



Niğde (Orta Anadolu, Türkiye) Merkezi yeraltısuyunun kalite değerlendirmesi Quality assessment of groundwater in Central Nigde (Central Anatolia, Türkiye)

Uğur Erdem Dokuz^{1,*}, Selma Yaşar Korkanç², Mustafa Korkanç³, Hilal Dokuz⁴

^{1,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

⁴ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı, Niğde kent merkezinin üzerinde yer aldığı alüvyon akiferin yeraltısuyu kalitesinin ve kullanım olanaklarının belirlenmesidir. Yapılan çalışmada, yeraltıları ulusal ve uluslararası standartlar yardımıyla içme ve kullanma suyu; Elektriksel İletkenlik (EC), Toplam Sertlik (TH); Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR); Sodyum Yüzdesi (%Na); Magnezyum Oranı (MR); Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC); Kelly İndisi (KI), Permeabilite İndisi (PI) yardımıyla tarımsal sulama suyu; Langier Doygunluk İndisi (LI), Larson-Skold İndisi (LS), Ryznar Stabilité İndisi (RSI), Puckorius Kabuklaşma İndisi (PSI), Agresiflik İndisi (AI), Klorür Sülfat Kütle Oranı (CSMR) ve mineral doymuluk indisleri yardımıyla da endüstriyel amaçlı kullanma suyu bakımından değerlendirilmiştir. Çalışma alanındaki suların genel olarak sulamaya uygun kalitede sular olduğu, içme-kullanma suyu olarak ise alüvyonun orta kısmında tarımsal kirlilik, mansap kısmına doğru jeotermal sularla karışım sonucu kirlilik saptanmıştır. Akiferin beslenme bölgesinde yeraltısuyunda düşük iyon içeriğine rağmen, jeotermal akışkan karışımın etkin olduğu bölgede düşük pH ve yüksek iyon yükü nedeniyle yeraltılarının endüstriyel kullanıma uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Niğde, Alüvyon akifer, Hidrokimya, Su kalitesi, Jeotermal etki

1 Giriş

Canlı yaşamının en önemli yapıtaşlarından biri olan su, insanlık tarihinin her döneminde hayatı öneme sahip olmakla birlikte tarihin akışı içerisinde önemi hızla artmıştır. Sanayi Devrimi'nden başlayan süreçte ise gerek endüstriyel amaçlı su kullanımı gerekse artan nüfus ve nüfusun belli bölgelerde yoğunlaşması nedeniyle su kaynaklarına duyulan gereksinimdeki artış daha da hızlanmıştır. Gerek dış etkenlere karşı yüzey sularına nazaran nispeten daha korunaklı olması, gerek mevsimsel etkilerin daha geç ve nispeten az hissedilmesi gerekse de kullanımda sağladığı kolaylıklar nedeniyle insani faaliyetlerde yeraltıları daha fazla tercih edilmektedir. Dünya nüfusunun üçte ikisi içme ve kullanma suyu ihtiyacını yeraltı sularından sağlamakta [1-

Abstract

This study aims to assess the groundwater quality and usability of the alluvial aquifer where the city center of Niğde is located. Groundwaters were evaluated based on their hydrochemical properties using national and international standards. The water quality was assessed for drinking and domestic use; agricultural irrigation suitability was determined based on Electrical Conductivity (EC), Total Hardness (TH), Sodium Adsorption Ratio (SAR), Sodium Percentage (%Na), Magnesium Ratio (MR), Residual Sodium Carbonate (RSC), Kelly Index (KI), and Permeability Index (PI); while industrial usability was evaluated using the Langelier Saturation Index (LI), Larson-Skold Index (LS), Ryznar Stability Index (RSI), Puckorius Scaling Index (PSI), Aggressiveness Index (AI), Chloride-Sulfate Mass Ratio (CSMR), and mineral saturation indices. The results indicate that the groundwater in the study area is generally suitable for irrigation. However, in terms of drinking and domestic use, contamination was detected due to agricultural activities in the central part of the alluvial aquifer and mixing with geothermal waters in the downstream sections. Despite the low ion content in the groundwater in the recharge zone of the aquifer, it was concluded that the groundwater is not suitable for industrial use due to the low pH and high ion load in the region where the geothermal fluid mixture is active.

Keywords: Niğde, Alluvium aquifer, Hydrochemistry, Water quality, Geothermal effect

3]; dünya genelinde yapılan sulamanın da %43'ü yeraltılarından karşılanmaktadır [4]. Nitekim buzullar hariç gezegenimizdeki kullanılabilir tatlısu rezervinin %97'sini de yeraltıları oluşturmaktadır [3]. Artan yoğun yeraltısuyu kullanımının yanı sıra küresel iklim değişikliklerinin olumsuz etkileri yeraltıları üzerindeki baskıyı arttırmaktadır. Bu durum özellikle kurak-yarı kurak iklime sahip bölgelerde doğal ekosistemleri, sürdürülebilir kalkınmayı ve dolayısıyla toplumsal refahı ve toplum sağlığını tehdit etmektedir. Nitekim dünya üzerinde işletilen yeraltılarının %65'i içme, %20'si hayvancılık ve tarımsal sulama, %15'i ise endüstriyel su ihtiyacını karşılamak üzere kullanılmaktadır [5]. Su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerin en önemli sonucu kullanılabilir su miktarında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: udokuz@ohu.edu.tr (U. E. Dokuz)

Geliş / Received: 03.03.2025 Kabul / Accepted: 25.03.2025 Yayınlanma / Published: 15.04.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1650043

azalma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum su kaynaklarının miktar bakımından azalmasının yanı sıra doğal ve antropojenik faaliyetler sonucu su kalitesinin kötüleşmesinin de bir sonucudur. Nitekim su kaynaklarından etkin şekilde faydalanılabilmesi için suların hangi amaçla kullanılacağına bağlı olarak belirli kalite parametrelerini sağlaması gerekmektedir [1]. Kalite bakımından yeterli seviyede olmayan sular çevre ve halk sağlığı sorunlarının yanı sıra tarımsal arazilerin zarar görmesine, ürün kalitesinin bozulmasına, endüstriyel kullanımda ise maliyet kayıplarına sebep olmaktadır. Günümüzde hastalıkların yaklaşık %80'i; gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşen ölümlerin yaklaşık üçte biri temiz suya ulaşmada yaşanan zorluklardan kaynaklanmaktadır [6]. Bu nedenle su kalitesinin korunmasının yanı sıra kalite parametrelerinin saptanarak, kullanım amacına göre değerlendirilmesi doğal ekosistemin, toplum sağlığı ve refahının korunması için de önem arz etmektedir. Su kimyası, suyun kökeni, kimyasal fasiyesi, beslenme-boşalım süreçlerinde maruz kaldıkları etkiler, su-kayaç etkileşimi gibi bilgilerin yanı sıra suyun kullanım olanakları hakkında da önemli bilgiler sağlamaktadır [7-9]. Bu nedenle birçok çalışma, farklı kullanım amaçları için yeraltısuyu kalitesini belirlemeye odaklanmıştır [1, 5, 10-16]. Çalışmaların bazıları su kalitesini genel hidrokimyasal özellikleri standartlar ışığında değerlendirerek özellikle içme suyu ve insan sağlığına etkilerine odaklanmışken [1, 11, 12, 14-16]; bir kısmı da suları indis hesaplamaları yardımıyla tarımsal ve endüstriyel amaçlı kullanıma uygunluk açısından değerlendirmiştir [1, 11, 13, 14, 17].

Çalışmanın gerçekleştirildiği, İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan Niğde ili yarı kurak iklimi ve jeolojik koşulların da etkisiyle diğer Orta Anadolu illeri gibi su kaynakları bakımından nispeten fakir bir alanda bulunmakta olup kentin su ihtiyacının önemli bir bölümü yeraltısularından karşılanmaktadır. Özellikle son yıllarda yaşanan sosyo-ekonomik gelişmeler bölgede su kaynaklarının önemini ve su kaynakları üzerindeki baskıyı ciddi derecede arttırmıştır. Buna karşın Niğde kent merkezi dolayında hidrojeokimyasal özellikleri üzerine yapılmış çalışmalar sınırlıdır. Lermi ve Ertan [18], Niğde kent merkezi yakınında kırsal kesime ait kuyu ve kaynak sularının hidrojeokimyasal özelliklerini; Ciner vd. [19], ise Niğde kent merkezi yeraltısularını, iz elementler bakımından incelemişlerdir. Her iki çalışma da yeraltısularının genel hidrokimyasal özelliklerini incelemiş olup, As kirliliğinin kökenine ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur. Dokuz vd. [20], Niğde kent merkezi dolayında yeraltı ve yüzey sularının hidrokimyasal özelliklerini incelemiş ve bu özelliklerin ortaya çıkmasında etkin olan faktörleri değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada ise yeraltısuyu kalitesinin ve kullanım olanaklarının belirlenmesi amacıyla alüvyon akifere ait yeraltısuyu örneklerinin hidrokimyasal özelliklerinden faydalanarak sular, ulusal [21] ve uluslararası standartlar [6] yardımıyla içme ve kullanma suyu; Elektriksel İletkenlik (EC), Toplam Sertlik (TH); Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR); Sodyum Yüzdesi (%Na); Magnezyum Oranı (MR); Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC); Kelly İndisi (KI), Permeabilite İndisi (PI) yardımıyla tarımsal sulama suyu; Langier Doygunluk İndisi

(LI), Larson-Skold İndisi (LS), Ryznar Stabilité İndisi (RSI), Puckorius Kabuklaşma İndisi (PSI), Agresiflik İndisi (AI), Klorür Sülfat Kütle Oranı (CSMR) ve mineral doyumluk indisleri yardımıyla da endüstriyel amaçlı kullanma suyu bakımından değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Çalışma alanı

Çalışma alanı İç Anadolu Bölgesi'nin güneydoğusunda bulunan Niğde ilinin kent merkezi ve yakın dolayını kapsamaktadır. 37° 55'-38° 03' kuzey enlemleri ve 34° 36'-34° 45' doğu boylamları arasında yer alan çalışma alanı, batıda Melendiz, doğuda ise Aladağlar'a ait yükseltiler arasında, kuzeyindeki Misli Ovası ile güneyindeki Bor Ovası'nı birbirine bağlayan dar bir geçit görünümündeki arazi üzerine yer almaktadır. Kuzeyde Aktaş kasabası civarında doğan Karasu Deresi, kent merkezini kat ederek Akkaya Barajı'nı besler (Şekil 1). Bölgede tipik karasal iklim hakimdir. Uzun yıllar (1935-2024) meteoroloji verilerine göre ortalama sıcaklıklar en yüksek 22,5 (Ağustos) ile en düşük -0,2 °C (Ocak) arasında değişmektedir. 89 yıllık yağış ortalaması 342,8 mm'dir [22]. Yağışlar kışın kar, bahar aylarında yağmur olarak düşmektedir.

2.2 Örneklem ve analiz yöntemleri

Çalışma kapsamında Niğde kent merkezi ve dolayında yayılım gösteren alüvyon akifer ve yakın dolayını temsil etmesi amacıyla 25 noktadan yeraltısuyu örneklenmiştir. 2016-2020 yılları arasında yapılan arazi çalışmaları ile alanın hidrojeoloji haritası oluşturulmuş ve FEB2016/14-BAGEP nolu projeden elde edilen analiz sonuçları [20], yüzey suları çıkarılarak ve örnekler yeraltısuyu akım yönü boyunca yeniden numaralandırılarak kullanılmıştır. Numuneler katyon ve anyon analizleri (500'er ml) için polietilen numune kaplarında, 0,45µm filtrelerden süzülerek, ayrı ayrı örneklenmiştir. Katyon analizleri için kullanılacak olan numunelere pH'ı 2'nin altında tutmak için HNO₃ ilave edilmiştir. Ana katyon analizleri Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM), Mikroanaliz-ICP Laboratuvarı'nda ICP-OES cihazında, anyon analizleri ise Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Analitik Kimya Laboratuvarında, HCO₃⁻ için titrimetrik yöntem, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ için ise iyon kromatografi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Örneklem sırasında suların fizikokimyasal özellikleri (T, EC, pH, DO) Hach Lange marka taşınabilir ölçüm cihazı ile kuyu başında ölçülmüştür. Elde edilen analiz ve ölçüm sonuçları grafiksel yöntemler ve indis hesaplamaları ile değerlendirilmiştir. Hidrojeokimyasal grafiklerin hazırlanmasında Aquachem paket programı kullanılmıştır. Suların iyon dengesi (EN) hesaplamaları yine aynı program yardımıyla gerçekleştirilmiş olup kirlilik etkisi ile kimi numunelerin EN değerlerinin nispeten arttığı görülmüş olup, bu artışlar kabul edilebilir sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Jeolojik ve hidrojeolojik özellikler

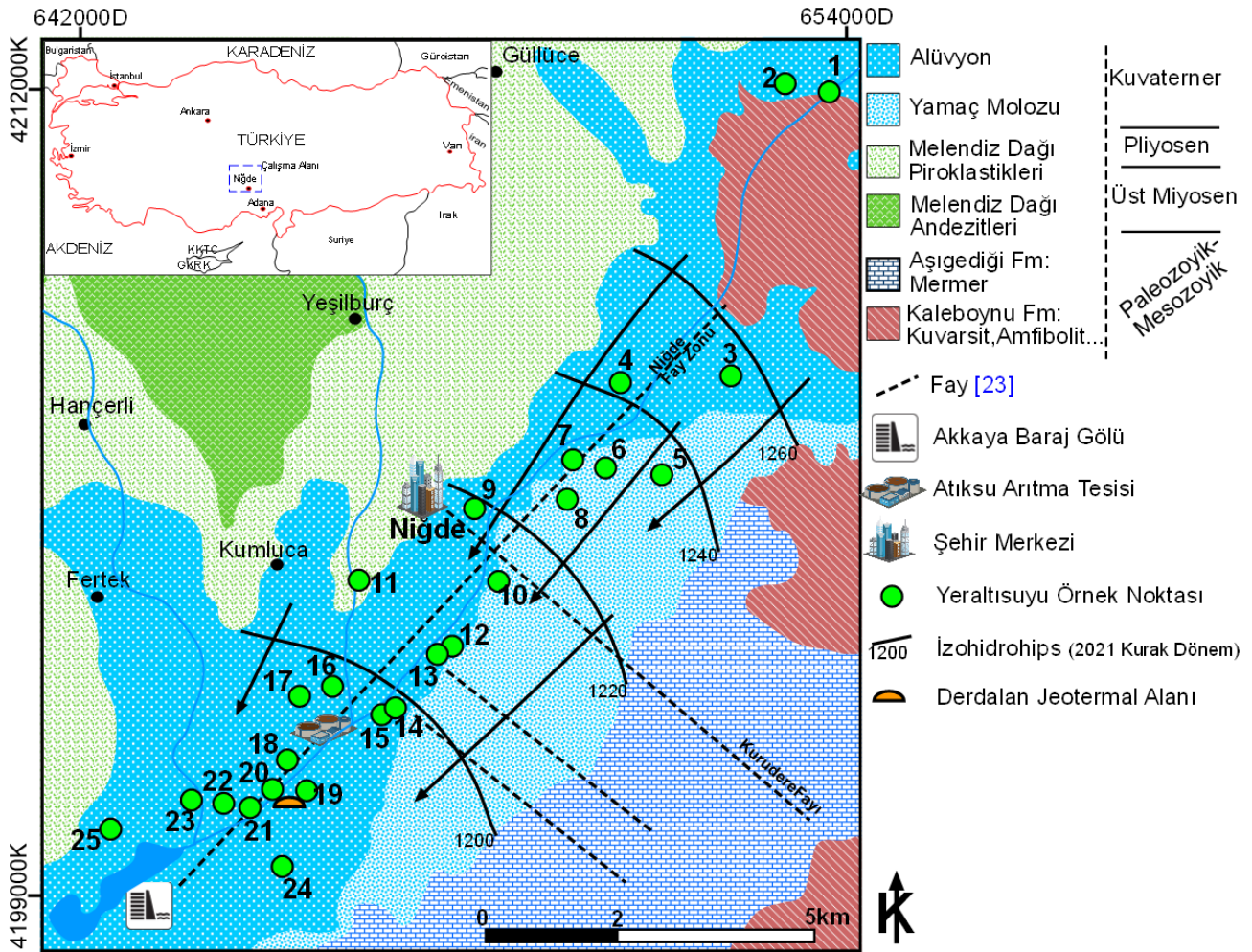
Çalışma alanı jeolojik bakımdan, kuzey-kuzeybatısında Kapadokya Volkanik Provansı, güney-güneydoğusunda ise

Toroslar'ın etkisi altındadır. Alanın kuzey-kuzeybatısında Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı andezit ve piroklastiklerden oluşan volkanitler, doğu-güneydoğusunda ise Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı Aşığediği Formasyonu'na ait mermerlerce temsil edilen temel birimler yüzeylenmektedir. Daha doğuda ise genel olarak kuvarsit, amfibolit ve şistlerden oluşan Kaleboynu Formasyonu yüzeylenmektedir (Şekil 1). Niğde kent merkezi ise genel olarak bu iki birimin ortasındaki çöküntüde depolanmış alüvyon örtü üzerine kurulmuştur. Alüvyon örtü, inceleme alanını yaklaşık KD-GB yönlü kat eden hattın güneyinde Aşığediği Formasyonu'na ait mermerleri, kuzeyinde kalan bölgede ise Melendiz Dağı volkanitlerini uyumsuz olarak örtmektedir [23, 24]. Kilden çakıla kadar değişen boyutta tanelerin heterojen ve anizotrop şekilde depolanması ile oluşmuş olan alüvyon örtü yer yer tuf seviyeleri içermektedir. Alüvyon örtü, başlıca Aşığediği ve Kaleboynu Formasyonları'na ait metamorfikler olmak üzere, daha ziyade batı kesimde ise Melendiz Dağı Volkanitleri'ne ait kayalar parçaları ve tanelerden oluşmaktadır. Bu nedenle alüvyon örtünün hidrojeolojik özellikleri de değişkendir. Yapılan incelemeler neticesinde alüvyon örtünün kil, silt boyu taneler içeren ve tüflü seviyelerinin geçirimsiz, kum, çakıl boyutu tanelerden

oluştugu kesimlerinin ise geçirimli özellik taşıdığı görülmüştür. Geçirimsiz kil, silt boyu tanelerden ve yer yer tüflerden oluşan seviyeler arasında değişik derinlik ve seviyelerde depolanmış olan kum, çakıl boyutu gevşek sedimanlar serbest ve basınçlı akifer seviyelerini oluşturmaktadır. Niğde kent merkezi alüvyon akiferini çevreleyen volkanitlerin kırıklı çatlaklı kesimleri ile Aşığediği ve Kaleboynu Formasyonları ile temsil edilen Niğde Masifi'nin (özellikle mermerlerin) kırıklı çatlaklı ve yer yer karstik kesimleri akifer özelliği taşımakta olup sırasıyla kuzey-kuzeybatıdan ve güneydoğudan alüvyon akiferi beslemektedir [20]. Yeraltısuyu derinlikleri 3-20 m, seviyeleri ise 1200-1260 m arasında değişmektedir. Genel yeraltısuyu akım yönü KD'dan GB'ya doğrudur [20] (Şekil 1).

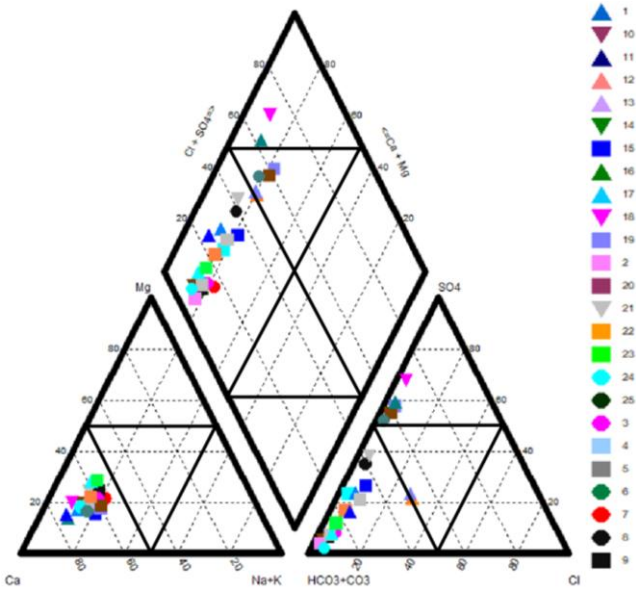
3.2 Hidrojeokimyasal değerlendirmeler

Hidrolojik döngü sırasında yağışın yeryüzüne düşmesinden itibaren yaşanan hidrojeolojik süreçler sırasında su-kayaç etkileşimi, antropojenik faaliyetler, farklı su kütlelerinin karışımı ile yeraltısuyunun kimyasal özellikleri değişmektedir.

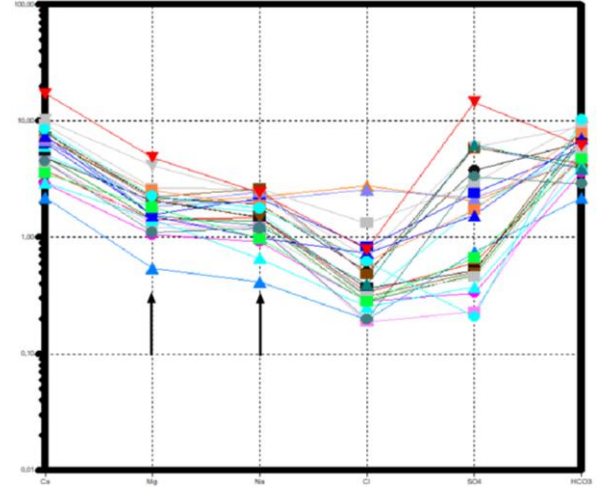


Şekil 1. Çalışma alanının hidrojeoloji haritası (Dokuz vd. [20]'den değiştirilerek)

Bu durum suların kalitesini de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yeraltısularının hidrokimyasal özelliklerinin saptanması ve bu özelliklerde meydana gelen değişimlerin anlaşılması yeraltısını kalitesini etkileyen faktörlerin belirlenmesine de yardımcı olmaktadır [25-30]. Çalışma kapsamında değerlendirilen yeraltısını örneklerine ait fizikokimyasal ölçüm ve hidrokimyasal analiz sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur. Buna göre suların pH değerleri 5,67- 7,84; EC değerleri ise 384-1472 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Suların ana iyon derişimleri Piper [31] (Şekil 2) ve Schoeller [32] (Şekil 3) diyagramlarında değerlendirildiğinde suların katyonlar bakımından Ca^{2+} , anyonlar bakımından ise HCO_3^- ’ca zengin oldukları anlaşılmıştır. Suların Piper [31] diyagramında katyonlar bakımından kümelenme göstermelerine karşın Schoeller [32] diyagramında genel olarak akım yönü boyunca Na^+ ve kısmen de Mg^{2+} zenginleşmeleri söz konusudur. Anyonlar bakımından ise 12 ve 13 nolu örneklerde görülen düşük SO_4^{2-} ve Cl^- içeriğinin yanı sıra SO_4^{2-} bakımından belirgin zenginleşmeler söz konusudur. Böylece Ca-HCO_3 , $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$, $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$, Ca-Mg-HCO_3 , $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$, $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ ve $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ tipinde hidrokimyasal fasiyesler ortaya çıkmıştır. Mg^{2+} ve SO_4^{2-} zenginleşmeleri Niğde kent merkezinin güney kesiminde maksimuma ulaşmaktadır. Bu alanın Dardalan Jeotermal Alanı’na yakınlığı söz konusu zenginleşmelerin ve dolayısıyla hidrokimyasal karakter değişiminin başlıca jeotermal karışım etkisi ile ortaya çıktığını göstermektedir [20] (Şekil 2). Na^+ zenginleşmesi ise jeotermal alana yakın örneklerin yanı sıra alüvyonun orta kesiminde görülmektedir. Bu durum söz konusu zenginleşmelerin jeotermal akışkan etkisi ve/veya alüvyonda killi seviyelerin yoğunlaşmasından kaynaklı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 2. Piper Diyagramı (Dokuz vd. [20]’den değiştirilerek)



Şekil 3. Schoeller Diyagramı (Semboller için Şekil 2’ye bakınız)

3.3 Su kalitesi değerlendirmeleri

Başta içme ve kullanma suları olmak üzere suların kimyasal özellikleri, kullanım amaçlarına bağlı olarak önem arz etmektedir. Bu nedenle içme ve kullanma suları için [6, 21] insan sağlığının korunması, sulama suları için [9, 32-36] sürdürülebilir tarımın sağlanması, verimin artırılması, endüstriyel amaçlı kullanım suları için [37-42] ise işletme maliyetinin düşürülmesi amacıyla su kalite parametreleri tanımlanmış ve çeşitli indisler geliştirilmiştir.

3.3.1 İçme ve insani kullanım suları bakımından değerlendirme

İçme sularının insan sağlığına olası olumsuz etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla çalışma kapsamında ölçülen hidrokimyasal parametreler, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) [21] ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) [6] standartları çerçevesinde değerlendirilmiştir (Tablo 1). Buna göre; pH değerleri bakımından her iki standart için de izin verilebilen alt sınır (6,5) 7 numune için aşılmıştır. TSE için 9,2 WHO için ise 8,5 olan üst sınır ise hiçbir numunede aşılmamaktadır. 3,87-1472 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişen EC değerleri TSE tarafından önerilen 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ üst sınır değerini sağlamakta iken 5 numune WHO tarafından önerilen 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ değerini aşmaktadır. EC değerleri 387-488 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişen 6 numune ise TSE tarafından tavsiye edilen 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ değerine yakın EC değerlerine sahiptir. Sıcaklık için WHO tarafından herhangi bir limit belirtilmemişken 27,3 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip 16 nolu numune TSE tarafından önerilen 25 $^{\circ}\text{C}$ sınır koşulunu sağlamamaktadır. Söz konusu numune noktasının konumu yine Niğde kent merkezinin güney çıkışında bulunmakta iken, diğer numunelere nazaran Dardalan Jeotermal Alanı’na nispeten daha uzaktır. Bu durum olası jeotermal karışımın farklı alanlarda etkin olduğunu göstermektedir.

İyon konsantrasyonları bakımından incelendiğinde ise 18 ve 21 nolu numuneler Ca^{2+} ve Mg^{2+} bakımından TSE’ne göre sırasıyla 200 ve 50 mg/l olan üst sınır değerini sağlamamaktadır. WHO’ya göre 500 mg/l olan HCO_3^- ve SO_4^{2-} sınır değerleri sırasıyla 4 ve 1 numunede aşılmaktadır.

TSE tarafından HCO_3^- için herhangi bir sınır değeri önerilmemişken SO_4^{2-} için 250 mg/l değeri önerilmiş olup 5 numunenin bu sınır değeri sağlamadığı görülmüştür. Önemli bir kirlilik parametresi olan NO_3^- için her iki standartta da 50 mg/l üst sınır değeri önerilmiş olup 12 ve 13 nolu numunelerde bu değerin çok üzerinde (sırasıyla 141 ve 125 mg/l) değerler elde edilmiştir. Bu durum, ana iyonlar ve

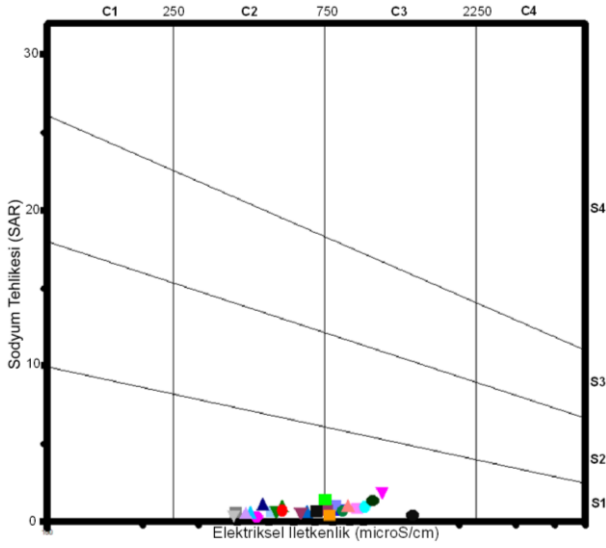
nitrat kirliliğinin farklı alanlarda etkin olduğunu dolayısıyla farklı proseslerden kaynaklandığını göstermektedir. Buna göre; ana iyonlar bakımından meydana gelen kirliliğin Dokuz vd. [20], tarafından saptanan jeotermal karışımdan kaynaklandığı, NO_3^- kirliliğinin ise tarımsal arazi kullanımıyla ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 1. Çalışma kapsamında örneklenen yeraltısularının fizikokimyasal ölçüm ve kimyasal analiz sonuçları (Ekim-2016; Dokuz vd. [20]'den değiştirilerek)

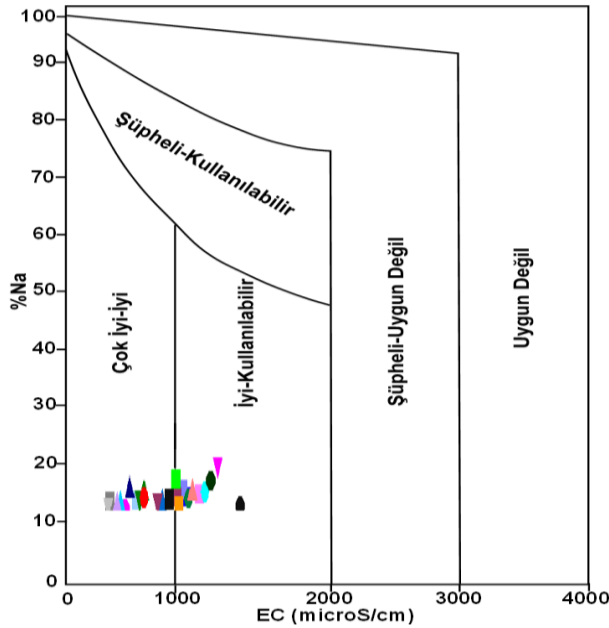
Örnek No	Koordinat		pH	DO		EC	T	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	EN (%)	
	X	Y		mg/l	%	µS/cm	C					mg/l						
Limit			6.5-9.2			2000	25	200	50	175			250	600		50		
Tavsiye			6.5-8.5			400	12	100	30	20			25	25		25		
			6.5-8.5			1000				200		500	500	250	20	50		
1	653690	4212555	7.52	8.3	94.9	460	14.4	44.3	6.6	7.6	2.5	134	36.1	7.5	-	41.8	-0.6	
2	652948	4212337	6.3	6.89	83	532	17.3	89.7	16.1	22.8	8.7	350	10.8	6.7	0.1	16.4	6.5	
3	652230	4207594	7.84	7.64	106.7	394	19	57.6	12.9	18.7	3.8	222	15.5	10.1	-	22.5	6.2	
4	650462	4207298	6.32	6.89	81.8	637	17.2	104.3	24.7	30.8	12	345	86.9	11.1	0.4	12.4	6.5	
5	651155	4205887	6.47	5.51	63.5	529	15.5	87	14.7	23.2	6.1	339	21.7	10.5	-	16.4	2.9	
6	650023	4206058	6.62	0.44	110	515	16.3	97.8	17.2	26.4	10	397	22.7	10	0.6	11.9	2.7	
7	649541	4205986	6.37	6.89	86.5	488	19	74.7	17.3	27.8	10.2	298	28.9	11.5	0.8	10.8	6.2	
8	649491	4205341	6.62	5.1	58.8	831	15.7	159.1	26.5	38.2	10.4	397	180	18.1	0.3	6.8	5.4	
9	648508	4205000	6.96	5.45	63.5	660	16.3	97	25.1	28.1	11.2	429	25.2	13.2	0.4	14.2	2.8	
10	648277	4204092	7.16	6.73	76.8	766	15.6	145.8	25.8	17.4	12	532	24.3	11	0.2	19.4	4.5	
11	646065	4204053	7.11	5.21	59.2	781	14.2	149.3	18.6	20.3	4.5	433	74	26.2	-	42.5	2.6	
12	647556	4202944	6.73	3.7	43	1020	16.1	133.5	23.7	41.5	14.9	286	98.9	97.5	0.2	141	4.0	
13	647465	4202824	6.81	4.17	48.5	955	16.1	137.9	22.2	39.6	13.7	280	105	90.8	0.2	125	4.9	
14	646534	4201751	7.07	2	23.1	1074	15.1	186.8	32.1	51	16	590	141	47.4	-	1.5	1.6	
15	646309	4201603	6.57	1.93	23.1	813	17.5	130.2	19.2	41.8	12.8	356	115	28.5	-	7.4	5.5	
16	645291	4202219	5.67	1.86	27	701	27.3	166.6	18.6	18.6	16.7	237	299	13.5	-	-	2.5	
17	643807	4201583	7.5	7.68	89.9	387	16	59	17.4	11.8	5.4	252	18	9.1	-	13.2	2.5	
18	644711	4200896	6.69	1.87	21.2	1472	15.2	344.4	59.1	45.1	17.8	375	698	27.8	-	0.5	6.4	
19	644831	4200425	5.87	3.02	37.7	772	19	133.6	23.8	47.1	15.9	239	287	17.3	-	-	3.0	
20	644513	4200349	5.92	2	23.4	812	16.3	145	27.2	50.1	17.6	264	280	17.3	-	-	6.2	
21	644479	4200348	6.56	3.1	35.5	1147	15.6	205.5	50.1	42.9	18.1	547	287	24.3	-	6.8	3.1	
22	644187	4200215	7.19	6.69	77	761	15.5	144	30.8	36.9	10.6	481	82.7	22	-	5.7	5.9	
23	643645	4200674	7.48	6.9	83.4	406	15.4	71.3	22	17.4	9.1	287	31.5	10	0.1	5.9	5.7	
24	644990	4199332	7.06	4.19	50.8	856	18.6	169.9	27.4	36.4	8.5	629	10.3	22.4	-	3.2	5.5	
25	642586	4200304	6.98	6.73	87	437	15.3	89.7	13.5	23.4	7.8	176	160	6.8	-	1.3	2.9	

3.3.2 Tarımsal sulama suları bakımından değerlendirme

Tarımsal üretimde kullanılacak suyun kalitesi başta EC, SAR ve %Na değerleri yardımıyla incelenmektedir. Bu amaçla ABD Tuzluluk Laboratuvarı ve Wilcox diyagramları geliştirilmiştir. Sular, ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı'ndaki dağılımlarına göre C2S1 ve C3S1 sınıfında yer almaktadır (Şekil 4). Buna göre, çalışma alanında bulunan yeraltısularının, orta ve yüksek derecede tuz ihtiyacı olan bitkiler ile sodyuma karşı duyarlılığı olmayan tüm bitkilerin üretiminde kullanılması uygundur. Wilcox Diyagramı'na göre ise EC değerlerindeki artışa bağlı olarak çok iyi-iyi kullanılabilir sular sınıfındadır (Şekil 5).



Şekil 4. ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı (Semboller için Şekil 3'ye bakınız)



Şekil 5. Wilcox Diyagramı (Semboller için Şekil 2'e bakınız)

Başta Na^+ , K^+ ve Mg^{2+} olmak üzere ana iyonların miktarları ve birbirlerine göre zenginleşme dereceleri suların sulama amaçlı kullanıma uygunluklarını etkilemektedir. Bu nedenle sulama sularının bitki gelişimine ve tarım arazilerine etkilerinin değerlendirilebilmesi için çeşitli indisler geliştirilmiş ve sulama suyu kaliteleri bu indisler yardımıyla değerlendirilmiştir (Tablo 2).

Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR): Sulama sularındaki Na^+ derişiminin Ca^{2+} 'a nazaran yüksek olması, Na^{++} 'un iyon değişimi yoluyla toprakta bollaşmasına neden olacaktır. Böylece toprakta tuzlanma, killeşme gibi sorunlar meydana gelebilecektir [13, 33]. Çalışma alanından derlenen örnekler için Denklem (1) kullanılarak hesaplanan SAR değerleri 0,28-1 arasında değişmektedir (Tablo 2). Buna göre tüm örnekler SAR değerleri bakımından iyi kalite sulama suları olarak sınıflandırılmışlardır (Tablo 3).

$$SAR = \frac{r\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (\text{meq/l})(1)$$

Tablo 2. Tarımsal sulama suyu indis değerleri

No	SAR	PI	RSC	MR	%Na	KI	PS	TH
1	0.28	73.95	1.07	19.89	12.49	0.12	0.63	137.74
2	0.58	49.67	-0.09	23.03	17.25	0.17	0.34	290.15
3	0.58	57.06	-0.32	27.18	18.71	0.21	0.50	196.85
4	0.70	43.16	-1.62	28.30	18.46	0.18	1.28	361.95
5	0.60	51.13	-0.02	21.97	17.29	0.18	0.58	277.66
6	0.65	49.51	0.18	22.67	18.17	0.18	0.57	314.90
7	0.75	53.54	-0.29	27.85	22.12	0.23	0.68	257.63
8	0.74	35.62	-3.66	21.73	15.94	0.16	2.48	506.19
9	0.66	47.45	0.09	30.13	17.86	0.18	0.70	345.37
10	0.35	36.38	-0.72	22.78	10.13	0.08	0.62	470.10
11	0.42	35.84	-1.92	17.19	9.97	0.10	1.64	449.25
12	0.87	37.97	-3.96	22.83	20.18	0.21	4.28	430.76
13	0.82	36.92	-4.15	21.15	19.16	0.20	4.12	435.58
14	0.90	37.43	-2.34	22.26	17.95	0.18	3.05	598.37
15	0.90	42.64	-2.27	19.73	20.92	0.22	2.15	404.02
16	0.36	26.01	-5.99	15.69	11.13	0.08	3.56	492.45
17	0.35	51.81	-0.27	32.95	12.90	0.12	0.49	218.84
18	0.59	18.42	-16.00	22.24	9.84	0.09	8.20	1102.87
19	0.98	37.60	-4.75	22.89	22.08	0.24	3.57	431.42
20	1.00	36.41	-5.19	23.82	21.65	0.23	3.49	473.86
21	0.69	29.79	-5.48	28.89	13.88	0.13	3.80	719.04
22	0.73	38.80	-1.88	26.28	16.11	0.16	1.59	486.16
23	0.46	47.53	-0.69	33.96	15.50	0.14	0.66	268.46
24	0.68	38.78	-0.47	21.18	14.31	0.15	0.85	536.85
25	0.61	40.98	-2.72	20.05	17.83	0.18	1.89	279.47

Permeabilite İndisi (PI): Tarım arazilerinde toprağın geçirirliiliği bitki gelişimi ve toprağın işlenebilmesi için önem arz etmektedir. Sulama sularındaki Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- ve Na^+ derişimleri uzun süreli kullanımda tarımsal arazilerin geçirirliiliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [34, 43, 44]. Çalışma alanı için Denklem (2) kullanılarak hesaplanan PI değerlerine göre 18 nolu örnek 18,42 PI değeri ile 3. Sınıf (Uygun Değil) kategorisinde yer almakta iken diğer sular 2. Sınıf (İyi) kategorisinde yer almaktadır (Tablo 2 ve 3).

$$PI = \left(\frac{rNa^+ + \sqrt{rHCO_3^-}}{rCa^{2+} + rMg^{2+} + rNa^+} \right) \times 100 \quad (\text{meq/l})(2)$$

Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC): Suların CO_3^{2-} ve HCO_3^- derişimlerini Ca^{2+} ve Mg^{2+} derişimlerine göre değerlendiren RSC değerinin artması sularda sodik koşulların egemen olmasına sebep olacak ve olası çökelimler neticesinde toprağın havalanma ve su tutuma kapasitesi olumsuz yönde etkilenebilecektir [13, 45, 46]. Çalışma kapsamında örneklenen suların Denklem (3) kullanılarak RSC değerleri -16-1,07 arasında değişmekte olup suların tamamı güvenli olarak sınıflanmıştır (Tablo 2 ve 3) [47].

$$RSC = (rCO_3^{2-} + rHCO_3^-) - (rCa^{2+} + rMg^{2+}) \quad (\text{meq/l})(3)$$

Magnezyum Oranı (MR): Sulama sularındaki Mg^{+2} derişiminin diğer katyonlara nazaran yüksek olması da çökelme ve iyon değişimine bağlı olarak toprağın tuzlanmasına ve dolayısıyla bitki gelişiminin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olacaktır [35, 46]. İnceleme alanındaki suların Denklem (4) kullanılarak hesaplanan MR değerlerinin tamamı 15,69-33,96 arasında değişen değerleri ile MR bakımından “Uygun” kategorisinde yer almaktadır (Tablo 2 ve 3).

$$MR = \frac{rMg^{2+}}{rCa^{2+} + rMg^{2+}} \times 100 \quad (\text{meq/l})(4)$$

Sodyum Yüzdesi (%Na): Tarımsal arazilerde toprağın kalitesini olumsuz yönde etkileyen Na^+ ’un sulama suyunda diğer katyonlara nazaran değerlendirildiği, Denklem (5) kullanılarak hesaplanan %Na değerleri %9,84-22,11 arasında değişmektedir. Bu durum 5 (8, 12, 15, 19, 20) örnek hariç suların %Na değeri bakımından “Mükemmel” kalitede olduklarını göstermektedir (Tablo 2 ve 3) [34].

$$\%Na = \left(\frac{rNa^+ + rK^+}{rCa^{2+} + rMg^{2+} + rK^+ + rNa^+} \right) \times 100 \quad (\text{meq/l})(5)$$

Kelley İndeksi (KI): Sulama sularındaki Na^+ iyonunun Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarına oranını gösteren Kelly indeksi, iyon değişimi ve çökelim neticesinde Na^+ ’un tarım arazilerinde oluşturması muhtemel riskleri tanımlamak üzere geliştirilmiş olup 1’den büyük KI değerleri suların sulama için uygun olmayacağına işaret etmektedir [36]. Niğde alüvyon akiferine ait suların, Denklem (6) ile hesaplanan KI

değerleri (0,08-0,23) sulamaya uygun sular olduklarını göstermektedir (Tablo 2 ve 3).

$$KI = \frac{rNa^+}{rCa^{2+} + rMg^{2+}} \quad (\text{meq/l})(6)$$

Tablo 3. Tarımsal sulama suyu indislerine göre suların sınıflandırılması

Parametre	Sınır Değer	Sulama Suyu Sınıfı
	<20	Mükemmel
	20-40	İyi
SAR [33]	40-60	İzin Verilebilir
	60-80	Şüpheli Kullanım
	80<	Kullanıma Uygun Değil
	<25	3. Sınıf (Uygun Değil)
PI [34]	25-75	2. Sınıf (iyi)
	75<	Mükemmel (1. Sınıf)
	<1.25	Güvenli
RSC [45]	1.25-2.5	Normal
	2.5<	Uygun Değil
MR [35]	<50	Uygun
	50<	Uygun Değil
	<20	Mükemmel
	20-40	İyi
%Na [33]	40-60	İzin Verilebilir
	60-80	Şüpheli Kullanım
	80<	Kullanıma Uygun Değil
	<1	Uygun
KI [36]	1<	Uygun Değil
	<3	Uygun
PS [34]	3<	Uygun Değil
	<60	Yumuşak
	60-120	Orta Sert
TH [48]	120-180	Sert
	180<	Çok Sert

Potansiyel Tuzluluk (PS): Suların EC değerlerinde önemli etkisi olan Cl^- ve SO_4^{2-} derişimlerine bağlı olarak sebep olabilecekleri tuzluluk tehlikesinin değerlendirildiği PS değerlerinin 3’ün üzerinde olması suların sulama için uygun olmadığını göstermektedir [34, 46]. Çalışma kapsamında örneklenen suların Denklem (7) ile hesaplanan PS değerleri 0,33-8,20 arasında değişmekte olup 8 adet numunenin (12-14, 16, 18-21 nolu örnekler) PS bakımından sulamaya uygun sular olmadıkları anlaşılmıştır [34] (Tablo 2 ve 3). Bu numunelerin tamamı (12 nolu örnek hariç) Niğde kent merkezi güney sınırında, önemli bir kısmı (18-21) ise Derdalan Jeotermal Alanı dolayında bulunmaktadır.

$$PS = rCl^- + 0,5rSO_4^{2-} \quad (\text{meq/l})(7)$$

Toplam Sertlik (TH): Sulardaki Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının etkinliğinin bir ifadesi olan [Denklem \(8\)](#) ile hesaplanan TH değeri 137,74-1102,87 arasında değişmekte olup 1 numaralı örnek hariç tüm örnekler çok sert sular sınıfına düşmektedir [\[33, 48\]](#) ([Tablo 2 ve 3](#)).

$$TH = (2,497Ca^{2+}) + (4,11Mg^{2+}) \quad (\text{mg/l})(8)$$

3.3.3 Endüstriyel kullanım amaçlı sular bakımından değerlendirme

Doğal suların hidrokimyasal özellikleri çökeltme ya da korozyon yoluyla temasta oldukları, başta kuyu ekipmanları ve iletim hatları olmak üzere temas ettikleri malzemelere zarar verebilmektedir. Bu durum kentsel ve endüstriyel amaçlı yeraltısuyu kullanımından kaynaklı olarak maliyet, zaman ve işgücü kayıplarına sebep olabilmektedir. Bu kapsamda doğal suların endüstriyel ve kentsel amaçlı kullanımları sırasında sebep olabilecekleri korozyon etkisini öngörebilmek amacıyla çeşitli indisler geliştirilmiştir [\[40, 44-53\]](#). Buna göre suların pH, sıcaklık, toplam çözünmüş madde miktarı, alkalinite ve bazı ana iyon değerleri suların korozitivite özelliklerinde belirleyici olmaktadır. Niğde alüvyon akiferinden derlenen örnekler için hesaplanan korozitivite değerleri [Tablo 4](#)'te sunulmuştur.

Langelier Doygunluk İndisi (LSI): Suyun kalsiyum karbonatı çözme ya da çöktürme eğilimini belirlemek için geliştirilen indis, demir veya galvanizli boruların korozyona uğrama ihtimalini değerlendirmek üzere, TDS değeri 10.000 mg/l'den az olan sular için geliştirilmiştir [\[42-54\]](#). LSI değeri negatif olduğunda su, kalsiyum karbonatı çözme eğilimindeyken; pozitif değerler suyun kalsiyum karbonatı çöktürme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Çalışma kapsamında [Denklem \(9\)](#) kullanılarak hesaplanan LSI değerleri hesaplanan 25 örneğin 9 tanesi (3, 10, 11, 14, 17, 18, 22-24 nolu örnekler) kalsiyum çöktürme eğilimindeyken 1 tanesi (9 nolu örnek) nötr olup 14 tanesi kalsiyum karbonatı çözerek korozyona sebep olma eğilimindedir. En yüksek korozyon potansiyelini 19 numaralı örnek (LSI=-1,18) taşımakta iken en yüksek kalsiyum karbonat çöktürme eğilimini 24 nolu örnek (LSI=0,52) taşımaktadır ([Tablo 5](#)).

$$LSI = pH - pH_s \quad (9)$$

pH_s , suyun doygunluk durumundaki pH olup [Denklem \(10-14\)](#) ile hesaplanmaktadır.

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (10)$$

$$A = \frac{\log(TDS) - 1}{10} \quad (\text{mg/l})(11)$$

$$B = -130,12 \times \log(^{\circ}C + 273) + 34,55 \quad (12)$$

$$C = \log(CaCO_3 \text{ olarak } Ca^{2+}) \quad (\text{mg/l})(13)$$

$$D = \log(CaCO_3 \text{ Alkalinitesi}) \quad (\text{mg/l})(14)$$

Tablo 4. Korozyon ve kabuklaşma indis değerleri

Örnek No	LSI	RSI	PSI	LS	AI	CSMR
1	-0.05	8.09	7.73	0.25	11.62	0.21
2	-0.75	8.23	6.39	0.07	10.70	0.62
3	0.45	7.38	7.37	0.17	12.05	0.65
4	-0.69	8.11	6.30	0.38	10.79	0.13
5	-0.64	8.20	6.55	0.13	10.86	0.48
6	-0.35	7.76	6.16	0.12	11.06	0.44
7	-0.80	8.39	6.72	0.19	10.70	0.40
8	-0.19	7.41	5.80	0.65	11.27	0.10
9	0.00	7.07	5.75	0.13	11.40	0.52
10	0.44	6.72	5.47	0.09	11.78	0.45
11	0.29	6.98	5.80	0.32	11.74	0.35
12	-0.32	7.77	6.49	1.63	11.31	0.99
13	-0.22	7.67	6.49	1.03	11.40	0.86
14	0.46	6.55	5.15	0.44	11.79	0.34
15	-0.35	7.69	6.10	0.55	11.14	0.25
16	-1.16	8.34	6.11	1.70	10.34	0.05
17	0.13	7.70	7.27	0.15	11.72	0.51
18	0.12	6.82	5.32	2.49	11.68	0.04
19	-1.18	8.65	6.62	1.65	10.45	0.06
20	-1.10	8.55	6.51	1.46	10.53	0.06
21	-0.04	7.03	5.17	0.74	11.32	0.08
22	0.42	6.79	5.64	0.30	11.80	0.27
23	0.23	7.47	6.94	0.20	11.78	0.32
24	0.52	6.43	4.98	0.08	11.74	2.17
25	-0.38	8.21	7.49	1.22	11.38	0.04

Ryznar Duraylılık İndisi (RSI): İçme suyu şebekelerinde sudan kaynaklı korozyon ve kalsiyum karbonat çökeltim ihtimalini değerlendirmek üzere geliştirilmiş olan RSI [Denklem \(15\)](#) ile hesaplanmakta olup korozyon ve çökeltim ihtimali 5 sınıfta değerlendirilmiştir [\[50\]](#) ([Tablo 5](#)). Çalışma kapsamında incelenen 4 örnek (10, 14, 22, 24) az çökeltim ve korozyon potansiyeli, 2 örnek (19 ve 20) çok yüksek korozyon potansiyeli, diğer örnekler ise yüksek korozyon potansiyeli taşımaktadır.

$$RSI = 2pH_s - pH \quad (15)$$

Puckorius Kabuklaşma İndisi (PSI): LSI ve RSI indislerine alternatif olarak önerilen PSI, LSI ve RSI indislerinden farklı olarak suyu tamponlama kapasitesini de hesaplamaya dahil etmiş ve suları korozif, nötr ve korozif olmayan şeklinde 3 sınıfta incelemiştir [\[39\]](#). [Denklem \(16\)](#) kullanılarak elde edilen sonuçlara göre çalışma kapsamında örneklenen yeraltısularının 4 tanesi (1, 3, 17, 25 nolu

örnekler) korozyif özellik taşıırken diğerleri nötr özelliğe sahiptir.

$$PSI = 2(pHs) - pH_{eq} \quad (16)$$

pHeq denge anındaki pH değeri olup [Denklem 17](#) ile hesaplanmaktadır.

$$1,465 \times \log(Alaklinite) + 4,54 \quad (mg/l)(17)$$

Tablo 5. Korozyon ve kabuklaşma indislerine göre suların sınıflandırılması

Parametre	Sınır Değer	Sınıfı
	<0	Doygun Değil, Korozyif
LSI [42]	0	Doygun, Kabuklaştırıcı Değil
	0<	Aşırı Duygun, Kabuklaştırıcı
	<10	Aşırı Korozyif
AI [40]	10-12	Kısmen Korozyif
	12<	Kabuklaştırıcı, Korozyif Değil
	<5.5	Aşırı Kabuklaştırıcı
	5.5-6.2	Kabuklaştırıcı
RSI [50]	6.2-6.8	Nötr
	6.8-8.5	Korozyif
	8.5<	Aşırı Korozyif
	<6	Kabuklaştırıcı
PSI [39]	6-7	Nötr
	7<	Kuvvetli Korozyif
	<0.8	Kabuklaştırıcı
LS [37]	0.8-1.2	Korozyif
	1.2<	Aşırı Korozyif
	<0.5	Korozyif Değil
CSMR [38]	0.5<	Korozyif

Larson-Skold İndisi (LS): Suların çelik borularda meydana getirebileceği korozyif etkinin incelendiği LS indisi kullanılarak klorür ve sülfatın kireç oluşumuna etkileri 3 kategoride değerlendirilmiştir [37] (Tablo 5). [Denklem \(18\)](#) kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde, LS değeri 1,2'nin üzerinde olan 6 örneğin (12, 16, 18-20, 25 nolu örnekler) yüksek korozyon potansiyeli taşıdığı; LS değeri 0,8-1,2 arasında olan 1 örneğin (13 nolu örnek) yüksek korozyif özelliğe sahip olup çözünmüş klorür ve sülfatın kireç oluşumunu engelleyebileceği, diğer örneklerde ise klorür ve sülfatın kireç oluşumunda etkili olmadığı saptanmıştır.

$$LS = \frac{rCl^- + rSO_4^{2-}}{rHCO_3^- + CO_3^{2-}} \quad (meq/l)(18)$$

Klorür Sülfat Kütle Oranı (CSMR): Kurşun kullanılarak lehimlenmiş borularda galvanik korozyonun değerlendirildiği CSMR indisi klorürün Pb çözünürlüğündeki pozitif, sülfatın ise negatif etkisinin değerlendirilmesi sonucu önerilmiş olup, 0,5'in üzerindeki CSMR değerleri galvanik korozyonun arttığına işaret etmektedir (Tablo 6) [38]. [Denklem \(19\)](#) kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde Niğde alüvyon akiferine ait 6 örneğin (2, 3, 9, 12, 13 nolu örnekler) CSMR indisine göre yüksek galvanik korozyon potansiyeli olduğu belirlenmiştir. En yüksek CSMR değeri 2,17 ile 24 nolu örneğe aittir (Tablo 5).

$$CSMR = \frac{Cl^-}{SO_4^{2-}} \quad (mg/l)(19)$$

Agresiflik İndisi (AI): Asbestli borularda ve beton malzemelerde suyun aşındırıcı etkisini değerlendirmek üzere önerilen indis suyun pH, Ca^{2+} ve alkalinite değerlerini dikkate almaktadır [40]. Çalışma kapsamında [Denklem \(20\)](#) yapılan hesaplamalar sonucu 3 nolu örnek "agresif değil" olarak sınıflanırken diğer tüm örnekler "orta derece agresif" sınıfında yer almıştır (Tablo 5).

$$AI = pH + \log[(A)(H)] \quad (20)$$

Burada,
A: Alkalinite (mg/l);
H: Ca^{2+} (mg/l)

Doygunluk İndisi (SI): Yeraltı suları hidrojeolojik sistemde dolaşımını sırasında kayaç oluşturan mineralleri çözerek bünyelerine katarlar. Bu etkileşim sonucunda, sular genel hidro(fiziko)kimyasal özellikleri kontrolünde kimi minerallerce zenginleşirler. Söz konusu minerallerle etkileşimin artması sonucunda ise doymunluk dereceleri artarak doymun hale gelebilirler. Bu noktadan sonra su, başta sıcaklık ve basınç değişimi olmak üzere genel hidrokimyasal karakterindeki değişimlere bağlı olarak söz konusu minerali çöktürme eğilimine girecektir. Suların hidrokimyasal karakterlerinden yola çıkılarak yapılan doymunluk indisi hesaplamaları suların mineralleri çözme/çöktürme eğilimleri hakkında bilgi sağlamaktadır [55, 56]. Çalışma kapsamında Niğde alüvyon akiferine ait sularla yapılan kimyasal analizlerden elde edilen veriler yardımıyla suların Anhidrit, Aragonit, Dolomit, Kalsit, Halit ve Jips minerallerine göre doymunluk indisleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre suların 9 tanesinde karbonat minerallerine doymunluk tespit edilmiştir. Tamamı kalsite doymun olan bu suların 6 tanesi aynı zamanda aragonite, 3 tanesi ise kalsit, aragonit ve dolomite göre doymun olup bu mineralleri çöktürme eğilimindedir (Tablo 6). Söz konusu numunelerin tamamı inceleme alanının mansap tarafında bulunan yarısında yer almakta olup, akım yolu boyunca suların iyon yükünün artmasının bu duruma neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu

durum kentsel ve endüstriyel kullanım sırasında söz konusu kuyulardan alınan suların başta kalsit olmak üzere karbonat minerali çöktürme ve dolayısıyla boruların tıkanması, veriminin azalması gibi problemlere yol açmasının söz konusu olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Doygunluk indisi değerleri

Örnek No	Anhidrit	Aragonit	Kalsit	Dolomit	Jips	Halit
1	-2.37	-0.96	-0.81	-2.24	-2.12	-8.78
2	-2.70	-0.24	-0.09	-0.69	-2.46	-8.36
3	-2.66	-0.57	-0.42	-1.23	-2.42	-8.27
4	-1.80	-0.23	-0.08	-0.54	-1.56	-8.04
5	-2.41	-0.30	-0.15	-0.85	-2.16	-8.15
6	-2.37	-0.18	-0.03	-0.59	-2.12	-8.15
7	-2.35	-0.36	-0.21	-0.79	-2.11	-8.04
8	-1.39	-0.06	-0.09	-0.37	-1.14	-7.75
9	-2.36	-0.16	-0.01	-0.38	-2.11	-8.01
10	-2.26	0.07	0.22	-0.09	-2.01	-8.10
11	-1.75	-0.04	0.12	-0.48	-1.50	-7.86
12	-1.68	-0.24	-0.09	-0.70	-1.43	-6.96
13	-1.64	-0.23	-0.08	-0.73	-1.39	-7.02
14	-1.46	0.16	0.31	0.06	-1.22	-7.21
15	-1.62	-0.13	0.02	-0.55	-1.37	-7.49
16	-1.14	-0.11	0.03	-0.52	-0.93	-8.19
17	-2.62	-0.56	-0.41	-1.13	-2.37	-8.52
18	-0.69	0.10	0.25	-0.04	-0.44	-7.52
19	-1.26	-0.32	-0.17	-0.82	-1.02	-7.69
20	-1.24	-0.28	-0.13	-0.76	-1.00	-7.66
21	-1.17	0.13	0.29	0.18	-0.92	-7.59
22	-1.74	0.00	0.15	-0.15	-1.50	-7.67
23	-2.33	-0.46	-0.31	-0.90	-2.08	-8.32
24	-2.61	0.24	0.38	0.24	-2.36	-7.69
25	-1.57	-0.61	-0.46	-1.53	-1.32	-8.35

4 Sonuçlar

Su kalitesi doğal ekosistemin, toplum sağlığı ve refahının korunması ve bölgesel sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, yeraltısuyunun en önemli su kaynağı konumunda olduğu Niğde il merkezinde yayılım gösteren alüvyon akiferine ait sular içme, insani kullanım, tarımsal sulama, endüstriyel ve kentsel amaçlı kullanıma uygunlukları bakımından değerlendirilmiştir. Çalışma alanının kuzey-kuzeybatısında Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı andezit ve piroklastiklerden oluşan volkanitler, doğu-güneydoğusunda ise Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı Aşığedici Formasyonu'na ait mermerler yüzeylenmektedir. Tüm bu birimler çalışma kapsamında incelenen akifer sistemini oluşturan alüvyon örtü tarafından

uyumsuz olarak üzerlenmektedir. Alüvyon örtünün kil, silt boyu taneler içeren ve tüflü seviyelerinin geçirimsiz, kum, çakıl boyutu tanelerden oluştuğu kesimlerinin ise geçirimli özellik taşımaktadır. Bu geçirimli ve geçirimsiz seviyeler arasında serbest ve basınçlı akifer seviyeleri oluşmuştur. Niğde kent merkezi alüvyon akiferini çevreleyen volkanitlerin kırıklı çatlaklı kesimleri ile Niğde Masifi'nin (özellikle mermerlerin) kırıklı çatlaklı ve yer yer karstik kesimleri akifer özelliği taşımakta olup, alüvyon akiferi beslemektedirler. Kuyularda yeraltısuyu derinlikleri 3-20 m arasında; seviyeleri ise 1200-1260 m arasında değişmektedir. Genel yeraltısuyu akım yönü KD'dan GB'ya doğrudur.

Çalışma kapsamında örneklenen yeraltısularının pH değerleri 5,67- 7,84; EC değerleri ise 384-1472 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Sular katyonlar bakımından Ca^{2+} , anyonlar bakımından ise HCO_3^- 'ca baskındır. Bunun yanı sıra katyonlar bakımından Na^+ ve kısmen de Mg^{2+} ; Anyonlar bakımından ise 12 ve 13 nolu örneklerde görülen düşük SO_4^{2-} ve Cl^- zenginleşmesinin yanı sıra SO_4^{2-} bakımından belirgin zenginleşmeler söz konusudur. Böylece çalışma alanında Ca-HCO_3 , $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$, $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$, Ca-Mg-HCO_3 , $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$, $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ ve $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ tipinde hidrokimyasal fasiyesler ortaya çıkmıştır. Mg^{2+} ve SO_4^{2-} zenginleşmeleri Niğde kent merkezinin güney kesiminde maksimuma ulaşmaktadır. Bu alanın Derdalan Jeotermal Alanı'na yakınlığı söz konusu zenginleşmelerin ve dolayısıyla hidrokimyasal karakter değişiminin başlıca jeotermal karışım etkisi ile ortaya çıktığını göstermektedir [20] (Şekil 1). Na^+ zenginleşmesi ise jeotermal alana yakın örneklerin yanı sıra alüvyonun orta kesiminde görülmektedir. Bu durum, söz konusu zenginleşmelerin jeotermal akışkan etkisi ve/veya alüvyonda killi seviyelerin yoğunlaşmasından kaynaklı olabileceğini göstermektedir.

Suların, alüvyon akiferde gerçekleşen hidrojeokimyasal proseslerden kaynaklı olarak Ca^{2+} , Mg^{2+} (18 ve 21 nolu örnekler) ve SO_4^{2-} (16, 18-21 nolu örnekler) bakımından TSE; HCO_3^- ve SO_4^{2-} bakımından ise (numune 4 ve 1) WHO tarafından; NO_3^- (12 ve 13 nolu örnekler) bakımından ise her iki standartta önerilen değerleri aştığı anlaşılmıştır.

Sular, ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı'ndaki dağılımlarına göre C2S1 ve C3S1 sınıfında, Wilcox Diyagramı'na göre ise EC değerlerindeki artışa bağlı olarak çok iyi-iyi kullanılabilir sular sınıfında yer almaktadır. Buna göre çalışma alanında bulunan yeraltısularının, orta ve yüksek derecede tuz ihtiyacı olan bitkiler ile sodyuma karşı duyarlılığı olmayan tüm bitkilerin üretiminde kullanılması uygundur.

Suların tarımsal sulama suyu kalitesi ve endüstriyel kullanım bakımından değerlendirmelerinde alüvyonun merkez ve özellikle de mansap kısmında (Niğde kent merkezinin güneyi) su kalitesinin tarımsal arazi kullanımı, jeotermal karışım ve su kayaç etkileşimi gibi nedenlerle azaldığı anlaşılmıştır. Özellikle su kayaç etkileşimi ve arazi kullanımı gibi nedenler su kalitesinde lokal bozulmalara sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, alüvyon akiferin heterojen ve anizotrop yapısı farklı derinliklerde açılmış birbirine yakın kuyularda farklı su kalitesi değerlerinin elde edilmesine sebep olmuştur.

Sonuçlar inceleme alanındaki suların önemli bir kısmının sulamaya uygun olduğunu, içme ve kullanma suyu olarak ise inceleme alanının orta kısmında tarımsal arazi kullanımından kaynaklı, mansap kısmına doğru (12, 14, 16, 18-21 nolu numuneler) ise, jeotermal sularla karışım sonucunda EC, SO_4^{2-} ve Mg^{2+} konsantrasyonlarında artış şeklinde kendini gösteren su kalitesinde azalma saptanmıştır. Yine, akiferin mansap kısmında Niğde kent merkezi güneyinden itibaren Na^+ zenginleşmeleri saptanmış olup, bu durumun bölgede kalınlığı ve yayılımı artan killi seviyelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Alüvyon akiferin beslenme bölgesinde iyon yükünün azlığı ve yine jeotermal akışkanın sularla karışımının etkin olduğu bölgede düşük pH ve yüksek iyon yükü nedeniyle yeraltısularının endüstriyel kullanıma uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma FEB2016/14-BAGEP ve MMT2020/1-BAGEP nolu projeler kapsamında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

Benzerlik oranı: %11

Kaynaklar

- [1] N. Adimalla, Groundwater quality for drinking and irrigation purposes and potential health risks assessment: A case study from semi-arid region of south India, Expo Health, 11 (2), 109–123, 2019. <https://doi.org/10.1007/S12403-018-0288-8>.
- [2] E. Union, Groundwater protection in Europe: The new groundwater directive: consolidating the EU regulatory framework, 2009. <https://doi.org/10.2779/84304>.
- [3] P. Li, H. Qian, and J. Wu, Conjunctive use of groundwater and surface water to reduce soil salinization in the Yinchuan Plain, North-West China, Int J Water Resour Dev, 34 (3), 337–353, 2018. <https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1443059>.
- [4] S. Sahu, U. Gogoi, and N. C. Nayak, Groundwater solute chemistry, hydrogeochemical processes and fluoride contamination in phreatic aquifer of Odisha, India, Geoscience Frontiers, vol. 12 (3), 101093, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2020.10.001>.
- [5] S. Ghosh and M. K. Jha, Evaluating trends in groundwater quality of coastal alluvial aquifers of Eastern India for sustainable groundwater management, Environmental Science and Pollution Research, 31 (29), 42049–42074, 2024. <https://doi.org/10.1007/S11356-024-33852-3>.
- [6] WHO, Guidelines for drinking-water quality, 2011.
- [7] E. Mazor, Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. CRC Press, 2003.
- [8] C. A. J. Appelo and D. Postma, Geochemistry, Groundwater and Pollution. CRC Press, 2013.
- [9] J. D. Hem, Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. University Press of the Pacific, 2005.
- [10] S. Varol, A. Davraz, Ş. Şener, E. Şener, F. Aksever, B. Kırkan and A. Tokgözlü, Assessment of groundwater quality and usability of Salda Lake Basin (Burdur/Turkey) and health risk related to arsenic pollution, J Environ Health Sci Eng, 19 (1), 681–706, 2021. <https://doi.org/10.1007/S40201-021-00638-5>.
- [11] E. D. Sunkari, T. Abangba, A. Ewusi, S. E. K. Tetteh, and E. Ofosu, Hydrogeochemical evolution and assessment of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in the Gushegu Municipality and some parts of East Mamprusi District, Ghana, Environ Monit Assess, vol. 195 (1), 1–25, 2023. <https://doi.org/10.1007/S10661-022-10731-3>.
- [12] Ş. Şener, S. Varol ve E. Şener, Akşehir (Konya) Ovası yeraltısuyu kalitesi ve kullanılabilirliğinin belirlenmesi, Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research, 8 (1), 80–91, 2022. <https://doi.org/10.17216/LIMNOFISH.871731>.
- [13] B. A. Berhe, M. Çelik, and U. E. Dokuz, Investigation of irrigation water quality of surface and groundwater in the Kütahya plain, Turkey, Bulletin of the Mineral Research and Exploration, (150), 2015. <https://doi.org/10.19111/bmre.95431>.
- [14] A. Fırat Ersoy and E. Hatipoğlu Temizel, Karadere Deresi'nin (Araklı-Trabzon) içme ve sulama suyu amaçlı kullanım uygunluğunun incelenmesi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 8 (2), 238–249, 2022. <https://doi.org/10.21324/DACD.1005286>.
- [15] T. P. Maluleke, S. Dube, E. D. Sunkari, and A. A. Ambushe, Assessment of borehole water quality in Nwadekudzeku village, Giyani, Limpopo Province, South Africa: Implication for potential human health risks, Journal of Trace Elements and Minerals, 11, 100206, 2025. <https://doi.org/10.1016/J.JTEMIN.2024.100206>.
- [16] F. Gültekin, A. Fırat Ersoy, E. Hatipoglu, and S. Celep, Quality assessment of surface and groundwater in Solaklı Basin (Trabzon, Turkey), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72, (2), 213–224, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0467-6>.
- [17] E. D. Sunkari, M. Abu, P. S. Bayowobie, and U. E. Dokuz, Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga west municipality, Ghana: Implication for domestic and irrigation purposes, Groundw Sustain Dev, vol. 8, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.02.002>.
- [18] A. Lermi and G. Ertan, Hydrochemical and isotopic studies to understand quality problems in groundwater of the Niğde Province, Central Turkey, Environ Earth Sci, 78, (12), 1–32, 2019. <https://doi.org/10.1007/S12665-019-8365-2>.
- [19] F. Çiner, E. D. Sunkari, and B. A. Şenbaş, Geochemical and multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater of Niğde Municipality, South-Central Turkey: Implications for arsenic contamination and human health risks assessment, Arch Environ Contam Toxicol, 80 (1), 164–182, 2021. <https://doi.org/10.1007/S00244-020-00759-2>.

- [20] U. E. Dokuz, S. Yaşar Korkanç, and M. Korkanç, Niğde kent merkezi alüvyon akiferinin yeraltı suyu kalitesini etkileyen doğal ve antropojenik faktörlerin incelenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (3), 1095–1100, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.502263>.
- [21] TSE, Türk Standartları Enstitüsü, Türk İçme Suyu Standartları TS 266 sayılı standart. İnsani tüketim amaçlı sular, Ankara, 2005.
- [22] Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr>.
- [23] F. Ballı, M. Sönmez, and A. Lermi, Niğde GD kesiminin jeolojisi ve Niğde fayına ilişkin yeni bulgular, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (3), 1180–1185, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.502417>.
- [24] M. Sönmez, F. Aydın, A. Lermi, and S. Oğuz Saka, Niğde Volkanik Kompleksi'nin batı kesiminin jeolojisi ve volkanostatigrafisi (Kapakdöğ, Orta Anadolu): Keçiboyduran Dağı ve yakın çevresi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (3), 1170–1174, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.502395>.
- [25] M. Afşin, Hydrochemical evolution and water quality along the groundwater flow path in the Sandıklı plain, Afyon, Turkey, Environmental Geology, 31 (3–4), 221–230, 1997. <https://doi.org/10.1007/S002540050183>.
- [26] G. Tayfur, T. Kirer, and A. Baba, Groundwater quality and hydrogeochemical properties of Torbalı Region, İzmir, Turkey, Environ Monit Assess, 146 (1–3), 157–169, 2008. <https://doi.org/10.1007/S10661-007-0068-6>.
- [27] A. Baba, G. Yüce, O. Deniz, and D. Y. Uğurluoğlu, Hydrochemical and isotopic composition of Tuzla Geothermal Field (Canakkale-Turkey) and its environmental impacts, Environ Forensics, 10, (2), 144–161, 2009. <https://doi.org/10.1080/15275920902873418>.
- [28] M. Brehme, T. Scheytt, M. Çelik, and U. E. Dokuz, Hydrochemical characterisation of ground and surface water at Dörtöl/Hatay/Turkey, Environ Earth Sci, 63, (6), 1395–1408, 2011. <https://doi.org/10.1007/S12665-010-0810-1>.
- [29] B. Abadi Berhe, U. E. Dokuz, and M. Çelik, Assessment of hydrogeochemistry and environmental isotopes of surface and groundwaters in the Kütahya Plain, Turkey, Journal of African Earth Sciences, 134, 230–240, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARS.2017.06.015>.
- [30] G. Okwir, S. Kumar, K. S. Pramod, H. Gao, and K. N. Njau, Conceptualization of groundwater-surface water interaction with evidence from environmental isotopes and hydrogeochemistry in lake Babati Basin in Northern Tanzania, Groundw Sustain Dev, 21, 100940, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2023.100940>.
- [31] A. M. Piper, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses, Eos, Transactions American Geophysical Union, 25 (6), 914–928, 1944. <https://doi.org/10.1029/TR025I006P00914>.
- [32] H. Schoeller, Geochemie des eause souterraines, Rev. Inst. Fr. Petrol, 10, 230–244, 1955.
- [33] L. W. M. David Keith Todd, Groundwater hydrology. John Wiley and Sons, 2004.
- [34] L. D. Doneen, Water Quality for Irrigated Agriculture In A. Poljakoff-Mayber, J. Gale (eds.) Plants in saline environments, Springer Nature, pp. 56–76, 1975.
- [35] K. V Paliwal, Irrigation with Saline Water, no. 3. Stony Brook Foundation, Inc., 1972.
- [36] W. P. Kelley, Use of Saline irrigation water, Soil Sci, 95, (6), 385–391, 1963. <http://doi.org/10.1097/00010694-196306000-00003>.
- [37] T. E. Larson and R. V. Skold, Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron, Corrosion, 14 (6), 43–46, 1958. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-14.6.43>.
- [38] R. Gregory, Galvanic corrosion of lead solder in copper pipework, Water and Environment Journal, 4 (2), -112–118, 1990. <https://doi.org/10.1111/J.1747-6593.1990.TB01566.X>.
- [39] P. R. Puckorius and J. M. Brooke, A new practical index for calcium carbonate scale prediction in cooling tower systems, Corrosion, 47 (4), 280–284, 1991. <https://doi.org/10.5006/1.3585256>.
- [40] AWWA, Standard for asbestos-cement transmission pipe, for water and other liquids, 67 (8), 462–467, 1975.
- [41] J. W. Ryznar, A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water, Journal AWWA, 36, (4), 472–483, 1944. <https://doi.org/10.1002/J.1551-8833.1944.TB20016.X>.
- [42] W. F. Langelier, The analytical control of anti-corrosion water treatment, J Am Water Works Assoc, 28 (10), 1500–1521, 1936. <https://doi.org/10.1002/J.1551-8833.1936.TB13785.X>.
- [43] S. Yıldız and C. B. Karakuş, Estimation of irrigation water quality index with development of an optimum model: a case study, Environ Dev Sustain, 22 (5), 4771–4786, 2020. <https://doi.org/10.1007/S10668-019-00405-5>.
- [44] S. Medhi, R. Choudhury, P. Sharma, and B. B. Sharma, Assessment of groundwater quality for irrigation purpose in aquifers of the Upper Brahmaputra floodplains of Assam, India, Environ Monit Assess, 96 (11), 1023, 2024. <https://doi.org/10.1007/S10661-024-13150-8>.
- [45] H. M. Ragunath, Ground Water. New Delhi: Wiley Eastern Ltd., 1987.
- [46] A. K. Dandapat, P. K. Panda, S. Sankalp, and M. Jothamani, Integrated assessment of groundwater quality for sustainable irrigation in drought-prone central districts of Odisha, India, Discover Sustainability, 5, (1), 1–19, 2024. <https://doi.org/10.1007/S43621-024-00443-8>.
- [47] F. M. Eaton, Significance of carbonates in irrigation waters, Soil Sci, 69 (2), 1950. <https://doi.org/10.1097/00010694-195002000-00004>.
- [48] C. N. Durfor, E. Becker, and U. S. G. P. Office, Public Water Supplies of The 100 Largest Cities of the United States, Washington, D.C., 1964.

- [49] W. F. Langelier, The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment, J Am Water Works Assoc, 28 (10), 1500–1521, 1936. <https://doi.org/10.1002/J.1551-8833.1936.TB13785.X>.
- [50] J. W. Ryznar, A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water, J Am Water Works Assoc, 36 (4), 472–483, 1944. <https://doi.org/10.1002/J.1551-8833.1944.TB20016.X>.
- [51] T. E. Larson and R. V. Skold, Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron, Corrosion, 14 (6), 43–46, 1958. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-14.6.43>.
- [52] C. N. Sawyer, Chemistry for Sanitary Engineers, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [53] M. Edwards and S. Triantafyllidou, Chloride-to-sulfate mass ratio and lead leaching to water, J Am Water Works Assoc, 99 (7), 96–109, 2007. <https://doi.org/10.1002/J.1551-8833.2007.TB07984.X>.
- [54] P. R. Roberge, Corrosion Inspection and Monitoring, John Wiley and Sons, 2007.
- [55] J. N. Butler, Aquatic chemistry: An introduction emphasizing chemical equilibria in Natural Waters (Stumm, Werner), J Chem Educ, 48 (12), A779, 1971. <https://doi.org/10.1021/ED048PA779.1>.
- [56] U. E. Dokuz, M. Çelik, Y. Kağan Kadioğlu, M. Brehme, and H. Engin, Geothermal Evaluation of the Bayramhacılı and Tekgöz-Çiftgöz area, Central Anatolia, Turkey by a New Conceptual Reservoir Model. World Geothermal Congress 2015.

