-54,37 ile ‰-60,28 arasındadır. Su örneklerinin $\delta^{18}\text{O}$ - δD diyagramında köken değerlendirmesi için Küresel Meteorik Su Doğrusu (KMSD) ve Akdeniz Meteorik Su Doğrusu (AMSD) kullanılmıştır. AMSD'nin denklemi Eşitlik (5)'de (Gat and Carmi 1970) ve buharlaşma etkisinde olmayan atmosferik sular için geçerli olan KMSD'nin denklemi Eşitlik (6)'da (Craig 1961) verilmiştir.

$$\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 22 (\text{‰SMOW}) \quad (5)$$

$$\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10 (\text{‰SMOW}) \quad (6)$$

$\delta^{18}\text{O}$ - δD diyagramında (Şekil 9) su örneklerinin tümünün KMSD ile AMSD arasında kalması meteorik kökene işaret etmekte ve suların Akdeniz kökenli nemin oluşturduğu yağışlardan beslendiğini göstermektedir. Pınarbaşı Kaynağı'nın Ekim-2017 ile Eylül-2018 aralığındaki δD ve $\delta^{18}\text{O}$ değerleri sırasıyla ‰-55,30 ile ‰-57,28 ve ‰-8,86 ile ‰-9,15 arasında olup önemli bir mevsimsel farklılık yoktur. Erikli, Kozlupınar, Kızılpınar ve Kayapınar kaynaklarının $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerlerinin daha negatif olması bu kaynakların Pınarbaşı Kaynağı'na göre daha yüksek kesimlerden beslendiğine işaret etmektedir. Bu kaynak sularında Mayıs ayı örneklerinin Ekim ayı örneklerine göre daha pozitif olması olasılıkla kar örtüsünden erime öncesi süblimasyon ve süzülme öncesi buharlaşma nedeniyle.

Döteryum fazlası değerleri ($d=\delta\text{D}-8\times\delta^{18}\text{O}$), hidrolojik çevrim sürecinde coğrafi konum, iklim koşulları, nem, buharlaşma ve yağışa bağlı olarak değişmektedir. İnceleme alanı sularının döteryum fazlası değerleri birbirine yakın olup ‰13,07 ile ‰17,62 arasında değişmektedir (ortalama ‰16,01). Bu da suların aynı yağış rejiminin etkisi altında olduğunun göstergesidir.

5.3.2 Trityum (T)

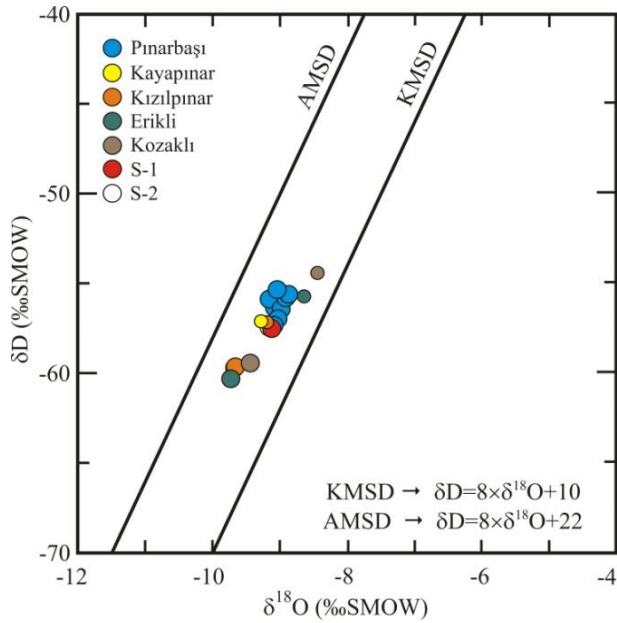
Atmosferdeki 10^{18} hidrojen atomundan sadece bir tanesi trityumdur (Evans 1996). Yarılanma ömrü 12,32 yıl olan (Lucas and Unterweger 2000) trityum (^3H) beta bozuşması yoluyla ^3He izotopuna dönüşür. 1953-1964 yılları arasındaki nükleer denemeler nedeniyle atmosferdeki doğal (kozmojenik) trityum

değeri (25 TU) giderek artmış ve 1964 yılında maksimum değerine (2200 TU) ulaşmıştır (Faure 1986). Bu tarihten sonra atmosferde azalmaya başlayan trityum değeri yaklaşık son 25 yılda normal değerlerine gelmiştir. Bu durum, hidrolojik sistemlerde yeraltısu yaşının belirlenmesinde trityumun yararlı bir araç olarak kullanılmasını sağlamıştır. Buna göre trityum değeri <0,8 TU olan suların 1952 yılı öncesi beslenmeye sahip suları, 0,8 ile ~4 TU arasında olan suların güncel ve yaşlı suların karışımını (10-50 yıl), 5-15 TU arasında olan suların ise güncel beslenmeli suları (5-10 yıl) temsil ettiği ifade edilmiştir (Clark and Fritz 1997).

Nisan-2017 ve Nisan-2018 arasında Akdeniz yağışlarında belirlenen trityum değeri 1,62 ile 10,07 TU arasındadır (ortalama 4,52 TU) (Juhlke et al. 2020). Antalya yağışlarından 2012-2016 yılları arasında ölçülen trityum değeri ise ilkbahar ve yaz yağışlarında daha yüksek olmak üzere 1,50-7,75 TU (ortalama 3,65 TU) aralığında olmuştur (Dilaver vd. 2018). İnceleme alanında Kasım-2017'de alınan yağmur suyu örneğindeki trityum değeri 5,64 TU olup Akdeniz yağışı ortalama değerleri ile uyumludur. Pınarbaşı Kaynağı'ndan Ekim-2017 ve Eylül-2018 arasında alınan 6 örneğin trityum değerleri 1,64 (Ağustos) ile 3,87 TU (Nisan) aralığındadır. S-1 sondaj suyundaki trityum Ekim ayında 1,39 TU, Mayıs ayında ise 0,83 TU olup birbirine yakın değerlerdedir. Bu sondajdaki düşük trityum değerleri sondaj suyunun soğuk yeraltı suyu ve jeotermal suyun karışımını yansıtması nedeniyle. Trityum değerleri soğuk su akiferi ve termal akiferdeki basınç değişimleri ve dolayısıyla değişen karışım yüzdeleri ile kontrol edilmektedir. S-2 sondaj suyunda trityum değerleri aynı aylar için 0,95 TU'dan Pınarbaşı Kaynağı'na benzer olarak 2,35 TU'ya yükselmiştir. Beslenme alanını temsil eden Kayapınar, Kızılpınar, Kozaklı ve Erikli kaynaklarında ise trityum değerleri daha yüksektir (2,88-5,11 TU arasında). Bu durumda inceleme alanı sularının yaşlarının 10 ile 50 yıl arasında olduğu ve sondaj sularının kaynak sularına göre daha derin dolaşım yaptığı söylenebilir. Sadece 1 yağış örneğinin trityum değeri sisteme trityum girdisini temsil edemez. Ancak bu değer (5,64 TU)

Çizelge 3. İnceleme alanı sularının izotop değerleri.

Adı	Tarih	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VSMOW)	δD	T (TU)	Adı	Tarih	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VSMOW)	δD	T (TU)
Pınarbaşı	10/2017	-9,08	-57,28	2,19±0,30	Kayapınar	10/2017	-9,66	-59,66	2,88±0,30
	11/2017	-9,02	-56,92	-		05/2018	-9,27	-57,07	4,94±0,48
	12/2017	-9,03	-55,30	-	Kızılpınar	10/2017	-9,65	-59,61	3,53±0,33
	02/2018	-9,15	-55,83	-		05/2018	-9,18	-57,12	5,11±0,48
	03/2018	-9,12	-55,78	-	Kozaklı	10/2017	-9,43	-59,40	3,07±0,32
	04/2018	-	-	3,87±0,51		05/2018	-9,72	-60,28	4,74±0,48
	05/2018	-8,90	-55,76	2,06±0,47	Erikli	10/2017	-8,63	-55,68	2,95±0,31
	07/2018	-9,07	-56,30	2,69±0,46		05/2018	-8,43	-54,37	4,63±0,46
	08/2018	-8,86	-55,57	1,64±0,41	S-1	10/2017	-9,11	-57,48	1,39±0,28
	09/2018	-8,97	-56,38	1,73±0,41		05/2018	-	-	0,83±0,40
					S-2	10/2017	-9,15	-57,40	0,95±0,27
						05/2018	-	-	2,31±0,42
					Yağmur	11/2017	-	-	5,64±0,38

Şekil 9. Suların $\delta^{18}\text{O}$ – δD grafiği.

baz alınırsa beslenme alanındaki kaynaklardan boşalan suların sirkülasyon yaşı 10 yıldan daha genç olabilir. Bu yaşlar özellikle Pınarbaşı Kaynağı ve sondaj suları için farklı akım kanallarından gelen sular veya jeotermal su karışımı olasılığı nedeniyle gerçeği yansıtmayabilir. Beslenme alanı kaynak sularının Mayıs ayı trityum değerlerinin Ekim ayı değerlerinden yüksek olmasının nedeni olasılıkla bahar aylarında eriyen kar sularının akiferi beslemesidir.

5.3.4 Suların içme ve sulamada kullanılabilme özellikleri

Örneklenen suların içilebilirliği İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY)(2005)'de verilen standartlara göre incelenmiştir. İçilebilirlik değerlendirmesi sadece ölçülen ve analizi yapılan parametrelere göre yapılmıştır. Örneklenen tüm sular Ei , pH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , F^- , NO_2^- , NO_3^- , Al, B, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb ve Se değerlerine göre içilebilir sulardır. Ancak arsenik değerleri göz önüne alındığında Pınarbaşı (18,7–21,2 $\mu\text{g/l}$) ve Erikli (11,4–11,5 $\mu\text{g/l}$) kaynakları ile S-1 (92,1–98,2 $\mu\text{g/l}$) ve S-2 (24,9–26,1 $\mu\text{g/l}$) nolu sondaj suları limit değer (10 $\mu\text{g/l}$) üzerindeki As değerleri nedeni ile içilemezler (Semerci Aygün 2019). Özellikle S-1 nolu sondaj suyunda As limit değerden 10 kat daha fazladır. Buna göre örneklenen sulardan sadece Kozaklı, Kızılpınar ve Kayapınar kaynakları suyu içilebilir özelliktedir. Bunun yanında, suların İTASHY standardında yer alan ancak bu çalışmada analizi yapılmayan radyoaktivite, tarımsal kalıntı, bakteri gibi diğer parametreler açısından da incelenmesi gerekir.

Suların sulamada kullanılabilme özelliklerini belirleyen ölçütler genellikle pH, toplam sertlik, Ei , %Na, sodyum adsorbsiyon oranı (SAR), kalıntı sodyum karbonat (RSC) ve magnezyum oranı

(MR)'dir. Suların Eİ ve %Na (%3,2 ile 6,3 arasında) değerlerine göre yapılan Wilcox (1954) sınıflamasına göre kaynak suları çok iyi-iyi, sondaj suları iyi-kullanılabilir sular sınıfındadır. Suların Eİ ve SAR değerlerini baz alan sınıflamaya göre (ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı, Richards 1954) sondaj suları C₃S₁ (tuzlu, az sodyumlu) sınıfında yer alırlar ve tuzlu olmaları nedeniyle iyi akaçlamaya sahip arazilerde tuza dayanıklı bitkilerin sulamasında kullanılabilirler. Pınarbaşı ve diğer kaynak suları genellikle C₂S₁ sınıfında (orta tuzlu-az sodyumlu) sular olup bu sularla akaçlaması orta düzeyde olan topraklarda tüm bitkiler sulanabilir. Suların bor ve klorür değerleri düşüktür ve sulanan bitkiler üzerinde bor ve klorür tehlikesi oluşturmazlar.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Pınarbaşı Kaynağı Menderes Masifi'ne ait Mesozoyik yaşlı Yılanlı formasyonunun rekristalize kireçtaşlarından boşalmaktadır. Kaynağın çalışma dönemi içindeki debi değerleri ve debi değişim yüzdesine göre Pınarbaşı Kaynağı "fazla yüksek debili kaynaklar" ve "debi değişimi orta kaynaklar" sınıflarında yer alır. Aylık toplam yağış miktarları ile Pınarbaşı Kaynağı'nın debi değerleri arasında anlamlı bir ilişki olmaması kaynağın debisinin aylık yağışların etkisinde olmadığını göstermektedir. Pınarbaşı Kaynağı'nın debisi anlık, mevsimsel veya yıllık yağışlardan çok yıllık ortalama yağıştan eklenik sapma değerleri ile kontrol edilmektedir.

Kurak dönemde kaynak boşalım analizinden elde edilen boşalım katsayısı değeri (0,0020 gün⁻¹) kaynağın boşalımının egemen olarak katman yüzeyi, kırık ve çatlaklar gibi süreksizlikler yoluyla olduğunu göstermiştir. Kaynak suyunun toplam sertlik değişim katsayısı da bu yorumu desteklemektedir. Buna göre olağanüstü koşullar dışında (iklim değişimi-uzun süreli kuraklık, çeşitli amaçlarla yapılacak patlatmalar veya magnitudü yüksek depremlerin etkisiyle kaynak debisinin önemli ölçüde azalması ya da kuruması gibi) Pınarbaşı Kaynağı'nın debisi uzun dönem su temini planlamaları için bir risk oluşturmamaktadır. Son dönemde Pınarbaşı Kaynağı'nın debisindeki görece azalma olasılıkla son

yıllarda beslenme alanına düşen kar miktarının önemli oranda azalması nedeniyledir.

Pınarbaşı Kaynağı'nın toplam iyon derişimi beslenme alanındaki kaynaklardan yüksek, yakınındaki sondajlardan ise düşüktür. Sondaj sularına derindeki düşük entalpili bir jeotermal sistemden aktif Honaz Fayı yoluyla bir miktar jeotermal su karışımı söz konusudur. Beslenme alanı kaynakları genellikle Ca-HCO₃, Pınarbaşı Kaynağı ve sondaj suları Ca-Mg-HCO₃-SO₄ tipindedir. Pınarbaşı Kaynağı'nın kimyasal kompozisyonunda izleme döneminde önemli bir mevsimsel değişim gözlenmemesi akiferin depolama kapasitesinin büyük olduğunu göstermektedir.

Örneklenen kaynak ve sondaj suları meteorik kökenli olup Akdeniz kökenli nemin oluşturduğu yağışlardan beslenmektedir. Döteryum fazlası değerlerinin birbirine yakın olması suların aynı yağış rejiminin etkisi altında olduğuna işaret etmektedir. Yüksek kotlardaki kaynak sularının trityum değerlerinin yağmur suyundaki değerlere yakın olması bu kaynakların beslenmesinde güncel yağışların etkili olduğunu göstermektedir. Pınarbaşı kaynağı ve S-2 sondaj suları nispeten derin dolaşım yaparlar. S-1 sondaj suyu jeotermal su karışımı nedeniyle en düşük trityum değerine sahiptir.

Pınarbaşı Kaynağı'nın suyu yüksek As içeriği nedeniyle sofraya suyu olarak kullanılamaz. Ancak Denizli il merkezinde içme suyu ihtiyacının karşılanmasında güçlük çekildiğinde, zorunlu kalırsa, As miktarı düşük olan sularla arsenik miktarı limit değeri aşmayacak şekilde karıştırılarak içilebilir. Honaz ilçesindeki Akbaş Barajı suyu bu karışıma girebilir. Bu durumda kaynak ve baraj suyu kimyasının (özellikle arsenik açısından) izlenmesi gerekir.

Teşekkür

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2017FEBE048).

7. Kaynaklar

- Adomako, D., Osae, S., Akiti, T.T., Faye, S. and Maloszewski, P., 2011. Geochemical and Isotopic Studies of Groundwater Conditions in the Densu River Basin of Ghana. *Environmental Earth Sciences*, **62**, 1071–1084.
- Atkinson, T.C., 1977. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset, England. *Journal of Hydrology*, **35**, 93–100.
- Bernoulli, D., Graciansky, P.C. and Monod, O., 1974. The extension of the Lycian Nappes (SW Turkey) into the Southeastern Aegean Islands. *Ecolgae Geologicae Helvetiae*, **67**, 39–90.
- Bicalho, C., Batiot-Guilhe, C., Deidel, J.L., Van Exter, S. and Jourde, H., 2012. Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer. *Journal of Hydrology*, **450-451**, 206–218.
- Bozkuş, C., Kumsar, H., Özkul, M. and Hançer, M., 2001. Seismicity of active Honaz fault under an extensional regime. International Earth Science Colloquium of the Aegean Region (IESCA), Proceedings, 7-12, İzmir, Turkey.
- Clark, I.D. and Fritz, P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Press, 342.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Çeliker, M., Yükseler, U. and Dursun, Ö. F., 2021. Trend analyses for discharge-recharge of Tacin karstic spring (Kayseri, Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, **184**, 104344.
- Dilaver, A.T., Aydın, B., Özyurt, N.N. ve Bayarı, C.S., 2018. Türkiye Yağışlarının İzotop İçerikleri (2012-2016). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü-Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü-Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Ekmeççi, M., 2005. Pesticide and nutrient contamination in the Kestel polje–Kirkgoz karst springs, Southern Turkey. *Environmental Geology*, **49**, 19–29.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S. ve Elmacı, H., 2011. 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Denizli (NJ35-12) Paftası, Seri No. 12, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Erakman, B., Meşhur, M., Gül, M.A., Alkan, H., Öztaş, Y. ve Akpınar, M., 1986. Fethiye-Köyceğiz-Tefenni-Elmalı- Kalkan arasında kalan alanın jeolojisi. Türkiye Altıncı Petrol Kongresi, Tebliğler, 23–32, Ankara.
- Evans, E.A., 1966. Tritium and its Compounds. D. Van Nostrand.
- Faure, G., 1986. Principles of Isotope Geology. John Wiley and Sons.
- Frencken, J.E., 1992. Endemic Fluorosis in Developing Countries, Causes, Effects and Possible Solutions. Publication number 91.082, NIPG-TNO, 98.
- Gabrovsek, F., Martin Knez, M., Kogovsek, J., Mihevc, A., Mulec, J., Perne, M., Petric, M., Pipan, T., Prelovsek, M., Slabe, T., Sebela, S. and Ravbar, N., 2011. Development challenges in karst regions: sustainable land use planning in the karst of Slovenia. *Carbonates and Evaporites*, **26**, 365–380.
- Gat, J.R. and Carmi, I., 1970. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, **75**, 3032–3048.
- Gökğöz, A., Mutlu, H. ve Akman, M.A., 2022. Hydrochemical characteristics and geothermometry applications of thermal waters in the Çürüksu Graben, western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **31**, 260-283.
- Gökğöz, A., Demirel, Ö. ve Asal, İ., 2015. Pınarbaşı Karst Kaynağı ve Çevresinin (Honaz-Denizli) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelemesi. Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu MÜHJEO'2015, Trabzon, 428–435.
- Göktaş, F., 1990. Denizli M22-b1 , M22-b2 ve M22-b3 paftalarının Jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Raporu, No: 9114, İzmir.
- Gündoğan, İ., Helvacı, C. and Sözbilir, H., 2008. Gypsiferous carbonates at Honaz Dağı (Denizli): First documentation of Triassic gypsum in western Turkey and its tectonic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, **32**, 49–65.

- Hakyemez, Y.H., 1989. Geology and stratigraphy of the Cenozoic sedimentary rocks in the Kale-Kurbalık area, Denizli-southwestern Turkey. *Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) Bulletin*, **109**, 1–14.
- Hershey, R.L., Mizell, S.A. and Earman, S., 2010. Chemical and physical characteristics of springs discharging from regional flow systems of carbonate-rock province of the Great Basin, western United States. *Hydrogeology Journal*, **18**, 1007–1026.
- Horvatinčić, N., Özkul, M., Gökgöz, A. and Barešić, J., 2005. Isotopic and geochemical investigation of tufa in Denizli province, Turkey. 1st International Symposium on Travertine, Denizli, Turkey. 162–170.
- İTASHY, 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. 17.02.2005, 25730 sayılı resmi gazete, Ankara.
- Jemcov, I., 2014. Water supply potential and optimal exploitation capacity of karst aquifer systems. *Environmental Earth Sciences*, **71**, 543-551.
- Juhlke, T.B., Sültenfuss, J., Huneau, F., Garel, E., Santoni, S., Barth, J.A.C. and van Geldern, R., 2020. Tritium as hydrological tracer in Mediterranean precipitation events. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 3555–3568.
- Kaçaroğlu, F., 2012. Hydrogeology of the Gökpınar karst springs, Sivas, Turkey. *Acta Carsologica*, **41**, 219–233.
- Konak, N. ve Şenel, M., 2002. 1/500.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Denizli Paftası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Konak, N., Akdeniz, N. ve Öztürk, E.M., 1987. Geology of the south of Menderes Massif. I.G.C.P. Project no:5, Correlation of Variscan and pre-Variscan events of the Alpine Mediterranean mountain belt, field meeting. Mineral Research and Exploration Institute, Turkey, 42-53.
- Korkmaz, N., 1989. Akiferlerin Boşalım Katsayılarına Göre Gruplandırılması Üzerine Bir Araştırma. *DSİ Teknik Bülteni*, **69**, 51-63.
- Lopez-Chicano, M., Bouamama, M., Vallejos, A. and Pulido-Bosch, A., 2001. Factors which determine the hydrogeochemical behaviour of karstic springs. A case study from the Betic Cordilleras, Spain. *Applied Geochemistry*, **16**, 1179–1192.
- Lucas, L.L. and Unterweger, 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**, 541-549.
- Maillet, E.T., 1905. Essai D'hydraulique Souterraine et Fluviale. A. Herman, 218.
- Malík, P. and Vojtková, S., 2012. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environmental Earth Sciences*, **65**, 2245–2257.
- Mayo, A.L. and Loucks, M.D., 1995. Solute and isotopic geochemistry and ground water flow in the central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, **172**, 31–59.
- Meinzer, O.E., 1923. Outline of groundwater hydrology with definitions. U.S. Geological Survey Water Supply Paper-494, U.S. Government Printing Office, 48–54.
- Meşhur, M. ve Akpınar, M., 1984. Yatağan-Milas-Bodrum ve Karacasu-Kale-Acıpayam-Tavas civarlarının jeolojisi ve petrol olanakları. Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı Arama Grubu Rapor No. 1963.
- Meybeck, M., 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, **287**, 401–428.
- Okay A.İ., 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. and Kaplan, A., 1988. Research on the origin of the karst waters in Yukarı Çürüksu plain using isotope techniques. Devlet Su İşleri Raporu, Ankara.
- Özkul, M., Kele, S., Gökgöz, A., Shen, C.C., Jones, B., Baykara, M.O., Fórizs, I., Németh, T., Chang, Y.W. and Alçıçek, 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,

- Özler, H.M., 1996. Büyük Menderes Havzası Yukarı Çürüksu kesiminin hidrojeoloji incelemesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 189.
- Özler, H.M., 2000. Hydrogeology and geochemistry in the Çürüksu (Denizli) hydrothermal field, western Turkey. *Environmental Geology*, **39**, 1169-1180..
- Paiva, I. and Cunha, L., 2020. Characterization of the hydrodynamic functioning of the Degracias-Sicó Karst Aquifer, Portugal. *Hydrogeology Journal*, **28**, 2613–2629.
- Parkhurst, D.L. and 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. Water-Resources Investigations Report 99–4259, U.S. Geological Survey, 312.
- Poisson, A., 1977. Resherches geologiques dans les Taurides occidentales (Turquie), Doktora Tezi, Paris-Sud Üniversitesi, Paris, 795.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline alkali soils. United States Department of Agriculture.
- Schoeller, H., 1934. Les echanges de bases dans les eaux souterraines; trois exemples es Tunisie. *Bulletin de la Société géologique de France*, **4**, 389–420.
- Semerci Aygün, B., 2019. Pınarbaşı karst kaynağının (Honaz-Denizli) boşalım hidrodinamiği ve hidrokimyasal özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 79.
- Shuster, E.T. and White, W.B., 1971. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, **14**, 93–128.
- Sun, S., 1990. Denizli-Uşak arasının jeolojisi ve linyit olanakları. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Rapor No. 9985, Ankara.
- Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası. Reform Matbaası, 548.
- Şimşek, Ş., 1984. Denizli-Sarayköy-Buldan Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları. *İstanbul Üniversitesi Yer Bilimler Fakültesi Yayın Organı*, **3**, 145-162.
- Taner, G., 2001. Denizli Bölgesi Neojen'ine ait katların stratigrafik konumlarında yeni düzenleme. 54. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, 54-79.
- White, W.B., 1999. Groundwater Flow in Karst Aquifers. J.W. Delleur (editor), *The Handbook of Groundwater Engineering*, CRC Press, 1–36.
- Wilcox, L.V., 1955. Classification and Use of Irrigation Water. United States Department of Agriculture, Circular No. 969.
- Yüce, G., 2007. Yenişehir ve Cüdeyde (Reyhanlı – Hatay) Karst Kaynaklarının Boşalım Hidrodinamiği ve Hidrojeokimyasal Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **20**, 159-188.