

سنتز نانو ذرات آهن صفر (nZVI) و بررسی کارایی آن در حذف آرسنیک از محیط‌های آبی

منصور ضرابی^۴

محمد تقی صمدی^۳

حمیدرضا غفاری^۲

علیرضا رحمانی^۱

(دریافت ۸۸/۱۱/۱۶ پذیرش ۸۹/۶/۲۳)

چکیده

هدف از این پژوهش سنتز نانو ذرات آهن صفر و تعیین کارایی آن در حذف آرسنیک از محیط آبی بود. نانوذرات به روش احیای کلرید فریک توسط بوروهیدرید سدیم سنتز گردید و تأثیر تغییرات پارامترهای pH، زمان ماند، غلظت آرسنیت و آرسنات و غلظت نانو ذرات بر کارایی حذف در سیستم ناپیوسته مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین خصوصیات نانو ذرات آهن تولیدی از میکروسکوپ الکترونی (SEM) و روش XRD استفاده شد. تصویربرداری از نانو ذرات تولیدی با میکروسکوپ الکترونی نشان داد که این ذرات قطری در مقیاس نانو (۱۰-۱۰۰ نانومتر) داشتند. نتایج نشان داد که در pH حدود ۷ و با غلظت ۱ گرم در لیتر نانو ذرات آهن، می‌توان در زمان ماند ۱۰ دقیقه بیش از ۹۹ درصد آرسنیت و آرسنات را از محیط آبی حذف نمود. همچنین کارایی حذف با افزایش غلظت نانو ذرات آهن و زمان تماس، افزایش و با افزایش غلظت آرسنیک و pH کاهش یافت. نانوذرات آهن دارای مزایایی از قبیل کارایی حذف بالا و زمان کوتاه است و می‌تواند به‌عنوان یک روش در حذف آرسنیک از محیط‌های آبی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: نانو ذرات، آهن صفر، آرسنیک، محیط آبی

Synthesis of Zero Valent Iron Nanoparticles (nZVI) and its Efficiency in Arsenic Removal from Aqueous Solutions

Ali Reza Rahmani¹
Mohammad Taghi Samadi³

Hamid Reza Ghafari²
Mansour Zarabi⁴

(Received Feb. 5, 2010 Accepted Sep. 14, 2010)

Abstract

The aim of this study to synthesize nanoparticle zero valent iron and to determine its efficiency in arsenic removal from aqueous solutions. Nanoparticles were synthesized by reduction of ferric chloride using sodium borohydrid. The experiments were conducted in a batch system and the effects of pH, contact time, and the concentrations of arsenit, arsenat, and nano zero valent iron were investigated. SEM and XRD were applied for the determination of particle size and characterization of the nanoparticles synthesized. SEM results revealed that synthesized particles were of nano size (1-100 nanometers). At pH=7.0, 99% of arsenit and arsenat was removed when nano zero valent iron concentration was 1 (g L⁻¹) over a retention time of 10 min. Based on the results obtained, the removal efficiency was enhanced with increasing nano zero valent iron dosage and reaction time, but decreased with increasing initial concentration and initial solution pH. The significant removal efficiency, high rate of process and short reaction time showed that iron nano particles are of a significant potential for the removal of arsenic from aqueous solutions.

Keywords: Nanoparticle, Iron, Arsenic, Aqueous Solution.

1. Assoc. Prof., Dept. of Environmental Health Eng., Research Center for Health Sciences, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamedan
2. Faculty Member of Environmental Health Eng., School of Public Health, Hormozgan University of Medical Sciences (Corresponding Author) (+98 811) 8260661 ghaffarihrz@gmail.com
3. Assist. Prof., Dept. of Environmental Health, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamedan
4. Grad. Student of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health Hamadan University of Medical Sciences, Hamedan

- ۱- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان
- ۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان (نویسنده مسئول) ۰۸۱۱) ۸۲۶۰۶۶۱ ghaffarihrz@gmail.com
- ۳- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان
- ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان

می‌شوند و تغییر شکل می‌دهند و آب تصفیه شده از دیواره عبور می‌کند. بیش از ۱۰۰ پروژه PRBs از سال ۱۹۹۰ تاکنون در آمریکا اجرا شده است و در اروپا و آسیا نیز پروژه‌هایی در حال اجرا یا طراحی است [۱۴].

واکنش‌های هتروژن در سطح ZVI بسیار پیچیده بوده و در نتیجه سطوح جاذب بالقوه‌ای را برای آرسنیت و آرسنات فراهم می‌آورد. علی‌رغم این پیچیدگی، مطالعات صورت گرفته با استفاده از اسپکتروسکوپی جذب اشعه X نشان می‌دهد که محصولات حاصل از واکنش آرسنیت و آرسنات با ZVI، شامل کمپلکس‌های سطحی آرسنیت و آرسنات بر روی هیدروکسیدهای آهن است [۱]. حذف گونه‌های آرسنیک به وسیله ZVI در شرایط بی‌هوازی به کاهش الکتروشیمیایی As(III) به As(0) که حلالیت کمتری دارد و جذب As(III) و As(V) به وسیله هیدروکسید تشکیل شده بر روی سطح Fe^0 مربوط می‌شود. در شرایط اتمسفری، میزان حذف As(III) و As(V) افزایش می‌یابد. حذف سریع As(III) و As(V) در شرایط هوازی در اثر جذب بر روی هیدروکسید آهن تشکیل شده در اثر اکسیداسیون Fe^0 اتفاق می‌افتد [۱۱]. با وجود مزایای زیاد این فرایند در حذف آلاینده‌ها، مشکلاتی مانند نیاز به مقادیر زیاد پودر آهن، هزینه‌های مربوط به ساخت دیواره به‌ویژه در آبخوان‌های عمیق و انعطاف‌پذیری کم این تکنولوژی بعد از ساخت دیواره، کاربرد آن را با مشکلاتی مواجه نموده است.

مطالعات نشان داده است که واکنش‌پذیری ZVI با کاهش اندازه آن در مقیاس نانو (nZVI) افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند [۲]. این مطالعات در خصوص استفاده از nZVI در کنترل آلودگی‌های محیطی از جمله پرکلرات، کروم، سرب، اسید هیومیک، نیترات، مس، روی، TCE و غیره انجام شده است [۱۴-۲۳].

میزان واکنش‌پذیری نانو ذرات آهن ۱۰۰۰-۵۰۰ برابر بیشتر از پودر آن است. هزینه‌های جاری نانو ذرات آهن ۵۰ دلار در هر کیلوگرم است در حالی که این هزینه‌ها برای پودر آهن با در نظر گرفتن مقدار مورد نیاز و سطح مقطع آنها، ۲۰۰ دلار در کیلوگرم برآورد شده است. nZVI به دلیل اندازه بسیار کوچک، نسبت سطح به حجم زیاد و واکنش‌پذیری بالا، پتانسیل زیادی برای استفاده در محیط زیست دارد. علاوه بر این، nZVI به دلیل اندازه کوچک و قابلیت باقی ماندن در سوسپانسیون می‌تواند به‌طور مؤثر توسط آب زیرزمینی منتقل شده و به‌صورت ذرات فلزی به درون خاک، رسوبات و آبخوان‌ها تزریق شود و نیاز به ساخت PRBs را مرتفع سازد.

با توجه به دلایل بالا، هدف این پژوهش سنتز نانو ذرات آهن و

آرسنیک یکی از سرطان‌زاهای شناخته شده است که از طریق فرایندهای طبیعی مانند واکنش‌های هوازدگی، فعالیت‌های بیولوژیکی و انتشارات آتشفشانی و همچنین در اثر فعالیت‌های انسان مانند متالوژی، ساخت شیشه و سرامیک، تولید ابر رسانه‌ها، نیمه هادی‌ها، ترانزیستور و لیزر وارد محیط زیست و در نتیجه محیط‌های آبی می‌شود [۱-۴]. استفاده طولانی مدت از آب آشامیدنی حاوی آرسنیک خطرناک است. از نشانه‌های تماس مزمن با آرسنیک می‌توان به افزایش پیگمانتاسیون، دی پیگمانتاسیون، کراتوزیس، سرطان پوست و تعدادی از سرطان‌های داخلی، مشکلات جدی پوستی، نقص تولد و مشکلات تولید مثلی اشاره نمود. به‌نظر می‌رسد بیماری‌های قلبی و عصبی نیز به آلودگی آرسنیک ارتباط داشته باشند [۲، ۵، ۶]. غلظت بالای آرسنیک در آب علاوه بر سوء تغذیه و هیپاتیت، باعث تشدید اثرات سمی آن می‌شود. سازمان بهداشت جهانی^۱ و آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا^۲ غلظت مجاز برای آرسنیک را $10 \mu\text{g/L}$ تعیین کرده‌اند [۲، ۷ و ۸].

آرسنیک در آب زیر زمینی عمدتاً به شکل آرسنیت (H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- , HASO_3^{2-}) و آرسنات (H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HASO_4^{2-}) یافت می‌شود [۱-۴]. روش‌های متعددی در حذف آرسنیک از منابع آب استفاده شده است که متداول‌ترین آنها تصفیه فیزیکی-شیمیایی شامل تبادل یون، جذب، صافی غشایی، ترسیب شیمیایی و همچنین تبدیل میکروبی است [۱ و ۳]. همه فرایندهای نام برده دارای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بالایی بوده و لجن زیاد که حاوی آرسنیک است تولید می‌کنند [۹].

در طی سالیان اخیر، استفاده از فلزات با ظرفیت صفر (مانند Al^0 , Sn^0 , Zn^0 , Fe^0) به‌عنوان عامل مؤثری برای اصلاح آبهای آلوده مورد مطالعه قرار گرفته است. در بین این فلزات، استفاده از آهن با ظرفیت صفر (ZVI) به دلیل فراوانی، ارزانی، غیر سمی بودن، واکنش سریع و توانایی و بازده بالا در تجزیه آلاینده‌ها و همچنین حذف آرسنیت As(III) و آرسنات As(V) از آبهای زیرزمینی بیشتر مورد توجه بوده است [۱، ۲، ۴، ۵، ۸، ۱۰-۱۳]. اولین بار در سال ۱۹۹۰، ZVI به‌عنوان یک عامل تصفیه. در موانع فعال نفوذپذیر (PRBs)^۴ برای تصفیه در محل منبع آب زیرزمینی^۵ استفاده گردید. در هنگام عبور جریان آب زیرزمینی از PRBs به‌صورت یک دیواره حاوی گرانوله آهن، آلاینده‌ها جذب و ته‌نشین

¹ World Health Organization (WHO)

² US. Environmental Protection Agency (USEPA)

³ Zero Valent Iron (ZVI)

⁴ Permeable Reactive Barrier

⁵ In Situ

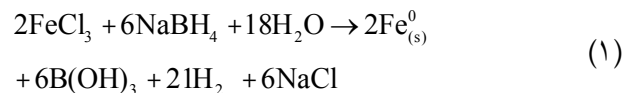
⁶ Nanoparticle Zero Valent Iron

بررسی کارایی آن در حذف آرسنیت و آرسنات از محیط‌های آبی بود. همچنین تأثیر غلظت‌های آرسنیت و آرسنات، nZVI، pH و زمان تماس در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

۲-۱- سنتز نانو ذرات آهن

نانو ذرات با افزودن محلول بوروهیدرید سدیم (NaBH_4) ۰/۱۶ مولار به محلول کلرید-فریک ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ۰/۱ مولار در دمای محیط سنتز شد. برای ساخت محلول کلرید فریک از آب دیونیزه خنثی‌سازی شده با گاز نیتروژن و به‌منظور ساخت محلول بوروهیدرید سدیم از سود (NaOH) ۰/۱ مولار استفاده شد. پس از آماده‌سازی محلولها، محلول بوروهیدرید سدیم به‌صورت قطره قطره و در شرایط اختلاط شدید و خلأ به محلول کلرید فریک افزوده شد. این مرحله حدود ۳۰ دقیقه به‌طول انجامید. در زمان انجام واکنش، درب ظرف کاملاً بسته شد تا سنتز نانوذرات در شرایط خلأ صورت گیرد. بوروهیدرید سدیم طبق واکنش ۱ با کلرید فریک واکنش داده و سبب احیای Fe^{+2} به Fe^0 گردید



پس از انجام این واکنش، نانوذرات آهن به‌صورت ذرات سیاه رنگ بسیار ریزی ته‌نشین شدند. این واکنش در زیر هود انجام شد زیرا در اثر واکنش‌های شیمیایی، گاز هیدروژن به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌گردد. علاوه بر این لازم است برای اختلاط ظرف واکنش از یک همزن مقاوم به انفجار استفاده نمود تا امکان جرقه کاهش یابد. برای تعیین خصوصیات نانوذرات آهن تولیدی از میکروسکوپ الکترونی SEM و دستگاه تفرق اشعه X (XRD) استفاده گردید.

۲-۲- آزمایش‌های حذف آرسنیک

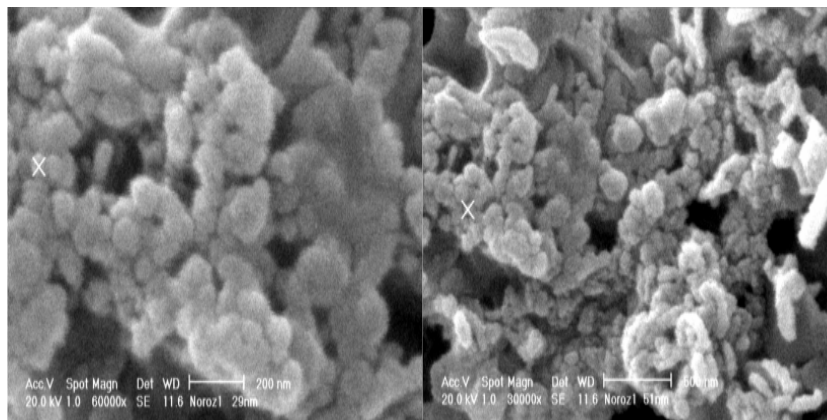
در این مطالعه نانو ذرات آهن به‌صورت روزانه سنتز و استفاده شد. برای ساخت محلولهای استاندارد آرسنیت و آرسنات به‌ترتیب از آرسنیت سدیم و آرسنات سدیم استفاده گردید. آزمایش‌ها در دمای 20 ± 2 درجه سلسیوس و در ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری به‌عنوان ظرف واکنش انجام شد. تأثیر فاکتورهای pH (۳، ۴ و ۷)، زمان ماند (۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه)، غلظت نانو ذرات (۱، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰/۵ گرم در لیتر) و غلظت آرسنات (۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر) بر کارایی حذف مورد بررسی قرار گرفت. در هر سری از آزمایش‌ها، دو پارامتر ثابت بود و با تغییر دو پارامتر دیگر تأثیر آنها مورد بررسی قرار می‌گرفت. در طول زمان واکنش، محتویات ظرف به‌وسیله یک همزن مغناطیسی با سرعت حدود ۱۵۰ دور در دقیقه اختلاط یافت و بعد از اتمام زمان واکنش، به‌مدت ۵ دقیقه به حالت سکون نگه داشته شد تا نانو ذرات واکنش کرده با آرسنیت و آرسنات، ته‌نشین شوند. سپس بخش رویی ظرف با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد و پس از عبور از فیلتر غشایی با قطر منافذ ۰/۴۵ میکرون، غلظت آرسنیت و آرسنات باقیمانده به‌روش SDDC (3500-As) و با استفاده از اسپکتروفتومتری UV-VISIBLE با دستگاه UV-1700 مدل شیمادزو^۱ اندازه‌گیری شد [۲۴].

۳- نتایج

۳-۱- خصوصیات نانوذرات تولیدی

در شکل ۱ تصویر نانوذرات سنتز شده نشان داده شده است. نتایج حاصل از SEM ذرات، اندازه ذرات تولیدی را در محدوده نانو نشان می‌دهد که به‌عنوان نمونه دو ذره ۲۱ و ۵۱ نانومتری در این تصویر با ضربدر مشخص شده است. آنالیز XRD بر روی نمونه‌های

¹ Shimadzo



شکل ۱- تصاویر SEM از نانو ذرات آهن سنتز شده

فرایند و محاسبه کارایی فرایند در هر مرحله از آزمایش‌ها از رابطه ۲ استفاده شد

$$\%E = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

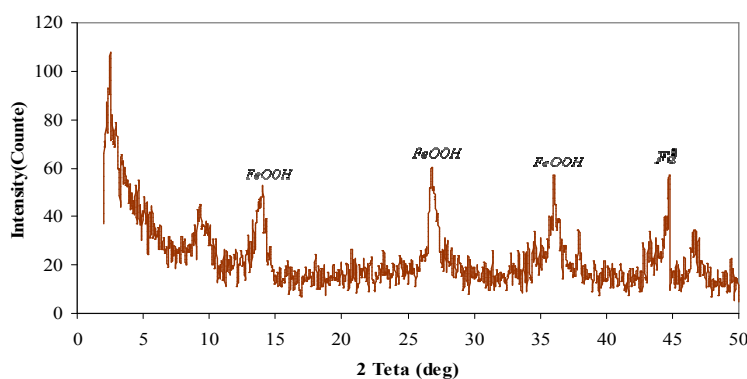
که در این رابطه C_0 و C به ترتیب نشان دهنده غلظت‌های اولیه و ثانویه آرسنیک در هر مرحله است.

همانطور که بیان شد در هر مرحله از آزمایش‌ها با ثابت نگه داشتن دو پارامتر و با تغییر دو پارامتر دیگر، اثر فاکتورهای مختلف بر کارایی حذف بررسی شد. در مرحله اول، pH و غلظت آرسنیت و آرسنات به عنوان فاکتورهای ثابت در نظر گرفته شد و تأثیر غلظت نانوذرات و زمان تماس مورد بررسی قرار گرفت.

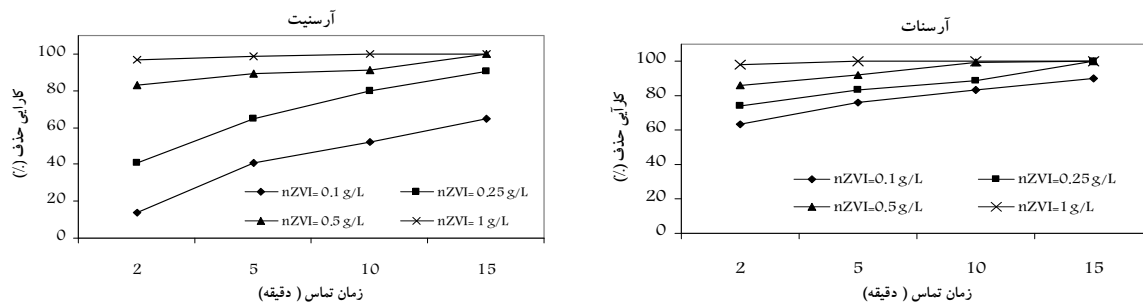
تولیدی نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. در زاویه‌های $14/06$ ، $26/945$ ، $36/29$ ، $38/03$ و $46/78$ ، $2\theta =$ منحنی دارای بالاترین پیک بود که در مقایسه با استاندارد ۴۴-۱۴۱۵ ICDD Card # مشخص گردید که کانی از نوع لیبیدو کروکیت ($FeOOH$) بود. همچنین در زاویه $2\theta = 44/67$ طبق استاندارد ICDD Card # = ۰۶-۰۶۹۶ پیک Fe^0 مشخص گردید.

۲-۳- نتایج حذف آرسنیک

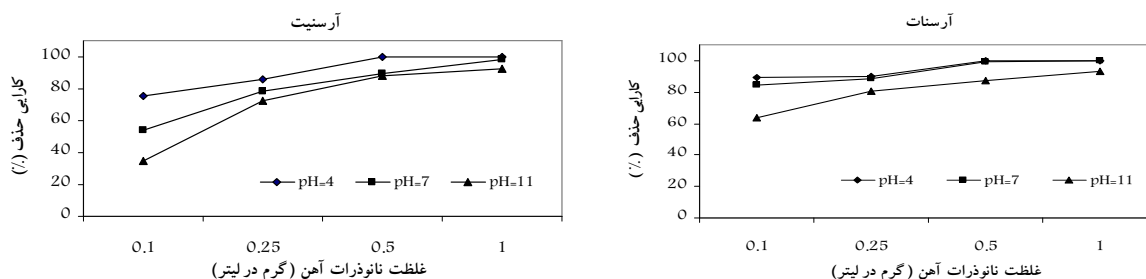
نتایج حاصل از تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر کارایی حذف آرسنیت و آرسنات توسط نانو ذرات آهن تولیدی در نمودارهای مندرج در شکل‌های ۳ تا ۶ آورده شده است. برای تعیین میزان تأثیر



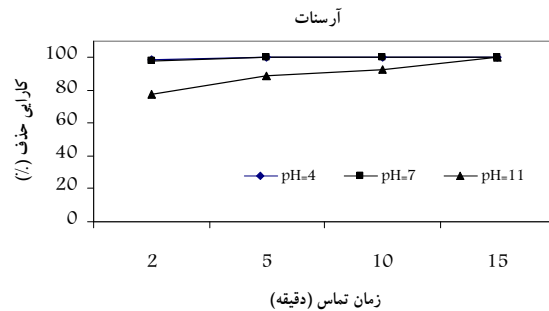
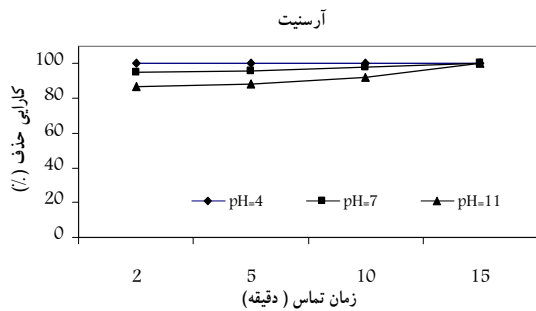
شکل ۲- تصویر XRD از نانو ذرات آهن سنتز شده



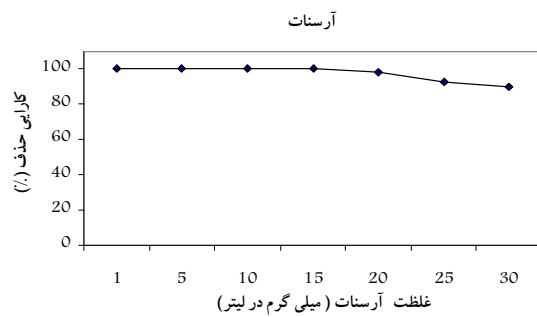
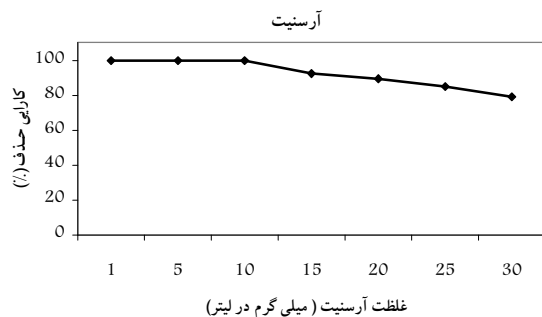
شکل ۳- بررسی تأثیر تغییرات زمان تماس و غلظت نانوذرات آهن بر کارایی حذف آرسنیت و آرسنات: pH=7، غلظت آرسنیت و آرسنات = 10 mgL^{-1}



شکل ۴- بررسی تأثیر تغییرات غلظت نانو ذرات آهن و pH بر کارایی حذف آرسنیت و آرسنات: زمان تماس ۱۰ دقیقه، غلظت آرسنیت و آرسنات 10 mgL^{-1}



شکل ۵- بررسی تأثیر تغییرات زمان تماس و pH بر کارایی حذف آرسنیت و آرسنات $C nZVI=1gL^{-1}$: غلظت آرسنیت و آرسنات = $10 mgL^{-1}$



شکل ۶- بررسی تأثیر تغییرات غلظت آرسنیت و آرسنات بر کارایی حذف آن توسط نانوذرات آهن: زمان تماس ۱۰ دقیقه، $pH=7$ و $C nZVI=1 g L^{-1}$

۴- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از این پژوهش حاکی از آن است که نانو ذرات آهن در محدوده وسیعی از pH و در مدت زمان کوتاهی، آرسنیک را به طور مؤثر از آب حذف می نماید و می تواند به عنوان روشی جدید برای تصفیه در منبع و در محل تصفیه خانه آب استفاده شود. همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش زمان تماس و غلظت نانو ذرات، کارایی حذف آرسنیت و آرسنات افزایش می یابد. افزایش کارایی حذف با گذشت زمان به این دلیل است که با گذشت زمان ایجاد حفره و خوردگی در سطح آهن بیشتر شده در نتیجه سطح مقطع جذب و کارایی حذف نیز افزایش می یابد. ضمناً با گذشت زمان جایگاههای فعال برای جذب آرسنیک تغییر می کند و تعداد محصولات حاصل از واکنش آهن در محیط آبی افزایش می یابد که این موضوع نیز سبب افزایش کارایی حذف با افزایش زمان ماند می شود. همچنین علت افزایش کارایی حذف با افزایش غلظت نانو ذرات، افزایش محل های فعال سطحی جذب و امکان برخورد بیشتر بین آرسنیک با نانو ذرات آهن و افزایش واکنش های اکسیداسیون و احیا است [۸]. با افزایش pH، کارایی حذف آرسنیت و آرسنات کاهش می یابد [۸ و ۱۱]. در شرایط قلیایی، یون های آهن در اثر برخورد سطح نانو ذرات با

نتایج این بخش از آزمایش ها در شکل ۳ آورده شده است. مطابق شکلهای، نانوذرات با غلظت ۱ گرم در لیتر در زمان تماس ۵ دقیقه، آرسنیت و آرسنات را به طور کامل حذف نمود. در مرحله بعد، زمان تماس بهینه به دست آمده از مرحله اول (۱۰ دقیقه) و غلظت آرسنیت و آرسنات ثابت و تأثیر pH و غلظت نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۴ آورده شده است. این نتایج نشان می دهد که با افزایش pH، کارایی حذف کاهش می یابد. در pH برابر ۴ و در غلظت نانوذرات آهن ۰/۵ گرم در لیتر، حذف به طور کامل صورت گرفت. در مرحله سوم با ثابت نگه داشتن غلظت نانوذرات آهن و غلظت آرسنیک (آرسنیت و آرسنات)، تأثیر pH و زمان تماس بر کارایی حذف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. هرگاه غلظت آرسنات در محیط آبی با pH برابر ۷، ۱۰ میلی گرم در لیتر باشد، با استفاده از نانو ذرات آهن با غلظت بالاتر از ۰/۵ گرم در لیتر می توان پس از گذشت ۱۰ دقیقه تمام آرسنات را حذف نمود. در مرحله آخر با ثابت نگه داشتن سایر فاکتورها تأثیر غلظت آرسنیت و آرسنات بر کارایی حذف آن توسط نانو ذرات مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش غلظت آرسنیت و آرسنات کارایی حذف کاهش یافت. نتایج این بخش نیز در شکل ۶ آورده شده است.

دارای بار مثبت است. بنابراین این گونه‌ها احتمالاً گونه‌های اصلی هستند که در این محدوده pH، جذب می‌گردند. با افزایش pH، بار نانو ذرات منفی شده و در اثر نیروی دافعه بین آرسنات و نانو ذرات، میزان جذب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت آرسنیت و آرسنات نیز کارایی حذف آنها کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از تحقیق، نانو ذرات آهن دارای مزایایی از قبیل کارایی حذف بالا و زمان واکنش کوتاه بوده و می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب در حذف آرسنیک از محیط‌های آبی مطرح گردد.

۶- قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی همدان و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو به‌خاطر حمایت مالی از این تحقیق و فراهم نمودن امکانات لازم و همچنین از خانم مهندس ناظمی کارشناس محترم گروه مهندسی بهداشت محیط به‌خاطر همکاری در انجام تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

رادیکال‌های هیدروکسیل به‌صورت محلول در آمده و باعث تولید رسوب هیدروکسید آهن می‌شود. این رسوب، جایگاه‌های فعال سطحی بر روی نانو ذرات را اشغال نموده و از فعالیت بیشتر ممانعت به‌عمل می‌آورد [۲۵]. در pH زیر ۹/۲، H_3AsO_3 گونه غالب آرسنیک در محیط آبی بوده و احتمالاً گونه اصلی است که جذب می‌گردد. وقتی pH به بالای ۹/۲ می‌رسد، $H_3AsO_3^-$ گونه غالب آرسنیک است در حالی که سطوح محصولات خوردگی nZVI منفی ($Fe(III)-O^-$) است که سبب دافعه الکترواستاتیکی می‌گردد. این رفتار وابسته به pH در جذب AS (III)، بر روی اکسید آهن، ژئوتیت سنتتیک و مگنتیت نیز مشاهده شده است [۲۵]. در تحقیق کانل و همکاران^۱، جذب ۱۰۰ درصد AS(V) در محدوده pH بین ۳ تا ۷، ۸۴/۷ درصد در pH برابر با ۹ و ۳۷/۹ درصد در pH برابر با ۱۱ اتفاق افتاده است. نتایج این پژوهش با پژوهش ذکر شده مشابهت دارد. این روند وابستگی به pH همچنین در طول جذب AS(V) به‌وسیله اکسیدهای آهن مختلف نیز مشاهده شده است که ممکن است به یونیزاسیون جاذب و جذب شونده مربوط باشد [۲]. در pH ۲ تا ۷، آرسنات به شکل $H_2AsO_4^-$ و $HASO_4^{2-}$ است در حالی که در این محدوده pH نانو ذرات آهن

¹ Kanel et al.

۷- مراجع

- 1- Kanel, S.R., Manning, B., Charlet, L., and Choi, H. (2005). "Removal of Arsenic(III) from groundwater by nanoscale zero-valent iron." *Environ. Sci. Technol.*, 39, 1291-1298.
- 2- Kanel, S.R., Greneche, J.M., and Choi, H. (2006). "Arsenic (V) removal from groundwater using nano scale zero-valent iron as a colloidal reactive barrier material." *Environ. Sci. Technol.*, 40, 2045-2050.
- 3- Tyrovolas, K., Nikolaidis, N.P., Veranis, N.S., Kallithrakas-Kontos, N., and Koulouridakis, P.E. (2006). "Arsenic removal from geothermal waters with zero-valent iron effect of temperature, phosphate and nitrate." *Water Research*, 40, 2375-2386.
- 4- Rahmani, A. R., Ghaffari, H. R., and Samadi, M. T. (2010). "Removal of arsenic (III) from contaminated water by synthetic nano size zerovalent iron." *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 62, 1116-1119.
- 5- Cornejo, L., Lienqueo, H., Arenas, M., Acarapi, J., Contreras, D., Yanez, J., and Mansilla, H.D. (2008). "In field arsenic removal from natural water by zero-valent iron assisted by solar radiation." *Environmental Pollution*, 156, 827-831.
- 6- Nguyena, T.V., Vigneswaran, S., Ngoa, H.H., Kandasamy, J., and Choi, H.C. (2008). "Arsenic removal by photo-catalysis hybrid system." *Separation and Purification Technology*, 61, 44-50.
- 7- Konstantina, T., Nikolaos, P., Nikolaos, V., Nikolaos, K., and Pavlos, E. (2006). "Arsenic removal from geothermal water with zero-valent iron—Effect of temperature, phosphate and nitrate." *Water Research*, 40 (12), 2375-2386.
- 8- Konstantina, T., Elpida, P., and Nikolaos P.N. (2007). "Modeling of arsenic immobilization by zero valent iron." *European J. of Soil Biology*, 43, 356-367.

- 9-Junyapoon, S. (2005). "Use of zero valant iron for wastewater treatment." *KMITL Sci. Tech.*, 5(3), 587-595.
- 10- Sharma, B., and Bose, P. (2006). "Arsenic sequestration by metallic iron under strongly reducing conditions." *Current Science*, 91 (2), 204-208.
- 11- Bang, S., Johnson, M.D., Korfiatis, G.P., and Meng, X. (2005). "Chemical reaction between arsenic and zero-valant iron in water." *Water Research*, 39, 763-770.
- 12- Asgari, A.R., Naseri, S., Mahvi, A. H., Kheiri, A., Qasri, A., and Vaezi, F. (2009). "Effectiveness of iron filings in arsenate and arsenite removal from drinking water." *J. of Water and Wastewater*, 71, 18-25. (In Persian)
- 13- Nikaen, M., and Naseri, S. (2007). "Evaluation of metallic iron (Fe⁰) application to remediate Nitrate contaminated water." *J. of Water and Wastewater*, 60, 15-21. (In Persian)
- 14- Li, X.Q., Elliott, D. W., and Zhang W.X. (2006). "Zero-valent iron nanoparticles for abatement of environmental pollutants: Materials and engineering aspects." *Solid State and Material Science*, 31, 111-122.
- 15- Rangsidek, R., and Jekel, M.R. (2005). "Removal of dissolved metals by zero-valent iron (ZVI): Kinetics, equilibrium, processes and implications for storm water runoff treatment." *Water Research*, 39, 4153-4163.
- 16- Chen, S.S., Cheng, C.Y., Li, C.W., Chai, P.H., and Chang, Y.M. (2007). "Reduction of chromate from electroplating wastewater from pH 1 to 2 using fluidized zero valent iron process." *J. of Hazardous Materials*, 142, 362-367.
- 17- Chen, S. S., Hsu, H. D., and Li, C.W. (2005). "A new method to produce nanoscale iron for nitrate removal." *J. of Nanoparticle Research*, 6, 639-647.
- 18- Yang, G. C. C., and Lee, H. (2005). "Chemical reduction of nitrate by nanosized iron: Kinetics and pathways." *Water Research*, 39, 884-894.
- 19- Niu, S.F., Liu, Y., Xu, X.H., and Lou, Z.H. (2005). "Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by iron nanoparticles." *J. of Zhejiang University Science-B*, 6(10), 1022-1027.
- 20- Plagentz, V., Ebert, M., and Dahmke, A. (2006). "Remediation of groundwater chlorinated and brominated hydrocarbons, benzen and chromate by sequential treatment using ZVI and GAC." *Environ. Geol.*, 49, 684-695.
- 21- Giasuddin, A. B. M., Kanel, S.R, and Choi, H. (2007). "Adsorption of humic acid onto nanoscale zerovalent iron and its effect on arsenic removal." *Environ. Sci. Technol.*, 41, 2022-2027.
- 22- Li, X.Q., Brown, D.G., and Zhang, W.X. (2007). "Stabilization of biosolids with nanoscale zero-valent iron (nZVI)." *J. of Nanoparticle Research*, 9, 233-243.
- 23- Xu, Y., and Zhao, D.Z. (2007). "Reductive immobilization of chromate in water and soil using stabilized iron nanoparticles." *Water Research*, 41, 2101-2108.
- 24- APHA, AWWA, WEF. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 19th Ed., Washington DC.
- 25- Shu, H. Y., Chang, M.C., Yu, H.H., and Chen W.H. (2007). "Reduction of an azo dye acid black 24 solution using synthesized nanoscale zero valent iron particles." *J. of Colloid and Interface Science*, 314, 89-97.