



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Yarı kurak koşullarda yeraltı suyu kalitesinin değerlendirilmesi: Su kalite indeksi kullanılarak coğrafi bilgi sistemleri ile entegre bir yaklaşım

Assessing groundwater quality in semi-arid conditions: a geographic information systems-integrated approach using water quality index

Rihab CHOUGAR^{a,b}, Fethi BAALI^{a,b}, Riheb HADJI^{c,d*}, Lassad GHRIEB^f, Amor HAMAD^{a,b,e} ve Younes HAMED^g

^a Yer ve Evren Bilimleri Bölümü, Fen Bilimleri Doğa ve Yaşam Bilimleri Fakültesi, Echahid Larbi Tebessi Üniversitesi, Tebessa12002, Cezayir

^b Su ve Çevre Laboratuvarı; Fen Bilimleri Doğa ve Yaşam Bilimleri Fakültesi, Echahid Larbi Tebessi Üniversitesi, Tebessa12002, Cezayir

^c Yer Bilimleri Bölümü, Mimarlık ve Yer Bilimleri Enstitüsü, Farhat Abbas Üniversitesi, Setif, Cezayir

^d Mühendislik Jeolojisi, Geoteknik, Su Bilimleri ve Çevre Uygulamalı Araştırma Laboratuvarı, Farhat Abbas Üniversitesi, Setif, Cezayir

^e Uluslararası Güney Akdeniz Havzası Su Kaynakları Birliği, Tunus

^f Yer ve Evren Bilimleri, Yaşam Bilimleri Bölümü, Guelma Üniversitesi, Guelma 24000, Cezayir

^g Yer Bilimleri Bölümü, Gafsa Fen Fakültesi, Gafsa Üniversitesi, Tunus

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Tatlı Su İhtiyacı, Su Kalite İndeksi WQI, Akifer, Hidrojeolojik Süreçler, Kimyasal parametreler

ÖZ

Hidrolik stres, kentleşme, kuraklık ve nüfus artışı gibi zorluklar göz önüne alındığında, su kıtlığı çeken bölgelerdeki tatlı su ihtiyacının karşılanması zorunludur. Bu çalışma, artan taleplerle karşı karşıya kalan kritik bir su kaynağı olan Tebessa akifer sistemine odaklanmaktadır. Öncelikli amaç; yarı kurak bölgelerde yeraltı suyu kalitesi dinamiklerini iyileştirmek için uygulanabilir yönetim stratejileri belirlemektir. Metodoloji, Su Kalite İndeksi'ni (WQI) kullanarak yeraltı suyu sağlığının kapsamlı bir değerlendirmesini içermektedir. Bu yöntem, yoğun tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerden etkilenen çeşitli parametreleri de entegre etmektedir. Ayrıca, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) teknolojisi ile kolaylaştırılan mekansal ilişki analizi, karmaşık hidrojeolojik süreçler hakkında fikir edinmek için kullanılmaktadır. Çok parametrelilik stratejik uygulamalar, çeşitli iyonları açığa çıkaran, mekansal farklılıkları vurgulayan ve yeraltı su kalitesinin 'İyi'den 'Kötü'ye sınıflandırmasını belirleyen su kalite haritalarını elde etmeye yardımcı olmaktadır. Yarı kurak Tebessa-Morsott ovasında yürütülen araştırma, alkalinite, tuzluluk ve yüksek iyon konsantrasyonları da dahil olmak üzere hidrokimyasal özellikleri tanımlamak için saha ve laboratuvar incelemelerini kapsamaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, karşılıklı ilişkileri ve mekansal karmaşıklıkları ortaya çıkararak bilimsel anlayışa katkıda bulunmakta ve su kaynakları yönetimi için değerli bilgiler sunmaktadır. WQI (Su Kalite İndeksi) ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi)'ni birleştiren yöntemlerin etkinliği, yeraltı suyu kalitesinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesinde gösterilmiştir. Sonuç olarak bu araştırma, yarı kurak bölgelerdeki yeraltı suyu kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için bir temel oluşturmaktadır.

Geliş Tarihi: 24.08.2023

Kabul Tarihi: 29.04.2024

Keywords:

Freshwater Demands,
Water Quality Index WQI,
Aquifer, Hydrogeological
Processes, Chemical
Parameters.

ABSTRACT

Meeting freshwater demands in water-scarce regions is imperative, given challenges like hydric stress, urbanization, aridity, and population growth. This study focuses on the Tebessa aquifer system, a critical water source facing escalating demands. A primary objective is to identify actionable management strategies to improve groundwater quality dynamics in semi-arid regions. The methodology involves a comprehensive assessment of groundwater health using the Water Quality Index (WQI) approach. This method integrates diverse parameters influenced by intensive agricultural and industrial activities. Additionally, spatial relationship analysis, facilitated by Geographic Information System (GIS) technology, is employed to gain insights into complex hydrogeological processes. The multi-parameter strategy implemented results in water quality maps that highlight various ions, revealing spatial disparities and assigning quality priority classes from 'Good' to 'Poor' across the groundwater. The research, conducted in the semi-arid Tebessa-Morsott Plain, encompasses field and laboratory investigations to delineate hydrochemical traits, including alkalinity, salinity, and heightened ion concentrations. The results of the study contribute to scientific understanding by uncovering interrelationships and spatial intricacies, offering valuable insights for water resource governance. The effectiveness of the methodology, incorporating WQI and GIS, is demonstrated in the comprehensive evaluation of groundwater quality. Ultimately, this research provides a foundation for informed decision-making and sustainable management of groundwater resources in semi-arid regions.

1. Giriş

Yeraltı suyu, özellikle kıt ve öngörülemeyen yağışlar ile birlikte bu kaynağa oldukça ihtiyacı olan yarı kurak bölgelerde önemli bir içme suyu kaynağıdır. Bu bölgelerdeki yeraltı suyu rezervlerinin dayanıklılığı, su kıtlığıyla karşı karşıya olan topluluklar için hayati önem taşımaktadır. Bununla birlikte, bu kaynağın sürdürülebilirliği kalitesine bağlıdır ve saflığının sağlanması toplum sağlığı için zorunludur. Hem doğal hem de insan kaynaklı kirlenmeler tüketim için uygunluğu tehlikeye atabilir. Etkili yönetim stratejileri için yeraltı suyu kalitesinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Drias ve Toubal (2015), Kallel vd. (2018), Hamad vd. (2018a,b; 2021a,b), Elubid vd. (2019), Zeqiri vd. (2019), Nekkoub vd. (2020), Kerbatı vd. (2020), Besser vd. (2021) ve Brahmi vd. (2021), çalışma alanında ve komşu bölgelerde su ile ilgili zorlukları vurgulayarak suyun mevcudiyeti, kalitesi ve sürdürülebilirliği üzerine dikkat çekmiştir.

Çeşitli ihtiyaçlar için birincil kaynak olan Tebessa akifer sistemindeki yeraltı suyu kalitesinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi çok önemlidir. Hidrik stres, iklimsel kuraklık, hızlı kentleşme ve nüfus artışı gibi zorluklar, akifer kalitesinin aşırı kullanımına ve bozulmasına yol açmıştır. Bu çalışma, daha derin bir bilimsel anlayışa katkıda bulunmak ve sürdürülebilir çözümler geliştirmek için yeraltı suyu

kalitesinin düşmesine katkıda bulunan faktörlere odaklanmaktadır.

Su Kalite İndeksi (WQI) yöntemi, çeşitli parametreleri sentezleyerek genel su sağlığını temsil eden önemli bir araçtır. Siyasetçilerin, bilim insanlarının ve kaynak yöneticilerinin su kalitesinin değerlendirilmesi için standartlaştırılmış bir çerçeveyi teşvik ederek su kirliliğinin boyutunu ölçmelerini, eğilimleri izlemelerini ve iyileştirme stratejileri için kaynak tahsis etmelerini sağlar.

Coğrafi verilerin sistemleştirilerek ve analiz edilmesiyle bilinen Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojisi, hidrojeolojik modellemede temel bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. CBS, WQI ile birleştiğinde su kalitesi parametrelerinin kapsamlı mekansal analizlerde değerlendirilmesi için dinamik bir çerçeve sunarak etkili kaynak yönetimi ve idari planlamaya yardımcı olur.

Hamed vd. (2018; 2023), Bensoltane vd. (2021), Benmarce vd. (2021; 2023) ve Ncibi vd. (2021; 2022) çalışmalarında görüldüğü gibi, Kuzey Afrika'da yarı kurak bir bölgede su kıtlığı üzerine yapılan araştırmalar, su kıtlığı sorunlarını ele almanın aciliyeti ve karmaşıklığının altını çizmektedir. Çalışmada pH, Toplam Çözünmüş Katı Madde (TDS) ve önemli iyonları içeren çok parametrelili bir yaklaşım kullanılmış ve bu yaklaşım CBS ile sentezlenip asimile

edilerek titizlikle hazırlanmış haritalar elde edilmiştir. Bu haritalar, çalışma bölgesi genelinde yeraltı suyu kalitesinin pragmatik bir tasvirini temsil eden mekansal varyasyonlara ilişkin içgörüler sağlayan öncelik sınıflarına ayrılmış entegre haritalar olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın genel amacı, başta Tebessa olmak üzere yarı kurak bölgelerdeki yeraltı suyu kalitesinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi ve daha iyi anlaşılmasıdır. Öncelikli amaç, yeraltı suyu kalitesini değerlendirmek, temel etkileri belirlemek, mekansal ve analitik yaklaşımları entegre etmek ve yönetim stratejileri üretmektir. Elde edilen verilerin, su kıtlığı ile ilişkili riskleri azaltmak ve çevreye duyarlı alanlarda insan refahı için kritik öneme sahip su kaynaklarını korumak için kanıta dayalı politika ve stratejileri bilgilendirmesi beklenmektedir.

2. Çalışma Alanı Jeolojisi

Kuzey Afrika'nın jeolojisi, kendisinden daha geniş olan Afrika jeolojisinin içinde önemli özellikleri barındırmaktadır. Bu karmaşık jeolojik ortam, Afrika kıtasının jeolojik tarihini ve dinamiklerini anlamada büyük öneme sahiptir (Rouabhia vd., 2004; Bagwan vd., 2023; Sankar vd., 2023; Orabi vd., 2023). Cezayir ve Tunus arasındaki sınır bölgesinde, tüm çöküntü hendekleri Geç Lütetiyen yaşlı atlas yapıları ile kesişmektedir. Miyosen'in genişleme evresi, Oulad Soukies, Foussana-Kasserine hendekleri ve El Ma Labiod havzasının oluşumu ile tescillenmektedir. Tebessa ve Hammamet hendeklerinin alt tabakası horst ve grabenlerden oluşan bir mozaikten meydana gelmektedir. Tebessa hendeğinin gelişimi sırasında birbirini takip eden dört aşama tespit edilmiştir: İlk aşama Alt Villafranşiyen (Üst Pliyosen) sırasında meydana gelmiştir. İkinci aşama Üst Villafranşiyen sırasında meydana gelmiştir. Üçüncü aşama Orta Pleistosen'in sonunda meydana gelmiştir. Dördüncü aşama ise Üst Pleistosen'in sonunda meydana gelmiştir. 1995'teki üç sismik olayın da gösterdiği gibi çökme süreci halen devam etmektedir. Bu durum, son çökme aşamasında yeraltının orta kısımda battığı graben kenarlarının yükselmesi ile ilişkilidir ve süregelen bu jeodinamik faaliyet, bölgenin karmaşık tektonik evrimine ışık tutmaktadır.

Tebessa-Morsott ovası (35°24' ila 35°35' N enlemleri ve 7°50' ila 8°10' E boylamları) Cezayir'in

kuzeydoğu bölgesinde, uluslararası sınırdan 28 km ve Akdeniz'den 230 km uzaklıkta yer almaktadır. Toplam 974,4 km²'lik bir alana yayılan bu havza, bölgede çok önemli bir rol oynayan önemli akiferlere ev sahipliği yapmaktadır (Şekil 1). Bölge, yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk geçen yarı kurak bir iklime sahiptir. Yıllık yağış miktarı 200 mm ile 350 mm arasında değişmektedir ve bu da bölgenin kurak yapısının bir göstergesidir. Yaz sıcaklıkları 45°C'ye kadar çıkabilmektedir.

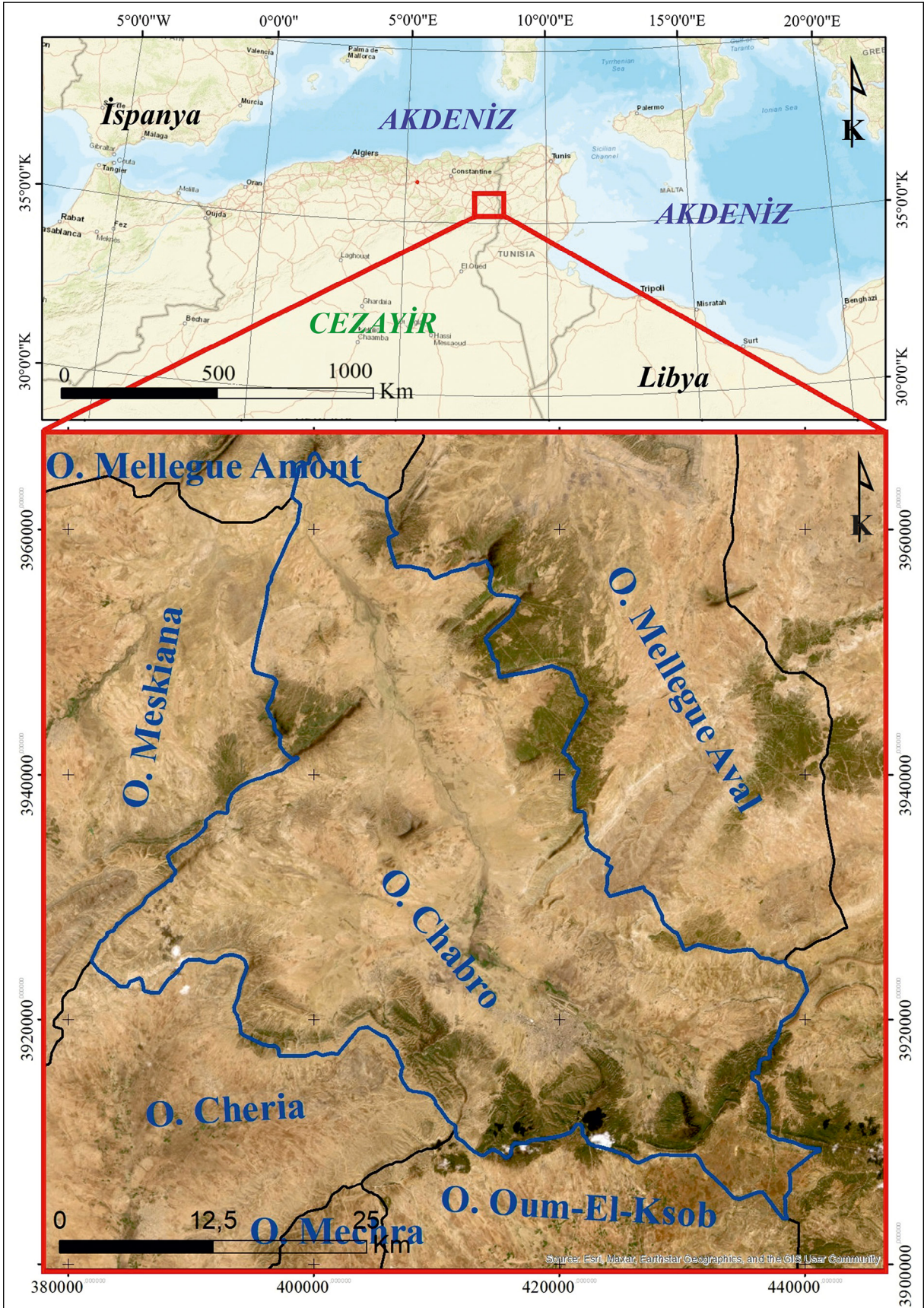
Tebessa-Morsott ovası Merdja alt su havzasına aittir ve Oued Ksob deresi tarafından drene edilmektedir. Uzun bir Kuzey-Batı-Güney-Doğu yönelimine sahiptir ve dağlık araziyle çevrili geniş bir çöküntüyü kapsamaktadır. Sahra Atlası'ndaki Kuzey Auresian (Aures Nememcha) bölgesinin jeolojik yapısına bağlı kalarak 1712 metre ile 700 metre arasında değişen rakımlara sahiptir.

Mouici vd. (2017), Tamani vd. (2019), Boulemia vd. (2021), Zerzour vd. (2020; 2021), Taib vd. (2022; 2023), Mahleb vd. (2022), Chibani vd. (2022), Benyoucef vd. (2023) ve Zighmi vd. (2023)'nin çalışmalarında da görüldüğü üzere, çok sayıda araştırmacı jeolojik anlamda çalışma alanını özenle araştırmıştır. Bölge, Tebessa bölgesindeki en eski jeolojik mostrayı oluşturan Jebel Jebissa'nın Triyas diyapirleri ile karakterize edilir. Bu oluşumlar alçıtaşı kireçtaşına geçen kumtaşı kilinden oluşmaktadır. Tebessa Çöküntü Hendeği içindeki önemli bir Pliyo-Kuvaterner dolgu, bölgede önemli bir yeraltı suyu rezervuarının varlığını kanıtlamaktadır. Bu dolgu kum, alüvyon ve kireçtaşı çakıllarından oluşmaktadır. Maastrichtiyen karbonat oluşumları havzanın Güney-Batı ve Kuzey-Doğu kenarlarında ortaya çıkarken, Turoniyen kireçtaşı Doğu'da görülmektedir (Şekil 2). Bunlar bölgenin önemli karstik rezervuarları olarak hizmet vermektedir. Havzanın merkezindeki belirgin derinlik nedeniyle ova içindeki bu rezervuar potansiyeline henüz ulaşmamıştır.

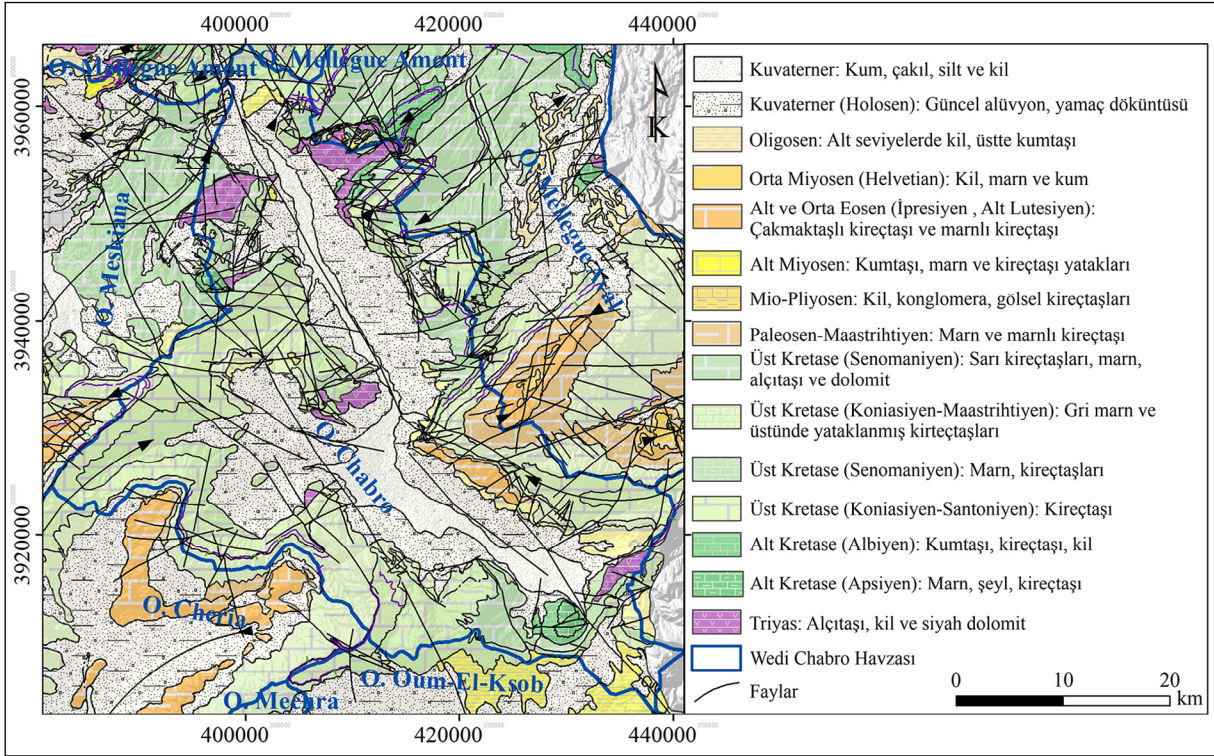
3. Materyal ve Yöntem

3.1. Alan ve Laboratuvar İncelemeleri

Şubat 2019'da Merdja, Bekkaria ve Hammamet'teki üç farklı noktada kapsamlı bir yeraltı suyu örnekleme çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmada, örnek olarak



Şekil 1- Çalışma alanının coğrafi konumu.



Şekil 2- Çalışma alanının basitleştirilmiş jeolojik haritası.

gösterilen yeraltı suyunun hidrokimyasal özelliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Toplanan yeraltı suyu numuneleri, kimyasal bileşimlerini ve özelliklerini belirlemek için analize tabi tutulmuştur.

Amerikan Halk Sağlığı Birliği (APHA) tarafından 1995 yılında belirlenen standart yöntem bilimleri kullanılarak laboratuvar ortamında çözümsel inceleme gerçekleştirilmiştir. Her bir yeraltı suyu numunesinde sekiz temel parametre titizlikle incelenmiştir. Kalsiyum (Ca^{+2}), Mg^{+2} , bikarbonat (HCO_3^-), klorür (Cl^-), sülfat (SO_4^{2-}), potasyum (K^+), sodyum (Na^+) ve ana katyonlar (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ ve K^+) araştırmanın odak noktasını oluşturmuştur. ICP-Kütle spektrometresi yöntemi kullanılarak başlıca katyonlar (kalsiyum, sodyum, magnezyum ve potasyum) belirlenmiştir. Bikarbonat (HCO_3^-) içeriğinin ölçümü, reaktif olarak hidroklorik asit (HCl) kullanılan volümetrik bir titrasyon yöntemi ile gerçekleşmiştir. Sülfatın değerlendirilmesi için spektrofotometrik türbidimetri yöntemi kullanılırken, klorür (Cl^-) içeriği gümüş nitrat ($AgNO_3$) ve potasyum dikromat ($K_2Cr_2O_7$) içeren hacimsel bir titrasyon prosedürü kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca, fenolftalein ve metil turuncunun indikatör reaktif

olarak kullanılmasının yanı sıra hidroklorik asit kullanılarak (HCl) uygulanan titrasyon yöntemi ile bikarbonat (HCO_3^-) ve karbonat (CO_3^{2-}) içeriklerinin Portamess analizi değerlendirilmiştir (Selvam vd., 2013). Bu yöntem, bu bölgelerde örneklendirilen yeraltı suyunun hidrokimyasal bileşimini daha iyi anlamamızı sağlayan bir veri seti ortaya çıkarmıştır.

3.2. Jeo Uzamsal Veri Toplama, Entegrasyon ve Enterpolasyon

Numunesi alınan noktalarının enlem, boylam ve yükseklik koordinatları 12 Kanallı GPS cihazı GARMIN ile belirlenmiştir. Bu coğrafi koordinatlar belirlendikten sonra Excel-pro programında hazırlandıktan sonra yeraltı suyu parametreleri ile birleştirilmiştir. Bu veriler daha sonra bir CBS platformuna aktarılmış ve daha ileri çözümleme ve sayısallaştırma süreçleri için temel oluşturmuştur. Nokta verisi data seti ArcGIS 10.8 yazılımına entegre edilmiş ve burada farklı özneliklere sahip nokta katmanını oluşturmuştur. Gelişmiş analizleri ve görselleştirmeyi kolaylaştırmak için bir coğrafi veri tabanı oluşturulmuştur. Bu coğrafi veri tabanı çalışılan bölge genelinde seçilen su kalitesi parametrelerinin

yaygınlığını gösteren mekânsal dağılım haritalarının oluşturulmasını kolaylaştırmıştır (Bairu vd., 2013). Çevre bilimlerinde önemli bir teknik olan mekânsal enterpolasyon, komşu noktalardaki bilinen değerlere dayanarak bilinmeyen noktalardaki değerlerin tahmin edilmesini içerir. Çok sayıda enterpolasyon yöntemi arasında yaygın olarak kullanılan iki yöntem Ters Mesafe Ağırlıklandırma (IDW) ve Sıradan Kriging'dir (Ork). Her iki yöntem de temelde mekansal otokorelasyon kavramına dayanır; mekansal olarak yakın olan örnekler benzer özellikler sergileme eğilimindedir.

IDW ve OK'nin uygulanması, tahminler için gözlem miktarlarının belirlenmesini gerektirir. Bu bağlamda, arama penceresinin kapsamı bu gözlemleri içermeli ve böylece tahmin noktasını çevreleyen bir alanı kapsamalıdır. Bu arama penceresinin konfigürasyonu, araştırılan kaynağa ilişkin ampirik bilgiye dayalı olarak belirlenir (Zarco-Perello ve Simões, 2017). IDW yöntemi, örneklenen veri noktalarından elde edilen mevcut değerlerin ortalamasını alarak bilinmeyen konumlar için veri değerlerini tahmin eder (Setianto ve Triandini, 2013).

3.3. WQI Hesaplaması

WQI, havzanın su kalitesini değerlendirmek için birden fazla su kalitesi parametrelerini kısa ve öz şekilde sayısal biçimde özetleyen değerli bir araçtır. Bu indeks yöntemi özellikle Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen içme suyu kalitesi kılavuzlarıyla uyumludur. Bir dizi karmaşık değişkeni bir veya iki basamaklı tek bir sayıya dönüştüren WQI, kapsamlı izleme verilerinin yorumlanmasını basitleştirir. Su kalite indeksleri, su kalitesinin izlenmesi ve yönetilmesi için kolaylaştırılmış bir

araç sunar. Bölgesel su kalitesindeki eğilimleri değerlendirmek ve karar vericilere su kalitesini iyileştirmeyi amaçlayan belirli müdahalelerin etkinliğini değerlendirmede yardımcı olmak için uygun bir araç olarak hizmet etmektedir (Li vd., 2019). WQI'nin hesaplanması dört ardışık adımdan oluşur. İlk adımda, dokuz su kalitesi parametresinin her birine, içme amaçlı suyun genel kalitesinin belirlenmesindeki göreceli önemine dayalı olarak bir ağırlık (w_i) atanır. Ağırlıkların belirlenmesinde parametrelerin bireysel önemleri dikkate alınmış, klorür, sülfat ve sodyum gibi parametrelere 3 ağırlık verilirken, kalsiyum, magnezyum, bikarbonat ve potasyuma 2 ağırlık verilmiştir (Çizelge 1).

Denklem 1'e göre sonraki adım bağıl ağırlığın (W_i) hesaplanmasını içerir:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Formülde "W_i" göreceli ağırlığı, "w_i" her bir parametrenin ağırlığını ve "n" parametre sayısını temsil eder.

Bununla birlikte, her bir parametreye bir kalite derecelendirme ölçeği (q_i) atanır (Denklem 2). Bu ölçek, bir su örneğindeki her bir kimyasal parametrenin konsantrasyonunun (C_i) DSÖ kılavuzlarında belirtildiği gibi standardına (S_i) bölünmesiyle elde edilir.

$$q_i = (C_i / S_i) \times 100 \quad (2)$$

Denklem (2) bu derecelendirmeyi yansıtmaktadır. "q_i" kalite derecesini, "C_i" her bir kimyasal parametrenin litre başına miligram (mg/l) cinsinden içeriğini, "S_i" ise DSÖ kılavuzuna göre her bir parametre için DSÖ içme suyu standardını ifade

Çizelge 1- Kimyasal parametrelerin bağıl ağırlığı.

Kimsayal Parametre	DSÖ Standartı	Ağırlık (w_i)	Bağıl Ağırlık (W_i)
Na ⁺	200	3	0,17
Ca ²⁺	75	2	0,12
K ⁺	12	2	0,12
Cl ⁻	250	3	0,17
SO ₄ ⁻²	250	3	0,17
HCO ₃ ⁻	120	2	0,12
Mg ²⁺	50	2	0,12
Toplam		$\sum w_i = 17$	$\sum W_i = 0,99$

etmektedir. Her bir parametre (i) için Alt İndeks (SI) daha sonra Denklem 3 kullanılarak hesaplanır:

$$SI_i = W_i q_i \quad (3)$$

Genel WQI, bireysel SI değerinin toplanmasıyla elde edilir (Denklem 4) :

$$WQI = \sum SI_i \quad (4)$$

Hesaplanan WQI değerleri genellikle mükemmel, iyi, zayıf, çok zayıf ve içmek için uygun olmayan şeklinde beş farklı sınıfa ayrılmaktadır (Çizelge 2). Bu sınıflandırma, yeraltı suyu numunelerinin kalitesinin bildirilmesine yardımcı olur ve böylece bilinçli karar vermeyi destekler (Tiwari vd., 2014).

Çizelge 2- WOI aralığı ve su kategorilerinin sınıflandırılması.

WQI Aralığı	Su Kategorisi
<50	Mükemmel Su
50-100	İyi Su
100-200	Kalitesiz Su
200-300	Çok Kalitesiz Su
>300	İçimi Uygun Olmayan Su

4. Sonuç ve Tartışma

Yeraltı su kalitesinin belirlenmesi çevresel değerlendirmede büyük önem taşımaktadır. Çizelge 3'te belirtildiği üzere, 16 yeraltı suyu numunesi için

temel istatistikler kimyasal analiz yoluyla derlenmiştir. Ayrıca Çizelge 4'te sunulan korelasyon matrisi analizi, çeşitli yeraltı suyu kalite parametreleri arasındaki karmaşık ilişkiler hakkında fikir vermektedir.

Analiz, yeraltı suyu numunelerindeki su kalitesine ilişkin temel istatistiksel parametrelerin kapsamlı bir görüntüsünü sunarak çeşitli bileşenlerin aralığına, merkezi eğilimine ve değişkenliğine ışık tutmaktadır. Maksimum ve minimum değerler, yeraltı suyu bileşimindeki önemli değişkenliği gösteren geniş konsantrasyon spektrumunu vurgulamaktadır. Ortalama değerler, her parametre için ortalama bir ölçü sağlayarak özgün içerik seviyelerini göstermektedir.

Standart sapmalar, ortalama etrafındaki dağılımı ölçerek veri kümesindeki tutarlılığı veya değişkenliği açıklar. Ortalamalar, sıralı veri kümesindeki orta noktayı gösteren ve merkezi eğilimin sağlam bir ölçüsünü sağlayan merkezi bir değer sunar. Korelasyon matrisi olan Çizelge 4, yeraltı suyu kalite parametreleri arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya koymaktadır. Özellikle, korelasyon katsayıları farklı iyonlar arasındaki ilişkilerin derecesini ve yönünü göstermektedir. Ca⁺² ve Cl⁻ arasındaki güçlü pozitif korelasyon, bu iyonları birbirine bağlayan potansiyel bir ortak kaynağa veya jeokimyasal süreçlere işaret etmektedir. Ayrıca, korelasyonlar potansiyel etkilerin

Çizelge 3- Yeraltı suyu örneklerinin su kalitesi parametrelerinin normal istatistikleri.

İSTATİSTİKLER	K(mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Na(mg/l)	Cl(mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ Meq /l
Maksimum	7,5	61	161	23,10	291,3	500	341,16
Minimum	2,70	17,01	45,62	12,50	37,99	57,60	173,24
Ortalama	5,23	37,31	94,27	17,88	147,06	294,70	261,94
Standart Sapma	1,47	14,29	28,70	3,03	76,89	125,15	55,24
Median	4,90	35,49	84,16	17,88	141,80	290	261,94

Çizelge 4- Yeraltı suyu kalite parametrelerinin korelasyon matrisi analizi sonucu.

Parametreler	Mg ⁺²	K ⁺	Ca ⁺²	Na ⁺	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
Mg ⁺²	1						
K ⁺	-0,25	1					
Ca ⁺²	0,61	-0,36	1				
Na ⁺	-0,02	0,44	0,12	1			
SO ₄ ⁻²	-0,20	0,28	-0,13	0,05	1		
HCO ₃ ⁻	0,37	-0,48	0,28	-0,31	0,09	1	
Cl ⁻	0,62	-0,21	0,59	-0,07	-0,46	0,02	1

veya etkileşimlerin belirlenmesine yardımcı olarak yeraltı suyu yönetimi ve çevresel değerlendirme için değerli bilgiler sağlar. Bu sonuçlar, incelenen bölgede kaynakların korunması ve kirliliğin önlenmesine yönelik stratejilerin oluşturulmasına yardımcı olarak yeraltı suyu özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Çalışma alanında incelenen HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ ve Na^+ iyon içeriklerinin nispeten düşük değişkenlik göstermesi dikkate değer bir gözlemdir. Spesifik olarak bikarbonat içeriği 173.24 ile 341.16 mg/l arasında, sülfat 57.60 ile 500 mg/l arasında, kalsiyum 45.62 ile 161 mg/l arasında, potasyum 2.70 ile 7.5 mg/l arasında, sodyum 12.50 ile 23.10 mg/l arasında ve magnezyum 17.01 ile 61 mg/l arasında değişmektedir. Elde edilen verilerde öne çıkan bir sonuç ise 37.99 ile 291.3 mg/l arasında geniş bir değişkenlik gösteren yüksek klorür içeriğidir. Klorür içeriği magnezyum ($R= 0.62$) ve kalsiyum ($R = 0.61$) ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Bu korelasyonlar gerçekten de yeraltı suyu tuzluluğunda bir artışa işaret edebilir. Bu tür bulgular, Merdja akifer bölgesinde oyundaki karmaşık hidrokimyasal etkileşimler hakkında değerli bilgiler sağlar. İstatistiksel analizleri, korelasyon değerlendirmelerini ve parametre konsantrasyonlarını yan yana getiren bu çalışma, incelenen alandaki yeraltı suyu kalitesi dinamiklerine ilişkin kapsamlı bir anlayış sunmaktadır. Bu bilgiler yalnızca akiferin hidrokimyasının bilimsel olarak anlaşılmasına değil, aynı zamanda su kaynakları yönetimi ve çevresel korumanın daha geniş hedeflerine de katkıda bulunmaktadır.

4.1. Mekânsal Değişkenlik Fizikokimyasal Parametre

Kalsiyum: Yeraltı suyu, akiferi çevreleyen karbonat oluşumlarının çözünmesi nedeniyle kalsiyum içerir ve ayrıca alçı taşı marnı, dolomit mineralleri ve buharlaşan tortuların varlığından etkilenir. İçme suyunda Ca^{+2} için MCL 75 mg/l'dir. Gözlemlenen Ca^{+2} içeriği 45,62 ile 161 mg/l arasında değişmektedir. Kalsiyum içeriğini gösteren mekansal dağılım haritası formüle edilerek Şekil 3'te gösterilmiştir.

Sodyum: Sodyum iyonların Djebissa yakınlarındaki triyasik alçı taşı oluşumlarının içinden geldiği görülmektedir. Akiferin kaya alt tabakasını

oluşturan alçı taşlı marn, iyon değişimi ve buharlaşma süreci yoluyla bu iyonları üretmektedir. İçme suyunda Na^+ için MCL 200 mg/l olarak belirlenmiştir. Ölçülen Na^+ içeriği 12,5 ile 23,10 mg/l arasında değişmektedir. Sodyum içeriğindeki değişkenliği gösteren mekansal bir harita Şekil 3'te sunulmuştur.

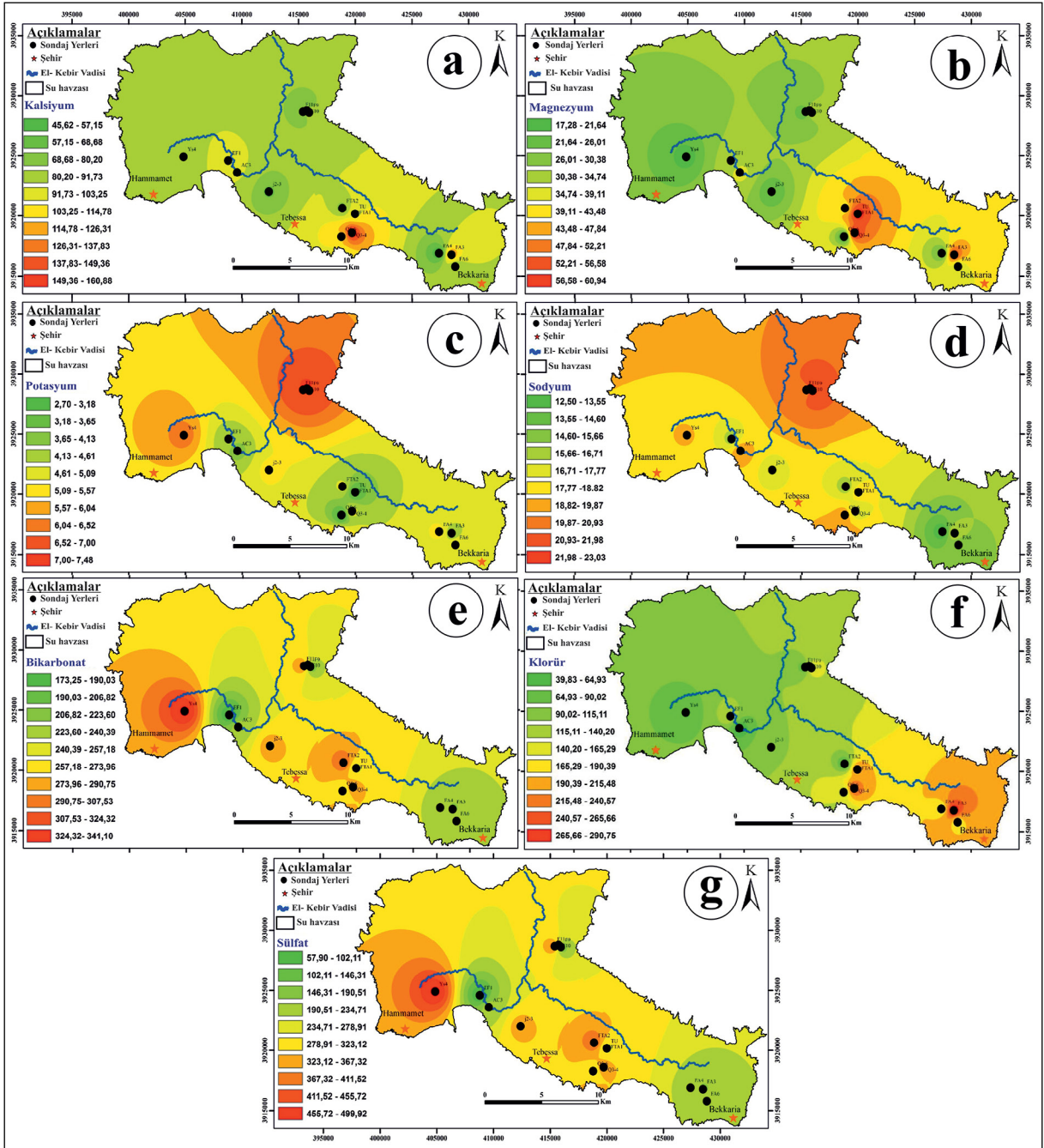
Potasyum: Yeraltı suyundaki potasyum varlığı, yakındaki tarım arazilerindeki gübre kullanımına atfedilmektedir. İçme suyunda K^+ için MCL 12 mg/l olarak tanımlanmıştır. Gözlemlenen K^+ içeriği 2,7 ile 7,50 mg/l arasında değişmektedir. Potasyum içeriğindeki değişkenliği gösteren mekansal bir harita formüle edilmiş ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

Magnezyum: Dolomit kireçtaşı oluşumunun çözünmesine bağlı olarak magnezyum varlığı içme suyunda SO_4^{2-} için MCL 50 mg/l olarak belirlenmiştir. Gözlemlenen SO_4^{2-} içeriği 17.01 ile 61 mg/l arasında değişmektedir. Sülfat içeriği dağılımını gösteren uzamsal bir harita oluşturulmuş ve Şekil 3'te sunulmuştur.

Sülfat: Sülfatın varlığı alçı taşı marnlar içindeki akçı taşının çözünmesine ve evaporitlerin süzülmesine, atmosferik çökme ve endüstriyel deşarja bağlanmaktadır. İçme suyunda SO_4^{2-} için MCL 250 mg/l olarak belirlenmiştir. Gözlenen SO_4^{2-} içeriği 57,6 ile 500 mg/l arasında değişmektedir. Sülfat içeriği dağılımını gösteren uzamsal bir harita oluşturulmuş ve Şekil 3'te sunulmuştur.

Klorür: Klorür içeriği, evaporitlerin yanı sıra önemli bir havza alanını kaplayan kum, kil ve alçı taşı yataklarının sızmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, endüstriyel faaliyetler de klorür içeriğine katkıda bulunmaktadır. İçme suyunda Cl^- için MCL 250 mg/l olarak belirlenmiştir. Gözlemlenen Cl^- içeriği 37.99 ile 291.30 mg/l arasında değişmektedir. Klorür içeriği dağılımını gösteren mekansal bir harita formüle edilmiş ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

Bikarbonat: Akiferi çevreleyen karbonat oluşumlarının çözünmesi nedeniyle bikarbonat mevcuttur. İçme suyunda HCO_3^- için MCL 120 mg/l olarak belirlenmiştir. Gözlemlenen HCO_3^- içeriği 173,24 ile 341,16 mg/l arasında değişmektedir. Şekil 3'te bikarbonat içeriğinin dağılımını özetleyen mekansal bir harita geliştirilmiştir.



Şekil 3- Fizyokimyasal parametrelerin mekansal dağılımı: a) Kalsiyum (Ca^{+2}); b) Magnezyum (Mg^{+2}); c) Potasyum (K^{+}); d) Sodyum (Na^{+}); e) Bikarbonat (HCO_3^{-}); f) Klorit (Cl^{-}); g) Sülfat (SO_4^{-2}).

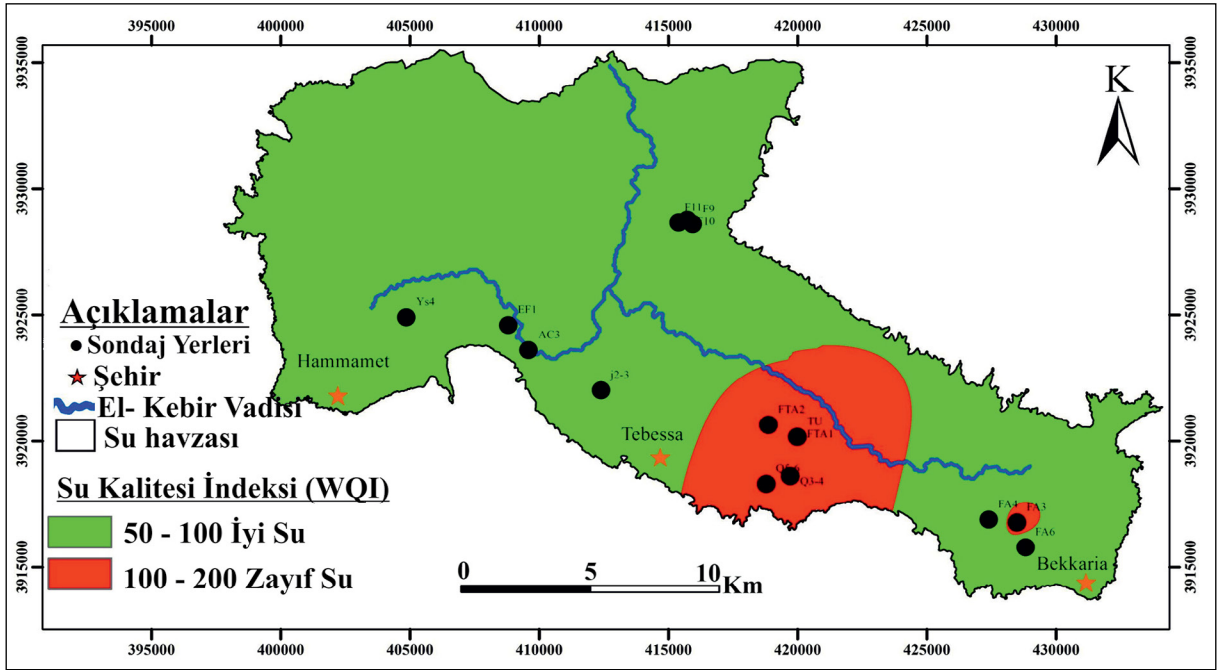
4.2. Yeraltı Su Kalite İndeksinin Haritalanması

Yeraltı suyu kalite haritasının (Şekil 4) oluşturulması, Çizelge 5'te özetlenen sınıflandırma sürecine dayanmaktadır ve ArcGIS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yeraltı suyu kalitesinin karmaşık mekansal dağılımı, litolojik özellikler, yeraltı suyunun

hidrodinamik davranışı, mevcut iklim koşulları, atık su akışı ve potansiyel kirlilik kaynakları dahil olmak üzere çeşitli faktörlerin değerlendirmesini içeren verilerdir.

Bu verinin bir parçası olarak su kalitesi parametrelerinin kapsamlı sentezini içeren temsili bir görsel olan WQI haritasının oluşturulmasıdır.



Şekil 4- Merdja ovasında su kalite indeksinin mekansal dağılım haritası.

Çizelge 5- Çalışma alanındaki her bir yeraltı suyu örneğinin Qi, SLi, WQI ve su sınıflandırması.

Numune	Na ⁺		Ca ⁺²		K ⁺		Mg ⁺²		Cl ⁻		SO ₄ ⁻²		HCO ₃ ⁻		WQI	Sınıf
	Qi	SLi	Qi	SLi	Qi	SLi	Qi	SLi	Qi	SLi	Qi	SLi	Qi	SLi		
EF1	8,05	1,37	133,60	16,03	35,83	4,30	62,22	7,47	56,72	9,64	23,04	3,92	162,67	19,52	62,25	İyi
j2-3	8,50	1,45	89,33	10,72	43,33	5,20	44,22	5,31	44,52	7,57	139,20	23,66	181,98	21,838	75,74	İyi
AC3	10,00	1,70	122,83	14,74	32,50	3,90	72,90	8,75	18,12	3,08	84,48	14,36	223,67	26,84	73,37	İyi
FA3	8,55	1,45	172,93	20,75	35,83	4,30	113,54	13,62	116,52	19,81	71,20	12,10	224,68	26,962	99,00	İyi
FA4	6,25	1,06	60,83	7,30	44,17	5,30	46,24	5,55	66,40	11,29	90,80	15,44	204,35	24,522	70,46	İyi
FA6	7,35	1,25	105,80	12,70	40,83	4,90	70,00	8,40	68,30	11,61	92,00	15,64	233,38	28,006	82,50	İyi
FTA1	9,15	1,56	134,67	16,16	24,17	2,90	121,06	14,53	90,48	15,38	103,68	17,63	196,00	23,52	91,67	İyi
FTA2	7,95	1,35	99,39	11,93	40,00	4,80	82,40	9,89	24,08	4,09	168,00	28,56	284,30	34,116	94,74	İyi
T3	10,75	1,83	106,83	12,82	59,17	7,10	87,50	10,50	40,00	6,80	138,00	23,46	244,00	29,28	91,79	İyi
TU	6,90	1,17	103,25	12,39	31,67	3,80	76,20	9,14	23,64	4,02	111,20	18,90	281,62	33,794	83,22	İyi
Q3-4	8,35	1,42	214,67	25,76	40,83	4,90	122,00	14,64	102,00	17,34	138,40	23,53	264,17	31,7	119,29	İyi
Q5-6	9,90	1,68	149,33	17,92	22,50	2,70	36,00	4,32	55,20	9,38	116,00	19,72	274,17	32,9	88,63	İyi
Ys4	9,45	1,61	112,21	13,47	52,50	6,30	40,08	4,81	28,36	4,82	200,00	34,00	144,37	17,324	82,33	İyi
F10	11,55	1,96	100,47	12,06	62,50	7,50	70,98	8,52	59,96	10,19	120,00	20,40	172,83	20,74	81,37	İyi
F9	10,95	1,86	114,36	13,72	55,00	6,60	67,10	8,05	73,99	12,58	27,95	4,75	170,83	20,5	68,07	İyi
F11	9,45	1,61	101,53	12,18	57,50	6,90	34,02	4,08	15,20	2,58	180,00	30,60	163,43	19,612	77,57	İyi
EF1	8,05	1,37	133,60	16,03	35,83	4,30	62,22	7,47	56,72	9,64	23,04	3,92	162,67	19,52	62,25	İyi

Bu süreçte karmaşık veri kümelerinin mekansal enterpolasyonlarını sağlamasıyla tanınan Kriging jeoistatistik tekniğinden yararlanılmaktadır. WQI değerleri, mükemmel su (<50), iyi su (50-100), kalitesiz su (100-200) ve çok kalitesiz su (200-300) olmak üzere dört farklı aralıkta makul bir şekilde sınıflandırılmıştır.

Kötü kaliteli olarak karakterize edilen Q3-4 kuyusu dışında çalışma alanında sınıflandırılan su kalitesinin iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Bu jeo uzamsal analiz, yeraltı suyu kalitesi dağılımını etkileyen sayısız faktörün karmaşık etkileşim sürecini içeren bir değerlendirmedir ve özellikle kaynak yönetimi ve çevresel koruma alanlarında geniş kapsamlı sonuçlar doğurmaktadır. Su kalite indeksleri, gelişmiş jeoistatistiksel yöntem bilimleri ve CBS araçlarının sinerjisi, stratejik karar alma süreçlerine rehberlik ederek hayati su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine katkıda bulunan bütünsel bir yaklaşıma yol açmaktadır.

5. Kimyasal fasiyelerin belirlenmesi

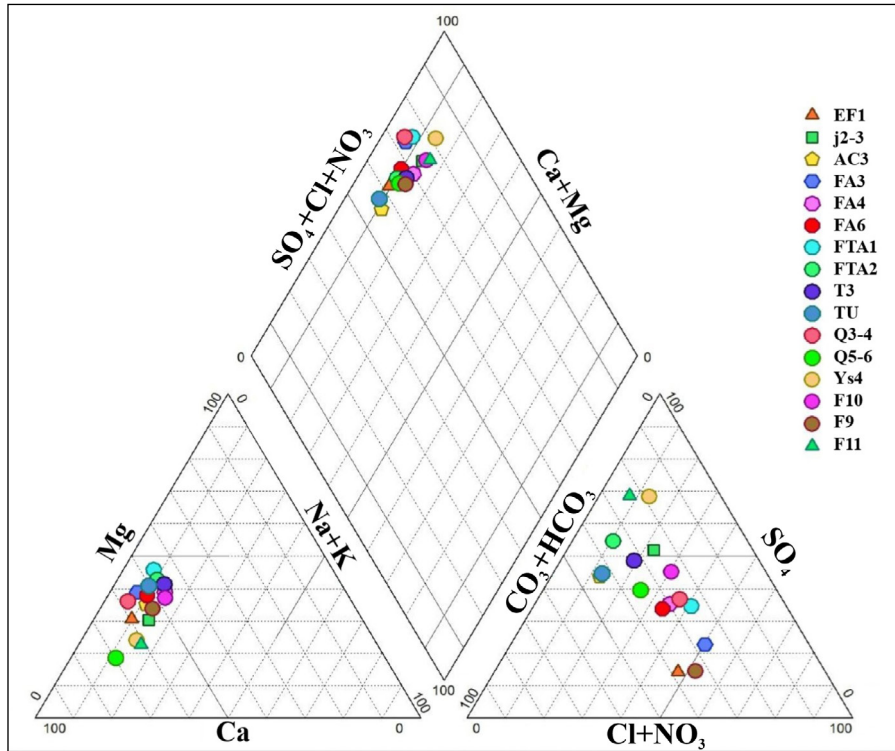
5.1. Piper diyagramı

Çalışma alanındaki hidrokimyasal parametreler arasındaki iyonik ilişkiye ve Piper trilineer diyagramında ana katyon ve anyonların çizilmesiyle dağılımlarına göre, iki baskın fasiyesin olduğu görülmektedir: Karbonat oluşumlarının ve jipsin çözünmesine bağlı olarak kalsik sülfat ve kalsik klorür.

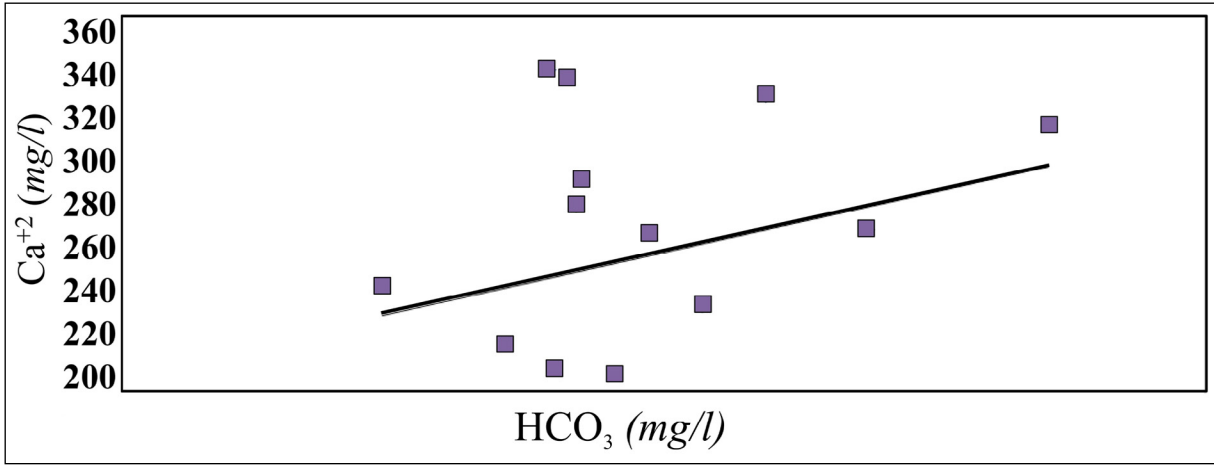
5.2. Kimyasal elementlerin kökenleri

Kalsiyum genellikle karbonat ve jips gibi mineraller bakımından zengin jeolojik oluşumlardan kaynaklanmaktadır, bu jeolojik oluşumlar kalsiyumun ortamdaki varlığı ve bulunabilirliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Diyagram analizi 16 örnekten 5'inin karbonat kökenli olduğunü göstermektedir (Şekil 5, 6, 7 ve 8).

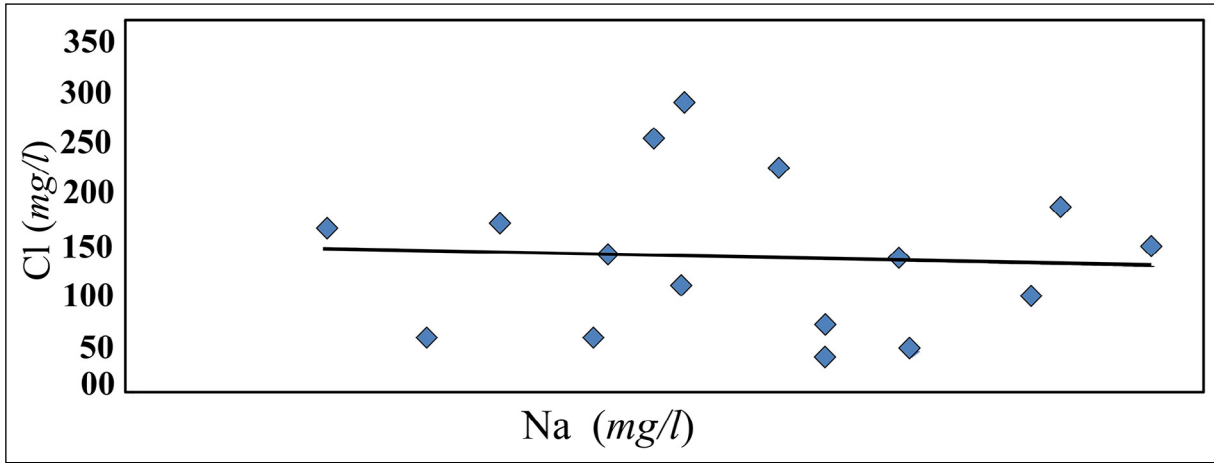
Klorür ve sodyumun varlığı triyasik oluşumların çözünmesiyle bağlantılıdır. Diyagram, su kil mineralleri ile etkileşime girdiğinde üründe başka bir sodyum kaynağının varlığına işaret etmekte ve bu da yedek sodyum iyonlarının salınmasından sonra kalsiyum iyonlarının sabitlenmesine yol açmaktadır.



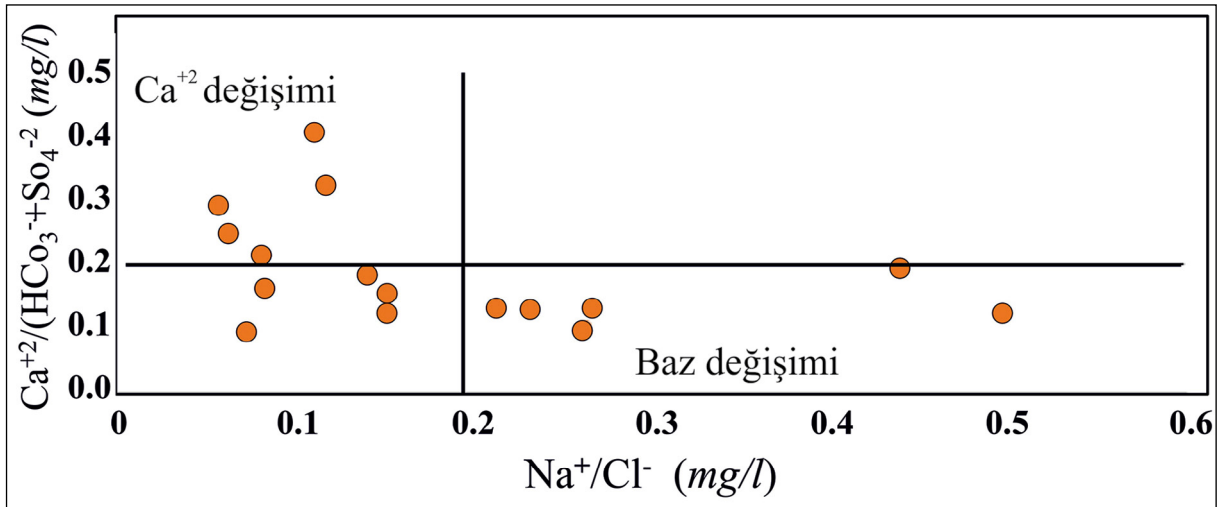
Şekil 5- Piper diyagramı kullanılarak suyun kimyasal özellikleri.



Şekil 6- Merdja ovasında Ca^{+2} vs HCO_3^- .



Şekil 7- Merdja ovasında Cl^- vs Na^+ .



Şekil 8- Merdja ovasında temel değişim.

Tuzluluk, önceki diyagramın yorumlanmasında önerildiği gibi buharlaşan veya karbonat oluşumlarının çözünmesi ve Baz Değişimi ile ilişkilidir.

6. Sonuçlar

Su kaynağına fazlasıyla ihtiyacı olan yarı kurak bölgelerde yeraltı suyu kalitesinin korunması yaşamın sürdürülmesi için hayati bir öneme sahiptir. Bu çalışma, Kuzeydoğu Cezayir'in Tebessa-Morsott ovasında yeraltı suyu kalitesini etkileyen faktörlerin karmaşık etkileşimini vurgulamaktadır. Akiferin kirlenmeye karşı hassasiyeti, artan taleplerle birleştiğinde sürdürülebilirliği sağlamak için kapsamlı bir değerlendirmeyi zorunlu kılmaktadır.

Yeraltı suyu kalitesi sadece doğal süreçlerin bir ürünü değil, aynı zamanda antropojenik faaliyetlerden de derinden etkilenmektedir. Kimyasal pestisit kullanımıyla vurgulanan artan tarımsal uygulamalar, su kalitesinin bozulmasına katkıda bulunmaktadır. Akifer ve çevresindeki toprak, litoloji ve iklim koşulları arasındaki karmaşık etkileşimler bu zorluğu daha da arttırmaktadır. Bu dinamiklerin anlaşılması, etkili yönetim stratejilerinin oluşturulması için önemlidir.

WQI, su kalitesini ölçmek için güçlü bir araç olarak hizmet vermektedir. Bu yöntem, karmaşık verileri tek bir sayısal değere indirgeyerek kolay yorumlama ve bilinçli karar verme olanağı sağlamaktadır. CBS'nin WQI'e entegre edilmesi ise bu yaklaşımı güçlendirerek, eğilimleri ve kalıpları ortaya çıkaran, kaynak yönetimine ve politika formülasyonuna yardımcı olan mekansal analizlere olanak tanımaktadır. Sonuçlar, yeraltı suyundaki kalsiyum, sodyum, potasyum, sülfat, klorür ve bikarbonat içeriklerinin öneminin altını çizmektedir. Güçlü korelasyonlar, hidrokimyasal manzarayı şekillendiren karmaşık ilişkileri ortaya çıkarmaktadır. Bu parametrelerin haritalanmasıyla, mekansal farklılıklar belirgin hale gelerek hedeflenen müdahalelere rehberlik etmektedir.

En önemlisi, WQI haritası yeraltı suyu kalitesi üzerindeki karmaşık etkiler ağını ortaya koymaktadır. Mükemmel su kalitesine sahip kuyular (WQI <50) belirlenirken, kötü ve çok kötü kaliteye sahip olan kuyular müdahale ihtiyacına işaret etmektedir. Bu jeo uzamsal anlayış, kaynak tahsisini ve karar alma süreçlerini desteklemektedir.

Çalışmanın konuya ilişkin anlayış geliştirme hedefi, sürdürülebilir yönetim hedefleriyle uyumludur ve elde edilen bulgular su kıtlığının getirdiği zorlukları aşmak için hayati önem taşıyan politikaları, müdahaleleri ve stratejileri şekillendirmektedir. Bilimsel titizlik, jeo uzamsal analiz ve disiplinlerarası öngörülerini bir araya getiren bu çalışma, yarı kurak bölgelerde yeraltı suyu kalitesinin korunmasının önünü açarak, bu paha biçilmez kaynağın gelecek nesiller için sürdürülebilir kullanımını sağlamaktadır.

Yarı kurak bölgelerde su kıtlığı ve yeraltı suyu kalitesinin düşmesi gibi çok yönlü zorlukların ele alınması kapsamlı bir yaklaşım gerektirmektedir. Devlet kurumları, yerel topluluklar ve bilimsel kurumlar arasındaki işbirliğini içeren entegre yönetim stratejileri, sürdürülebilir uygulamaları teşvik ederken kirlilik kaynaklarını kontrol etmek için düzenleyici önlemleri de kapsamalıdır. Sağlam bir yeraltı suyu izleme ağı, zaman içindeki su kalitesi değişikliklerini izlemek, şeffaflığı ve bilinçli karar almayı teşvik etmek için oldukça önemlidir. İklim esnekliği stratejileri, sürdürülebilir su uygulamaları konusunda eğitim, ekonomik teşvikler ve sınır ötesi işbirliğin süreçlere dahil edilmesi yeraltı sularının daha çok korunmasını teşvik etmektedir. Sürekli araştırma ve yenileşim, karmaşık etkileşimleri anlamak ve etkili çözümler geliştirmek için hayati önem taşımaktadır. Çevresel koruma ve arazi kullanımı desteklenerek elde edilecek sektörler arası siyasa bütünleşme, yeraltı suyu kaynaklarının adil ve sürdürülebilir kullanımını sağlayarak bütüncül bir yönetim sağlayacaktır. Paydaşlar bu tavsiyeleri benimseyerek su kıtlığının yarattığı zorlukların üstesinden gelebilir ve mevcut ve gelecek nesiller için güvenli su mevcudiyetini koruyabilir.

Katkı Belirtme

Yazarlar, Güney Akdeniz Havzası Su Kaynakları Uluslararası Birliği (IAWRSMB) ve Ferhat Abbas Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği, Jeoteknik, Su Bilimleri ve Çevre Alanında Uygulamalı Araştırma Laboratuvarı'na katkılarından dolayı teşekkürlerini sunarlar.

Değinilen Belgeler

- Bagwan, W. A., Gavali, R. S., Maity, A. 2023. Quantifying soil organic carbon (SOC) density and stock in the Urmodi River watershed of Maharashtra, India: implications for sustainable land management. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 1-17.
- Bairu, A., Tadesse, N., Amare, S. 2013. Use of geographic information system and water quality index to assess suitability of groundwater quality for drinking purposes in Hewane areas, Tigray, Northern Ethiopia. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 6 (2), 110-123.
- Benmarce, K., Hadji, R., Zahri, F., Khanchoul, K., Chouabi, A., Zighmi, K., Hamed, Y. 2021. Hydrochemical and geothermometry characterization for a geothermal system in semiarid dry climate: The case study of Hamma spring (Northeast Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 182, 104285.
- Benmarce, K., Hadji, R., Hamed, Y., Zahri, F., Zighmi, K., Hamad, A., Gentilucci M., Ncibi, K., Besser, H. 2023. Hydrogeological and water quality analysis of thermal springs in the Guelma region of North-Eastern Algeria: A study using hydrochemical, statistical, and isotopic approaches. *Journal of African Earth Sciences*, 205, 105011.
- Bensoltane, M. A., Zeghadnia, L., Hadji, R. 2021. Physicochemical Characterization of Drinking Water Quality of the Communal Water Distribution Network in Souk Ahras City/Algeria. *Civil Engineering Research Journal*, 12 (02).
- Benyoucef, A. A., Gadri, L., Hadji, R., Slimane, H., Mebrouk, F., Hamed, Y. 2023. Empirical graphical and numerical model for the schematization of underground mining operations in the heterogeneous rock masses, case of Boukhadra mine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 16 (3), 165.
- Besser, H., Dhaouadi, L., Hadji, R., Hamed, Y., Jemmali, H. 2021. Ecologic and economic perspectives for sustainable irrigated agriculture under arid climate conditions: An analysis based on environmental indicators for southern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 104134.
- Boulemlia, S., Hadji, R., Hamimed, M. 2021. Depositional environment of phosphorites in a semiarid climate region, case of El Kouif area (Algerian–Tunisian border). *Carbonates and Evaporites*, 36 (3), 1-15.
- Brahmi, S., Baali, F., Hadji, R., Brahmi, S., Hamad, A., Rahal, O., Zerrouki, H., Saadali B., Hamed, Y. 2021. Assessment of groundwater and soil pollution by leachate using electrical resistivity and induced polarization imaging survey, case of Tebessa municipal landfill, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (4), 1-13.
- Chibani, A., Hadji, R., Hamed, Y. 2022. A combined field and automatic approach for lithological discrimination in semi-arid regions, the case of geological maps of bir later region and its vicinity, Nementcha mounts, Algeria. *Geomatics, Landmanagement and Landscape* (4), 7–26.
- Drias, T., Toubal, A. C. 2015. Cartographie de la vulnérabilité a la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (bassin versant de l'Oued Ksob) extrême est algérien. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (22), 35-48.
- Elubid, B., Huang, T., H. Ahmed, E., Zhao, J., M. Elhag, K., Abbass, W., Babiker, M. 2019. Geospatial distributions of groundwater quality in Gedaref state using geographic information system (GIS) and drinking water quality index (DWQI). *International journal of environmental research and public health*, 16 (5), 731.
- Hamad, A., Baali, F., Hadji, R., Zerrouki, H., Besser, H., Mokadem, N., Legrioui R., Hamed, Y. 2018*a*. Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundary basin). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3 (1), 7.
- Hamad, A., Hadji, R., Bâali, F., Houda, B., Redhaounia, B., Zighmi, K., Legrioui, R., Brahmi S., Hamed, Y. 2018*b*. Conceptual model for karstic aquifers by combined analysis of GIS, chemical, thermal, and isotopic tools in Tuniso-Algerian transboundary basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 11 (15), 409.
- Hamad, A., Abdeslam, I., Fehdi, C., Badreddine, S., Mokadem, N., Legrioui, R., Hadji R. Hamed, Y. 2021*a*. Vulnerability characterization for multi-carbonate aquifer systems in semiarid climate, case of Algerian–Tunisian transboundary basin. *International Journal of Energy and Water Resources*, 1-14.
- Hamad, A., Hadji, R., Boubaya, D., Brahmi, S., Baali, F., Legrioui, R., Abdeslam, I., Hidouri, B., Hamed, Y. 2021*b*. Integrating gravity data for structural investigation of the Youkous-Tebessa and Foussana-Talah transboundary basins (North Africa). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6 (2), 1-11.
- Hamed, Y., Hadji, R., Redhaounia, B., Zighmi, K., Bâali, F., El Gayar, A. 2018. Climate impact on surface and groundwater in North Africa: A global synthesis of findings and recommendations.

- Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 3 (1), 25.
- Hamed, Y., Hadji, R., Ahmadi, R., Ayadi, Y., Shuhab, K., Pulido-Bosch, A. 2023. Hydrogeological investigation of karst aquifers using an integrated geomorphological, geochemical, GIS, and remote sensing techniques (Southern Mediterranean Basin—Tunisia). *Environment, Development and Sustainability*, 1-33.
- Kallel, A., Ksibi, M., Dhia, H. B., Khélifi, N. (Eds.). 2018. Recent advances in environmental science from the Euro-Mediterranean and surrounding regions: proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1), Tunisia 2017. Springer International Publishing.
- Kerbaty, N. R., Gadri, L., Hadji, R., Hamad, A., Boukelloul, M. L. 2020. Graphical and Numerical Methods for Stability Analysis in Surrounding Rock of Underground Excavations, Example of Boukhadra Iron Mine NE Algeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-9.
- Li, H., Smith, C. D., Wang, L., Li, Z., Xiong, C., Zhang, R. 2019. Combining spatial analysis and a drinking water quality index to evaluate monitoring data. *International journal of environmental research and public health*, 16 (3), 357.
- Mahleb, A., Hadji, R., Zahri, F., Chibani, A., Hamed, Y. 2022. Water-Borne Erosion Estimation Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Model Over a Semiarid Watershed: Case Study of Meskiana Catchment, Algerian-Tunisian Border. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-14.
- Mouici R, Baali F, Hadji R, Boubaya D, Audra, P., Fehdi, C., Cailhol, D., Jaillot, S., Arfib, B. 2017. Geophysical, Geotechnical, and Speleologic assessment for karst-sinkhole collapse genesis in Cheria plateau (Algeria). *Mining Science*, 24, 59-71.
- Ncibi, K., Hadji, R., Hajji, S., Besser, H., Hajlaoui, H., Hamad, A., Mokadem, N., Ben Saad, A., Hamdi, M., Hamed, Y. 2021. Spatial variation of groundwater vulnerability to nitrate pollution under excessive fertilization using index overlay method in central Tunisia (Sidi Bouzid basin). *Irrigation and Drainage*.
- Ncibi, K., Mastrocicco, M., Colombani, N., Busico, G., Hadji, R., Hamed, Y., Shuhab, K. 2022. Differentiating Nitrate Origins and Fate in a Semi-Arid Basin (Tunisia) via Geostatistical Analyses and Groundwater Modelling. *Water*, 14 (24), 4124.
- Nekkoub, A., Baali, F., Hadji, R., Hamed, Y. 2020. The EPIK multi-attribute method for intrinsic vulnerability assessment of karstic aquifer under semi-arid climatic conditions, case of Cheria Plateau, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (15), 1-15.
- Orabi, O. H., El-Sabbagh, A., Mansour, A. S., Ismail, H., Taha, S. 2023. Foraminifera study for the characterization of the Campanian/Maastrichtian boundary in Gebel Owaina, Nile Valley. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 1-19.
- Rouabhia, A., Baali, F., Kherici, N., Djabri, L. 2004. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15 (4), 347-352.
- Sankar, T. K., Ambade, B., Mahato, D. K., Kumar, A., Jangde, R. 2023. Anthropogenic fine aerosol and black carbon distribution over urban environment. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 1-10.
- Selvam, S. I. J. D., Mala, R. I. J. D., Muthukakshmi, V. 2013. A hydrochemical analysis and evaluation of groundwater quality index in Thoothukudi district, Tamilnadu, South India. *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 2 (3), 25-37.
- Setianto, A., Triandini, T. 2013. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. *Journal of Applied Geology*, 5 (1).
- Taib, H., Ben Abbas, Ch., Khiari, A., Hadji, R. 2022. Geomatics-based assessment of the Neotectonic landscape evolution along the Tebessa-Morsott-Youkous collapsed basin, Algeria, eomatics, *Landmanagement and Landscape* (3), 131–146.
- Taib, H., Hadji, R., Hamed, Y., Bensalem, M. S., Amamria, S. 2023. Exploring neotectonic activity in a semiarid basin: a case study of the Ain Zerga watershed. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 1-14.
- Tamani, F., Hadji, R., Hamad, A., Hamed, Y. 2019. Integrating Remotely Sensed and GIS Data for the Detailed Geological Mapping in Semi-Arid Regions: Case of Youks les Bains Area, Tebessa Province, NE Algeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-11.
- Tiwari, A. K., Singh, P. K., Mahato, M. K. 2014. GIS-based evaluation of water quality index of ground water resources in West Bokaro Coalfield, India. *Current world environment*, 9 (3), 843.

- Zarco-Perello, S., Simões, N. 2017. Ordinary kriging vs inverse distance weighting: Spatial interpolation of the sessile community of Madagascar reef, Gulf of Mexico. *Peer J*, 5, e4078.
- Zeqiri, R. R., Riheb, H., Karim, Z., Younes, G., Mania, B., Aniss, M. 2019. Analysis of safety factor of security plates in the mine" Trepça" Stantërg. *Mining Science*, 26, 21.
- Zerzour, O., Gadri, L., Hadji, R., Mebrouk, F., Hamed, Y. 2020. Semi-variograms and kriging techniques in iron ore reserve categorization: Application at Jebel Wenza deposit. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (16), 1-10.
- Zerzour, O., Gadri, L., Hadji, R., Mebrouk, F., Hamed, Y. 2021. Geostatistics-Based Method for Irregular Mineral Resource Estimation, in Ouenza Iron Mine, Northeastern Algeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-10.
- Zighmi, K., Zahri, F., Hadji, R., Benmarce, K., Hamed, Y. 2023. Polymetallic mineralization hosted in the Neogene sedimentary strata of the Algerian Tellian Range: A comprehensive overview. *Mining of Mineral Deposits*, 17 (2), 20-27.