

Afyon Ovası Kuzeybatı Bölümü Yeraltısularının Hidrojeokimyası, İçme ve Sulama Suyu Özelliklerinin Belirlenmesi

Can Başaran^{1,*}, Hüseyin Manap²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar.

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği ABD, 03200, Afyonkarahisar.

Özet

Afyon Ovası kuzeybatı bölümünde yer alan yeraltısuları, yaklaşık 8000 kişi tarafından şebeke suyu olarak kullanılmakta ve bölgeden üretilen sularla yaklaşık 56km² tarımsal alan sulanmaktadır. Su kaynaklarının etkin ve verimli bir şekilde kullanılması için suların fiziksel, kimyasal özelliklerinin ve su kalitelerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, çalışma kapsamında 12 adet yeraltısuyu örneklenerek suların güncel kompozisyonlarını kazandıran hidrojeokimyasal süreçler belirlenmiş, analiz sonuçları içme suyu standardı ile karşılaştırılmış, sulama suyu kaliteleri Elektriksel iletkenlik (EC), Schoeller ve Wilcox Diyagramı, Sodyum Tehlikesi (%Na ve SAR), Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC), Magnezyum Oranı (MR), Potansiyel Tuzluluk (PS) ve Kelley indeksi (KI) gibi parametreler kullanılarak yorumlanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre suların majör katyonlarının Ca, Mg ve Na, majör anyonun ise HCO₃ olduğu belirlenmiştir. Bölgede yüzeyleyen şistler ve karbonatlı kayalar suların güncel bileşimini etkilemektedir. Bununla birlikte bazı su noktalarında tespit edilen ve sınır değeri aşan nitrat, arsenik, flor ve bor gibi elementler evsel-tarımsal atıklardan ve gübrelerden kaynaklanabilir. İncelenen su örneklerinin içilebilirlik ve sulama suyu özellikleri bakımından her türlü kullanımında dikkatli olunması ve gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir.

Anahtar Sözcükler

Su Kirliliği, Hidrojeokimya, Çevre, Tarım

Determination of Hydrogeochemistry, Drinking and Irrigation Properties of Groundwaters in the Northwest Section of Afyon Plain

Abstract

The water points located in the northwest part of the Afyon Plain are used as mains and irrigation water, by approximately 8000 people approximately 56 km² of agricultural land. In order to use water resources effectively and efficiently, it is necessary to know the physical, chemical properties and the qualities of the waters very well. For this purpose, 12 groundwater were sampled within the scope of the study, and the hydrogeochemical processes that gave the current compositions of the waters were determined, the analysis results were compared with the standards, and the irrigation water quality was Electrical conductivity (EC), Schoeller and Wilcox Diagram, Sodium Hazard (%Na and SAR), Residual Sodium Carbonate. (RSC), Magnesium Ratio (MR), Potential Salinity (PS) and Kelley index (KI) were interpreted using parameters. According to the analysis results, it was determined that the major cations of the waters were Ca, Mg and Na, and the major anion was HCO₃. The schists and carbonate rocks cropping out in the region affect the current composition of the waters. However, the elements such as nitrate, arsenic, fluorine and boron, detected at some water points and exceeding the limit value may originate from domestic-agricultural wastes and fertilizers. The sampled waters should be used carefully and necessary precautions should be taken in terms of drinkability and irrigation water characteristics.

Keywords

Water Pollution, Hydrogeochemistry, Environment, Agriculture

1. Giriş

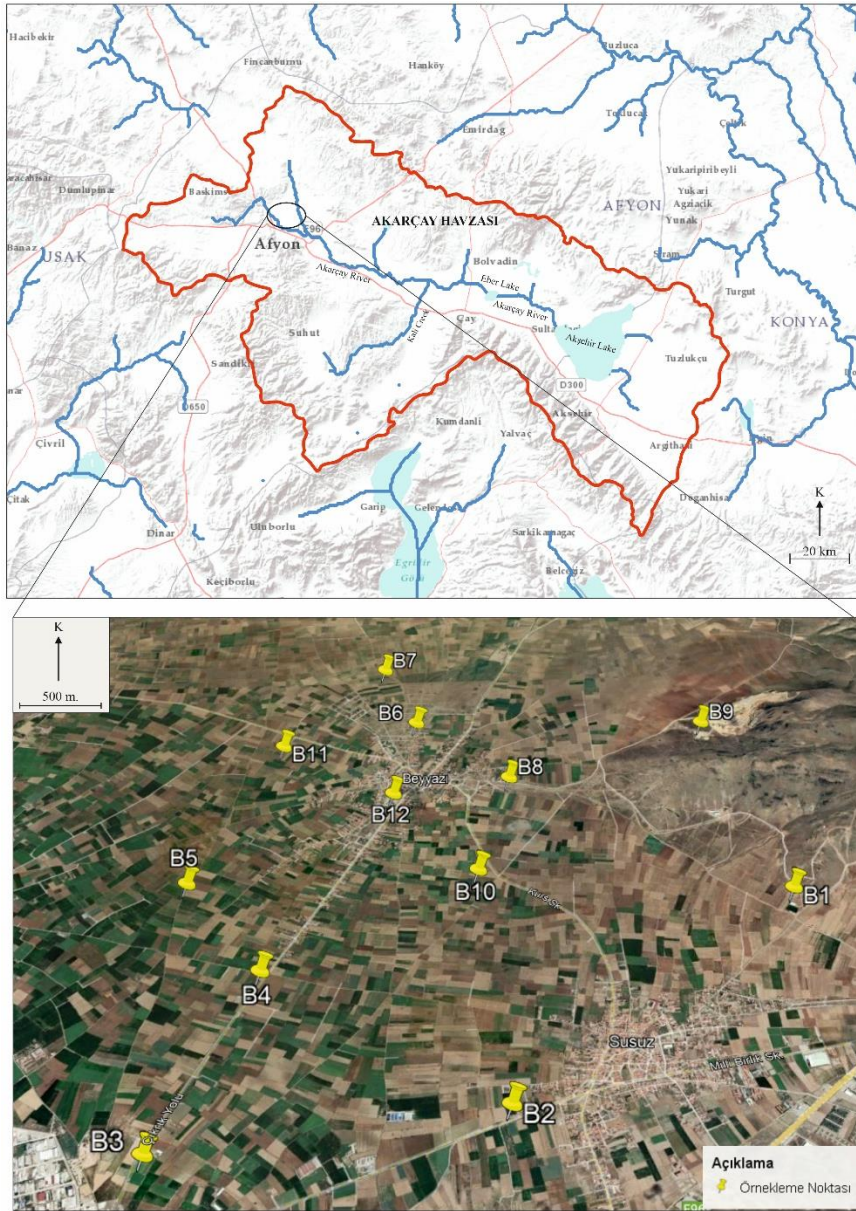
Su-kayaç etkileşimi, endüstriyel-tarımsal faaliyetler ve atıklar gibi etkenler su kaynaklarını kirlilik tehdidi ile karşı karşıya bırakmaktadır. Su kaynaklarının içme-sulama maksatlı kullanımını için suların hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi ve izlenmesi gerekmektedir. Nüfus artışına bağlı olarak artan endüstriyel ve tarımsal ihtiyaçların karşılanması için yeterli miktarda ve kalitede suya ihtiyaç vardır. Yakın geçmişte kaliteli su kaynakları bol ve kolaylıkla temin edilebilir olduğundan su kalitesi ile ilgili problemler genellikle ihmal edilmiştir. Bölge jeolojisi, toprak yapısı, atık sular ve kanalizasyon atıkları, tarımsal gübreleme ve tarımsal hayvansal atıklar gibi faktörler yeraltı suyu kalitesini etkilemektedir.

Çalışma alanı Afyon-Akşehir Grabeni boyunca yer alan Akarçay Havzasının (Afyon Ovası) kuzey/kuzeybatı bölümünde yer almaktadır. Kurak-yarı kurak bir iklime sahip olan Akarçay Havzası kapalı bir havza durumunda olup 7995 km² yağış alanına sahiptir (Uray vd. 2019).

İncelenen yeraltı sularının bulunduğu alanda 8000 kişi yaşamakta olup, bölgede 56 km² tarımsal alan bulunmaktadır. Çalışma alanında içme suyu ve tarımsal amaçlı olarak kullanılan yeraltısularının kalite ve kullanılabilirlik durumlarının belirlenmesi bölge için büyük önem taşımaktadır.

1.1. Materyal ve Yöntem

Çalışma alanı Akarçay Havzasının kuzey/kuzeybatısında, Afyonkarahisar şehir merkezine 15 km mesafede ve 1/25.000 ölçekli K25-a4 paftasında yer almaktadır (Şekil 1). Bölgenin jeoloji ve hidrojeoloji haritaları önceki çalışmalardan derlenerek hazırlanmıştır. Bölgede içme ve sulama amacıyla açılmış olan 12 sondaj kuyusundan örnekleme yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1: Çalışma sahasının konumu ve örnekleme noktaları

Yeraltısularının sıcaklık (°C), elektriksel iletkenlik (EC-µs/cm), ve hidrojen iyonu aktivitesi (pH) değerleri Mayıs-2022 tarihinde HQ40D (Hach-Lange) marka portatif su ölçüm cihazı kullanılarak örnek alımı sırasında arazide ölçülmüştür. Suların katyon ve element analizleri için 500 ml yüksek yoğunluklu polietilen numune kapları kullanılarak, örnekler filtre edilmiş ve ultra saf HNO₃ kullanılarak pH'ları <2 olacak şekilde asitlenmiştir. Anyon ve silis analizleri için ise 500 ml örnek kapları kullanılmış, bu örnekler filtreleme ve asitleme işlemleri uygulanmamıştır.

Anyon (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^-), katyon (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ve diğer element (Al, Cu, Cd, Fe, B, Mn, Si, B, Zn) analizleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Su, Kayaç ve Mineral Analiz Laboratuvarında, Arsenik (As) analizleri ise MTA, MAT dairesinde yapılmıştır. İncelenen suların kimyasal analiz sonuçları İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (URL-1 2013)'te belirtilen sınır değerler ile karşılaştırılmış ve Schoeller içilebilirlik diyagramı kullanılarak içme amaçlı kullanımları belirlenmiştir. Ayrıca, ABD tuzluluk, Wilcox grafikleri, SAR, %Na, RSC (kalıntı sodyum karbonat), MT (magnezyum tehlikesi), KI (Kelley indeksi) ve PS (potansiyel tuzluluk) gibi bazı kullanılabilirlik indeksi verileri yardımıyla tarımsal sulama suyu olarak uygunlukları değerlendirilmiştir.

Değerlendirme aşamasında analiz hassasiyeti %5 ve daha küçük olup, analiz sonuçları Aquachem 9.0 programı kullanılarak değerlendirilmiştir. SAR, %Na, RSC, MT, KI ve PS gibi bazı parametrelerin hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda verilmiştir (birimler mek/l'dir).

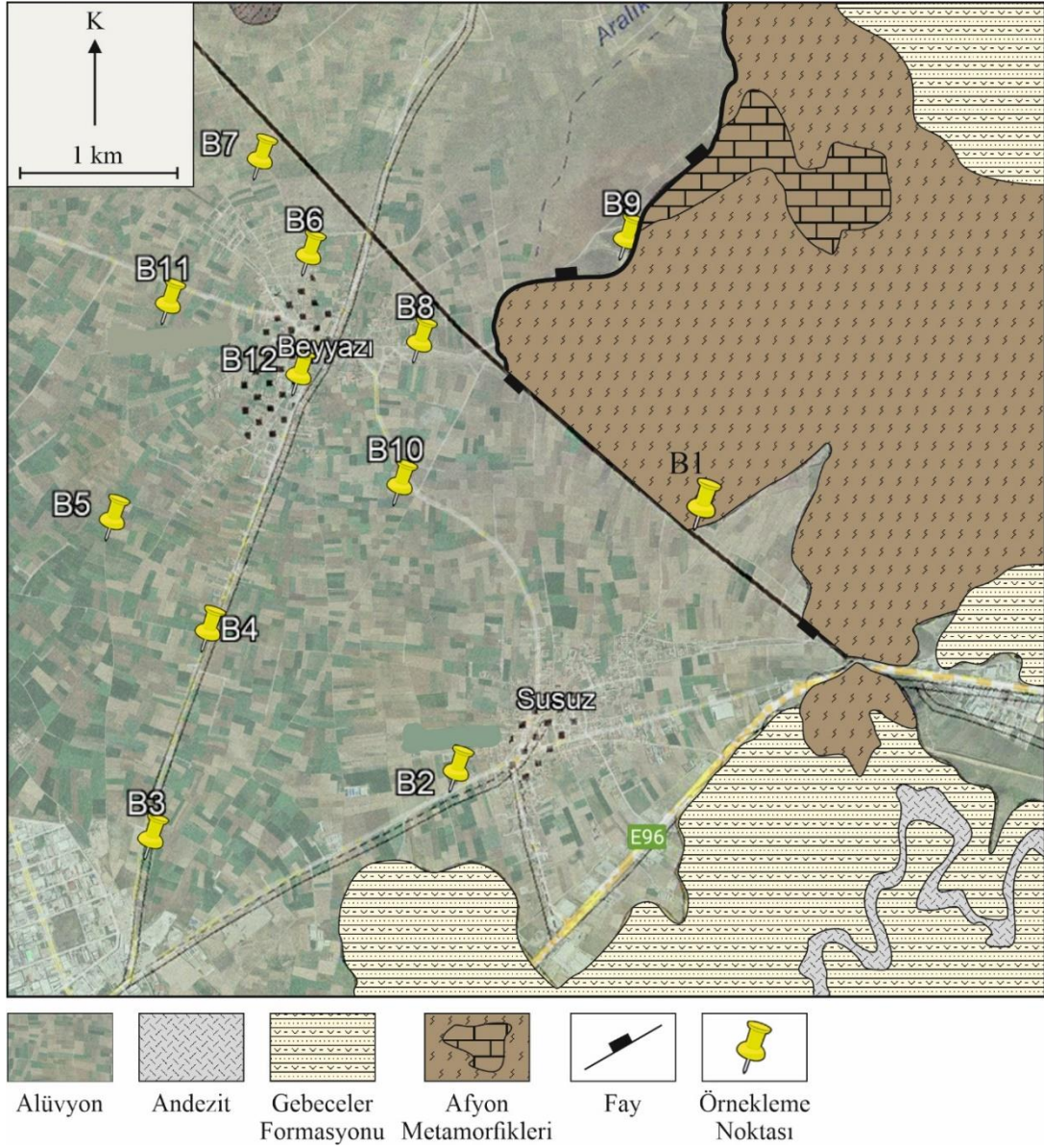
Parametre / indeks	Referans
$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{(rCa + rMg)/2}}$	(Richards 1954) (1)
$\%Na = \frac{rNa}{rNa + rCa + rMg + rK} \times 100$	(Wilcox 1955) (2)
$RSC = (rCO_3 + rHCO_3) - (rCa + rMg)$	(Eaton 1950; Richards 1954) (3)
$PS = Cl + \frac{SO_4}{2}$	(Doneen 1964) (4)
$MT = 100 \times \frac{rMg}{rMg + rCa}$	(Raghunath 1987) (5)
$KI = \frac{rNa}{rCa + rMg}$	(Kelley 1951; Kelley 1963) (6)

2. İnceleme Alanının Jeolojisi ve Hidrojeoloji

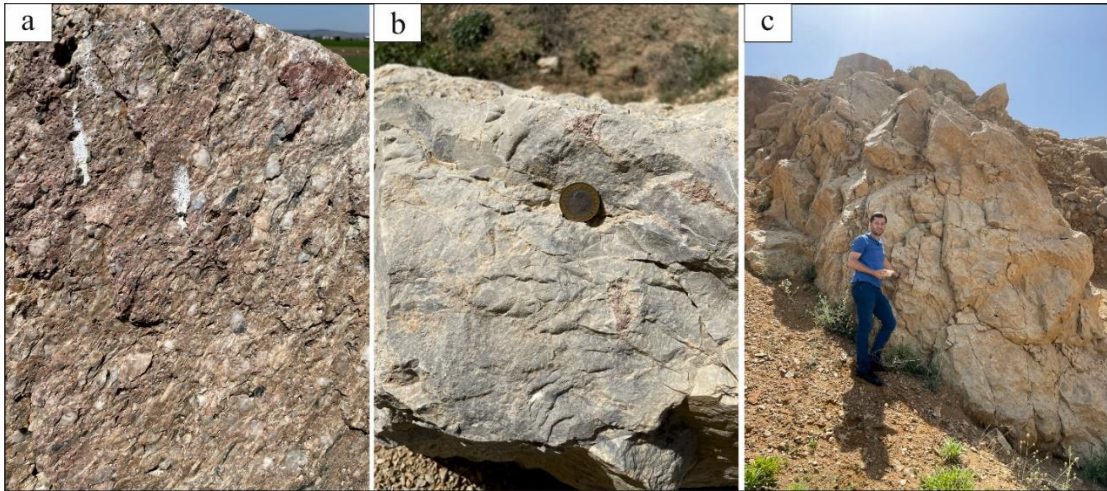
Bölgenin temel kayaçlarını Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfikleri oluşturmaktadır. Afyon metamorfikleri muskovitist, biyotitist gibi çok farklı bileşimlere sahip şistler ve mermerlerden meydana gelmektedir. Orta-Üst Miyosen yaşlı Gebeceler formasyonu Afyon metamorfiklerinin üzerinde uyumsuzlukla yer almaktadır. Üst Miyosen yaşlı andezitler bölgedeki volkanizmanın son ürünlerdir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ise inceleme alanındaki en genç birimlerdir (Şekil 2).

Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfikleri Doğanlar Şisti ve İncehisar Mermerleri olmak üzere 2 alt üyeden oluşmaktadır. Albit – klorit – muskovit – biyotit – kuvarşist ve kalkışist türünde litolojiler içeren birim içerisinde mercerler ve damarlar şeklinde kuvarşit yer almaktadır (Metin vd. 1987; Kibici vd. 2001). Genellikle kahve, boz, yeşil renkli olan Doğanlar Şistleri düşük dereceli yeşilşist fasiyesine ait mineral parajenezleri kapsamaktadır (Şekil 3a, Öktü vd. 1997). Beyaz, gri, krem renkli, kalın - çok kalın tabakalanmalı, büyük bloklar verebilen, ince kristalli çok değerli bir mermer türü olan İncehisar Mermer üyesi Afyon metamorfikleri içinde mercer şeklidir (Şekil 3b, Kibici vd. 2001; Yıldız vd. 2021). Temel kayaçlar üzerinde uyumsuzlukla yer alan Gebeceler Formasyonu volkanosedimanter gösel kireçtaşı ve tüfler ile üstte yer alan alüvyon yelpazesi çökellerinden oluşmaktadır (Şekil 3c, Yıldız vd. 2021). Bölgedeki volkanizmayı karakterize eden Adatepe Andezitleri arazide trakit, trakiandezit, trakibazalt şeklinde gözlenir. İnceleme alanındaki alüvyonlar ise akarsu yataklarında, ovalarda biriken kum, çakıl türü bağlanmamış güncel kırıntılardan oluşmaktadır.

İnceleme alanı yakınlarında yer alan jeotermal suların rezervuar kayacı olan kırıklı-çatlaklı ve boşluklu İncehisar mermerleri karstik akifer, soğuk su örneklerinin hazne kayası olan alüvyon ise taneli ortam akiferi olarak sınıflandırılmaktadır. Adatepe andezitleri kırıklı-çatlaklı kesimleri nedeniyle, Gebeceler formasyonu da çakıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı seviyeleri nedeniyle yarı geçirimli birim olarak adlandırılmıştır. B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B10, B11 numaralı sondaj kuyuları alüvyonda açılmış olup, alüvyon akiferden beslenmektedirler. B1 ve B9 numaralı sondaj kuyuları ise şist-alüvyon sınırında yer alan fayı kesmişlerdir. Örnekleme yapılan yeraltısularıyla ilgili genel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. B1, B6, B7, B8, B12 numaralı sondaj kuyuları bölge belediyelerince açılmış olup bu yeraltısuları genel amaçlı olarak şebekeye verilmektedir. B2, B3, B4, B5, B10, B11 sondajlarından üretilen yeraltısuları ise bölge halkı tarafından sulama amaçlı olarak kullanılmaktadır. B9 sondajına ait yeraltısuyu ise özel bir işletmeye ait olup işletme içerisinde kullanılmaktadır.



Şekil 2: İnceleme alanının jeoloji haritası (Öcal vd. 2011'den değiştirilmiştir)



Şekil 3: a) Doğanlar şisti ve kuvarsit, b) Mermer c) Gölsel kireçtaşı

Tablo 1: Örneklenen yeraltısularının genel özellikleri (Mayıs 2022)

	Koordinat	Rakım (m)	Türü	Kullanım Amacı	Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)	Elektriksel İletkenlik (µs/cm)	pH
B1	293865 4299434	1038	Sondaj	Şebeke Suyu	-	18.7	663	8.34
B2	291572 4297361	1017	Sondaj	Sulama	125	17.2	1035	8.28
B3	289033 4297012	1015	Sondaj	Sulama	110	17	1492	7.99
B4	289612 4298660	1020	Sondaj	Sulama	95	16.2	1191	8.25
B5	288877 4299635	1019	Sondaj	Sulama	105	15.7	543	8.36
B6	290652 4301683	1030	Sondaj	Şebeke Suyu	120	17	451	8.32
B7	290239 4302807	1030	Sondaj	Şebeke Suyu	120	17	480	8.25
B8	291521 4300884	1029	Sondaj	Şebeke Suyu	125	17.2	1568	8.17
B9	293295 4301580	1062	Sondaj	Fabrika	150	18.4	348	8.25
B10	291276 4299726	1025	Sondaj	Sulama	-	16	734	8.26
B11	289456 4301380	1023	Sondaj	Sulama	-	16.7	598	8.31
B12	290504 4300699	1027	Sondaj	Şebeke Suyu	110	17.1	1489	8.09

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Hidrojeokimyasal Özellikler

Bölgede örnekleme yapılan yeraltısularının sıcaklıkları 16.2-18.7°C, elektriksel iletkenlikleri 348-1568 µs/cm arasında değişmektedir. Suların pH 7.99-8.36 arasında olup bazik karakter sunmaktadır (Tablo 1). Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH 1979) sınıflamasına göre belirlenen su sınıfları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Örneklenen yeraltısularının su sınıfları

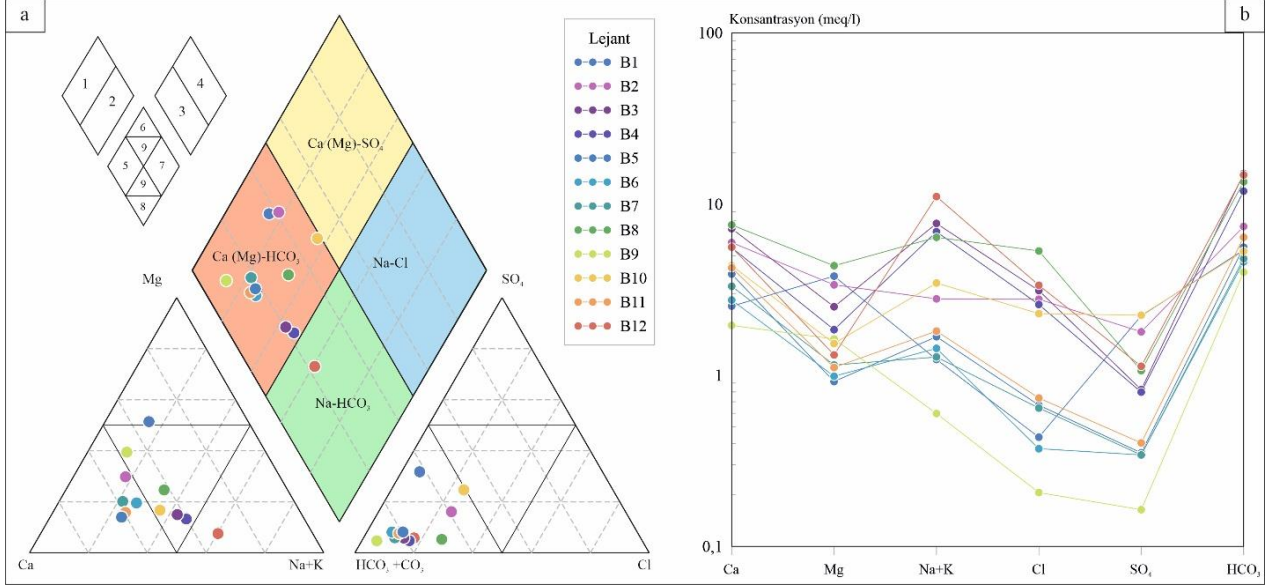
Örnek Numarası	Su Sınıfı	Örnek Numarası	Su Sınıfı
B1	Mg-Ca-HCO ₃ -SO ₄	B7	Ca-Na-HCO ₃
B2	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl	B8	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -Cl
B3	Na-Ca-HCO ₃	B9	Ca-Mg-HCO ₃
B4	Na-Ca-HCO ₃	B10	Ca-Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄
B5	Ca-Na-HCO ₃	B11	Ca-Na-HCO ₃
B6	Ca-Na-HCO ₃	B12	Na-Ca-HCO ₃

Örneklerin topluca bir arada gösterilmesine olanak sağlayan Piper (1944) diyagramında B12 kodlu örnek Na-HCO₃ bileşimli sular alanında yer almakta iken diğer tüm örnekler Ca(Mg)-HCO₃ bileşimli sular sınıfında yer almaktadır. İncelenen tüm su örneklerinde baskın anyon HCO₃⁻ iken, 5 su örneğinde kalsiyum, 1 örnekte sodyum, 1 örnekte magnezyum hâkim kation durumundadır. 5 su örneği ise karışık tip katyonlar sınıfında yer almıştır. Aynı zamanda bu örnekler 1 (Ca + Mg > Na + K) ve 3 (CO₃ + HCO₃ > Cl + SO₄) numaralı alanlarda yer almaktadır. B12 örneği ise diğer örneklerden farklı olarak 2 numaralı (Ca + Mg < Na + K) alanında yer almıştır (Şekil 4a). Schoeller diyagramında da örneklerin benzer kökenli oldukları, aynı kimyasal süreçlerden geçtikleri ve sodyum-potasyum, kalsiyum ve bikarbonat iyonlarında zengin oldukları görülmektedir (Şekil 4b).

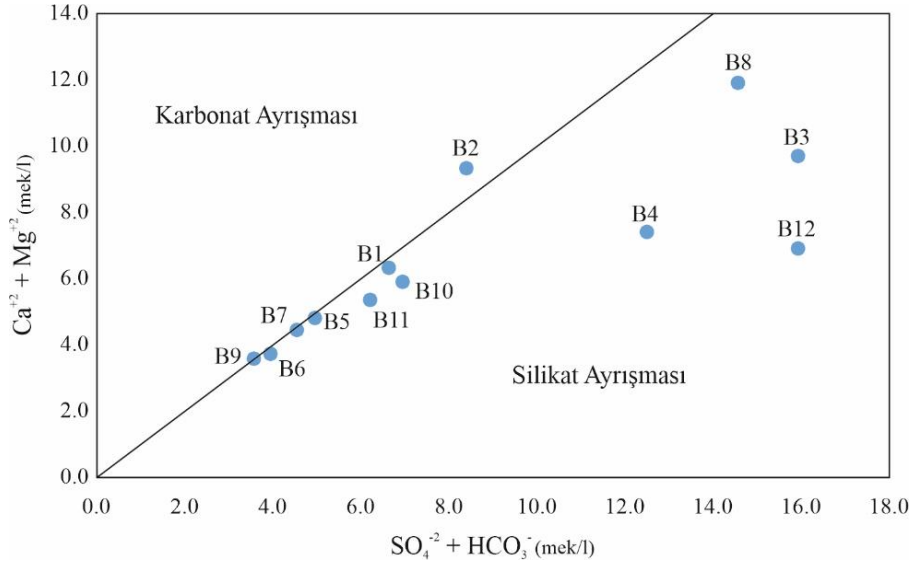
Na⁺/Cl⁻ oranı, sulardaki sodyumun kaynağının belirlenmesi için sıkça kullanılan bir parametredir. Na⁺/Cl⁻ oranı bire yakınsa sodyumun ana kaynağı halit mineralinin çözünmesi, 1’den büyükse sodyumun ana kaynağı silikat bozunma reaksiyonlarıdır (Meybeck 1987). İnceleme alanı sularının mek/l cinsinden Na⁺/Cl⁻ oranı bir örnekte 0.7 iken, diğer örneklerin değerleri 1.4-3.6 arasında değişmektedir. Bu veriye ek olarak Na⁺/Cl⁻ oranı >1 olan sulardaki sodyum fazlalığı, negatif baz değişim indeksi (BDİ) değerleriyle de yansıtılır (-0,1 ile -2.9 arasında). Negatif BDİ değerleri, sudaki Ca⁺² ve Mg⁺²’un minerallerdeki Na⁺ ve K⁺ iyonları ile değişimini gösterir. Örneklerdeki sodyum fazlalığının ana kaynağı Afyon metamorfikleri-su arasında gerçekleşen iyon değişim reaksiyonlarıdır.

Sulardaki molar Ca⁺²/Mg⁺² oranı, çözülmüş karbonatlı kayacın türünü işaret eden önemli bir göstergedir. Ca⁺²/Mg⁺² oranının 1’e yakın olması dolomit çözünmesini, 1-2 arasında olması daha fazla kalsit katkısına ve 2’den daha yüksek değerler ise silikat minerallerinin çözünmesini işaret etmektedir (Katz vd. 1997; Mayo ve Loucks 1995). Bu oran 1-2 arasında değerlere sahip olan B1, B2, B8 ve B9 örneklerinde genel olarak kalsit ve dolomit çözünmesine, Ca⁺²/Mg⁺² oranı 2 ve daha yüksek değere sahip örneklerde (B3, B4, B5, B6, B7, B10, B11, B12) ise silikat minerallerinin çözünmesine işaret etmektedir.

Dolomitik bileşime sahip olan İsehisar mermerleri ve Gebeceler formasyonunun kireçtaşı seviyeleri ile şist türünden kayalar suların Ca-Mg içeriklerini doğrudan etkilemektedir. Eğer sulardaki Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- ve SO_4^{-2} iyonlarının kaynağı kireçtaşı, dolomit ve jipsin çözünmesi ise $(Ca^{+2} + Mg^{+2})$ ve $(SO_4^{-2} + HCO_3^-)$ diyagramında örnekler yaklaşık 1:1 çizgisi üzerinde yer almalıdır (McLean vd. 2000). Şekil 5 incelendiğinde örneklerin karbonat ve silikat ayrışma reaksiyonlarından etkilendiği görülmektedir. Örneklerin güncel kompozisyonlarının oluşmasında birden çok parametre etkili olmuş, sular etkileşimde buldukları kayalarla reaksiyonları sonucunda güncel kimyasal bileşimlerini kazanmışlardır.



Şekil 4: a) Analizi yapılan örneklerin Piper diyagramı, b) Schoeller diyagramı



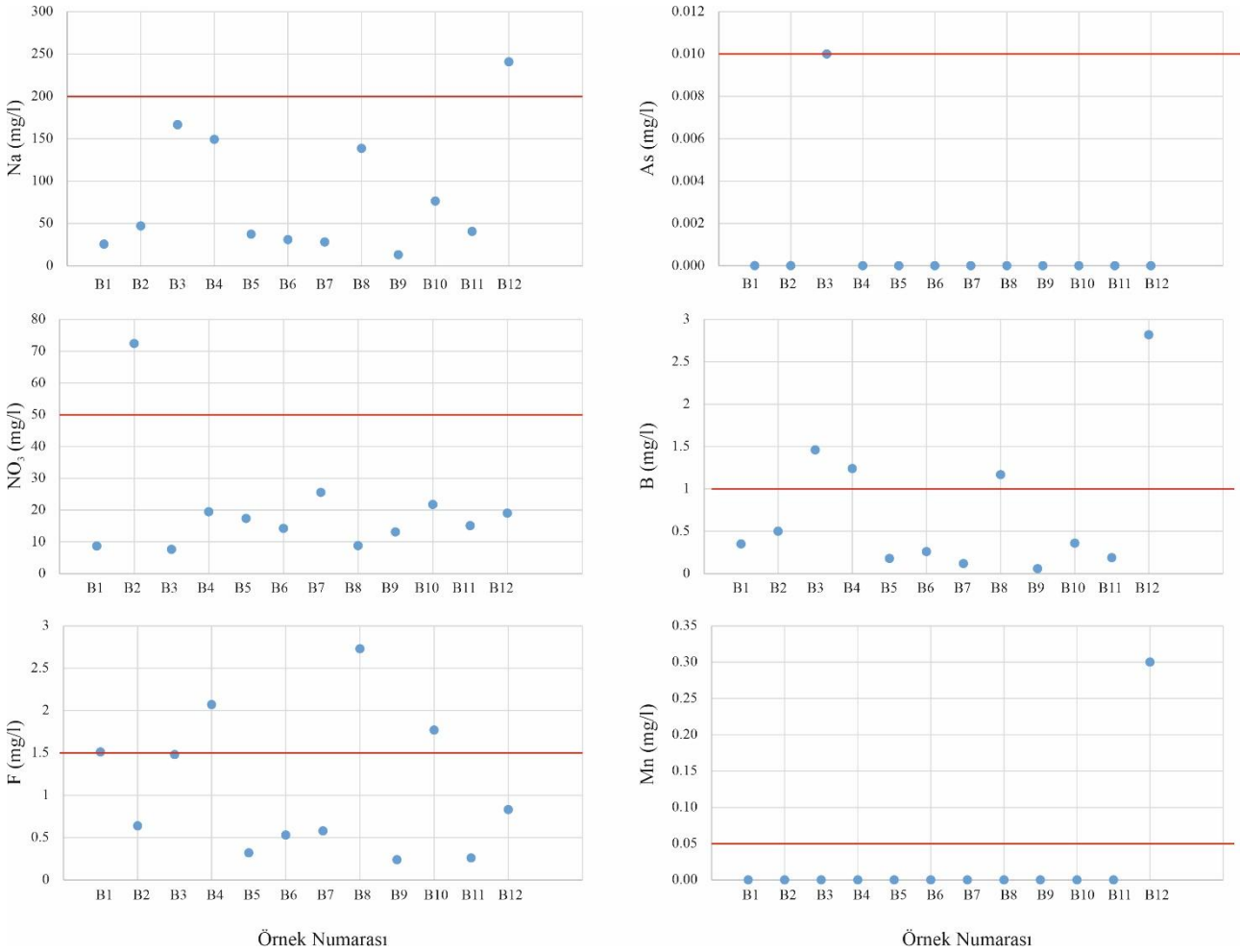
Şekil 5: Örneklerin $(Ca^{+2} + Mg^{+2})$ ve $(SO_4^{-2} + HCO_3^-)$ diyagramındaki konumu

3.2. Suların Kullanılabilirlik Özellikleri

3.2.1. İçilebilirlik Özellikleri

İnceleme alanındaki suların içilebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesinde İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (URL-1 2013) parametreleri ve Schoeller içilebilirlik diyagramından faydalanılmıştır. Tüm suların EC, pH, Cl, SO_4^{-2} , NO_2^- , NH_4 , Al, Cu, Cr, Cd, Fe, Pb içerikleri standartlarla belirlenen limit değerlerin altındadır. Sodyum (Na^+) içeriği bakımından B12 örneği, Nitrat (NO_3^-) içeriği bakımından B2 örneği, Flor (F^-) içeriği bakımından B1, B4, B8 ve B10 örnekleri, Arsenik (As) içeriği bakımından B3 örneği, Bor (B) açısından B3, B4, B8 ve B12 örnekleri ve Mangan (Mn) içeriği bakımından B12 örneği izin verilen değerlerin üzerindedir (Şekil 6).

Sondaj kuyusu bazında sınır değerleri aşan bazı parametrelerin varlığı, su-kayaç etkileşimi, tarımsal ve evsel kirlenme ile tarımsal gübreler gibi farklı parametrelerden kaynaklanabilmektedir. Sodyum fazlalığı bölgedeki metamorfik kayalar ile ilişkili olabilirken, nitrat, bor ve flor gibi elementlerin yüksekliği su-kayaç etkileşimi ile birlikte antropojenik kirlenmeye işaret edebilir.



Şekil 6: Analiz sonuçlarının yönetmelik (URL-1 2013) değerleri ile karşılaştırılması (kırmızı çizgiler izin verilen sınır değerleri göstermektedir)

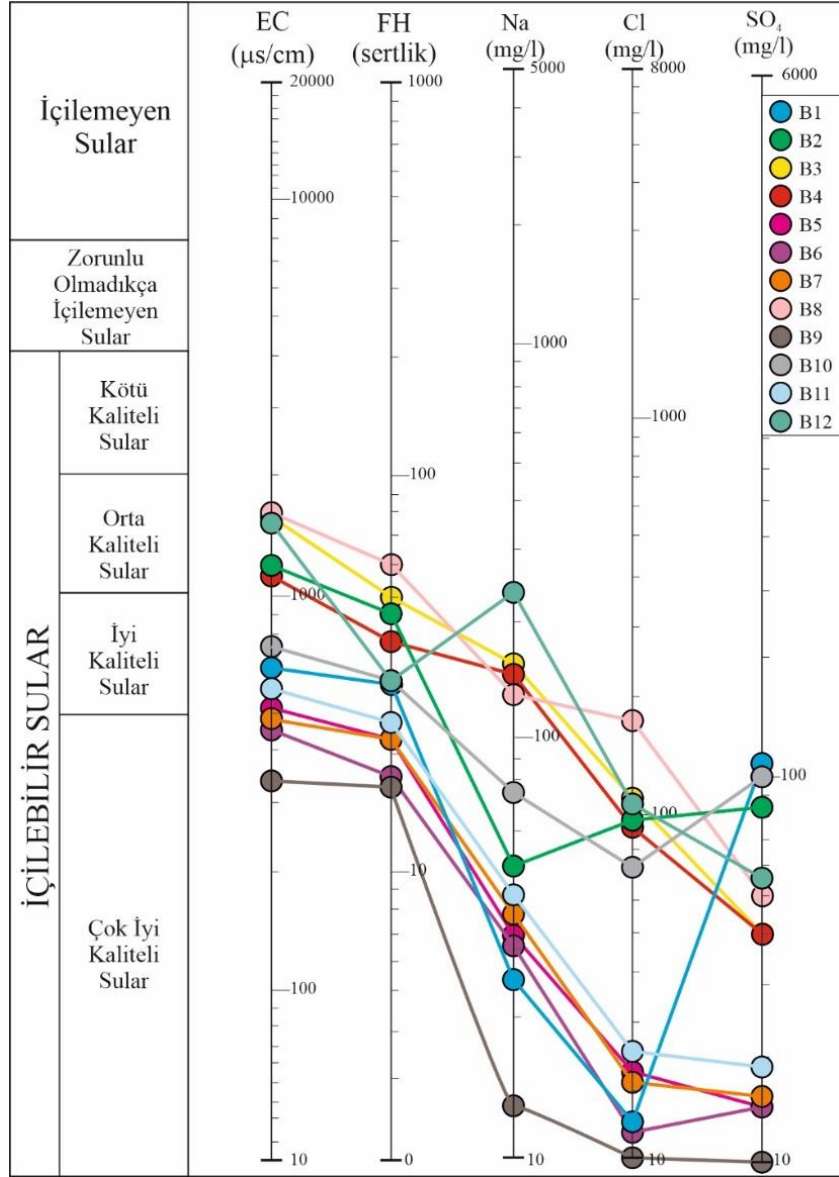
Örneklerin Schoeller içilebilirlik diyagramındaki konumları incelendiğinde, B9 numaralı örneğin “çok iyi kaliteli sular”, B1, B5, B6, B7, B10, B11 örneklerinin “iyi kaliteli sular”, B2, B3, B4, B8 ve B12 kodlu örneklerin “orta kaliteli sular” sınıfında yer aldığı görülmektedir (Şekil 7).

3.2.2. Sulama Suyu Özellikleri

Bu bölümde, inceleme alanında sulamada da kullanılan yeraltısularının sulama suyu kalitesinin belirlenebilmesi için kimyasal analiz sonuçlarından hareketle hesaplanan sodyum tehlikesi (%Na ve SAR-sodyum adsorpsiyon oranı), kalıntı sodyum karbonat (RSC), magnezyum tehlikesi (MT), geçirgenlik indeksi (PI) ve Kelley oranı (KR) değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Sularda sodyumun görece bolluğu, toprakta kabuklaşmaya ve dolayısıyla köklerin hava almasının engellenmesine neden olmaktadır (Şahinci 1991). %Na ve Elektriksel iletkenlik değerleri kullanılarak hazırlanan Wilcox (1955) diyagramında B12 örneğinin “şüpheli”, B2, B3, B4 ve B8 örneklerinin “iyi kullanılabilir”, B1, B5, B6, B7, B10 ve B11 örneklerinin “çok iyi kullanılabilir” sınıfında yer aldığı belirlenmiştir (Şekil 8a).

Sulardaki sodyum tehlikesinin değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılan diğer bir diyagram olan ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramında ise suların SAR ve elektriksel iletkenlik değerleri kullanılmaktadır (Richards 1954). Bu diyagramda B12 örneği C3S2 (yüksek tuzlu sular-orta sodyumlu sular) sınıfında, B2, B3, B4 ve B8 örnekleri C3S1 (yüksek tuzlu sular-düşük sodyumlu sular), B1, B5, B6, B7, B9, B10, B11 örnekleri ise C2S1 (orta tuzlu sular-düşük sodyumlu sular) sınıfında yer almaktadır (Şekil 8b). Genel olarak bu suların kullanılacağı bitkilerin tuza dayanıklı bitkiler olması gerekmektedir.

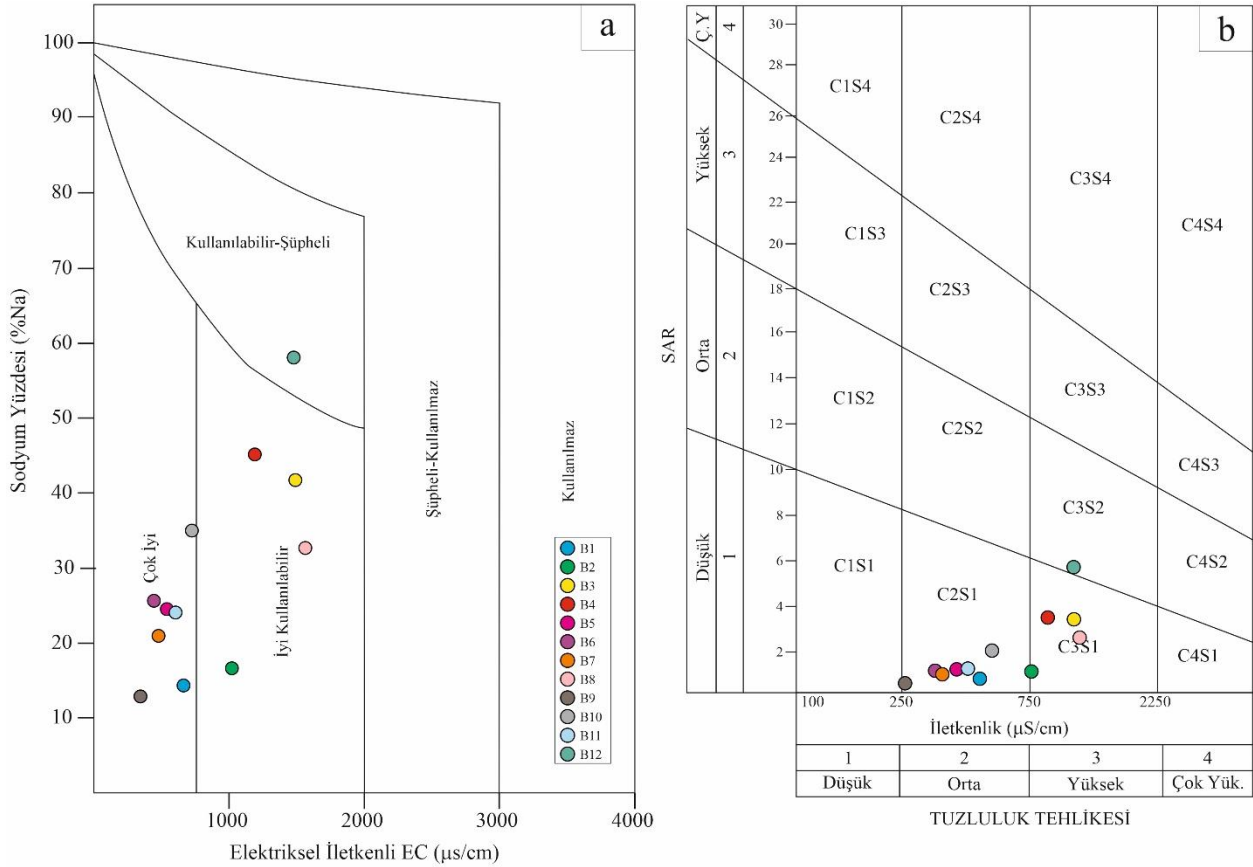


Şekil 7: Örneklerin Schoeller içilebilirlik diyagramındaki konumu

Tablo 3: Sulama suyu kriterleri

	SAR	%Na	RSC	PS	MT %	KI
B1	0.6	14.7	-0.9	1.5	60.0	0.2
B2	0.9	16.9	-1.9	3.7	36.2	0.2
B3	3.3	41.7	5.4	3.5	25.9	0.7
B4	3.4	45.4	4.5	3.0	24.9	0.9
B5	1.0	25.0	0.8	0.8	19.1	0.3
B6	1.0	26.0	0.9	0.5	26.4	0.4
B7	0.8	21.4	0.3	0.8	25.7	0.3
B8	2.5	33.0	1.6	5.9	36.6	0.5
B9	0.4	13.5	0.4	0.3	45.5	0.2
B10	1.9	35.5	-0.6	3.4	26.0	0.6
B11	1.1	24.6	1.0	0.9	20.7	0.3
B12	5.6	58.3	7.9	3.9	19.0	1.5

SAR: Sodyum adsorbsiyon oranı, %Na: Yüzde sodyum, RSC: Kalıntı sodyum karbonat, PS: Potansiyel tuzluluk, %MT: Magnezyum tehlikesi, KI: Kelley indeksi



Şekil 8: a) Wilcox (1955) diyagramı b) ABD tuzluluk diyagramı

Ortamda çok fazla karbonat ve bikarbonatın varlığı karbonat ve bikarbonat ile sodyum birleşmesine ve sonuç olarak sodyumlu toprakların oluşmasına neden olmaktadır (Eaton 1950; Ragunath 1987). Artıksal sodyum karbonat (RSC) değeri 2.5’den büyük olan sular sodyum birikmesine neden olacağı için sulama suyu açısından kullanımları uygun değildir. B3, B4 ve B12 numaralı su örnekleri bu sınıflamaya göre “sulamaya uygun olmayan sular” sınıfında yer almaktadır (Tablo 3).

Sudaki yüksek magnezyum oranı toprağı tuzlandırmakta, bitki büyümesini ve verimini olumsuz etkilemektedir (Joshi vd. 2009; Venugopal vd. 2009). Magnezyum tehlikesi %50’den az olan sular “uygun”, daha yüksek olan sular ise “uygun olmayan” sular olarak sınıflanır (Paliwal 1972). B1 numaralı örnek haricindeki tüm sular magnezyum tehlikesi bakımından sulamaya uygundur (Tablo 2).

Kelley indeksi (KI) suların Ca^{+2} , Mg^{+2} ve Na^{+} içeriklerine göre kalite değerlendirmesinde kullanılmaktadır. Kelley oranı < 1 olan sular sulama için uygundur (Kelley 1951; Kelley 1963). B12 örneği harici diğer tüm sular Kelley oranı bakımından sulamaya uygundur.

Su örnekleri potansiyel tuzluluk (PS) açısından değerlendirildiğinde PS değerlerinin 0.3-5.9 arasında değişim gösterdiği hesaplanmıştır. Potansiyel tuzluluk değerinin 3’den küçük olması su kaynağının sulama amaçlı kullanım için uygun olduğunu göstermektedir (Doneen 1964; Tablo 2). Bu nedenle B2, B3, B8, B10 ve B12 örnekleri “sulamaya uygun olmayan sular” olarak sınıflandırılmışlardır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Afyon Ovası kuzeybatı bölümünde yer alan 12 farklı sondajdan elde edilen yeraltı sularının hidrojeokimyasal özellikleri ile içme ve sulama suyu olarak kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda su örneklerinin genel olarak $Ca-(Mg)-HCO_3$ bileşimli oldukları, B12 örneğinin ise $Na-HCO_3$ tipinde olduğu belirlenmiştir. Farklı litolojideki kayalarla suların etkileşimlerine ve yer yer antropojenik kirlenmelere bağlı olarak suların kimyasal bileşimleri ve kullanılabilirlik özellikleri değişim göstermektedir. Sular içilebilirlik özellikleri bakımından incelendiğinde, B12 örneğinde sodyumun (240.8 mg/l), B2 örneğinde nitratın (72.42 mg/l), B1, B4, B8 ve B10 örneklerinde florun (>1.5 mg/l), B3, B4, B8 ve B12 örneklerinde borun (>1 mg/l), B12 örneğinde manganın (0.3 mg/l) izin verilen sınır değerleri aştığı görülmektedir. B3 örneğinin arsenik değeri (0.01 mg/l) ise tam sınıf değerdedir.

Afyon metamorfiklerine ait şist türündeki kayalar ile volkanik kayaların bu elementlerin zenginleşmesine neden olabileceği gibi, tarımsal-evsel atıklar ve gübreler de özellikle nitrat, flor ve bor gibi elementlerin zenginleşmesine neden olabilmektedir. İncelenen örneklerin yüzde sodyum değerlerinin 13.5-58.3 arasında, sodyum adsorbsiyon oranı değerlerinin 0.4-5.6 arasında, magnezyum tehlikesi oranlarının 19.0-60.0 arasında, Kelley oranlarının 0.2-1.5 arasında ve potansiyel tuzluluk değerlerinin 0.3-5.9 arasında değiştiği belirlenmiş olup, bu değerlere göre sular kendi içlerinde farklı özelliklere sahiptir. Sulamaya uygun olmayan sular olarak sınıflandırılan su örneklerinin kullanılacağı bitki türlerinin dikkatli seçilmesi ve sulama yapılacak toprakta iyileştirme çalışmaları yapılması gerekmektedir. İncelenen su örneklerinin uzun dönem analiz ve takipleri yapılarak su kaynaklarının kaliteleri izlenmeli, kimya-ziraat-çevre ve jeoloji gibi alanlarda multidisipliner ekipler yardımıyla toprağın ve suların verimli kullanımı sağlanmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma, 22.FEN.BİL.18 numaralı proje ile, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Doneen L.D., (1964), *Notes on water quality in agriculture*, Department of Water Science and Engineering, University of California, Davis, 48ss.
- Eaton E.M., (1950), *Significance of carbonate in irrigation waters*, Soil Science, 69(2), 123-133.
- IAH, (1979), *Map of Mineral and Thermal Water of Europe Scale: 1:500000*, International Association of Hydrogeologists, United Kingdom.
- Joshi M.D., Kumar A., Agrawal N., (2009), *Assessment of the irrigation water quality of river ganga in haridwar district*, Rasayan Journal of Chemistry, 2(2), 285-292.
- Katz B.G., Coplen T.B., Bullen T.D., Davis J.H., (1997), *Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interactions between ground water and surface water in mantled karst*, Ground Water, 35(6), 1014-1028.
- Kelley W.P., (1963), *Use of saline irrigation water*, Soil Science, 95(6), 385-391.
- Kelley W.P., (1951), *Alkali soils-their formation, properties and reclamation*, Reinhold Publishing Corporation, New York, USA, 176ss.
- Kibici Y., Yıldız A., Bağcı M., (2001), *Afyon kuzeyinin jeolojisi ve mermer potansiyelinin araştırılması*, Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM '2001), 3-5 Mayıs, Afyonkarahisar, Türkiye, ss.73-85.
- Mayo A.L., Loucks M.D., (1995), *Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range*, Utah, Journal of Hydrology, 172(1-4), 31-59.
- McLean W., Jankowski J., Lavitt N., (2000), *Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia*, Groundwater, Past Achievements and Future Challenges' in İçinde, (Sililo O., Ed.), Balkema, Rotterdam, ss.567-573.
- Metin S., Genç Ş., Bulut V., (1987), *Afyon ve Yakın Dolayının Jeolojisi*, MTA Raporu No: 2113, Ankara.
- Meybeck, M., (1987), *Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads*, American Journal of Science, 287(5), 401-428.
- Öcal H., Turhan N., Göktaş F., (2011), *Türkiye jeoloji haritaları Afyon K-25 paftası*, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Öktü G., Kara I., Önder I., (1997), *Afyon ilinde yerel Ömer-Gecek-Uyuz Hamamı Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl jeotermal sahalarının detay etüdü*, MTA Rapor No: 10027, Ankara, 41ss.
- Paliwal K.V., (1972), *Irrigation with Saline Water*, Water Technology Centre, Indian Agriculture Res. Institute, New Delhi, 198ss.
- Piper A.M., (1944), *A Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis*, Eos, Transactions American Geophysical Union, 25(6), 914-23.
- Raghunath H.M., (1987), *Groundwater*, Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 563ss.
- Richards L.A., (1954), *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*, US Department of Agriculture Hand Book No 60, Washington D.C, ss.129-134.
- Şahinci A., (1991), *Doğal Suların Jeokimyası*, Reform Matbaası, İzmir, Türkiye, 548ss.
- Uray G., Yaşlıoğlu A., Eryıldırım M., Yıldızhan M., Durmaz Z., Koçbay G.R., (2019), *Akarçay Havzası Taşkın Yönetim Planı*, Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, 328ss.
- URL-1, (2013), *İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelikte değişiklik yapılmasına dair yönetmelik*, Resmi Gazete Tarih: 07.03.2013, Sayı: 28580, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/03/20130307-7.htm>, [Erişim 20 Aralık 2022].
- Venugopal T., Giridharan L., Jayaprakash, M., Periakali P., (2009), *Environmental impact assessment and seasonal variation study of the groundwater in the Vicinity of River Adyar, Chennai, India*, Environmental Monitoring and Assessment, 149, 81-97.
- Wilcox L.V., (1955), *Classification and use of Irrigation Waters*, Washington, United States Department of Agriculture, 969, 1-19.
- Yıldız A., Bağcı M., Başaran C., Özyıldırım Ö., (2021), *Susuz (Afyonkarahisar) ve çevresinin derin jeotermal yapısının araştırılması*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi Sonuç Raporu, Afyonkarahisar, 53ss.