

Araştırma Makalesi / Research Article

Tarsus Kıyı Akiferi'nde (Mersin) Meydana Gelen Tuzlanmanın Nedenlerinin Araştırılması

An Investigation into the Causes of Salinization in the Tarsus Coastal Aquifer (Mersin)

Onur GÜVEN^{1*} , Cüneyt GÜLER² , Mehmet Ali KURT³ , Ümit YILDIRIM⁴ 

¹ Bayburt Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı-Bayburt

² Mersin Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü-Mersin

³ Mersin Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü-Mersin

⁴ Bayburt Üniversitesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü-Bayburt

Geliş (Received): 11 Ocak (January) 2023, Düzeltme (Revised): 17 Ocak (January) 2023, Kabul (Accepted): 03 Şubat (February) 2023

ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye'nin Doğu Akdeniz bölgesinde yer alan Tarsus Kıyı Akiferi'nde (Mersin) görülen tuzlanma olayının nedenleri araştırılmıştır. Özellikle Akdeniz havzası genelinde kritik bir problem olan yeraltı sularının tuzlanması olayı, deniz suyu girişi, iklim değişikliği, jeojenik etkiler ve antropojenik faaliyetler (kirlilik ve hidrolojik müdahaleler) gibi süreçlerin ve mekanizmaların bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda, Eylül 2020'de yapılan saha çalışmasında 87 yeraltı suyu kuyusundan ve deniz suyundan (Akdeniz) örnekler alınmıştır. Alınan su örneklerinin sıcaklık, elektriksel iletkenlik, pH, tuzluluk, indirgenme-yükseltgenme (redoks) potansiyeli, çözünmüş oksijen ve toplam çözünmüş madde değerleri arazide ölçülmüştür. Su örneklerinin majör iyon ve iz element içerikleri (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , B, Br, Sr ve Li) laboratuvarında spektrometrik (ICP-MS), spektrofotometrik ve volumetrik (titrasyon) yöntemlerle analiz edilmiştir. Analiz edilen bu parametrelere ait tematik dağılım haritaları bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Alınan su örneklerinin hidrokimyasal fasiyesleri, Piper ve HFE diyagramları kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, bölgede görülen tuzlanma mekanizmalarını açıklamak amacıyla, çeşitli majör iyonlara ve/veya iz elementlere ait oranların kullanıldığı ikili (x-y) grafikler oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre; Tarsus Kıyı Akiferi'ni etkileyen tuzlanma olayının; deniz suyu girişi, Messiniyen evaporitlerinin (anhidrit, jips ve halit) çözünmesi ve antropojenik (tarımsal ve endüstriyel) faaliyetler sonucunda meydana geldiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tuzlanma, İyon Oranları, HFE-Diyagramı, Hidrojeokimya, Tarsus Kıyı Akiferi

ABSTRACT

This study investigated the causes of the salinization occurring in the Tarsus Coastal Aquifer (Mersin) located in the Eastern Mediterranean region of Turkey. Groundwater salinization, which is a critical problem, especially in the Mediterranean basin, occurs as a result of processes and mechanisms such as seawater intrusion, climate change, geogenic effects and anthropogenic activities (pollution and hydrological interventions). In this context, samples were collected from 87 groundwater wells and seawater (Mediterranean) during a field study conducted in September 2020. The temperature, electrical conductivity, pH, salinity, reduction-oxidation (redox) potential, dissolved oxygen, and total dissolved solid values of collected water samples were measured in the field. The major ion and trace

element contents (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , B, Br, Sr ve Li) of the water samples were analyzed in a laboratory by spectrometric (ICP-MS), spectrophotometric, and volumetric (titration) methods. Thematic distribution maps of the analyzed parameters were created using a Geographic Information System (GIS) software. The hydrochemical facies of the water samples were determined using Piper and HFE diagrams. In order to explain the salinization mechanisms occurring in the region, binary (x-y) graphs were created using the ratios of various major ions and/or trace elements. According to the results obtained, it was revealed that the salinization phenomenon affecting the Tarsus Coastal Aquifer occurred as a result of seawater intrusion, the dissolution of Messinian evaporites (anhydrite, gypsum and halite) and anthropogenic (agricultural and industrial) activities.

Keywords: Salinization, Ionic Ratios, HFE-Diagram, Hydrogeochemistry, Tarsus Coastal Aquifer

GİRİŞ

Yeryüzünde bulunan tatlı suların %99'unu oluşturan yeraltı suyunun %69'u tarım, %22'si evsel ve %9'u da endüstriyel amaçlar için kullanılmaktadır (UN Water, 2022). Yapılan bir çalışmaya (UN Water, 2022) göre; Dünya'da yeraltı suyunu en çok kullanan ilk 10 ülke arasında Türkiye de yer almaktadır. Özellikle kurak ve yarı kurak kıyı bölgelerinde yaşayan insanlar, bir tatlı su kaynağı olarak yeraltı suyuna bağımlı durumdadır (Wetzelhuetter, 2015). Bu durum, yeraltı sularının miktarını hızlı bir şekilde azaltmakla birlikte, kalitesini de olumsuz yönde etkilemektedir. Yeraltı suyunun kalitesini ve kullanılabilirliğini etkileyen en önemli etkenlerden biri olan tuzlanma, küresel boyutta görülen ve geri döndürülmesi neredeyse imkânsız olan bir problemdir. Bu nedenle, günümüzde yeraltı sularının tuzlanmasına yönelik olarak yapılan araştırmalar ve çalışmalar giderek artmaktadır. Vengosh (2014) tarafından yapılan literatür çalışmasına göre; kıyı akiferlerinin tuzlanmasına neden olan süreçleri ve mekanizmaları dört ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar, aşırı yeraltı suyu çekiminden kaynaklanan deniz suyu girişimi, jeojenik süreçler (evaporitlerin çözünmesi), iklim değişikliği ve çeşitli insan aktiviteleridir.

Aşırı yeraltı suyu çekimine bağlı olarak gerçekleşen deniz suyu girişimi nedeniyle,

Akdeniz havzasındaki kıyı akiferlerinin sürdürülebilirliği büyük bir tehdit altındadır (Vengosh, 2014). Tatlı su kıyı akiferlerine sadece %1 oranında deniz suyu karışması sonucunda, yeraltı suyunun tuzluluğu üç katına kadar çıkabilmektedir (Jones vd., 1999). Ayrıca, tektonik ve iklimsel etkilere bağlı olarak meydana gelen Messiniyen Tuzluluk Krizi (7.2-5.3 milyon yılları arası) sonucunda, Akdeniz büyük ölçüde kuruyarak bir tuz havzasına dönüşmüştür (İlgar, 2015). Bu krizin ürünleri olan jips ($CaSO_4 \times 2H_2O$), anhidrit ($CaSO_4$) ve halit ($NaCl$) minerallerinin çözünmesi sonucunda da yeraltı suları tuzlanma olayına maruz kalabilmektedir. Yağışlardaki değişkenlik ve buharlaşma miktarının giderek artması sonucunda, akiferlerin beslenme miktarı etkilenmekte olup bu durumun da tuzluluk artışı üzerinde önemli bir rolü bulunmaktadır (Ranjan, 2006). Bununla birlikte, iklim değişikliği (sıcaklık artışı) etkisiyle buzulların erimesi sonucunda, küresel ölçekte deniz seviyelerinde önemli yükselmeler olacağı öngörülmektedir. Ghyben-Herzberg bağıntısına göre; deniz seviyesinin bir metre yükselmesi sonucunda, akiferdeki tatlı su seviyesi yaklaşık 40 m azalmaktadır (Jones vd, 1999). NASA (2022) tarafından yapılan çalışmaya göre; deniz seviyesi küresel ölçekte her yıl ortalama 3.5 mm, Akdeniz havzasında ise 1.8 mm yükselmektedir (Antonioli, 2020).

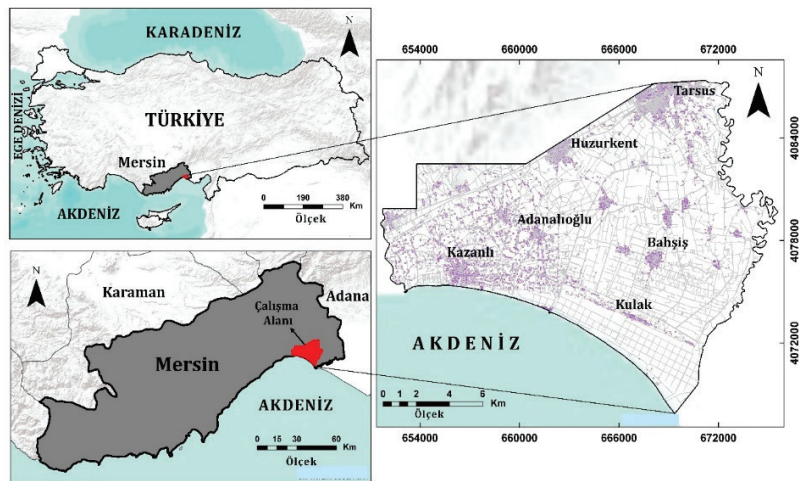
Tarsus Kıyı Akiferi'nin (TKA) farklı kesimlerinde ve değişik zamanlarda yapılan

çalışmalarda (Demirel, 2004; Hatipoğlu ve Bayarı, 2005; Güler, 2009; Kurt, 2010; Güler vd., 2012; Güler vd., 2013), akiferin genellikle kıyıya yakın bölgelerde olmak üzere büyük oranda tuzlanma süreci etkisi altında olduğu tespit edilmiştir. TKA'daki tuzlanmanın sadece deniz suyu girişimi sonucunda oluşmadığı, bölgenin kendine özgü jeolojik, topoğrafik ve iklimsel özelliklerinden dolayı farklı süreçlerin veya birden çok mekanizmanın akiferin tuzlanmasına neden olduğu Güler vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Mevcut çalışma kapsamında, TKA'nın tuzlanmasına neden olan mekanizmaları ve süreçleri ortaya koymak için daha kapsamlı bir inceleme gerçekleştirilmiştir.

TKA, tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerin yoğun olarak yapıldığı ve bu faaliyetler için gerekli olan tatlı su ihtiyacının akiferde açılan farklı derinliklerdeki kuyulardan sağlandığı flüvyo-deltaik bir ortamdır (Güler vd., 2012). Çalışma alanı yaklaşık 234 km² olup 36°44'30"-36°55'2" Kuzey enlemleri ile 34°42'2"-34°58'10" Doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1). Batısında Deliçay, doğusunda Tarsus (Berdan) Çayı, kuzeyinde

Mersin-Tarsus devlet karayolu (D-400) ve güneyinde Akdeniz ile sınırlanan düşük eğimli (0-2°) bu alanda tipik olarak Akdeniz iklimi görülmektedir. TKA'da yürütülen ekonomik faaliyetler arasında, tarım (çeşitli bitki, meyve, sebze, turuncgil, vb. yetiştiriciliği) ve endüstri (makine-parça imalatı, kimyasal ve çeşitli inşaat malzemeleri üretimi, gıda işleme-depolama ve yerüstü akaryakıt depolama tesisleri) önemli bir yere sahiptir (Güler vd., 2012).

Çalışma alanının ve yakın çevresinin jeolojisini Temel Birimler, Tersiyer Birimleri ve Kuvaterner Birimleri oluşturmaktadır (Schmidt, 1961; Ünlügenç, 1986; Şenol vd., 1998). Bölgenin kuzeyindeki dar bir alanda yüzeyleyen Permo-Karbonifer yaşlı Karahamzaşağı formasyonu, başlıca rekrystalize kireçtaşları, mermer, şist ve kuvarsit türü kayaçlardan oluşmaktadır. (Ünlügenç, 1986). TKA'nın batı sınırını oluşturan Deliçay'ın drenaj alanında yüzeyleyen Mersin Ofiyolitik Melanjı (Güler vd., 2012) içerisinde gabro, harzburjit, verlit, dünit, klinopiroksenit, verzolit, diyabaz, radyolarit gibi kayaçlar ve derin deniz sedimanları bulunmaktadır (Şenol vd., 1998).

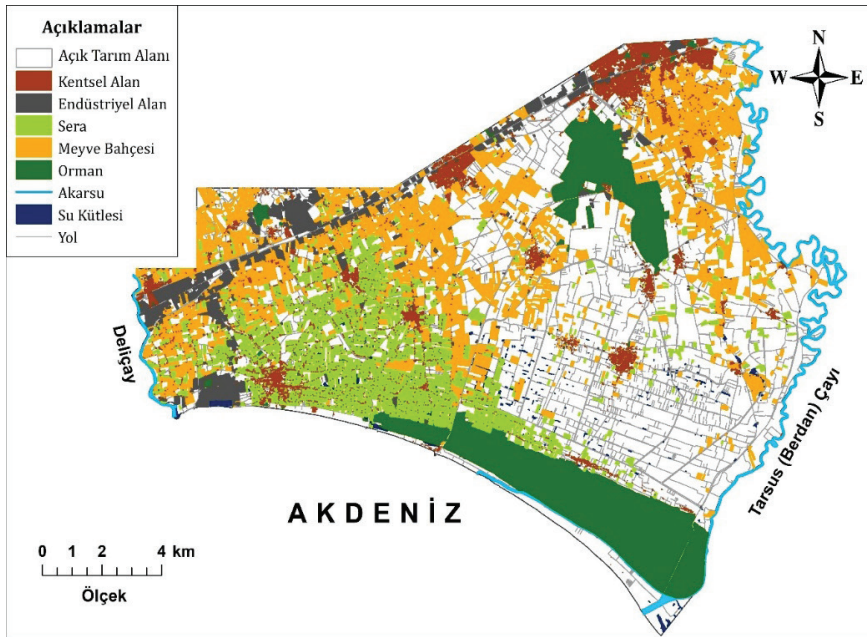


Şekil 1. Tarsus Kıyı Akiferi'nin yer bulduru haritası.
Figure 1. Location map of the Tarsus Coastal Aquifer.

Sığ denizel, gölsel ve akarsu niteliğindeki ortamlarda çökelen Tersiyer birimleri ise beş farklı formasyondan (Gildirli, Karaisalı, Güvenç, Kuzgun ve Handere) oluşmaktadır (Şenol vd., 1998). Oligosen-Miyosen yaşlı Gildirli formasyonu başlıca konglomera-kumtaşı, silttaşı-kiltaşı ve killi kireçtaşı-marn birimlerinden oluşmaktadır (Schmidt, 1961; Şenol vd., 1998). Alt-Orta Miyosen yaşlı Karaisalı ve Güvenç formasyonları sırasıyla kireçtaşı ve killi kireçtaşı, Orta-Üst Miyosen yaşlı Kuzgun formasyonu ise kumtaşı, konglomera ve kireçtaşı birimleriyle temsil edilmektedir. (Schmidt, 1961; Şenol vd., 1998). Bölgenin kuzeyinde yüzeylenen Handere Formasyonu, Üst Miyosen (Messiniyen) zamanında hüküm süren tektonik aktiviteler ve kuraklık sonucunda (Mesiniyen Tuzluluk Krizi) oluşan denizel çökeller-evaporitik birimlerden (jips, anhidrit ve halit) meydana gelmiştir (Schmidt, 1961; Şenol vd., 1998).

Kıyı akiferini meydana getiren Pliyo-Kuvaterner yaşlı sedimanlar ise, kil, silt, kum ve çakıl boyutundaki çökellerden oluşan çok katmanlı yapısıyla oldukça heterojen bir karakter göstermektedir (Güler vd., 2012). Deliçay ve Tarsus Çayları ve Seyhan Nehri gibi akarsuların biriktirdiği pekişmemiş yapıdaki bu çökellerin (Göney, 1976; DSİ, 1978) kalınlığı kuzeyde 30 m'den, güneyde >500 m ye kadar çıkmaktadır (Güler vd., 2012).

Yılda 2-3 kez hasat yapılmasına olanak sağlayan verimli topraklara ev sahipliği yapan TKA'nın (Sandal ve Gürbüz, 2003; Güler vd., 2012) yaklaşık %83'ü tarım alanıdır (açık tarım alanları, meyve bahçeleri ve seralar). Geriye kalan arazi kullanım sınıflarını ise; yapay olarak oluşturulan (1939-1965 yılları arasında) okaliptüs ve çam ormanları (%11.4), endüstriyel alanlar (%3.5), yerleşim yerleri (%1.9) ve küçük çaplı çeşitli su kütleleri (%0,4) oluşturmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Tarsus Kıyı Akiferi'nin arazi kullanım haritası.

Figure 2. Land use map of the Tarsus Coastal Aquifer.

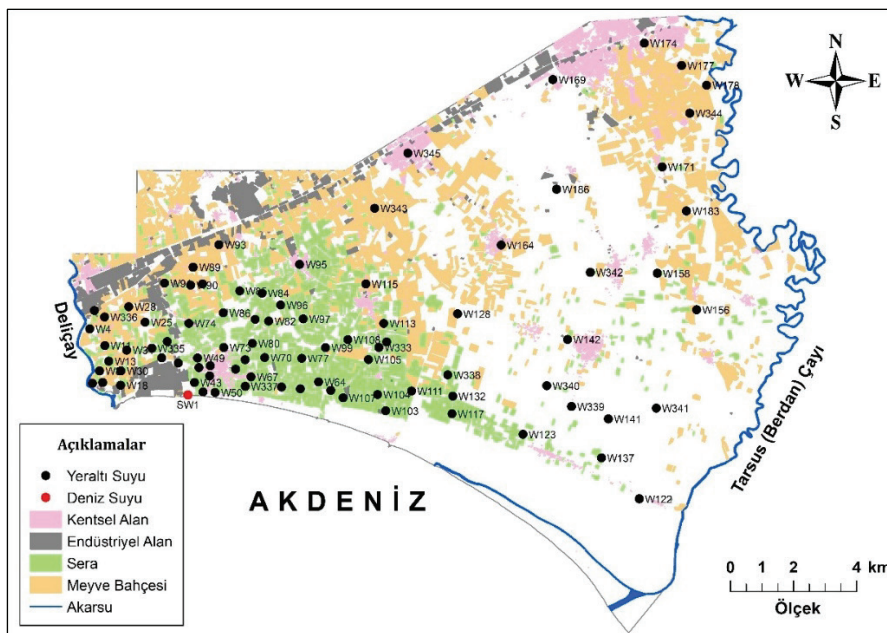
YÖNTEMLER

Eylül 2020’de (kurak dönem) yürütülen arazi çalışmaları kapsamında, konumları GPS yardımıyla belirlenen 87 farklı noktadan yeraltı suyu ve bir adet deniz suyu (Akdeniz) örneği alınmıştır (Şekil 3). Tüm su örnekleme noktalarından ikişer adet (anyon ve katyon analizleri için) örnek alınmış olup bunlar için 250 mL’lik HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) plastik şişeler kullanılmıştır. Katyon analizleri için ayrılan su örneklerine ~2 mL HNO₃ ilave edilmiştir. Alınan su örnekleri, sıcaklık nedeniyle meydana gelebilecek buharlaşmaya karşı, içinde soğutulmuş termo jel kalıpları bulunan buzluklarla laboratuvara nakledilmiş ve analizlerin yapılacağı zamana kadar +4 °C’deki karanlık bir ortamda saklanmıştır.

Alınan su örneklerinin fiziksel parametreleri (sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC), pH, tuzluluk, yükseltgenme-indirgenme potansiyeli (ORP), çözülmüş oksijen (DO) ve toplam çözülmüş

madde (TDS), YSI marka PRODSS model multiparametre cihazı ile yerinde ölçülmüştür. Çeşitli majör ve minör anyonların (Cl⁻, SO₄⁻², NO₃⁻ ve NO₂⁻) analizinde Hach Lange DR 3900 model Spektrofotometre kullanılmıştır. Majör elementlerin toplam derişimi (Ca, Mg, Na ve K) ve iz elementlerin (B, Br, Sr ve Li derişimleri ise Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan ICP-MS yöntemiyle tespit edilmiştir. Su örneklerinin karbonat (CO₃⁻²) ve bikarbonat (HCO₃⁻) analizleri ise, dijital büret kullanılarak volumetrik titrasyon (0.01N H₂SO₄) yöntemiyle yapılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen yeraltı sularının genel kimyasal karakterlerini ve fasiyes tiplerini belirlemek amacıyla Piper Diyagramı (Piper, 1944), deniz suyu girişim süreçlerinin görselleştirilmesi ve hidrokimyasal fasiyeslerin evrimini incelemek amacıyla Hidrokimyasal Fasiyes Evrim Diyagramı (HFE-D) (Giménez-Forcada, 2010) kullanılmıştır.



Şekil 3. Tarsus Kıyı Akiferi’ndeki su örnekleme noktaları.

Figure 3. Water sampling points in the Tarsus Coastal Aquifer.

Farklı tuzlanma mekanizmalarını açıklamak amacıyla Na^+/Cl^- (meq/L), $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ (meq/L), Cl^-/Br (meq/L), $\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4^{-2}$ (meq/L), $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ (meq/L), Sr/Ca^{+2} (mmol/L) ve B/Li (mmol/L) iyon oranlarından yararlanılmıştır. Deniz suyunun baskın iyonu olan Cl^- kullanılarak Appelo ve Postma (2005)'in önerdiği deniz suyu fraksiyonu (f_{deniz}) hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Deniz suyu fraksiyonu kullanılarak kıyı akiferlerinde katı ve sıvı faz arasındaki jeokimyasal reaksiyonlar için önemli bir gösterge olan iyonik delta (Δ_i) hesaplanmaktadır (Khadra vd., 2017).

$$f_{\text{deniz}} = (\text{Cl}^-_{\text{numune}} - \text{Cl}^-_{\text{tatlı}}) / (\text{Cl}^-_{\text{deniz}} - \text{Cl}^-_{\text{tatlı}}) \quad (1)$$

Eşitlikte $\text{Cl}^-_{\text{numune}}$ her bir örneğin klorür derişimini (mmol/L), $\text{Cl}^-_{\text{tatlı}}$ tuzlanmaya maruz kalmamış 29 adet yeraltı suyu örneğinin ortalamasını ve $\text{Cl}^-_{\text{deniz}}$ ise Akdeniz'den alınan deniz suyu örneğini temsil etmektedir. İkinci adımda, deniz suyu ile tatlı su karışımındaki iyon derişimi ($i_{\text{karışım}}$) hesaplanmaktadır (Eşitlik 2).

$$i_{\text{karışım}} = f_{\text{deniz}} \times i_{\text{deniz}} + (1 - f_{\text{deniz}}) \times i_{\text{tatlı}} \quad (2)$$

Karışımın derişiminden ($i_{\text{karışım}}$), her bir numune için ölçülen derişim (i_{numune}) çıkarılarak iyonik delta (Δ_i) değeri elde edilmektedir (Eşitlik 3). İyonik delta (Δ_i) değerinin pozitif olması iyonun yeraltı suyunda zenginleştiğini, negatif olması ise iyonun yeraltı suyunda tükendiğini göstermektedir (Najib vd., 2016).

$$\Delta_i = i_{\text{numune}} - i_{\text{karışım}} \quad (3)$$

BULGULAR ve TARTIŞMA

Su Kimyası

Çalışma kapsamında incelenen 87 adet yeraltı suyu ve bir adet deniz suyu örneğinde analiz edilen

fizikokimyasal parametrelere ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 1'de sunulmuştur. Bölgedeki yeraltı suları, sıcaklık ve pH değerleri göz önüne alındığında, az ılık ve bazik sular sınıfında yer almaktadır. Beslenme miktarının az olduğu bölgelerdeki suların daha sıcak ve kirliliğe karşı daha hassas oldukları belirtilmiştir (Fidelibus ve Pulido-Bosch, 2018). TKA'nın kıyıya yakın bölgelerinde bulunan suların sıcaklıkları belirgin olarak yüksektir. Çalışma alanında ölçülen elektriksel iletkenlik (EC) değerleri ise 514 ile 16490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir. Yüksek EC değerlerine ($>1000 \mu\text{S}/\text{cm}$) sahip olan yeraltı sularının, kıyı bölgelerinde meydana gelen deniz suyu girişiminden etkilenmiş olabileceği belirtilmektedir (Somay ve Gemici, 2009). Yağıştan beslenme yoluyla, atmosferle temas halinde olan vadoz (doymamış) bölgeden veya akiferin yüzey sularıyla etkileşim halinde olduğu bölgelerden yeraltı suyuna (veya akifere) oksijen girişi olabilmektedir (Hem, 1985; Menz, 2016). Bunun sonucunda da yeraltı sularının çözünmüş oksijen (DO) derişimlerinde artış meydana gelmektedir (akiferde organik madde mevcut değilse).

Çalışma alanındaki yeraltı sularının çözünmüş oksijen (DO) değerleri 0.82-6.98 mg/L arasında değişmekte olup TKA'nın batısında (Deliçay'a yakın kesimlerde) yüksek değerler gözlenmektedir. Yeraltı sularının toplam çözünmüş madde (TDS) değerleri 334-10720 mg/L arasında değişmekte olup kıyıya yakın alanlarda yüksek değerlerdeki artış dikkat çekicidir. Freeze ve Cherry (1979) tarafından yapılan TDS sınıflamasına göre, yeraltı suyu örneklerinin 74'ü tatlı su (0-1000 mg/L), 12'si acı su (1000-10000 mg/L) ve 1'i ise tuzlu su (10000-100000 mg/L) sınıfına girmektedir.

Çizelge 1. Tarsus Kıyı Akiferi yeraltı suyu örneklerinin (Eylül 2020) fiziko-kimyasal parametrelerinin tanımlayıcı istatistikleri.

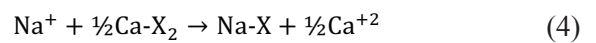
Table 1. Descriptive statistics of physicochemical parameters of groundwater samples (September 2020) from the Tarsus Coastal Aquifer.

Parametre	Birim	Yeraltı Suyu (n=87)					Deniz Suyu
		Ort.	Min.	Maks.	Medyan	STS	
pH		7.73	7.25	8.26	7.68	0.24	8.15
DO ^a	mg/L	3.25	0.82	6.80	3.17	1.63	5.91
EC ^b	µS/cm	1558	514	16490	1083	2209	56444
Sıcaklık	°C	22.10	19.2	24.7	22.0	1.00	29
TDS ^c	mg/L	1013	334	10720	703	1436	36690
Tuzluluk	‰	0.81	0.25	9.67	0.54	1.29	37.41
Ca ⁺²		89.9	21.2	671.7	70.1	87.1	471.3
Mg ⁺²		80	19	767	60	98	1418
Na ⁺		122	10	2867	51	318	10934
K ⁺		7.0	1.0	78.6	2.9	12.1	482.9
Cl ⁻	mg/L	277	16	5250	77	752	19903
HCO ₃ ⁻		282	104	649	267	100	65
CO ₃ ⁻²		1.1	0.3	3.0	0.9	0.6	1.0
SO ₄ ⁻²		99	1	510	81	74	2892
NO ₃ ⁻		47.5	1.1	214.7	26.5	52.2	224.1
NO ₂ ⁻		0.06	0.00	1.97	0.01	0.24	0.02
B		156	36	2042	111	219	3895
Br	µg/L	470	41	15118	188	1634	71837
Li		12.5	2.5	47.5	10.2	7.8	46.8
Sr		1856	350	12591	1273	1766	9593

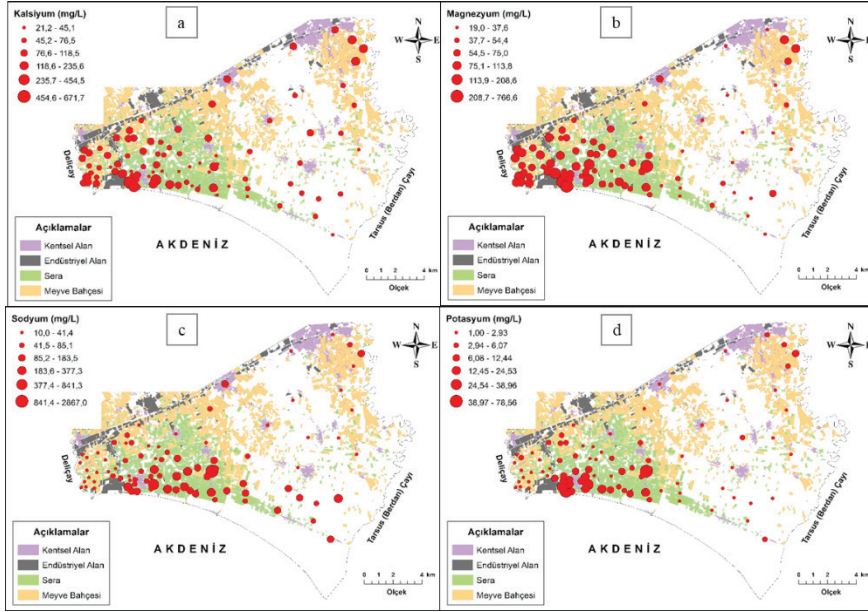
Ort.: ortalama, Min.: minimum, Maks.: maksimum, STS: standart sapma

^a çözülmüş oksijen, ^b elektriksel iletkenlik, ^c toplam çözülmüş madde

Yeraltı sularının kalsiyum (Ca⁺²) ve magnezyum (Mg⁺²) değerleri sırasıyla 21.1 ile 671.7 mg/L ve 19.0 ile 766.6 mg/L arasında değişmektedir (Şekil 4a ve 4b). Kıyı akiferlerinde deniz suyu girişi sonucu katyon değişimi (Eşitlik 4) meydana gelmekte olup bunun sonucunda yeraltı sularında Ca⁺² iyonu zenginleşmektedir (Vengosh, 2014; Appelo ve Postma, 2005). Yeraltı sularındaki Ca⁺² iyonu zenginleşmesine ek olarak, deniz suyunda önemli miktarda bulunan Mg⁺² iyonu da yeraltı suyunda artmaktadır (Jones vd., 1999).



TKA'da kullanılan bitki koruyucu kimyasalların da (nemasol ve tamifume gibi) yeraltı sularındaki Na⁺ ve K⁺ derişimleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Deniz suyunun da önemli bileşenleri arasında bulunan bu iyonlar, farklı kaynaklar ile yeraltı suyunda zenginleşmektedir. TKA yeraltı sularındaki Na⁺ ve K⁺ derişimleri sırasıyla 10-2867 mg/L ve 1.00-78.56 mg/L arasında değişmektedir (Şekil 4c ve Şekil 4d).



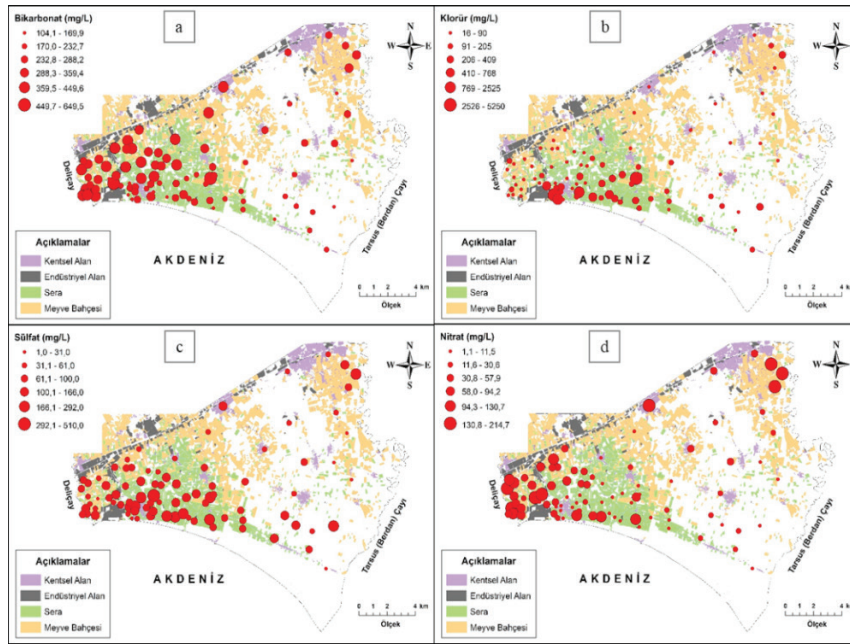
Şekil 4. Yeraltı suyu örneklerinin Ca²⁺ (a), Mg²⁺ (b), Na⁺ (c) ve K⁺ (d) derişimlerine ait dağılım haritaları.

Figure 4. Distribution maps of Ca²⁺ (a), Mg²⁺ (b), Na⁺ (c), and K⁺ (d) concentrations in groundwater samples.

TKA'nın batı bölgesinde ve beslenme alanını oluşturan kuzey kesimlerinde yüksek HCO₃⁻ derişimleri (104-650 mg/L) gözlenmektedir (Şekil 5a). Deniz suyu girişiminin belirteci olarak kullanılan Cl⁻ değerleri TKA yeraltı sularında 16 ile 5250 mg/L arasında (Şekil 5b) değişmekte olup yüksek Cl⁻ derişimli sularda antropojenik ve jeojenik (NaCl çözünmesi) faktörlerin birlikte etkili olduğu düşünülmektedir. SO₄⁻² derişimleri 1-510 mg/L arasında değişen (Şekil 5c) TKA yeraltı sularındaki yüksek derişimler çoğunlukla bölgedeki tarımsal faaliyetlerde yoğun olarak kullanılan amonyum sülfattan (şeker gübresi) ((NH₄)₂SO₄) kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, TKA'nın kuzeyindeki alanlarda ve akiferin derinliklerinde kalın evaporit katmanlarının var olduğu bilinmekte (Güler vd., 2012) olup yüksek sülfat derişimlerine evaporit

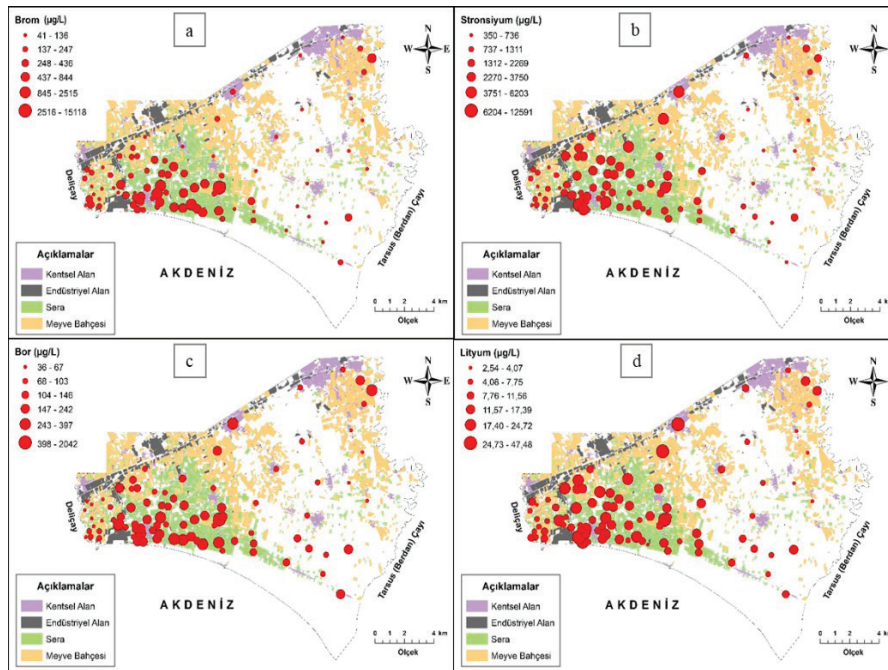
çözünmesinin de katkısı olabilmektedir. Aşırı gübre kullanımı, evsel ve endüstriyel atıksu deşarjlarının bir sonucu olarak yeraltı sularında NO₃⁻ derişimi artmaktadır (Appelo ve Postma, 2005). Daha önce yapılan çalışmalarda da, TKA yeraltı sularında önemli bir NO₃⁻ kirliliğinin olduğu vurgulanmıştır (Korkut, 2009; Kurt, 2010; Güler vd., 2012). Çalışma alanı yeraltı suyu örneklerinin NO₃⁻ değerleri 1.0 ile 214.7 mg/L arasında değişmektedir (Şekil 5d).

Deniz suyunun önemli bileşenleri olan Br, Sr, B ve Li elementleri bu çalışmada deniz suyu girişimini belirlemek amacıyla irdelenmiştir. Bu iz elementlerin derişimleri sırasıyla 40-15118 µg/L (Şekil 6a), 350-12591 µg/L (Şekil 6b), 36-2042 µg/L (Şekil 6c) ve 2.54-47.48 µg/L (Şekil 6d) arasında değişmektedir.



Şekil 5. Yeraltı suyu örneklerinin HCO_3^- (a), Cl^- (b), SO_4^{2-} (c) ve NO_3^- (d) derişimlerine ait dağılım haritaları.

Figure 5. Distribution maps of HCO_3^- (a), Cl^- (b), (c) SO_4^{2-} and NO_3^- (d) concentrations in groundwater samples.



Şekil 6. Yeraltı suyu örneklerinin Br (a), Sr (b), B (c) ve Li (d) derişimlerine ait dağılım haritaları.

Figure 6. Distribution maps of Br (a), Sr (b), B (c), and Li (d) concentrations in groundwater samples.

Cl⁻ gibi Br⁻'de deniz suyu girişi olan akiferlerde izleyici olarak kullanılmaktadır (Vengosh ve Rosenthal, 1994). Farklı tuzlanma mekanizmalarını tanımlamak amacıyla Cl⁻, Na⁺ ve SO₄⁻² iyonları Sr ile birlikte değerlendirilmektedir (Lebid vd., 2016). Yüksek Sr derişimleri (>5000 µg/L) hem deniz suyunun etkisini hem de evaporit çözünmesinin etkisini gösterebilmektedir (Somay ve Gemici, 2009).

Literatürde ayrıca farklı tuzlanma kaynaklarını belirlemek amacıyla B/Li oranı da kullanılmaktadır (Sanchez-Martos vd., 2002). Deniz suyu girişimin göstergesi olarak kabul edilen B ve Li (Sanchez-Martos vd., 2002), aynı zamanda evaporitlerin tuzluluk üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla da kullanılmaktadır. Evsel/endüstriyel atıkların ve B içerikli gübrelerin yeraltı suyuna karışması nedeniyle bu sularda B derişimi artmaktadır (Sanchez Martos vd., 2002).

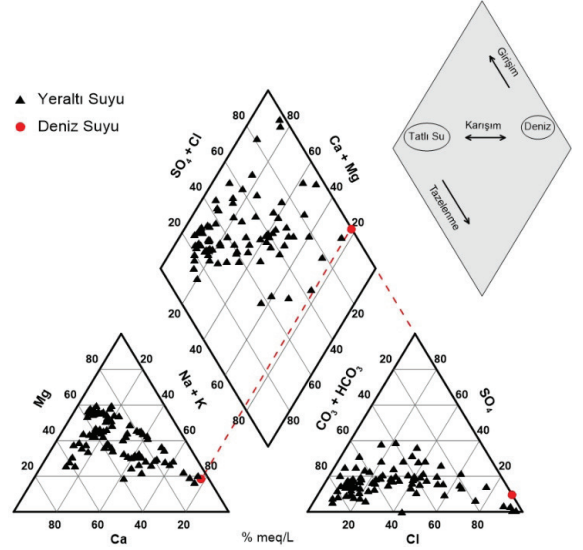
Hidrojeokimyasal Ortam

Diyagramlar

Tarsus Kıyı Akiferi'ne ait yeraltı suyu örneklerinin hidrojeokimyasal sınıflandırmasını yapmak ve fasiyeslerini belirlemek amacıyla Piper Diyagramı (Piper, 1944), deniz suyu girişimini değerlendirmek ve kıyı akiferindeki tazelenme-tuzlanma süreçlerini belirlemek için Hidrokimyasal Fasiyes Evrim Diyagramı (HFE-D) (Giménez-Forcada, 2010) kullanılmıştır.

Piper diyagramına (Şekil 7) göre; yeraltı suyu örneklerinin katyon ve anyon içeriği bakımından büyük bir çoğunluğu "karışık" tipte sularla "bikarbonat+karbonat" tipi sular sınıfını temsil etmektedir. Diyagramın katyon-anyon bileşimini yansıtan paralelkenar şekilli ana bölümüne göre sular üç sınıfa ayrılmıştır. Bunlar

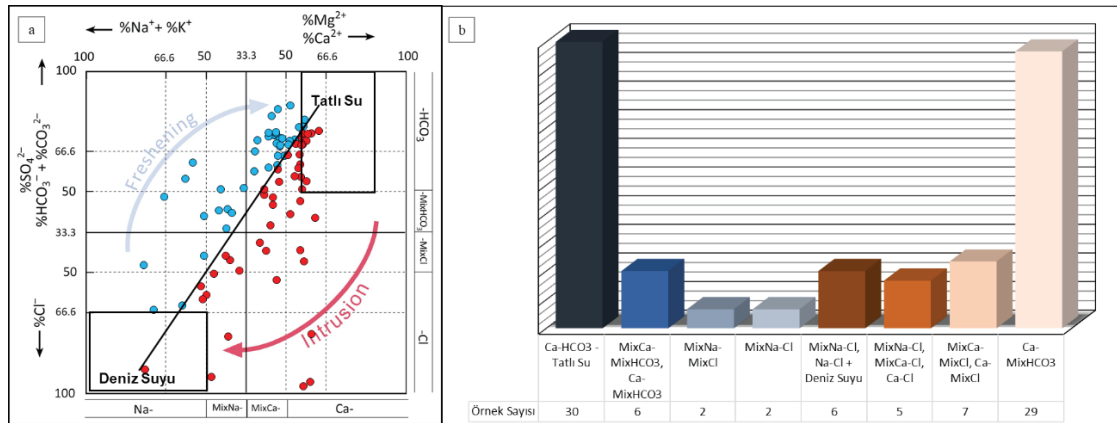
tatlı suları karakterize eden "Ca-Mg-HCO₃" tipi sular, deniz suyu girişiminin etkisindeki "Ca-Cl" tipi sular ve deniz suyunun karışımını yansıtan "Na-Cl" tipi sular şeklindedir.



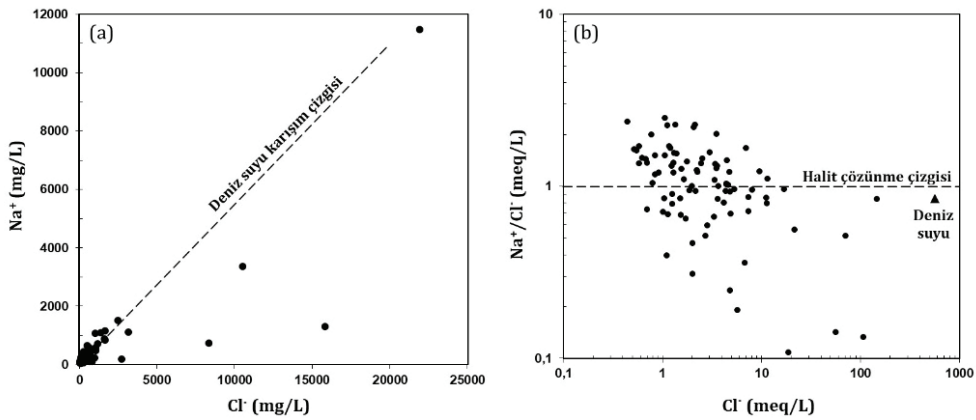
Şekil 7. Tarsus Kıyı Akiferi'ne ait su örneklerinin Piper diyagramı.

Figure 7. Piper diagram of water samples from Tarsus Coastal Aquifer.

Deniz suyu girişimi ve tazelenme evrelerini gösteren HFE-Diyagramına göre (Şekil 8a); TKA yeraltı sularının %47'si tazelenme, %53'ü ise deniz suyu girişiminin etkisi altındadır. HFE-Diyagramı dört ana ve sekiz alt evreye ayrılmaktadır (Giménez-Forcada, 2010). Yeraltı suyu örnekleri arasında, tazelenme süreci etkisindeki örneklerin ikisi MixNa-Cl, ikisi MixNa-MixCl, altısı MixCa-MixHCO₃⁻ ve 30'u Ca-HCO₃⁻-tatlı su alt evre fasiyesindedir. Girişim sürecindeki örneklerin ise 29'u Ca-MixHCO₃⁻, yedisi MixCa-MixCl, beşi MixNa-Cl, Ca-Cl ve altısı MixNa-Cl, Na-Cl-deniz suyu alt evre fasiyesindedir (Şekil 8b).



Şekil 8. Tarsus Kıyı Akiferi'ne ait su örneklerinin HFE-Diyagramı (a) ve alt evre fasiyes dağılımları (b).
Figure 8. HFE-Diagram (a) and subphase facies distribution (b) of water samples from Tarsus Coastal Aquifer.



Şekil 9. Yeraltı suyu örneklerinin Na^+ - Cl^- (a) ve Na^+/Cl^- - Cl^- (b) grafikleri.
Figure 9. Na^+ - Cl^- (a) and Na^+/Cl^- - Cl^- (b) graphs of groundwater samples.

Majör-Minör İyonlar ve İyon Oranları

Deniz suyu girişiminin etkisindeki akifere ait yeraltı sularında Na^+/Cl^- molar oranı 0.86'dan daha düşük değerlerde olup (Jones vd., 1999) 1'e yakın oranlar halit (NaCl) mineralinin çözünmesine işaret etmektedir (Vengosh, 2014). Antropojenik kaynakların etkisiyle (evsel atıklar) Na^+/Cl^- oranı 1'den büyük değerlere sahip olabilmektedir (Jones vd., 1999). TKA yeraltı suyu örnekleri, genel olarak deniz suyu karışım çizgisine yakın eğilim göstermektedir

(Şekil 9a). Na^+/Cl^- oranına göre, çalışma alanında deniz suyu girişiyle birlikte jeojenik (halit) ve antropojenik (evsel atıklar) etkilerin tuzlanmaya katkı sağladığı söylenebilir (Şekil 9b).

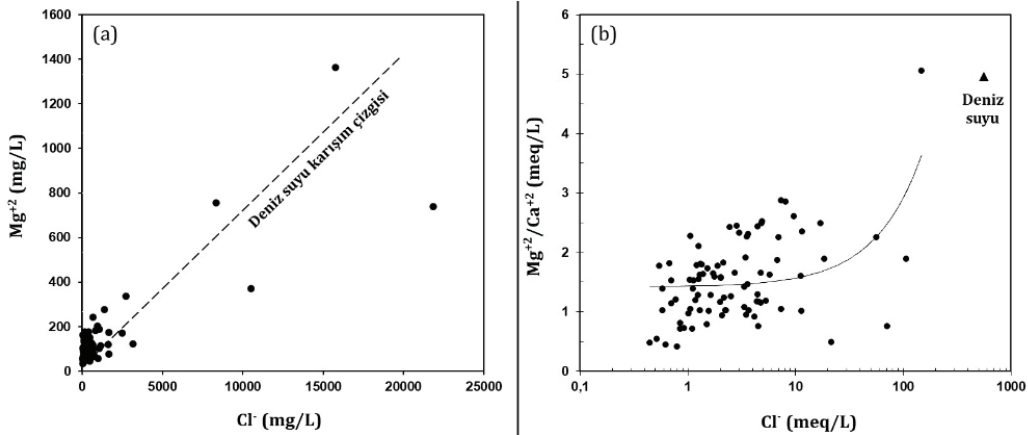
Tuzlanma etkisi altında olmayan yeraltı sularının $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ meq/L oranı 1'den az olmaktadır (Vengosh, 2014). Deniz suyundan etkilenen yeraltı sularında bu oran 1'den büyük olup (Telahigue vd., 2018) $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} > 5$ oranları deniz suyu girişiminin doğrudan göstergesi olarak kabul edilmektedir (Somay ve

Gemici, 2009). Düşük Mg^{+2}/Ca^{+2} oranı (<0.5) ise $CaCO_3$ veya jips mineralinin çözünmesinden kaynaklanmaktadır (Vengosh ve Rosenthal, 1994). Çalışma alanından alınan deniz suyu örneğinin (Akdeniz) Mg^{+2}/Ca^{+2} (meq/L) oranı 4.96 olup bazı örneklerin Mg derisimleri deniz suyu karışım çizgisinden saptığı görülmektedir (Şekil 10a). Örneklerin Mg^{+2}/Ca^{+2} oranı TKA yeraltı sularında hem deniz suyu girişimi hem de Messiniyen evaporit minerallerinin çözünmesine bağlı olarak tuzlanma meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 10b).

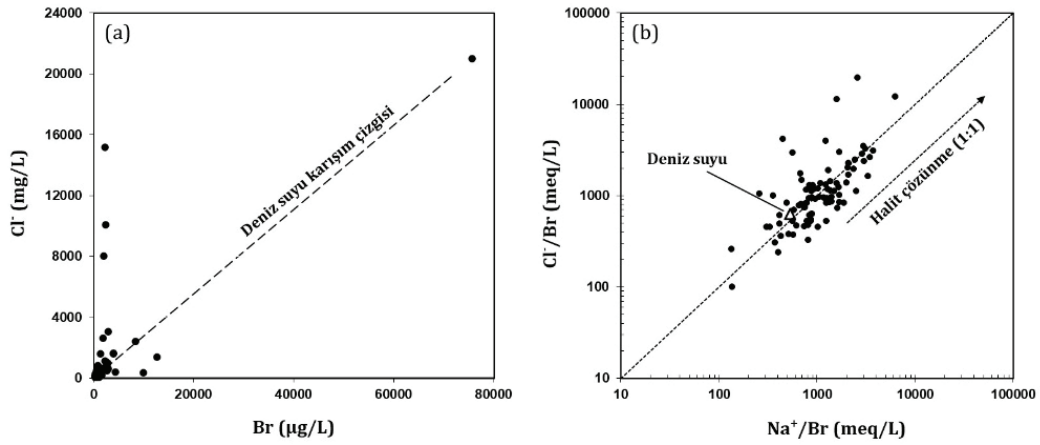
Farklı tuzlanma kaynaklarının ortaya konulması amacıyla Cl^-/Br^- (meq/L) oranı yaygın olarak kullanılmaktadır. Deniz suyunun Cl^-/Br^- oranı 655 olup (Alcala ve Custodio, 2008) bu oran Akdeniz'de 624'tür. Jeojenik ve antropojenik kaynaklı kirlenme/tuzlanma mekanizmalarını belirlemek için de, Cl^-/Br^- oranı ölçüt olarak değerlendirilmektedir. Pestisit kullanımı (Br bazlı), hayvansal ve septik atıkların yeraltı suyuna karışmasıyla bu oran 300'e kadar düşmektedir (Davis vd., 1998; Alcala ve Custodio, 2008). Yüksek Cl^-/Br^- oran değerleri $NaCl$ 'nin (doğal ve/veya endüstriyel) çözünmesi sonucu meydana gelmekte ve bu oran

1000 ile 10000 arasında değişmektedir (Davis vd., 1998; Alcala ve Custodio, 2008). TKA'daki tuzlanma kaynaklarının açıklanması amacıyla Cl^-/Br^- karışım grafiğiyle birlikte $Cl^-/Br^-/Na^+/Br^-$ grafiği oluşturulmuştur (Şekil 11a ve Şekil 11b). Bu iyonlarla oluşturulan grafiklere göre, akiferin tuzlanmasında deniz suyu girişimiyle birlikte jeojenik (halit) ve antropojenik faktörlerin etkili olduğu görülmektedir.

Yeraltı sularında SO_4^{-2} iyonunun yüksek derişimde olması deniz suyu girişimi, jips mineralinin çözünmesi, sülfat içerikli gübre kullanımı gibi faktöre bağlı olabilmektedir (Vengosh ve Rosenthal, 1994; Sanchez-Martos vd., 2002; Pulido-Lebouf vd., 2003; Zghibi vd., 2013). Yüksek SO_4^{-2} derişimiyle birlikte yeraltı sularındaki NO_3^- varlığı gübre, kanalizasyon sızıntısı ve hayvansal atık gibi girdilere de işaret etmektedir (Zghibi vd., 2013). Jipsli kayalarla temaslı yeraltı sularında Ca^{+2}/SO_4^{-2} (meq/L) oranı 1'e yaklaşmaktadır (Vengosh ve Rosenthal, 1994). Tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bir bölge olan TKA'da, amonyum sülfat gibi gübrelerin kullanıldığı saha çalışmaları sırasında tespit edilmiştir.



Şekil 10. Yeraltı suyu örneklerinin $Mg^{+2}-Cl^-$ (a) ve $Mg^{+2}/Ca^{+2}-Cl^-$ (b) grafikleri.
Figure 10. $Mg^{+2}-Cl^-$ (a) and $Mg^{+2}/Ca^{+2}-Cl^-$ (b) graphs of groundwater samples.



Şekil 11. Yeraltı suyu örneklerinin Cl⁻-Br (a) ve Cl⁻/Br-Na⁺/Br (b) grafikleri.

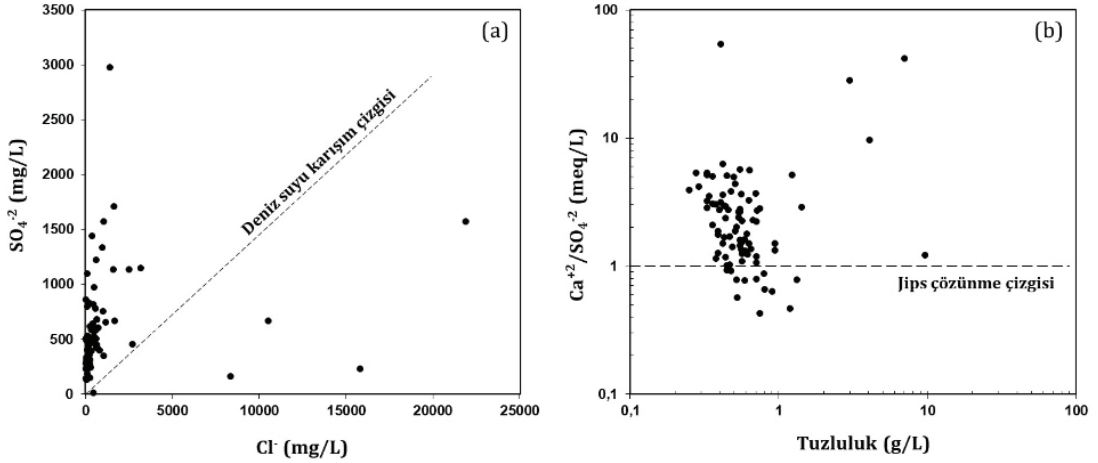
Figure 11. Cl⁻-Br (a) and Cl⁻/Br-Na⁺/Br (b) graphs of groundwater samples.

Bu tür gübrelerin de akiferin tuzlanmasında rol oynadığı düşünülmektedir. Yeraltı suyu örneklerinin deniz suyu karışım çizgisinden sapması sülfatın farklı kaynaklardan geldiğini göstermektedir (Şekil 12a). Oluşturulan Ca²⁺/SO₄⁻²-Tuzluluk grafiğine (Şekil 12b) göre örneklerin çoğunda Ca²⁺ fazlalığı olup bu durum deniz suyu girişimine bağlı kation değişimi ve/veya karbonat çözünmesi ile açıklanabilmektedir (Abu-alnaeem vd., 2018). Ca²⁺/SO₄⁻² oranına göre, TKA'daki bir diğer tuzlanma kaynağı jips mineralinin çözünmesidir.

Deniz suyu girişiminin göstergesi olan Cl⁻ ile antropojenik kirliliğin en önemli göstergesi olan NO₃⁻ parametreleri birlikte kullanılarak yeraltı suyunun kalitesini etkileyen farklı mekanizmalar ortaya konulabilmektedir. TKA'da yapılan bir çalışmada (Güler vd., 2012) vurgulandığı üzere, bölgedeki tarımsal faaliyetlerin yoğunluğu sonucu kıyı akiferi tarımsal kirleticilerin etkisi altındadır. Bu kapsamda, hem antropojenik kirleticinin hem de deniz suyu karışımının tanımlanması amacıyla NO₃⁻/Cl⁻ (meq/L) oranı (Park vd., 2005; Zghibi vd., 2013) kullanılarak

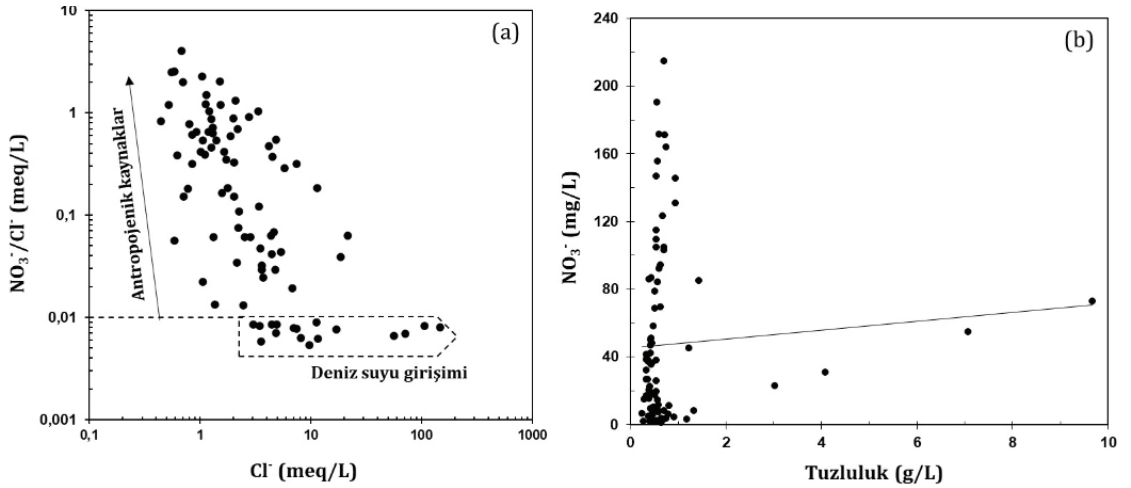
NO₃⁻/Cl⁻-Cl⁻ grafiği oluşturulmuştur. Deniz suyu karışımıyla birlikte yeraltı sularındaki NO₃⁻/Cl⁻ oranı 0'a yakın değerler gösterirken yüksek NO₃⁻/Cl⁻ değerleri antropojenik kaynaklara işaret etmektedir (Zghibi vd., 2013). Özellikle hayvansal ve insan kaynaklı atıkların yeraltı suyuna karışmasıyla bu oran 1'e yakın değerlere çıkmaktadır (Akpataku vd., 2020). TKA yeraltı sularındaki nitrat kaynaklarının çoğunluğunu gübreler ile hayvansal ve insan kaynaklı atıklar oluşturmaktadır (Şekil 13a). Aynı zamanda nitratın tuzluluk üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı Şekil 13b'deki grafikten anlaşılmaktadır.

Deniz suyundaki derişimleri yeraltı suyundaki derişimlerden daha yüksek olan Sr, B ve Li elementleri deniz suyu girişiminin göstergesi olarak kullanılmaktadır (Giménez ve Morell, 1997). Bu elementler deniz suyu girişiminin etkisini göstermek amacıyla kullanıldığı gibi, farklı tuzlanma kaynaklarını ortaya koymak amacıyla da kullanılmaktadır (Giménez ve Morell, 1997).



Şekil 12. Yeraltı suyu örneklerinin SO_4^{2-} - Cl^- (a) ve Ca^{+2}/SO_4^{2-} -Tuzluluk (b) grafikleri.

Figure 12. SO_4^{2-} - Cl^- (a) and Ca^{+2}/SO_4^{2-} -Salinity (b) graphs of groundwater samples.

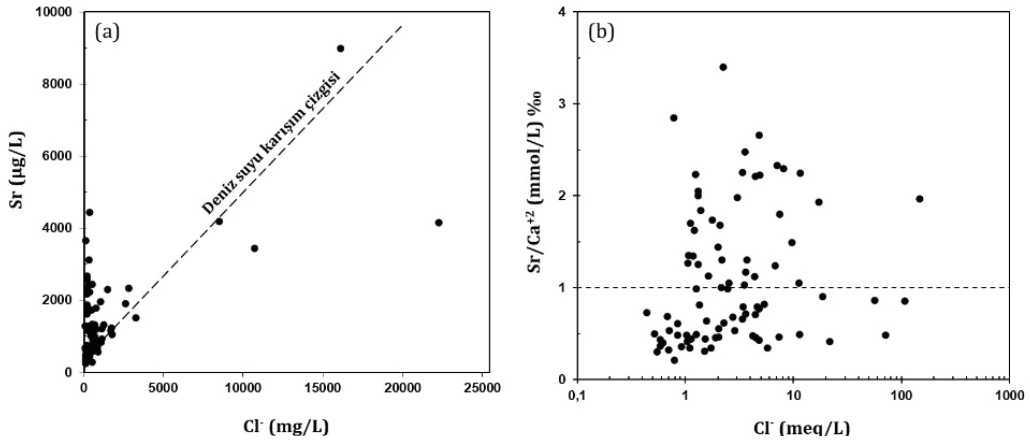


Şekil 13. Yeraltı suyu örneklerinin NO_3^- - Cl^- (a) ve NO_3^- -Tuzluluk (b) grafikleri.

Figure 13. NO_3^- - Cl^- (a) and NO_3^- -Salinity (b) graphs of groundwater samples.

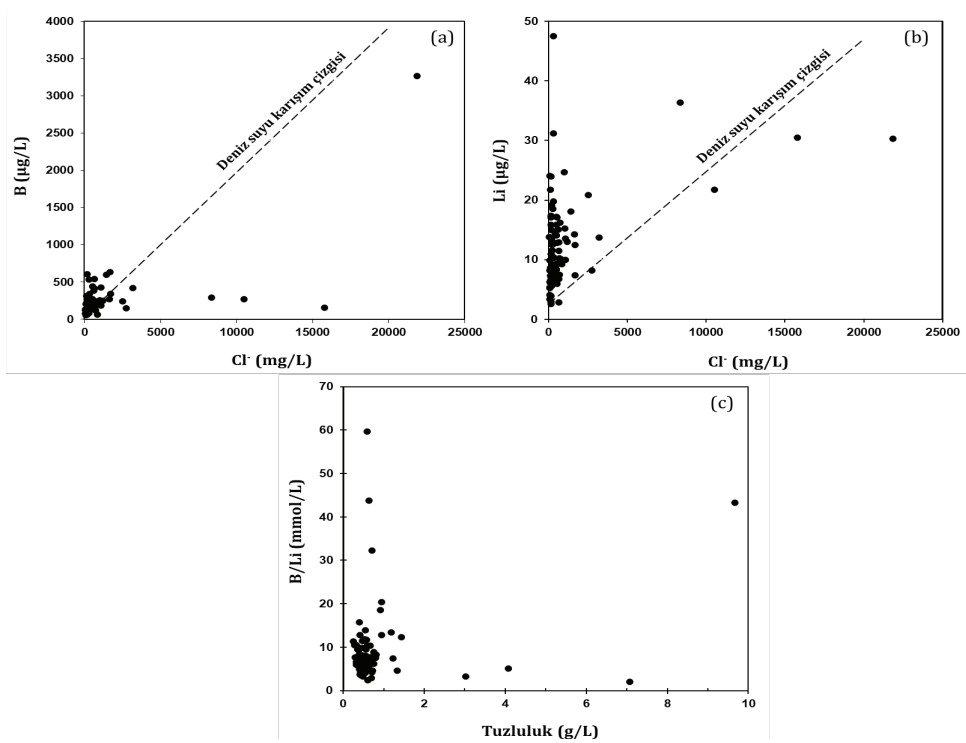
TKA yeraltı suyu örneklerinin Sr ve B derişimleri çoğunlukla deniz suyu karışım çizgisine yakın eğilim göstermekle birlikte, bu çizgiden sapmalar gösteren örnekler farklı tuzluluk kaynaklarından etkilenmektedir (Şekil 14a ve 15a). Evaporitlerin etkisini değerlendirmek amacıyla Sr/Ca^{+2} (mmol/L) oranı kullanılmakta olup bu oran ≥ 1 olmaktadır (Lepid vd., 2016).

TKA yeraltı suyu örneklerinin %44'ünde Sr/Ca^{+2} oranı > 1 'den büyüktür (Şekil 14b). Deniz suyu karışım çizgisinden sapma gösteren örneklerin Li derişimi (Şekil 15b) B derişimi ile birlikte değerlendirilebilmektedir. Tuzlu örneklerin yüksek B/Li (mmol/L) oranları (Şekil 15c) evaporitlerin etkisini ortaya koymaktadır (Sanchez-Martos vd., 2002).



Şekil 14. Yeraltı suyu örneklerinin Sr-Cl⁻ (a) ve Sr/Ca²⁺-Cl⁻ (b) grafikleri.

Figure 14. Sr-Cl⁻ (a) and Sr/Ca²⁺-Cl⁻ (b) graphs of groundwater samples.



Şekil 15. Yeraltı suyu örneklerinin B-Cl⁻ (a), Li-Cl⁻ (b) B/Li-Tuzluluk (c) grafikleri.

Figure 15. B-Cl⁻ (a), Li-Cl⁻ (b), and B/Li-Salinity (c) graphs of groundwater samples.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bölgenin iklimi, denize olan mesafe, evaporitlerin varlığı ve antropojenik faaliyetler gibi faktörlerin etkisiyle birçok farklı tuzlanma kaynaklarının etkisi altındaki Tarsus Kıyı Akiferi'nde, tuzlanma kaynaklarının ortaya konulması amacıyla yapılan bu çalışmada Piper diyagramı, HFE-Diyagramı, iyon oranları ve iyon oranlarının ikili (x-y) grafikleri kullanılmıştır.

TKA yeraltı suyu örneklerinde, en düşük ve en yüksek fiziksel parametre değerleri şu şekildedir: sıcaklık 19.2-24.7 °C; pH 7.25-8.26; EC 514-16490 µS/cm, DO 0.82-6.98 mg/L; TDS 334-10720 mg/L ve tuzluluk 0.25-9.67 g/L'dir. Kimyasal parametrelerin en düşük ve en yüksek değerleri ise şu şekildedir: Ca⁺² 21.1-671.7 mg/L; Mg⁺² 19.0-766.6 mg/L; Na⁺ 10-2867 mg/L; K⁺ 1.00-78.56 mg/L; CO₃⁻² 0.29-2.95 mg/L; HCO₃⁻ 104-650 mg/L; Cl⁻ 16-5250 mg/L; SO₄⁻² 1-510 mg/L; NO₃⁻ 1.0-214.7 mg/L; NO₂⁻ 0.0-1.97 mg/L; Br 40-15118 µg/L; Sr 350-12591 µg/L; B 26-2042 µg/L ve Li 2.54-47.48 µg/L'dir.

Piper diyagramına göre yeraltı suyu örneklerinin (n=87) 10 tanesi "sodyum-klorür" tipinde olup deniz suyunun etkisini göstermektedir. Beş adet örnek deniz suyu girişim sürecini yansıtan "kalsiyum-klorür" fasiyesindedir. Geriye kalan örnekler ise "kalsiyum-magnezyum-bikarbonat" su tipindedir.

Tazelenme ve girişim süreçlerini görselleştiren HFE-Diyagramında 87 adet örneğin %47'si tazelenme, %53'ü ise deniz suyu girişiminin etkisi altındadır.

Majör-minör iyonlar, iyon oranları ve oluşturulan ikili (x-y) grafiklere göre TKA'da tuzlanmaya neden olan üç ana faktör belirlenmiştir. Bunlar; aşırı pompaj nedeniyle düşen yeraltı suyu seviyesi sonucu meydana gelen

deniz suyu girişimi, Messiniyen evaporitlerinin (anhidrit, jips ve halit) çözünmesi ve antropojenik (tarımsal ve endüstriyel) faaliyetlerdir.

Bu çalışma, Tarsus Kıyı Akiferi'nde meydana gelen tuzlanmanın boyutunu, etkisini ve dağılımını ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, sürdürülebilir su yönetiminin ve/veya kıyı akiferi yönetiminin önemine vurgu yapmaktadır. İklim değişikliğinin en çok hissedildiği Akdeniz havzasında yer alan Tarsus Kıyı Akiferi'ndeki bu kritik soruna tüm paydaşların rol aldığı ve havza bazlı bütüncül bir yaklaşım ile çözümler üretilmelidir. Bu yaklaşımlar, su kullanımını, gübre kullanımını, tarımsal ve evsel atıkların bertarafını ve su kullanıcılarının bilinçlendirilmesini kapsamalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Avrupa Birliği'nin PRIMA (Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area) Programı kapsamındaki "Kıyısız Akdeniz Bölgelerinde Kritik Yeraltı Suyu Rezervlerinin Tuzlanması: Bütünleşik Modelleme ve Akıllı Bilgi İletişim Teknolojisi Araçlarının Kullanımı ile Tanımlama, Risk Değerlendirmesi ve Sürdürülebilir Yönetim (Proje kısa adı: MEDSAL)" başlıklı, 118Y366 nolu TÜBİTAK projesi tarafından finanse edilmiştir. Yazarlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve PRIMA'ya desteklerinden dolayı teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Abu-alnaeem, M. F., Yusoff, I., Fatt Ng, T., Alias, Y., Raksmei, M., (2018). Assessment of groundwater salinity and quality in Gaza coastal aquifer, Gaza Strip, Palestine: An integrated statistical,

- geostatistical and hydrogeochemical approaches study. *Science of the Total Environment*, 615, 972-989.
- Alcala, F. J., Custodio E., (2008). Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology*, 359 (1-2), 189-207.
- Antonioli, F., De Falco, G., Lo Presti, V., Moretti, L., Scardino, G., Anzidei, M. ve diğerleri. (2020). Relative sea-level rise and potential submersion risk for 2100 on 16 Coastal Plains of the Mediterranean Sea. *Water*, 12 (8), 2173-2198.
- Appelo, C. A. J., Postma, D., (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd edition). A. A. Balkema Publishers, Amsterdam, 634 s.
- Davis, S. N., Whittemore, D. O., Fabryka-Martin, J., (1998). Use of chloride/bromide ratios in studies of potable water. *Ground Water*, 36 (2), 338-350.
- Demirel, Z., (2004). The history and evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey. *Journal of Environmental Management*, 70, 275-282.
- DSİ, (1978). Mersin, Berdan ve Efrenk Ovaları hidrojeolojik etüd raporu. DSİ, 60 s.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, New Jersey, 604 s.
- Fidelibus, M. D., Pulido-Bosch, A., (2018). Groundwater temperature as an indicator of the vulnerability of karst coastal aquifers. *Geosciences*, 9 (1), 2-22.
- Giménez, E., Morell, I., (1997). Hydrogeochemical analysis of salinization processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellón, Spain). *Environmental Geology*, 29 (1), 118-131.
- Giménez-Forcada, E., (2010). Dynamic of seawater interface using Hydrochemical Facies Evolution Diagram. *Ground Water*, 48 (2), 212-216.
- Göney, S. (1976). Adana Ovaları. İstanbul Üniversitesi yayımları, İstanbul, 179 s.
- Güler, C., (2009). Site characterization and monitoring of natural attenuation indicator parameters in a fuel contaminated coastal aquifer: Karaduvar (Mersin, SE Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 59 (3), 631-643.
- 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 Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology*, 414-415, 435-451.
- Güler, C., Kurt, M. A., Korkut, R. N., (2013). Assessment of groundwater vulnerability to nonpoint source pollution in a Mediterranean Coastal Zone (Mersin, Turkey) under conflicting land use practices. *Ocean&Coastal Management*, 71, 141-152.
- Hatipoğlu, Z., Bayarı S., (2005). Mersin-Tarsus kıyı ve yamaç akiferlerinin hidrojeokimyası. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 48 (2), 59-72.
- Hem, J. D., (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2254, Virginia, 264 s.
- İlgar, A., (2015). Messiniyen Tuzluluk Krizi Akdeniz'in kurumasına ilişkin bir derleme. *Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 20, 73-80.
- Jones, B. F., Vengosh, A., Rosenthal, E., Yechieli, Y., (1999). *Geochemical investigations. Bear* (Ed.), *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers- Concepts, Methods and Practices*. Springer Science+Business Media, Israel, 51-69 ss.
- Khadra, W. M., Stuyfzand, P. J., Breukelen van, B. M., (2017). Hydrochemical effects of saltwater intrusion in a limestone and dolomitic limestone aquifer in Lebanon. *Applied Geochemistry*, 79, 36-51.
- Korkut, R. N., (2009). Deliçay-Tarsus Çayı (Mersin) arasındaki bölgedeki yeraltı sularında nitrat ve nitrit kirliliğinin araştırılması. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Yüksek Lisans Tezi, 67 s (yayımlanmamış).
- Kurt, M. A., (2010). Deliçay ve Tarsus Çayı (Mersin) arasında kalan alandaki toprak profillerinin mineralojisi, toprak ve su kirliliğinin araştırılması.

Güven, Güler, Kurt, Yıldırım

Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Doktora Tezi, 424 s (yayımlanmamış).

- Lebid, H., Errih, M., Boudjemline, D., (2016). Contribution of strontium to the study of groundwater salinity. Case of the alluvial plain of Sidi Bel Abbas (Northwestern Algeria). *Environmental Earth Sciences*, 75:947.
- Menz, C. (2016). Oxygen delivering processes in groundwater and their relevance for iron-related well clogging processes—a case study on the Quaternary aquifers of Berlin. *Freien Üniversitesi, Berlin, Doktora tezi*, 185 s (yayımlanmamış).
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2022). Sea Level. 27 Kasım 2022 tarihinde <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/> adresinden erişildi.
- Park, S. C., Yun, S. T., Chaea, G. T., Yoo, I. S., Shin, K. S., Heoa, C. H. ve diğerleri, (2005). Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea. *Journal of Hydrology*. 313 (3-4), 182-194.
- Piper, A. M., (1944). A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25 (6), 914-928.
- Pulido-Leboeuf, P., Pulido-Bosch, A., Calvache, M. L., Vallejos, A., Andreu, J. M., (2003). Strontium, SO_4^{2-}/Cl^- and Mg^{+2}/Ca^{+2} ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro aquifer (SE Spain). *Comptes Rendus Geoscience*, 335 (14), 1039-1048.
- Ranjan, P., Kazama, S., Sawamoto, M., (2006). Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources. *Global Environmental Change*, 16, 388-399.
- Sanchez-Martos, F., Pulido-Bosch, A., Molina-Sanchez, L., Vallejos-Izquierdo, A., (2002). Identification of the origin of salinization in groundwater using minor ions (Lower Andarax, Southeast Spain). *The Science of the Total Environment*, 297 (1-3), 43-58.
- Sandal, E. K., Gürbüz, M., (2003). Mersin şehrinin mekansal gelişimi ve çevresindeki tarım alanlarının amaç dışı kullanımı. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 1, 117-130.
- Schmidt, G., (1961). VII. Adana Petrol Bölgesinin Stratigrafik Nomenklatürü. *Petrol Dergisi*, 6, 47-63.
- Somay, M. A., Gemici, Ü., (2009). Assessment of the salinization process at the coastal area with hydrogeochemical tools and Geographical Information Systems (GIS): Selçuk Plain, Izmir, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, 201 (1), 55-74.
- Şenol, M., Şahin Ş., Duman, T. Y., (1998). Adana-Mersin dolayının jeoloji etüd raporu. MTA, Ankara, 46 s.
- Telahigue, F., Agoubi, B., Souid, F., Kharroubi, A., (2018). Assessment of seawater intrusion in an arid coastal aquifer, south-eastern Tunisia, using multivariate statistical analysis and chloride mass balance. *Physics and Chemistry of the Earth*, 106, 37-46.
- United Nations Water, (2022). Groundwater making the invisible visible. UNESCO, Paris, 225 s.
- Ünlügenç, U. C. (1986). Kızıldağ Yayla (Adana) dolayının jeoloji incelemesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Yüksek Lisans Tezi, 76 s (yayımlanmamış).
- Vengosh, A., Rosenthal E., (1994). Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country. *Journal of Hydrology*, 156 (1-4), 389-430.
- Vengosh, A., (2014). Salinization and Saline Environments. Holland ve Turekian (Ed.) *Treatise on Geochemistry Second Edition*. Elsevier, USA, ss. 325-378.
- Wetzelhuetter, C., (2015). Groundwater in the Coastal Zones of Asia-Pacific. Springer, Netherlands, 110 s.
- Zghibi, A., Tarhouni J., Zouhri, L., (2013). Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba coastal plain of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 87, 1-12.