

حذف آرسنیک در محیط آبی با روش اسمز معکوس و نانوذره آهن صفر ظرفیتی

نیلوفر صبوری^۱، جوانشیر عزیزی مبصر^۲، اسداله اسدی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(نویسنده مسئول) Javanshir22@yahoo.com

۳- دانشیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(دریافت ۹۴/۱۱/۱۷ پذیرش ۹۵/۶/۱۳)

چکیده

آرسنیک یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های منابع آب است که سلامت انسان و سایر موجودات را تهدید می‌کند. بنابراین حذف آرسنیک از منابع آب در اولویت برنامه‌های بهداشتی قرار دارد. راه‌های مختلفی برای حذف آرسنیک وجود دارد. در این پژوهش از دو روش اسمز معکوس و نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. برای انجام آزمایش، متغیرهای دما، غلظت آرسنیک، pH، غلظت نانوذره آهن و زمان اختلاط در نظر گرفته شد. نتایج پژوهش نشان داد در هر دو روش اسمز معکوس و استفاده از نانوذره آهن، با افزایش غلظت آرسنیک کارایی حذف افزایش یافته است. برای غلظت ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب با ۹۸ و ۹۵/۲ درصد حذف آرسنیک، بیشترین راندمان به دست آمد. در روش اسمز معکوس تأثیر دما و pH مشابه بود و با افزایش این دو متغیر درصد حذف آرسنیک نیز افزایش یافت. در روش اسمز معکوس درصد حذف آرسنیک در pH برابر ۹ و دمای ۳۰ درجه سلسیوس، به ترتیب برابر ۹۵/۹۸ و ۹۶/۵۶ به دست آمد. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش زمان اختلاط و دما در روش حذف آرسنیک با نانوذره آهن باعث افزایش کارایی حذف آرسنیک و افزایش pH باعث کاهش آن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، اسمز معکوس، نانوذره آهن صفر ظرفیتی، حذف، محیط آبی

۱- مقدمه

حالی است که روش‌های معمول تصفیه آب قادر به کاهش میزان آرسنیک تا این حد نیستند، لذا انجام تحقیقات بیشتر امری ضروری است. یکی از روش‌های نوین تصفیه آب که امروزه در اکثر نقاط جهان استفاده شده و قادر است حدود استانداردهای جدید تعیین شده را تأمین نماید، استفاده از فرایندهای غشایی است. از جمله این فرایندها که بدون استفاده از تغییر فاز، آلاینده مورد نظر را از سیال جدا می‌کنند، اسمز معکوس^۴ است (Peterson et al. 1981; Shin et al. 2003).

اسمز معکوس یک فرایند فیزیکی تحت فشار است که توانایی حذف آلاینده‌های بسیار ریز و یون‌های تک ظرفیتی از آب را دارد (Greenlee 2009; Nicolai Sen 2002; Cornejo et al. 2008). از طرفی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی^۵ به دلیل فراوانی، ارزانی، غیر

یکی از آلودگی‌های رایج و سمی، آلودگی آرسنیک است که در کشورهای مختلف به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه، غلظت بیش از حد آن در آب شرب گزارش شده است. آرسنیک یکی از عوامل سرطان‌زا است که از طریق فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسان وارد محیط زیست و در نتیجه محیط‌های آبی می‌شود و در آب با ظرفیت ۳ و ۵ وجود دارد (Kanei et al. 2006).

اثر مصرف دراز مدت آرسنیک انواع سرطان‌های داخلی و پوست را ایجاد می‌کند و غلظت بالای آن در آب باعث تشدید اثرات سمی آن می‌شود (Viraraghava et al. 1999). سازمان بهداشت جهانی^۱ و آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا^۲ غلظت مجاز برای آرسنیک را ۱۰ میکروگرم در لیتر تعیین کرده‌اند

^۴ Reverse Osmosis (RO)

^۵ Nano Zero Valent Iron (nZVI)

^۲ World Health Organization (WHO)

^۳ US Environmental Protection Agency (USEPA)

توجه به استفاده از روش‌های نوین در حذف آلودگی با راندمان بالا و استفاده گسترده از دستگاه‌های تصفیه آب خانگی که به روش اسمز معکوس برای حذف آلودگی عمل می‌کنند، این تحقیق با هدف بررسی عملکرد حذف آرسنیک به روش اسمز معکوس و انعقاد با نانوذره آهن صفر ظرفیتی انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. آزمایش‌ها به صورت ناپیوسته با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها انجام گرفت. مقادیر در نظر گرفته شده بر اساس مطالعات و پژوهش‌های انجام شده قبلی تعیین شد. مواد مورد استفاده در پژوهش شامل: پودر آرسنات سدیم ($\text{Na}_2 \text{HASO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ساخت شرکت سیگما آلدريج^۳ آمریکا، سود سوزآور ۰/۱ مولار، اسد کلریدریک، پودر نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی با اندازه ذرات ۳۵ تا ۴۵ نانومتر محصول شرکت Nano-us آمریکا، کیت سنجش آرسنیک محصول شرکت واهب می باشد. شکل ۱ تصویر میکروسکوپی نانوذرات آهن را نشان می‌دهد. وسایل به کار رفته پایلوت اسمز معکوس شامل مخزن ورودی، فیلتر کارتریج، پمپ، فشارسنج و غشاء بود. شکل ۲ مسیر جریان از ابتدا تا انتها را بر طبق شماره‌های اجزاء دستگاه نشان می‌دهد.

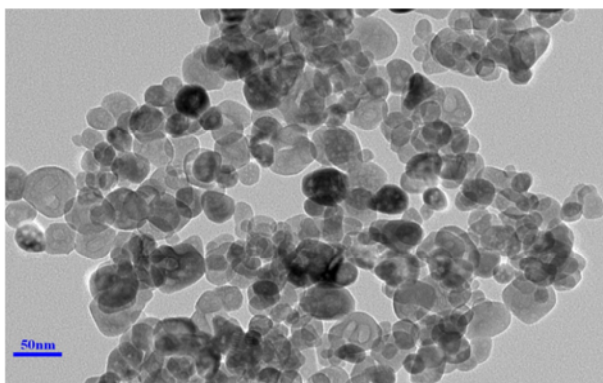


Fig. 1. Microscopic picture of zero-valent iron nanoparticles with 99.5% purity, 0.45 gr/cm^3 bulk density, 7.9 gr/cm^3 particle density and $8\text{-}14 \text{ cm}^2/\text{gr}$ specific surface

شکل ۱- تصویر میکروسکوپی نانو ذرات آهن با خلوص ۹۹/۵ درصد، دانسیته ظاهری ۰/۴۵ و دانسیته حقیقی ۷/۹ گرم بر سانتی متر مکعب و سطح ویژه ۸ تا ۱۴ سانتی متر مربع در هر گرم

سمی بودن، واکنش سریع و توانایی و بازدهی بالا برای حذف آلودگی‌ها از محیط‌های آبی از جمله آرسنیک، استفاده شده است (Sharma & Bose 2006; Li et al. 2006; Cheng et al. 2014). مظفریان و همکاران در سال ۱۳۸۵، عملکرد فرایند اسمز معکوس در حذف آرسنیک از آب را ارزیابی کرده و به درصد حذف آرسنیک بالای ۹۵ درصد، در شرایط بهینه فشار ۱۰ بار و pH معادل ۷/۵۷ رسیده‌اند (Mozaffarian et al. 2006). در سال ۲۰۱۴ در پژوهشی عملکرد نانوفیلتراسیون پلی‌آمید و غشاهای اسمز معکوس فشار پایین^۱ در حذف آرسنیک سه ظرفیتی تحت شرایط مختلف عملیاتی با هم مقایسه و مشخص شده که نسبت حذف آرسنیت به طور قابل توجهی با افزایش pH از حدود ۸/۵ به بالا، افزایش یافته است. همچنین راندمان حذف به ترتیب برای NF و LPRO به مقادیر ۴۰ و ۹۰ درصد رسیده است (Chang et al. 2014).

در پژوهش دیگری عملکرد اسمز معکوس در مقیاس کوچک برای حذف آرسنیک ارزیابی شده و نتایج نشان داده که این روش می‌تواند به عنوان روش مناسبی برای کاهش میزان آرسنیک از محیط آبی در حد بیشینه سطح آلودگی^۲ استفاده شود (Geucke et al. 2009).

در سال ۲۰۰۹ در پژوهشی به منظور بررسی نانوذرات آهن در پالایش آبخوان، استفاده از نانوذرات به علت سطح ریز (در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) و ماندگاری طولانی در آب زیرزمینی بسیار مفید معرفی شد (Zhang 2009). کوهپایه زاده و همکاران در سال ۱۳۸۹، میزان حذف آرسنیک پنج ظرفیتی و کاهش آن با استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی از آب آشامیدنی را بررسی کردند که نتایج تحقیق توانایی حذف ۱۰۰ درصد ۱ میلی‌گرم آرسنیک توسط ۰/۰۵ گرم نانوذره آهن در مدت زمان کوتاه ۸ دقیقه را نشان داد (Koochpayezadeh et al. 2012). علاوه بر فعالیت‌های انسانی، تشکیلات زمین‌ساختی، مخصوصاً مناطق آتشفشانی نیز می‌تواند منبع آلودگی آب به آرسنیک باشد. آلودگی آب زیرزمینی به علت تشکیلات زمین‌ساختی در دشت‌های اردبیل، مشگین شهر و دشت نیر متأثر از فعالیت‌های کوه آتشفشانی سبلان در سال‌های اخیر مشاهده شده است. با توجه به مضرات وجود آرسنیک در آب شرب حذف آن از محیط آبی در مناطق آلوده امری اجتناب‌ناپذیر است. با

³ Sigma-Aldrich

¹ Low Pressure Reverse Osmosis (LPRO)
² Maximum Contaminant Level

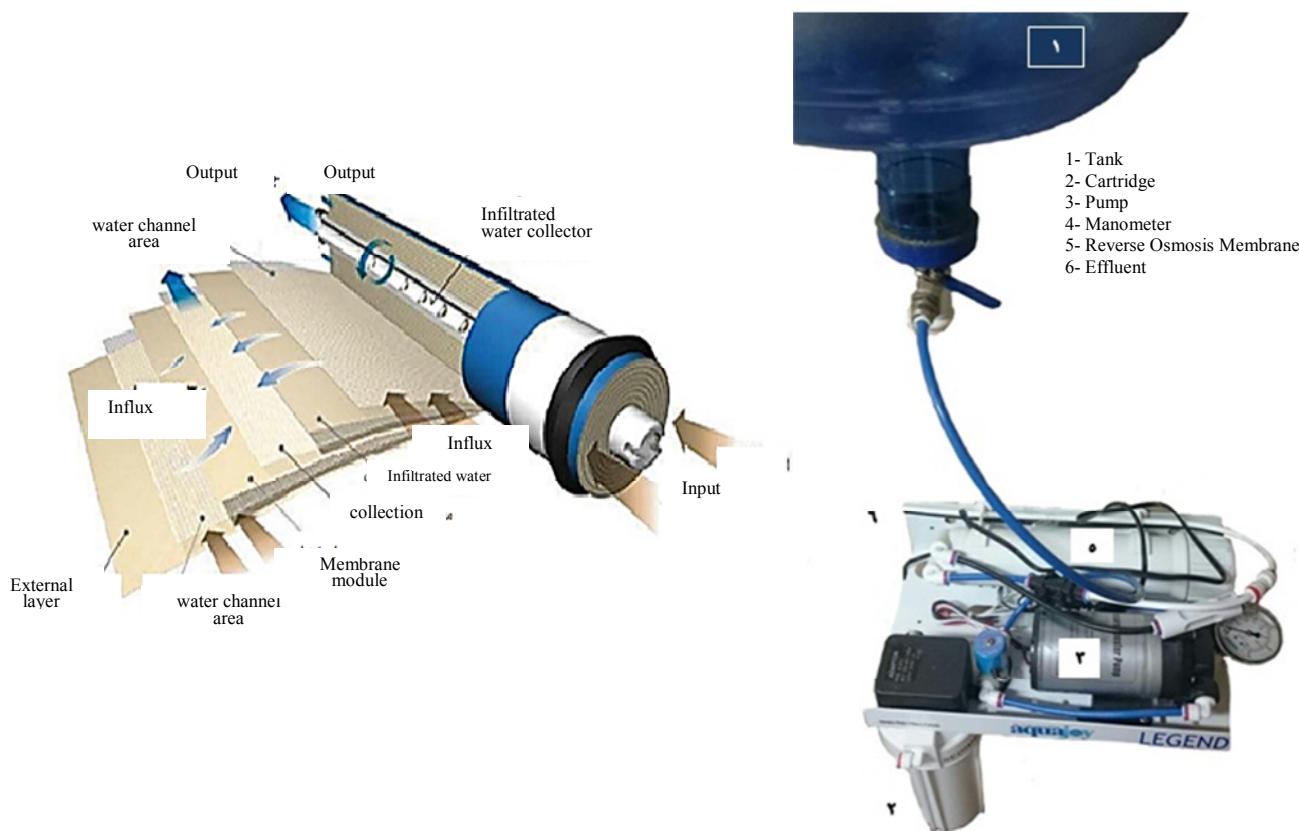


Fig. 2. Picture of the pilot and membrane section

شکل ۲- تصویر دستگاه و برش غشاء مورد استفاده در پژوهش

۱-۲- اسمز معکوس

ابتدا محلول ورودی با استفاده از آرسنات سدیم ($\text{Na}_2 \text{HAS O}_4$) در غلظت‌های ۰/۱۸، ۰/۲۵، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌گرم در لیتر آرسنیک و با استفاده از آب مقطر تهیه شد. سپس در فشار ثابت و بهینه ۱۹۰ psi (۱۰ bar)، تأثیر غلظت، دما و pH در کارایی حذف غشاء بررسی شد و pH، غلظت و دمای بهینه تعیین شد. pH محلول‌های تهیه شده، با استفاده از سود و اسید کلریدریک در pHهای ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ توسط دستگاه pH متر تنظیم و تغییرات دما بین ۴ تا ۳۰ درجه سلسیوس توسط دماسنج جیوه‌ای تنظیم و تثبیت شد. در تمام مراحل، میزان جذب مطابق با روش‌های استاندارد در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتوفتومتر قرائت شد و راندمان حذف در نمونه و شاهد مقایسه شد. راندمان حذف آرسنیک به‌عنوان پارامتر اساسی مطابق معادله

$$1 \text{ برای حذف آرسنیک مورد ارزیابی قرار گرفت} \\ \text{درصد حذف} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

غشاء ماریچی RO استفاده شده، غشاء مدل TW40 ساخت شرکت فیلم تک^۱، از جنس کامپوزیت پلی‌آمید با شارژ منفی بود. طول غشاء ۱۰ اینچ، قطر آن ۱/۷۷ اینچ و قطر لوله تغذیه ۲/۵۴ اینچ، با سطح فعال و مؤثر ۱/۱ متر مربع و شکل مدول آن ماریچی می‌باشد. میزان فلاکس عبوری اسمی غشاء ۵۰ گالن در روز معادل ۰/۲ متر مکعب در روز بود. غشاء انتخابی از نوع فشار پایین معادل ۱۹۰ psi بود و در تمام مراحل، فشار ثابت حفظ شد. دستگاه pH متر شرکت AZ، دستگاه هیتر ترموکوپل برقی، دستگاه طیف‌سنجی مرئی - فرابنفش^۳ مدل UV-vis 2100 ساخت شرکت Rayleigh، دستگاه امواج فراصوت^۴ و سانتریفیوژ^۵، دستگاه‌هایی هستند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند.

¹ Filmtec

² Composite

³ Spectrophotometer

⁴ Ultrasonic

⁵ Centrifuges

در لیتر تهیه شدند. با توجه به شکل ۳ تغییرات غلظت آرسنیک در محلول ورودی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در راندمان حذف آرسنیک داشت و با افزایش غلظت آرسنیک کارایی حذف افزایش یافت. با توجه به نتایج به دست آمده از این شکل ملاحظه می‌شود که تغییرات غلظت آرسنیک در محلول ورودی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در راندمان حذف آرسنیک داشته و با افزایش غلظت آرسنیک، کارایی حذف افزایش یافته است. غلظت ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر با ۹۸ درصد حذف آرسنیک بیشترین راندمان را نشان داد.

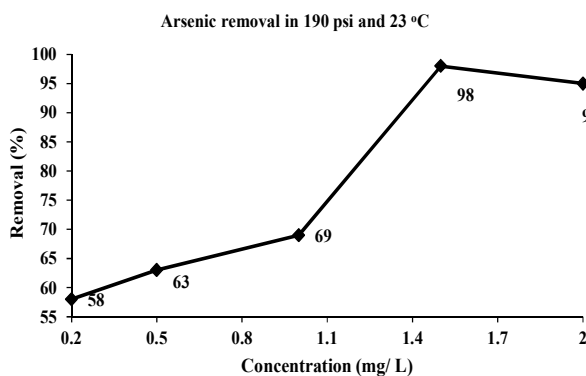


Fig. 3. Effect of Arsenic concentration on removal Efficiency at pH 6.9

شکل ۳- حذف آرسنیک با تغییرات غلظت و در pH برابر ۶/۹

۳-۱-۲- اثر pH بر کارایی حذف آرسنیک

برای بررسی تأثیر pH بر کارایی فرایند حذف آرسنیک در شرایط غلظت بهینه ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر، فشار عملکرد ۱۹۰ psi و دمای ۲۳ درجه سلسیوس، راندمان حذف با pH های متغیر در بازه ۵ تا ۹ اندازه‌گیری شد. بیشترین راندمان حذف در pH برابر ۹ با ۹۵/۹۸ درصد به دست آمد (شکل ۴). با توجه به شکل ۳ در محدوده pH بین ۵ تا ۷ افزایش نسبی راندمان حذف مشاهده می‌شود. می‌توان گفت که حذف آرسنیک از آب با افزایش pH افزایش می‌یابد که سایر پژوهشگران علت این امر را به اختلاف بزرگ بین ثابت‌های تجزیه H_2AsO_4 نسبت داده‌اند (Bronhuder & Amy 1998; Smedley & Kinniburagh 2002) در pH های پایین، کل ذرات آرسنیک پنج ظرفیتی خنثی هستند و با بالا رفتن pH این ذرات از حالت خنثی به فرم منوآنیونی و در pH های بالاتر از ۶/۹ به فرم دی آنیونی تجزیه می‌شوند. بنابراین هرچه pH افزایش یابد، درصد حذف آرسنیک افزایش می‌یابد. پژوهش‌های

که در این معادله C_0 برابر غلظت اولیه آرسنیک و C_i برابر غلظت نهایی آرسنیک می‌باشند.

۲-۲- نانوذرات آهن صفر ظرفیتی

به منظور انجام پژوهش میزان ۱/۱۴۷ میلی‌گرم نمک آرسنیک با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم برای تهیه محلول استوک از نمک آرسنات سدیم اندازه‌گیری شد. سپس محلول‌های استاندارد تعیین شده برای آزمایش با رقیق نمودن محلول استوک معادل غلظت‌های ۰/۰۱۸، ۰/۰۲۵، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌گرم در لیتر آرسنیک با استفاده از آب مقطر تهیه شد. در این روش محلول با حجم ۱۵ میلی‌لیتر در داخل لوله‌های آزمایش به مدت ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه، در تماس با نانوذرات آهن صفر ظرفیتی قرار گرفت. نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در مقادیر ۱، ۰/۵ و ۱/۵ گرم با ترازو اندازه‌گیری شد. برای اختلاط کامل نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در محلول، امواج فراصوت با طول موج متوسط استفاده شد. سپس محلول با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ قرار داده شد و محلول به مدت ۵ دقیقه در حالت سکون قرار گرفت تا نانوذرات واکنش کرده با آرسنات، ته‌نشین شوند. پس از عبور محلول از کاغذ صافی واتمن با قطر منفذ ۰/۴۵ میکرون، غلظت آرسنات با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر، در طول موج متوسط ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. به منظور تغییر pH از اسید کلریدریک و سود استفاده شد و مقدار pH برابر ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ در آزمایش‌های مختلف تنظیم و با استفاده از دستگاه pH متر سنجیده شد. همچنین تغییرات دما در محدوده ۴، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس توسط آب مقطر یخ زده و دستگاه هیتر ترموکوپل برقی توسط دماسنج جیوه‌ای تنظیم شد و در نهایت راندمان حذف آرسنیک بر اساس معادله ۱ محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۱- اسمز معکوس

۳-۱-۱-۱- اثر غلظت آرسنیک بر کارایی حذف

برای تعیین غلظت بهینه حذف آرسنیک در شرایط فشار ۱۹۰ psi، دمای ۲۳ درجه سلسیوس و pH معادل ۶/۹ محلول‌هایی با غلظت‌های ۰/۰۱۸، ۰/۰۲۵، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌گرم

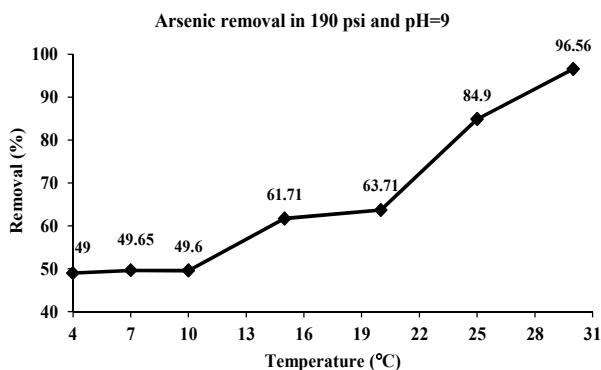


Fig. 5. Effect of temperature on arsenic removal efficiency at arsenic concentration of 1.5 mg/L
 شکل ۵- درصد حذف آرسنیک بر اساس تغییرات دما و غلظت ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر آرسنیک

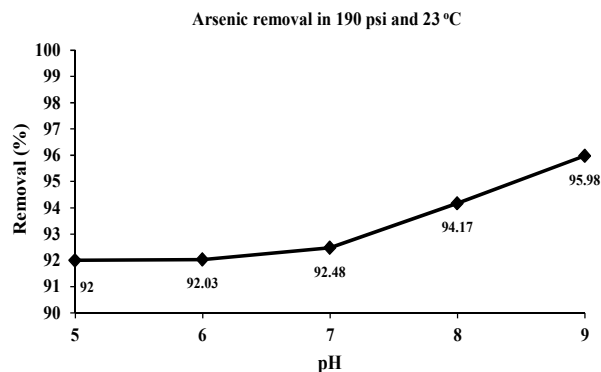


Fig 4. Effect of pH on removal efficiency at arsenic concentration of 1.5 gr/L
 شکل ۴- حذف آرسنیک با تغییرات pH در غلظت ۱/۵ گرم در لیتر آرسنیک

تراوش مولکول‌های حلال بیشتر از یون‌های آرسنیک می‌باشد؛ بنابراین میزان حذف آرسنیک را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش آن می‌شود (Madaeni et al. 2003; Li et al. 2006). مدائنی در سال ۱۳۸۵، نشان داد که افزایش دما به همان علت تغییر ویسکوزیته حلال و بالارفتن فشار اسمزی و نفوذپذیری حلال و حل شونده، باعث افزایش راندمان حذف آرسنیک می‌شود. نتایج تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۲ با سه نوع غشاء اسمز معکوس نیز حذف ۹۹ درصدی بر اثر افزایش دما را نشان داد (Lin et al. 2002).

۳-۲- نانوذرات آهن صفر ظرفیتی

۳-۲-۱- اثر غلظت آرسنیک بر کارایی حذف

به منظور بررسی تأثیر غلظت اولیه آرسنیک با مقادیر ۰/۱۸، ۰/۲۵، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌گرم در لیتر بر روند حذف آرسنیک در شرایط pH معادل ۷، دمای ۲۳ درجه سلسیوس و غلظت نانوذرات آهن ۱ گرم در لیتر در زمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه، روند تغییرات مقایسه شدند. با توجه به شکل ۶ تغییر غلظت اولیه آرسنیک بر میزان جذب آن از طریق نانوذرات آهن صفر ظرفیتی تأثیر مستقیم داشته به طوری که بیشترین حذف در غلظت ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر معادل ۹۶/۵ رخ داده است.

شکل ۷ اثر تغییر غلظت نانوذرات آهن بر روند حذف آرسنیک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در مقدار ۱ و ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات، بعد از گذشت ۱۰ دقیقه ۹۸ درصد راندمان حذف

قبلی نیز نشان دادند pH به دلیل اثر بر روی بار غشاء و نوع آرسنیک، تأثیر مستقیم در راندمان حذف دارد (Lin et al. 2002; Footemi et al. 2012). مظفریان و همکاران در سال ۱۳۸۵ نیز اعلام نمودند که با افزایش pH، میزان حذف آرسنیک افزایش می‌یابد (Mozaffarian et al. 2006).

۳-۱-۳- اثر دما بر کارایی حذف آرسنیک

شکل ۵ راندمان حذف در غلظت بهینه ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر، pH بهینه ۹ و فشار ثابت ۱۹۰ psi در دماهای ۴ تا ۳۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. با بررسی این نتایج مشخص شد که با افزایش میزان دمای محلول ورودی، راندمان حذف آرسنیک نیز افزایش یافته، به طوری که در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس حداکثر شیب راندمان حذف ملاحظه شد. علاوه بر آن در محدوده دمایی ۴ تا ۱۰ درجه سلسیوس متغیر دما بر روی کارایی حذف بی‌تأثیر بوده که این امر به علت تغییر کم ویسکوزیته محلول در این بازه از تغییرات دما است.

افزایش دما باعث تغییر ویسکوزیته حلال (کاهش آن) و بالا رفتن فشار اسمزی و نفوذپذیری حلال و حل شونده می‌شود که این افزایش دما، تحرک مولکول‌های حلال و یون‌های آرسنیک را افزایش می‌دهد. اما با توجه به اندازه و بار یون‌های آرسنیک در مقایسه با مولکول‌های حلال، تحرک آنها به مراتب بیشتر از مولکول‌های حل شونده است و در واحد زمان، میزان

و مقدار غلظت نانوذره آهن صفر ظرفیتی، مقدار آرسنیک با شیب تند کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر کارایی حذف آرسنیک افزایش یافته و در انتها به مقدار ثابتی می‌رسد، به طوری که در ۳۰ دقیقه به علت افزایش سطح تماس واکنش‌گر و آلاینده، بیشترین راندمان حذف حاصل می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۷ غلظت نانوذره و زمان تماس تا دقیقه حدود ۱۵ تأثیر زیادی داشته و از دقیقه ۱۵ تا ۳۰، تأثیر غلظت نانوذره نسبت به زمان بیشتر بوده است. زیرا با گذشت زمان ایجاد خوردگی و حفره در سطح آهن بیشتر شده که منجر به افزایش سطح مقطع جذب و در نهایت کارایی حذف آرسنیک می‌شود. از طرفی افزایش غلظت نانوذره آهن صفر ظرفیتی باعث افزایش محل‌های فعال سطحی جذب شده و افزایش واکنش‌های اکسید و احیاء را منجر خواهد شد (Zhang 2009; Koochpayehzadeh et al. 2012; Footemi et al. 2012)

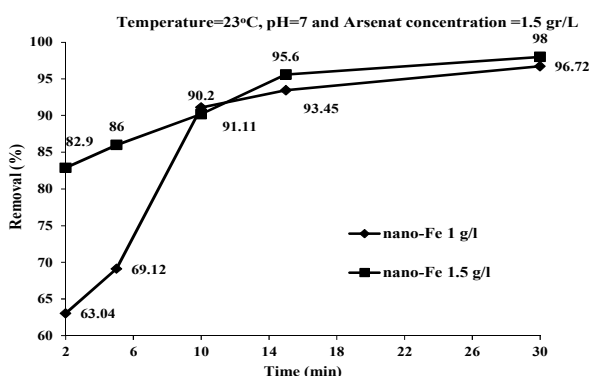


Fig. 8. Simultaneous effect of zero-valent iron nanoparticles concentration and contact time on arsenic removal

شکل ۸- تأثیر همزمان غلظت نانوذره آهن صفر ظرفیتی و زمان تماس در حذف آرسنیک از آب

۳-۲-۳- اثر همزمان pH و وزن نانوذره بر کارایی حذف آرسنیک برای مقایسه واکنش آرسنیک با نانوذرات آهن در محیط‌های بازی، اسیدی و خنثی، با توجه به شکل ۹ مشاهده شد که حالت اسیدی واکنش را تسریع می‌کند به طوری که در محیط اسیدی (pH=4) آلودگی در حضور ۱ و ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بعد از گذشت زمان ۱۵ دقیقه به ترتیب به ۹۹/۵ و ۹۸ درصد رسید. این بدان معنی است که پس از گذشت زمان ۱۵ دقیقه فقط ۰/۵ درصد آلاینده در محیط باقی مانده است، اما در حالت بازی واکنش بسیار کند بوده است. علت این امر می‌تواند تأثیر نیروی دافعه

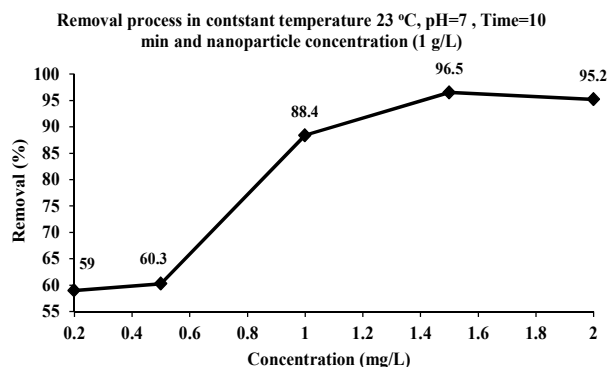


Fig. 6. Effect of arsenic concentration on removal efficiency

شکل ۶- درصد حذف بر اساس تغییر غلظت آرسنیک

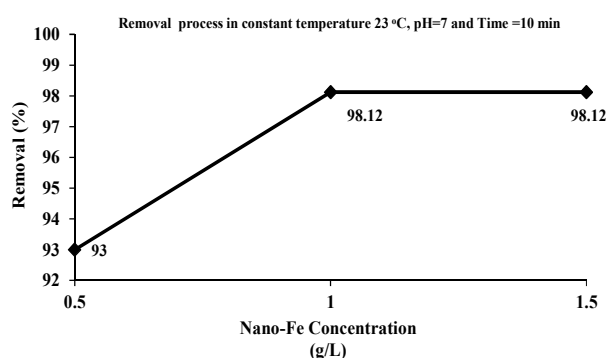


Fig. 7. Effect of weight of zero-valent iron nanoparticle on arsenic concentration removal efficiency

شکل ۷- درصد حذف آرسنیک با تغییر وزن نانوذره آهن صفر ظرفیتی

مشاهده شد. می‌توان علت را افزایش سطح تماس بین واکنش‌گر و آلاینده بیان کرد و مکانیسم اصلی حذف آرسنیک را جذب و یا هم‌رسوبی عنوان نمود، که متعاقباً با واکنش‌های اکسیداسیون-احیاء دنبال می‌شود. بنابراین با افزایش غلظت جرمی نانوذرات تا ۱/۵ گرم در لیتر، مساحت سطحی و محل‌های جذب قابل دسترس برای جذب افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کارایی حذف می‌شود (Footemi et al. 2012; Koochpayehzadeh et al. 2012; Konstantina et al. 2007; Rahmani et al. 2008) با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که راندمان حذف برای غلظت‌های ۱ و ۱/۵ گرم در میلی‌لیتر نانوذره آهن صفر ظرفیتی یکسان است، بنابراین در شرایط این آزمایش غلظت ۱ گرم در لیتر را می‌توان به عنوان غلظت بهینه انتخاب نمود.

۳-۲-۲- اثر همزمان غلظت نانوذره و زمان تماس بر کارایی حذف آرسنیک

همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است با افزایش زمان تماس

واکنش تسریع می‌شود، به طوری که در دمای محیط پس از گذشت ۶۰ دقیقه، فقط ۲ درصد از مقدار آلاینده آرسنیک حذف شده، در صورتی که در دمای حدوداً دو برابر آن، این مقدار به ۱۵ درصد رسیده است.

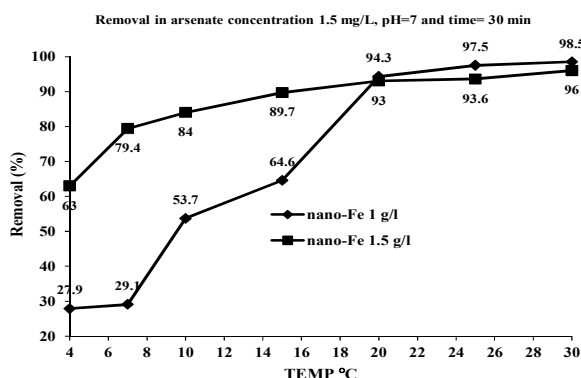


Fig. 10. Simultaneous effect of zero-valent iron nanoparticles concentration and temperature on arsenic removal

شکل ۱۰- تأثیر همزمان غلظت نانوذره آهن صفر ظرفیتی و دما (°C) در حذف آرسنیک از آب

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش اسمز معکوس، در حذف آرسنیک از محیط آبی به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر است و راندمان حذف آن، در حدود ۹۵ تا ۹۹ درصد می‌باشد؛ همچنین استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی روشی ارزان و کاراست و می‌توان از آن به صورت درجا در محیط استفاده کرد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که واکنش نانوذرات آهن و آرسنیک بسیار سریع و در مقیاس زمانی دقیقه است و راندمان حذف آن بیشتر از ۹۸ درصد نیز می‌تواند باشد. با مقایسه این دو روش برای متغیرهای pH، دما و زمان تماس با توجه به نتایج حاصل شده از دو روش مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت آرسنیک، درصد حذف در هر دو افزایش یافته است. نانوذرات آهن صفر در محدوده pH اسیدی ۴ بهترین کارایی در حذف آرسنیک را داشتند زیرا در این محدوده بار منفی آرسنیک با بار مثبت نانوذرات آهن واکنش داده و واکنش خیلی سریع انجام شد، اما غشاء اسمز معکوس در محدوده pH برابر ۹ بیشترین راندمان را نشان داد. در روش نانوذرات آهن با افزایش دما واکنش تسریع شد و در دمای ۳۰ درجه سلسیوس به راندمان ۹۶ درصد رسید. افزایش دما تحرک مولکول‌های حلال و

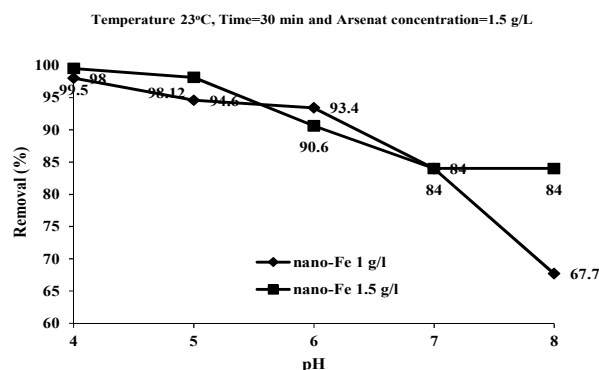


Fig. 9. Simultaneous effect of zero-valent iron nanoparticles concentration and pH on arsenic removal
شکل ۹- تأثیر همزمان غلظت نانوذره آهن صفر ظرفیتی و pH در حذف آرسنیک از آب

بارهای همنام بین آرسنیک و نانوذرات آهن در pH های بالا باشد، که باعث کاهش سطح تماس و در نتیجه کاهش واکنش می‌شود. چون در pH های قلیایی گونه غالب آرسنیک با بار منفی است و سطوح نانوذره نیز منفی است که موجب دافعه الکترواستاتیکی می‌شود. در pH بین ۳ تا ۷ آرسنیک بار منفی و نانوذرات آهن بار مثبت دارند، که بالاترین جذب آلاینده اتفاق می‌افتد. در شرایط قلیایی، یون‌های آهن در اثر برخورد سطح نانوذرات با رادیکال‌های هیدروکسیل به صورت محلول درآمده و باعث تولید رسوب هیدروکسید آهن می‌شود. این رسوب، جایگاه‌های فعال سطحی بر روی نانوذرات را اشغال نموده و از فعالیت بیشتر ممانعت به عمل می‌آورد. در pH کمتر از ۹/۲، بار آرسنیک در محیط آبی مثبت بوده و بار خنثی حذف می‌شود. در pH بالای ۹/۲، بار منفی آرسنیک غالب است. در حالی که بار نانوذرات آهن منفی است که سبب دافعه الکترواستاتیکی می‌شود (Kanel et al. 2006; 2009; Cornejo et al. 2008; Pire & Golestani 2001)

۳-۲-۴- اثر همزمان دما و وزن نانوذره بر کارایی حذف آرسنیک

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش دما واکنش تسریع می‌شود، به طوری که در دمای محیط پس از گذشت ۱۵ دقیقه مقدار کمی از آلاینده آرسنیک حذف شده است، در صورتی که در دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس برای غلظت نانوذره آهن ۱ و ۱/۵ گرم در لیتر، مقدار راندمان حذف آرسنیک به ترتیب ۹۸/۵ و ۹۶ درصد بوده است. نتایج پژوهشی در سال ۱۳۹۲، نیز نشان داد که با افزایش دما

دقیقه و در شرایط دمای محیط و pH خنثی قابل توصیه می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج این پژوهش روش تصفیه اسمز معکوس در مقیاس خانگی در مناطق آلوده به آرسنیک توصیه می‌شود.

یون‌های آرسنیک را افزایش می‌دهد و باعث افزایش میزان حذف آرسنیک می‌شود. در نهایت می‌توان گفت که استفاده از نانوذره آهن صفر ظرفیتی در ایستگاه‌های مرکزی تصفیه با زمان ماند حدود ۳۰

References

- Brandhuber, P.H. & Amy, G., 1998, "Alternative methods for membrane filtration of arsenic from drinking water", *Journal of Desalination*, 117, 1-10.
- Chang, F.F., Liu, W.J. & Wang, X.M., 2014, "Comparison of polyamide nanofiltration and low-pressure reverse osmosis membranes on As (III) rejection under various operational conditions", *Journal of Desalination*, 334, 10-16.
- Cornejo, L., Lienqueo, H., Arenas, M., Acarapi, J., Contreras, D., Yanez, J. & Mansilla, H.D., 2008, "In field arsenic removal from natural water by zero-valent iron assisted by solar radiation", *Journal of Environmental Pollution*, 156, 827-831.
- Dambies, L., Vincent, T.H. & Guibal, E., 2002, "Treatment of arsenic-containing solutions using chitosan derivatives: uptake mechanism and sorption performance", *Journal of Water Research*, 36, 3699-3710.
- Geucke, T., Deowan, S.A., Hoinkis, J. & Patzold, C.H., 2009, "Performance of a small-scale RO desalinator for arsenic removal", *Journal of Desalination*, 239, 198-206.
- Greenlee, L.F., 2009, "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", *Journal of Water Research*, 43, 2317-2348.
- Footemi, M., Kholghi, M., Hoorfar, A.H. & Haghshenas, D., 2012, "Laboratory study on arsenic removal effect of iron nanoparticles in aqueous media", *Journal of Environmental*, 39(4), 149-156.
- Kanel, S.R., Grenache, J.M. & Choi, H., 2006, "Arsenic (V) removal from groundwater using nano scale zero-valent iron as a colloidal reactive barrier material", *Journal of Environ Science of Technology*, 40, 2045-2050.
- Kanel, S.R., Manning, B., Charlet, L. & Choi, H. 2009. "Removal of arsenic(III) from groundwater by nanoscale zero-valent iron", *Journal of Environmental Science & Technology*, 39, 1291-1298.
- Konstantina, T., Elpida, P. & Nikolaos, P.N., 2007, "Modeling of arsenic immobilization by zero valent iron", *Journal of Soil Biology European*, 43, 356-367.
- Konstantina, T., Nikolaos, P., Nikolaos, V., Nikolaos, K. & Pavlos, E., 2006, "Arsenic removal from geothermal water with zero-valent iron-Effect of temperature, phosphate and nitrate", *Journal of Water Research*, 40, 2375-2386.
- Koohpayezadeh, H., Torabian, A., Nabibidhendi, G.R. & Habashi, N., 2012, "The effects of zero-valent iron nanoparticles on pentavalent arsenic removal from drinking water", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 23 No. 3 (83), 60-67. (In Persian)
- Li, X.Q., Elliott, D.W. & Zhang, W.X., 2006, "Zero-valent iron nanoparticles for abatement of environmental pollutants: Materials and engineering aspects", *Critical Reviews in Solid State and Materials Science*, 31, 111-112.

- Lin, T.F., Hsiao, H.C. & Wu, J.K., 2002, "Removal of arsenic from groundwater using POU RO and distilling devices", *Journal of Environmental Technology*, 23, 781-790.
- Nicolai Sen, B., 2002, "Developments in membrane technology for water treatment", *Journal of Desalination*, 153, 355-360.
- Peterson, P.J., Benson, L.M. & Zeive, R., 1981, "Arsenic and effect of heavy pollution on plants", *Journal of Science*, 1, 192-199.
- Pire, T. & Golestani, H., 2011, "The production of zero-valent iron nanoparticles and evaluate its performance in removal of arsenate and arsenite from water environments", *5th National Conference and Exhibition of Environmental Engineering*, Tehran. (In Persian)
- Rahmani, A.R., Ghafari, H.R., Samady, M.T. & Zarabi, M., 2008, "Synthesized zero valent iron nanoparticles and study its effectiveness in removing arsenic fom water environments", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 22 No. 1 (77), 41-35. (In Persian)
- Sharma, B. & Bose, P., 2006, "Arsenic sequestration by metallic iron under strongly reducing conditions", *Journal of Current Science*, 91, 204-208.
- Shih, M.C., 2005, "An overview of arsenic removal by pressure-driven membrane processes", *Journal of Desalination*, 172, 85-97.
- Smedley, P.L. & Kinniburgh, D.G., 2002, "A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural water", *Appl. Geochem.*, 17, 517-568.
- Tyrovola, K., Nikolaidis, N.P., Veranis, N.S., Kallithrakas-Kontos, N. & Koulouridakis, P.E., 2006, "Arsenic removal from geothermal waters with zero-valent iron effects of temperature, phosphate and nitrate", *Journal of Water Research*, 40, 2375-2386.
- Viraraghava, T., Subramania, K.S. & Aruldos, J.A., 1999, "Arsenic in drinking water. Problems and solutions", *Journal of Water Science Technology*, 40, 69-76.
- Zhang, T.C., 2009, "Nanotechnologies for water environmental applications", Committee of the Environment Council, Environment and Water Resource Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers, 628.