

İÇME SULARINDA ARSENİK KİRLİLENMESİ

Mustafa ÖZTÜRK*¹ Ayben POLAT² Şükrü ASLAN²
¹Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas MYO, Organik Tarım Programı, 58140, Sivas, Türkiye
²Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

Özet

Arsenik çevrede yaygın olarak bulunan bir elementtir. Pek çok çevre sorunu arseniğin doğal koşullar altında hareket etmesi sonucu olmasına rağmen, madencilik faaliyetleri ve arsenikli pestisit kullanımı gibi antropojenik kaynaklarında önemli bir etkisi vardır. Çevredeki çeşitli arsenik kaynakları nedeniyle içme suları insan sağlığı için büyük tehdit oluşturmaktadır. Arseniğin yüksek toksisitesinin bir sonucu olarak, Türkiye’de dahil olmak üzere birçok ülke sıkı yasal düzenlemeler yaparak içmesularında izin verilebilir toplam arsenik konsantrasyonunu 10 µg/L gibi düşük seviyeye düşürmüştür. İçme sularında arseniğin sürekli artışı küresel bir sağlık sorunu haline gelmiştir. Bu çalışmada, içme sularında arsenik kirliliği ve arıtma yöntemleri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Arsenik, içme suyu, kirlilik

Abstract

Arsenic is a ubiquitous element that is commonly found in environments. Although the most environmental arsenic problems are the result of mobilization under natural conditions, anthropogenic sources such as mining activities, use of arsenical pesticides had an important additional impact. Due to the various sources of arsenic in the environment, drinking water probably poses the greatest threat to human health. As a result of the high toxicity level of arsenic, many countries include Turkey established stringent regulations of maximum allowable limits as low as 10 µg total As/L in drinking waters. The continuous increase of the arsenic in drinking waters has become a global health problem. In this study, arsenic pollution and treatments methods in drinking waters are investigated.

Key words: Arsenic, drinking water, kirlilik

1. Giriş

Doğada en bol bulunan elementlerden biri olan arseniğe doğal sular, toprakta ve kayalarda, atmosferde ve organizmalarda yaygın olarak rastlanmaktadır. Yer kabuğunda 20. sırada, deniz suyunda 14. sırada ve insan vücudunda 12. sırada yer alan arsenik, bazı türleri metale benzemekle birlikte metal ile ametal arasında bir özelliğe sahip metaloid olarak sınıflandırılır [1-3].

Arseniğe (As) genellikle dünyanın farklı bölgelerinde, yeraltı sularında doğal süreçlerin yanı sıra, antropojenik kaynaklı faaliyetler sonucu da rastlanır [4-6]. Arsenik toksik, mutajenik ve kanserojenik olarak bilindiğinden bu bileşik ile kirlenmiş doğal sular önemli bir çevre sorundur [7]. As kirliliğinin en temel kaynağı alüvyonal ve volkanik sedimentler ve daha sonra sırası ile yüksek alkalinite, kapalı havza gölleri, termal kaynaklar, madencilik faaliyetleri, pestisitler ve çeşitli kayaçlardır [8]. Ayrıca iklim reaksiyonları, biyolojik aktivite ve volkanik emisyonlar gibi doğal koşulların yanı sıra, fosil yakıtların yanması, arsenikli herbisit ve bitki kurutucu maddeler ve hayvan yemi katkı maddesi olarak arsenik kullanımı arsenik kirliliğini arttırmaktadır [1,9].

Arseniğin yeraltı ve yüzey sularında konsantrasyonu geniş bir aralıkta ve bölgesel olarak farklılık gösterir [10]. Yeraltı ve yüzey sularında arseniğe özellikle ulusal ve uluslararası içme suyu standartlarını aştığı ABD, Arjantin, Bangladeş, Şili, Hindistan, Meksika, Çin, Moğolistan, Myanmar, Nepal, Yeni Zelanda, Tayland, Tayvan, Türkiye ve Vietnam gibi dünyanın bir çok bölgesinde rastlanmaktadır [1,11]. Türkiye'nin özellikle Kütahya, İzmir ve Afyon gibi Türkiye'nin batı bölgelerinde doğal su kaynakları kirliliğinin izin verilen maksimum seviyesinden çok daha yüksek seviyelerde arsenik içerir (10-900 µg/L) [11].

Arseniğin sağlık üzerine olumsuz etkileri; arsenik dozu, maruz kalma süresi ve maruz kalan nüfusun beslenme özelliklerine kuvvetle bağlıdır. İçme sularında arseniğe kronik maruz kalma nedeniyle mide, karaciğer, solunum, nörolojik, hematolojik, kardiyovasküler, sinir ve diğer hastalıklar ile birlikte başlıca dermatolojik özelliklere sahip sağlık etkileri gösterebilir [12-16]. Çeşitli epidemiyolojik çalışmalar içme suyu ve soluma yoluyla arseniğe maruz kalındığında insanlarda lezyonlar, deri kanseri ve akciğer kanseri de dahil olmak üzere arseniğin kanserojen etkilerini göstermiştir [12, 17-19].

Arsenik doğada çeşitli oksidasyon seviyelerinde (-3, 0, +3 ve +5) olabilir ancak doğal sularda çoğunlukla üç değerli arsenit (As^{3+}) ya da beş değerlikli arsenat (As^{5+}) oksianyonları gibi inorganik formda bulunur. Arsenit, arsenattan 25-60 kat daha toksik ve hareketlidir [4].

Yukarıda sayılan tüm bu nedenlerle doğal sulardan arseniğin giderilmesi gerekmektedir. Başlıca arıtma yaklaşımları, kireç, alum veya demir ile pıhtılaşma, kimyasal oksidasyon adsorpsiyon, ters osmoz, membran filtrasyon ve iyon değişimini kapsamaktadır [11, 20,21].

Bu çalışmada arseniğin oluşumu, türlendirilmesi, sağlık etkileri ve arıtma yöntemleri araştırılarak tartışılmıştır.

2. Arseniğin Varlığı ve Oluşumu

2.1. Arsenik varlığı

Arsenik, yerkabuğunda geniş bir alana yayılmış ve yerkabuğundaki ortalama konsantrasyonu 2 mg/L, 5,78 g/cm³ yoğunluğa sahip atom numarası 33, atom ağırlığı 74,92 gr, VA grubunda bulunan, kimyasal açıdan hem metal hem de metal olmayan özelliklere sahip, bir metaloid olarak sınıflandırılır.

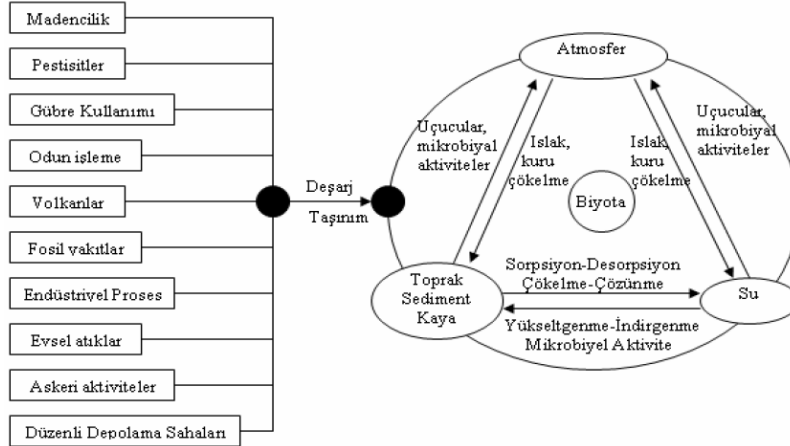
Arsenik toprakta, bazı kaya türlerinde ve özellikle kurşun ve bakır içeren mineral ve cevherlerde doğal olarak bulunur. Rüzgarın taşıdığı toz, yüzeysel akış ve yeraltına sızma sonucu havaya ve suya geçebilir [22,23]. Arsenik konsantrasyonu deniz suyundaki 0.09-24 µg/L, yüzeysel sularda ise 0.15 – 0.45 µg/L arasındadır [24].

Arseniğin doğal kaynakları arasında kaplıcalar, ılıcalar, volkanik kayalar, çöküntü kayaları (organik/inorganik killer), başkalaşım kayaları, deniz suyu ve mineral çökeller yer alır [25].

2.2. Arsenik oluşumu

Arsenik yeraltı suyunda genellikle doğal olarak meydana gelen bir element olmasının yanısıra antropojenik kaynaklı olarak da bulunabilir ve konsantrasyon aralığı geniş ve bölgesel olarak

değişir. Asenin doğal ve antropojenik kaynakları Şekil 1’de gösterilmiştir. Yeraltı sularında arsenik konsantrasyonu değişkenliği akifer arsenik içeriğine ve katı fazdan sıvı faza arseniğin serbest bırakıldığı değişik desorpsiyon/dispersiyon proseslerine mineral çözünme/çökme, adsorpsiyon/ desorpsiyon, yükseltgenme/indirgenme tepkime mekanizmaları ve biyolojik dönüşüme bağlanır [26-28]. Yeraltı sularında arsenik kaynakları olduğuna inanılan en yaygın arsenik taşıyan mineraller, pirit ve çeşitli arsenik sülfidler ve sülfö tuzlarını içerir [6, 26, 29,30].



Şekil 1. Doğada arsenik döngüsü [22,31]

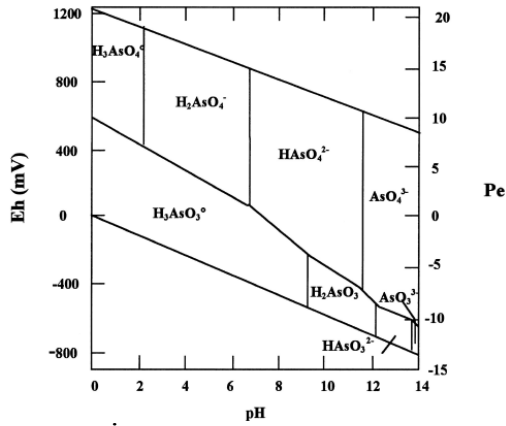
Genel olarak birçok durumda As; kükürlü ve demirli minerallerin içeriğinde var olduğundan, bu minerallerin çözünümüne bağlı olarak yeraltısuyuna geçer [6,32]. Ülkemizde menderes masifi ile ilişkili jeotermal kaynaklardaki As derişimleri oldukça yüksek değerlerdedir [33-35].

3. Arsenik Bileşikleri

Arsenik doğada 200’den fazla mineral türünde bulunmakla birlikte, çoğunlukla dört farklı değerlikteki oksidasyon seviyelerine (-3, 0, +3 ve +5) rastlanır. Doğal sulara ise çoğunlukla üç değerlikli arsenit (As^{III}) ya da beş değerlikli arsenat (As^V) oksianyonları gibi inorganik formda bulunur [2]. Arsenik doğada kolay bir şekilde oksidasyon basamağı ve kimyasal formunu değiştirir. Arseniğin değerliğini ve türünü suyun pH değeri, redoks potansiyeli, sülfür, demir ve kalsiyum gibi iyonların varlığı ve mikrobiyal aktivite etkilemektedir [22].

Doğada nadiren serbest halde bulunan arsenik genellikle, sülfür, oksijen ve demirli bileşikler halinde bulunur [2,36]. Arsenit, arsenat, momometil arsonik asit (MMA) ve dimetil arsinik asit (DMA) sulara bulunan arsenik türleridir. Doğal sulara daha çok inorganik sınıftan bileşiklere rastlanır. İnorganik arseniğin sudaki kararlı türleri artı yüklü iyonlar olarak değil, oksijenli eksi yüklü anyonlar şeklinde bulunur.

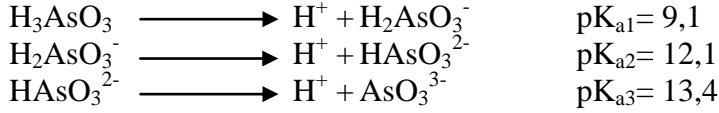
pH ve redoks potansiyeli, arsenik türünü kontrol eden en önemli parametrelerdir. Şekil 2’de inorganik arsenik için yatay ekseninde çözeltinin pH değeri, dikey ekseninde ise Redoks potansiyeli (Eh) Volt biriminde gösterilmiştir [2,22]. Buna göre yükseltgen çevre koşullarında (artı gerilim değerlerinde), artı beş değerlikli arsenat türleri baskın iken, indirgen koşullarda (eksi gerilim değerlerinde) ise artı üç değerlikli arsenit türleri hâkimdir [2]. Dolayısıyla arsenit daha çok yer altı suyunda, arsenat ise yüzeysel sulara bulunur [6, 22,37].



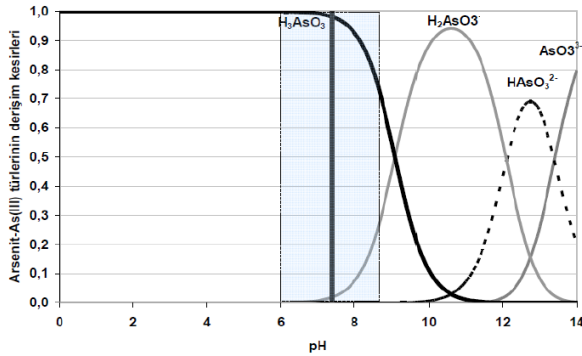
Şekil 2. İnorganik arsenik için Eh-pH diyagramı [1, 6]

Şekilde görüldüğü gibi arsenit sulu çözeltilerde dört formda bulunur: H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$, AsO_3^{3-} . Benzer şekilde arsenat da dört formda bulunur: H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-} . Yeraltı sularının en çok bulunduğu pH aralığı olan 6-9 aralığında baskın olan arsenit türü (H_3AsO_3) nötral iken, baskın olan arsenat türleri -1 ($H_2AsO_4^-$) ve -2 ($HAsO_4^{2-}$) yüklüdür [25].

İnorganik arseniğin sudaki kararlı türleri artı yüklü iyonlar olarak değil, oksijenli eksi yüklü anyonlar şeklinde bulunur. Artı üç değerlikli arseniğin, eksi üç değerlikli arsenit olarak bilinen anyonuna (AsO_3^{3-}) dayalı asitlik türlerine ($HAsO_3^{2-}$, $H_2AsO_3^-$, H_3AsO_3) ilişkin denklemler ve asitlik sabitleri (pKa değerleri) aşağıda verilmiştir [2,5].

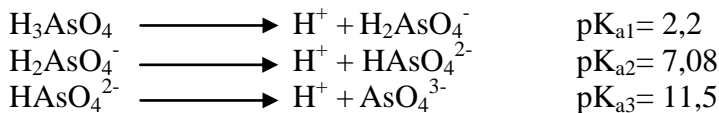


Bu değerler kullanılarak suyun çeşitli pH değerlerindeki türlerin dağılımına ilişkin kesirler hesaplanarak, pH'a karşı değişim grafiği Şekil 3'de sunulmuştur.

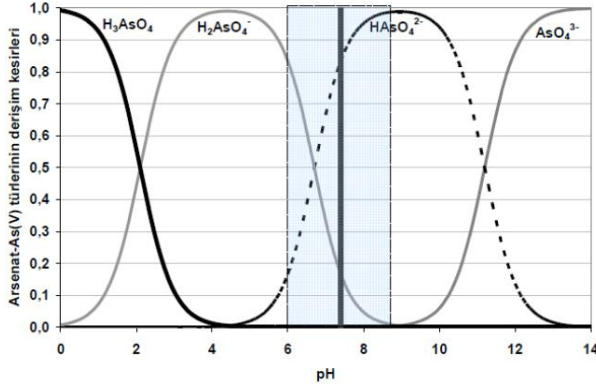


Şekil 3. pH'ın fonksiyonu olarak arsenitin dağılımı [2]

Benzer şekilde, yükseltgenmiş sularda ise arsenat aşağıda verilen tepkimelere göre iyonlaşmaktadır [22, 38]:



Beş değerlikli arsenik, üç değerlikli arseniğinin aksine, suyun pH aralığı olan 6 ile 9 arasında anyonik türler ($H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$) halinde bulunur. İkinci asitlik sabitine ($pK_{a2}=7.08$) eşit pH değerinde ise tek değerlikli $H_2AsO_4^-$ ve iki değerlikli $HAsO_4^{2-}$ anyon türlerinin dağılımları birbirine eşittir.



Şekil 4. pH'ın fonksiyonu olarak arsenatın dağılımı [2]

Literatürdeki verilere uyumlu olarak en çok bulunan arsenik türlerinin asidik yeraltı sularında $H_2AsO_4^-$ olduğu, alkali yeraltı sularında ise $HAsO_4^{2-}$ olduğu bulunmuştur. H_3AsO_4 ve AsO_4^{3-} türlerinin konsantrasyonları ise oldukça düşük bulunmuştur [22].

4. Arseniğın Sağlık Etkileri

Arsenik toksik özellikte bir madde olup toksisite derecesi, arsenik bileşiklerinin kimyasal ve fiziksel şekline, vücuda girişine, alınan miktarına ve alınma süresine, gıda içindeki reaksiyonu etkileyen elementlerin varlığına, yaş ve cinsiyete bağlıdır. Organik arsenik vücuttan kolaylıkla atılabildiği ve sağlığa etkileri önemsiz olduğundan arıtma işlemleri inorganik arseniğın giderimine yöneliktir.

Doğada doğal olarak da bulunabildiğinden dolayı arseniğe maruz kalmak insanlar açısından kaçınılmaz olmaktadır. Bu durum başlıca 3 şekilde gerçekleşebilir: havanın solunması, yiyecek ve su tüketimi ve dermal adsorpsiyon. Arsenik vücuda alındıktan sonra cilt, solunum, kalp ve damar, bağırsıklık, genital ve üriner sistemler, üreme, sindirim sistemi ve sinir sistemini de içeren çok farklı organları etkilemektedir [22, 39]. Arsenik adsorblandığında öncelikle karaciğer, akciğer, böbrek ve kalpte depolanmaktadır. Daha küçük miktarlarda da kas ve sinir dokusunda birikmektedir. Arsenik alımından iki veya 4 hafta sonra, keratin sülfidril gruplar tarafından bağlanarak tırnak, saç ve ciltte birikmeye başlamaktadır [22].

Yeraltı suyunda arsenik kirliliği, dünyanın birçok ülkesinde özellikle de Bangladeş ve Hindistan'ın Batı Bengal bölgesi gibi Güney Asya bölgelerinde büyük risk oluşturmaktadır. Günümüzde milyonlarca insanın kronik olarak maruz kalmasıyla dünyanın en önemli doğal kirliliklerinden biri olarak kabul edilir. Hindistan ve Bangladeş'te incelenen insanların önemli bir yüzdesinin (% 10-20) arsenik maruziyeti ile ilişkili tipik deri lezyonları ve kanserlere sahip olduğu tanımlanmıştır [40]. Ayrıca, yüksek arsenik maruziyeti nedeniyle karaciğer, akciğer ve mesane gibi çeşitli organlarda kansere neden olduğu gözlelenmiştir [41,42]. Hamile kadınlar için, kronik arsenik maruziyeti ani düşük, ölü doğum ve erken doğum oranlarına neden olmuştur [12, 41, 43].

Pek çok çalışmada, insan vücudunda arsenik yükü için saç, idrar ve tırnak örneklerinden biyolojik numuneler değerlendirilmiştir. Arseniğe maruz kalındığında vücutta, keratin bakımından zengin dokularda özellikle saç ve tırnaklarda birikmektedir. Bu, keratindeki sülfhidril gruplarına arsenitin bağlandığını düşündürmektedir. Arseniğe maruz kalmayan saç örnekleri 1 µg/g dan küçük arsenik içerir [44,45]. Saç örnekleri genellikle arseniğe uzun süreli maruz kalmada bir biyobelirteç olarak kullanılır iken, idrar numuneleri daha çok son maruziyetin göstergesidir. Her iki analiz de insan vücudunda arsenik yükü için güvenilir biyobelirteçdir [12].

Ayrıca arsenikle kirlenmiş yeraltı suyu içme suyu için bir kaynak olmasının yanı sıra, aynı zamanda yaygın olarak bitkileri sulamak için de kullanılmaktadır. As ile kirlenmiş suların içen ve/veya uzun süreli dönemlerde As ile kirlenmiş gıdalarla beslenen insanlarda lezyonlar gibi tipik arsenik zehirlenmesi belirtileri görülür. As ile kirlenmiş toprağın etkili şekilde ıslah edilmesi için As'nin topraktan bitkiye transferine ilişkin bilgi gerektirir [4].

5. Arseniği Arıtma Yöntemleri

pH 2'nin üzerinde arsenat negatif yüklü olduğu için, pozitif yüklü metal hidroksitleri elektrostatik olarak çeker ve sudan daha kolay bir şekilde giderilir [46]. pH değeri 9'a kadar arsenit yüksüz olması nedeniyle arsenata göre daha az giderilebilir. Dolayısıyla pH 2-9 aralığında daha iyi bir arıtım yapılabilmesi için arsenitin arsenata oksidasyonunu sağlayan bir ön arıtma prosesi kullanılmalıdır [47]. Arsenik oksidasyonu için gaz veya sıvı klor, fenton oksidasyonu, potasyum permanganat, sodyum hipoklorit ve hidrojen peroksit gibi kimyasal madde ilavesi veya ozonlama ve foto oksidasyon kullanılabilir [22, 48].

İçme sularından arseniğin giderilmesinde kullanılan başlıca arıtma yöntemleri, kireç, alüm veya demir ile pıhtılaşma, kimyasal oksidasyon adsorpsiyon, ters osmoz, membran filtrasyon ve iyon değişimini kapsamaktadır [7]. Amerika Çevre Koruma Ajansı tarafından sulardan arsenik giderimi için seçilen en uygun teknolojiler; Aktif alüm, Koagülasyon/Filtrasyon, İyon değişimi, Kireçle yumuşatma, Ters osmoz, Elektrodializ ve Oksidasyon/filtrasyondur. Bu yöntemlerin belirlenmesinde yöntemlerin etkinliğinin kanıtlanmasının yanı sıra maliyet ve arazi kullanım durumları da göz önünde bulundurulmuştur [22, 46]. Arsenik giderimi için membran filtrasyon, ters osmoz, elektrokoagülasyon, bitkilerle arıtma ve biyolojik arıtma yöntemleri de kullanılmaktadır. Arsenik giderimi için kullanılan farklı arıtma teknolojilerinin birbirleriyle karşılaştırması Tablo 1'de verilmiştir [7].

Arsenik arıtma yönteminin seçiminde su kalitesi özellikleri ve miktarı, mevcut arıtma sistemi, arıtma sonrası hedeflenen arsenik konsantrasyonu, arazi ihtiyacı, işletmeci gereksinimi, su kaynağının kapasitesi gibi faktörler belirleyici olmaktadır.

Uygun işletme koşullarında demir veya alüminyum tuzları kullanılarak yapılan koagülasyon işleminde çok yüksek oranda (> %90) arsenik giderimi elde edilebilmekte ve arsenik konsantrasyonu 1 µg/L seviyesinin altına inebilmektedir [49]. Ülkemiz açısından da değerlendirildiğinde mevcut içmesuyu arıtma tesisleri genellikle

koagülasyon ünitesine sahip olduğu için bu yöntemin arsenik gideriminde kullanılması daha uygundur. En yaygın kullanılan koagülanlar demir ve alüminyum tuzlarıdır. Alüm, demir klorür ve demir sülfatın koagülan olarak kullanıldığı koşullarda arsenat gideriminin daha etkili olduğu belirtilmektedir [48].

Tablo 1. İçme sularından arseniğin giderilmesinde farklı proseslerin karşılaştırılması [7]

Proses Tipi	Proses Şartları	Avantajları	Dezavantajları
Alüm ile çöktürme	pH≤6.5, AEA= hem düşük hem yüksek As ₀ , UÇAK≤20 µg/L, Re=%20-90 OC=orta	Yerleşmiş; ev kullanımı için uygun	Kimyasal kullanımı; yüksek arsenikli çamur; oksidasyon kimyasallarının dozu verimi etkiler
Demir ile çöktürme	pH 6-8, AEA= hem düşük hem yüksek As ₀ , UÇAK≤20 µg/L, Re=%60-90 OC=orta	Yerleşmiş; ev kullanımı için uygun	Kimyasal kullanımı; yüksek arsenikli çamur; oksidasyon kimyasallarının dozu verimi etkiler
Fe/Mn ile çöktürme	pH>7, AEA= hem düşük hem yüksek As ₀ , UÇAK≤10 µg/L, Re=%40-90 OC=orta	Yerleşmiş; ev kullanımı için uygun	Düşük ve yüksek pH verimi düşürürü, kimyasal kullanımı; yüksek arsenikli çamur; oksidasyon kimyasallarının dozu verimi etkiler
Kireçle yumuşatma	pH≥10.5, AEA= düşük As ₀ , UÇAK≤10 µg/L, Re=%80-90 OC=yüksek	Yerleşmiş ve korozyonu azaltır	Sülfat iyonları verimliliği olumsuz etkiler; ikincil artma gereklidir; kimyasal kullanımı
Ters ozmoz	AEA= düşük As ₀ , UÇAK≤2 µg/L, Re=%90 OC=yüksek	Yüksek su kalitesi; bulanıklığı, çözünmüş tuzları ve mineralleri geniş aralıkta giderme	Kurması ve işletmesi pahalı; sık membran takibi; sürekli pH, sıcaklık ve basınç kontrolü
Elektro diyaliz	pH 7-9, AEA= düşük As ₀ , UÇAK≤3 µg/L, Re=%95 OC=yüksek	Saf su kalitesi	Daha az denenmiş; pahalı; oksitleyici madde ihtiyacı
İyon değişimi	pH=7.5, AEA= düşük As ₀ , UÇAK≤2 µg/L, Re=%90 OC=yüksek	2 µg/L'den düşük As konsantrasyonunda artma gerçekleştirilebilir	Sülfat, nitratlar, florür iyonları, TDS, selenyum vb. verimi etkiler
Aktif alümina adsorpsiyonu	pH 5.5-6, AEA= düşük As ₀ , UÇAK≤1 µg/L, Re=%90 OC=düşük	Yerleşmiş; ev kullanımı için uygun, Basit yedek parça gereksinimleri ile genellikle ucuz; tadımı ve kokusunu iyileştirir	Dikkatli izleme; etkinlik kirletici türüne bağlı; konsantrasyon ve su kullanım oranı; bakteriler alümina yüzeyinde büyüyebilir
Aktif karbon adsorpsiyonu	pH 2-9, AEA= düşük As ₀ , UÇAK≤7 µg/L, Re=%30-90 OC=düşük	Basit yedek parça gereksinimleri ile genellikle ucuz; tadımı ve kokusunu iyileştirir	Verim karbon ve metal konsantrasyonundaki kül içeriğine bağlıdır; denenmemiştir

UÇAK: Ulaşılabilir çıkış arsenik konsantrasyonu; AEA: Ayırmanın efektif aralığı; OC: İşletim maliyeti; Re: Giderme verimi

6. Sonuç

Arseniğin kanserojen etkisi nedeniyle, içme sularında izin verilebilecek maksimum arsenik konsantrasyonu yasal olarak düzenlenmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) arsenik limitini 10 µg/L değerine indirmiştir. Ülkemizde 2008 yılında arsenik için maksimum kirletici seviyesi 50 µg/L'den 10 µg/L'ye düşürülmüştür.

Standarttaki bu düşme sonucu bazı bölgelerde arsenik sorun oluşturmaya başlamış ve giderilmesi gereken önemli bir parametre olarak ortaya çıkmıştır. Bu durumda birçok yerde yeni arıtma tesislerinin teşkili veya mevcut tesislerde bazı değişiklikler yapılarak uygunlaştırılması yoluna gidilebilir. İlk aşamada mevcut sistemin gözden

geçirilerek pratik olarak uygulanabilecek küçük değişikliklerle performansının artırılması sağlanmalıdır.

Sonuç olarak, kimyasal çökeltim/filtrasyon süreçleri genel olarak arsenik arıtma verimi yüksek (> %90) seçeneklerdir. Süreçlerin tümünde ön arıtma (oksidasyon) gereksinimi vardır. Hava ile oksidasyon nispeten basit, ucuz ancak yavaştır.

Ülkemizdeki içme suyu arıtma tesislerinde kimyasal arıtma ve filtrasyon üniteleri yaygın olarak kullanılmaktadır [50]. Arsenik bakımından problemlilerde mevcut tesislerde bazı değişiklikler yapılmak suretiyle arıtma veriminin artırılması önerilebilir. Bazı durumlarda arıtma ve paçallama seçeneklerinin birlikte değerlendirilmesi ile uygun stratejiler oluşturulabilir.

7. Kaynaklar

- [1] Mutlu, M., *Arsenic Pollution and Health Risk Assessment in the Groundwater of Simav Plain, Kütahya*, Graduate School of Natural And Applied Sciences Dokuz Eylül University, İzmir, 2010.
- [2] Öztürk, R., *Manisa ve Bazı İlçelerin Yeraltı ve İçme Sularında Arsenik Miktarının Tayini*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa, 2009.
- [3] Mandal, B.K., Suzuki, K.T., *Arsenic Round the World: A Review*, 58, 201–235, Talanta, 2002.
- [4] Caporale, A.G., Pigna, M., Sommella, A., Dynes, J.J., Cozzolino, V., Violante, A., *Influence of compost on the mobility of arsenic in soil and its uptake by bean plants (Phaseolus vulgaris L.) irrigated with arsenitecontaminated water*, Journal of Environmental Management, 128, 837-843, 2013.
- [5] Mohan, D., Pittman, Jr., C.U., *Arsenic Removal from Water/Wastewater Using Adsorbents-A Critical Review*, J. Hazard. Mater., 142, 1-53, 2007.
- [6] Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., *A Review of the Sources, Behavior and Distribution of Arsenic in Natural Waters*, Appl. Geochem. 17, 517-568, 2002.
- [7] Kobya, M., Akyol, A., Demirbas, E., Oncel, M.S., *Removal of Arsenic from Drinking Water by Batch and Continuous Electrocoagulation Processes Using Hybrid Al-Fe Plate Electrodes*, Environmental Progress & Sustainable Energy, Volume 33, Issue 1, pages 131–140, 2014.
- [8] Güneş, S.T., Güneş, C., *Jeotermal Kaynaklı Arseniğin Yeraltısuyu ve Yüzeysel sularındaki Jeokimyasal Davranışı: Birlikte Çökeltme, Adsorbsiyon, pH-Eh*, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 14 Sayı:41 sh. 43-64, 2012.
- [9] Terlecka, E., *Arsenic Speciation Analysis in Water Samples: A review of the Hyphenated Techniques*, Environmental Monitoring and Assessment, 107, 259-284, 2005.

- [10] Sorg, T.J., Chen, A.S.C., Wanga, L., *Arsenic Species in Drinking Water Wells in the USA with High Arsenic Concentrations*, Water Research, 48, 156-169, 2014.
- [11] Kobya, M., Gebologlu, U., Ulu, F., Oncel, S., Demirbas, E., *Removal of Arsenic from Drinking Water by the Electrocoagulation Using Fe and Al Electrodes*, Electrochimica Acta, 56, 5060–5070, 2011.
- [12] Arain, M.B., Kazi, T.G., Baig, J.A., Jamali, M. K., Afridi, H.I., Jalbani, N., Sarfraz, R.A., Shah, A.Q., Kandhro, G.A., *Respiratory effects in people exposed to arsenic via the drinking water and tobacco smoking in southern part of Pakistan*, Science of the Total Environment, 407, 5524–5530, 2009.
- [13] Tuzen, M., Citak, D., Mendil, D., Soylak, M., *Arsenic speciation in natural water samples by coprecipitation–hydride generation atomic absorption spectrometry combination*, Talanta 78, 52–6, 2009.
- [14] Islam, L.N, Nabi, A.H.M.N., Rahman, M.M., Shamim, M., Zahid, H., *Association of respiratory complications and elevated serum immunoglobulins with drinking water arsenic toxicity in human*, J Environ. Sci. Health Part A, 42, 1807–14, 2007.
- [15] Tchounwou, P.B., Patlolla, A.K., Centeno, J.A., *Carcinogenic and systemic health effects associated with arsenic exposure — a critical review*, Toxicol Pathol, 31, 575–88, 2003.
- [16] NRC, *Arsenic in Drinking Water (2001 Update)*, Washington DC: National Academy Press, 2001.
- [17] Rahman, M., Vahter, M., Sohel, N., Yunus, M., Wahed, M.A., Streatfield, P.K., *Arsenic exposure and age- and sex-specific risk for skin lesions: a population-based casereferent study in Bangladesh*, Environ Health Persp, 114, 355–9, 2006.
- [18] Chen, Y.C., Guo, Y.L., Su, H.J., Hsueh, Y.M., Smith, T.J., Ryan, L.M., *Arsenic methylation and skin cancer risk in southwestern Taiwan*, J Occup Environ Med, 45, 241–8, 2003.
- [19] Ferreccio, C., Gonzalez, C., Milosavjlevic, V., Marshall, G., Sancha, A.M., Smith, A.H., *Lung cancer and arsenic concentrations in drinking water in Chile*, Epidemiol, 11, 673–9, 2000.
- [20] Vaclavikova, M., Gallios, G.P., Hredzak, S., Jakabsky, S., *CleanTechnol.*, Environ., Policy, 10, 89, 2008.
- [21] Chen, H., Frey, M.M., Clifford, D., McNeill, L.S., Edwards, M., Am, J., *Water Works*, Assoc., 91, 79, 1999.
- [22] Başkan, M.B., Pala, A., *İçme Sularında Arsenik Kirliliği : Ülkemiz Açısından Bir Değerlendirme*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt, 15, Sayı, 1, Sayfa, 69-79, 2009.
- [23] Chou, H.S.J., Rosa, C.T.D., *Case studies arsenic*, J. Hyg. Env. Health., 206, 381-386, 2003.
- [24] Bissen, M., Frimmel, F.H., *Arsenic—A review Part I: occurrence, toxicity, speciation, mobility*, Acta Hydrochim., Hydrobiol., 1, 9-18, 2003.
- [25] USEPA, *Workshop on Managing Arsenic risks to the Environment: Characterization of Waste, Chemistry, and Treatment and Disposal*, 2003.
- [26] Hering, J.G., Kneebone, P.E., *Biogeochemical Controls on Arsenic Occurrence and Mobility in Water Supplies*, Environmental Chemistry of Arsenic, Marcel Dekker, Inc., NY, 2001.
- [27] Jain, C.K., Ali, I., *Arsenic occurrence, toxicity, and speciation techniques*, Water Research, 34, 17, 4304-4312, 2000.
- [28] Welch, A.H., Westjohn, D.B., Heisel, D.R., Wanty, R.B., *Arsenic in ground water of the United States: occurrence and geochemistry*, Ground Water 38, 4, 589-604, 2000.

- [29] Kent, D.B., Fox, P.M., *The influence of groundwater chemistry on arsenic concentrations and speciation in a quartz and gravel aquifer*, *Geochem. Transact.*, 5, 1, 1-12, 2004.
- [30] Kim, M.J., Nriagu, J., *Oxidation of arsenite in groundwater using ozone and oxygen*, *Sci., Total., Environ.*, 247, 1, 71-79, 2000.
- [31] Wang, S., Mulligan, C.N., *Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, Behaviour and Distribution*, *Sci., Tot., Env.*, 366, 701-721, 2006.
- [32] Prohaska, T., Stinger, G., *Speciation of Arsenic*, in *Handbook of Elemental Speciation II: Species in the Environment, Food, Medicine and Occupational Health* (Ed.: R. Cornelis, H. Crews, J. Caruso and K. G. Heumann), John Wiley and Sons, ISBN: 0-470-85598-3 Chichester, 69-8, İngiltere, 2005.
- [33] Doğdu, M.S., Bayari, C.S., *Environmental Impact of Geothermal Fluids on surface Water, Groundwater and Streambed Sediments in the Akarcay Basin, Turkey*, *Environmental Geology*, 47, 3, 325-340, 2005.
- [34] Tarcan, G., Gemici, Ü., Aksoy, N., *Hydrogeological and Geochemical Assessments of the Gediz Graben Geothermal Areas, Western Anatolia, Turkey*, *Environmental Geology*, 47, 523-534, 2005.
- [35] Gemici, Ü., Tarcan, G., *Hydrogeological and Hydrogeochemical Features of the Heybeli Spa, Afyon, Turkey: Arsenic and the Other Contaminants in the Thermal Waters*, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 72, 6, 1107-1114, 2004.
- [36] Simon, S., Tran, H., Pannier, F., Potin-Gautier, M., *Simultaneous determination of Twelve Inorganic and Organic Arsenic Compounds by Liquid Chromatography- Ultraviolet Irradiation-Hyride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry*, *Journal of Chromatography A*, 1024, 105-113, 2004.
- [37] Brookins, D.G., *Eh-pH diagrams for geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [38] Kartinen, E.O., Martin, C.J., *An overview of arsenic removal processes*, *Desalination*, 103, 79-88, 1995.
- [39] Abernathy, C., *United Nations synthesis report on arsenic in drinking water*, chapter 3: exposure and health effects. World Health Organization, Genova. 2001.
- [40] Chakraborti, D., Mukherjee, S.C., Pati, S., Sengupta, M.K., Rahman, M.M., Chowdhury, U.K., Lodh, D., Chanda, C.R., Chakraborti, A.K., Basu, G.K., *Arsenic groundwater contamination in middle Ganga Plain, Bihar, India: A Future Danger?* *Env. Health Pers.* 111, 1194-1201, 2003.
- [41] Agusa, T., Trang, P.T.K., Lan, V.M., Anh, D.H., Tanabe, S., Viet, P.H., Berg, M., *Human exposure to arsenic from drinking water in Vietnam*, *Science of the Total Environment*, 2013.
- [42] Rahman, M.M., Chowdhury, U.K., Mukherjee, S.C., Mondal, B.K., Paul, K., Lodh, D., ve diğ., *Chronic arsenic toxicity in Bangladesh and West Bengal, India - a review and commentary*, *J Toxicol Clin Toxicol*, 39:683-700, 2001.
- [43] Milton, A.H., Smith, W., Rahman, B., Hasan, Z., Kulsum, U., Dear, K., ve diğ., *Chronic arsenic exposure and adverse pregnancy outcomes in Bangladesh*, *Epidemiology*, 16, 82-6, 2005.
- [44] Mahata, J., Basu, A., Ghoshal, S., Sarkar, J.N., Roy, A.K., Poddar, G., ve diğ., *Chromosomal aberrations and sister chromatid exchanges in individuals exposed to arsenic through drinking water in West Bengal, India*, *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*, 534, 133-43, 2003.
- [45] Saad, A., Hassanien, M.A., *Assessment of arsenic level in the hair of the nonoccupational Egyptian population: pilot study*, *Environ Int*, 27, 471-8, 2001.

- [46] Johnston, R., Heijnen, H., Wurzel, P., *United Nations synthesis report on arsenic in drinking water*, chapter 6, safe water technology. World Health Organization, Genova, 2001.
- [47] Fujimoto, M., *The Removal of arsenic from drinking water by carbon adsorption*, Master of Science Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, 2001.
- [48] Alpaslan, M.N., Dölgen D., Boyacıoğlu H., Sarptaş H., *İçme suyundan kimyasal yöntemlerle arsenik giderimi*, itüdergisi/e, Su Kirlenmesi Kontrolü, 20, 1, 15-25, 2010.
- [49] Hu, C., Liu H., Chen, G., Qu, J., *Effect of aluminum speciation on arsenic removal during coagulation process*, Separation and Purification Technology, 86, 35–40, 2012.
- [50] Dölgen, D., *Su arıtımında gelişen teknolojiler*, Çevre ve Mühendis, 28, 67-73, 2007.