مجله ایمنی زیستی
دوره ۹، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

مقایسه عملکردي تکنولوژي‌های ایمن در حذف آرسنيك از آب

رضا تیموری*، محمد مهدیارفر
***کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران**
استادیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
teymouri109@yahoo.com

چکیده

آرسنیک و ترکیبات آن که به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های آب بشمار می‌رود، علاوه‌بر بروز بیماری‌های خطرناک، به‌عنوان یک مشکل اساسی در جوامع مختلف مطرح است. تاکنون تحقیقات فراوانی برای کاهش و حذف آرسنیک و ترکیبات آن از آب آشامیدنی در نقاط مختلف دنیا توسط دانشمندان و محققین انجام شده و بر اساس نتایج آن، راه‌کارهای متنوعی پیشنهاد شده است که هر یک از آن‌ها عملکردی متفاوت از خود نشان داده‌اند. در این تحقیق سعی شده ضمن معرفی و شناخت اجمالی این راه‌کارها، به مقایسه عملکردی آن‌ها و ملاحظات موثر بر بکارگیری این تکنولوژی‌ها پرداخته شود. تکنولوژی‌های حذف آرسنیک شامل گزینه‌های جذب سطحی، تعویض یونی، ترسیب شیمیایی، فیلتراسیون فرآیندهای غشایی و اسمز معکوس می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با توجه به لزوم حداکثری حذف آرسنیک، تکنولوژی اسمز معکوس بهترین عملکرد را از خود نشان داده و قادر است به تنهائی و در شرایط بهینه، بیش از ۹۸ درصد آرسنیک و ترکیبات آن‌را حذف نماید.

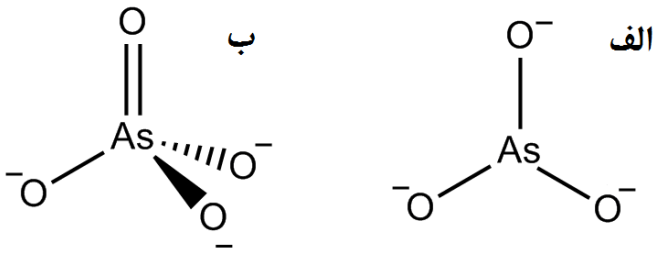
کلمات کلیدی: آرسنیک، اسمز معکوس، غشا، نانوفیلتراسیون

مقدمه

همزمان با رشد جمعیت در جهان و ایجاد توسعه در صنایع مختلف، آلودگی آب آشامیدنی، تبدیل به یکی از اساسی‌ترین مشکلات جهان شده است. بیش از یک میلیارد نفر در جهان به آب آشامیدن سالم دسترسی ندارند و این امر موجب شده که سالانه بیش از پنج میلیون نفر به‌دلیل مصرف آب آلوده فوت کنند که در این بین، ۱/۵ میلیون نفر را کودکان تشکیل می‌دهند. در کشورهای در حال توسعه، ۷۵ درصد فاضلاب‌ها بدون تصفیه وارد آب‌های سطحی و رودخانه‌ها شده و منابع زیرزمینی آب را نیز آلوده می‌کنند. البته آلوده بودن آب آشامیدنی تنها مختص کشورهای درحال توسعه نیست، بلکه بسیاری از کشورهای صنعتی و توسعه یافته نیز با این معضل روبرو هستند. آبی که دارای عوامل بیماری‌زای عفونی یا انگلی، مواد شیمیایی سمی، ضایعات و فاضلاب خانگی و صنعتی باشد را آب آلوده می‌گویند. سازمان بهداشت جهانی، آب آلوده را عامل یک بیماری از هر ۱۰ بیماری و ٦ درصد مرگ و میرها در جهان می‌داند. سرطان، انواع تب روده‌ای و بیمارهای گوارشی، از

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

مهمترین بیماری‌های ناشی از استفاده از آب آلوده است. همچنین مغز، سیستم عصبی و بینائی و گوارشی، مهمترین قسمت‌هایی هستند که در شرب آب آلوده درگیر می‌شوند. امروزه پنج آلاینده اصلی و خطرناک شناخته شده است که از آلاینده‌های مهم آب آشامیدنی بوده و آب‌های زیرزمینی، آب شهری و یا آب‌های بطری را تهدید می‌کند. شامل آرسنیک، سرب، فلوراید، کروم و موارد رادیو اکتیو هستند. آلوده شدن این‌گونه آب‌ها به وسیله زائدات و مواد شیمیایی سمی، ممکن است کیفیت آب را چنان نامطلوب سازد که از آن نتوان به عنوان منبع تامین آب استفاده نمود و یا تصفیه آن بسیار پرهزینه خواهد بود. از این‌رو تحقیقات زیادی برای حذف این آلاینده‌ها از منابع آب انجام شده است که مجموعه این تحقیقات در حوزه تصفیه آب تعریف می‌شوند. تصفیه آب، به فرآیندهایی گفته می‌شود که طی آن مواد شیمیایی نامطلوب، آلاینده‌های بیولوژیکی و فلزی، جامدات معلق و گازها از آب آلوده حذف می‌شوند، تا قابل آشامیدن یا مصرف کشاورزی شود. آرسنیک سومین عنصر گروه پنجم جدول می‌باشد که با ظرفیت‌های مختلف و به‌صورت معدنی و آلی در طبیعت یافت می‌شود. میزان آرسنیک در پوسته زمین ۱/۸ میلی گرم در کیلوگرم بوده و به صورت ترکیب با گوگرد و فلزاتی نظیر مس، کبالت، سرب، روی و غیره یافت می‌شود. سپس از طریق حل شدن کانی‌ها و مواد معدنی، تخلیه پساب‌های صنعتی به عنوان یک ماده سمی وارد منابع زیرزمینی آب می‌شود. به‌طورکلی ترکیبات آلی آن از ترکیبات معدنی آن بسیار سمی‌تر است. آلودگی آرسنیک در آب، به خصوص آب‌های زیرزمینی، به دلیل سمیت و مخاطره‌آمیز بودن آن، به عنوان یک مشکل اساسی در جوامع مختلف مطرح است. به‌عنوان مثال، مصرف طولانی‌مدت این عنصر سبب ایجاد سرطان می‌شود. این عنصر به‌عنوان آلاینده مهم آب آشامیدنی شناخته شده است. برنامه پیشرفت و توسعه ملل متحد، حد مجاز آرسنیک را حدود ۵ تا ۱۰ میکروگرم در لیتر ذکر کرده است (۱۶). سازمان بهداشت جهانی، برای آرسنیک ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (۱۹). در حالی‌که حداکثر مجاز تعیین شده در استاندارد ایران ۵ میکروگرم در لیتر است (۱). آرسنیک در آب به‌صورت ترکیبات سه ظرفیتی (آرسنیت (Arsenite)) و پنج ظرفیتی (آرسنات (Arsenate)) حل می‌شود که ساختار سه ظرفیتی آن سمی‌تر از ساختار پنج ظرفیتی آن می‌باشد (۲۲). شکل (۱) ساختار شیمیایی ترکیبات آرسنیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار شیمیایی ترکیبات آرسنیک الف) آرسنیت ب) آرسنات

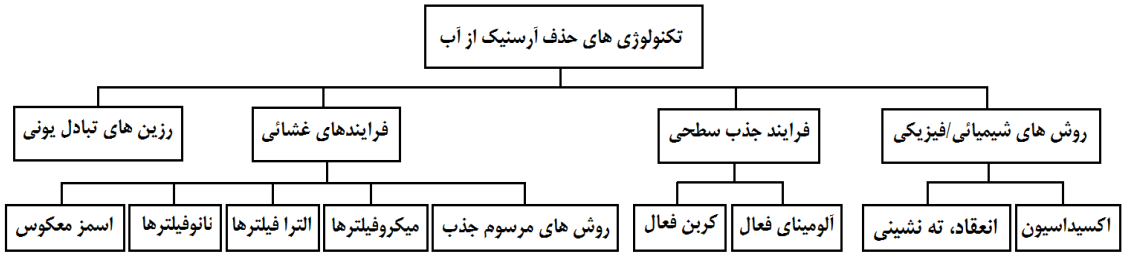
[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

بعلاوه در آب‌های طبیعی، حذف آرسنیت از آرسنات سخت‌تر است. از این‌رو برای دستیابی به میزان بالای حذف این ترکیبات از آب آشامیدنی، طی یک مرحله پیش تصفیه قبل از فرآیند اصلی حذف، آرسنیت به آرسنات اکسید شده و سپس نسبت به حذف آرسنات اقدام می‌شود (٦). امروزه روش‌های بسیاری برای تصفیه آب پیشنهاد شده و گسترش یافته‌اند تا قادر به تولید آب سالم باشند. اما این روش‌ها چگونه با یکدیگر مقایسه می‌شوند و کارایی هرکدام چقدر است؟ هدف از این تحقیق پاسخ به این سوال است که شامل معرفی روش‌های مختلف حذف آرسنیک از آب آشامیدنی و مقایسه عملکرد آن‌ها با یکدیگر به منظور انتخاب بهترین و موثرترین این روش می‌باشد.

روش‌های حذف آرسنیک از آب

روش‌های مختلفی برای حذف آرسنیک از آب آشامیدنی وجود دارد که به‌طورکلی به چهار گروه روش‌های فیزیکی/شیمیایی، روش‌های جذب سطحی، روش‌های غشائی و رزین‌های تبادل یونی تقسیم بندی می‌شوند. شکل (۲) به جزئیات بیشتری از این تقسیم‌بندی اشاره می‌کند.



شکل ۲- تقسیم‌بندی روش‌های حذف آرسنیک از آب به تفکیک زیر گروه‌ها

انواع روش‌های حذف فیزیکی/ شیمیایی شامل انعقاد، ته‌نشینی و فیلتراسیون، تبادل یونی و روش‌های جذب سطحی، شامل جذب توسط جاذب‌های مختلف با ساختارهای میکرویی و نانویی می‌باشد. در ادامه به معرفی مختصری از هر یک از روش‌های فوق به همراه ذکر مزایا و معایب و پارامترهای موثر آن پرداخته می‌شود.

اکسیداسیون

اغلب تکنولوژی‌های حذف آرسنیک برای حذف آرسنات موثر است و در حذف آرسنیت ناتوان می‌باشند، زیرا فرم ۳ ظرفیتی آن (آرسنیت) معمولا در PH کمتر از ۹/۲ بدون بار بوده و حلالیت آن بیشتر می‌شود. از طرفی آرسنات تمایل بیشتری به کاتیون‌های فلزی و یا جذب بر سطوح جامد دارد. بر این اساس برای حذف کامل ترکیبات آرسنیک، ابتدا باید مرحله اکسیداسیون به‌منظور تبدیل آرسنیت به آرسنات انجام شود که در آن از اکسیژن، ازن، هیپوکلریت، پرمنگنات، اکسید منگنز و پراکسید هیدروژن استفاده می‌شود. امواج ماورابنفش می‌تواند به عنوان کاتالیزور، فرآیند اکسیداسیون را تسریع نماید. همچنین انجام فرآیند اکسیداسیون در حضور سولفید (۷)، آهن فریک (۵) و یا سیترات (۱۰) نیز با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. در بین این مواد کارایی کلرین از سایر اکسیدانت‌ها بهتر است، ولی واکنش اکسیداسیون را به سمت تشکیل مواد آلی، مواد سمی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

و محصولات جانبی سوق می‌دهد. در جوامع پیشرفته از ازن برای این منظور استفاده می‌شود (۱۷) به‌طوری‌که با تماس ازن، نیمه عمر آرسنیت در آب به ٤ دقیقه می‌رسد (۱۳). اگر آب حاوی آرسنیک شامل مقادیر زیادی یون آهن نیز باشد، پراکسید هیدروژن به عنوان عامل اکسید کننده قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین مرحله اکسیداسیون به‌عنوان یک فرآیند شیمیایی معمول، در اغلب فرآیندهای حذف آرسنیک برای افزایش راندمان عملیات انجام می‌شود.

انعقاد، ته‌نشینی و فیلتراسیون

انعقاد، ته نشینی و فیلتراسیون از جمله روش‌های فیزیکی حذف آرسنیک محسوب می‌شود. در فرآیند انعقاد، آرسنیک از طریق سه مرحله بارش (انعقاد)، ته‌نشینی، جذب الکترواستاتیک حذف می‌شود (١٤). در مرحله بارش، انعقاد با یکی از نمک‌های فلزی و آهک انجام می‌شود و ترکیبات نامحلول آرسنیکی که با آهن و یا آلومینا پیوند یافته‌اند، مانند $Al(AsO_4)$ و $Fe(AsO_4)$ تشکیل می‌شود. سپس مرحله انعقاد و لخته‌سازی آرسنیک با استفاده از آلوم، کلرید فریک، سولفات فریک انجام می‌شود که طی آن ترکیبات محلول آرسنیکی در محیط هیدروکسیدهای فلزی رشد می‌یابند. در طی این مرحله لخته‌سازی، تمام میکروذرات و یون‌های با بار منفی، به‌وسیله نیروهای الکترواستاتیک به لخته‌های رشته‌ای متصل می‌شوند. آرسنیک نیز به این رشته‌های لخته ای جذب می‌شود. بعد از مرحله انعقاد، بوسیله فیلترهای رسوب‌گیر، لخته‌های ایجاد شده را جداسازی می‌کنند. در این روش PH و غلظت منعقد کننده‌های مورد استفاده برای حذف بهینه آرسنیک موثر می‌باشند و در مواردی می‌توان غلظت آرسنیک را تا ۱۰µg/l رساند. انعقاد با کلرید فریک در PH زیر ۸ به خوبی عمل می‌کند و آلوم تنها در محدوده کوچک PH، از ٦ تا ۸ قادر به عمل می‌باشد. در اکثر مواقع از آهک به عنوان یک پیش تصفیه یا منعقد کننده مقدماتی قبل از آلوم یا آهن استفاده می‌شود. تحت شرایط کنترل شده می‌توان از آهن موجود در آب‌های زیر زمینی، به عنوان منعقد کننده برای حذف آرسنیک استفاده کرد. نتایج تحقیقی نشان می‌دهد که میزان حذف آرسنیک توسط این روش بدون مرحله جذب تا ۳۰ درصد می‌رسد که با تکمیل شدن آن با مرحله فلیتراسیون می‌توان به ۹٦ درصد حذف آرسنیک دسترسی پیدا کرد (۸). از این‌رو مرحله سوم، مهمترین بخش این روش می‌باشد که موجب شده در برخی موارد از فیلتراسیون دو مرحله‌ای استفاده شود (۱۸).

فرآیند جذب سطحی

در این روش آرسنیک توسط یک جاذب از آب جذب می‌شود. هنگامی که آب از میان ستون‌های بسته از جاذب عبور می‌کند، ناخالصی‌های آن از جمله آرسنیک بر روی سطوح دانه‌بندی جاذب، جذب می‌شود. در نهایت ستون شروع به اشباع شدن می‌کند که در این‌صورت باید عملیات احیای جاذب انجام شود. به‌عنوان مثال آلومینای فعال بوسیله جریان حاوی سود احیا می‌شود. موادی با سطح جذب بالا همچون کربن فعال، آهن و منگنز، شن و ماسه پوشیده، خاک رس کائولینیت، اکسید آهن هیدراته، بوکسیت فعال، اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیکون و بسیاری از عناصر طبیعی و مصنوعی برای حذف آرسنیک به روش سطح جذبی گزارش شده است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

آلومینای فعال

آلومینای فعال از آب‌گیری آلومینا در دمای بالا تولید می‌شود و شامل اکسید آلومینای آمورف و گاما می‌باشد. آلومینای فعال ساختار دانه‌ای شکل بسیار متخلخل و مرکب از فازهای بی‌شکل و کریستاله تری‌هیدرات آلومینیوم می‌باشد. سطح ویژه این ساختار، ۲۰۰–۳۰۰m^2/g می‌باشد که موجب شده سایت‌های فعال زیادی بر روی آن بوجود آید که برای فلورزدائی آب نیز از دیرباز کاربرد گسترده‌ای داشته است (۱۲). از این‌رو آلومینای فعال به‌عنوان یک جاذب قوی برای آرسنیک شناخته شده است. از آلومینای فعال در بسترهای پر شده جهت حذف آرسنیک و همچنین برای برخی آلاینده‌های دیگر مانند فلوراید، سلنیوم و سیلیکا استفاده می‌شود. آب به صورت یکنواخت از بستر عبور می‌کند و ذرات از طریق جذب سطحی حذف می‌شوند. این ذرات با هیدروکسید روی آلومینا جایگزین می‌شوند. سطح اکسید شده این جاذب قادر است یون‌های آرسنیک موجود در آب را به‌راحتی جذب نماید، درنتیجه یک فرآیند جذب سطحی رخ می‌دهد (۲۰و ۲). در این فرآیند، PH، حالت اکسیداسیون آرسنیک، یون‌های رقابت کننده، زمان تماس و احیا تاثیر فراوانی بر راندمان حذف دارند (۲۱). احیای این بستر از طریق سلسله مراحل عبور احیاکننده، فلاشینگ با آب و خنثی با اسید می‌باشد. احیاکننده یک قلیای قوی می‌باشد. معمولا از هیدروکسید سدیم استفاده می‌شود. به‌طور معمول از یک اسید قوی نظیر اسید سولفوریک برای خنثی سازی استفاده می‌شود. بسیاری از مطالعات نشان داده است که جذب سطحی، روش موثری برای حذف آرسنیک می‌باشد. پارامترهای زیادی در عملکرد این روش وجود دارد که از این میان به PH، حالت اکسیدی آرسنیک و یون‌های رقیب در جذب می‌توان اشاره کرد.

به‌طور کلی، سطح آلومینای فعال در PH برابر۸/۲ دارای بار سطحی صفر است. در مقادیر کمتر از آن مقدار بار سطحی مثبت شده و در مقادیر بیشتر از آن مقدار بار سطحی منفی می‌شود. ظرفیت جذب آرسنیک توسط آلومینای فعال در حالت بار سطحی خنثی به شدت افت می‌کند و در PHهای بیش از ۸/۵ مقدار حذف به ۲ تا ۵ درصد می‌رسد که بسیار ناچیز است (۳). بنابراین عملکرد آلویمنای فعال، به‌شدت تابع PH می‌باشد. با کنترل PH در محدوده ۵/۵، آلومینا قادر است بیش از ۹۵ درصد آرسنیک موجود در آب را جذب نماید. در حذف آرسنیک باید ساختار آلومینا به‌صورت نرم و با غربال ۲۸–۴۸ باشد (۱۵). نوع و مقدار سایت‌های جاذب موجود بر سطح آلومینای فعال، در جذب آنیون‌های آرسنیکی بسیار تاثیرگذار است. از این‌رو به دسته‌بندی عملکردی برای آلومینای فعال با گروه‌های عاملی مختلف PH محدوده ۵/۵ تا ۸/۵ به‌صورت زیر پیشنهاد شده است (٤).

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

برای احیای آلومینای فعال اشباع شده ناشی از جذب آرسنیک، می‌توان به کمک فرآیند غوطه‌وری آلومینا در محلول سود ٤ درصد، آرسنیک جذب شده را از آلومینا جدا نمود و بار مثبت سطحی آلومینا را به

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

سطح آن بازگردانید. همچنین می‌توان به کمک فرآیند تبادل یونی، آلومینا را بازیابی کرد که در این‌صورت راندمان فرآیند احیا ۵۰ تا ۸۰ درصد می‌باشد (٤). از مزایای استفاده از آلومینای فعال در حذف آرسنیک، یکی سادگی فرآیند مورد نیاز و دیگری امکان توسعه آسان فرآیند در سطح جامعه می‌باشد. زیرا نیاز به افزودن هیچ مواد شیمیایی خطرناکی ندارد. از معایب سیستم حذف توسط آلومینای فعال می‌توان به امکان تخریب و از بین رفتن سایت‌های فعال سطحی در جذب آلاینده، یا مسدود شده آن‌ها توسط حضور آهن و ترکیبات آن که می‌تواند بر روی این سایت‌ها رسوب نماید، محدوده بودن مقدار pH و نسبتا باریک بودن آن و دشواری نسبی در بازیابی آن اشاره کرد.

رزین‌های تبادل یونی

روش‌های تبادل یون، همانند روش جذب سطحی است با این تفاوت که در آن از مواد مصنوعی مانند رزین با ظرفیت بالاتر تبادل یون استفاده می‌شود. در این روش یک یون از فاز جامد با یک یون در فاز آبی جایگزین می‌شود. این فاز جامد در واقع رزین‌های تبادل یون هستند. ولی روند تبادل یون به PH وابستگی زیادی ندارد. آرسنیت با فرآیند تبادل یون قابل حذف نیست. از این رو فرآیند اکسیداسیون قبل از شروع تبادل یون، برای تبدیل آرسنیت به آرسنات ضروری می‌باشد. زمان اکسیداسیون زیاد به فرآیند تبادل یون و رزین‌های حساس آسیب وارد می‌کند و لذا باید زمان این روش بهینه شود. برای ایجاد تبادل یون، آب به صورت مداوم از بستر رزینی عبور می‌کند. رزین‌های مورد استفاده در این روش به چهار گروه رزین‌های اسیدی قوی، رزین‌های اسیدی ضعیف، رزین‌های قلیائی قوی و رزین‌های قلیائی ضعیف تقسیم‌بندی می‌شوند (۳). معمولا برای حذف آرسنیک، از رزین‌های قلیایی قوی استفاده می‌شود که عملکرد گروه‌های مختلف موجود بر ساختمان این رزین‌ها برای حذف آرسنیک به ترتیب زیر می‌باشد (۳):

$$CrO_4^{2-} >> SeO_4^{2-} >> SO_4^{2-} >> HSO_4^{-} > NO_3^{-} > Br^{-} > HAsO_4^{2-} > SeO_3^{2-} > HSO_3^{3-} > NO_2^{-} > Cl^{-}$$

زمانی که از رزین‌های قلیایی قوی نوع کلراید برای حذف آرسنیک از آب استفاده می‌شود، در PH بین ۸ تا ۹ واکنش از نوع آرسنات کلراید رخ می‌دهد (۹). زمانی که کلیه مکان‌های فعال رزین با یون یا یون‌های مورد نظر اشباع می‌شوند، رزین از کار می‌افتد. در این نقطه باید رزین احیا شود که با محلول کلرید سدیم احیا می‌شوند. پارامترهای زیادی در کارآیی استفاده از این روش تاثیرگذار هستند که از این میان می‌توان به PH، یون‌های رقیب، نوع رزین، آلکالینیتی و میزان آرسنیک موجود در آب اشاره کرد.

فرآیندهای غشایی

یکی دیگر از روش‌های حذف آرسنیک از آب آشامیدنی، استفاده از روش‌های غشایی است. ساختار فیزیکی غشا بدین‌صورت است که قابلیت عبور برخی مولکول‌ها را از خود دارد که بر اساس اندازه جداسازی می‌کند. فیلتراسیون غشایی قادر است که بسیاری از آلاینده‌ها از جمله باکتری‌ها، نمک‌ها و فلزات سنگین مختلف را از آب جدا نماید. شکل و

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

مشخصات شیمیایی آرسنیک نقش مهمی در حذف آن به‌روش غشایی ایفا می‌کند. غشا همچنین می‌تواند آرسنیک را از طریق جذب بر روی سطح حذف نماید. ویژگی مهم غشاها، توانایی آن‌ها در کنترل نرخ نفوذ گونه‌های آلاینده هنگام عبور از آن‌ها می‌باشد. به منظور افزایش و بهبود عملکرد غشاها در فرآیندهایی تصفیه، شناخت کامل و دقیق انواع غشاها ضروری می‌باشد.

معمولا دو نوع فیلتراسیون غشایی شامل یکی غشاء کم‌فشار مانند میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون و دیگری غشاء فشار بالا مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس وجود دارد. غشاهای کم‌فشار، اندازه منافذ اسمی بزرگتری داشته و در فشار ۱۰-۳۰psi عمل کرده و غشاهای پر فشار، اندازه منافذ اسمی کوچکتری داشته و در فشار ۷۵-۲۵۰psi عمل می‌کنند (۱۱).

فرآیند میکروفیلتراسیون

این فرآیندها در کدورتهای پایین آب به خوبی کار می‌کنند. معمولترین کاربرد آن‌ها در جوامع کوچک است. اما تصفیه خانه‌های خیلی بزرگ در حال کار در سراسر دنیا نیز وجود دارند. توانایی روش میکروفیلتراسیون برای حذف آرسنیک، وابستگی بسیار زیادی به توزیع اندازه ذرات حامل آرسنیک در آب دارد. اندازه حفرات میکروفیلترهای مورد استفاده برای دفع آرسنیک حل شده یا کلوییدی، اغلب بزرگ می‌باشد. با این‌حال با استفاده از میکروفیلتراسیون فقط می‌توان ذرات بزرگتر آرسنیک را حذف کرد. به صورت معمول آب‌های زیرزمینی دارای کمتر از ۱۰ درصد آرسنیک ذره‌ای می‌باشند. درحالی‌که آب‌های سطحی می‌توانند تا ۷۰ درصد شامل این نوع آرسنیک باشند. به‌منظور افزایش بازده حذف آرسنیک با روش میکرو فیلتراسیون، می‌توان این روش را با روش انعقاد ترکیب کرد. از آن‌جایی که مکانیزم حاکم در روش میکروفیلتراسیون، مکانیزم غربال مولکولی است پس توزیع اندازه حفرات، نقش بسیار پررنگی در این روش ایفا می‌کند.

فرآیند الترافیلتراسیون

این روش نیز همانند روش میکروفیلتراسیون بر مبنای اندازه حفره‌ها می‌باشد و شاید تاثیر زیادی در حذف آرسنیک از آب‌های زیر زمینی نداشته باشد. اما از این روش برای حذف آرسنیک کلوییدی یا ذره‌ای استفاده می‌شود. این روش نسبت به روش میکروفیلتراسیون برای حذف آرسنیک از آب‌های سطحی کارآیی بهتری دارد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که دفع الکتریکی غشای الترافیلتراسیون، نقش مهمی در حذف آرسنیک ایفا می‌کند. فیلترهای میکروفیلتراسیون و اولترا فیلتراسیون دارای حفرهای بسیار بزرگ‌تر از مولکول‌ها و یون‌های آرسنیک هستند و در حذف آرسنیک ناتوان می‌باشند. اما می‌توان با ترکیب روش‌های انعقاد با آن‌ها، مقداری از آرسنیک را حذف نمود. فرآیند الترافیلتراسیون برای حذف ترکیبات باکتریائی و ویروسی تا ۹۹/۹ درصد بسیار مفید و پرکاربرد هستند. عملیات ساده و هزینه تعمیر و نگهداری پایین، عدم نیاز به مواد شیمیایی، فشار عملیاتی ایمن و کم و دوره عمر طولانی، به همراه بازیابی راحت این فرآیند، از مزایای آن محسوب می‌شود. درحالی‌که میزان تصفیه کم این فرآیند (۱۰ تا ۲۰ درصد بازیابی) و امکان ایجاد رسوب در آن از

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

معایب اصلی آن به‌شمار می‌رود.

فرآیند نانوفیلتراسیون

با استفاده از غشاهای نانو فیلتراسیون می‌توان به صورت قابل‌توجهی میزان آرسنیک محلول در آب را کاهش داد. غشاهای نانو فیلتراسیون قابلیت حذف یون‌های با بیش از یک بار نظیر Ca^{+2} و Mg^{+2} را دارد. اما نمی‌توان با استفاده از غشاهای نانوفیلتراسیون، میزان یون‌های تک‌بار را حذف کرد. به‌لحاظ محدودیت‌های اندازه حفرات غشاهای نانوفیلتر، این غشاها قابلیت حذف آرسنیک را دارند. از این‌رو تکنولوژی نانوفیلتراسیون، یکی از روش‌های موثر در حذف آرسنیک آب‌های زیر زمینی می‌باشد. استفاده از روش نانوفیلتراسیون برای آب‌های سطحی، بایست با پیش تصفیه‌های مناسب صورت گیرد.

در تحقیقی مقدار ۹۶ تا ۹۹ درصد آرسنیک موجود در آب، توسط سیستم غشائی نانوفیلتراسیون در فشار عملیاتی ٤۰۰psi گزارش شده است (۲۳). این مقدار حذف آرسنیک توسط نانوفیلترهای مورد استفاده، به دلیل بزرگ بودن ترکیبات آرسنیک و عدم امکان عبور آن‌ها از فضای غشای نانوفیلتراسیون بوده است. با توجه به ابعاد منافذ در نانوفیلتراسیون، میزان نفوذ آب خالص از این نوع غشاها، حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از خوراک اولیه می‌باشد که موجب شده هنوز این فرآیندها به مقیاس صنعتی نزدیک نشوند. این مقدار کم در تصفیه آب، فقط برای مصارف خانگی در بخش پخت و پز و تامین آب آشامیدنی کاربرد دارد. به‌طوری‌که در سیستم‌های تصفیه آب شهری، باید از غشاهای سری با راندمان عبوری بیش از ۹۵ درصد استفاده شود. نانوفیلتراسیون برای غلظت‌های کمتر از آلاینده مفید است و با افزایش غلظت آلاینده، عملکرد آن به‌شدت کاهش می‌یابد.

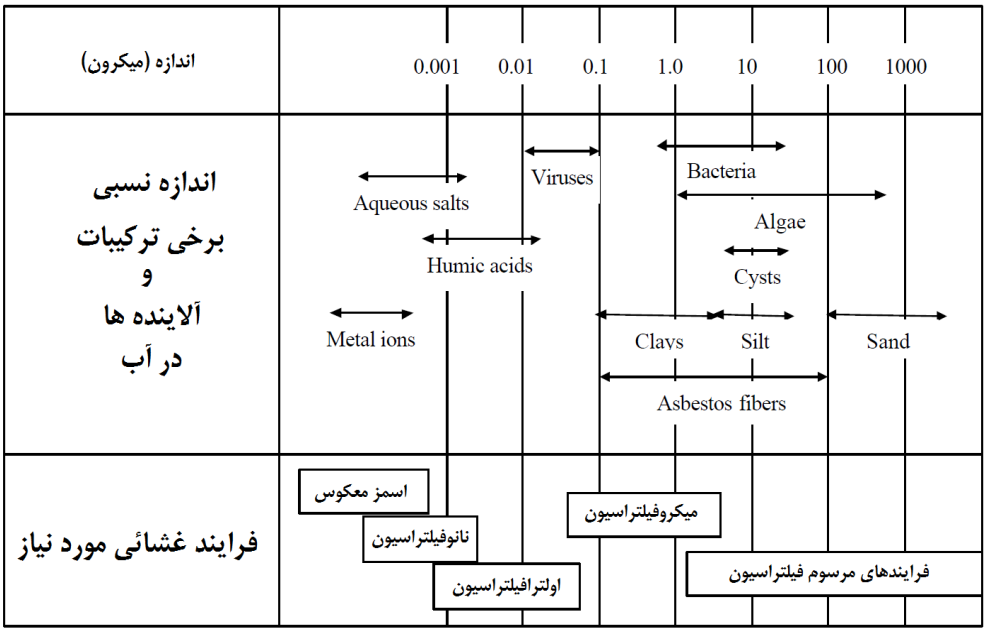
تکنولوژی اسمز معکوس

یکی از مدرن‌ترین روش‌ها در حذف آرسنیک غشایی، استفاده از غشای اسمز معکوس می‌باشد. اگر یک غشاء نیمه تراوا بین دو محلول با غلظت‌های متفاوت قرار گیرد، مقداری از حلال از یک طرف غشاء به طرف دیگر منتقل می‌شود (یعنی از پتانسیل شیمیایی بیشتر به پتانسیل کمتر). به‌طوری‌که محلول غلیظ‌تر، رقیق می‌شود. با اعمال فشار مکانیکی بیشتر از فشار اسمزی به محلول غلیظ‌تر، مولکول‌های آب از ناخالصی جدا و به سمت بخش خالص حرکت خواهد کرد. این فرآیند را اسمز معکوس می‌نامند. اسمز معکوس یک روش فیلتراسیون با تکنولوژی غشایی است که موجب حذف بسیاری از انواع مولکول‌های بزرگ و یون‌ها از محلول، با استفاده از فشار به محلول پشت غشاء می‌شود. در نتیجه املاح در سمت تحت فشار غشاء باقی می‌مانند و حلال خالص به سمت دیگر عبور می‌کند. این غشا قابلیت حذف بیشتر یون‌ها را با درصد بالایی دارند و می‌توانند درصد بسیار بالایی از آرسنیک موجود در آب‌های زیر زمینی را حذف کنند. بازده یک فیلتر آب به روش اسمز معکوس تحت تاثیر فشار آب ورودی به سیستم و درجه حرارت آب می‌باشد. غشاء اسمز معکوس در فشار ٦٥psi و دمای ۷۷ درجه فارنهایت تست می‌شود. هر تغییری در هر یک از این دو متغیر، باعث تغییر در عملکرد غشاء می‌شود. خروجی دستگاه‌های اسمز معکوس، نزدیک به آب خالص می‌باشد. میزان حذف آرسنیک از آب با غشاهای اسمز

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

معکوس، به PH و حضور دیگر املاح بستگی دارد و حضور ذرات کلوئیدی، تاثیر منفی در آن دارد. آهن و منگنز ممکن است در آن رسوب کنند و باعث گرفتگی غشای اسمز معکوس شوند. چنین غشائی قابل احیاء نیست، بنابراین در آب‌هایی که میزان بالای ذرات معلق دارند، بهتر است از پیش تصفیه‌های مناسب برای جلوگیری از گرفتگی غشاها استفاده شود. استفاده از فرآیند اسمز معکوس قبل از سیستم تبادل یونیT می‌تواند به‌مقدار قابل‌ملاحظه‌ای زمان تناوب احیای رزینی را کاهش دهد. به‌طوری‌که در برخی شرایط، یک واحد اسمز معکوس ثانویه، می‌تواند جایگزین سیستم تبادل یونی شود، تا آب خالص بیشتری از یک واحد اسمز معکوس تولید شود. شکل (۳) به بررسی محدوده کاربرد فرآیندهای غشائی برای حذف برخی ترکیبات مرسوم موجود در آب می‌پردازد.



شکل ۳- بررسی محدوده کاربرد فرآیندهای غشائی برای حذف برخی ترکیبات مرسوم موجود در آب

فرآیندهای مرسوم فیلتراسیون که برای آب‌هایی با کدورت متوسط تا بالا به کار می‌رود، روشی موثر و انعطاف‌پذیرتر نسبت به روش‌های تصفیه مستقیم است. به‌طوری‌که زمان ماند مورد نیاز این فرآیندهای در حوضچه ته‌نشینی اجازه می‌دهد که مواد آلی طبیعی و مزه و رنگ حذف شوند. سادگی این روش‌ها امکان طراحی بدون ایجاد نمونه آزمایشگاهی را ایجاد کرده است. تفاوت‌های عمده‌ای بین اسمز معکوس و فیلتراسیون وجود دارد. مکانیسم غالب حذف در فیلتراسیون غشایی، اعمال فشار است که به‌صورت تئوری، منجر به خروج کامل ذرات بدون در نظر گرفتن پارامترهای عملیاتی مانند فشار و غلظت پساب است. اما اسمز معکوس، شامل یک مکانیسم انتشار است که بازده جداسازی آن وابسته به غلظت املاح،

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

فشار، و نرخ جریان آب است. با توجه به شکل (۱) ملاحظه می‌شود که در بین فرآیندهای غشائی، فرآیند اسمز معکوس و نانوفیلتراسوین برای حذف آرسنیک موثر می‌باشند. در مقایسه عملکردی نانوفیلترها و اسمز معکوس فشار فرآیند مورد نیاز بسیار کمتر می‌باشد. نانوفیلتراسیون به پساب با کیفیت بالایی نیازمند است. در حالی‌که فرآیند اسمز معکوس، توانایی حذف آلایندهای بیشتر را به‌طور همزمان دارد. از طرفی غشای نانویی می‌تواند توسط مواد کلوئیدی و مخصوصا ترکیبات آلی، ترکیبات آهن و منگنز رسوب یافته و راندمان آن به‌شدت کاهش یابد که در این صورت، فرآیند اسمز معکوس از ارجحیت خاصی برخوردار است.

نتیجه‌گیـــری

جدول (۱) به مقایسه اجمالی تکنولوژی‌های مختلف حذف آرسنیک می‌پردازد. در این مقایسه، علاوه‌بر عملکرد میزان حذف آرسنیک از آب به جنبه‌های دیگر موضوع از جمله ملاحظات شیمیائی، شرایط اقتصادی، شرایط عملیاتی و سطح کاربردی نیز پرداخته می‌شود. این مقایسه نشان می‌دهد که در فرآیندهای حذف آرسنیک، غلظت اولیه آرسنیک در آب و PH دو عامل اصلی بر میزان راندمان و اثر پذیری این تکنولوژی‌ها می‌باشد.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

جدول ۱- مقایسه اجمالی تکنولوژی‌های مختلف حذف آرسنیک

تکنولوژی	راندمان حذف (درصد)		سایر ملاحظات
	ترکیبات سه ظرفیتی آرسنیک	ترکیبات پنج ظرفیتی آرسنیک	
انعقاد و ته‌نشینی با یون آهن	۶۰-۹۰	≥۸۵	فرآیندی گران کاربردی در مقیاس صنعتی و شهری حضور ترکیبات فسفاتی و سیلیکاتی میزان حذف را کاهش می‌دهد
انعقاد و ته‌نشینی با آلوم	≤ ۳۰	≥۷۵	فرآیندی گران کاربردی در مقیاس صنعتی و شهری حضور ترکیبات فسفاتی و سیلیکاتی ممکن است حذف میزان را کاهش دهد بسیار حساس به PH و در محدوده باریک قابل انجام است تولید لجن آرسنیک غنی
فرآیندهای جذب سطحی	۳۰-۶۰	≥۹۰	فرآیندی ارزان در محیط‌های ساده فرآیندی موثر در مقیاس آزمایشگاهی در کشورهای پیشرفته عملکرد آن تابع شرایط محیطی
آلومینای فعال	۳۰-۶۰	≥۹۵	فرآیندی نسبتا گران کاربردی در مقیاس پایلوت و در کشورهای صنعتی و توسعه یافته قابلیت حذف بالای آرسنات احیای آن نیازمند باز و یا اسید قوی در زمان طولانی است حضور ترکیبات آهن و منگنز میزان حذف را کاهش می‌دهد
رزین‌های تبادل یونی	≤ ۳۰	≥۸۰	فرآیندی نسبتا گران کاربردی در مقیاس پایلوت و در کشورهای صنعتی ظرفیت بالای جذب و احیای زمان بر سیستم حضور ترکیبات آهن و منگنز میزان حذف را کاهش می‌دهد تولید آب نمک غنی از آرسنیک
فرآیندهای غشائی	≤ ۲۵	≥۸۵	فرآیندی خیلی گران مخصوصا در فشارهای بالا فرآیندی موثر در مقیاس آزمایشگاهی در کشورهای صنعتی مزیت بالای بازیافت در غشاهای کم فشار نیاز به مراحل پیش تصفیه
اسمز معکوس	۶۵-۸۰	≥۹۸	فرآیندی ارزان فرآیندی موثر در مقیاس آزمایشگاهی در کشورهای پیشرفته عملکرد آن تابع فشار اسمزی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

آنچه از جدول (۱) نتیجه می‌شود این است که با توجه به لزوم حداکثری حذف آرسنیک از منابع آبی که می‌تواند مشکلات عدیده‌ای را ایجاد نماید، فرآیندهای اسمز معکوس و سپس آلومینای فعال را می‌توان به عنوان تکنولوژی‌های موثرتر و قابل قبول پیشنهاد کرد. چرا که اسمز معکوس با توانایی حذف ترکیبات آرسنیک بیش از ۹۸ درصد، ضمن این‌که هزینه عملیاتی کمی را در بردارد، کاربردی در سطح تامین مصارف پخت و پز و آب آشامیدنی دارد که می‌تواند بسیار مفید واقع شود. همچنین متذکر می‌شود که تلفیق برخی از این روش‌ها با یکدیگر به‌صورت سری، می‌تواند عملکردی مناسب را در اختیار قرار دهد. به‌عنوان مثال، تلفیق روش‌های غشائی با تبادل یونی، در برخی موارد حذف کامل آرسنیک از آب را به دنبال دارد.

فهرست منابع References

۱- **میترا غلامی، حامد محمدی، سید احمد مختاری، ۱۳۸۸،** حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از فن‌آوری اسمز معکوس، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی زنجان، دوره ۱۷ , شماره ٦٨، ۱۹-۹.

2. American Water Works Association. 1999. Water quality and treatment. A Handbook of Community Water Supplies, 5th Ed., McGraw-Hill, New York.

3. **Clifford D. 1999.** Ion exchange and inorganic adsorption. In: A. Letterman, Water Quality and Treatment, American Water Works Association, McGraw Hill, New York.

4. **Debabrata Ghosh, Anirban Gupta. 2012.** Economic justification and eco-friendly approach for regeneration of spent activated alumina for arsenic contaminated groundwater treatment, Resources, Conservation and Recycling, 61, 118–124.

5. **Emett M.T, Khoe G.H. 2001.** Photochemical oxidation of arsenic by oxygen and iron in acidic solutions, Water Research, 35, 649-656.

6. **Garelick H, Dybowska A, Valsami-Jones E, Priest N.D. 2005.** Remediation technologies for arsenic contaminated drinking waters, Soils Sediments, 5, 182-90.

7. **Ghurye G, Clifford D. 2000.** Laboratory study on the oxidation of as III to as V. Proceedings, AWWA Water Quality Technology Conference,1, 12-20.

8. **Hering J.G, Chen P.Y, Wilkie J.A, Elimelech M. 1997.** Arsenic removal from drinking water during coagulation, Environmental Engineering, 123, 800-807.

9. **Hideyuki Matsunag, Chiaki Kanno, Toshishige M. Suzuki. 2005.** Naked-eye detection of trace arsenic(V) in aqueous media using molybdenum-loaded chelating resin having β-hydroxypropyl-di(β-hydroxyethyl) amino moiety, Talanta, 66, 5 , 1287–1293.

10. **Ioannis A, Katsoyiannis, Andreas Voegelin, Anastasios Zouboulis, Stephan Hug. 2015.** Enhanced as (III) oxidation and removal by combined use of zero valent iron and hydrogen peroxide in aerated waters at neutral pH values, Hazardous Materials, 297, 1–7.

11. **Jorge Garcia-Ivars, Xin Wang-Xu, Maria-Isabel Iborra-Clar. 2017.** Application of post-consumer recycled high-impact polystyrene in the preparation of phase-inversion membranes for low-pressure membrane processes, Separation and Purification Technology, 175 , 340–351.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

12. **Jumin Hao, Mei-Juan Han, Xiaoguang Meng. 2009.** Preparation and evaluation of thiol-functionalized activated alumina for arsenite removal from water, Hazardous Materials, 167, 1-3, 1215–1221.

13. **Kim, M.J. Nriagu, 2000.** Oxidation of arsenite in groundwater using ozone and oxygen, Science of the total environment, 247, 71-79.

14. **Kun Wu, Rui-Ping Liu. 2012.** Enhanced arsenic removal by in situ formed Fe–Mn binary oxide in the aeration-direct filtration process, Journal of Hazardous Materials, 239, 308–315.

15. **Lucy Mar Camacho, Sundaravadivelnathan Ponnusamy, Isaac Campos. 2015.** Evaluation of Novel Modified Activated Alumina as Adsorbent for Arsenic Removal, Handbook of Arsenic Toxicology, 121–136.

16**. Mandal B.K, Suzuki K.T. 2002**. Arsenic round the world: a review, Talanta, 58, 1, 201-235.

17. **P. Asaithambi, Abdul Raman Abdul Aziz, Wan Mohd Ashri Bin Wan Daud. 2016.** Integrated ozone—electrocoagulation process for the removal of pollutant from industrial effluent: Optimization through response surface methodology, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 105, 92–102.

18. **Parimal Pal. 2015.** Chapter 4 – Arsenic Removal by Membrane Filtration, Groundwater Arsenic Remediation, Treatment Technology and Scale UP, 105–177.

19. **Shih MC. 2005.** An overview of arsenic removal by pressure-driven membrane processes. Desalination, 172 85-97.

20. Somak Chatterjee, Sirshendu De. 2014. Adsorptive removal of fluoride by activated alumina doped cellulose acetate phthalate (CAP) mixed matrix membrane, Separation and Purification Technology, 125, 223–238.

21. **U.S. Environment of Protection Agency**. **2000.** Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water, Office of Water.

22. **Van der Bruggen B, Vandecasteele C. 2003.** Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry, Environ Pollut, 122, 435-45.

23. **Waypa, J., Elimelech, M. and Hering. 1997.** Arsenic removal by RO and NF membranes, Journal of the American Water Works Association, 89, 102-114.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]

Comparison of safety technologies on arsenic removal from water

Reza Teimouri*, Mohammad Mahdiarfar
*MSc of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Tehran South Branch, Tehran, Iran
Assistant Professor of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Tehran South, Tehran, Iran

teymouri109@yahoo.com

Abstract
Arsenic and its compounds are considered as one of the most dangerous water pollutants which are major problem in different communities in addition to the dangerous disease. Lot of researches was done to reduce/remove Arsenic and its compounds from drinking water in the world. Various solutions have been proposed based on the results that each of them has shown different performance. In this research, introduction of these strategies and synopsis comparison of their performance was presented and the effective use of these technologies has been discussed. The main technologies of Arsenic removal include adsorption, ion exchange, chemical precipitation, filtration and reverse osmosis membrane processes. Due to the maximum removing of arsenic, the results show that reverse osmosis has the best performance and is able to remove more than 98% of arsenic and its compounds in optimal conditions.
Keywords: Arsenic, Reverse Osmosis, Membrane, Nan filtration

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1395.9.4.9.7]