

## مطالعه مروری روش‌های حذف آرسنیک از منابع آبی

مرضیه حسن زاده<sup>۱\*</sup>، فریبا استوار<sup>۲</sup>

[Marzi\\_h67@yahoo.com](mailto:Marzi_h67@yahoo.com)

### چکیده

بسیاری از آلاینده‌های موجود در آب برای سلامتی انسان و محیط زیست، مضر و سمی شناخته شده‌اند. در میان این آلاینده‌ها آرسنیک از اهمیت بیشتری برخوردار است، چرا که میلیون‌ها نفر در معرض آب آشامیدنی آلوده به آن قرار دارند. سازمان بهداشت جهانی، حد مجاز آن را کمتر از ۰/۰۱ میلی گرم در لیتر (۱۰ میکرو گرم در لیتر) در آب آشامیدنی مشخص کرده است و همچنین حد مجاز آرسنیک در استاندارد ۱۰۵۳ ایران نیز همین مقدار گزارش شده است. در این مطالعه به بررسی تکنیک‌های مختلف حذف آرسنیک و همچنین کارایی نانوذرات مختلف در تصفیه آرسنیک از آب آشامیدنی پرداخته شده است. از روش‌های متداول حذف آرسنیک از منابع آبی می‌توان به اکسیداسیون، انعقاد و لخته سازی، اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون، تعویض یونی، گیاه پالایی و فناوری های نوین با تکیه بر استفاده از نانوذرات اشاره نمود. یافته ها نشان داد علی‌رغم درصد بالای حذف آرسنیک با استفاده از روش هایی مانند اکسیداسیون، تعویض یونی و شناورسازی با هوای محلول، این روش‌ها از لحاظ اقتصادی به صرفه نبوده و مدت زمان حصول به راندمان بهینه بالا می‌باشد. اخیراً استفاده از نانوذرات بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ بطوری‌که با استفاده از نانوذرات اکسید فلزاتی مانند آهن مغناطیسی، روی، مس، سرب و آلومینیم می‌توان آرسنیک محلول در منابع آبی با غلظت بالای ۵۰ mg/L را به طور کامل حذف نمود و پس از اشباع شدن جاذب، با اجذب آلاینده، امکان چندبار استفاده از جاذب‌ها میسر می‌باشد. در نتیجه، استفاده از نانوذرات نسبت به فرایندهای شیمیایی بهتر بوده و با توجه به راندمان بالا در زمان کم، از لحاظ اقتصادی به صرفه می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** آرسنیک، استاندارد، منابع آبی، روش حذف، نانوذرات

### A Review of Arsenic Removal Methods from Water Resources

Marzieh Hasanzadeh<sup>\*1</sup>, Fariba Ostovar<sup>2</sup>

1-Ph.D Student, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Guilan, Rasht, Iran

2-Ph.D Student, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Urmia, Western Azerbaijan, Iran

Many of the pollutants in water are known to be harmful for human health and toxic for environment. Among these pollutants, Arsenic is more important because millions of people are exposed to contaminated drinking water. The World Health Organization (WHO) has identified the permitted limit of below 0.01 mg/L (10 micrograms per liter) for arsenic in drinking water and the same amount for arsenic has been reported in Iran's 1053 standard. In this study, various techniques have been investigated for removing Arsenic and efficiency of different nanoparticles in treatment of Arsenic from drinking water. Common methods of removing Arsenic from water sources are including oxidation, coagulation and flocculation, reverse osmosis and ultrafiltration, ion exchange, phytoremediation and new technologies based on the use of nanoparticles. The findings showed that despite of the high arsenic removal percentage using different methods such as oxidation, ion exchange and floating with dissolved air, these methods are not economic and a lot of time is required to achieve optimal efficiency. Recently, the use of nanoparticles has become very popular, so that metal oxide nanoparticles such as magnetic iron, Zinc, Copper, Serum, and Aluminum can completely eliminate Arsenic soluble with a high concentration of 50 mg/L in water sources and after the adsorbent is saturated, it is possible to use the regeneration of adsorbents, repeatedly by adsorbing the pollutant into the adsorbent. As a result, the use of nanoparticles is better than chemical processes and is economic due to their high efficiency in a short time.

**Keywords:** Arsenic, Standard, Water Resources, Removal Method, Nanoparticles.

۱- دانشجوی دکتری، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، آذربایجان

غربی، ایران

## مقدمه

تمام عناصر به طور طبیعی با غلظت‌های گوناگون در محیط وجود دارند، که در میان آن‌ها عناصر سمی و خطرناک هم دیده می‌شود. آلودگی‌های عنصری می‌تواند منشأ طبیعی و غیر طبیعی داشته باشد. آلودگی‌هایی که منشأ طبیعی دارند از این نظر قابل توجه‌اند که اگر در سطح قرار داشته باشند باعث آلوده کردن آب، خاک و هوا می‌شوند و در نهایت محیط زیست و اکوسیستم را دچار مشکل می‌کنند. یکی از مهم‌ترین خطراتی که اکوسیستم‌های طبیعی و انسانی را تهدید می‌کند آلودگی منابع آب و خاک توسط فلزات سنگین و سمی است که وجود آن‌ها سبب ایجاد تغییرات بنیادی در اکوسیستم‌هاست و با ورود به چرخه زیستی می‌تواند اثرات مخرب زیست محیطی را به دنبال داشته باشد (سلامی اصل و داودیان، ۱۳۹۴). آلودگی آرسنیک در محیط بیشتر به دلیل فعالیت‌های معدن کاری و کارخانه‌های فرآوری کانی‌های حاوی آرسنیک است (بهاروند و همکاران، ۱۳۸۶). آرسنیک شبه فلز سنگینی است که نام آن از کلمه یونانی آرسنیکون به معنی قوی گرفته شده است. این عنصر در محیط در حالت‌های مختلف اکسیداسیون یافت می‌شود که میتوان به آرسنات، آرسنیت و حالت صفر ظرفیتی آن اشاره کرد (عسگری و همکاران، ۱۳۸۷). این شبه فلز در همه جای پوسته‌ی زمین وجود دارد و مواجهه انسان‌ها با آرسنیک غیرآلی عمدتاً از طریق مصرف آب شربی است که بصورت طبیعی با آرسنیک آلوده شده باشد (اسمدلی و کینیبورگ، ۲۰۰۲). منابع اصلی ورود این عنصر سمی به محیط و آب آشامیدنی عبارتست از: خروجی برخی صنایع مانند رنگ، پالایشگاه‌های نفت، صنایع فلزی، شیشه‌سازی، سرامیک و غیره (نیک مراد، ۱۳۸۷). مصرف طولانی آب آلوده به آرسنیک می‌تواند به مشکلات سلامتی شدید، از جمله ضایعات پوستی (کراتوزیس<sup>۱</sup> و پیگمانتاسیون<sup>۲</sup>)، و سرطان کلیه، ریه، کبد و ... منجر شود (آووال و همکاران، ۲۰۱۲). برای کاستن از این نگرانی‌ها سازمان بهداشت جهانی<sup>۳</sup> (WHO)، حداکثر مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی را ۵۰ ppb - ۱۰ تعیین کرده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰). در نتیجه نیاز به توسعه و پیشرفت فن‌آوری‌های مؤثر برای حذف آرسنیک از آب و دستیابی به این اهداف ایجاد شده است. از زمان

شناسایی مشکلات بهداشتی ناشی از حضور آرسنیک در آب آشامیدنی، تلاش‌های فراوانی توسط دانشمندان در نقاط مختلف دنیا برای حذف آرسنیک از آب شرب با استفاده از روش‌های مختلف و توجه ویژه به روش‌های جذبی به عمل آمده است (مسافری و مصداقی نیا، ۱۳۸۴). با توجه به اهمیت این موضوع برخی از روش‌های حذف آرسنیک از آب‌های آشامیدنی در ذیل بیان گردیده است.

## - تکنولوژی‌های مختلف برای حذف آرسنیک

## • اکسیداسیون

از آنجایی که آرسنیک سه ظرفیتی نسبت به آرسنیک پنج-ظرفیتی بسیار سمی‌تر است و تا  $pH=9$  به صورت مولکولی و غیر باردار است، از این رو حذف ترکیبات آرسناتی بسیار کارتر از ترکیبات آرسنیتی هستند، بنابراین نیاز به روش‌هایی است که بتوان آرسنیت موجود در آب را طی فرایند اکسیداسیون به آرسنات تبدیل کرد. در این راستا، توسعه موادی که بر پایه فرایندهای اکسیداسیون شیمیایی در محل<sup>۱</sup> کارایی لازم را برای حذف مؤثر آلودگی داشته باشند، مورد توجه قرار گرفته‌اند (گوری و کلیفرد، ۲۰۰۱؛ رومرو و همکاران، ۲۰۰۹). فرآیند اکسیداسیون شیمیایی به عنوان یکی از روش‌های کم هزینه، سریع و مؤثر در حذف آلاینده‌ها از منابع آبی در بین تکنولوژی‌های مشابه مطرح است. از جمله اکسیدکننده‌ها میتوان به کلر گازی، هیپوکلریت، اوزون، پرمنگنات، هیدروژن پراکسید و غیره اشاره کرد (پتین و میلرو، ۲۰۰۰)

در بین این اکسیدکننده‌ها، پراکسیدکلسیم به عنوان یکی از کارآمدترین آزادکننده‌های اکسیژن در فرایند اکسیداسیون شیمیایی در محل شناخته شده است. مقالات متعددی در زمینه افزودن کلسیم پراکسید به خاک‌ها و آب‌های آلوده گزارش شده که نتیجه آن‌ها افزایش غلظت اکسیژن در محیط و افزایش تخریب‌پذیری زیستی آلاینده‌های نامحلول است (نورفوپ و کاسیدی، ۲۰۰۸). شاید بتوان مهم‌ترین مزیت استفاده از روش فوق را قدرت و کارایی بالا و مقرون به صرفه بودن آن دانست. اما سرعت کم واکنش اکسیداسیون باعث شده است که همواره استفاده از فرایند فوق در حذف آلاینده‌ها در برنامه‌های کلان مدیریت و تصمیم‌گیری تصفیه آب، در اولویت‌های بعدی قرار گیرد. در این راستا، استفاده از نانوذرات به لحاظ افزایش نسبت

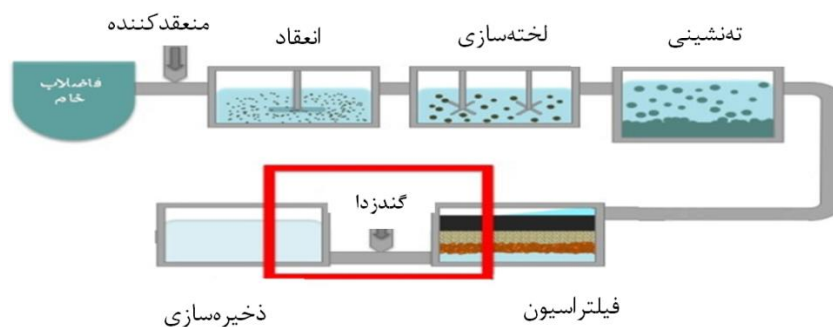
1 Keratoses

2 Pigmentation

3 World Health Organization

لخته‌های بدست آمده که ذرات معلق و کلوئیدی را به همراه دارند، به حد کافی درشت هستند و به راحتی ته نشین و صاف می‌شوند.

در مورد آرسنیک فرآیند انعقاد و فیلتراسیون با استفاده از نمک‌های فلزی یا نرم‌سازی با آهک (ترسیب با آلوم، ترسیب با آهن و نرم‌سازی با آهک) روش متداولی است (جین و سینگه، ۲۰۱۲؛ چونگ و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از ساده‌ترین و ارزان‌ترین راه‌های حذف آرسنیک آب استفاده از فیلتر سونو است که با استفاده از مواد اولیه محلی قابل تهیه بوده در آن براده‌های آهن عامل اصلی زداینده آرسنیک می‌باشد (افلاکی و شیخ قمی، ۱۳۸۷). در شکل (۱) طرح کلی لخته‌سازی و فیلتراسیون نمایش داده شده است.



شکل ۱- طرح کلی انعقاد و لخته‌سازی

غلظت بالای رنگ و کدورت پایین مورد استفاده قرار گرفته است (کرد مصطفی پور و همکاران، ۱۳۸۹).

#### • اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون

جداسازی غشایی متشکل است از فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب که طی آن‌ها فاز مایع تحت تاثیر یک گرادیان فشار از درون غشاها عبور داده می‌شوند (مانند اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون). آلاینده‌های موجود در آب و پساب‌ها که قبلاً فیلتر شده اند توسط غشاهایی که فیلم‌های نازک از جنس مواد پلیمری هستند، جدا می‌شوند (مولر اند مولر، ۱۳۷۲) در این فرآیند اختلاف فشار باعث عبور آب خالص در میان غشاء از قسمت رقیق به غلیظ می‌شود. این فشار را فشار اسمزی و این فرآیند را اسمز می‌نامند. این پدیده تا زمانی که پتانسیل شیمیایی دو طرف برابر گردند ادامه خواهد یافت. در حالت تعادل اختلاف فشار بین دو طرف غشاء برابر اختلاف فشار

سطح به حجم باعث می‌شود که سرعت واکنش‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد (کاسیدی و ایروین، ۱۹۹۹).

#### • لخته‌سازی و فیلتراسیون

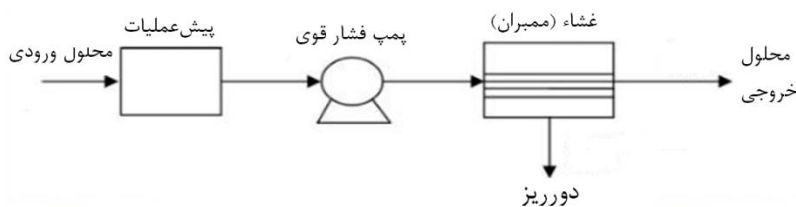
صاف کردن یا فیلتراسیون یک روش فیزیکی برای حذف ذرات معلق در هر مایع است که در آن جدا کردن آلودگی‌ها از آب بوسیله عبور دادن آن از میان یک غشاء نیمه تراوا انجام می‌گیرد. این غشاء اجازه عبور به بعضی اجزاء را می‌دهد در حالی که مانع عبور اجزای دیگر می‌شود. روش انعقاد با افزودن یک ماده منعقد کننده به آب باعث خنثی شدن بار ذرات کلوئیدی شده، این ذرات با نزدیک شدن به هم ذرات درشت دانه و وزین‌تری را ایجاد می‌کنند (اورملند و استولز، ۲۰۰۳).

#### 1. In situ chemical oxidation

یکی از فرآیندهایی که اخیراً به منظور حذف آرسنیک از محیط‌های آبی مورد توجه قرار گرفته است، فرآیند شناورسازی با هوای محلول می‌باشد. سابقه کاربرد این فرآیند در تصفیه آب به دهه ۱۹۲۰ برمی‌گردد که به منظور زلال‌سازی آب از طریق جداسازی ذرات موجود در آن استفاده شد. مکانیسم شناورسازی از طریق رهاسازی حباب‌های هوا در تانک شناورسازی از طریق انحلال هوا در آب خام با استفاده از فشار و سپس پایین آوردن فشار به دلیل مواجهه آن با هوای اتمسفر صورت می‌پذیرد. به دلیل کاربرد مقادیر بالای فشار، حباب‌های کوچکی به قطر حدود ۴۰ میکرون (در گستره ۱-۱۰۰ میکرون) تولید می‌شود. در حال حاضر فرآیند شناورسازی با هوای محلول در تصفیه آب آشامیدنی به طور موفقیت آمیزی در ترکیب با فرآیند لخته‌سازی جهت حذف جلبک‌ها و مواد هیومیکی<sup>۲</sup> و نیز

#### 2. Humic material

میکند. با فشار کافی اعمال شده آب خالص از طرف غلیظ به طرف رقیق رانده می شود و غشاء اجازه عبور یون ها را نمی دهد. آرسنیک نیز به عنوان یک یون آلاینده در آب، می توان با این روش جداسازی کرد (مظفریان و همکاران، ۱۳۸۵). شکل ۲ دیگرامی از یک سیستم اسمز معکوس را نشان می دهد.



شکل ۲. طرح شماتیک سیستم اسمز معکوس

واحد‌های تبادل یونی معمولاً وقتی استفاده می شوند که بخواهیم آرسنیک را از تمامی آب ورودی به منزل جدا نماییم. در واقع این روش می تواند نیاز صنایع به آب فوق خالص را مرتفع سازد. این رزین ها به دو نوع قوی و ضعیف تقسیم می شوند و می توانند در آرایش های مختلفی قرار گرفته و آب فوق خالص تولید نمایند.

البته تبادل آنیونی، یون سولفات را به یون آرسنیک ترجیح می دهد و این امر منجر به کاهش ظرفیت رزین برای حذف آرسنیک خواهد شد. رزین تبادل یونی زمانی بیشترین تاثیر را خواهد داشت که، مقدار سولفات کمتر از ۲۵ میلی گرم در لیتر باشد (جین و سینگه، ۲۰۱۲)

اختراع جدید موسوم به ArsenXnp کارایی و راندمان بالایی در حذف آرسنیک نشان داده است. این اختراع در حقیقت یک رزین مبادله یونی است که در راستای تکمیل رزین های انتخابگر جهت تصفیه آب های زیرزمینی از یونهای نیترات، پرکلرات و کروم شش ظرفیتی ساخته شده است. از مهم ترین مزایای این روش، انتخابگری بالای آن برای یون آرسنیک است؛ که پلیمرهای پایه آن برای دوام و بقا نیاز به شستشو ندارند. به عبارت دیگر؛ این محصول عمر طولانی و کاربرد بسیار ساده ای دارد. این فناوری علاوه بر حذف آرسنیک از آب آشامیدنی، در جهت حذف آرسنیک از پساب های صنایع نیمه هادی و آب های استفاده شده در برج های خنک کننده نیز کاربرد دارد.

### • تعویض یونی

فرآیند تبادل یونی یکی از اشکال پدیده جذب سطحی است، که در آن فاز سیال در تماس با فاز جامد جاذب قرار می گیرد. طی این تماس برخی از اجزای موجود در فاز سیال جذب فاز جامد شده و از سیال جدا می گردند. فرآیند تبادل یونی فرآیندی برگشت پذیر است که طی آن یون های خارجی موجود در آب جذب گروه های عاملی قرار گرفته بر روی شبکه پلیمری (فاز جامد) می گردند و به این ترتیب هرگونه ناخالصی یونی آب برطرف می شود. پس از اشباع شدن گروه های عاملی، سیستم تحت عملیات بازیابی و شستشوی شیمیایی قرار گرفته و مجدداً مورد استفاده قرار می گیرد. در سیستم های تبادل یونی برای تولید آب با درجه خلوص، از رزین های اسیدی و بازی استفاده می شود. مانند تبادل یون که برای حذف آرسنیک از رزین تبادل آنیونی بازی قوی استفاده می شود (اورملند و استولز، ۲۰۰۳).

تبادل یونی در حذف آرسنیک همانند یک نرم کننده معمولی آب عمل می کند. در این حال آرسنیک آب حذف شده و به جای آن کلر به آب افزوده می شود. سولفات، کل جامدات محلول، سلنیم، فلوراید و نیترات رقیب آرسنیک هستند که می توانند به جای آن حذف شوند و کارایی فیلتر را در حذف آرسنیک کم کنند. جامدات معلق و آهن رسوب کرده نیز موجب گرفتگی واحدهای تبادل یونی می شوند و بنابراین آب در صورت دارا بودن آن ها بهتر است قبل از گذر از واحد تبادل یونی از یک پیش تصفیه گذرانده شود.

### • تکنیک گیاه‌پالایی<sup>۱</sup>

گیاه‌پالایی روش جدیدی برای حذف آلودگی است. این تکنیک در واقع استفاده مستقیم از گیاهان سبز و ارتباط آن‌ها با موجودات ذره‌بینی خاک به منظور تجزیه، نگهداری و یا بی‌خطر کردن آلاینده‌ها می‌باشد، که برای رفع هر دو نوع آلاینده آلی و معدنی به کار می‌رود (بابایی و همکاران، ۱۳۸۵). این تکنولوژی سبز شیوه‌ای مناسب جهت از بین بردن فلزات سمی خاک بوده و بدلیل مقرون به صرفه بودن و مناسب بودن از نظر محیط زیست بسیار قابل توجه است (مهراگ، ۲۰۰۵).

در جدول ۱، نام برخی از این گیاهان و مقدار آرسنیک جذب شده توسط آنها آورده شده است (دیکسیت و هرینگ، ۲۰۰۶).

جدول ۱: اسامی گیاهان مناسب برای حذف آرسنیک

نام گیاه	آرسنیک موجود در گیاه (میلی گرم بر کیلوگرم گیاه خشک)
<i>Agrostis tenuis</i>	۲۴۷۰
<i>Lemna gibba</i>	۱۹۶۶/۴۸
<i>Pteriscretica</i>	<۱۰۰۰
<i>Pteris longifolia</i>	<۱۰۰۰
<i>Egeriadensa</i>	<۱۰۰۰
<i>Ceratophyllum demersum</i>	<۱۰۰۰
<i>Holcus lanatus</i>	۵۶۰
<i>Chara</i>	۴۴۰/۸
<i>Pterisargyraea</i>	۳۶۱
<i>Hydrillaverticillata</i>	۲۸۲/۸
<i>Pistia Slatiotes</i> (ریشه)	۲۴۶/۸
<i>Colocasiaesculenta</i>	۱۹۵
<i>Eichhornia crassipes</i>	۱۴۳/۸

### • فناوری‌های نوین

روش‌های بسیاری برای حذف آرسنیک از محیط‌های زیر زمینی و سطحی وجود دارد که از میان آن‌ها، فناوری جذب به دلیل مزایای آن مانند راه اندازی ساده تر، بازسازی آسان تر و راندمان حذف بالاتر به طور گسترده ای استفاده شده است (نیکومل و همکاران، ۲۰۱۶).

از روش‌های دیگری که در حال حاضر در دسترس هستند می‌توان به رسوب‌دهی، جذب، تبادل یونی، استخراج با حلال، فوم شناور، نانوفیلتراسیون و جداسازی بیولوژیکی اشاره کرد. با این حال، به تازگی مشخص شده است که، این فناوری‌ها در زمینه عملی با مشکل مواجه است و بنابراین مواد و سیستم‌های بهبودیافته موردنیاز است. اخیراً، نانومواد اکسید و هیدروکسیدهای فلزی مانند آهن، زیرکونیوم، تیتانیوم، منگنز و آلومینیوم به دلیل ساختار الکترونیکی متغیر، فراوانی طبیعی و ثبات در محلول‌های آبی به صورت گسترده برای از بین بردن آرسنیک از آب‌های آلوده استفاده شده است (اولیویرا و همکاران، ۲۰۰۴؛ نیتو دلگادو و رانگل مندز، ۲۰۱۲). نانوذرات نیز می‌توانند برای برنامه‌های زیست‌محیطی اصلاح شوند. واکنش‌پذیری نانوذرات آهن در اثر جفت شدن با فلزات دارای خواص کاتالیزوری بهبود می‌یابد (اوبار و میر، ۲۰۰۴). در چند سال گذشته، این نتیجه به دست آمد که؛ اختلاط  $CeO_2$  یا  $ZrO_2$  به صورت قابل توجهی می‌تواند به بهبود ظرفیت جذب به سمت آرسنیک منجر شود، که دلیل آن تمایل ذاتی آن‌ها به آنیون‌های پلی‌اکسی می‌باشد (بیسواس و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین کامپوزیت‌هایی بر مبنای  $CeO_2$  و  $ZrO_2$  می‌توانند به عنوان مواد کاندید ایده‌آل برای حذف آرسنیک به شمار روند. در این راستا توانایی کامپوزیت  $CeO_2-ZrO_2$  برای حذف آرسنیک بررسی شده است. نتایج تحقیقی که توسط ژوا و همکاران انجام گرفت نشان داد که، هر گرم از این کامپوزیت توانایی حذف ۲۷/۱ میلی‌گرم آرسنیک پنج‌ظرفیتی و ۹/۲ میلی‌گرم آرسنیک سه ظرفیتی را دارد (ژو و همکاران، ۲۰۱۳). تحقیق دیگری توسط حسن‌زاده و همکاران به بررسی حذف آرسنیک با کامپوزیت‌های مختلف؛ بر مبنای  $CeO_2$  انجام گرفت. در این تحقیق از نانوکامپوزیت  $CeO_2/Fe_2O_3$  برای حذف آرسنیک استفاده شد. مقدار  $K_F$  برای  $CeO_2$ ،  $Fe_2O_3$  و  $CeO_2/Fe_2O_3$  بر اساس ایزوترم جذب فروندلیچ به ترتیب ۱/۳۱، ۱/۳۷ و ۵ به دست آمد؛ که بیانگر جذب مطلوب‌تر توسط نانوکامپوزیت  $CeO_2/Fe_2O_3$  می‌باشد (انصاری و همکاران، ۲۰۱۷).

همچنین بررسی قدرت جذب در سیستم پیوسته توسط جاذب  $CeO_2/SD$  نیز انجام شد؛ که نتایج آن نشان داد که، ماکزیمم ظرفیت جذب حجمی آرسنیک برای این جاذب  $mg/L$

(راموس و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج برآمده از پژوهشی که توسط علیائی و همکاران انجام گرفت، نشان داد که نانوذرات پراکسید-کلسیم دارای پتانسیل بالایی در زمینه زدایش آرسنیک (III) از آب هستند.

استفاده از نانوذرات پراکسیدکلسیم به لحاظ تهیه آسان، هزینه ارزان و واکنش سریع، جهت کاهش و حذف محدوده نسبتا گسترده‌ای از این آلاینده موثر واقع شد و می‌توان با استفاده از این نانوذرات به میزان توصیه شده سازمان خواروبار (۱۰۰ µg/L) دست یافت (علیایی و همکاران، ۱۳۹۱).

### بحث و نتیجه‌گیری

آرسنیک عنصری سمی است که از طریق خروجی برخی صنایع مانند رنگ، پالایشگاه‌های نفت، صنایع فلزی، شیشه‌سازی، سرامیک و غیره به محیط‌زیست و آب آشامیدنی وارد می‌شود. از این‌رو تعیین غلظت آن همواره مورد توجه محققین بوده است. امروزه روش‌های مختلفی به منظور حذف آرسنیک از آب مطرح می‌شود که از جمله می‌توان به فرآیندهای تبادل‌یونی، اسمز معکوس، فرآیندهای غشایی، انعقاد و فیلتراسیون و ... اشاره نمود. با استفاده از روش شناورسازی با هوای محلول‌میتوان آرسنیک را با کارایی بیش از ۹۹ درصد حذف کرد. فیلتر سونو توانایی کاهش قابل توجه آرسنیک ۳ و ۵ ظرفیتی موجود در آب را دارا بوده و با توانایی تصفیه ۴۰ لیتر آب در هر ساعت برای تهیه آب مصرفی مناطق روستایی، که دسترسی آن‌ها به آب سالم با مشکل مواجه است؛ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. آلودگی به فلزات سنگین و مواد ضد زیست سبب شده است که، توسعه فناوری‌های گیاه پالایی، استفاده از روش‌های رفع آلودگی مبتنی بر گیاهان را مورد توجه قرار دهند. استفاده از این فناوری‌ها برای زیرمجموعه‌ای از آلودگی‌های حاوی جیوه، آرسنیک، کروم و روی کاربرد وسیعی داشته است. هدف از کاربرد این فناوری، افزایش انتقال آلاینده‌ها از خاک به بخش‌های هوایی گیاه است، به گونه‌ای که با هر بار محصول دهی، بیشترین میزان آلاینده‌ها از محیط خاک خارج شود. در طی سالیان اخیر استفاده از فلزات با ظرفیت صفر (مانند  $Zn^0$ ،  $Fe^0$ ،  $Al^0$ ) به عنوان عامل مؤثری برای اصلاح آب‌های آلوده مورد مطالعه قرار گرفته است. در بین این فلزات، استفاده از آهن با ظرفیت صفر به دلیل فراوانی، ارزانی و غیرسمی بودن، واکنش سریع و بازده بالا در تجزیه آلاینده‌ها (از جمله آرسنیک)؛ از آب‌های زیرزمینی

$10^3 \times 0.96$  می‌باشد (حسن‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶). طبق تحقیقات انجام گرفته مشخص گردید که، نانو ذرات آهن برای حذف آرسنیک بسیار موثرند. اکسید آهن پوشش داده شده روی ماسه<sup>۱</sup>، کربن فعال، آلومینای فعال،  $TiO_2$ ، هیدروکسید آهن پوشش داده شده روی آلومینا و همچنین جاذب‌های ارزان قیمتی همچون سبوس برنج، گل سرخ<sup>۲</sup>، تفاله کوره ذوب آهن<sup>۳</sup>، سنگ معدن آهن‌دار ارزان قیمت<sup>۴</sup> و تفاله آب پرتقال<sup>۵</sup> برای حذف آرسنیک (III) مورد استفاده قرار گرفته اند (لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ موهان و پیتمن، ۲۰۰۷).

در تحقیقی که توسط مارتینسون و همکارانش صورت گرفت، نانوذرات  $\gamma-Fe_2O_3$  برای حذف آرسنیک (III) و آرسنیک (V) و همچنین نانوذرات سوپراکسید آهن  $Fe_3O_4$  پوشش داده شده با آسکوربیک اسید برای حذف آرسنیک (III) به کار گرفته شده است (مارتینسون و ردی، ۲۰۰۹). گوآ و همکاران از سیدریت<sup>۶</sup> با فرمول شیمیایی  $FeCO_3$  برای حذف آرسنیک سه و پنج ظرفیتی، در هردو سیستم پیوسته و ناپیوسته استفاده کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که، ظرفیت جذب برای آرسنیک ۳ و ۵ ظرفیتی به ترتیب ۱۰۴۰ و ۵۲۰ میکروگرم بر گرم می‌باشد (گاو و همکاران، ۲۰۰۷).

در مطالعه‌ای دیگر که توسط گوسوامیا و همکاران انجام شد از نانوذرات مس (II) اکسید برای حذف آرسنیک (III) استفاده شده است؛ که ۱ گرم از این نانوجاذب می‌تواند پس از ۳۰۰ دقیقه ۱ لیتر محلول آرسنیک با غلظت ۲۰۰ میکروگرم بر لیتر را تا ۱۰۰ درصد حذف نماید (گوسوامی و همکاران، ۲۰۱۲). نانو جاذب‌های متخلخل تیتانیوم<sup>۷</sup> از دیگر جاذب‌های معرفی شده برای حذف آرسنیک می‌باشند (هان و همکاران، ۲۰۱۰). در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد که جذب آرسنیک به وسیله  $Fe_2O_3$  بالاتر از  $Al_2O_3$  می‌باشد (زاد و دهارمادهیکاری، ۲۰۰۷). همچنین مطالعاتی برای بررسی توانایی نانومواد برای حذف آرسنیک انجام شده است. به‌عنوان مثال، آهن صفر ظرفیتی در ابعاد نانو برای حذف آرسنیک از طریق مکانیسم کاهش آرسنیک (سه و پنج ظرفیتی) به آرسنیک عنصری موثر است

1. Iron oxide coated sand
2. Red mud
3. Blast furnace slag
4. Low-cost ferruginous manganese ore
5. Orange juice residue
6. Siderite
7. Nanoporous titania adsorbents

تکنیک گیاه پالایی. نهمین همایش ملی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان.

سلامی اصل، س.، داودیان، س. (۱۳۹۴). اثرات زیست محیطی فلز آرسنیک و روش های حذف آن از آب و خاک. اولین کنگره علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایران، انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین. علیایی، ا.، بانژاد، ح.، رحمانی، ع.ر.، افخمی، ع.، خداویسی، ج. (۱۳۹۱). امکان سنجی استفاده از نانوذرات پراکسید کلسیم در حذف آرسنیک (III) از آب های آلوده در کشاورزی و تاثیر آن بر پارامترهای کیفی آبیاری. مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، ۳(۳): ۳۱۹ تا ۳۳۰.

عسگری، ع.، محوی، ا.، واعظی، ف.، قصری، آ. (۱۳۸۷). گرانول هیدروکسید آهن جاذبی برای حذف آرسنات و آرسنیت از آب آشامیدنی. مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان، ۱۳(۲): ۸۶-۷۶.

کرد مصطفی پور، ف.، بذرافشان، ا.، کمائی، ح. (۱۳۸۹). بررسی قابلیت حذف آرسنیک از آب با استفاده از فرآیند انعقاد و شناورسازی با هوای محلول. فصلنامه سلامت و محیط زیست، ۳(۳): ۳۰۹-۳۱۸.

مولر اند مولر، (۱۳۷۲). ترجمه سعید فردوسی، مدیریت پسماندهای شیمیایی، انتشارات شهرداری تهران. مظفریان، ک.، مدائینی، س.س.، خشنودی، م.ع. (۱۳۸۵). ارزیابی عملکرد فرآیند اسمز معکوس در حذف آرسنیک از آب. فصلنامه آب و فاضلاب، ۶۰: ۲۲-۲۸.

مسافری، م.، مصداقی نیا، ع. (۱۳۸۴). حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از آلومینای فعال اصلاح شده. فصلنامه آب و فاضلاب، دانشکده بهداشت و تغذیه، دانشگاه علوم پزشکی ۱۶(۳): ۲-۱۴.

نیک مرام، ر. (۱۳۸۷). ارزیابی عملکرد پرمنگنات پتاسیم در حذف آرسنیک از آب شرب با استفاده از متدولوژی شش سیگما. دومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد بهره-برداری.

Ansari, R., Hassanzadeh, M., & Ostovar, F. (2017). Arsenic Removal from Water Samples Using CeO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite. International Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 13(4), 335-345.

Awual, M. R., Shenashen, M. A., Yaita, T., Shiwaku, H., & Jyo, A. (2012). Efficient arsenic (V) removal from

بیشتر مورد توجه بوده است. با توجه به به صنعتی شدن جوامع و افزایش آلودگی های زیست محیطی و کاهش منابع آب دارای کیفیت، استفاده از روش های جدید تصفیه آب و فاضلاب که نانوتکنولوژی مهم ترین آن هاست، روز به روز در حال گسترش است. تحقیقات اخیر نشان داده است که نانوذرات و نانو-کامپوزیت های آهن دارای مزایایی از قبیل کارایی حذف بالا و زمان واکنش کوتاه بوده و می توانند به عنوان یک گزینه مناسب در حذف آرسنیک از محیط های آبی مطرح گردد.

با توجه به روش های حذف آرسنیک که در این مقاله عنوان شد، روش اکسیداسیون علی رغم کارایی بالایی که در حذف آرسنیک دارد، به دلیل سرعت پایین فرآیند، در اولویت های بعدی قرار می گیرد. متداول ترین روش صنعتی در مواردی که تهیه آب فوق خالص ضروری است، استفاده از رزین های تبادل یونی می باشد. البته این روش زمانی کارایی بالایی دارد که، آنیون های مزاحم موجود در محیط از جمله یون سولفات؛ کمتر از mg/L ۲۵ باشند. استفاده از تکنیک گیاه پالایی نیز، به دلیل مقرون به صرفه تر بودن و سازگاری بهتر با محیط زیست بسیار پرکاربرد می باشد.

در سال های اخیر استفاده از نانوذرات به دلیل خواص شگفتی که در مقیاس نانو از خود نشان می دهند و همچنین بالا بودن نسبت سطح به حجم در آن ها؛ به طرز چشمگیری رو به افزایش است. با توجه به تحقیقات انجام گرفته نانوذرات و نانو کامپوزیت های بر پایه ی اکسید آهن، زیرکونیوم، آلومینیوم، تیتانیوم و سریم برای حذف آرسنیک استفاده شده اند که از میان آن ها نانوذرات و نانو کامپوزیت های اکسید آهن کارایی و راندمان بسیار بالایی برای حذف آرسنیک از خود نشان داده اند.

## منابع

افلاکی، ف.، شیخ قمی، ه. (۱۳۸۷). بررسی کارایی فیلتر سونو جهت حذف آرسنیک از آب آشامیدنی در مناطق با محدودیت دسترسی به آب سالم. یازدهمین همایش ملی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی زاهدان.

بهاروند، س.، میربیک سبزواری، ک.، فرهپور، م.م. (۱۳۸۶). تأثیر آرسنیک بر محیط زیست و سلامت انسان. اولین همایش زمین-شناسی زیست محیطی و پزشکی دانشگاه شهید بهشتی.

بابایی، ی.، علوی مقدم، م.ر.، قاسم زاده، ف.، ارباب زوار، م.ح. (۱۳۸۵). بررسی امکان حذف آرسنیک از آب با استفاده از

- Meharg, A. A. (2005). Mechanisms of plant resistance to metal and metalloid ions and potential biotechnological applications. *Plant and Soil*, 274(1-2), 163-174.
- Northup, A., & Cassidy, D. (2008). Calcium peroxide (CaO<sub>2</sub>) for use in modified Fenton chemistry. *Journal of Hazardous Materials*, 152(3), 1164-1170.
- Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., & Du Laing, G. (2016). Technologies for arsenic removal from water: current status and future perspectives. *International journal of environmental research and public health*, 13(1), 62.
- Nieto-Delgado, C., & Rangel-Mendez, J. R. (2012). Anchorage of iron hydro (oxide) nanoparticles onto activated carbon to remove As (V) from water. *Water research*, 46(9), 2973-2982.
- Obare, S. O., & Meyer, G. J. (2004). Nanostructured materials for environmental remediation of organic contaminants in water. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 39(10), 2549-2582.
- Oremland, R. S., & Stolz, J. F. (2003). The ecology of arsenic. *Science*, 300(5621), 939-944.
- Oliveira, L. C., Petkowicz, D. I., Smaniotto, A., & Pergher, S. B. (2004). Magnetic zeolites: a new adsorbent for removal of metallic contaminants from water. *Water research*, 38(17), 3699-3704.
- Pettine, M., & Millero, F. J. (2000). Effect of metals on the oxidation of As (III) with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Marine chemistry*, 70(1-3), 223-234.
- Ramos, M. A., Yan, W., Li, X. Q., Koel, B. E., & Zhang, W. X. (2009). Simultaneous oxidation and reduction of arsenic by zero-valent iron nanoparticles: understanding the significance of the core-shell structure. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(33), 14591-14594.
- Romero, A., Santos, A., Vicente, F., Rodriguez, S., & Lafuente, A. L. (2009). In situ oxidation remediation technologies: Kinetic of hydrogen peroxide decomposition on soil organic matter. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 627-632.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*, 17(5), 517-568.
- Xu, W., Wang, J., Wang, L., Sheng, G., Liu, J., Yu, H., & Huang, X. J. (2013). Enhanced arsenic removal from water by hierarchically porous CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> nanospheres: role of surface-and structure-dependent properties. *Journal of hazardous materials*, 260, 498-507.
- Zhang, S., Niu, H., Cai, Y., Zhao, X., & Shi, Y. (2010). Arsenite and arsenate adsorption on coprecipitated bimetal oxide magnetic nanomaterials: MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Chemical engineering journal*, 158(3), 599-607.
- Zade, P. D., & Dharmadhikari, D. M. (2007). Removal of arsenic as arsenite from groundwater/wastewater as stable metal ferrite. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42(8), 1073-1079.
- water by ligand exchange fibrous adsorbent. *Water research*, 46(17), 5541-5550.
- Biswas, B. K., Inoue, J. I., Inoue, K., Ghimire, K. N., Harada, H., Ohto, K., & Kawakita, H. (2008). Adsorptive removal of As (V) and As (III) from water by a Zr (IV)-loaded orange waste gel. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 1066-1074.
- Cassidy, D. P., & Irvine, R. L. (1999). Use of calcium peroxide to provide oxygen for contaminant biodegradation in a saturated soil. *Journal of hazardous materials*, 69(1), 25-39.
- Choong, T. S., Chuah, T. G., Robiah, Y., Koay, F. G., & Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination*, 217(1-3), 139-166.
- Dixit, S., & Hering, J. G. (2006). Sorption of Fe (II) and As (III) on goethite in single-and dual-sorbate systems. *Chemical geology*, 228(1-3), 6-15.
- Ghurye, G., & Clifford, D. A. (2001). Laboratory study on the oxidation of arsenic III to arsenic V. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Guo, H., Stüben, D., & Berner, Z. (2007). Adsorption of arsenic (III) and arsenic (V) from groundwater using natural siderite as the adsorbent. *Journal of colloid and interface science*, 315(1), 47-53.
- Goswami, A., Raul, P. K., & Purkait, M. K. (2012). Arsenic adsorption using copper (II) oxide nanoparticles. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(9), 1387-1396.
- Hasanzadeh, M., Ansari, R., & Ostovar, F. (2016). Synthesis and application of CeO<sub>2</sub>/sawdust nanocomposite for removal of As (III) ions from aqueous solutions using a fixed bed column system. *Global NEST J*, 19(1), 7-16.
- Han, D. S., Abdel-Wahab, A., & Batchelor, B. (2010). Surface complexation modeling of arsenic (III) and arsenic (V) adsorption onto nanoporous titania adsorbents (NTAs). *Journal of colloid and interface science*, 348(2), 591-599.
- Jain, C. K., & Singh, R. D. (2012). Technological options for the removal of arsenic with special reference to South East Asia. *Journal of environmental management*, 107, 1-18.
- Li, Z., Deng, S., Yu, G., Huang, J., & Lim, V. C. (2010). As (V) and As (III) removal from water by a Ce-Ti oxide adsorbent: behavior and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 161(1-2), 106-113.
- Mohan, D., & Pittman Jr, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—a critical review. *Journal of hazardous materials*, 142(1-2), 1-53.
- Martinson, C. A., & Reddy, K. J. (2009). Adsorption of arsenic (III) and arsenic (V) by cupric oxide nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 336(2), 406-411.