

## مطالعه آزمایشگاهی اثر نانوذرات آهن بر حذف آرسنیک در محیط آبی

مهديه جانباز فوتمی\*<sup>۱</sup>، مجید خلقی<sup>۲</sup>، عبدالحسین هورفر<sup>۳</sup>، داود حق‌شناس<sup>۴</sup>

۱. کارشناس ارشد گرایش مدیریت منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

Kholghi@ut.ac.ir

hoorfar@ut.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

davoudhaghshenas@gmail.com

۴. دکتر مواد گروه شیمی دانشگاه امیرکبیر

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۹/۱۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۴/۲

### چکیده

آلودگی آبخوان، یکی از مسائل مطرح در آب زیرزمینی است که با افزایش فعالیت‌های صنعتی، دفع فاضلاب در چاه‌های جذبی و برداشت بی‌رویه از سفره در دهه‌های اخیر افزایش یافته و با توجه به اینکه حدود ۶۰ درصد از آب مصرفی سالانه کشور از آب زیرزمینی تأمین می‌شود، پالایش آن بسیار حائز اهمیت است. یکی از آلودگی‌های رایج، سمی و خطرناک در آب زیرزمینی، آلایندة آرسنیک است که غلظت بیش از حد مجاز آن در چند استان ایران گزارش شده است. یکی از راه‌های جدید، کارآمد و کم‌هزینه برای کاهش غلظت آرسنیک از آب زیرزمینی، تزریق درجای نانوذرات آهن به محیط آبخوان است که امروزه در جهان به آن توجه شده است. هدف از این مقاله بررسی روند کاهش آرسنیک در محیط آبی از طریق نانوذرات آهن صفر است که با انجام آزمایش‌های پیمانه‌ای شکل گرفته است. در این آزمایش‌ها اثر زمان، غلظت اولیه آلایندة و واکنش گر، دما و pH بر تغییرات غلظت نانوذرات آهن و آرسنیک مطالعه شده است تا سرعت واکنش و نحوه کاهش آرسنیک در محیط آبی بررسی شود. نتایج این آزمایش‌ها نشان دادند نانوذرات آهن، غلظتی در حدود ۱۰ برابر مجاز غلظت آرسنیک را در یک ساعت به زیر غلظت مجاز استاندارد آب شرب ایران می‌رسانند. در نهایت، نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که نانوذرات آهن بازده بسیار زیادی برای پالایش آب آلوده به آرسنیک در محیط آبی دارند.

### کلیدواژه

آزمایش‌های پیمانه‌ای، پالایش آب، حذف آرسنیک، نانوذرات آهن.

### ۱. سرآغاز

جمله این‌ها می‌توان به کشورهای هند، بنگلادش، کمبوج، چین، نپال، پاکستان، تایوان، تایلند و ویتنام در قاره آسیا و کشورهای آرژانتین، برزیل، شیلی و مکزیک در قاره آمریکا اشاره کرد (www.who.int). در ایران نیز در برخی آبخوان‌ها (دشت هشتگر و کردستان) غلظت بیش از حد مجاز آرسنیک مشاهده شده است. با توجه به سمیت و گسترش آرسنیک در سطح جهان، مطالعات زیادی برای حذف آن از آب سطحی و زیرزمینی شکل گرفته و روش‌های گوناگونی بررسی شده است. به تازگی با توجه به حذف سریع (V) As و (III) A از طریق نانوذرات آهن، این روش مطالعه شده است. از این رو در این تحقیق با

با توجه به اینکه از ۲/۸ درصد آب‌های شیرین دنیا، ۵۹ درصد آن آب زیرزمینی است، می‌توان گفت یک منبع مورد اطمینان برای توسعه جوامع انسانی است. امروزه این منبع گرانقدر با رشد و توسعه صنعت و کشاورزی، افزایش بی‌رویه جمعیت و به تبع آن افزایش نیاز شرب و دفن فاضلاب شهری و پساب‌های صنعتی و کشاورزی در آبخوان‌ها در معرض آلودگی قرار گرفته است. یکی از آلودگی‌های رایج و سمی، آلودگی آرسنیک است که در کشورهای مختلف به خصوص در حال توسعه، غلظت بیش از حد مجاز آن در آب شرب گزارش شده است. از

افزایش غلظت آلاینده و واکنش‌گر را گزارش کردند. این آزمایش‌ها در ۶۰ روز ادامه یافت و روند کاهشی مستمری مشاهده شده است (Evanko, et al., 1997). چویی و همکاران در بررسی حذف آرسنات و آرسنیت در محیط آبی از طریق دو نوع نانوذرات GPD<sup>۱</sup> و CIS<sup>۲</sup> به مقایسه فرایند حذف این دو پرداختند و pH مناسب برای حذف را ۳ تا ۵/۱ اعلام کردند (Choi, et al., 2012). رحمانی و همکاران راندمان حذف آرسنیک را از طریق نانوذرات میکروذرات آهن در غلظت‌های متفاوت واکنش‌گر، آرسنیک و pH متفاوت بررسی کردند و از کارایی نانوذرات آهن در pH اسیدی خبر دادند. همچنین، آن‌ها اثرگذاربودن نانوذرات آهن نسبت به آهن میکرو را تأیید کردند (Rahmani, et al., 2011).

حسینی با بررسی اثر نانوذرات آهن بر احیای نیترات در محیط آبی، از کارایی بالای ستون یک‌بعدی خاک و مدل دوبعدی پرده واکنش‌گر خبر داد و بیان کرد که واکنش طی عملکرد به سمت حالت قلیایی پیش می‌رود و با افزایش حالت اسیدی، سرعت واکنش افزایش می‌یابد.

وی همچنین اثر یون‌های اضافه را بررسی کرده و از کاهش نرخ واکنش خبر داده است (حسینی، ۱۳۸۹). در ادامه تحقیقات انجام‌شده، در این مقاله، روند حذف آرسنیک با نانوذرات آهن در زمان مختلف در محیط آبی بررسی و اثر تغییرات غلظت اولیه آلاینده، غلظت نانوذرات تزریقی، pH و دما بر محیط دیده شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. آرسنیک

آرسنیک یک آلودگی نیمه‌معدنی، سمی و رایج است و بیشتر به شکل‌های آرسنات و آرسنیت در آب زیرزمینی یافت می‌شود. آرسنیت و آرسنات تحت واکنش‌های اکسایش و کاهش، بنا به شرایط محیطی مانند واکنش‌های شیمیایی، بیولوژیکی و pH، به یکدیگر تبدیل می‌شوند (www.who.int).

نگاهی به مطالعات گذشته به بررسی حذف آلودگی آرسنیک در محیط آبی با نانوذرات آهن پرداخته می‌شود. ژانگ و همکاران به بررسی نانوذرات آهن در پالایش آبخوان پرداختند و استفاده از نانوذرات را به علت سطح ریز (در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) و حرکت و ماندگاری بالای آن در آب زیرزمینی بسیار مفید دانسته‌اند. آن‌ها همچنین با بیان آلودگی‌های حذف‌شدنی از طریق نانوذرات آهن از جمله آرسنیت و آرسنات، همچنین چند واکنش احیا بیان داشتند که می‌توان از نانوذرات برای حذف آلودگی آب و فاضلاب در سطح وسیع با هزینه کم استفاده کرد (Zhang, et al., 2009). کانل و همکاران با بررسی اثر نانوذرات آهن بر آرسنیت و آرسنات، این واکنش را بسیار سریع و در حد دقیقه بیان کردند و گفتند یون‌های اضافه در محیط سبب کاهش نرخ واکنش می‌شوند (Kanel, et al., 2005, 2006).

آن‌ها همچنین در ادامه به بررسی اثر نانوذرات بر ستون خاک با نانوذرات اصلاح‌شده و روکش‌دار پرداختند و بیان کردند نانوذرات روکش‌دار سبب کاهش اکسیدشدگی آهن و افزایش مسافت طی‌شده در ستون خاک می‌شوند (Kanel, et al., 2007). کرلینگ و همکاران با بررسی بهداشت استفاده از نانوذرات، استفاده از آن را در برخی رشته‌ها به‌خصوص در زمینه درمان و بهداشت مشکل‌ساز و منوط به برخی موارد خاص مناسب دانستند (Kreyling, et al., 2006).

وانگ در بررسی اثر پالایش آرسنیک از خاک، یکی از روش‌ها را استفاده از نانوذرات آهن بیان داشته و واکنش‌های ایجادشده بین آهن و آرسنیک در شرایط محیطی مختلف را مطرح کرده است (Wang, et al., 2006).

هوران و همکاران، در بررسی حذف آرسنیک از طریق نانوذرات آهن، نحوه حذف در pH و غلظت‌های متفاوت آرسنیک و نانوذرات آهن را مطالعه کردند. این آزمایش‌ها با نانوذرات آهن روکش‌دار و حضور املاح مزاحم انجام شده است و در نهایت کاهش آرسنیک با کاهش pH،

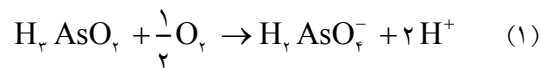
با توجه به جدول فوق با ریختن ۱/۷۳ گرم پودر آرسنیت سدیم در ۱ لیتر آب مقطر، ۱ لیتر محلول آلوده به ۱ گرم آرسنیک به دست می‌آید. برای تولید این آلودگی، ابتدا محلول مادر با غلظت ۱۰۰۰ ppm<sup>۶</sup> ساخته، سپس از رابطه  $N_1C_1=N_2C_2$  به سایر غلظت‌ها تبدیل می‌شود.

## ۲.۲. نانوذرات آهن

نانوذرات آهن ذره‌ای از فلز آهن است که ابعادی در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر و واکنش‌پذیری بسیار بالایی برای پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی و تصفیهٔ پساب‌های صنعتی دارد (www.pnf-co.com).

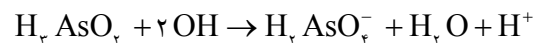
این ماده به علت ابعاد کوچک بعد از تزریق به راحتی در فواصل زیاد جابه‌جا می‌شود و قادر به احیای آلاینده‌هایی مانند ترکیبات آلی کلردار، یون‌های سنگین فلزی، رنگ‌های آلی و یون‌های غیرآلی مانند دی‌کرومات، آرسنیک و نیترات است (Zhang, et al., 2009). خارج‌شدن آرسنیک از محیط از طریق آهن، به صورت نامتحرک کردن، جذب سطحی و رسوب است که با توجه به اهمیت شرایط محیطی، بسته به pH مختلف، واکنش‌های متفاوتی حاصل می‌شود (www.ubu.dk, Evanko, et al., 1997).

امروزه به علت افزایش استفاده از نانوذرات در تکنولوژی، مطالعاتی در خصوص تأثیر آن‌ها در سلامت انسان‌ها شکل گرفته است.



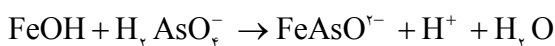
[www.pnf-co.com]

(۲)



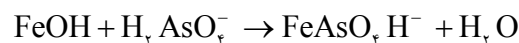
[Kanel, et al., 2005]

(۳)



[wang, et, al., 2006]

(۴)



[wang, et, al., 2006]

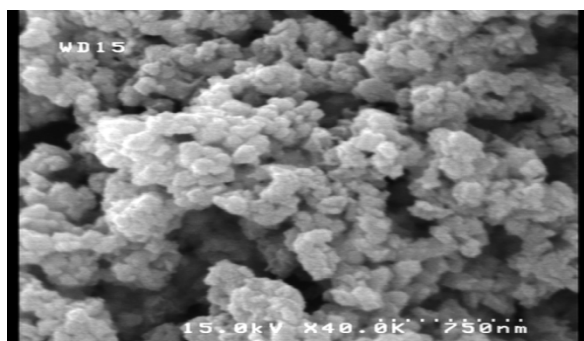
آرسنیک بر اثر فعالیت‌های طبیعی مانند آتشفشان، فرسایش خاک صخره‌ها، آتش‌سوزی جنگل‌ها و سوزاندن زغال‌سنگ، فعالیت‌های انسانی مانند تولید محصولات صنعتی حاوی آرسنیک شامل نگهدارنده‌های چوب، رنگ، دارو، علف‌کش‌ها و نیمه‌هادی‌ها و فعالیت‌های معدنی مانند عملیات ذوب، سوزاندن زباله‌های سوخت‌های فسیلی، تولید خمیر و کاغذ، سیمان و ساخت تجهیزات کشاورزی وارد طبیعت می‌شود (www.who.int).

مصرف طولانی بیش از غلظت مجاز آرسنیک (در حدود ۲ تا ۵ سال) باعث بیماری‌های مختلفی از جمله مشکلات پوستی (مانند تغییر رنگ روی پوست و تکه‌های سخت در کف دست‌ها و پا)، سرطان پوست، سرطان مثانه، سرطان کلیه و ریه، بیماری رگ‌های خونی در پا و ساق پا، احتمالاً دیابت، فشار خون بالا و اختلال در تولید مثل می‌شود. بیشترین جذب آرسنیک از راه شرب و شستشو با آب آلوده بسیار مشکل‌ساز است (www.pnf-co.com). میزان غلظت مجاز آرسنیک طبق استاندارد شرب ۱۰۵۳ ایران برابر با ۵۰ ppb<sup>۳</sup> است که این مقدار در سازمان بهداشت جهانی<sup>۴</sup> برابر با ۱۰ ppb در نظر گرفته شده است (www.who.int).

در این آزمایش برای ایجاد آلودگی آرسنیک در آب، از نمک آرسنیت سدیم ( $NaAsO_2$ ) استفاده شده است.<sup>۵</sup> غلظت‌های تعیین‌شده برای بررسی، ۱۰ تا ۱۰۰ برابر غلظت مجاز استاندارد آب شرب ایران است. با توجه به نسبت آرسنیک در نمک آرسنیت سدیم، میزان نمک مورد نیاز برای ایجاد آلودگی به دست می‌آید (جدول ۱).

جدول ۱. نسبت مقدار آرسنیک در عنصر آرسنیت سدیم

عنصر	جرم اتمی	درصد	جرم در ۱۰۰۰ ppm
Na	۲۳	۰/۱۸	۰/۳۱
As	۷۴/۹	۰/۵۸	۱
O <sub>۲</sub>	۳۲	۰/۲۵	۰/۴۳
NaAsO <sub>۲</sub>	۱۲۹/۹	۱	۱/۷۳



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات آهن  
(www.pnf-co.com)

### ۳.۲. آزمایش پیمانه‌ای

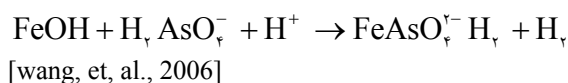
آزمایش‌های پیمانه‌ای در بررسی ۵ پارامتر مؤثر بر واکنش نانوذرات آهن صفر و آلایندۀ آرسنیک انجام گرفت و مشخصات آزمایش به اختصار در جدول ۳ نمایش داده شده است.

### ۳.۳. اثر زمان بر کاهش غلظت آرسنیک

برای بررسی اثر زمان، آزمایش پیمانه‌ای در محیط آبی آلوده به ۵۰۰ ppb آرسنیک در حضور ۱ گرم بر لیتر نانوذرات آهن انجام شد. در حین آزمایش برای ته‌نشین نشدن و معلق بودن نانوذرات، محلول روی یک شیکر در حال چرخش با دور ۲۰۰ rpm قرار گرفته بود و در زمان‌های ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه در ۲ تکرار از آن نمونه برداری شکل می‌گرفت.

برای جداکردن نانوذرات آهن از محلول نمونه، نمونه‌ها پس از نمونه برداری با سرنگ از فیلتر کاغذی عبور داده شدند. در این آزمایش‌ها از فیلتر کاغذی شرکت S&S با مش بندی ۱۱ میکرون استفاده شده است و برای اطمینان از آلوده نبودن آن‌ها، در ۳ تکرار آب مقطر از فیلتر کاغذی عبور داده و مقدار غلظت آرسنیک آن اندازه‌گیری شد که این مقدار در هر ۳ تکرار زیر ۵ ppb قرائت شده است. نمونه‌ها برای جلوگیری از اکسایش و کاهش آرسنیک در معرض نور خورشید، در شیشه‌های نمونه برداری تیره ریخته و برای قرائت میزان آرسنیک به آزمایشگاه منتقل شدند. دقت آزمایش با انجام ۲ بار تکرار برای هر زمان (برداشتن ۲ نمونه هم‌زمان) و بررسی روند مورد انتظار در یک سری داده سنجش شد.

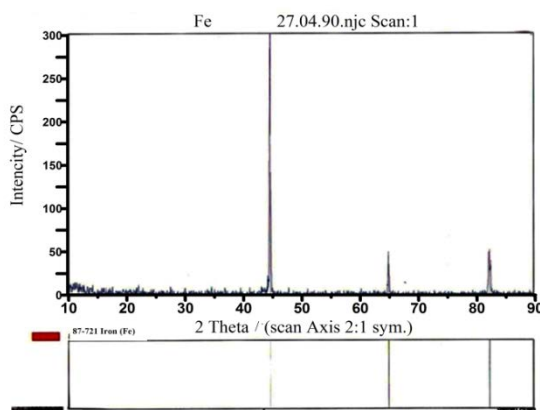
(۵)



در این میان به احتمال مشکل ساز بودن استفاده از نانوذرات در برخی موارد مانند تکنولوژی‌های درمان و بهداشت توجه شده است (Kreyling, et al., 2006). اما در خصوص پالایش آب آلوده، از آنجا که پس از تزریق نانوذرات به محیط، فرایند جداسازی آن از آب، از طریق فیلتر شکل می‌گیرد، نه تنها عملاً نانوذراتی باقی نمی‌ماند که خطر ساز باشد، بلکه در مقابل زیان بار بودن شرب آب آلوده به آرسنیک، روشی سودمند و کارا به نظر می‌رسد. در این آزمایش، از پودر نانوذرات آهن صفر تولیدی شرکت پیام‌آوران نانو فناوری فردانگر (PNF) استفاده شده که دارای مشخصات ذکر شده در جدول ۲ است. برای تعیین ساختار، جنس و نوع نانوذرات، عکس XRD و برای تعیین اندازه و شکل ذرات، عکس TEM گرفته و در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده است. عکس TEM میانگین نانوذرات را ۷۵ نانومتر نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات نانوذرات آهن (www.pnf-co.com)

خلوص (%)	سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)	دانسیته بالک (g/cm <sup>3</sup> )	دانسیته واقعی (g/cm <sup>3</sup> )
۹۹/۹	۸-۶	۰/۲۵-۰/۱	۷/۹



شکل ۱. پراش اشعه x (www.pnf-co.com)

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌های پیمانه‌ای

مشخصات	غلظت اولیه آرسنیک (ppm)	غلظت نانوذرات (gr/lit)	زمان (دقیقه)	توضیحات
اثر زمان در کاهش آرسنیک	۰/۵	۱	۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰	بررسی اثر زمان
اثر غلظت نانوذرات	۰/۵	۲، ۰/۵	۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰	بررسی اثر غلظت نانوذرات
اثر غلظت اولیه آرسنیک	۵، ۰/۵	۲، ۱	۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰	بررسی اثر غلظت اولیه آرسنیک
اثر تغییرات دما	۰/۵	۱	۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰	بررسی اثر دمای ۳۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد
اثر PH	۰/۵	۱	۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰	بررسی اثر pH خنثی، بازی و اسیدی

#### ۴. تعیین اثر غلظت نانوذرات

برای تعیین اثر غلظت نانوذرات تزریقی، ۵۰۰ppb آلاینده آرسنیک با ۰/۵ و ۲ گرم بر لیتر نانوذرات آهن واکنش داده شده‌اند. در این آزمایش در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه نمونه‌برداری در ۲ تکرار صورت گرفته و سایر روند آزمایش مطابق آزمایش قبلی بوده است.

#### ۵. بررسی اثر تغییر غلظت اولیه آرسنیک

تغییر غلظت اولیه آرسنیک بر میزان جذب آن از طریق نانوذرات آهن تأثیر می‌گذارد، به همین علت در یک میزان مشخص تزریق نانوذرات آهن، غلظت ۵۰۰ppb و ۵۰۰۰ آرسنیک بررسی شد. روند این آزمایش مطابق آزمایش‌های شرح داده شده قبلی است.

#### ۶. بررسی اثر pH

در بررسی اثر تغییرات pH، ۳ حالت اسیدی، خنثی و بازی بررسی شده است. در حالت اسیدی از اسیدکلریک رقیق شده (pH=۲) و در حالت بازی از پودر NaOH (pH=۱۲) استفاده شده است. حالت خنثی نیز تنها با افزودن آب مقطر ایجاد شده است.

#### ۷. بررسی اثر تغییرات دما

حذف آرسنیک از طریق نانوذرات آهن فرایندی شیمیایی

است که تغییرات دمایی بر روند آن مؤثر است. به همین علت آزمایش در ۲ دمای محیط و ۶۵ درجه سانتی‌گراد که در آب‌های زیرزمینی گرم مشاهده می‌شود، انجام شده است. هنگام آزمایش دما ثابت نبود و تغییرات اندکی داشت.

#### ۸. بررسی اثر طولانی‌مدت نانوذرات بر آرسنیک

برای بررسی اثر طولانی‌مدت نانوذرات بر آرسنیک، ۲ نمونه آب حاوی ۱ppm آرسنیک و ۰/۵ و ۲ گرم بر لیتر نانوذرات آهن به مدت ۱۵ روز در دمای محیط و دور از نور خورشید نگهداری و در انتها از آن‌ها نمونه‌برداری شد.

#### ۹. نتایج

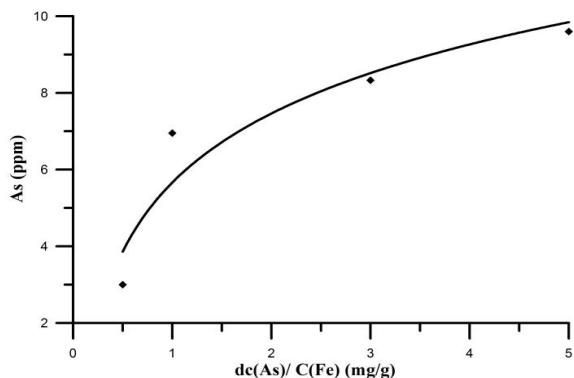
##### ۱.۹. اثر زمان بر کاهش غلظت آرسنیک

در این آزمایش، پس از نمونه‌برداری در زمان‌های مقرر، نتایج آن‌ها بررسی شد. این نتایج نشان دادند در ابتدا با گذشت زمان مقدار آرسنیک با شیب تند کاهش می‌یابد و در انتها با کاهش مقدار آلاینده و سطح تماس، این مقدار تقریباً ثابت می‌شود. در انتهای آزمایش میزان آلودگی از ۱۰ برابر غلظت مجاز به زیر غلظت مجاز می‌رسد، به طوری که پس از گذشت ۶۰ دقیقه، مقدار غلظت آرسنیک ۵۷ppb و در زمان ۹۰ دقیقه غلظت آن ۲۷ppb مشاهده شده است. تغییرات غلظت نسبی آرسنیک به زمان در نمودار ۱ نمایش داده شده است.

۰/۵ گرم بر لیتر در ۱۲۰ دقیقه به ۱۶ppb رسیدند. علت این امر را می‌توان افزایش سطح تماس بین واکنش‌گر و آلاینده بیان کرد.

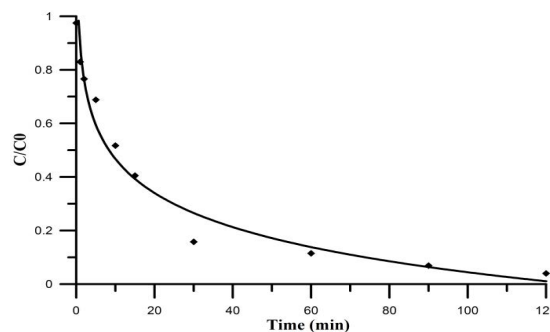
### ۳.۹. بررسی اثر تغییر غلظت اولیه آرسنیک

برای بررسی اثر تغییر غلظت اولیه آرسنیک، مقدار ۳،۱ppm و ۵ آرسنیک با ۱ گرم بر لیتر نانوذرات آهن بررسی شدند. این آزمایش‌ها نشان دادند، با افزایش غلظت آرسنیک شیب حذف نانوذرات بیشتر می‌شود به طوری که ۵۰۰ppb، ۳ppm و ۵ به ترتیب پس از گذشت زمان ۶۰ دقیقه از آزمایش به ۵۷ppb، ۲/۵ppm و ۴/۴۲ رسیدند و شیب کاهش برابر با ۳ppb/s، ۸/۳۳ و ۹/۶ داشتند. این نشان می‌دهد که با افزایش آلاینده آرسنیک در مقدار یکسان واکنش‌گر نانوذرات آهن، به علت افزایش سطح تماس آن‌ها با هم، واکنش با سرعت بیشتری انجام و سرعت حذف آرسنیک بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش میزان غلظت اولیه آرسنیک در حضور غلظت یکسان نانوذرات تزریقی، آرسنیک بیشتری از محیط حذف می‌شود با آنکه ممکن است غلظت آرسنیک محیط، هنوز بیشتر از سایرین باشد.



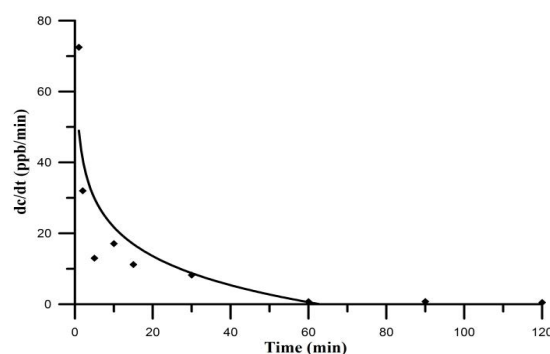
نمودار ۳. نرخ کاهش آرسنیک در غلظت‌های اولیه مختلف

شیب حذف آرسنیک با غلظت‌های اولیه مختلف، در نمودار ۳ ترسیم شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، روند کاهش آرسنیک با مقدار اولیه متفاوت، از یک خط صاف تبعیت نمی‌کند و معادله‌ای از درجات بالاتر دارد.



نمودار ۱. تغییرات غلظت آرسنیک با زمان

شیب کاهش آرسنیک با زمان در نمودار ۲ نشان داده شده است.



نمودار ۲. شیب حذف آرسنیک با زمان

علت کاهش شیب را می‌توان کاهش میزان آلاینده، کاهش سطح تماس، اکسیدشدگی نانوذرات آهن و در نتیجه کاهش کارایی آن بیان کرد. این آزمایش نشان داد به ازای هر ۱ واحد آرسنیک، ۲۰۰۰ واحد نانوذرات آهن لازم است تا در ۶۰ دقیقه غلظت آرسنیک به زیر غلظت مجاز برسد.

### ۲.۹. تعیین غلظت نانوذرات

برای دیدن اثر تغییر غلظت نانوذرات، غلظت‌های ۰/۵ و ۲ گرم بر لیتر نانوذرات آهن در غلظت آلاینده حدود ۴۰۰ppb آرسنیک بررسی شد تا اثر هر یک دیده شود. در هر ۲ آزمایش پس از گذشت ۲ ساعت تمامی مقادیر آرسنیک به زیر غلظت مجاز رسیدند، اما با افزایش غلظت نانوذرات آهن شدت این کاهش بیشتر بوده است به طوری که در ۲ گرم در لیتر پس از ۳۰ دقیقه به زیر ۵ppb و در

که با افزایش دما 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. از آنجا که نسبت غلظت آرسنیک به نانوذرات فقط ۱:۲۰ بوده است، آزمایش باید ساعات بیشتری به طول انجامد تا غلظت آرسنیک به زیر غلظت مجاز برسد.

### ۶.۹. بررسی اثر طولانی مدت نانوذرات بر آرسنیک

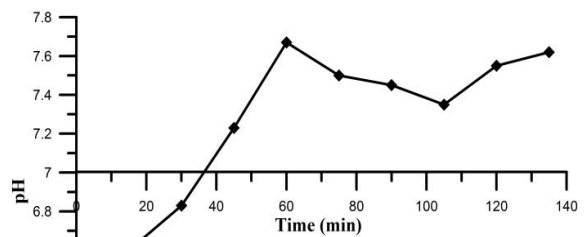
برای بررسی اثر طولانی مدت نانوذرات بر حذف آرسنیک، ۲ آزمایش با غلظت آلودگی آرسنیک ۱ ppm و به ترتیب با نانوذرات تزریقی ۰/۵ و ۲ گرم بر لیتر به مدت ۱۵ روز انجام شده است. مقدار غلظت آرسنیک در آزمایش اول در ۱۲۰ دقیقه ۱۶ ppb قرائت شده و پس از ۱۵ روز این مقدار کاهش یافته و به ۷/۶ ppb رسیده است. در آزمایش دوم مقدار آرسنیک پس از ۱۲۰ دقیقه و ۱۵ روز یکسان بوده و در هر دو زیر ۵ ppb قرائت شده است. نتایج نشان‌دهنده تداوم کاهش غلظت آرسنیک است و نشان می‌دهند که با گذشت زمان آرسنیک دوباره به محیط باز نمی‌شود.

### ۱۰. نتیجه گیری

پالایش آرسنیک به‌منزله آلاینده سمی و رایج در آب زیرزمینی امروزه بسیار حائز اهمیت است. یکی از روش‌های حذف آرسنیک استفاده از نانوذرات آهن است که روشی ارزان و کاراست و می‌توان از آن به صورت درجا در محیط استفاده کرد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که واکنش نانوذرات آهن و آرسنیک بسیار سریع و در حد دقیقه است. از طرف دیگر در محیط اسیدی و دمای بالا واکنش تسریع می‌شود. با بررسی اثر غلظت اولیه آرسنیک و اثر تغییرات غلظت نانوذرات دیده شد که در غلظت بیشتر آرسنیک به علت افزایش سطح تماس، نرخ حذف آن بیشتر می‌شود و با افزایش نانوذرات، در زمان کمتری آرسنیک به زیر غلظت مجاز می‌رسد. با

### ۴.۹. بررسی اثر pH

برای بررسی اثر pH به ۲ گونه عمل شد. ابتدا روند pH آزمایش‌های پیمانه‌ای بررسی شده است. با توجه به نمودار ۴ دیده می‌شود pH محلول به سمت قلیایی شدن پیش می‌رود که نشان می‌دهد، بسته به شرایط محیطی، در واکنش آهن و آرسنیک با هم و در محیط آبی،  $H^+$  از محیط گرفته یا  $OH^-$  آزاد می‌شود (Wang, et al, 2006).



نمودار ۴. تغییرات pH در آزمایش پیمانه‌ای

حالت دیگر بررسی‌ها، مقایسه واکنش آرسنیک با نانوذرات آهن در محیط‌های بازی، اسیدی و خنثی بوده است. آزمایش‌ها نشان دادند حالت اسیدی واکنش را تسریع می‌کند به طوری که در محیط اسیدی، آلودگی ۴۰۰ ppb در حضور ۱ گرم در لیتر نانوذرات پس از ۱۵ دقیقه به زیر ۵ ppb رسیده است. این بدان معنی است که در حالت اسیدی پس از ۱۵ دقیقه فقط ۱ درصد آلاینده در محیط باقی مانده است. در مقابل در حالت بازی واکنش بسیار کند بوده و فقط ۱ درصد از آلاینده در ۴۵ دقیقه حذف شده و ۹۹ درصد دیگر در محیط باقی مانده است که علت این امر می‌تواند تأثیر نیروی دافعه بارهای همنام بین  $As(III)$  و نانوذرات آهن در pH‌های بالا باشد (کوهپایه‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱) که باعث کاهش سطح تماس و در نتیجه کاهش واکنش می‌شود.

### ۵.۹. بررسی اثر تغییرات دما

برای بررسی اثر تغییرات دما، آزمایش‌ها در ۲ دمای ۶۵ درجه و دمای محیط (۳۰ درجه) در غلظت ۵ ppm آرسنیک و ۱ گرم بر لیتر نانوذرات آهن انجام شد. نتایج نشان دادند

شیمیاری شکل گرفته است که از مساعدت و همکاریشان تشکر و قدردانی می‌شود.

### یادداشت‌ها

1. GPD: grind precipitate dust

2. CIS: cast iron shot

۳. میکروگرم بر لیتر، قسمت در بیلیون

4. World Health Organization (WHO)

۵. آزمایشگاه شیمی تجزیه دکتر گنج‌علی، گروه شیمی، دانشگاه تهران

۶. میلی‌گرم بر لیتر، قسمت در میلیون

۷. دور در دقیقه

بررسی روند حذف آرسنیک در زمان، روند کاهش نمای مشاهده و دیده شد که با گذشت ۲ ساعت، ۵۰۰ میکروگرم بر لیتر آرسنیک در حضور ۱ گرم بر لیتر نانوذرات آهن به زیر غلظت مجاز خود می‌رسد. در نهایت آزمایش‌ها از کارآمدی نانوذرات آهن در حذف آرسنیک خبر دادند.

### تشکر و قدردانی

از گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج دانشگاه تهران به دلیل حمایت مالی طرح پژوهشی سپاسگزاری می‌شود. نانوذرات استفاده‌شده، تولیدی شرکت پیام‌آوران نانو فناوری فردانگر (PNF) بوده و اندازه‌گیری‌های آرسنیک نیز در آزمایشگاه شرکت نوین

### منابع

- استاندارد آب آشامیدنی ایران ۱۰۵۳، (۱۳۷۲). مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.
- حسینی، م، (۱۳۸۹). بررسی احیای آب زیرزمینی آلوده به نیترات از طریق نانوذرات آهن، رساله دکتری، دانشگاه تهران.
- کوهپایه‌زاده، ح؛ ترابیان، ع؛ نبی بیدهندی، غ؛ حبشی، ن، (۱۳۹۱). «تأثیر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در حذف آرسنیک ۵ ظرفیتی از آب آشامیدنی»، مجله آب و فاضلاب، شماره ۳، صص ۶۰-۶۷.
- Choi, N.C., et al. 2012. Removal of arsenate and arsenite from aqueous solution by waste cast iron, *Journal of Environmental Sciences*, 24(4) 589-595.
- Evanko, C.R., D.A., Dzombak. 1997. Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater, *Technology Evaluation Report*, 61page.
- Kanel, S. R., et al. 2005. Removal of Arsenic (III) from Groundwater by Nano Scale Zero-Valent Iron. *Environmental Science and Technology*, 39(5), 1291-1298.
- Kanel, S.R., J.M., Grenèche, H., Choi. 2006. Arsenic (V) Removal from Groundwater using Nano Scale Zero-Valent Iron as a Colloidal Reactive Barrier Material. *Environmental Science and Technology*, 40(6); 2045-2050.
- Kanel, S.R., et al. 2007. Transport of Surface-modified iron nanoparticle in porous media and application to arsenic(III) remediation. *J. of Nanoparticle Research*, 9, 725-735.
- Kreyling, G.W., Semmler-Behnke, W. Moller. 2006. Health implications of nanoparticles, *Journal of Nanoparticle Research Springer*, 8: 543-562.
- Rahmani, A.R., H.R., Ghaffari M.T., Samadi. 2011. A comparative study on arsenic(III) removal from aqueous solution using nano and micro sized zero-valent iron, *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, Vol. 8, No. 2, pp. 175-180.
- Vance, D.V. 1995. The Technology Solutions, *National Environmental Journal*, Vol 5 No. 3.
- Wang. Y. 2006. Assessment of the effect of soil amendments on the leaching of lead and arsenic from contaminated soil, *master of science thesis of Auburn University*, 99page.
- www.pnf-co.com
- www.ubu.dk
- www.who.int
- Zhang, T.C. 2009. Nanotechnologies for Water Environment Applications, committee of the Environment Council, *Environment and Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers*, 628 page.