

SUYU KAYNAKLARINDA ARSENİK GİDERİMİ



TARİH: KASIM 2019

İÇİNDEKİLER

2 İÇME SUYU KAYNAĞINDA ARSENİK TÜRLERİ.....	5
3 ARSENİĞİN SAĞLIK ÜZERİNE ETKİSİ.....	8
4 İNDİRGEME/YÜKSELTGEME	11
5 ARSENİK GİDERME.....	14
5.1 PIHTILAŞTIRMA, YUMAKLAŞTIRMA VE ÇÖKTÜRME.....	14
5.2 İYON DEĞİŞTİRME	19
5.3 AKTİF ALÜMİNA.....	23
5.4 DEMİR OKSİT ESASLI SORBENTLER	24
5.5 TERS OSMOZ.....	25
6 ARSENİK GİDERME MALİYETİ.....	27
7 KAYNAKLAR.....	28

TABLolar

Tablo 1 Çeşitli Bölgelerde İçme Suyu Kaynaklarında Arsenik Konsantrasyonu.....	4
Tablo 2 İçme Suyunda Arsenik Konsantrasyonuna Bağlı Olarak Kanser Riski	9
Tablo 3 Çeşitli Ülkelerde İçme Suyunda Maksimum Arsenik Kirleticisi Seviyesi ile İlgili İzin Verilen Sınır Değerler	10
Tablo 4 Pihtılaştırma ve Yumaklaştırma ile Arsenat Giderimi	16
Tablo 5 Aktifleştirilmiş Alümina Girişimde Bulunan Su Kalitesi.....	24
Tablo 6 Çeşitli metotlarla Arsenik Giderme ve İşletme Maliyeti	27

ŞEKİLLER

Şekil 1 pH-Eh Bağlı Olarak Arsenik Türlerinin Değişimi.....	5
Şekil 2 pH'a Bağlı Olarak As(3) Türleri.....	6
Şekil 3 pH'a Bağlı Olarak As(5) Türleri.....	6
Şekil 4 Havalandırma ve Filtrasyonla Arsenik Giderimi.....	11
Şekil 5 Sulardan Arsenik Giderme Teknikleri	14
Şekil 6 Yumaklaştırma ve Filtrasyonla Arsenatın Giderimi Akım Şeması	17
Şekil 7 Arsenik (V) Gideriminde Pihtılaştırma ve Filtrasyon Sistemi	18
Şekil 8 Pihtılaştırma ve Filtrasyonla Arsenik Giderimi.....	19
Şekil 9 İyon Değiştiriciyle Arsenat Giderimi Akım Şeması.....	22
Şekil 10 İyon Değiştirici Sistem.....	22
Şekil 11 Arsenatın Aktifleştirilmiş Alüminayla Giderimi	24

1 GİRİŞ

Su sadece yaşam için önemli bir bileşen değil aynı zamanda yaşam kalitesini korumak için temel bir yapı taşıdır. Su kıtlığı, her kıtadaki tüm popülasyonlar üzerinde olumsuz etkiler yapmaktadır. Son zamanlarda, UNICEF ve WHO raporları, 748 milyon insanın yeterli ve güvenli su kaynağına sahip olmadığını ve 2,5 milyardan fazla insanın yetersiz su kaynağına erişebildiğini doğruladı. Dünya Sağlık Örgütü ayrıca 1,8 milyar insanın evsel atıksularla kirlenmiş (fekal koliform) içme suyu kullandığı tahmin ediyor.

Yeraltı suyu, küresel nüfusun %50'sinden fazlası tarafından içme suyu amaçlı kullanılmaktadır. Bu nedenle, yeraltı suyu bazen “gizli deniz” olarak tanımlanmaktadır.

Dünya’da yeraltı sularında arsenik konsantrasyonu yüksek olan ülkeler, Hindistan, Bangladeş, Pakistan, Şili, Çin, Arjantin, Meksika, Tayvan, Nepal, Moğolistan, ABD ve Vietnam’dır. Bu ülkelerde arseniğin sağlık üzerine etkileri ve arıtımı ile ilgili yoğun çalışmalar yapılmıştır.

Dünyada 70 ülkede, en az 140 milyon insan, WHO sınır değerinin üzerinde arsenikli su içmektedir. 2012 yılında, dünyada yaklaşık 202 milyon insanın 50 µg/L'nin üzerinde içme suyunda arsenik konsantrasyonlarına maruz kaldığı tahmin edilmektedir

Birleşmiş Milletlerin 2006 tarihli İnsani Gelişme Raporu’nda Türkiye, sularında arsenik konsantrasyonu yüksek olan ülkeler arasında yer almaktadır. Yer altı sularında arsenik problemi olan başlıca ülkeler arasında Türkiye’nin yanı sıra Arjantin, Bangladeş, Şili, Çin, Macaristan, Hindistan, Meksika, Tayvan, Vietnam gibi ülkeler de gösterilmektedir.

Arsenik yeraltı suyu kaynaklarında arıtılması için en önemli ihtiyaç, insan sağlığının korunması ile ilgilidir.

Ülkemizde arsenik kirliliği özellikle içme suyu içindeki arsenik konsantrasyonu 50 mg/L den 10 mg/L indirildiği için yaşanmıştır. Çünkü çeşitli bölgelerdeki içme suyu içindeki değerler yüksekti. Bu mevzuat çıkarılırken yerel yönetimlere gerekli yatırımları yapmaları için süre verilmiştir. Ülkemizin bazı bölgelerinde yapılan ölçümlere göre içme suyu kaynaklarında arsenik konsantrasyonu fevkalade yüksek bulunmuştur (**Tablo 1**).

Tablo 1 Çeşitli Bölgelerde İçme Suyu Kaynaklarında Arsenik Konsantrasyonu

Yerleşim Bölgesi	Arsenik Konsantrasyonu µg/L
Hisarcık-Kütahya Çeşme Suyu, Kuyu Suyu, Yüzeysel Su	380
	50
	510
İğdeköy-Emet-Kütahya Yüzeysel- yer altı suyu	10-20
	10-77
Bursa İçme suyu Kaynağı	0,051-21
Bigadiç-Balıkesir Yer altı suyu	30-900
Eşme-Uşak Yer altı suyu	50

İzmir ilinde 2008 yılında çeşitli kuyularda yapılan arsenik ölçümlerinde arsenik konsantrasyonu, Göksu'da 59 µg/L, Sarıkız'da 32 µg/L, Menemen'de 10 µg/L ve Halkapınar'da ise 13 µg/L ölçülmüştür. İnsan sağlığını korumak için bu kadar yüksek arsenik içeren içme sularının seyreltildikten veya arıtıldıktan sonra şebeke sistemlerine verilmelidir.

Küresel ısınmadan ve konfor yapısının artmasından dolayı suya olan talep her geçen gün artmaktadır. İklim değişikliğinden dolayı ülkemiz sel, kuraklık ve buharlaşma tehdidi altındadır. Sel ve kuraklık daha sık, şiddetli ve ani olarak görülmektedir. Buda su kaynaklarına zarar vermektedir.

Son otuz yıl boyunca, bazı araştırmalar arsenikle kirlenmiş suyun içilmesinin insan sağlığı için en önemli endişelerden biri olması gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle, yeraltı suyunun arsenik kirlenmesini önleme ve/veya bu kirlenmenin etkisini hafifletme stratejileri, arsenikle kirlenmiş su alımı ile ilgili sağlık risklerini azaltmak amacıyla geliştirilmelidir.

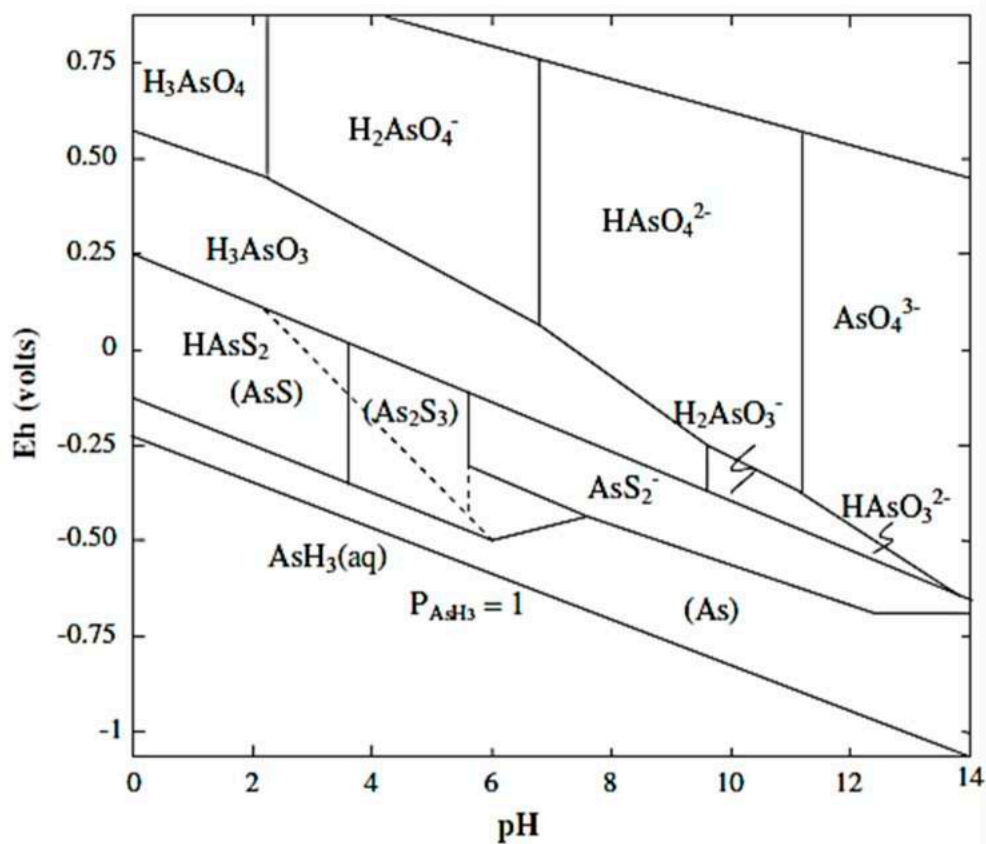
Bu çalışmada ham içme suyu kaynaklarında bulunması muhtemel arsenik kirleticinin nasıl giderileceği üzerinde detaylı olarak durulmuştur. İçme suyundan arsenik giderimi zor değildir. Ancak bu tür tesislerin sürekli olarak işletilmesi gereklidir. Mevcut yerel yönetimlerin çoğunun içme suyu arıtma tesislerini işletmeleri mümkün değildir. Mali ve teknik kapasitesi yetersiz olan belediyelerin bu tür tesisleri işletmeleri mümkün değildir.

2 İÇME SUYU KAYNAĞINDA ARSENİK TÜRLERİ

Arsenik yeryüzünün yirminci, deniz suyun on dördüncü ve insan vücudun on ikinci en bol bulunan elementidir.

Arsenik, yüzeysel sularda (aerobik şartlarda) As(V) şeklinde ve yeraltı sularında (anaerobik şartlarda) ise As (III) formunda bulunur.

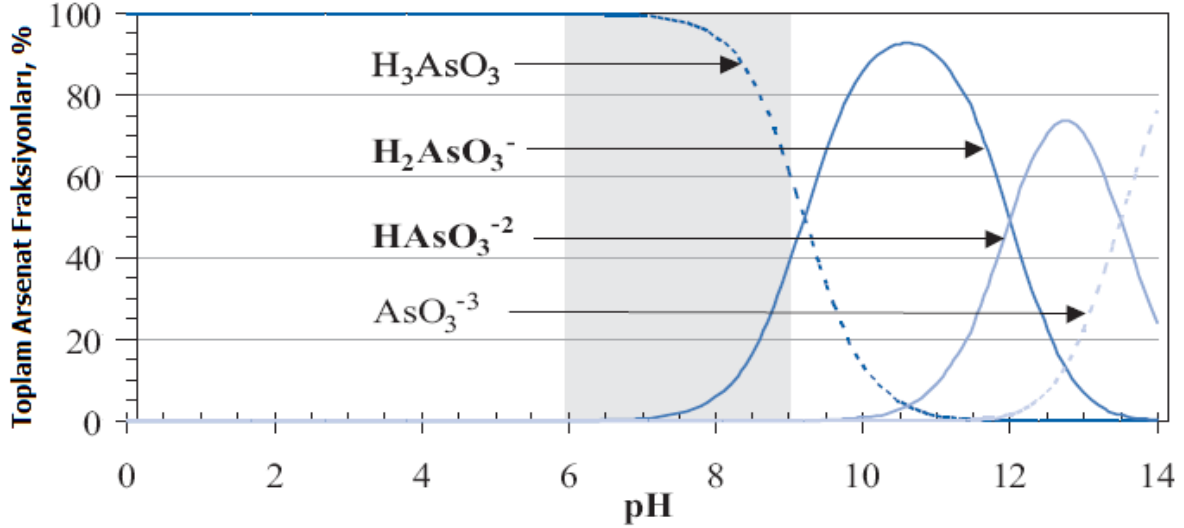
Arsenik türlerinin suda bulunma türleri ortamın pH'na ve redoks potansiyeline bağlıdır. Düşük pH ve orta indirgeme şartlarında (>100 mV), arsenik (3) termodinamik olarak stabildir ve arsenik (3) bileşikleri, genelde ($H_3AsO_3^0$, $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$ ve AsO_3^{3-} şeklinde bulunur.



Şekil 1 pH-Eh Bağlı Olarak Arsenik Türlerinin Değişimi

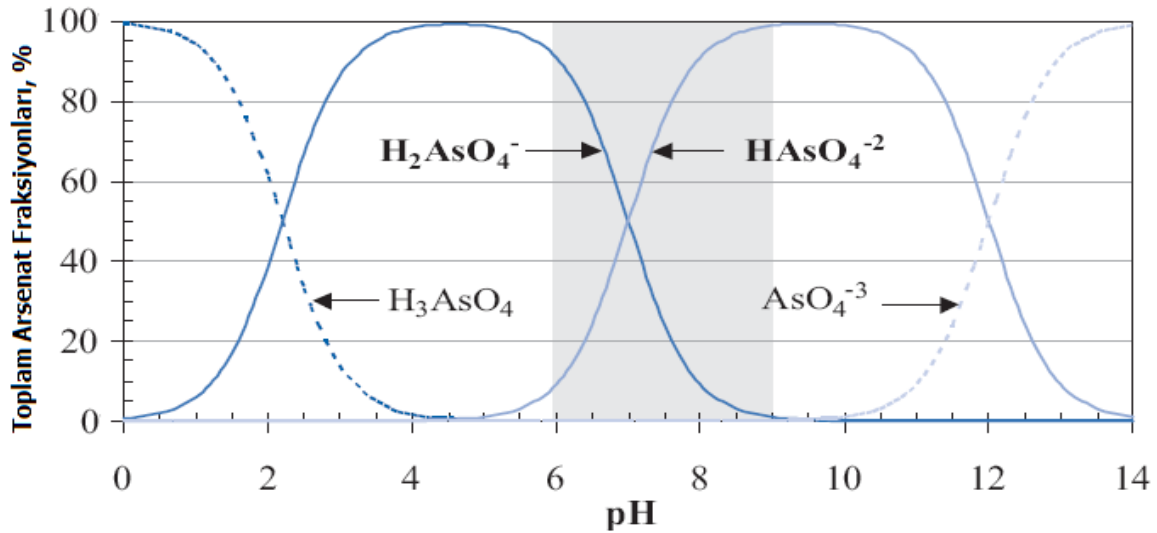
Doğal sularda arseniğin iki hakim bileşiği As (3) ve As (5) olarak bilinen AsO_3^{3-} ve AsO_4^{3-} dür. Arsenik (3) bileşikleri, arsenat (5)'e göre suda 4 ila 10 kat çözünür halde bulunur. Arseniğin pH'a bağlı olarak değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Oksidasyon şartlarının hakim olduğu durumlarda arsenik arsenik (3) halinde bulunur. pH bağlı olarak arsenik (5) türleri Şekil 3'de verilmiştir.

Arsenik(3), suyun pH'ına bağlı olarak değişik formda bulunur. As(3), pH 2 ila 7 arasında genel olarak H_3AsO_3 halinde bulunmaktadır. Suyun pH'ı 8 üzerinde olduğu zaman yine ortamın pH'ına bağlı olarak As(3), $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$, AsO_3^{-3} halinde bulunmaktadır.



Şekil 2 pH'ına Bağlı Olarak As(3) Türleri

As (5), su ortamının pH'ına bağlı olarak değişik formda bulunur. Bu formlar Şekil 3'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3 pH'ına Bağlı Olarak As(5) Türleri

Yeraltı suları genel olarak anaerobik olduğu için tüm arsenik bileşikleri genel olarak ortamında şartlarına da bağlı olarak As (3) halinde bulunur. Oksijen bakımında zengin aerobik şartlarda ise arsenik genel olarak As (5) halinde bulunur. Çünkü arsenik (3), su içinde bulunan oksijeni kullanarak As (5) dönüşür.

Arsenik doğal suyun pH ve redoks potansiyeline bağı olarak birkaç formda bulunur. Doğal suların tipik pH değeri olan 5-8 arasında genel olarak iki oksitleme halinde bulunur. Bunlar genel olarak Arsenik (3) bileşığı H_3AsO_3 iyonu halinde ve Arsenik (5) $H_2AsO_4^-$ ve $HAsO_4^{2-}$ iyonları halinde suda çözüdür halinde bulunur.

3 ARSENİĞİN SAĞLIK ÜZERİNE ETKİSİ

Sınır değerlerin üzerinde kirleticiler içeren suların, içme suyu olarak şebeke sistemine verilmesi insan sağlığı açısından çok riskli olup kısa ve uzun vade de geçici ve kalıcı olumsuz, kanser gibi, etkiler gösterir.

İçme suyundaki arseniğin sağlık üzerine etkisi arsenik bileşiğinin formuna, alınan dozaja ve maruz kalma süresine bağlı olarak değişir. İçme suyu içindeki inorganik arsenik 3 bileşiği, insan sağlığı üzerinde en negatif etki gösterir. Özellikle inorganik arsenik bileşikleri, organoarsenik bileşiklerine göre çok daha toksik etki göstermektedir. Arsenit (3), arsenata (5) göre insan sağlığı üzerinde 30 ila 40 kat daha yüksek toksit etki göstermektedir. İçme suyunda farklı arsenik bileşiklerinin toksisite etkisi;

arsenite > arsenate > mono-metilarsonat (MMA) > dimetilarsinat

şeklinde değişmektedir. Dolayısıyla içme suyu kaynaklarında arsenik bileşiği kompozisyonu mutlaka tespit edilmelidir.

Araştırmalar, arsenit [As (III)] ve arsenat [As (V)]'ın insan vücudundaki birçok organı etkileyebileceğini göstermiştir. Yetişkin bireyler için öldürücü doz 1- 4 mg As/kg vücut ağırlığıdır.

Arsenik bileşiklerinin sudaki çözünürlüğü arttıkça toksisite etkisi de artmaktadır.

İçme suyundaki inorganik arsenik (3) bileşiklerinin %80-90 bağırsaklar tarafından absorbe edilir. Organoarsenik bileşiklerinin çoğu ise idrar yolu atılır. Çok azı bağırsaklar tarafından absorbe edilmektedir.

Arsenik konsantrasyonu 60.000 µg/L olan bir suyu içen kişi derhal ölür.

Sınır değerlerin üzerinde arsenik içeren sular, uzun süreli içme suyu olarak kullanıldığında; deri kalınlaşması, nörolojik bozukluğu, adale zayıflığı, iştah eksikliği ve bulantı yanında deri, akciğer, mesane ve böbrek kanserine neden olduğu tespit edilmiştir. Kanser gerçekleşmesi yaklaşık olarak 10 yıl gibi bir süre almaktadır.

10 µg/L'den yüksek 50 µg/L'den düşük konsantrasyonlarda arsenik içeren sular, içme suyu olarak uzun süreli kullananlarda akciğer ve mesane kanserinde ve deri yaralarında artışlar gözlenmiştir.

Sudaki arseniğin el yıkama ve yıkanma gibi deri yolu ile vücuda girme söz konusu değildir.

Dermatolojik belirtiler: doz-yanıt ilişkileri;

1. Bir kişi günde 40 µg/kg gibi yüksek dozda arsenik içeren su içtiği zaman 6 ay ile 3 yıl süre içinde o kişinin derisinde hiperpigmentasyon görülebilir.
2. Bir kişi günde 10 µg/kg gibi düşük dozda arsenik içeren su içtiği zaman 5 ile 15 yıl içinde o kişinin derisinde hiperpigmentasyon görülebilir.
3. Belli süre içinde deride kalınlaşma (hiperkeratozis) genellikle hiper pigmentasyonun ilk görüntüsünden sonra meydana gelir.

İçme suyundaki arsenik konsantrasyonuna ve alınma süresine bağlı olarak kanser riski arasındaki ilişki Tablo 2’de verilmiştir. İçme suyundaki arsenik konsantrasyonu ve maruz kalma süresi arttıkça kanser riski de o oranda artmaktadır. İçme suyunda arsenik konsantrasyonu 50 µg/L mertebesinde olduğu zaman kanser olma riski %1 mertebesinde dir. Suda arsenik konsantrasyonu azaldıkça kanser riski de o oranda azalmaktadır. WHO verilerine göre içme suyunda arsenik konsantrasyonu 10 µg/L altında olduğunda deri kanseri riski sadece 5000’de bir mertebesinde dir.

Tablo 2 İçme Suyunda Arsenik Konsantrasyonuna Bağlı Olarak Kanser Riski

İçme suyunda arsenik konsantrasyonu (µg/L)	Yaklaşık Toplama Kanser Riski (Kişinin 2 L/gün su içtiği kabul edilir)
0.5	10,000’de bir
1	5,000’de bir
3	1,667’de bir
4	1,250’de bir
5	1,000’de bir
10	500’de bir
20	250’de bir
25	200’de bir
50	100’de bir

10 µg/L üzerinde arsenik içeren suların uzun süreli içme suyu olarak kullanılması halinde, deri kalınlaşmaya (hiperkeratozis) ve pigment mutasyonları yanında deri, akciğer, mesane ve böbrek kanserinde artan riskler olduğu görülmüştür.

Yapılan bir çalışmaya göre çocuklar, 10–11 µg/L ve yetişkinler, 30 µg/L arsenik içeren suları, içme suyu olarak kullandıkları zaman IQ’larının zarar gördüğü tespit edilmiştir.

50 µg/L arsenik içeren sular içme suyu olarak kullanıldığında deri keratozu (kalınlaşması) görülmektedir.

Arsenik konsantrasyonu 20–91,5 µg/L olan sular içme suyu olarak kullanıldığı zaman atardamar, alteriyol ve kılcal damar hastalığına neden olduğu tespit edilmiştir.

Türkiye’de 10 µg/L üzerinde arsenik içeren suların içildiği şehirlerde kanser, hiperkeratozis, hiperpigmentasyon ve atardamar, alteriyol ve kılcal damar hastalıkları bilimsel bir şekilde incelenmelidir.

Dünya sağlık teşkilatı (WHO) tavsiyesine göre içme suyunda arsenik, sınır değer 10 µg/L altında olmalıdır. 2005 yılında yürürlüğe giren “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmeliği’nde” belirlenen üst sınır değerlerine göre içme suyunda arsenik konsantrasyonu 10 µg/L’den yüksek olamaz.

Birçok ülke, hala WHO’nın daha önceki 50 µg/L sınır değerini uygulamaktadır. Çeşitli ülkelerde içme suyunda maksimum arsenik kirleticisi seviyesi (MCL) değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3 Çeşitli Ülkelerde İçme Suyunda Maksimum Arsenik Kirleticisi Seviyesi ile İlgili İzin Verilen Sınır Değerler

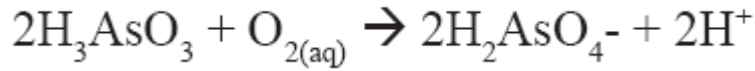
Ülkeler	Maksimum İzin Verilen Limitler (µg/L)
Arjantin	50
Bangladeş	50
Çin	50
Şili	50
Hindistan	50
Meksika	50
Nepal	50
Malezya	10-50
Fransa	15
Yeni Zelanda	10
Tayvan	10
Amerika	10
Vietnam	10
A.B.	10
Japonya	10
Türkiye	10
Dünya Sağlık Teşkilatı	10
Avusturalya	7

Doğal sularda arsenik dünya çapında büyük bir problemdir. Arsenik kirliliği birçok çalışmada araştırıldı. Dünyada Hindistan, Bangladeş ve Nepal gibi 21 ülke suda bulunan arsenik yüzünden risk altındadır.

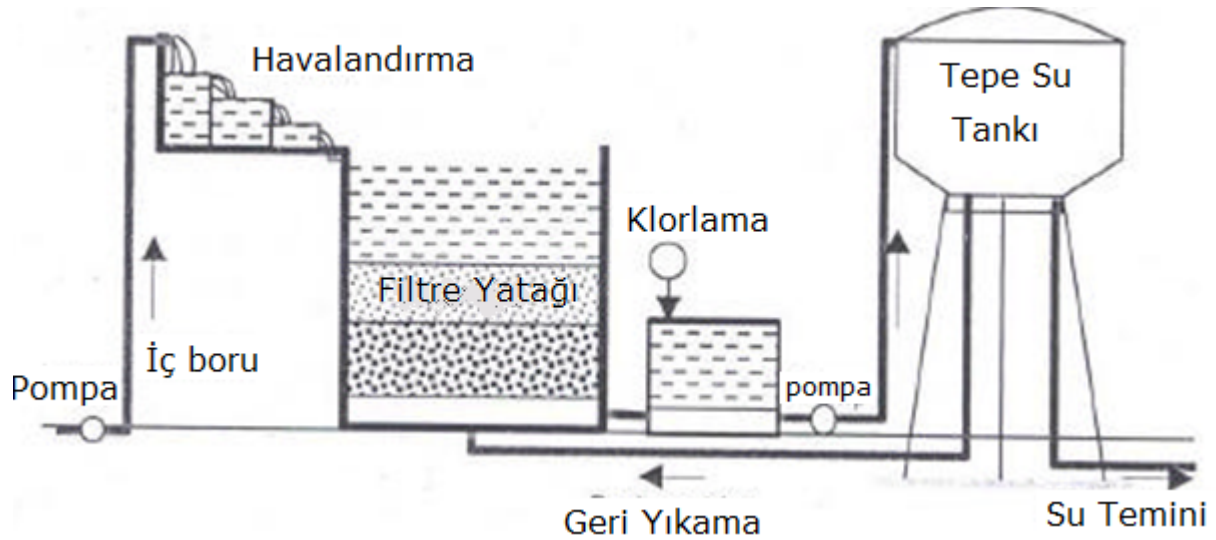
4 İNDİRGEME/YÜKSELTGEME

Su ortamına elektron alan (yükseltgeyici) ve veren (indirgeyici) kimyasallar ilave edilerek arseniğin kimyasal yapısı değiştirilebilir. İndirgeme yükseltgeme reaksiyonları, arseniği su ortamından gidermez. Fakat diğer reaksiyonlar için ortamı optimize eder. Arsenik içeren suyun havalandırılma ile oksidasyonu mümkün olduğu halde, proses uzun sürede gerçekleştiği için, ön oksidasyon teknolojisinde oksidant olarak genelde klorlama, potasyum permanganat ve ozon kullanılır.

Hava ile arsenik (3)'ün arsenik (5)'e oksidasyonu en ekonomik ve basit metottur. Fakat reaksiyon oldukça yavaş ve süre uzundur. Bu yüzden yeterli havalandırma alanına ihtiyaç vardır. Yeterli havalandırma ile suda bulunan inorganik ve organik yapıları arsenik (3) bileşikleri arsenik (5) bileşiğine okside olur. Havanın oksijeni ile arsenitin arsenata dönüşüm reaksiyonu aşağıda verilmiştir. Suyun pH'ı 8,3'den 6'a düşürülmesi halinde havanın oksijeni ile reaksiyon daha hızlı gerçekleşmektedir.



Hava ile oksidasyon ve filtrasyona bir örnek Şekil 4'de verilmiştir. Havalandırma işleminden sonra mutlaka filtrasyon işlemi uygulanmak zorundadır.



Şekil 4 Havalandırma ve Filtrasyonla Arsenik Giderimi

Arsenik (3), klor gazı, hipoklorit, ozon, permanganat, hidrojen peroksit ve fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{+2}$) gibi kimyasallar ile doğrudan okside edilebilir. Mangan oksitler gibi bazı katı maddelerde arsenik (3)'ü okside eder.

Hem klorlama hem de potasyum permanganatla oksidasyonda ortamın pH'nın 6,3-8,3 arasında olması istenir. Bu pH aralığında oksidantlar, birkaç dakika içinde arseniti (3) arsenata (%) okside eder. Hipoklorür ile arsenitin arsenata dönüşümü aşağıdaki denklemde verilmiştir. Stokiyometrik değerin 3 katı hipoklorür kullanmak gereklidir. Reaksiyon süresi 42 saniyedir. Sülfür gibi maddeler içermesi halinde reaksiyon süresi 60 saniyeye kadar çıkar.



Klor sıvı sodyum hipoklorit veya klor gazının suda çözülmüş hali kullanılır. Klor gazı ve sodyum hipoklorit ucuz ve kolay olarak temin edilen maddelerdir. Ticari hipoklorit bileşiği %5,25-%12,5 oranında satılır. Tankların hacmi 7 ila 21 günlük hipokloriti depolayacak kapasite de olması tavsiye edilir. Klor gazının uygun şartlarda depolanması gereklidir. Aksi durumda gaz halindeki klor hızlı şekilde kaybolur.

Okside edilecek su içinde organik maddeler bulunuyorsa klor bu maddelerle reaksiyona girerek, trihalo metan gibi, organo klor yan ürün bileşikleri oluşturur. Klor oksidasyon yapılacaksa sudaki toplam organik madde (TOC) miktarının mutlaka tespit edilmesi gereklidir. Halbuki permanganat dezenfektan değildir ve yan ürün oluşturmaz, rejenere edilebilir fakat çok pahalıdır.

pH 9,2'un altında arseniği (3) değiştirmek pek mümkün olmadığı için arsenik (5)'in giderimi yoğun uygulanmaktadır. pH 9,2 altında arsenik (3) genel olarak H_3AsO_3 halinde bulunur. Bu yüzden çoğu sistemlerde arsenik (3) önce arsenik (5) döndürülür.

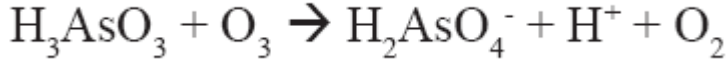
Sadece oksidasyon kademesi ile arseniği gidermek mümkün değildir. Oksidasyon işleminden sonra mutlaka pıhtılaştırma, adsorpsiyon, filtrasyon veya iyon değiştirici işlemi uygulanır.

Ozon, dezenfeksiyon, oksidasyon, koku ve tat giderimi için kullanılmaktadır. Ozon bir gazdır. %0,1 konsantrasyonda üretilmektedir. Ozon arsenik (3)'in yanında, demir(2), mangan(2), HS^- ve organik maddeleri de okside eder. Dolayısıyla dozajını iyi ayarlamak gereklidir.

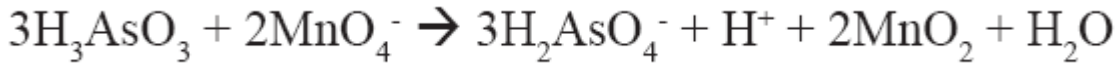
Avrupa ülkelerinde ve A.B.D'de artan bir şekilde ozon oksidant olarak kullanılmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde ozon henüz geniş olarak kullanılmamaktadır. Ozon filtrasyon işleminden önce 2 mg/L dozda bir dakika temas süresi içinde arsenik (3) arsenik (5) oksidasyonu yanında demir (2) ve mangan (2) de oksidasyonunda etkili olmaktadır. Aynı ozon dozunda arsenik (3)'ün yarılanma süresinin 4 dakika olduğu görülmüştür. Ozon kuvvetli

bir oksidanttır. Klor gazı veya hipokloritin aksine artırılmış suya nihai bakiye bırakmaz. Ancak şebeke sisteminde bakiye ozona izin verilmemelidir.

Ozonla arsenitin arsenata dönüşümü aşağıdaki denklemde verilmiştir. Stokiyometrik değerin pratikte 3 katı ozon kullanmak gereklidir. Reaksiyon süresi 18 saniyedir. Suyun sülfür gibi maddeler içermesi halinde reaksiyon süresi 132 saniyeye kadar çıkar.



Permanganat (MnO_4^-) arsenik(3)'in yanında, demir(2), mangan(2), HS^- ve organik maddeleri de okside eder. Ayrıca tat ve kokuyu da giderir. Bu yüzden uygulanacak permanganat dozajı iyi tespit edilmelidir. Permanganat ile arsenitin arsenata oksidasyonu reaksiyonu aşağıda verilmiştir. Bu reaksiyon 36 saniye gibi kısa sürede oluşur. Sülfür gibi maddeler varsa reaksiyon 54 saniyeye kadar çıkabilir.



Zayıf bir dezenfektandır.

Potasyum permanganat gelişmekte olan ülkelerde geniş olarak elde edilmektedir. Çünkü bu ülkelerde az miktarda dahi tropikal antibiyotik olarak kullanılırdı. Uzun raf ömürlü oldukça stabil maddedir. Genelde oksidasyon işlemlerinde 60 g/L doygun çözelti halinde uygulanır.

Oksidasyon işlemi sonucu MnO_2 bakiyesi oluşur. Bakiye mangan dünya sağlık teşkilatının belirlediği 0,5 mg/L değerine aşmamalıdır. MnO_2 bakiyesini gidermek için filtrasyon işlemi uygulanır.

Ham su yüksek oranda çözülmüş demir içeriyorsa hidrojen peroksit etkili bir oksidant olarak kullanılabilir. Arsenik kirliliğini birlikte bertaraf ettiği için önemli bir oksidanttır.

5 ARSENİK GİDERME

Arsenikle kirlenmiş suyun kimyası ve bileşimi, arsenik artırımını belirleyen başlıca faktörlerdir. Mevcut arıtma teknolojilerinin çoğu, arsenatın pH 9.2'nin altında ağırlıklı olarak şarj edilmediği için, arsenat için daha verimli olmaktadır. Bu arsenik üç değerli formunu, çöktürme, adsorpsiyon veya iyon değişimi için daha az kullanılabilir kılmaktadır. Buna göre, arıtma teknolojilerinin, arsenitten arsenat'a oksidasyonu birinci kademe, takiben ikinci kademe arsenatın uzaklaştırılması kapsayan iki aşamalı bir yaklaşım kullanarak daha etkili olduğu düşünülmektedir. **Şekil 5**, arseniğin sudan uzaklaştırılması için kullanılabilen mevcut teknolojileri özetlemektedir.



Şekil 5 Sulardan Arsenik Giderme Teknikleri

5.1 PIHTILAŞTIRMA, YUMAKLAŞTIRMA VE ÇÖKTÜRME

Arsenatı birçok kimyasal madde ile su da az çözünür yapıya dönüştürerek çöktürmek mümkündür. En çok kullanılan kimyasallar kireç, demir klorür ve alüminyum sülfattır. Kireç ile %90, alüminyum sülfat ile %90 ve demir bileşiği ile %95 oranında arsenik (5) gidermek mümkündür.

Çöktürme işlemi ile, kireç gibi, suda az çözünür haldeki arsenatı, kalsiyum arsenat haline dönüştürerek çöktürmek mümkündür. Arsenat içeren suya kireç ilave edilerek suyun pH'nı 10'un üzerine yükseltilir. Su içindeki arsenat kalsiyum ile reaksiyona girerek kalsiyum arsenat halinde çöker. Arsenatı çöktürmek için ortamın pH'nın 10,5 üzerinde olması istenir. Yani su ortamının pH aralığının 11-12 olması tavsiye edilir. Bu esnada su içinde bulunan magnezyumda magnezyum hidroksit çökerken arsenatı da birlikte çöktürür. pH 10,5 altında birlikte çöktürme ile arsenat ancak %10 oranında bertaraf edilebilir.

Karbon dioksitli ortamlarda kalsiyum arsenatın stabil olması mümkün değildir. Karbon dioksitli ortamda kalsiyum, kalsiyum karbonata ve arseniğe dönüşür. Böylece arsenik suda çözünür hale geçer. Fazla kireç ilavesiyle çözünür haldeki arsenik konsantrasyonunu 10 µg/L altına indirmek mümkündür. Oluşan katı madde çöktürme ve filtrasyonla ortamdan giderilir. Arsenat içeren su içine yumaklaştırıcı ilave edildiği zaman belli süre karıştırma sonucu yumak oluşur. Arsenik ilave edilen kimyasala bağlanarak çözünmez hale dönüşür. Oluşan katı madde askıda kalır. Pıhtılaştırma işleminden sonra yumaklaştırma işlemi ile katı maddeler bir araya getirilerek yumaklar büyür. Büyüyen yumağın çökmesi daha kısa sürede olur. Çöktürme İşleminden sonra geriye kalması muhtemel askıda katı maddeler filtrasyon işlemi ile giderilir.

Kireçle arsenat gideriminde aşırı derecede çamur oluşur. Tipik çamur konsantrasyonu %1-4 arsenik içerir. Çamur bertaraf edilmeden önce yoğunlaştırılmalı ve suyunun alınması gereklidir. %1-4 arsenik içeren arıtma çamuru tehlikeli atıktır ve özel olarak bertaraf edilmesi veya arseniğin geri kazanılması gereklidir

Kimyasal bir madde ilave edilerek arsenikle bir reaksiyon oluşturarak arseniği çözünür formdan çözünür olmayan forma dönüştürmek mümkündür. Arseniği arsenik (3) sülfür, alüminyum arsenat veya demir arsenat halinde sudan ayrıştırarak çöktürmek mümkündür.

As₂S₃ halinde arseniği çözünür olmayan forma dönüştürmek için su ortamının pH'nın 4 altında olması istenir.

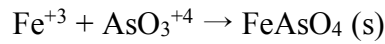
Arsenik gideriminde en fazla kullanılan metotlardan biride yumaklaştırma ve filtrasyondur. Üç değerlikli metal tuzları (alüminyum sülfat, demir klorür gibi) kullanılarak yumaklaştırma ve filtrasyon işlemi sonucu arsenat giderilir. Bu tür arıtma metodu ile arsenat, bulanıklık, demir, mangan, fosfat ve flüorür yanında birçok askıda ve çözünmüş katı madde giderilir. Önemli oranda koku, renk ve trihalometan oluşturma potansiyelini düşürmek mümkündür.

Pıhtılaştırma, yumaklaştırma ve filtrasyon işlemi esnasında arsenat, üç temel mekanizma ile giderilir. Bunlar:

- Çökeltme: Çözünür olmayan Al(AsO₄) veya Fe(AsO₄) bileşiklerinin oluşumu,
- Birlikte çöktürme: Çözünür arsenik türlerini büyüyen metal hidroksit fazı içinde birleştirme,
- Adsorpsiyon: Çözünür arseniğin çözünür olmayan metal hidroksitin dış yüzeyine elektrostatik bağlanması

şeklinde gerçekleşmektedir. Bu üç işlem birbirinden bağımsız olarak kirletici bertarafına katkıda bulunur. Arsenat bertarafında sadece çökeltme önemli rol oynamaz, birlikte çöktürme ve adsorpsiyonda giderime katkıda bulunmaktadır.

Demir 3 bileşiği ile arsenatı, demir arsenatı;



FeAsO₄.2H₂O, halinde çöktürmek için ortamın pH'ının 7,2 ile 7,5 arasında olması yeterlidir. Ön klorlama işleminden sonra demir ile arsenat (5) gideriminde verimlilik %99'nın üzerindedir. As (3) giderimi çok düşüktür. Fe(OH)₃ çökeleği, As(5)'i adsorbe eder. Klorlu oksidasyon ve kloruz şartlara göre pıhtılaştırma ve yumaklaştırma ile arsenik giderimi özetle Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4 Pıhtılaştırma ve Yumaklaştırma ile Arsenat Giderimi

Kimyasallar	Çalışma Şartları	Giderim (%)
Alüminyum	Cl ₂ ile oksidasyon (pH = 7)	90
	Cl ₂ 'suz	10
Demir 3 sülfat	Cl ₂ ile oksidasyon (pH, 7,2-7,5)	99
	Cl ₂ 'suz	50-60
Kireç	Cl ₂ ile oksidasyon (pH>11)	90
	Cl ₂ 'suz (pH>11)	80
Demir 3 Klorür	Cl ₂ ile oksidasyon ve Fe/As oranı > 30	90-100
Alüminyum	Cl ₂ ile oksidasyon (6,8<pH<8,5)	67-88
Polialüminyum klorür	Cl ₂ ile oksidasyon	87-88

Genel olarak pH'ı kireçle ayarlanmış suya öncelikle pıhtılaştırıcı ilave edilir ve hızlı ve yavaş karıştırma işlemlerinden sonra oluşan yumakların çökmesi sağlanır. Hızlı karıştırma işlemi

için bir dakikalık süre yeterlidir. Yavaş karıştırma için 20 dakika yeterlidir. Çöktürme işlemi genelde dikdörtgen tanklarda yapılır. Demir bileşiği piyasada kolay bir şekilde temin edilmektedir. Demir ile elde edilen yumaklar alümlü yumaklardan ağırlıkça daha etkindir.

Alüminyum bileşiği ile pıhtılaştırma, yumaklaştırma ve çöktürme işlemi ile As (V) gidermede optimum pH aralığı 6 ila 7 arasındadır. En iyi sonuç bu pH aralığında alınır. Daha yüksek pH aralığında giderme verimliği ciddi şekilde düşer. Suyun pH, 7'den 9 çıktığı zaman arsenik giderimi %90'dan %10 düşer.

Alüminyum bileşiği ile As (3) giderilemez.

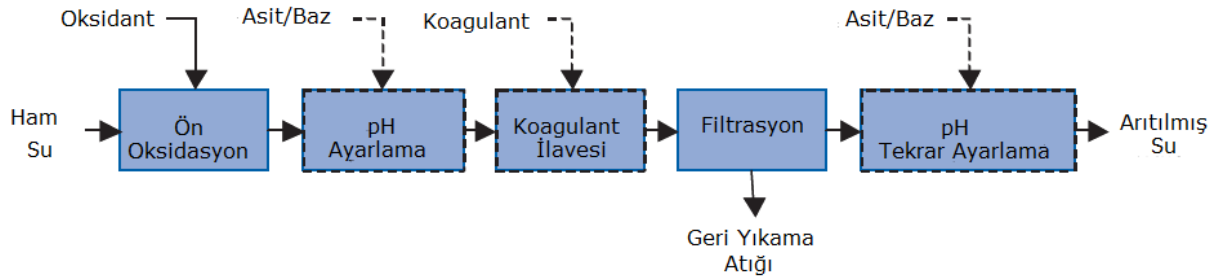
Arsenit (3), ön klorlama işlemi ile arsenata (5) döndürdükten sonra alüminyum bileşiği ile %98 oranında bertaraf etmek mümkündür.

Alüminyum bileşiği piyasada bol olarak bulunur. Alüminyum bileşiğinin ve işletmenin maliyeti düşüktür.

pH'ı ayarlanmış su alüminyum sülfat çözeltisi konur. Bir dakika hızlı, 20 dakika yavaş karıştırma işlemi ile pıhtılaştırma ve yumaklaştırma işlemi yapılır. Çöktürme ve filtrasyon işleminden sonra su kullanıma sunulur.

Filtrasyon işlemi olmaksızın pıhtılaştırma-yumaklaştırma ve çöktürme ile arsenik ancak %30 oranında bertaraf edilebilmektedir. Pıhtılaştırma-yumaklaştırma ve çöktürme işleminden sonra 1,0 mikron gözenek çaplı filtre arasından geçirildiği zaman arsenik %96 oranında bertaraf edilmektedir.

Pıhtılaştırma, yumaklaştırma ve filtrasyon işlemi arsenatin giderimi **Şekil 6**'de verilmiştir.

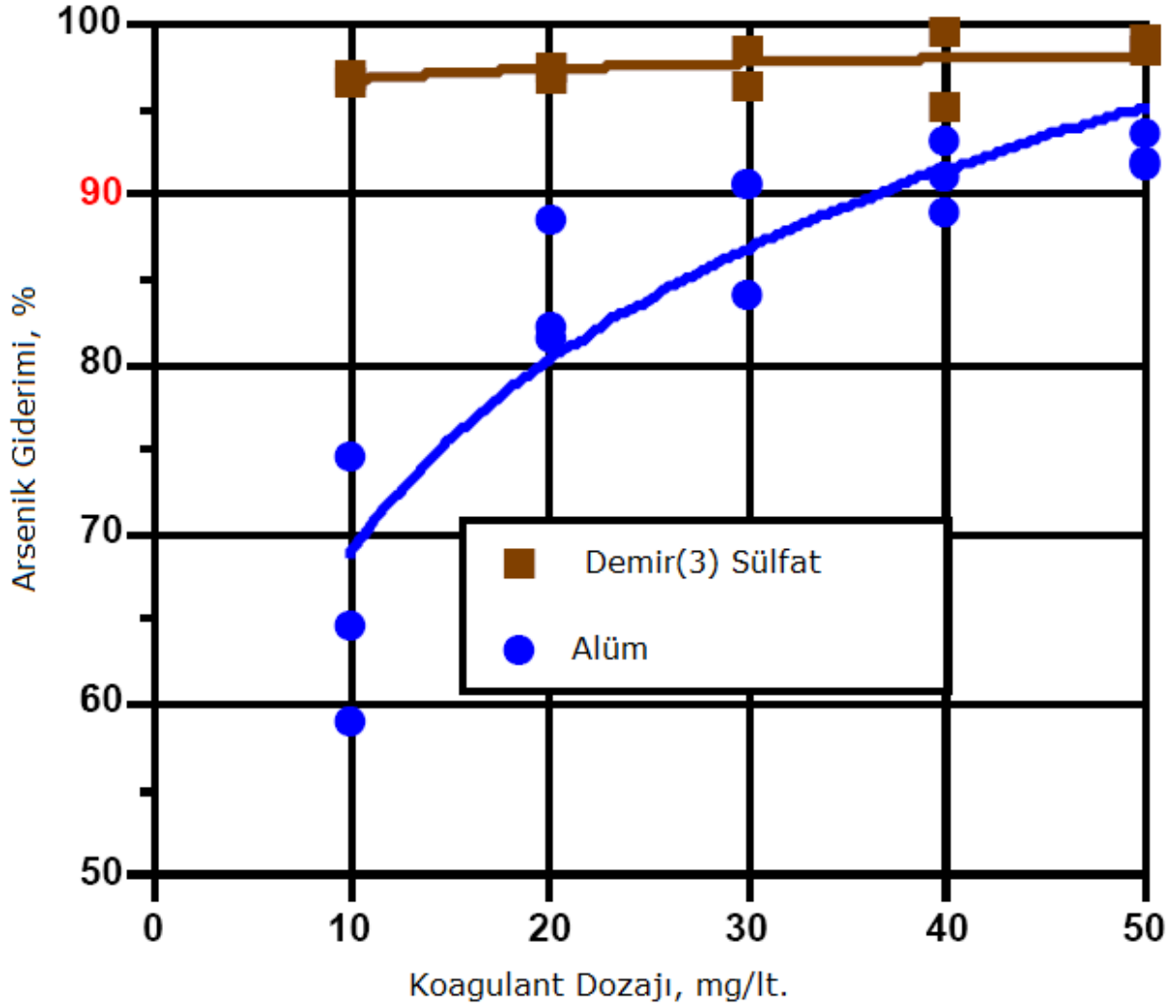


Şekil 6 Yumaklaştırma ve Filtrasyonla Arsenatin Giderimi Akım Şeması



Şekil 7 Arsenik (V) Gideriminde Pıhtılaştırma ve Filtrasyon Sistemi

Kullanılan pıhtılaştırıcı dozajına bağlı arsenik giderimi **Şekil 8**'de verilmiştir. **Şekil 8**'de görüldüğü gibi arsenik giderimi için yüksek miktarda alüm kullanılması gerekirken demir sülfat bileşiği ile daha düşük dozajda sonuca ulaşmak mümkündür. Demir kullanıldığı zaman renk kirliliği oluşur.



Şekil 8 Pıhtılaştırma ve Filtrasyonla Arsenik Giderimi

Pratik uygulamalarda iki kademe fitrasyon uygulaması ile arsenik daha iyi bertaraf edilmektedir.

Kimyasal çöktürme metodu ile arsenik giderim yatırımı nispeten ekonomik, işletmesi basit ve bilinen kimyasallar kullanılır. Dezavantajı, Toksik çamur oluşur, Ön-oksidasyon gerekebilir, zararlı dezenfeksiyon yan ürün üretilebilir, temel olarak As (V) giderir, As (III) nispeten giderir, Kimyasal dozlama, oksidasyon basamakları, çöktürme ve filtrasyon gerekir.

5.2 İYON DEĞİŞTİRME

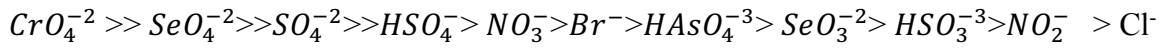
Çeşitli katı maddeler, demir ve alüminyum hidroksit yumakları dahil, çözünmüş arsenik için kuvvetli bir affiniteye sahiptir. Arsenik, bu katıların yüzeyindeki sorplama bölgelerine kuvvetli bir şekilde çekilir. Böylece çözelti içinden etkili bir şekilde arsenik bertaraf edilir. İyon değiştirici absorpsiyonun özel türü olarak değerlendirmeye alınır. İyon değiştirmede su içinde çözünür halde bulunan iyonlar ile iyon değiştiricideki bir iyonun yer değiştirmesi ile bu

işlem olur. Su da çözünür halde bulunan bazı iyonlar kuvvetli bir şekilde iyon değiştirici tarafından yer değiştirir.

Sentetik iyon değiştirici reçineler suda çözünür halde bulunan bir çok arzu edilmeyen çözünür haldeki maddeleri, çoğu sertliği gidermek için geniş olarak kullanılmaktadır. Yüklü fonksiyonel gruplar, kovalent bağlanma yoluyla matrise hücum ettirilir. Bu grupları dört grup altında toplamak mümkündür. Bunlar;

1. Kuvvetli asidik (e.g. sulfonat $-SO_3^-$)
2. Zayıf Asidik (e.g. karboksilat, $-COO^-$)
3. Kuvvetli bazik [e.g. kuaterner amin, $-N^+(CH_3)_3$]
4. Zayıf Bazik [yani üçüncü derece amin, $-N(CH_3)_2$]

Asidik reçineler, negatif olarak şarj edilir ve katyonlar (Na^+) ile yüklenebilir. Çünkü su arıtımı esnasında diğer katyonlarla kolayca yer değiştirebilir. Bu tür katyon değiştirici sert suları saflaştırmak için çok genel olarak uygulanır. Ters olarak, kuvvetli temel reçineler, klorür, Cl^- , gibi anyonlarla ön arıtmaya tabi tutulur ve geniş aralıktaki negatif yüklü türleri bertaraf etmek için kullanılır. Bir tip bir kuvvetli-baz esaslı anyon reçineler için bazı genel anyonların aşağıda nispi affiniteler verildi.



Çeşitli kuvvetli baz esaslı iyon değiştirici reçineler, piyasada kolayca temin edilebilmekte ve sudan arsenatı gidermek için etkili olarak kullanılmaktadır. Giderme sonucu arsenik konsantrasyonu $1 \mu g/L$ arsenik'in altına indirebilmektedir. Yükle olmayan arseniti bertaraf etmek mümkün değildir. Eğer su ortamında arsenik arsenit halinde ise öncelikle arsenata okside edilmesi gereklidir.

Klasik sülfat seçici reçineler arsenat giderimi için özellikle uygundur. Nitrat seçici reçineler de arseniği giderirler fakat arsenik kırılması daha erken meydana gelir. Çok genel olarak, reçineler yüzeyde klorür iyonu oluşturmak için HCl asidi ile ön işleme tabi tutulur. Klorür arsenat ile kolayca yer değiştirir. Bu reçineler bromür veya asetat gibi diğer anyonlarla da kullanıma hazır hale gelebilir.

İyon değiştirici içinde arıtılacak suyun hidrolik bekleme süresinin 15 dakika olması idealdir. Paket yataklar, 1,5-3 dakika Boş Yatak Temas Zamanlı olarak dizayn edilmektedir.

Arsenik(3) arsenata dönüştürüldükten sonra anyon iyon değiştirici reçinelerle oldukça verimli olarak bertaraf edilir. Su ortamının pH'ı 6,5'dan 8,5 çıktıķa iyon değiştiricinin sorplama kapasitesi düşmektedir.

Arsenat giderimi, pH ve giriş suyu konsantrasyonundan nispeten bağımsızdır. Diğer yandan, anyonlar içinde özellikle sülfat, kuvvetli bir etkiye sahiptir. Çünkü iyon değiştirici reçine öncelikli olarak arsenattan önce sülfatı alıkoymayı tercih eder. Bu yüzden ham su içinde sülfat konsantrasyonunun düşük olması tercih edilir. Aşağıdaki denklemlerden anlaşılacağı üzere arsenat giderimini etkileyen en önemli parametrelerden birisi sülfat konsantrasyonudur. Arsenik nüfus etmesinden (giriş suyu konsantrasyonunun %10 olarak kabul edilen) önce artırılabilir olan birçok yatak hacmi sayısı kabaca;

$$120 \text{ mg/L} > [SO_4^{-2}] \text{ için: Yatak hacimleri} = -606 * \ln[SO_4^{-2}] + 3,150$$

$$120 \text{ mg/L} < [SO_4^{-2}] \text{ için: Yatak hacimleri} = -200 * \ln[SO_4^{-2}] + 1,250$$

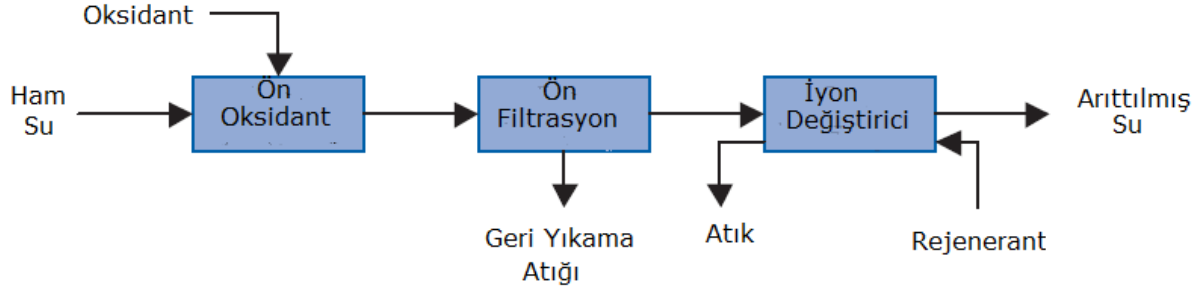
denklemler ile tespit edilebilir. Burada; SO_4^{-2} , ham sudaki sülfat konsantrasyonu, mg/L.

Düşük sülfat içeren sularda, iyon değiştirici reçine ile arsenat %95 oranında bertaraf edebilir. Arsenik nüfus etmesi meydana gelmeden önce yeterli arıtım için önemli miktarda yatak hacmine ihtiyaç vardır. USEPA, iyon değiştirici reçineler, su içindeki sülfat konsantrasyonu >120 mg/L ve TDS >500 mg/L aştığı zaman kullanılmaması gerektiği tavsiye edilmektedir. 25 mg/L gibi düşük sülfat konsantrasyonlarında arsenat içeren suların arıtımında çok olumlu sonuçlar vermektedir.

Ham su içinde askıda katı madde varsa önceden bertaraf edilmeli, yani bulanıklık 0,3 NTU'ün ve çözünmüş katı madde konsantrasyonu 500 miligram/L'nin altında olmalıdır

İyon değiştirici reçine arsenat bertarafında belli doygunluğa, yani arsenik giderimi düşmeye başladığı zaman rejenere edilmelidir. Rejenere işlemleri dört kademede olur. Bunlar, 1. Geri yıkama, 2. Klorür içeren tuzlu su veya kostik soda ile çalkalama ve yıkama, 3. Yavaşça su ile yıkama, 4. Hızlı olarak su ile yıkama kademelerinden oluşmaktadır.

İyon değiştirici ile arsenat giderimi kabaca **Şekil 9'** de gösterilmiştir.



Şekil 9 İyon Değiştiriciyle Arsenat Giderimi Akım Şeması



Şekil 10 İyon Değiştirici Sistem

İyon değiştirme tekniğinin avantajları, orta kapasite tesisler için tanımlanmış, proses pH'a az bağlı, özel iyon değiştirme reçinesi kullanmak gerekir. Dezavantajları, yüksek yatırım

maliyeti, yüksek teknoloji işletme ve bakım gerekir. Re jenerasyonunda çamur oluşur ve çamur bertarafı gerekir. As (III), gidermek çok zor. Reçinenin rejenerasyonu gerekir.

5.3 AKTİF ALÜMİNA

Aktif alümina, fiziksel ve kimyasal bir prostedir. Gözenekli ve granüle olan aktif alümina, alüminyum oksit (Al_2O_3), 200-300 m^2/g gibi çok geniş yüzey alanına sahiptir. Bu geniş yüzey alanı malzemeye çok sayıda bölgesinde sorpsiyon meydana gelir. Aktive edilmiş alümina, flüorür bertarafında da geniş olarak kullanılmaktadır. 1970 yıllardan beri sudaki arsenat bertarafında da kullanılmaktadır.

Arsenik giderme mekanizması zayıf bazik iyon değiştirme işlemine benzemektedir ve işlemde sık sık adsorpsiyon olarak bahsedilir. Alümina yüzeyinde arsenik bertaraf kinetiği, iyon değiştirici reçinelerden oldukça yavaştır. Bazı arsenik sızıntısı, aktifleştirilmiş alümina sistemlerinde sık sık not edilir.

Alüminanın arsenat giderme kapasitesi %95'dir. Fakat arsenit giderme kapasitesi çok değişkendir. pH 5,5 ila 6,0 arasında arsenat giderme çok yüksektir. Çünkü alümina protonlaşır. Asit anyonları sorpsiyon bölgelerinde arsenikle yarışacak yeterli konsantrasyonda değildir. Etkili arsenik giderimi için nötr ve bazik suyun pH'nın önceden ayarlanmasında yarar vardır. Suyun pH 8,2 de iken arsenik giderme kapasitesi hızla düşer.

Bir başka sorun ise harcanan rejenerantın bertaraf edilmesidir. Amorf ferri hidroksit üzerinde hem As(+3) hemde As (+5) adsorpsiyonunun aktif alüminadan daha etkili olduğu bildirilmektedir. As (+3) ve arsenik (+5)'in çıkarılması, pH-7'de sırasıyla yaklaşık 0,5 m mol/g Fe_2O_3 ve pH-4'te 1,5 m mol/g Fe_2O_3 'tür

28-48 mesh partikül çaplı aktif alümina, arsenik giderimi için kullanılır. 5 ila 8 dakika Boş Yatak Temas Süreli ortamda arsenik giderimi yapılır. Optimum pH aralığında çalışıldığı zaman aktive edilmiş alüminanın çalışma süresi iyon değiştirici reçineye göre çok yüksektir.

Suyun pH 6 civarında ise 1,6 g/L aktif alümina ile 4 mg/gr arsenat tutma kapasitesine ulaşılabilir. Su ortamının pH 7,4 -8 arasında ise kapasite 1 mg/gr düşmektedir. Bu durumda pH ayarlamak için asit ilave etmek gereklidir. Arsenattan başka birçok anyonda aktif alümina tarafından adsorplama kapasitesine sahiptir. pH 5,5-8,5 arasında aktif alüminanın çeşitli anyonları adsorplama kabiliyetleri sırasıyla;

$OH^- > H_2AsO_4^- > Si(OH)_3O^- > HSeO_3^- > F^- > SO_4^{2-} > CrO_4^{2-} >> HCO_3^- > Cl^- > NO_3^- > Br^- > I^-$

Adsorbsiyon kabiliyetinde görüldüğü gibi arsenik bileşiğinin arsenat halinde olması istenir. Aktif alümina, As (3) gideremez.

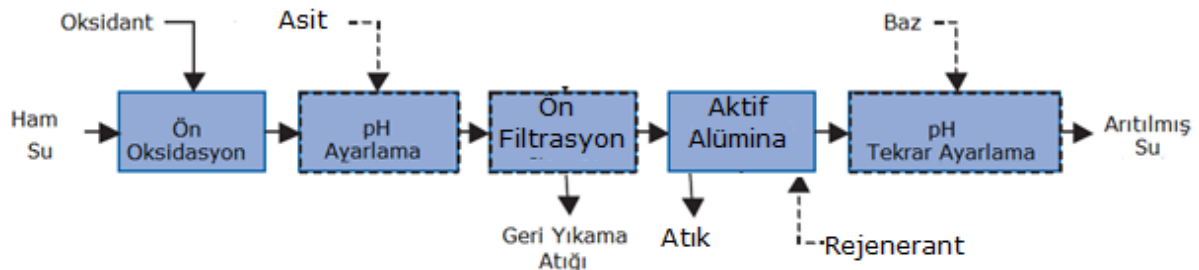
Sülfat ve klorür gibi maddeler, adsorbsiyon kapasitesini düşürür. Su ortamında bazı maddeler ve kirleticilerle ilgili sınır değerleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5 Aktifleştirilmiş Alümina Girişimde Bulunan Su Kalitesi

Parametreler	Problem Seviyesi (mg/L)
Klorür	250
Flüorür	2
Silika	30
Demir	0,5
Mangan	0,05
Sülfat	720
Çözünmüş Organik karbon	4
Toplam Çözünmüş Katılar	1.000

Aktif alümina yüzeyi dolduğu zaman yatak, %4 NaOH çözeltisi ile rejenere edilmelidir. Belli doygunluğa gelmiş aktif alümina NaOH çözeltisi ile çalkalanır. Böylece alümina yüzeyinde tutulmuş arsenik alınır. Takiben asit çözeltisi ile çalkalanır. Böylece yüzey tekrar pozitif yüklü hale dönüştürülerek aktif hale getirilir. Rejenerasyon oldukça zordur ve iyon değiştirici reçineden %50-%80 daha az komplekstir. Eksildiği kadar yeni aktif alümina ilave edilir.

Arsenatın aktifleştirilmiş alümina ile giderimi **Şekil 11**’de verilmiştir.



Şekil 11 Arsenatın Aktifleştirilmiş Alüminayla Giderimi

5.4 DEMİR OKSİT ESASLI SORBENTLER

Granüle demir hidroksit (GDH)’le arsenik giderimi basit filtrasyon işlemine dayanır. Filtrasyon yatağındaki GDH’le temas eden su içindeki arsenik alıkonur. GDH, aktif alüminaya göre 5 ila 10 kat daha fazla adsorplama kabiliyetine sahiptir. Geniş pH aralığında

GDH, arseniği adsorplamaktadır. GDH'nin adsorblama ömrü 2 ila 3 yıl arasında değişir. Arsenik bakımından doymuş GDH çöp depolama alanında bertaraf edilebilir.

Kum yüzeyi demir oksitle kaplanan sorbentin elde edilme maliyeti çok ucuzdur. Demir oksit sorbentin rejenerasyonuna gerek yoktur. Bu metotla hem arsenik(3) hem de arsenik(5) giderilir. Geri yıkama çamuru oluşmaz.

Demir esaslı sorbenlerle arsenik giderimi bilinen metotlardan biridir. Sabit yatak basınçlı kolonlar halinde uygulanır. Düşük pH şartlarında aktif alüminada olduğu gibi iyi sonuç vermektedir. Tavsiye edilen hidrolik bekleme süresi 5 dakikadır. Hidrolik yükleme oranı, 5 gpm/sft'dir.

Ham su içinde bulunan fosfat girişimde bulunur. 0,2 mg/L üzerinde her 0,5 mg/L fosfat konsantrasyonu arsenik absorplama kabiliyetini yaklaşık olarak %30 oranında azaltır.

Yeraltı suyunda doğal olarak mevcut bulunan demirin kullanımı, adsorpsiyon ile arsenik giderme için umut verici bir yöntemdir. Bu da kimyasalların eklenmesine gerek olmadığı anlamına gelir. Çözünmüş demirin oksidasyonu ile oluşan demir çökeltilerinin, pıhtılaşma, adsorpsiyon, çökeltme ve süzme yoluyla arsenik giderir. Ünitelerin verimliliği, suyun arsenik ve demir içeriğine bağlıdır. Arsenik türleri ile demir bileşiği arasındaki temas süresinin arttırılmasıyla arsenik giderimi artırılabilir.

5.5 TERS OSMOZ

Membran filtrasyonu ile arsenik, yarı geçirgen bir bariyer veya membrandan geçirilerek arıtılır. Membran bazı bileşenlerin geçmesine izin verirken diğerlerini engeller. Membran filtrasyonu daha az kullanılır, çünkü yüksek yatırım ve işletme maliyetlerine sahiptir ve diğer arsenik arıtma teknolojilerinden daha fazla miktarda konsantre su dahil atık üretir.

Ters osmoz tekniği, ilk konsantrasyonda 2ppm'ye kadar %98-99'a kadar As (+5) 'i giderebilir, fakat As (+3), H_3AsO_3 olarak nötr As (+3) formundan dolayı kısmen (%46-78) oranında giderilir. Yüksek As (V) giderme verimliliğine sahiptir. Bu teknik sadece kısmi veya tamamen tuzdan arındırma ile mümkün olacaktır.

Arsenik'in sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için teknolojiler mevcuttur. Uygun malzemeler üzerinde adsorpsiyon, özellikle pH 6,5-7,0'ın altında olduğunda ve mevcut fosfat, florür ve sülfat gibi düşük rekabet edici anyon seviyeleriyle birlikte, maliyet ve verimlilik nedeniyle tercih edilen bir teknik olabilir. Bu teknik benimsenmeden önce temas süresi, yüzey yükleme,

çalkalama hızı, partikül büyüklüğü, sıcaklık, pH vb gibi değişkenler optimize edilmelidir, çünkü bu değişkenler adsorban tarafından alım miktarı üzerinde kümülatif bir etkiye sahiptir.

Büyük, orta ve düşük kapasite tesislerde geniş olarak uygulanır. İşletmede minimum çalışan gerektirir. Yüksek toplam çözünmüş madde (TÇM) gideriminde de etkilidir. Kompak bir tesistir.

TO metodu ile Ca, Mg ve Na gibi kimyasalları da giderdiği unutulmamalıdır.

Ters osmoz tesisinin dezavantajları, yüksek kapasiteli tesisler için çoklu membran ünitesi gerektirir, aşırı enerji tüketir, yatırım ve işletme maliyeti yüksektir, membranların bakım maliyeti yüksektir, ön arıtma yapmak gerekir ve daha fazla konsantrat bırakır.

6 ARSENİK GİDERME MALİYETİ

İçme ve kullanma su kaynaklarında sınır değerlerin üzerinde arsenik kirliliğinin çeşitli metotlarla arıtılması ile ilgili gerekli yatırım ve yıllık işletme (bakım, onarım ve yenileme dahil) maliyetleri Tablo 6’de verilmiştir.

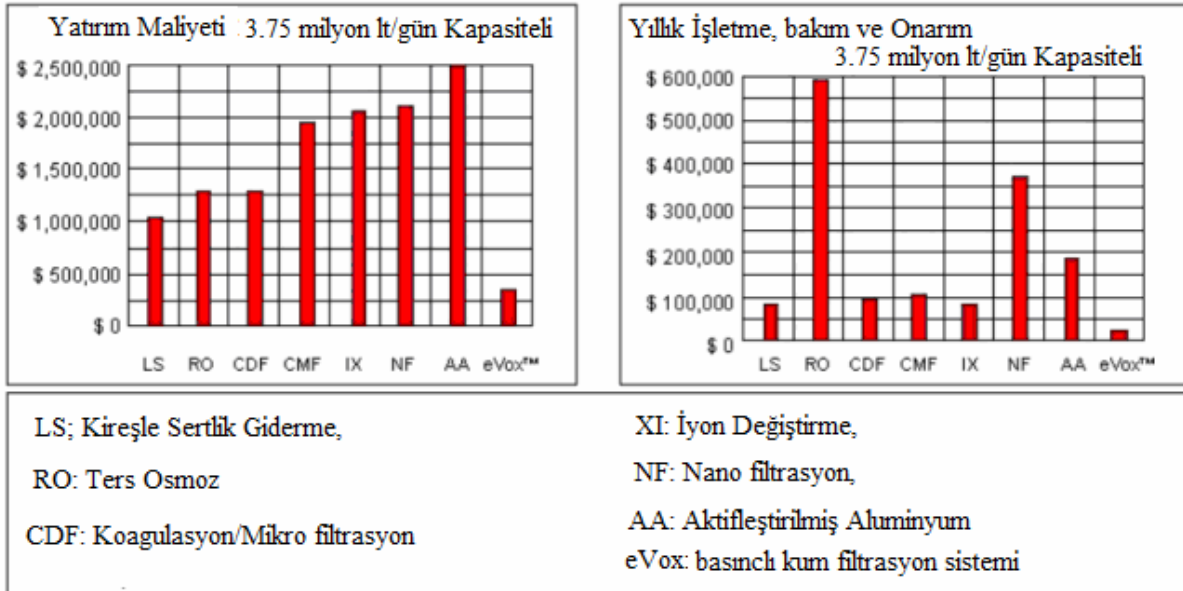
Oksidasyon redüksiyon tekniği düşük maliyetli bir yatırımdır. Mevcut tesislere kolayca uygulanır. As (3), As (5)’e kimyasal maddeler, UV ve güneş ışığı ile direk okside edilebilir.

Pıhtılaştırma/yumaklaştırma tekniği düşük maliyetli bir yatırımdır. Orta ve küçük ölçekli tesislere kolayca uygulanabilir.

Aktif alümina tekniği, küçük ölçekli tesislere (evler ve mahalleler) kolayca uygulanabilir.

Basınçlı kum filtrasyon sistemi (eVox™) arıtma metodunu dikkate alınmazsa arseniği gidermek için yatırım maliyeti bakımından en uygun ve ekonomik arıtmanın kireç, ters osmoz ve koagülasyon/mikrofiltrasyon metotları olduğu görülmektedir. Kireçle gidermede en büyük problem çamur oluşumu ve bertarafıdır. Bunlardan ters osmoz metodunun işletme maliyeti ise fevkalade yüksektir. Özellikle elektrik bedellerinin yüksek olduğu ülkelerde ters osmozla arsenik gidermenin yıllık işletme maliyeti çok daha yüksek olacaktır. Bu tür tesisleri kurarken yatırım maliyeti yanında işletme maliyeti de göz önüne alınmalıdır.

Tablo 6 Çeşitli metotlarla Arsenik Giderme ve İşletme Maliyeti



7 KAYNAKLAR

1. Meltem BİLİCİ BAŞKAN ve Ayşegül PALA “İçme Sularında Arsenik Kirliliği: Ülkemiz Açısından Bir Değerlendirme”, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilim Dergisi, 2009.
2. “Safe Water Technology for Arsenic Removal”, Richard Johnston Consultant to UNICEF and WHO and Han Heijnen, WHO Environmental Health Advisor, Bangladesh, *Johnston and Heijnen : Safe Water Technology for Arsenic Removal*,
3. “Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems”, EPA, 2003.
4. M. Zaw , M. T. Emmett “Arsenic removal from water using advanced oxidation processes”, *Toxicology Letters* 133 (2002) 113-118.
5. M. Jekel a and G. L. Amy, ”Chapter 11: Arsenic removal during drinking water treatment”, *Interface Science in Drinking Water Treatment*, 2006.
6. Dinesh Mohana, b,*, Charles U. Pittman Jr. “Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review”, *Journal of Hazardous Materials* 142 (2007) 1–53.
7. Miroslava Vaclavikova Æ George P. Gallios Æ Slavomir Hredzak Æ Stefan Jakabsky, “Removal of arsenic from water streams: an overview of available techniques”, *Clean Techn Environ Policy* (2008) 10:89–95.
8. Kuan-Seong Ng, Zaini Ujang & Pierre Le-Clech, “Arsenic removal technologies for drinking water treatment”, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3: 43–53, 2004.
9. John T. O’Connor, EngD, PE, and Thomas L. O’Connor “Arsenic in Drinking Water”, Part 4. Arsenic Removal Methods, 2001 H2O’C Engineering, LLC.
10. C.N. Mulligan, A.K.M. Saiduzzaman & J. Hadjinicolaou, *Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University* Optimization of the removal of arsenic from groundwater using ion Exchange, *Montreal, Quebec, Canada*.
11. Robert G. Robins, AquaMin Science Consortium, Lindfield, Australia, Tadahisa Nishimura, Institute for Advanced Mineral Processing (IAMP), Tohoku University, Sendai, Japan And Pritam Singh, Division of Science, Murdoch University, Perth Western, Australia “Removal of Arsenic from Drinking Water by Precipitation,

- Adsorption or Cementation”, Robins, Nishimura and Singh : Removal of Arsenic from Drinking Water.
12. Ronald Zakhar, Ján Derco, František Čacho, “An overview of main arsenic removal technologies”, *Acta Chimica Slovaca*, Vol. 11, No. 2, 2018, pp. 107—113.
 13. Marta I. Litter, Ana M. Ingallinella, Valentina Olmos, Marianela Savio, Gonzalo Difeo, Lía Botto, Elsa Mónica Farfán Torres, Sergio Taylor, Sofia Frangie, Jorge Herkovits, Isidoro Schalamuk, María José González, Eliana Berardozi, Fernando S. García Einschlag, Prosun Bhattacharya, Arslan Ahmad, “Arsenic in Argentina: Technologies for arsenic removal from groundwater sources, investment costs and waste management practices”, *Science of the Total Environment* 690 (2019) 778–789.
 14. “CHAPTER 7, Arsenic Removal Technologies on Comparison Scale and Sustainability Issues”, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801281-9.00007-2>.
 15. Birgitta Backman ve Arkadaşları, “Arsenik Removal form groundwater and surface water-Field Tests in Pirkanmaa Region, Finland, Espoo, 2007.
 16. Nina Ricci Nicomel, Karen Leus, Karel Folens, Pascal Van Der Voort, ve Gijs Du Laing, “Technologies for Arsenic Removal from Water: Current Status and Future Perspectives”, *Int J Environ Res Public Health*. 2016 Jan; 13(1): 62.
 17. Sachin V. Jadhav, Eugenio Bringas, Ganapati D. Yadav, Virendra K. Rathod, Inmaculada Ortiz, Kumudini V. Marathe, “Arsenic and fluoride contaminated groundwaters: A review of current technologies for contaminants removal”, *Journal of Environmental Management* 162 (2015) 306-325.
 18. Prof. Dr. Mustafa ÖZTÜRK, Müsteşar, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “İçme Suyu Kaynaklarında Arsenik Arıtımı”, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Kütüphanesi, 2017.