



Review Paper / Derleme Makalesi

**TRADITIONAL AND ALTERNATIVE TECHNOLOGIES FOR ARSENIC
REMOVAL FROM DRINKING WATERS**

Merve DÖNMEZ ÖZTEL*, Feryal AKBAL

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kurupelit-SAMSUN

Received/Geliş: 03.10.2012 Revised/Düzelme: 20.11.2012 Accepted/Kabul: 31.12.2012

ABSTRACT

Arsenic contamination in drinking waters has been a serious public health concern due to both carcinogenic and other health effects. The main sources of human exposure to arsenic are the drinking waters. Arsenic can cause chronic illness and death, even at low levels of arsenic concentration in drinking waters. There are many technologies available for removal of arsenic from contaminated drinking waters. Some of these technologies are traditional treatment processes. They have been tailored to improve removal of arsenic from drinking waters. Arsenic can occur in four oxidation states (-3, 0, +3, +5) – but two predominated oxidation states common in drinking water are oxyanions of trivalent arsenic and pentavalent arsenic. The removal efficiency for trivalent arsenic is generally lower than pentavalent arsenic. Inorganic As(III) (arsenite) should be converted to As(V) (arsenate) with oxidation technologies to facilitate removal. Traditional and new technologies discussed in this review article with regard to arsenic removal. Technologies discussed in this section are grouped into four broad categories: precipitation technologies, adsorption and ion exchange technologies, membrane technologies and alternative technologies. Each category is discussed here, with at least two treatment technology described in each category.

Keywords: Drinking waters, arsenic removal, precipitation technologies, membrane technologies alternative technologies.

**İÇME SULARINDAN ARSENİK GİDERİMİ İÇİN GELENEKSEL VE ALTERNATİF
TEKNOLOJİLER**

ÖZET

İçme sularında arsenik kirliliği hem kanserojen etkileri hem de diğer sağlık etkilerinden dolayı ciddi bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir. İnsanların arseniğe maruz kalmasında ana kaynak içme sularındır. Arsenik, içme sularında düşük konsantrasyonlarda bile kronik hastalıklara ve ölüme sebep olabilir. Kirlenmiş içme sularından arsenik giderimi için uygulanabilir birçok teknoloji bulunmaktadır. Bu teknolojilerin bir kısmı geleneksel arıtım yöntemleridir. Bu teknolojiler içme sularından arsenik giderimini geliştirmek için uygun hale getirilmektedir. Arsenik dört oksidasyon basamağında (-3, 0, +3, +5) oluşabilir ancak içme sularında yaygın iki baskın arsenik basamağı +3 değerlikli arsenik ve +5 değerlikli arseniktir. +3 değerlikli arseniğin giderim verimliliği +5 değerlikli arsenikten daha düşüktür. Bu nedenle daha iyi bir arıtım için arsenitin arsenata oksidasyonunu sağlayan bir ön arıtma yöntemi kullanılır. Bu derlemede geleneksel ve alternatif teknolojiler arsenik giderimi ile ilişkili olarak tartışılmıştır. Bu bölümde tartışılan teknolojiler dört genel kategoride gruplandırılmıştır: çöktürme teknolojileri, adsorpsiyon ve iyon değişim teknolojileri, membran ayırma teknolojileri ve alternatif teknolojiler. Her bir kategori en az iki arıtım teknolojisi tanımlanarak tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: İçme suyu, arsenik giderimi, çöktürme teknolojiler, membran teknolojiler, alternatif teknolojiler.

*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: merve.donmez@omu.edu.tr, tel: (362)

1. GİRİŞ

Arsenik periyodik tabloda VA grubunda bulunur ve atom numarası 33'dür [1]. Arseniğe doğada her yerde rastlanabilir [2]. Çevresel ortamlarda ppm'den ppb'ye değişen konsantrasyonlarda bulunur [3]. Yerkabuğunda ortalama arsenik konsantrasyonu 1,5-5 mg/kg aralığındadır. Toprakta doğal halde bulunan arsenik konsantrasyonu için tipik aralık 0,1-40 mg/kg'dır (ortalama 5-6 mg/kg) [4]. Volkanik faaliyetler arseniğin en önemli doğal kaynağıdır, düşük sıcaklıkta buharlaşarak atmosfere ve diğer alıcı ortamlara ulaşır [5]. Arsenik bileşikleri ziraatta, tıpta, elektronikte, endüstriyel uygulamalarda, gıda katkı maddelerinde ve metalürjide kullanılmaktadır [6]. Metal cevherlerinin işlenmesi, arsenikli pestisitlerin kullanımı ve ahşap koruyucu ajanlar gibi kontrol edilemeyen antropojenik aktivitelerle arsenik çevreye direk olarak yayılabilir [7]. 1970'li yıllarda arseniğin yaklaşık olarak %80'i zirai amaçlar için kullanılmaktaydı. Son yıllarda arseniğin zirai amaçla kullanımı azalmıştır ve birçok ülkede arsenik bileşiklerinin bu alanda kullanımı yasaklanmıştır. Ancak MSMA (mono-sodyum metanearsonat) ve DSMA (disodyum metanearsonat) gibi organik arsenik bileşikleri hala pamuk tarlalarında insektisit ve herbisit olarak kullanılmaktadır [8]. Arsenik çevresel ortamlara: hava, su, toprak, sediment gibi ortamlar arasında geçiş ve dağılımla, yükseltgenme-indirgenme, metilleme, degradasyon, gibi biyodönüşümlerle; mikroorganizmalar, makro algler, balıklar, karasal bitkiler, omurgasızlar ve kuşlar gibi canlılar aracılığı ile biyokümülyasyonla yayılabilir [5]. Çevresel ortamlarda bulunan arsenik konsantrasyonları Çizelge 1'de verilmiştir [4].

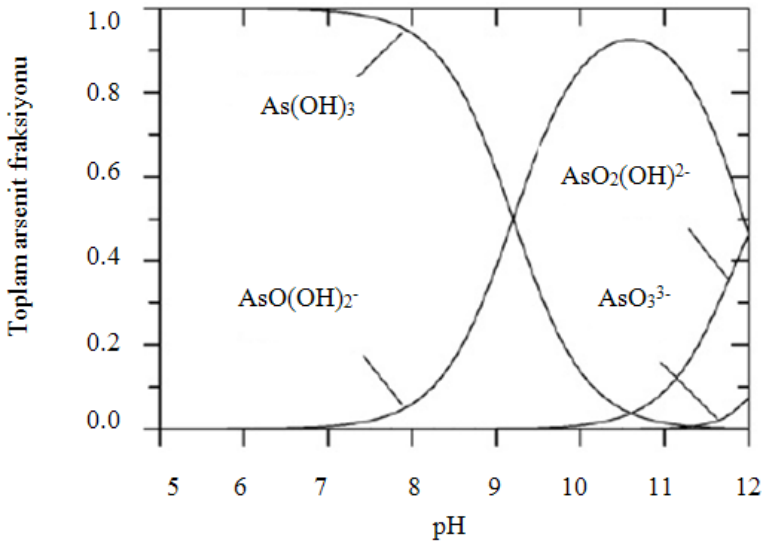
Çizelge 1. Çevresel Ortamlarda Arsenik Konsantrasyonları [4]

Çevresel Ortam	Arsenik Konsantrasyon Aralığı
Hava, ng/m ³	1,5-53
Kirlenmemiş okyanuslardan havadan yağışla, µg/l	0,019
Karasal alanlardan havadan yağışla, µg/l	0,460
Nehirler, µg/l	0,200-264
Göller, µg/l	0,380-1
Yer altı (kuyu) suyu, µg/l	<1->1
Deniz suyu, µg/l	0,150-6
Toprak, mg/kg	0,100-1
Akarsu, nehir sedimentleri, mg/kg	5-4
Göl sedimentleri, mg/kg	2-300
Volkanik kayalar, mg/kg	0,300-113
Metamorfik kayalar, mg/kg	0-143
Tortul kayalar, mg/l	0,100-490
Biota-yeşil alg, mg/kg	0,500-5
Biota-kahverengi, mg/kg	30

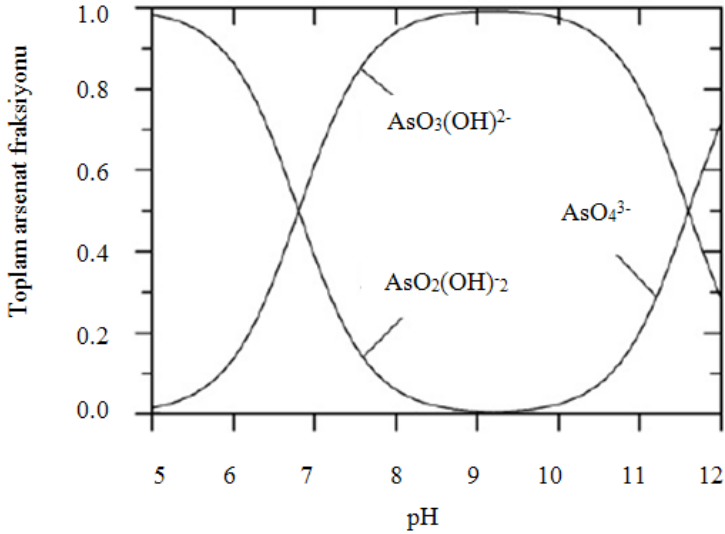
Arsenik doğal sulara inorganik ve organik formlarda bulunabilir [9]. Organik arsenik türleri deniz canlılarında bol bulunur, insan vücudunda hızlı bir şekilde elimine edilir ve daha az zararlıdır [10]. Doğal sulara daha çok inorganik sınıftan bileşiklere rastlanır. İnorganik arsenik dört farklı oksidasyon basamağında bulunabilir (-3, 0, +3 ve +5) [11]. İnsanlar üzerinde düşük konsantrasyonlarda bile kronik olarak zehirleyici etkisi olan arseniğin büyük kısmı içme sularından kaynaklanmaktadır [12]. İçme sularında yaygın iki baskın arsenik basamağı +3 ve +5'tir [8]. Beş değerlikli arsenik türleri daha baskındır ve oksijence zengin aerobik ortamlarda kararlıdır. Üç değerlikli arsenik ise yer altı suları gibi anaerobik indirgen koşullarda baskındır [13]. Sulu ortamda As⁰ metali (metalloid) oldukça nadir bulunur. Pek çok forma sahip olması nedeniyle arseniğin kimyası karmaşıktır. Arsenik doğada kolay bir şekilde oksidasyon basamağını ve kimyasal formunu değiştirir. Arseniğin değerliğini ve türünü; suyun pH değeri, redoks potansiyeli, sülfür, demir ve kalsiyum gibi iyonların varlığı ve mikrobiyal aktivite etkilemektedir.

pH ve redoks potansiyeli (Eh), arsenik türünü kontrol eden en önemli parametrelerdir [8]. Arsenitin ve arsenatın pH'ya bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.

Düşük pH şartlarında ve indirgenme koşullarında (>100 mV), As(III) termodinamik bir şekilde kararlıdır ve arsenöz asit (H_3AsO_3^0 , H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} ve AsO_3^{3-}) olarak bulunur. Yükseltgenme koşulları altında As(V) baskın türdür ve arsenik asit (H_3AsO_4 , $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$, HAsO_4^{3-} ve AsO_4^{3-}) olarak bulunur [14]. Arseniğin en toksik formu gaz arsenik bileşikleridir. Bunu çözülmüş organik üç değerlikli arsenik, inorganik üç değerlikli arsenik, inorganik beş değerlikli arsenik ve organik beş değerlikli arsenik takip eder. En az etkide bulunan elementel arsenik ve arseno şekerlerdir. Arsenit arsenattan 25 - 60 kez daha toksik özelliktedir. İçme suyundaki arseniğin sağlık üzerine etkisi arsenik bileşiğinin formuna ve maruz kalma süresine bağlıdır [15]. Bilinen en büyük arsenik faciası Bengal Deltasında (Bangladesh/West Bengal) milyonlarca insanın arsenikçe zengin içme suyuna maruz kalmasıyla gerçekleşmiştir [16]. İçme sularında bulunan arseniğin kronik toksikoloji etkisinin tespit edilmesini takiben yetkili kuruluşlarca konsantrasyon seviyeleri için bir takım düzenlemeler yapılmıştır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından içme sularındaki As konsantrasyonu geçici olarak 1993'de 50 $\mu\text{g/l}$ 'den 10 $\mu\text{g/l}$ 'ye azaltılmıştır. US-EPA'da Haziran 2001'de konsantrasyon seviyesini 50 $\mu\text{g/l}$ 'den 10 $\mu\text{g/l}$ 'ye indirmiş ve bir geçiş süresi öngörmüştür. Avrupa Topluluğu (EC) maksimum kabul edilebilir arsenik konsantrasyonu 10 $\mu\text{g/l}$ olarak kabul etmiştir [17]. Çizelge 2'de çeşitli kuruluşlar tarafından belirlenen standartlar verilmiştir. UNDP (Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı)'nin 2006 yılı İnsani Gelişme Raporunda Türkiye'nin, sularında arsenik kirlenmesi ihtimali yüksek olan ülkeler arasında yer aldığı bildirilmektedir [18]. Ülkemizde içme ve kullanma sularında arsenik için izin verilen sınır değer 2005 yılının şubat ayına kadar 50 $\mu\text{g/L}$ idi. Bu tarihten itibaren "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" gereği izin verilen sınır değer 10 $\mu\text{g/L}$ 'e indirilmiş ve 3 yıllık bir geçiş süresi öngörülmüştür. Buna göre şubat 2008'den itibaren ülkemizde izin verilen sınır değer 10 $\mu\text{g/L}$ olarak uygulanmakta ve içme ve kullanma sularında standart olarak aranmaktadır [19].



Şekil 1. Arsenit Dağılımı [As (III)] [56]



Şekil 2. Arsenat Dağılımı [As (V)] [56]

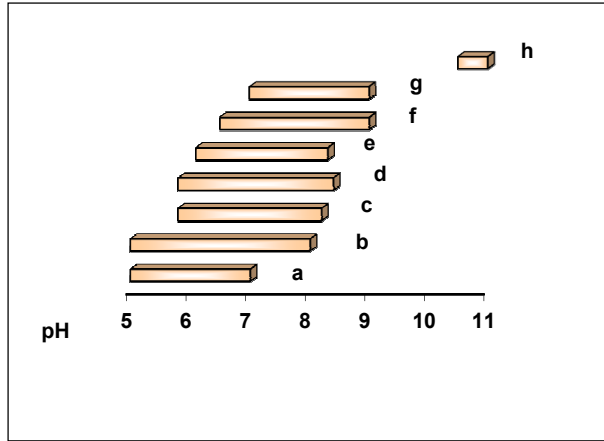
Çizelge 2. Arsenik İçin Çeşitli Kuruluşlar Tarafından Belirlenen Standartlar [19]

Kuruluşlar	Arsenik ($\mu\text{g/L}$)
Dünya Sağlık Örgütü (WHO-1958)	200
Dünya Sağlık Örgütü (WHO-1963)	50
Dünya Sağlık Örgütü (WHO-1999)	10
Amerika Birleşik Devletleri (EPA-1975)	50
Amerika Birleşik Devletleri (EPA-2001)*	10
Avrupa Topluluğu (EC-1998)	10
Türkiye (TSE 266-1997)	50
Türkiye (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hk. Yönetmelik 17 Şubat 2005)	10

2. ARSENİK GİDERİM TEKNOLOJİLERİ

Arsenik giderim teknolojilerinin çoğu geleneksel arıtım teknolojileridir. Bu bölümde tartışılan teknolojiler: çöktürme teknolojileri, adsorpsiyon ve iyon değişim teknolojileri, membran teknolojiler ve alternatif teknolojiler olarak dört genel kategoride sınıflandırılmıştır [21].

Arsenik arıtım teknolojilerinin çoğu optimum performans için pH ayarlaması gerektirir. Şekil 3’de çeşitli arsenik arıtım teknolojileri için uygun pH aralıkları verilmiştir. Özellikle adsorpsiyon ve koagülasyon yöntemleri pH’a duyarlıdır ve nötr pH değerlerinden daha düşük pH’larda daha etkilidir. Nötr pH’larda aktif alümina kullanımı küçük su sistemleri için maliyet açısından etkili bir seçenektir [20].



Şekil 3. Arsenik Artım Teknolojileri İçin Uygun pH Aralıkları [20]

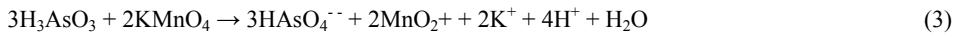
- | | |
|--|-------------------------------------|
| a: İyileştirilmiş alüminyum koagülasyonu | e: Demir sorbentleri |
| b: İyileştirilmiş demir koagülasyonu | f: İyon değişimi |
| c: Konvansiyonel aktif alümina | g: Ters ozmos |
| d: Oksidasyon-Filtrasyon | h: İyileştirilmiş kireçle yumuşatma |

pH değeri 2,2'nin üzerinde olan sularda As(V) negatif yüklü olduğu için, pozitif yüklü metal hidroksitleri elektrostatik olarak çeker ve sudan nispeten daha kolay bir şekilde giderilir. pH değeri yaklaşık 9'a kadar As(III) yüksüz olduğundan dolayı As(V)'e göre daha az bir verimle giderilebilir. Bu nedenle daha iyi bir artım için arsenitin arsenata oksidasyonunu sağlayan bir ön arıtma yöntemi kullanılır [22].

2.1. Oksidasyon

İçme sularından arsenik gideriminde arseniğin kimyasal formu önemlidir. Yeraltı suyunda arsenik genellikle inorganik As(III) (arsenit) olarak bulunduğu için, sudan etkin biçimde uzaklaştırılabilmesi için öncelikle As(V) (arsenat) formuna dönüştürülmesi gereklidir. Arsenata yükseltgenme işlemi, yükseltgeyici madde (oksidan) ilavesi ile arıtma prosesinin başında gerçekleşir [20, 59].

Oksidasyon yöntemi tek başına arsenik giderimi sağlamaz, koagülasyon, adsorpsiyon veya iyon değişimi gibi bir arıtma yöntemiyle birleştirilmelidir [17]. Oksijen, ozon, serbest klor, hipoklorit, permanganat ve katı faz oksidanları bu amaçla kullanılan oksitleyici maddelerdir. Aşağıda reaksiyonları verilen, atmosferik oksijen, hipoklorit ve permanganat yaygın olarak kullanılan oksidanlardır [60].



En yaygın olarak seçilen oksidanlardan biri klordur ancak eğer ortamda doğal organik madde varsa klorlu organik bileşikler oluşur ve bu da istenmez [23]. Klor dioksit ve monokloramin formları arsenik oksitleyicisi olarak etkisizdir [20]. Eğer ham su yüksek seviyelerde çözünmüş demir içeriyorsa hidrojen peroksit etkili bir oksidan olabilir [23]. Permanganat, demir ve mangan giderim yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir oksidandır. Potasyum permanganat katı halde, tanecikli formdadır ve suda kolaylıkla çözünür.

Filox-RTM (katı faz oksidant) tanecikli mangan dioksit ortamıdır ve As(III)'ün As(V)'e oksidasyonunu katalize edebilir. Bu ortam suda çözünmüş oksijeni kullanarak As(III)'ün As(V)'e okside eder. Filox-RTM bir miktar arseniği adsorplama eğilimindedir. İlk kullanımda %26 kadar arsenik adsorplayabilir. Ortam kapasitesi tükendiğinde arseniğin adsorpsiyonu daha uzun süre devam etmeyecektir fakat oksidasyonu devam edecektir [20].

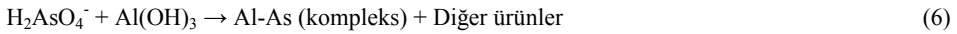
As (III) çözünmüş oksijenle okside edilebilir ancak oksidasyon oranı düşüktür ve oksidasyon tam olarak gerçekleşmez [24]. Son yıllarda yakın-UV ışınları ve çözünmüş demir bileşikleri varlığında çözünmüş As(III)'ün hava ile oksidasyonunun kimyasal bir oksidant ilavesi olmadan dört kattan daha fazla artabildiği görülmüştür. Böylece okside olmuş arseniğin giderimi için koagülasyon yöntemi kullanıldığında demir hem koagülant hemde oksidant olarak kullanılabilir [23].

Çizelge 3'de çeşitli oksidasyon teknolojilerinin kullanımı ile ilgili avantaj ve dezavantajlar özetlenmiştir. Oksidasyon metodu öncelikli olarak kullanılan arsenik artım teknolojilerine göre belirlenmelidir ve ikinci aşamada da Çizelge 3'de verilen faktörler göz önünde bulundurulmalıdır [20].

2.2. Çöktürme Teknikleri

2.2.1. Koagülasyon-Filtrasyon

Arsenik koagülasyonla, demir ve alüminyum tuzları kullanılarak çözünmeyen forma dönüştürülebilir. Demir tuzları arsenit gideriminde genellikle alüminyum tuzlarından daha etkilidir [25]. Bu durum, demir tuzları tamamen partiküler demir hidroksit formuna dönüşürken alüminyumun bir kısmının çözülebilir olarak kalmasından ve bu durumda filtrasyon aşamasına geçmesinden ileri gelmektedir [25]. Ayrıca demir hidroksitler pH 5.5-8.5 aralığında alüminyum hidroksitlerden daha kararlıdır [26, 27, 28]. Koagülasyonda alüminyum için optimum pH aralığı 5-7 [29] demir için 5-8'dir. pH>7'de alüminyum destekli koagülantlarla giderim verimliliği büyük ölçüde düşer. Alüminyum ve demir için koagülasyonda meydana gelen reaksiyonlar sırasıyla aşağıda verilmiştir;



Son ürün olarak oluşan Al-As ve Fe-As kompleksleri sedimentasyon/filtrasyonla giderilebilir. $\equiv\text{FeOH}^0$, sulu demir oksidi ifade etmektedir. [60]. Arseniğin koagülasyonla giderimine ait akım şeması Şekil 4'de verilmiştir.

As(III) doğal pH koşullarında yüksüz olduğundan koagülasyon ile As(V)'e göre düşük verimle giderilir. Bu yüzden ön oksidasyon gereklidir. Uygun pH aralıkları sağlandıktan sonra koagülant ilavesi yapılmalıdır [20]. Arseniğin koagülasyonla giderimi metal/arsenik oranı, pH, arsenik oksidasyon basamağı ve ortamda bulunan diğer maddelerin konsantrasyonuna bağlıdır [24].

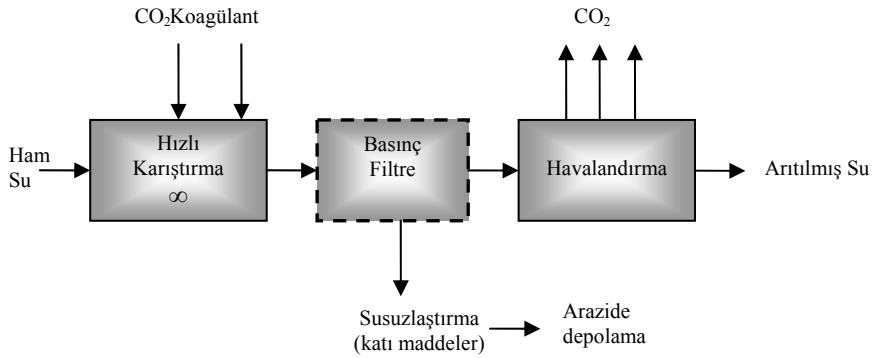
Ön klorlama işleminden sonra demir ile arsenit gideriminde verim %90'nın üzerindedir. Klorlu ve kloruz şartlara göre koagülasyon ve flokülasyon ile arsenik giderimi özetle Çizelge 4'de verilmiştir. Arseniti ön klorlama işlemi ile arsenata döndürdükten sonra alüminyum bileşiği ile %98 oranında gidermek mümkün olabilir [30].

Çizelge 3. Oksidasyon Ajanlarının Karşılaştırılması [20]

Klor	Avantajları	Dezavantajları
Permanganat	<ul style="list-style-type: none"> Düşük maliyet Ön dezenfeksiyon kapasitesi Arsenik oksitlenmesi 1 dk'dan kısa sürede 	<ul style="list-style-type: none"> Dezenfeksiyon yan ürünü oluşumu Membran tıkanması Özel ambalajlama ve depolama gerekliliği
Ozon	<ul style="list-style-type: none"> Membranlara tepkisiz Dezenfeksiyon yan ürün oluşumu yok Arsenik oksitlenmesi 1 dk'dan kısa sürede 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek maliyet Ön dezenfeksiyon kapasitesi yok Pembe su oluşumu Kullanımı zor Son dezenfeksiyon için ilave oksidan gerekebilir.
	<ul style="list-style-type: none"> Kimyasalın depolanması ve hazırlanması gerekli değil Ön dezenfeksiyon kapasitesi Kimyasal suda yan ürün bırakmıyor Karışan indirgeyici eksikliğinde arsenik oksitlenmesi 1 dk'dan kısa 	<ul style="list-style-type: none"> Dönüşüm ile sülfid ve TOK girişi olur ve gerekli temas süresi ve oksidasyon artar Son dezenfeksiyon için ilave oksidan gerekebilir.
Katı faz oksidantları (Filox R™)	<ul style="list-style-type: none"> Kimyasalın depolanması ve hazırlanması gerekli değil Kimyasal suda yan ürün bırakmıyor 	<ul style="list-style-type: none"> Geri yıkama gerekli Geri yıkama suyu oluşturuyor Çözünmüş oksijen gerektiriyor Ön dezenfeksiyon kapasitesi yok Son dezenfeksiyon için ilave oksidan gerekebilir. Çeşitli iyonların varlığı temas süresini arttırabilir.

Çizelge 4. Koagülasyon ve Flokülasyon ile Arsenit Giderimi [30]

Kimyasallar	Çalışma Şartları	Giderim (%)
Alüminyum	Cl ₂ ile (pH = 7) Cl ₂ içermeyen	90 10
Demir (III) sülfat	Cl ₂ ile (pH <8,5) Cl ₂ içermeyen	90 50-60
Kireç	Cl ₂ ile (pH>11) Cl ₂ içermeyen (pH>11)	90 80
Demir (III) Klorür	Cl ₂ ile ve Fe/As oranı > 30	90-100
Alüminyum	Cl ₂ ile (6,8<pH<8,5)	67-88
Polialüminyum klorür	Cl ₂ ile	87-88



Şekil 4. Flokülasyon ve Filtrasyonla Arsenik Giderimi Akım Şeması [57]

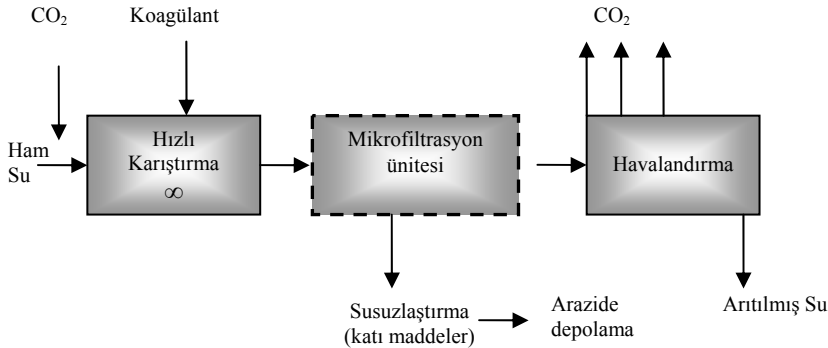
2.2.2. Demir-Mangan Oksidasyonu-Filtrasyon

Konvansiyonel demir ve mangan giderimi sırasında, demir ve mangan hidroksitler üzerine arsenik adsorpsiyonu ile önemli derecede arsenik giderimi gerçekleştirilebilir. Mekanizma koagülasyon ve filtrasyonda olduğu gibidir [17]. Demir ve mangan giderimi yeraltı sularının arıtılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Demir giderimi ile sağlanan arsenik giderimi aktif alümina yada iyon değişiminde olduğu kadar yüksek değildir. Mangan çökmesi esnasında arsenik giderimi ise demirle kıyaslandığında daha az verimlidir.

Oksidasyon/Filtrasyon teknolojileri olarak arsenik gideriminde yeşil kum filtrasyonu ilk kullanılan teknolojilerden biridir. Yeşil kum içindeki aktif materyal glokonittir. Yeşil renkli, demir bakımından zengin, kile benzer bir mineraldir ve iyon değişimi amacıyla kullanılabilir. Glokonit kum partikülleriyle karışarak küçük yumaklar halinde doğada sıklıkla oluşur. Glokonit kumu, kum taneleri mangan oksit tabakası ile kaplanana kadar potasyum permanganat ile muamele edilir. Bu şekilde gerçekleşen arsenit arıtımı çok yönlüdür. Oksidasyon, adsorpsiyon ve iyon değişimini içerir. Arsenik bileşikleri mangan oksitten oluşan türlerle yer değiştirir ve etkili bir şekilde yeşil kum yüzeyine bağlanır. Mangan yüzeyindeki doğal oksidan arseniti arsenata dönüştürür. Arsenat adsorpsiyonu ve elektron transferi sonucu indirgenmiş manganöz yüzeyden serbest bırakılır. Yeşil kum filtrasyonunda arseniğin giderimi ve filtrasyon verimliliği giriş su kalitesine bağlıdır. Ortamda bulunan Ca gibi çift değerlikli iyonlar adsorpsiyonda arsenikle rekabet edebilir. Yeşilkum kullanıldığında su kalitesinin değerlendirilmesi gerekir. Yeşil kum; oksitleme ve adsorpsiyon kapasitesi tükendiğinde rejenere edilmelidir. Yeşil kum filtreleri potasyum permanganat çözeltisi kullanılarak rejenere edilir [21].

2.2.3. Koagülasyon Destekli Mikrofiltrasyon

Koagülasyon destekli mikrofiltrasyonda koagülasyon-filtrasyon yönteminden farklı olarak, su granüler ortam filtrasyon aşaması yerine basınç farkıyla yarı geçirgen membrandan geçer. Membran koagülasyon aşamasında oluşan As(V) yüklü floklar tutar [20]. Koagülasyon destekli mikrofiltrasyon teknolojisinde mikrofiltrasyon konvansiyonel yerçekimi filtreleri gibi kullanılır. Mikrofiltrasyon ile daha küçük boyuttaki floklar giderilebilir. Koagülasyon destekli mikrofiltrasyon ile pH 6-7 aralığında sudan arsenik gideriminde yüksek verimler elde edilebilir. Su kaynağının yüksek konsantrasyonlarda sülfat ve silikat içermesi durumunda bile aynı verimde arsenik giderimi sağlanabilir. Düşük pH'larda da (yaklaşık 5.5) arsenik giderimi sağlanabilmektedir. Koagülasyon destekli mikrofiltrasyonun konvansiyonel filtrasyona göre avantajı daha küçük boyuttaki flokların taneciklerini gidermesi ve buna bağlı olarak daha az miktarda koagülant gerektirmesi ve toplam işletme kapasitesinin artmasıdır. Koagülasyon destekli mikrofiltrasyon sisteminde koagülant ilavesi membran temizleme sıklığını önemli derecede etkilememektedir [21]. Membran yüzeyinde tutulan kirlilikler tıkanmaya neden olacağı için periyodik olarak geri yıkanır. Geri yıkama suyu hacmi fazla olup genellikle düşük miktarda katı madde (< %1.0) içerir. Geri yıkama suyundaki arsenik konsantrasyonu limitlerin üzerinde ise doğrudan kanalizasyona verilmeyerek uygun bertaraf işlemlerinden geçirilmesi gereklidir. Bu kapsamda yoğunlaştırıcı ve mekanik susuzlaştırma ekipmanları kullanılarak katı madde içeriğinin artırılması sağlanabilir. Üst suyun (supernatant) ise geri döndürülerek tekrar sisteme verilmesi mümkündür. Filtre pres veya santrifüj sistemleri mekanik susuzlaştırma amacıyla uygulanmaktadır. Susuzlaştırılmış çamur ise genellikle kentsel katı atık depolama sahasına gönderilerek bertaraf edilmektedir. Şekil 5'de koagülasyon destekli mikrofiltrasyona ait akım şeması verilmektedir [57, 59].



Şekil 5. Koagülasyon Destekli Mikrofiltrasyonla Arsenik Giderimi Akım Şeması [57]

2.2.4. İyileştirilmiş Koagülasyon

İyileştirilmiş yöntem koagülant dozajının artırılması, pH'nın azaltılması veya her iki özelliğinde değiştirilmesi ile koagülasyon yönteminin modifikasyonunu içerir [21]. Yöntem; pH'nın ayarlanması ile birlikte partiküllerin mutlak zeta potansiyeli değerini azaltmak için elektrolit konsantrasyonunun artırılması koşullarını da kapsar. Ortama, uygun kaba partiküller ilave edilerek de iyileştirme gerçekleştirilebilir. Süspansiyondaki ince partiküller kaba partikülleri kaplar. Böyle yumaklar ince ve kaba partiküllerden oluşur. Bu durum sadece süspansiyondaki partikül sayısını azaltmaz, aynı zamanda yumak miktarını da azaltır. Demir sülfatın koagülant ve kalsitin kaba partikül olarak kullanıldığı bir çalışmada koagülasyon yöntemi ardından konvansiyonel filtrasyon uygulanarak %99 arsenik giderimi sağlanmıştır [31].

İyileştirilmiş koagülasyon ile arsenik gideriminde koagülant olarak alüm kullanıldığında pH 5-7, demir bileşikleri kullanıldığında pH 6-8.5 aralığı uygun giderim aralığı olarak belirlenmiştir. Şartların değiştirilmesi ile %90'dan daha fazla arsenat giderimi sağlanabilir [21].

2.2.5. Kireçle Yumuşatma

Kireçle yumuşatma metal tuzlarıyla koagülasyona benzer bir yöntemdir. Kireç (Ca(OH)_2) hidrolize olur ve karbondioksit (CO_2) ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturur. Kalsiyum karbonat arsenik giderimi için adsorplama ajanı olarak davranır. Jar testi çalışmalarında pH 10.5'de ve daha yüksek değerlerde yaklaşık olarak % 100'e yakın arsenat gideriminin ve pH 11.1'de %80'e yakın arsenit gideriminin mümkün olduğu belirlenmiştir. Kireçle yumuşatma yöntemlerinin dezavantajları;

-Koagülant gereksiniminin fazla (800-1200mg/l) olması

-Çamur oluşumunun fazla olması

-İşletme pH'sının yüksek olması ve pH değerinin tekrar ayarlanmasının gerekmesidir [32].

Arsenik giderimi için sadece kireçle yumuşatma ekonomik değildir ve kireç genellikle maliyetli bir giderici olarak düşünülür. Yöntem arsenik giderimi için iyileştirilebilir [20].

2.3. Adsorpsiyon ve İyon Değiştirme Teknikleri

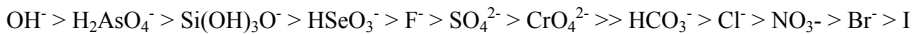
Adsorpsiyon arsenik gideriminde en etkili metodlardan biridir. Arsenik gideriminde yaygın olarak kullanılan adsorbentler aktif alümina, aktif karbon, reçineler ve metal oksitlerdir [25]. Arsenik gideriminde yaygın olarak kullanılan demir oksit mineralleri; hematit [33], siderit [34], geotit [35] ve magnetit [36].

2.3.1. Aktif Alümina

Aktif alümina ile arsenik giderimi hem arsenat hemde arsenit için % 95'in üzerindedir [17]. Arsenik pH 5.5'te aktif alümina ile içme sularından etkili bir şekilde giderilebilir. Optimum pH değerleri As (III) için 5.5 ve As (V) için nötrale yakın değerlerdir. Prempis; suda çözülebilir arseniğin (AsO_4^{3-} ve AsO_3^{3-}) aktif alümina yüzeyine adsorplanabilmesi ve alümin oktahedron kristal kafes bölgeleri oluşturabilmesidir [25]. Şekil 6 aktif alümina ile arsenat giderimi için tipik yöntem akış diyagramını göstermektedir. Eğer su kaynağında 0.3 NTU'yu aşan bir bulanıklık varsa ön filtrasyon gerekebilir [20].

Tipik olarak aktif alümina yüzeyi pH 8.2'de yüksüzdür. Bu değer in altındaki değerlerde pozitif, üstündeki değerlerde ise negatif yüklüdür. Sıfır yük noktasına yaklaştığında arsenik giderim kapasitesi belirgin bir şekilde azalır. pH 8.5'in üstünde kapasite sadece %2-5 oranında azalır. Bu nedenle nötr ve bazik sularda etkili giderim için pH ayarı gereklidir [17].

Aktif alümina yüzeyinde diğer anyonların seçiciliği pH 5.5 ve 8.5 arasında aşağıdaki gibidir;



Ortamda bulunan SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} ve F^- gibi bazı iyonlar arsenik giderim verimini azaltabilir [25].

Aktif alüminanın arsenat için yüksek seçiciliğinden dolayı iyon değiştirici reçinelere göre rekabet eden iyonların etkisi daha azdır. Sülfat ve daha az oranda klor kapasiteyi azaltabilir fakat rekabet etkisi iyon değiştiricilerde olduğu kadar yüksek değildir. Fosfat ve florür aktif alümina yüzeyine adsorplanarak içme suyu kalitesini iyileştirir ancak bu durum aynı zamanda arsenik giderim potansiyelini azaltır [17].

Çizelge 5'de girişim yapan maddeler konsantrasyonlarıyla birlikte verilmiştir [20].

Çizelge 5. Aktif alümina adsorpsiyonunda girişim yapan maddeler [20]

Parametreler	Problem Seviyesi
Klor	250 mg/l
Flor	2 mg/l
Silika	30 mg/l
Demir	0.5 mg/l
Mangan	0.05 mg/l
Sülfat	720 mg/l
Çözünmüş organik karbon	4 mg/l
Toplam çözünmüş katı	1.000 mg/l

Aktif alümina %4'lük sodyum hidroksit çözeltisiyle yıkanarak rejenere edilebilir. İyon değiştirici reçinelerine göre rejenerasyon daha zordur ve tam olarak gerçekleşmez (genellikle % 50-80). Ayrıca iyon değiştiricilere göre boş yatak temas süresi daha uzundur. Aktif alümina ile As gideriminde sistemin basit olması avantajları arasındadır. Düşük debilerde hiçbir kimyasal ilavesine gerek kalmadan kullanılabilir [17].

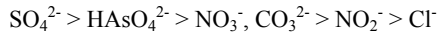


Şekil 6. Aktif Alüminayla Arsenik Giderimi Akım Şeması [58]

2.3.2. İyon Değiştirme

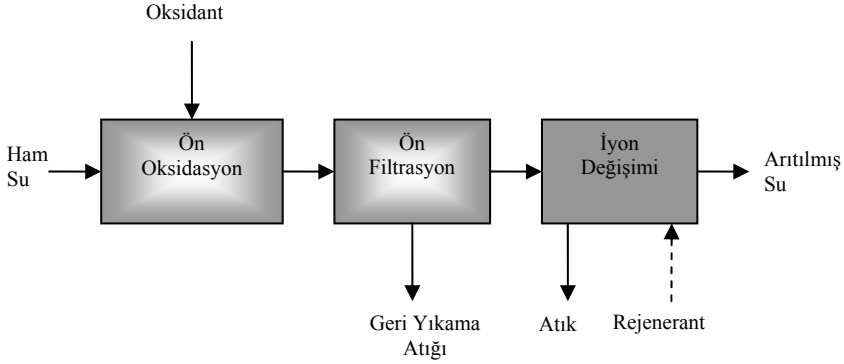
Arsenik giderimi için genellikle, yer değiştirme bölgesinde klorür iyonlarıyla yüklü olan iyon değiştirme reçinesi bir tank içerisine yerleştirilir. Arsenikli su tank boyunca geçer ve arsenik klorür iyonlarıyla yer değiştirir. Tank içerisindeki suyun arsenik içeriği tanka giren sudan daha düşük, klorür içeriği ise daha yüksektir [7]. Şekil 7 iyon değişimi için tipik yöntem akışı diyagramını göstermektedir. Eğer su kaynağında bulanıklık 0.3 NTU aşarsa ön filtrasyon gerekebilir [20].

Yöntemin ekonomikliği çözelti içerisindeki rekabet edici iyonların konsantrasyonuna bağlıdır [7]. Benzer iyonların değişimi net yüzey yükünün bir fonksiyonudur. Bu yüzden iyon değişim yönteminde As(V) giderimi, çözelti pH'ı diğer anyonların konsantrasyonları ve özellikle sülfat ve nitratla ilgilidir. Bunlar ve diğer anyonlar aşağıda verilen seçicilik sırasına göre reçine değişim yüzeyinde rekabet halindedirler [20].



İyon değiştirme ile arsenik arıtımında sülfat varlığı, sülfatın rekabet edici özelliğinden dolayı önemli bir faktördür [7]. Sülfat konsantrasyonu düşük (<25 mg/l) sularda arsenat iyon değiştiricilerde %95 oranında giderilebilir. Sülfat konsantrasyonu >120 mg/l ve toplam çözünmüş madde >500 mg/l ise iyon değiştirici reçineler tercih edilmez. Genellikle, iyon değişim yöntemi eğer su kaynağı 500 mg/l üzerinde toplam çözünmüş katı veya 50 mg/l üzerinde sülfat içeriyorsa ekonomik olarak geçerli bir arıtım teknolojisi değildir [20].

İyon değiştirme reçineleri yoğun tuz çözeltisiyle yıkanarak kolay bir şekilde rejenere edilebilir. Bunun için yaygın olarak 0.1 M NaOH kullanılır. Bu tuz çözeltisi, rejenerantta arsenik konsantrasyonunun artmasına rağmen 20-30 kez kullanılabilir [17].



Şekil 7. İyon Değiştiriciyle Arsenat Giderimi Akım Şeması [13]

2.4. Membran Teknikleri

Membran yöntemleri seçiciliğin farklı olmasına bağlı olarak dört kategoride değerlendirilebilir. Bunlar;

- Mikrofiltrasyon (MF),
- Ultrafiltrasyon (UF),
- Nanofiltrasyon (NF),
- Ters osmoz (RO).

Bu yöntemler için tipik basınç aralıkları Çizelge 6'da verilmiştir [21]. Yüksek basınç ile suyun membrandan geçişi sağlanır. Genellikle itici gücün artmasıyla seçicilik artar [7].

Doğal organik maddelerin varlığı ve özellikle kalsiyum, magnezyum, silis, sülfat, klorür ve karbonat gibi çeşitli inorganik iyonlar membran bozulmasına yol açabilir. Membran temizliği arıtım performansını iyileştirebilir ancak zor ve maliyetli bir işittir. Membranın bozulma oranı modülün biçimi ve besleme suyu kalitesi ile ilgilidir. Bazı membranlar, özellikle poliamitten oluşan membranlar klora karşı duyarlıdır. Bu nedenle besleme suyunda klor giderimi gereklidir. Başka bir önemli husus sularaki alkalinitenin giderilmesidir. Bu durum dağıtım sisteminde korozyon kontrolü ile ilgilidir [20].

2.4.1. Mikrofiltrasyon

Mikrofiltrasyon membranları düşük basınçlı membranlardır. MF sulardan partiküler boyuttaki arseniği giderebilir. Bu yüzden arsenik giderim verimliliği arsenikli partiküllerin boyutuna bağlıdır ve genellikle tek başına düşüktür [37]. Sularda partiküler boyutta arsenik yüzdesi yüksek değildir. MF tekniği ile giderim verimliliğini arttırmak için sistem öncesinde koagülasyon ve flokülasyon gibi bir ön yöntem uygulanabilir. Ters Osmoz ve Nanofiltrasyona göre enerji gereksinimi daha düşük, akış oranı daha yüksektir [8].

2.4.2. Ultrafiltrasyon

Ultrafiltrasyon yöntemi mikrofiltrasyon yönteminde olduğu gibi geniş gözenek boyutu ve sudaki düşük partiküler arsenik miktarı nedeniyle arsenik gideriminde her zaman geçerli bir yöntem değildir. Ancak sistem öncesinde koagülasyon ve flokülasyon gibi bir ön yöntem uygulanırsa başarılı olabilir.

Bazı araştırmacılar elektrik akımı ile ultrafiltrasyonun arsenik giderim verimliliğini arttırdığını bulunmuştur. Negatif yüklü membran yüzeyi ve arsenik arasındaki elektrostatik etkileşim nedeniyle giderim verimliliği artmaktadır [8].

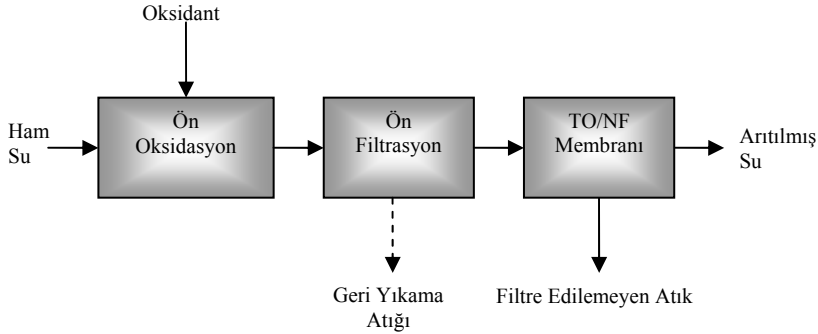
2.4.3. Nanofiltrasyon

Nanofiltrasyon arsenik konsantrasyonu düşük içme sularına uygulanan metodlardan biridir. Uygun işletme koşullarında hem As(V) hemde As(III) giderimi etkili bir şekilde gerçekleşir. NF ile sadece çözülmüş arsenik değil ortamda bulunan diğer çözülmüş ve partikül halinde bulunan maddelerin giderimi de sağlanır [8]. Arsenik giderimi sırasında (As(III) ve As(V)) nanofiltrasyon membranları su kaynağında bulunan diğer kimyasal bileşiklerden etkilenmez. NF ile %95 üzerinde As(V) giderimi sağlanabilir. As(III) ise ek bir kimyasal ilavesi olmaksızın %75 üzerinde giderilebilir [7].

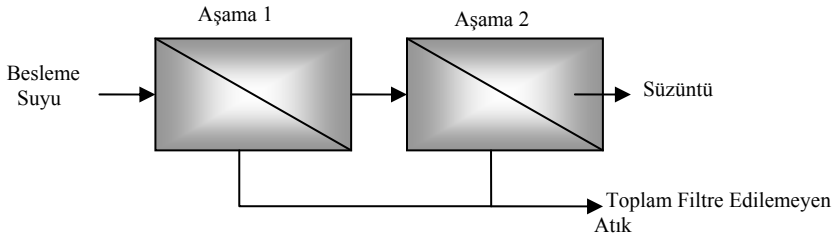
2.4.4. Ters Osmoz

En eski membran teknolojilerinden olan ters osmoz küçük su arıtım sistemlerinde sulardan arsenik gideriminde uygulanan en iyi giderim teknolojilerindedir. %95 üzerinde arsenat giderimi sağlanabilir. Arsenit giderim verimliliği daha düşüktür ve oksidasyonla verimliliği arttırmak kolay değildir. Oksidan membrana zarar verebilir [8].

Şekil 8'de ters osmoz membran yöntemi için tipik akış diyagramı verilmiştir. Arsenik giderim verimliliğini arttırmak için çoklu ters osmoz üniteleri de uygulanabilir. Şekil 9'de iki aşamalı ters osmoz ünitesi gösterilmiştir [20].



Şekil 8. Ters Osmoz Membran Yöntemi Akım Diyagramı [20]



Şekil 9. İki Aşamalı Şematik Ters Osmoz Arıtım Yöntemi [20]

Çizelge 6. Membran Yöntemleri İçin Tipik Basınç Aralıkları [21]

Membran Yöntemleri	Basınç aralığı (nt/m ²)
Mikrofiltrasyon	34480-310326
Ultrafiltrasyon	4873-689612
Nanofiltrasyon	344806-1034419
Ters Osmoz	689612-1034419

Çizelge 7. Arsenik İçeren Su Kaynaklarında Karakteristik Özelliklere Göre Membran Arıtım Yönteminin Seçimi [7]

Su Kaynağı	Arıtım Yöntemi				Olası arıtım
	Sadece filtrasyon				
Karakteristikler	RO	NF	UF	MF	Ön oksidasyon
As türleri					
As (III)	T	EO	TE	TE	T
As (V)	T	T	EO	TE	TE
As boyutu dağılımı					
Çözünmüş	T	EO	TE	TE	TE
Partikül	TE	TE	EO	EO	TE
Doğal Organik Madde	EO	EO	TE	TE	TE
İnorganik	T	EO	TE	TE	TE

T, Tavsiye edilebilir. TE, Tavsiye edilemez. EO, Etkili olabilir.

2.5. Alternatif Teknikler

2.5.1. Demir Oksit Kaplı Kum

Adsorpsiyon arıtma sistemlerine yapılacak modifikasyonlar ile arıtılmış sudaki arsenik konsantrasyonu 10 µg/L nin altına düşürülebilir. Bu alternatiflerden biri, adsorbant ortamında meydana getirilebilecek farklılıklardır. Demir içeren bileşikler arsenik gideriminde hem ekonomik yönden hem de giderim verimliliği açısından etkili olmaktadır. Çeşitli doğal malzemelerin yüzeyleri demirle kaplanarak arsenit ve arsenat adsorpsiyonunda kullanımı son yıllarda başarı ile uygulanan yöntemlerdendir [38, 61]. Demir oksit kaplı kum [39, 40, 41], demir oksit kaplı quartz [42], Ce(IV)-yükü demir oksit [43], silika içeren demir (III) oksit [44], demir oksit kaplı polimerik materyaller [45], demir oksit kaplı zeolit [46] ve demir oksit kaplı çimento [47] gibi yöntemler sulu çözümlerden arsenik gideriminde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle arsenat arsenite kıyasla demir oksit yüzeyine daha güçlü bir şekilde adsorplanır. Ancak bazı çalışmalar yüksek başlangıç arsenik konsantrasyonlarında arsenitin ferrihidrit üzerine pH 3-11 aralığında arsenattan daha iyi adsorlandığını göstermiştir [48].

Demir oksitle kaplama teknolojileri arasında, demir oksit kaplı kum arsenik gideriminde göze çarpan bir teknolojidir. Demir oksit kaplı kum, demir hidroksitlerle kaplanmış kum taneciklerinden meydana gelmektedir. Arsenik, demir oksit kaplı kum üzerindeki yüzey hidroksitleriyle yer değiştirir. Diğer çoğu yöntemde olduğu gibi yatak ömrü tükendiği zaman rejenerasyon gerekir. İşlem sırası ise; rejeneratla muamele etme, su ile yıkama ve güçlü bir asitle nötrale etmektir. Sodyum hidroksit (NaOH) en yaygın kullanılan rejenerattır. Sülfirik asit (H₂SO₄) en yaygın nötrale edicidir. Demir kompleksleri ortamdaki sodyum hidroksit rejenerasyonu ile kolayca giderilebilir. Çeşitli çalışmalar demir oksit kaplı kumun arsenik giderimi üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Arsenik oksidasyon basamağı, rekabet eden iyonlar, pH ve rejenerasyon gibi faktörlerin giderim verimi üzerinde önemli etkisi vardır [21].

2.5.2. Demir Dolgular

Demir dolguların yapısını oluşturan sıfır değerlikli demir (Fe^0) As(III) ve As(III) gideriminde önemli bir yere sahiptir. Fe^0 güçlü bir indirgeyicidir ve bu özelliğinden dolayı hem As(III) hemde As(V) gideriminde etkili bir ajandır. Fe^0 kullanımının diğer bir avantajı toksik özellikte olmaması ve ucuz olmasıdır. Literatürlerde Fe^0 'in düşük pH'larda ve yüksek sülfür içeren sularda arsenik gideriminde etkili olduğu görülmektedir. Nötral ve bazik pH değerlerinde Fe^0 yüzeyinde hidroksit türleri oluşur ve As(III) ve As(V) için giderim mekanizması adsorpsiyon olur [65].

Demir dolgular inorganik arsenik türlerinin gideriminde kullanılabilir. Bu tip yöntem yeşil kum filtrasyonunda olduğu gibi filtrasyon teknolojisine dayanır. Su kaynağı demir dolgu ve kum yatağı boyunca filtrelendirir (Şekil 10). Bazı teknolojilerin (örneğin iyon değişimi) aksine sülfat bu yöntemde arsenopirit çökeltisi oluşturmak için kullanılmaktadır. Kesikli sistemde işletildiğinde ortalama giderim verimi %80'dir ancak düşük giriş konsantrasyonlarında giderim verimi daha yüksek olmaktadır. Metodun içme suyu arıtımında kullanımı sınırlıdır. Kesikli testlerde bekleme süresi yaklaşık olarak 7 gündür. İstenen arsenik giderimine ulaşmak için bu süre gereklidir. Bu teknoloji içme suyundan arsenik giderimi için önerilmeden önce daha fazla deneysel değerlendirmeye ihtiyaç duyulmaktadır [21].



Şekil 10. Demir dolgular için akım şeması

2.5.3. Sülfürle Modifiye Edilmiş Demir

Çevresel ortamlarda arsenik ve sülfür bileşikleri arasında arseniğin indirgenmesinden dolayı güçlü bir ilişki vardır. Hidrojen sülfür varlığında metal sülfür oluşumundan kaynaklanan arsenik giderimi gerçekleşir [64].

Sülfürle modifiye edilmiş demir arsenik giderimi için yakın dönemlerde geliştirilmiş bir yöntemdir. Yöntem üç bileşenden oluşmaktadır; parçacıklar halinde bölünmüş metalik demir, toz halinde elementel sülfür veya diğer sülfür bileşikleri ve oksidasyon ajanı.

Toz demir, toz sülfür ve oksidasyon ajanı (H_2O_2) tamamen karıştırılır ve arıtılacak olan suya ilave edilir. Oksidasyon ajanı arseniti arsenata dönüştürür.

Sülfürle modifiye edilmiş demir yönteminin kullanıldığı çeşitli tip sularda yüksek adsorplama kapasitesi elde edilir. Arsenik giderim verimliliği arsenik/demir oranına bağlıdır.

Sülfürle modifiye edilmiş demir için öngörülen işletme maliyeti, yöntem pH 8'in altında işletildiği zaman demir klorür ilavesi, ters osmoz ve aktif alümina gibi alternatif arsenik giderim teknolojilerinden daha düşüktür. Maliyet, akış oranının ve arsenik konsantrasyonunun artmasıyla orantılı olarak artmaktadır [21].

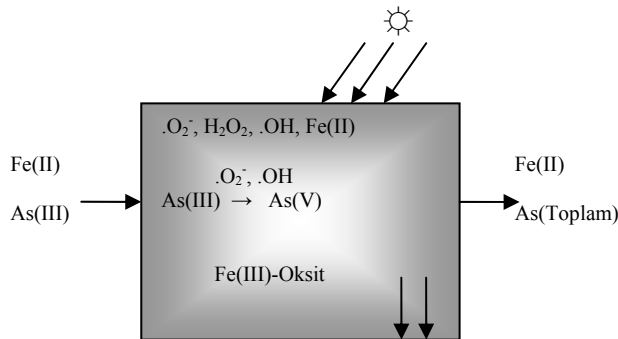
2.5.4. Granüler Demir Hidroksit

Granüler demir hidroksit β -FeOOH formunda olup yavaşça kristalleşme özelliğindedir. Demir hidroksit çözeltisinden hazırlanır ve düzensiz granüller 2mm'ye ulaşabilir (granüler demir hidroksit partikül yüzeyi) [62]. Bu yöntem, koagülasyon ve filtrasyon yönteminin özellikleri ile kombine edilmiş bir tekniktir. Yapılan granüler demir hidroksit testleriyle yüksek arıtım kapasitesi ile arsenat konsantrasyonunu 10 $\mu\text{g/l}$ altına indirdiği görülmüştür [21]. Granüler demir hidroksit arseniğin filtrasyonla arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Granüler demir hidroksitin yüzey yükü pH'ya bağlıdır [49]. Yüksek pH değerlerinde granüler demir hidroksit alümina ile kıyaslandığında daha üstündür. Performans ancak $\text{pH} < 7.6$ (≈ 8) değerlerinde kıyaslanabilir. Arsenat adsorpsiyonunda sülfat rekabeti çok güçlü değildir. Fosfat ise arsenatla rekabet eder ve granüler demir hidroksit ile arsenat giderimini azaltır. Yöntemin en belirgin dezavantajı maliyetidir. Ancak bir granüler demir hidroksit yatağı alümina yatağından daha uzun süreli kullanılabilir. Aktif alüminanın aksine granüler demir hidroksit ön oksidasyon gerektirmez. Gerekli olan hidroksit yükünden dolayı aktif alüminaya göre çok daha verimli bir teknolojidir çünkü 10 kat daha yüksek hidroksit yüküne sahiptir [21, 62].

2.5.5. Foto-Oksidasyon

Bu yöntemler ile yüksek giderme verimi elde edilmesine rağmen kullanılan kimyasal maddeler (H_2O_2 gibi) ve enerji gereksinimi (UV ışığı elde etmek için) oldukça yüksektir. Bu nedenle UV ışığı üretiminde doğal bir kaynak olan, güneş ışığı kullanılmaya başlanmıştır.

Avusturya Nükleer Bilim ve Teknoloji Organizasyonu (ANSTO) araştırmacıları tarafından ışık varlığında oksijenle arsenik oksidasyon oranını 10.000 kat arttırabilen bir ışık adsorblama materyali bulunmuştur. ANSTO asidik, gümüş, altın ve kurşun madenlerini kullanarak hem UV reaktörlerini hemde güneş ışığı destekli foto oksidasyonu değerlendirmiştir. Yapılan testler % 100'e yakın arsenik oksidasyonunun fotokimyasal yöntemler kullanarak sağlanabildiğini göstermiştir. Yöntemde arseniğin %97'si arsenat olarak bulunmuştur. Ayrıca araştırmacılar aşırı miktarda çözünmüş demir varlığında (22:1 arsenik-demir oranı) arsenitin tercihen okside edildiği sonucuna varmışlardır. Fotooksidasyonu takiben çöktürme ile arsenik giderimi etkili bir giderim teknolojisidir. Ancak teknoloji içme suyundan arsenik giderimi için önerilmeden önce daha fazla deneysel değerlendirmeye ihtiyaç duyulmaktadır [21]. Sistemde Şekil 11'da görüldüğü gibi; As(III)'ün fotokimyasal oksidasyonu, demir hidroksitlerin çökmesi ve oluşan demir hidroksitlere As(V)'in adsorpsiyonu olayları gerçekleşmektedir. Böylece sistem çıkışında sudaki arsenik konsantrasyonunu azalmaktadır [63]. Özellikle güneş ışığı destekli foto oksidasyon yöntemi tercih edildiğinde bu yöntem oksidasyon/koagülasyon/adsorpsiyon yöntemlerine alternatif olabilmektedir.

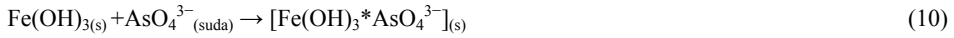


Şekil 11. Foto-Oksidasyon Yöntemi Akım Şeması [63]

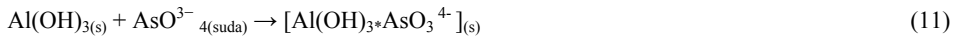
2.5.6. Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon yöntemi son yıllarda arsenik gideriminde kullanılan yöntemler arasındadır. Bu yöntem; koagülasyon yöntemine benzemektedir ancak ilave bir koagülanta gerek yoktur. [50]. Elektrokoagülasyon, yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarıyla kontrol edilir ve As(III) anotta yükseltgenebilir. Bu yöntemler As(V)'in giderimi daha kolay bir şekilde gerçekleşmektedir [51]. Elektrokoagülasyon sırasında As(III)'ün As(V)'e oksidasyonundan dolayı bu yöntem sudan arsenik gideriminde etkili bir teknolojidir [14]. Arsenik gideriminde yaygın olarak demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmaktadır [52]

Demir elektrotlar kullanıldığında oluşan demir flokları çöktürme ve/veya adsorpsiyon mekanizmasıyla suda bulunan arseniği tutar, kararlı demir arsenat bileşiği ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot \text{AsO}_4^{3-}$) kolay bir şekilde ortamdan ayrılabilir [53].



Alüminyum elektrotlar kullanıldığında ise anotta gerçekleşen reaksiyon aşağıdaki gibidir [54]:



Demir elektrot kullanılan elektrokoagülasyon yöntemlerinde kirleticilerin yük dengesinin bozunma mekanizması, çeşitli pH' lardaki demir komplekslerinin meydana gelmesi sonucunda olur. Yük dengesi bozulan kirleticiler demir hidroksit türleri ile çökelti meydana getirirler [55].

2.6. Giderim Yöntemlerinin Kıyaslanması

Çizelge 8 ve Çizelge 9'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

3. SONUÇ

Toksik etkisinden dolayı arsenik içeren su kaynaklarının tüketilmesi dünyanın pek çok ülkesinde karşılaşılan bir sorun olmuştur. Sularda arsenik için uygun görülen sınır değerin 10 µg/L olarak uygulanması su kaynaklarının kullanımını kısıtlamış ve arsenik kirliliğinin kontrolüne yönelik önlemler alınması ihtiyacını arttırmıştır. Sudan arsenik giderimi için debiye ve uygulama yerine göre seçilebilecek farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler; artılacak suyun debisine ve sudaki arsenik konsantrasyonuna bağlı olarak farklılıklar gösterir. Konvansiyonel artıtım yöntemleriyle As(V) daha etkin bir şekilde giderilmektedir. Bu yüzden sularda As(III)'ün baskın olması halinde konvansiyonel artıtım yöntemi öncesinde oksidasyon kademesi eklenerek arsenitin arsenata dönüşümü sağlanabilir. Konvansiyonel yöntemlerin sonuna ilave artıtım üniteleri eklenebilir. Bu amaçla membran sistemler (koagülasyon destekli mikrofiltrasyon gibi) kullanılabilir. Arsenik gideriminde koagülasyon, adsorpsiyon, iyon değişimi gibi konvansiyonel yöntemler kullanılmaktadır ancak arsenik bakımından sorun teşkil eden bölgelerde yeni artıtım tesisleri teşkil edilirken veya mevcut artıtım tesislerinde modifikasyonlar yapılırken alternatif yöntemler kullanılarak arsenik giderimi sağlanabilir. Çeşitli doğal malzeme yüzeylerinin demirle kaplanması ve bu malzemelerin adsorbent olarak kullanımı son yıllarda alternatif olarak karşılaştığımız yöntemlerdendir. Yine adsorbent olarak demir dolgular, sülfürle modifiye edilmiş demir ve granüler demir hidroksit gibi alternatif malzemeler kullanılabilir. Kimyasal çöktürme/filtrasyon süreçleri genel olarak arsenik artıtım verimi yüksek (> %90) seçeneklerdir ancak süreçlerin tümünde başta ön artıtım (oksidasyon) gereksinimini ortadan kaldırmak amacıyla bu yöntemlere alternatif olarak elektrokoagülasyon, fotooksidasyon gibi yöntemler kullanılabilir. Oluşabilecek sağlık riskleri, uygulama kolaylığı, verimlilik gibi faktörlere göre uygun artıtım yönteminin seçimi yapılmalı, mevcut tesislerde bazı değişiklikler yapılmak suretiyle artıtım verimi artırılmalıdır.

Cizelge 8. Arsenik Arıtım Teknolojilerinde Çöktürme Yöntemlerinin Kıyaslanması [20]

Faktörler	Arsenik Arıtım Teknolojilerinin Kıyaslanması					
	Çöktürme Yöntemleri					
	İyileştirilmiş Kireçle Yumuşatma	İyileştirilmiş (Konsansiyonel) Koagülasyon Filtrasyon	Koagülasyon Destekli Mikrofiltrasyon	Koagülasyon Destekli Filtrasyon	Oksidasyon Filtrasyon	
USEPA En iyi uygulanabilir teknoloji	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Evet	
USEPA Küçük sistemlere uyan teknolojiler	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet	
Sistem büyüklüğü	25-10.000	25-10.000	500-10.000	500-10.000	25-10.000	
Kullanım noktasında işletme için küçük sistemlere uyan teknolojiler	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	
Kullanım noktasında işletme için sistem büyüklüğü	-	-	-	-	-	
Giderim verimliliği	%90	%95 (FeCl ₃) <%90 (Alüm)	%90	%90	%50-90	
Toplam su kaybı	%60	%60	%5	%1-2	%1-2	
Ön oksidasyon gerekliliği	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet	
Optimum su kalite koşulları	pH 10,5-11 >5mg/ Fe ²⁺	pH 5,5-8,5	pH 5,5-8,5	pH 5,5-8,5	pH 5,5-8,5 >0,3 mg/l Fe Fe:As oranı >20:1	
İşletmeci yeteneğinin gerekliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	
Oluşturulan atıklar	Geni yıkama suyu, çamur (yüksek hacim)	Geni yıkama suyu, çamur	Geni yıkama suyu, çamur	Geni yıkama suyu, çamur	Geni yıkama suyu, çamur	
Diğer göz önünde bulundurulacaklar	Arıtılmış su pH ayarlaması gerektirir.	Önce veya sonra pH ayarlaması olasıdır.	Önce veya sonra pH ayarlaması olasıdır.	Önce veya sonra pH ayarlaması olasıdır.	Yok	
Merkezi işletme maliyeti	Düşük	Düşük	Yüksek	Orta	Orta	
Kullanım noktasında işletme maliyeti	Uygulanabilir değil	Uygulanabilir değil	Uygulanabilir değil	Uygulanabilir değil	Uygulanabilir değil	

Çizelge 9. Arsenik Miktarını Azaltmak İçin Kullanılan Adsorpsiyon Yöntemlerinin Kıyaslanması [20]

Arsenik Arttırım Teknolojilerinin Kıyaslanması			
Faktörler	Adsorpsiyon Yöntemleri		
	İyon Değişimi	Aktif Alümina	Demir Destekli Sorbentler
	İD	AA	DDS
USEPA En iyi uygulanabilir teknoloji	Evet	Evet	Hayır
USEPA Küçük sistemlere uyan teknolojiler	Evet	Evet	Hayır
Sistem büyüklüğü	25-10.000	25-10.000	25-10.000
Kullanım noktasında işletme için küçük sistemlere uyan teknolojiler	Hayır	Evet	Hayır
Kullanım noktasında işletme için sistem büyüklüğü	-	25-10.000	25-10.000
Giderim verimliliği	%95	%95	>%98
Toplam su kaybı	%1-2	%1-2	%1-2
Ön oksidasyon gerekliliği	Evet	Evet	Evet
Optimum su kalite koşulları	pH 6,5-9 <5mg/l NO ₃ ⁻ <50mg/l SO ₄ ²⁻ <500 mg/l Toplam çözünmüş katan <0,3 NTU Bulanıklık	pH 5,5-6 pH 6-8,3 <250 mg/l Cl ⁻ <2 mg/l F ⁻ <360 mg/l SO ₄ ²⁻ <30 mg/l siltika <0,5mg/l Fe ²⁺ <0,06 mg/l Mn ²⁺ <1000 mg/l Toplam çözünmüş katan <4 mg/l TOK <0,3NTU Bulanıklık	pH 6,5-8,5 <1mg/l PO ₄ ³⁻ <0,3 NTU Bulanıklık
İşletme yeteneğinin gerekliliği	Yüksek	Düşük	Düşük
Oluşturulan atıklar	Kullanılan reçine, tuz, Geri yıkama suyu	Kullanılan ortam, Geri yıkama suyu	Kullanılan ortam, Geri yıkama suyu
Diğer göz önünde bulundurulacaklar	Önce veya sonra pH ayarlama olasılığı. Ön filtrasyon gerekliliği. Potansiyel tehlikeli tuz atığı. Nitrat sızıntısı Karbonat sızıntısının pH etkisi.	Önce veya sonra pH ayarlama olasılığı. Ön filtrasyon gerekliliği. Uygun Aktif Alümina ile modifiye etme.	Ortam çok pahalı olabilir. Ön filtrasyon gerekli olabilir.
Merkezi işletme maliyeti	Orta	Orta	Orta
Kullanım noktasında işletme maliyeti	-	Orta	Orta

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Kang, M., Kawasaki, S.T., Tamada, S., et.al., "Effect of pH on the removal of arsenic and antimony using reverse osmosis membranes", *Desalination*, 131, 293-298, 2000.
- [2] Balasubramanian, N., Madhavan, K., "Arsenic Removal from Industrial Effluent through Electrocoagulation", *Chem. Eng. Technol.*, 24, 519-521, 2001.
- [3] Yağmur, F., Hancı, İ.H., "Arsenik. Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi", 7, 250-251, 2002.
- [4] Ning, R.Y., "Arsenic removal by reverse osmosis", *Desalination*, 143, 237-241, 2002.
- [5] World Health Organization (WHO), *Environmental Health Criteria 224 Arsenic and Arsenic Compounds (Second Edition)*, World Health Organization Library Cataloguing-in-Publication Data. Geneva, 2001.
- [6] Gholami, M.M., Mokhtari M.A., Aameri, A., et.al., "Application of reverse osmosis technology for arsenic removal from drinking water", *Desalination*, 200, 725-727, 2006.
- [7] Choong, S.Y.T, Chuah, T.G., Robiah, Y., et.al., "Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview", *Science Direct Desalination*, 217, 139-166, 2007.
- [8] Shih, M.C., "An overview of arsenic removal by pressure-driven membrane processes", *Desalination*, 172, 85-97, 2005.
- [9] Pokhrel, D., Viraraghavan, T., "Arsenic Removal From Aqueous Solution By Iron Oxide-Coated Fungal Biomass: A Factorial Design Analysis", *Springer, Water, Air, and Soil Pollution*, 173, 195–208, 2006.
- [10] Ranjan, D., Talat, M., Hasan, S.H., "Biosorption of arsenic from aqueous solution using agricultural residue 'rice polish'", *Journal of Hazardous Materials*, 166, 1050-1059, 2009.
- [11] Joshi, D.N., Flora S.J.S., Kalia, K., "Bacillus sp. strain DJ-1, potent arsenic hypertolerant bacterium isolated from the industrial effluent of India", *Journal of Hazardous Materials*, 166, 1500–1505, 2009.
- [12] Guo, H., Stüben, D., Berner, Z., et.al., "Characteristics of arsenic adsorption from aqueous solution: Effect of arsenic species and natural adsorbents", *Applied Geochemistry*, 24, 47-53, 2009.
- [13] Mohan, D., Pittman, C.U., "Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review", *Journal of Hazardous Materials*, 142, 1–53, 2007.
- [14] Kumar, P.R., Chaudhari, S., Khilar, K.C., et.al., "Removal of arsenic from water by electrocoagulation", *Chemosphere*, 55, 1245–1252, 2004.
- [15] Nguyen, T.V., Vigneswaran, S., Ngo, H.H., et.al., "Arsenic removal by a membrane hybrid filtration system", *Science Direct Desalination*, 236, 363-369, 2009.
- [16] Rahman, K., J., "Treatment of arsenic containing artificial wastewater in different laboratory-scale constructed wetlands", *Doctoral Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Stuttgart University*, 2009.
- [17] Smedley, L.P., Kinniburgh, D.G., "United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking-Water, Chapter 1. Source and behaviour of arsenic in natural waters", *Water and Sanitation Protection of the Human Environment*, Geneva, 1-68, 2001.
- [18] Serpen, A., "Sularda Arsenik Kirliliğinin Kentsel Ekosistem Sağlığının Bozulmasına Bağlı Yarattığı Halk Sağlığı Sorunu", *Çiftlik Dergisi*, 296, 1-7, 2008.
- [19] Tekbaş, Ö.F., Oğur, R., "Arsenik, İçme Suları ve Sağlık", *TAF Preventive Medicine Bulletin*, 7 (4), 2008.
- [20] Environmental Protection Agency (EPA), "Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems", Office of Water (4606M) EPA, 816-R-03-014, 2003.
- [21] Spellman, F.R., "Handbook Water and Wastewater Treatment Plant Operations", Lewis Publishers, 1-696, 2003.

- [22] Environmental Protection Agency (EPA), "Arsenic Treatment Technologies for Soil, Waste and Water", Solid Waste and Emergency Response (5102G) EPA, 542-R-02-004, 2002.
- [23] Zaw, M., Emett, M.T., "Arsenic removal from water using advanced oxidation processes", *Toxicology Letters*, 133,113–118, 2002.
- [24] Wilson, S.D., Kelyy W.R., Holm, T.R., et.al., "Arsenic removal in water treatment facilities: survey of geochemical factors and pilot plant experiments", *Illinois Waste Management and Research Center*, 1-79, 2004.
- [25] Zhenzhong, L., Huiping, D., Jian, Z., "Arsenic in Drinking Water and Its Removal", *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 5-3, 23-30, 2007.
- [26] Wickramasinghe, S.R., Han, B., Zimbron, J., et.al., "Arsenic removal by coagulation and filtration: comprasion of groundwaters from the United States and Bangladesh", *Desalination*, 169, 231-244, 2004.
- [27] Jain, A., Sharma, V.K., Mbuya, O.S., "Removal of arsenite by Fe(VI), Fe(VI)/Fe(III), and Fe(VI)/Al(III) salts: Effect of pH and anions", *Journal of Hazardous Materials*, 169, 339–344, 2009.
- [28] Başkan, M., Pala, A., "Determination of arsenic removal efficiency by ferric ions using response surface methodology", *Journal of Hazardous Materials*, 166, 796-801, 2009.
- [29] Başkan, M., Pala, A., 2009c. A statistical experiment design approach for arsenic removal by coagulation process using aluminum sulfate. *Desalination*. 254, 42-48
- [30] Öztürk, M. (2009). İçme Suyu Kaynaklarında Arsenik Arıtımı [Internet], <http://www.mozturk.net/?Type=1&Id=380> [Erişim tarihi: Ekim 13, 2009].
- [31] Song, S., Valdivieso, A.L., Hernandez-Campos, D.J., et.al., "Arsenic removal from high-arsenic water by enhanced coagulation with ferric ions and coarse calcite", *Science Direct, Water Reserarch*, 40, 364 – 372, 2006.
- [32] Johnston, R., Heijnen, H., "Safe Water Technology for Arsenic Removal." In: Ahmed, M.F. et. al. [Eds]. *Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water*. Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, Bangladesh, 2001.
- [33] Guo, H., Stüben, D., Berner, Z., "Removal of arsenic from aqueous solution by natural siderite and hematite", *Applied Geochemistry*, 22, 1039–1051, 2007.
- [34] Guo, H., Stüben, D., Berner, Z., "Adsorption of arsenic(III) and arsenic(V) from groundwater using natural siderite as the adsorbent", *Journal of Colloid and Interface Science*, 315, 657-663, 2007.
- [35] Tang, Y., Wang, J., Gao,N., "Characteristics and model studies for fluoride and arsenic adsorption on goethite", *Journal of Environmental Sciences*, 22(11), 1689–1694, 2010.
- [36] Chowdhury, S.R., Yanful, E.K., "Arsenic and chromium removal by mixed magnetiteemaghemite nanoparticles and the effect of phosphate on removal", *Journal of Environmental Management*, 91, 2238-2247, 2010.
- [37] Nguyen, T.V., Vigneswaran, S., Ngo, H.H., et.al., "Arsenic removal by a membrane hybrid filtration system", *Science Direct, Desalination*, 236, 363-369, 2007.
- [38] Gimenez, J., Martinez. M., J. De Pablo, M., et.al., "Arsenic sorption onto natural hematite, magnetite, and goethite", *Journal of Hazardous Materials*, 141, 575–580, 2007.
- [39] Hsu, J.C., Lin, C.J., Liao, C.H.,et.al., "Removal of As(V) and As(III) by reclaimed iron-oxide coated sands", *Journal of Hazardous Materials*, 153, 817–826, 2008.
- [40] Gupta,V.K., Saini,V.K., Jain, N., "Adsorption of As(III) from aqueous solutions by iron oxide-coated sand", *Journal of Colloid and Interface Science*, 288, 55–60, 2005.
- [41] Nguyen, T.V., Vigneswaran,S., Ngo, H.H., et.al., "Arsenic removal by iron oxide coated sponge: Experimental performance and mathematical models", *Journal of Hazardous Materials*, 182, 723–729, 2010.
- [42] Mostafa, M.G., Chen, Y.-H., Jean, J.-S., et.al., "Adsorption and desorption properties of arsenic onto nano-sized iron oxide-coated quartz", *Water Science Technology*, 2010.

- [43] Zhang, Y., Yang, M., Huang, X., "Arsenic(V) removal with a Ce(IV)-doped iron oxide adsorbent", *Chemosphere*, 51, 945–952, 2003.
- [44] Zeng, L., "A method for preparing silica-containing iron(III) oxide adsorbents for arsenic removal", *Water Research*, 37, 4351–4358, 2003.
- [45] Katsoyiannis, I.A., Zouboulis, A.I., "Adsorption characteristics of As(III) from aqueous solution on iron oxide coated cement (IOCC)", *Journal of Hazardous Materials*, 142, 97–104, 2002.
- [46] Jeon, C.S., Baek, K., Park, J.K., et.al., "Adsorption characteristic of As(V) on iron-coated zeolite", *Journal of Hazardous Materials*, 163, 804–808, 2009.
- [47] Kundu, S., Gupta, A.K., "Adsorption characteristics of As(III) from aqueous solution on iron oxide coated cement (IOCC)", *Journal of Hazardous Materials*, 142, 97–104, 2007.
- [48] Thirunavukkarasu, O.S., Viraraghavan, T., Subramanian, S., "Arsenic removal from drinking water using iron oxide-coated sand", *Water, Air, and Soil Pollution*, 142, 95–111, 2003.
- [49] Guan, J., Ma, J., Dong, H., et.al., "Removal of arsenic from water: Effect of calcium ions on As(III) removal in the KMnO_4 -Fe(II) process", *Science Direct Water Research*, 43(20), 5119-28, 2009.
- [50] Lakshmanan, D., Clifford, D.A., Samanta, G., "Comparative study of arsenic removal by iron using electrocoagulation and chemical coagulation", *Science Direct Water Research*, 44(19), 5641-52, 2010.
- [51] Wan, W., Pepping, T.J., Banerji, T., et.al., "Effects of water chemistry on arsenic removal from drinking water by electrocoagulation", *Water Research*, 45(1), 384-92, 2010.
- [52] Gomes, J.A.G., Daida, P., Kesmez, M., et.al., "Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products", *Journal of Hazardous Materials*, B139, 220–231, 2007.
- [53] Balasubramanian, N., Kojima, T., C. Basha, A., et.al., "Removal of arsenic from aqueous solution using electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, 167, 966–969, 2009.
- [54] Balasubramanian, N., Kojima, T., Srinivasakannan, C., "Arsenic removal through electrocoagulation: Kinetic and statistical modeling", *Chemical Engineering Journal*, 155, 76–82, 2009.
- [55] Mollah, M.Y., Schennach, R., Parga, J.R., et.al., "Electrocoagulation(Ec)- Science And Applications", *Journal of Hazardous Materials*, B84 P:29-41, 2001.
- [56] Sharma, V.K., Sohn, M., "Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation", *Environment International*, 35, 743–759, 2009.
- [57] Ghurye, G., Younan, J.C., Chwirka, J., "Arsenic Removal from Industrial Wastewater Discharges and Residuals Management Issues", *Journal of Euec*, 1, 2007.
- [58] Jalil, M. A., Ahmed, F., "Development of An Activated Alumina Based Household Arsenic Removal Unit", *BUET-UNU International Workshop on Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water*, 131-145, 2001.
- [59] 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.
- [60] Ahmed, M.F., "An Overview of Arsenic Removal Technologies in Bangladesh and India", *BUET-UNU International Workshop on Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water*, 251-269, 2001.
- [61] Yolcubal, İ., "Remediation Technologies for Arsenic Contaminated Groundwaters", *1.Tıbbi Jeoloji Çalıştay, Ürgüp/ NEVŞEHİR*, 30 Ekim–1 Kasım 2009.
- [62] Castro de Esparza, M.L., "Removal of arsenic from drinking water and soil bioremediation", *International Congress Mexico City*, 20-24 June 2006.
- [63] Wegelin, M., Gechter, D., Hug, S., Mahmud, A., Motaleb, A., "SORAS - a simple arsenic removal process", *Water, Sanitation and Hygiene: Challenges of the millennium*, 26, 255-259, 2000.

- [64] Vaishya, R.C., Gupta, S.K., “Arsenic(V) Removal by Sulfate Modified Iron Oxide-Coated Sand (SMIOCS) in a Fixed Bed Column”, *Water Qual. Res. J. Canada*, 41, (2), 157–163, 2006.
- [65] Kaminski, K. B. Vu, M. D., Nuñez. L., “Review of Arsenic Removal Technologies for Contaminated Groundwaters”, Argonne, Illinois 60439 operated by The University of Chicago for the United States Department of Energy under Contract W-31-109-Eng-38, 43s, 2003.

Pdf Source: [Sigma](#)