

# بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر حذف آرسنیک از آب آشامیدنی در حضور و عدم حضور براده‌های آهن

مازیار نادری<sup>۱\*</sup>، ویدا پاست<sup>۲</sup>، محمدباقر میرانزاده<sup>۳</sup>، امیرحسین محوی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران  
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران  
vida.past@yahoo.com  
۳. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان  
miranzadehm@gmail.com  
۴. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران  
ahmahvi@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۲/۲۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۵/۱۹

## چکیده

امروزه، در سراسر دنیا آلودگی آب‌های طبیعی به آرسنیک به مشکل محیط‌زیستی مهمی تبدیل شده است. هدف از انجام این مطالعه بررسی دامنه تأثیر میدان مغناطیسی بر میزان حذف آرسنیک سه ظرفیتی (آرسنیت) از نمونه‌های آب آلوده در حضور یا عدم حضور براده‌های آهن بود. این مطالعه از نوع مداخله‌ای است. جامعه آماری شامل نمونه‌های دارای غلظت آرسنیک ۲ و ۵/۰ میلی‌گرم بر لیتر واکنش داده‌شده با براده‌های آهن در دوزهای ۰، ۲/۵ و ۵ گرم بر لیتر در زمان‌های تماس ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه در pH خنثی و در شرایط آزمایشگاهی بود که با سه مرتبه تکرار آزمایش ۱۰۸ نمونه به دست آمد. در بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر یون‌ها و نمک‌های تشکیل شده ستونی مگنتیک طراحی و نمونه‌ها از آن عبور داده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که میدان مغناطیسی غلظت آرسنیک نمونه‌های بدون براده آهن را کاهش ولی غلظت آرسنیک نمونه‌های دارای براده آهن را افزایش داد. از این تحقیق چنین نتیجه‌گیری شد که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی قوی‌تر می‌توان آرسنیک را بدون واکنش با یون یا جاذب دیگری از آب آشامیدنی حذف کرد.

## کلیدواژه

آرسنیت، براده‌های آهن، ستون مگنتیک، میدان مغناطیسی.

## ۱. سرآغاز

مصنوعی دارد (Uddin et al., 2006). دریافت بیش از اندازه و طولانی مدت آرسنیک معدنی توسط انسان از طریق آب آشامیدنی و مواد غذایی موجب آرسنیکوزیس می‌شود، شامل اختلالات پوستی، سرطان پوست، سرطان اندام‌های داخلی (مثانه، کلیه، کبد و ریه)، بیماری‌های عروق دست و پا و دیابت (Shankar & Shanker, 2014). سازمان جهانی بهداشت رهنمود میزان آرسنیک در آب آشامیدنی را  $\mu\text{g/l}$  ۱۰ عنوان کرده است (Yean et al., 2005). لازم به ذکر است که این استاندارد در آسیا، همچنین در کشور ایران ۰/۰۵ است (Mosaferi et al., 2008).

آرسنیک شبه‌فلزی سمی است و در طبیعت به دو شکل آلی و معدنی وجود دارد. آب آشامیدنی منبع مهم انتقال آرسنیک محسوب می‌شود (Nagajyoti et al., 2010). آرسنیک در محیط‌های آبی به دو شکل آرسنات (پنج ظرفیتی) و آرسنیت (سه ظرفیتی) وجود دارد. آرسنات شکل اکسیدشده و در آب‌های سطحی گونه غالب است، در حالی که آرسنیت شکل احیاشده است و بیشتر در آب‌های زیرزمینی یافت می‌شود. همچنین، سمیت و حلالیت آرسنیت از آرسنات بیشتر است. آلودگی آرسنیک در منابع آب منشأ طبیعی و

بویلرهای صنعتی را بررسی کردند. همچنین Amiri و Dadkhan (۲۰۰۶) کاهش کشش سطحی آب ناشی از تصفیه با میدان مغناطیسی را مطالعه کردند. Banejad و Abdosalehi (۲۰۰۹) نیز تأثیر میدان مغناطیسی را روی کاهش سختی آب بررسی کردند. در این مطالعه، نخست کارایی براده‌های آهن در حذف آرسنیت از آب آلوده بررسی و سپس به دامنه و تأثیر میدان مغناطیسی بر راندمان حذف آرسنیک پرداخته شد. این مطالعه در محیط آزمایشگاهی انجام شد و برای بررسی تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر یون‌ها و نمک‌های تشکیل شده در محلول‌ها ستونی طراحی و نمونه‌ها از داخل آن عبور داده شد. از نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به پی‌بردن به اهمیت نیروهای فیزیکی مثل میدان مغناطیسی در تصفیه آب و کاربرد بیشتر آن در این صنعت اشاره کرد.

## ۲. مواد و روش بررسی

### ۱.۲. تهیه و آماده‌سازی جاذب

براده‌های آهن مورد نیاز از کارگاه‌های تراشکاری شهر تهران تهیه شد. براده‌ها از الکی با منافذ ۲ mm عبور داده شد. همچنین، برای حذف روغن و گریس براده‌ها و تشکیل هیدروکسید فریک روی آن، با دترجنت شستشو داده و در نهایت با آب دیونیزه شده آبکشی شد.

روش‌های حذف آرسنیک از آب آشامیدنی شامل سه روش کلی فیلترکردن غشایی، انعقاد-ته‌نشینی و روش جذب سطحی است (Chen et al., 2014). در روش جذب سطحی از جاذب‌های متعددی می‌توان استفاده کرد که جاذب براده آهن از متداول‌ترین آن‌هاست. براده آهن در تماس با آب و اکسیژن اکسیدهای آهن را تشکیل می‌دهد که نقش اصلی را در حذف ترکیبات آرسنیک دارد (Vu et al., 2003). در چند سال اخیر به تصفیه آب به وسیله میدان مغناطیسی توجه شده است (Su & Puls, 2001). Ma و همکاران (۱۹۹۸) حذف آرسنیک را به وسیله یون‌های سولفید در میدان مغناطیسی بررسی کردند. Cass و Coey (۲۰۰۰) تصفیه آب به وسیله میدان مغناطیسی را مطالعه کرده‌اند. Lipus و Dobersek (۲۰۰۷) تأثیر میدان مغناطیسی بر ترسیب آراگونیت در آب آشامیدنی شیرهای برداشت حاوی آهن و منگنز را بررسی کردند. همچنین، Sillanpää و Ambashta (۲۰۱۰) تصفیه آب را با استفاده از میدان مغناطیسی بررسی کردند. Szcześ و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر میدان مغناطیسی استاتیک را بر آب در شرایط کینتیک بررسی کردند. Weston و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر میدان مغناطیسی را روی یون‌های موجود در سیال در حال حرکت بررسی کردند.

در کشور ایران نیز Gholizadeh و همکاران (۲۰۰۵) تأثیر میدان مغناطیسی بر جلوگیری از تشکیل رسوب در



شکل ۱. سمت چپ، براده آهن؛ سمت راست، براده آهن دارای هیدروکسید فریک

### ۲.۲. ساخت ستون مگنتیک

T ۰/۱ با قطر خارجی ۷ cm و قطر داخلی ۳ cm در اطراف ستونی شیشه‌ای (پیرکس) با ارتفاع ۲۸ cm و قطر

نخست، آهن‌ربای حلقه‌ای شکلی با شدت میدان مغناطیسی

خروجی تعبیه شد. سرعت تخلیه  $2 \text{ mm/s}$  در نظر گرفته شد.

$1/5 \text{ cm}$  قرار دادیم. همچنین، برای گیراندازی رسوبات، ستون فلزی مارپیچی به طول  $6 \text{ cm}$  داخل ستون قرار داده شد. در انتهای ستون، شیر قطع و وصل برای تنظیم سرعت



شکل ۲. نمای کلی و نزدیک ستون مغنتیک

ستون از صافی واتمن شماره ۱ با منافذ  $0/45 \mu$  عبور داده و pH آن با اسید نیتریک غلیظ  $65$  درصد به کمتر از  $2$  کاهش داده شد. سپس، میزان آرسنیک نمونه‌ها با دستگاه ICP اندازه‌گیری شد. برای این کار، نخست دستگاه ICP با محلول‌های استاندارد با غلظت‌های  $0 \text{ mg/l}$ ،  $0/5$ ،  $1/5$  و  $2/5$  کالیبره شد. در نهایت، غلظت آرسنیک نمونه‌ها برحسب  $\text{mg/l}$  در طول موج  $193/7 \text{ nm}$  روی مانیتور دستگاه خوانده شد. همچنین، هدایت الکتریکی نمونه‌ها نیز با هدایت‌سنج بر حسب  $\text{mS/cm}$  اندازه‌گیری شد. تمامی آزمایش‌ها در شرایط آزمایشگاهی و در دمای  $25$  درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. پس از جمع‌آوری داده‌ها، درصد حذف آرسنیک در هر حالت محاسبه شد. میانگین و انحراف معیار درصد حذف تعیین و هر کدام از سطوح متغیرها با آزمون جفت‌شده  $t$  و آنالیز واریانس یک‌طرفه یا معادل ناپارامتری آن مقایسه شد. سپس، نتایج خام مربوط به آزمایش‌ها با برنامه  $\text{SPSS 11.5}$  تجزیه و تحلیل شد. همچنین،  $P \leq 0/05$  معنادار بود. تمامی مراحل در آزمایشگاه تحقیقاتی گروه مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی کاشان انجام گرفت.

### ۳.۲. تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های دست‌ساز دارای آرسنیک از محلول آرسنیت سدیم ( $\text{NaAsO}_2$ )  $0/1$  نرمال ساخته‌شده شرکت Merck آلمان و آب دیونیزه تهیه شد. همچنین، برای جلوگیری از اکسایش آرسنیت به آرسنات، محلول‌های مورد نظر به‌صورت روزانه در غلظت‌های  $0/5 \text{ mg/l}$  و  $2 \text{ mg/l}$  ساخته شد. لازم به ذکر است، انتخاب این غلظت‌ها به این دلیل بود که میزان آرسنیک بیشتر منابع آب آلوده در کشور ایران در این گستره قرار دارد.

### ۴.۲. انجام آزمایش‌ها

محلول‌های آرسنیت با غلظت‌های  $0/5 \text{ mg/l}$  و  $2 \text{ mg/l}$  در تماس با جاذب براده‌های آهن در دوزهای  $2/5 \text{ g/l}$  و  $5 \text{ g/l}$  در زمان‌های  $5$ ،  $10$  و  $15$  دقیقه در داخل بشر به حجم  $\text{ml}$   $100$  روی شیکر با سرعت  $400 \text{ rpm}$  واکنش داده شد. سپس، نصف نمونه، یعنی  $50 \text{ ml}$ ، از داخل ستون با سرعت  $2 \text{ mm/s}$  عبور داده و برای هر نمونه یک شاهد (بدون براده آهن) در نظر گرفته شد. نمونه شاهد نیز از داخل ستون با همان سرعت عبور داده شد. سپس، نمونه‌های قبل و بعد از

### ۳. نتایج

در جدول ۱ میانگین و انحراف معیار درصد حذف آرسنیک قبل و بعد از ستون مگنتیک بر حسب دوز براده آهن و زمان تماس در غلظت‌های آرسنیک ۰/۵ mg/l و ۲ mg/l نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های فاقد براده‌های آهن (۰ g/l) میدان مغناطیسی توانسته است میزان راندمان حذف آرسنیک را افزایش دهد. همچنین، با افزایش زمان واکنش راندمان حذف افزایش یافته است (جدول ۱). در غلظت اولیه آرسنیک ۰/۵ mg/l و دوز براده آهن ۰ g/l در زمان‌های تماس ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه قبل از ستون مگنتیک، راندمان حذف آرسنیک به ترتیب ۳۱/۲۶، ۳۵/۴۶ و ۳۸/۰۶ درصد بوده است ولی بعد از ستون مگنتیک به ترتیب ۳۷/۰۶، ۳۸/۰۶ و ۳۹/۲۶ درصد به دست آمد (جدول ۱). همچنین، در غلظت اولیه آرسنیک ۲ mg/l و دوز براده آهن ۰ g/l در زمان‌های

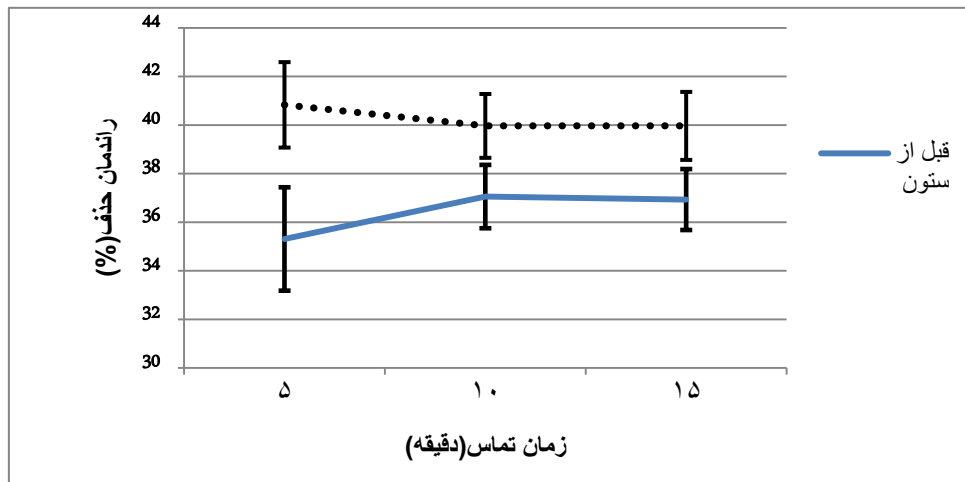
تماس ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه قبل از ستون مگنتیک، راندمان حذف آرسنیک به ترتیب ۳۵/۳۵، ۳۷/۶۵ و ۳۹/۸ درصد بوده است ولی بعد از ستون مگنتیک به ترتیب ۴۳/۶، ۴۶/۸۶ و ۴۸/۶۶ درصد گزارش شد (جدول ۱). در نمونه‌های دارای براده‌های آهن، در دوز براده آهن ۲/۵ g/l و غلظت اولیه آرسنیک ۰/۵ mg/l تنها در زمان‌های تماس ۱۰ و ۱۵ دقیقه راندمان حذف آرسنیک افزایش یافت؛ در زمان تماس ۱۰ دقیقه از ۷۳/۴۶ درصد به ۹۰/۰۶ درصد و در زمان تماس ۱۵ دقیقه از ۷۱/۷۳ درصد به ۷۵/۴ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین، در دوز براده آهن ۵ g/l و غلظت اولیه آرسنیک ۰/۵ mg/l و زمان تماس ۱۵ دقیقه نیز راندمان حذف آرسنیک افزایش یافت؛ از ۷۲/۴۶ درصد به ۷۸/۷۳ درصد تغییر یافت (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین و انحراف معیار درصد حذف آرسنیک قبل و بعد از ستون مگنتیک بر حسب دوز براده آهن و زمان تماس در غلظت‌های آرسنیک ۰/۵ mg/l و ۲ mg/l

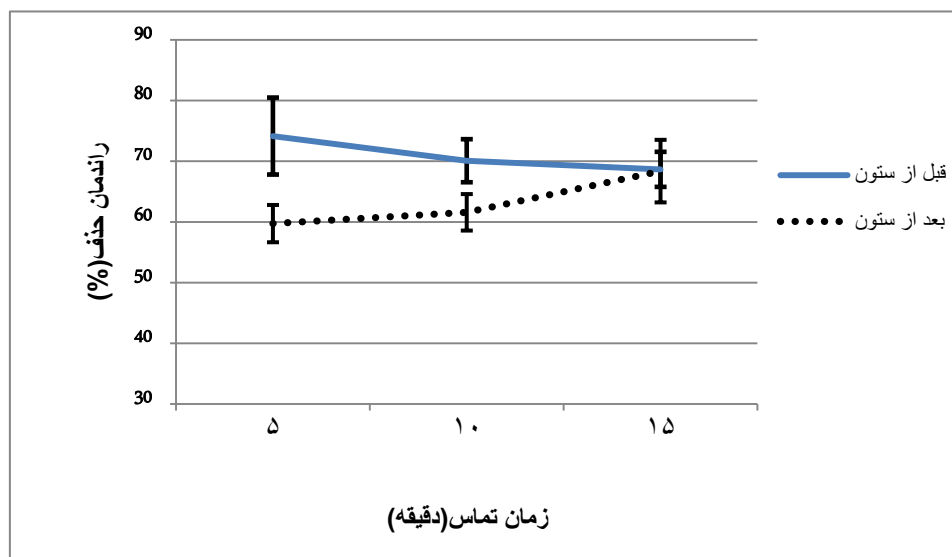
| 2 mg/l                 |                        | 0/5 mg/l               |                        | زمان تماس (min) | دوز براده آهن (g/l) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|---------------------|
| بعد از ستون            | قبل از ستون            | بعد از ستون            | قبل از ستون            |                 |                     |
| انحراف معیار ± میانگین | انحراف معیار ± میانگین | انحراف معیار ± میانگین | انحراف معیار ± میانگین |                 |                     |
| ۴۳/۶ ± ۳/۹۳            | ۳۵/۳۵ ± ۳/۷۶           | ۳۷/۰۶ ± ۲/۸۴           | ۳۱/۲۶ ± ۲/۱۹           | ۵               |                     |
| ۴۶/۸۶ ± ۳/۴۱           | ۳۷/۶۵ ± ۲/۵۲           | ۳۸/۰۶ ± ۱/۸۴           | ۳۵/۴۶ ± ۳/۴            | ۱۰              | ۰                   |
| ۴۸/۶۶ ± ۴/۵۳           | ۳۹/۸۳ ± ۳/۶۱           | ۳۹/۲۶ ± ۰/۴۱           | ۳۸/۰۶ ± ۰/۳            | ۱۵              |                     |
| ۵۶/۹۸ ± ۷/۳۵           | ۶۱/۳ ± ۷/۱۱            | ۶۲/۴۶ ± ۸/۰۲           | ۸۷ ± ۷/۵۱              | ۵               |                     |
| ۶۳/۱ ± ۳/۸۱            | ۶۶/۷۱ ± ۴/۷۱           | ۶۰/۰۶ ± ۱۰/۶           | ۷۳/۴۶ ± ۱۱/۴۹          | ۱۰              | ۲/۵                 |
| ۶۱/۳۵ ± ۳/۷۷           | ۶۵/۵۸ ± ۰/۸۹           | ۷۵/۴ ± ۱۵/۳۳           | ۷۱/۷۳ ± ۹/۸۱           | ۱۵              |                     |
| ۶۱/۶۶ ± ۶/۱۸           | ۶۳/۱۸ ± ۱۱/۱۵          | ۷۳/۲ ± ۱۴/۵۶           | ۸۵/۷۳ ± ۴/۹            | ۵               |                     |
| ۷۰/۴۸ ± ۴/۹۲           | ۷۸/۱۸ ± ۵/۶۹           | ۸۴/۲ ± ۱۳/۴۲           | ۹۱/۱۳ ± ۵/۸            | ۱۰              | ۵                   |
| ۸۱/۸ ± ۶/۰۶            | ۹۰/۷۵ ± ۸/۹۶           | ۷۸/۷۳ ± ۷/۶۷           | ۷۲/۴۶ ± ۳۴/۸۸          | ۱۵              |                     |

مقابل زمان تماس نشان می‌دهد. طبق این نمودار، میدان مغناطیسی درصد حذف آرسنیک را کاهش داده است. همچنین، همانطور که در نمودار دیده می‌شود در زمان تماس ۱۵ دقیقه میدان مغناطیسی توانسته است راندمان حذف آرسنیک را افزایش دهد. شکل ۷ میانگین راندمان حذف آرسنیک قبل و بعد از ستون مگنتیک را بر حسب غلظت آرسنیک  $2 \text{ mg/l}$  و در مقابل زمان تماس نشان می‌دهد. طبق این نمودار، میدان مغناطیسی درصد حذف آرسنیک را کاهش داده است.

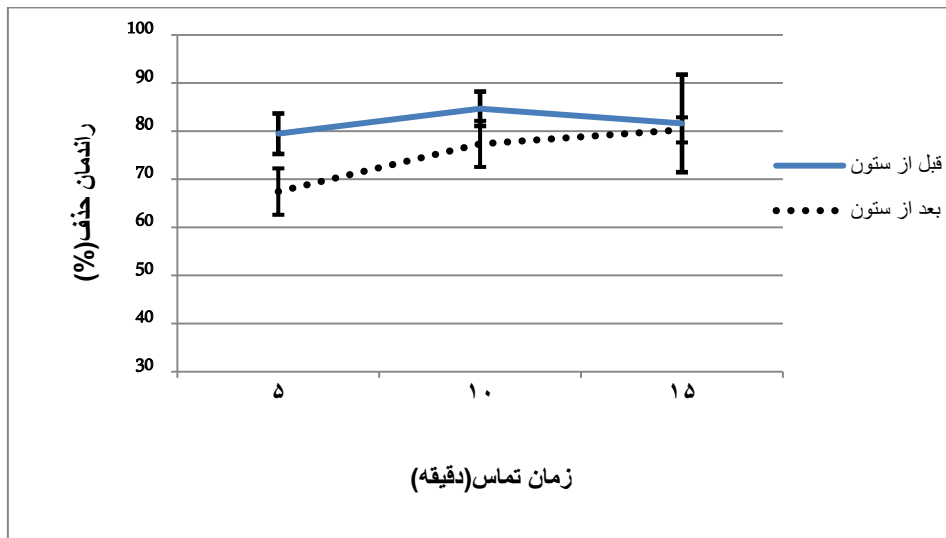
همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میدان مغناطیسی راندمان حذف آرسنیک نمونه‌های بدون براده آهن را افزایش داده است، که قبل از تأثیر میدان مغناطیسی به صورت خط ناپیوسته و بعد از تأثیر میدان مغناطیسی به صورت خط پیوسته نمایش داده شده است. شکل ۴ و ۵ کاهش میدان مغناطیسی راندمان حذف آرسنیک نمونه‌های دارای دوز براده آهن  $2/5 \text{ g/l}$  و  $5 \text{ g/l}$  را نشان می‌دهد. شکل ۶ میانگین راندمان حذف آرسنیک قبل و بعد از ستون مگنتیک را بر حسب غلظت آرسنیک  $5 \text{ mg/l}$  و در



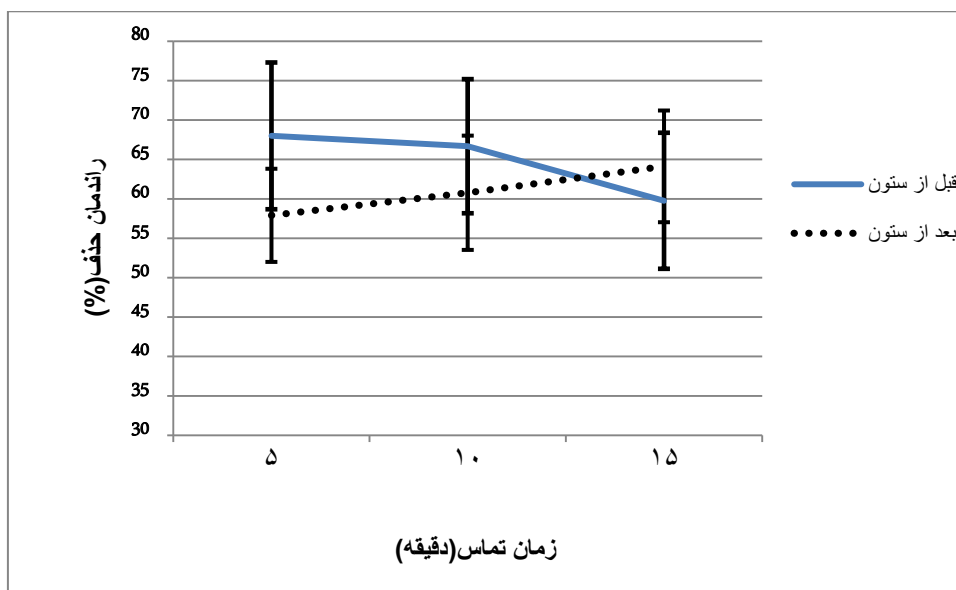
شکل ۳. میانگین راندمان حذف آرسنیک قبل و بعد از میدان مغناطیسی بر حسب دوز براده آهن  $5 \text{ g/l}$  در مقابل زمان تماس



شکل ۴. میانگین راندمان حذف آرسنیک قبل و بعد از میدان مغناطیسی بر حسب دوز براده آهن  $2/5 \text{ g/l}$  در مقابل زمان تماس



شکل ۵. میانگین راندمان حذف آرسنیک قبل و بعد از میدان مغناطیسی بر حسب دوز براده آهن ۵ g/l در مقابل زمان تماس



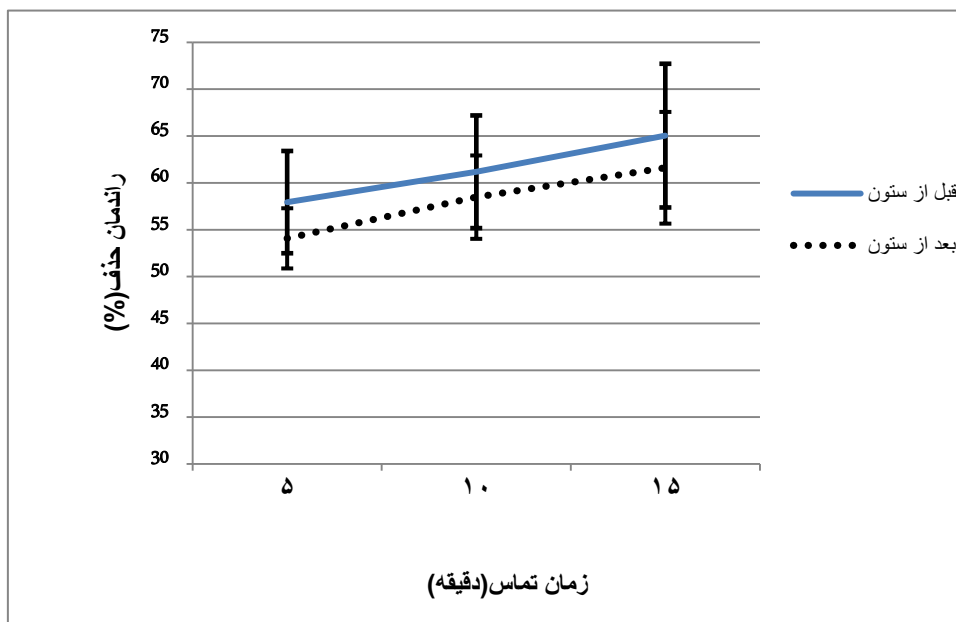
شکل ۶. میانگین راندمان حذف آرسنیک قبل و بعد از میدان مغناطیسی بر حسب غلظت اولیه آرسنیک ۰/۵ mg/l در مقابل زمان تماس

به ترتیب ۷/۵۹، ۸/۹۵ و ۱۰/۵۲ mS/cm بود و در غلظت اولیه آرسنیک ۲ این مقادیر ۹/۸۳، ۱۰/۷۹ و ۱۲/۳۹ mS/cm گزارش شد. همچنین، در دوز براده آهن ۵ و در غلظت اولیه آرسنیک ۰/۵ و در زمان های تماس ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه هدایت الکتریکی به ترتیب ۱۱/۹۹، ۱۲/۹۳ و ۱۳/۱۲ mS/cm و در غلظت اولیه آرسنیک ۲ این مقادیر ۱۴/۵۵، ۱۵/۵۶ و ۱۵/۹۵ mS/cm بود. به علاوه، در دوز

نتایج مربوط به هدایت الکتریکی نشان داد که با افزایش غلظت اولیه آرسنیک و دوز براده آهن هدایت الکتریکی افزایش یافت. همچنین، هدایت الکتریکی نمونه ها با عبور از ستون مگنتیک افزایش یافت. به علاوه، با افزایش زمان تماس هدایت الکتریکی مشاهده شد. در دوز براده آهن ۰ g/l و در غلظت اولیه آرسنیک ۰/۵ و در زمان های تماس ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه هدایت الکتریکی

نتایج آنالیز آماری آزمون جفت شده T و آنالیز واریانس یک طرفه یا معادل ناپارامتری نشان داد که میزان افزایش درصد حذف آرسنیک با افزایش دوز براده آهن از نظر آماری معنادار بود ( $P < 0/001$ ). همچنین، اثر متقابل غلظت اولیه آرسنیک و براده آهن بر تغییرات راندمان حذف آرسنیک ( $P < 0/013$ )، اثر متقابل زمان تماس، غلظت اولیه آرسنیک و دوز براده آهن بر تغییرات راندمان حذف آرسنیک ( $P < 0/011$ )، اثر غلظت اولیه آرسنیک و دوز براده آهن بر تغییرات هدایت الکتریکی ( $P < 0/000$ )، اثر زمان تماس بر تغییرات هدایت الکتریکی ( $P < 0/000$ )، اثر متقابل زمان تماس و غلظت اولیه آرسنیک ( $P < 0/049$ )، زمان تماس و دوز براده آهن بر تغییرات هدایت الکتریکی ( $P < 0/002$ ) و ارتباط بین میدان مغناطیسی و هدایت الکتریکی ( $P < 0/000$ ) معنادار مشاهده شد.

براده آهن 0 g/l و در غلظت اولیه آرسنیک 0/5 و در زمان‌های تماس 5، 10 و 15 دقیقه هدایت الکتریکی نمونه‌های قبل از ستون مگنتیک به ترتیب 7/25، 8/29 و 9/75 mS/cm و بعد از ستون مگنتیک 7/94، 9/61 و 11/29 mS/cm و در غلظت اولیه آرسنیک 2 قبل از ستون 9/71، 10/43 و 11/8 mS/cm و بعد از ستون 9/95، 11/15 و 12/97 mS/cm گزارش شد. همچنین، در دوز براده آهن 5 و در غلظت اولیه آرسنیک 0/5 و در زمان‌های تماس 5، 10 و 15 دقیقه هدایت الکتریکی نمونه‌های قبل از ستون به ترتیب 11/17، 12/37 و 14/22 mS/cm و بعد از ستون 12/62، 13/5 و 14/95 mS/cm بوده است. همچنین، در دوز براده آهن 5 و در غلظت اولیه آرسنیک 2 و در زمان‌های تماس 5، 10 و 15 دقیقه هدایت الکتریکی نمونه‌های قبل از ستون به ترتیب 12/76، 13/53 و 14 mS/cm و بعد از ستون 16/33، 17/6 و 18/9 mS/cm گزارش شد.



شکل ۷. میانگین راندمان حذف آرسنیک قبل و بعد از میدان مغناطیسی بر حسب غلظت اولیه آرسنیک 2 mg/l در مقابل زمان تماس

(جدول ۱). راندمان حذف در زمان‌های تماس 5، 10 و 15 دقیقه به ترتیب 31/26، 35/46 و 38/06 بود (جدول ۱). نتایج بیانگر آن بود که با افزایش زمان اختلاط میزان حذف

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

##### ۱.۴. اختلاط

اختلاط نمونه‌ها موجب کاهش غلظت آرسنیک شد

### ۳.۴. دوز براده آهن

بر اساس نتایج، با افزایش دوز براده آهن راندمان حذف آرسنیک افزایش یافت (جدول ۱). با افزایش دوز براده آهن مکان‌ها و سطوح جذب افزایش می‌یابد. در نتیجه واکنش میان یون آرسنیت با هیدروکسید فریک بیشتر اتفاق می‌افتد. Tyrovola و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که با افزایش دوز براده آهن راندمان حذف یون آرسنیت افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که باقی‌ماندن رنگ زرد متمایل به قرمز ناشی از براده‌های آهن پس از اتمام واکنش بیانگر آن است که غلظت آهن باقیمانده در نمونه بیش از حد مجاز یعنی  $0.3 \text{ mg/l}$  است که از معایب این روش به حساب می‌آید. البته، چون فلز آهن سمی نیست و جایگزین شبه‌فلز بسیار سمی آرسنیک می‌شود، این مسئله چندان نگران‌کننده نیست. همچنین، در مطالعات آینده می‌توان برای حذف آرسنیک از آب آشامیدنی براده آهن را در دوز کمتری به کار برد.

### ۴.۴. زمان تماس

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، به‌طور کلی با افزایش زمان تماس، عمل واجذب در زمان‌های مختلفی رخ می‌دهد. در نمونه‌های با غلظت آرسنیک و براده آهن بالا، به دلیل محل‌های هیدروکسید فریک روی براده آهن و در نتیجه جذب بیشتر، عمل واجذب در زمان‌های طولانی‌تری رخ داد. در عمل واجذب، یون‌های آرسنیت که دارای بار منفی است و در اتصال با یون‌های هیدروکسید فریک قرار دارد، در زمان‌های تماس مختلف از اکسیدهای آهن جدا می‌شود و راندمان حذف کاهش می‌یابد. Asgari و همکاران (۲۰۰۹) حذف آرسنیک با براده آهن را در زمان‌های تماس ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه بررسی کردند. نتایج حاصل از مطالعه آنها نشان داد که حداکثر راندمان حذف در زمان تماس ۳۰ دقیقه به دست آمد و واجذب در زمان تماس بیش از ۳۰ دقیقه گزارش شد.

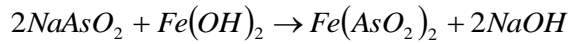
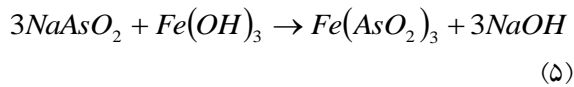
افزایش یافت. در اثر اکسایش، آرسنیت که شکل احیاشده آرسنیک است به یون آرسنات اکسید می‌شود. Lien و Wilkin (۲۰۰۵) با آنالیز براده‌های آهن بر اثر استخراج با اسید هیدروکلریک نشان دادند که تقریباً ۲۸ درصد آرسنیک به شکل آرسنات وجود داشته است که مشخص ساخت اکسایش نیز در حذف آرسنیک نقش دارد. نتایج مطالعه Bang و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد زمانی که براده آهن در شرایط بدون اکسیژن با محلول‌های آرسنیک واکنش داد، میزان حذف آرسنیت نسبت به آرسنات بیشتر بود و وقتی محلول‌ها در تماس با هوا قرار گرفت، میزان حذف آرسنات و آرسنیت خیلی بیشتر از شرایط آنوکسیک بود و آرسنات سریع‌تر از آرسنیت حذف شد. حذف سریع آرسنات و آرسنیت به دلیل جذب به وسیله هیدروکسیدهای فریک تشکیل شده روی براده آهن در اثر اکسایش آهن صفر ظرفیتی بود. Leupin و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که در اثر اختلاط نمونه‌های دارای آهن و آرسنیک، آرسنیک سه ظرفیتی هم‌زمان با اکسایش یون فروس آزاد شده و ناشی از خوردگی آهن اکسید شده بود و یون‌های فریک و آرسنات در محلول تشکیل شد.

### ۲.۴. غلظت اولیه آرسنیک

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه آرسنیک راندمان حذف آرسنیک کاهش یافت (جدول ۱). با کاهش غلظت آرسنیک نسبت جاذب (براده‌های آهن) به جذب‌شونده (آرسنیت) افزایش می‌یابد و راندمان حذف بیشتر می‌شود (Litter et al., 2010). Zhang و همکاران (۲۰۰۳) در غلظت آرسنیک  $1 \text{ g/l}$  به ظرفیت جذب  $16 \text{ mg/g}$  دست‌یافتند، در حالی که Hsing (Lien & Wilkin, 2005) در غلظت آرسنیک  $50 \text{ mg/l}$  ظرفیت جذب  $7/5 \text{ mg/g}$  را گزارش کرد. همچنین، Asgari و همکاران (۲۰۰۹) حذف آرسنیک در سه غلظت  $0.5$ ،  $1$  و  $2 \text{ mg/l}$  بررسی کردند که بیشترین راندمان حذف در غلظت  $0.5 \text{ mg/l}$  به دست آمد. در مطالعه آنها نیز بیشترین راندمان حذف آرسنیک در کمترین غلظت اولیه آرسنیک گزارش شد.



(۴)



بر اساس اثر فیزیکی-شیمیایی هال، زمانی که یون چند اتمی در داخل سیال از میان میدان مغناطیسی خارجی عبور می‌کند پیوند میان یونها ضعیف و از هم جدا می‌شود و تشکیل کاتیون و آنیون‌ها را می‌دهد (Coey & Cass, 2000). هنگامی که ذرات باردار در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، نیرویی از طرف میدان مغناطیسی بر ذره وارد می‌شود که به آن نیروی لورنتز می‌گویند (Weston et al., 2010).

بزرگی این نیرو به عوامل زیر بستگی دارد:

$$F = q \cdot V \cdot B \cdot \sin\theta \quad (۶)$$

$\sin\theta$  زاویه بین جهت حرکت اجزای باردار در سیال و خطوط میدان مغناطیسی،  $Q$  بار ذره ( $q$ )،  $V$  سرعت سیال ( $m/s$ )،  $B$  شدت میدان مغناطیسی ( $T$ ) و  $F$  نیروی لورنتز ( $N$ ) است.

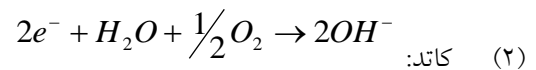
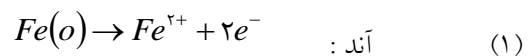
هنگامی که نمونه شاهد (دارای آرسنیت سدیم) از میان میدان مغناطیسی عبور یافت، طبق اثر هال این دو یون از هم جدا شد. در نهایت، با هیدروکسید فریک تشکیل شده روی فلز ماریپیچ واکنش داد. زمانی که یون آرسنیت فریک از میان آهن ربا عبور کرد، یونها از هم جدا شد و تحت تأثیر نیروی لورنتز قرار گرفت. آرسنیت دارای یک بار منفی و فریک دارای سه بار مثبت است، چون فریک بار بیشتری دارد نیروی بیشتری به آن وارد می‌شود و به فلز ماریپیچ داخل ستون می‌چسبد. در نتیجه، مقدار یون فریک در خروجی ستون کاهش یافت و نمونه کم‌رنگ‌تر شد. آرسنیت نیز تحت تأثیر نیروی لورنتز قرار گرفت و با فریک تشکیل شده روی فلز واکنش داد، ولی چون مقدار تفکیک یون آرسنیت فریک بیش از جذب آن بود، مقدار آرسنیت در خروجی ستون افزایش یافت. آرسنیت فریک نامحلول است و با دستگاه اندازه‌گیری نشد. وقتی که محلول‌ها از

#### ۵.۴. pH

آزمایش‌ها در این مطالعه در pH خنثی صورت گرفت، به این دلیل که pH اکثر آب‌های طبیعی در حدود pH خنثی است. برآه آهن، برخلاف دیگر جاذب‌ها، میل ترکیبی زیادی با آرسنیک در pH طبیعی آب دارد. Ramaswami و همکاران (۲۰۰۱) آرسنیت را با برآه آهن در pH ۷ با راندمان ۹۵ درصد حذف کردند. Su و Puls (۲۰۰۱) یون‌های آرسنیت و آرسنات را در pH ۷ با برآه آهن حذف و راندمان حذف ۹۹ درصد را گزارش کردند. Asgari و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که جاذب برآه آهن در حذف هر دو یون آرسنیت و آرسنات در pH حدود ۷ کارایی بالایی دارد. براساس تحقیق Weston و همکاران (۲۰۱۰) در مورد حذف آرسنیک با برآه آهن مشخص شد که در pH خنثی آهن چهار ظرفیتی نیز تشکیل می‌شود و آرسنیک بیشتری را حذف می‌کند.

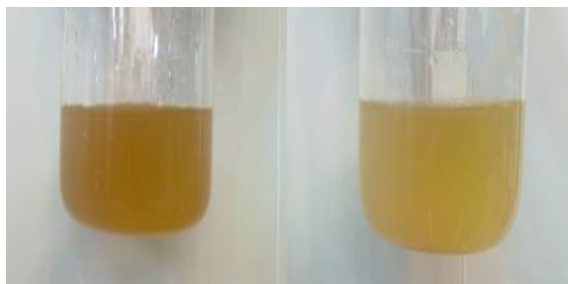
#### ۶.۴. میدان مغناطیسی

نتایج نشان داد که میدان مغناطیسی میزان آرسنیک نمونه‌های بدون برآه آهن را کاهش داد ولی مقدار آرسنیک نمونه‌های دارای برآه آهن افزایش یافت (جدول ۱ و شکل ۳ تا ۷). روی برآه‌های آهن یون هیدروکسید فریک مطابق واکنش‌های زیر تشکیل شد.

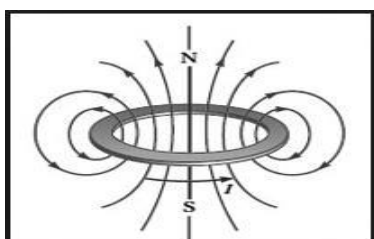


(۳)

$2\text{Fe}^{2+} + \Delta\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 \downarrow + 4\text{H}^+$   
آرسنیت سدیم ( $\text{NaAsO}_2$ ) با هیدروکسید فریک ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) واکنش و یون  $\text{Fe}(\text{AsO}_2)_3$  را روی برآه‌های آهن تشکیل می‌دهد. همچنین، یون هیدروکسید فریک نیز در محلول تشکیل شد که با آرسنیت سدیم واکنش داد و آرسنیت فریک ( $\text{Fe}(\text{AsO}_2)_2$ ) تشکیل شد (Ramaswami et al., 2001).



شکل ۸. سمت چپ، نمونه قبل از ستون؛ سمت راست، نمونه بعد از ستون



شکل ۹. خطوط میدان مغناطیسی آهن‌ربای حلقه‌ای اطراف ستون

#### ۷.۴. هدایت الکتریکی

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که میدان مغناطیسی هدایت الکتریکی را افزایش داد. هدایت الکتریکی معیاری از توان آب برای هدایت جریان الکتریکی است. این ویژگی با کل غلظت مواد یونیزه شده در آب مرتبط است. املاح در آب تفکیک می‌شود و به صورت یون باردار درمی‌آید. آب به علت داشتن همین یون‌های باردار است که هادی الکتریسیته است و جریان را از خود عبور می‌دهد. هر اندازه مقدار تفکیک املاح بیشتر باشد، جریان بیشتری از آب عبور می‌کند و بر عکس هر قدر املاح کمتر دیسوسیه (تفکیک) شود، مقدار هدایت جریان کمتر خواهد بود (Twort et al., 2000). یون‌های محلول وقتی در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد دیسوسیه می‌شود و محلول دارای یون‌های بیشتری می‌شود در نتیجه هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. Ma و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که هدایت الکتریکی نمونه‌های قبل و بعد از میدان مغناطیسی بر حسب  $\mu\text{S}/\text{m}$  به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۲۷ است. همچنین، Coey و Cass (۲۰۰۰) در زمینه تصفیه آب با

میان ستون عبور داده شد، آرسنیت از فریک جدا شد و به شکل محلول درآمد که قابل اندازه‌گیری بود.

Ma و همکاران (۱۹۹۸) با ته‌نشینی به کمک سولفید شدن در میدان مغناطیسی آرسنیک را حذف کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که میدان مغناطیسی پیوند میان یون‌ها را تضعیف می‌کند. در تحقیق آن‌ها سرعت سیال  $2 \text{ mm/s}$  و شدت میدان مغناطیسی  $0.4 \text{ T}$  بود. Weston و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر میدان مغناطیسی را بر یون‌های موجود در سیال در حال حرکت بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که نیروی وارد شده از طرف میدان مغناطیسی طبق قاعده اورستد، عمود بر جهت میدان مغناطیسی است و بر گونه‌های پارامگنتیک مثل یون‌ها و عوامل خنثی وارد می‌شود. Madsen (۱۹۹۵) تأثیر میدان مغناطیسی روی ترکیب بعضی نمک‌های معدنی را بررسی کرد. نمک‌های معدنی در شدت میدان مغناطیسی  $0.27 \text{ T}$  تسلا رسوب داد. نتایج او نشان داد که میزان هسته‌سازی و رشد کریستال در میدان مغناطیسی افزایش یافت.

Coey و Cass (۲۰۰۰) تأثیر میدان مغناطیسی را بر تشکیل رسوبات کربنات کلسیم و نوع و شکل آن را در آب آشامیدنی بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها شدت میدان مغناطیسی  $0.1 \text{ T}$  تسلا و سرعت جریان آب  $1 \text{ m/s}$  بود. نتایج این تحقیق در رابطه با مقایسه میزان تشکیل کریستال‌های آراگونیت و کلسیت در حضور میدان مغناطیسی نشان داد که میدان مغناطیسی موجب افزایش مقدار آراگونیت در رسوبات کربنات هم در آب چاه و هم در آب‌های معدنی شد و گزارش دادند این افزایش به دلیل اثر هال بود که موجب برهم‌زدن توازن آنیون‌ها و کاتیون‌ها شد. حداکثر نیروی اعمال شده به یون‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که خطوط میدان بر جهت حرکت یون‌ها عمود باشد. طبق شکل ۹، نیرو در مرکز صفر و در اطراف آهن‌ربا حداکثر است. در نتیجه، کاتیون‌ها به یک سمت و آنیون‌ها به سمت دیگری کشیده می‌شود (Weston et al., 2010).

معناداری مشاهده شد. به علاوه، با اعمال میدان مغناطیسی قوی‌تر در اطراف ستون مگنتیک می‌توان آرسنیک موجود در آب آشامیدنی را بدون اضافه کردن هرگونه ماده شیمیایی با راندمان بالا حذف کرد. محدودیت‌هایی که در این مطالعه وجود داشت شامل عدم امکان اندازه‌گیری سایر عناصر مثل آهن بود. پیشنهادهای اجرایی این تحقیق شامل استفاده از براده‌های آهن در حذف آرسنیک از آب آشامیدنی و کاربرد میدان مغناطیسی در کاهش بسیاری از آلاینده‌های معدنی آب آشامیدنی است. به این ترتیب، در آینده می‌توان با استفاده از روش‌های فیزیکی، مانند کاربرد میدان مغناطیسی، بسیاری از ترکیبات شیمیایی آب را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.

#### پیشنهادها

پیشنهادهای این مطالعه عبارت است از پیشنهادهای اجرایی شامل کاربرد میدان مغناطیسی در کاهش بسیاری از آلاینده‌های آب در نقطه مصرف در منازل، همچنین در مقیاس بزرگ مثل تصفیه‌خانه‌های آب و پیشنهادهای تحقیقاتی شامل بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر حذف آرسنیک از آب آشامیدنی در حضور یون‌های دیگر.

#### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی کاشان به دلیل حمایت مالی تشکر و قدردانی می‌شود.

میدان مغناطیسی نشان دادند که هدایت الکتریکی نمونه‌های آب چاه پس از تماس با میدان مغناطیسی با شدت ۰/۱ تسلا افزایش یافت و از ۴۰/۳ mS/m به ۶۴/۸ mS/m تغییر یافت که با نتایج حاصل از این مطالعه مطابقت داشت. نتایج این مطالعه نشان داد که در دوز براده آهن ۵ و در غلظت اولیه آرسنیک ۲ و در زمان‌های تماس ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه هدایت الکتریکی نمونه‌های قبل از ستون به ترتیب ۱۲/۷۶، ۱۳/۵۳ و ۱۴ mS/cm و بعد از ستون ۱۶/۳۳، ۱۷/۶ و ۱۸/۹ mS/cm بود. در این مطالعه، هدایت الکتریکی نمونه‌ها با هدایت‌سنج در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری و بر حسب mS/cm گزارش شد.

با توجه به آلودگی منابع آب به آرسنیک در کشورهای در حال توسعه و عدم دسترسی آن‌ها به روش‌های تصفیه پیشرفته، جاذب‌های کم‌هزینه مانند براده‌های آهن که در محل مصرف به کار می‌رود سودمند خواهد بود. براده‌های آهن غیرسمی، در دسترس و قابل استفاده مجدد است. از نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در pH طبیعی آب می‌توان آب‌های آلوده به آرسنیک را با راندمان بالا حذف کرد. از معایب کاربرد این جاذب تغییر رنگ آب است که این مشکل را می‌توان با کاهش دوز براده‌های آهن و افزایش شدت میدان مغناطیسی برطرف کرد. علاوه بر این، آنالیزهای آماری نشان داد که ارتباط معناداری هم بین غلظت اولیه آرسنیک و دوز براده آهن و هم بین متغیرهای زمان تماس، غلظت اولیه آرسنیک و دوز براده آهن وجود دارد ( $P \leq 0.05$ ). همچنین، بین میدان مغناطیسی و هدایت الکتریکی نیز ارتباط آماری

#### منابع

- Ambashta, R.D. and Sillanpää, M. 2010. Water purification using magnetic assistance: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 180(1): 38-49.
- Amiri, M. and Dadkhah, A.A. 2006. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 278(1): 252-255.
- Asgari, A., 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.

- Banejad, H. and Abdosalehi, E. 2009. The effect of magnetic field on water hardness reducing. Paper presented at the Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC.
- Bang, S., Johnson, M.D., Korfiatis, G.P. and Meng, X. 2005. Chemical reactions between arsenic and zero-valent iron in water. *Water Research*, 39(5): 763-770.
- Chen, L., Xin, H., Fang, Y., Zhang, C., Zhang, F., Cao, X., et al. 2014. Application of metal oxide heterostructures in arsenic removal from contaminated water. *Journal of Nanomaterials*, 80(23): 2-4.
- Coe, J. and Cass, S. 2000. Magnetic water treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 209(1): 71-74.
- Gholizadeh, M., Arabshahi, H. and Benam, M. 2005. The effect of magnetic field on scale prevention in the industrial boilers. *International Journal of Applied Chemistry*, 1(1): 84-89.
- Leupin, O.X., Hug, S.J. and Badruzzaman, A. 2005. Arsenic removal from Bangladesh tube well water with filter columns containing zerovalent iron filings and sand. *Environmental Science & Technology*, 39(20): 8032-8037.
- Lien, H.L. and Wilkin, R.T. 2005. High-level arsenite removal from groundwater by zero-valent iron. *Chemosphere*, 59(3): 377-389.
- Lipus, L. and Dobersek, D. 2007. Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. *Chemical Engineering Science*, 62(7): 2089-2095.
- Litter, M.I., Morgada, M.E. and Bundschuh, J. 2010. Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption. *Environmental Pollution*, 58(5): 1105-1118.
- Ma, W., Ma, W., Ma, R. and Shen, D. 1998. Arsenic removal by sulfidation sedimentation in magnetic field. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 8(3): 529-532.
- Madsen, H.L. 1995. Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts. *Journal of Crystal Growth*, 152(1): 94-100.
- Mosaferi, M., Yunesian, M., Dastgiri, S., Mesdaghinia, A. and Esmailnasab, N. 2008. Prevalence of skin lesions and exposure to arsenic in drinking water in Iran. *Science of the Total Environment*. 39(1): 69-76.
- Nagajyoti, P., Lee, K. and Sreekanth, T. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(3): 199-216.
- Ramaswami, A., Tawachsupa, S. and Isleyen, M. 2001. Batch-mixed iron treatment of high arsenic waters. *Water Research*, 35(18): 4474-4479.
- Shankar, S. and Shanker, U. 2014. Arsenic contamination of groundwater: A review of sources, prevalence, health risks, and strategies for mitigation. *The Scientific World Journal*.
- Su, C. and Puls, R.W. 2001. Arsenate and arsenite removal by zerovalent iron: kinetics, redox transformation, and implications for in situ groundwater remediation. *Environmental Science & Technology*, 35(7): 1487-1492.
- Szczęś, A., Chibowski, E., Hołysz, L. and Rafalski, P. 2011. Effects of static magnetic field on water at kinetic condition. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(1): 124-127.
- Twort, A.C., Ratnayaka, D.D. and Brandt, M.J. 2000. *Water supply*: Butterworth-Heinemann.
- Tyrovola, K., Peroulaki, E. and Nikolaidis, N.P. 2007. Modeling of arsenic immobilization by zero valent iron. *European Journal of Soil Biology*, 43(5): 356-367.

Uddin, M., Harun-Ar-Rashid, A., Hossain, S., Hafiz, M., Nahar, K. and Mubin, S. 2006. Slow arsenic poisoning of the contaminated groundwater users. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 4(3): 447-453.

Vu, K., Kaminski, M. and Nunez, L. 2003. Review of arsenic removal technologies for contaminated groundwaters: Argonne National Lab., IL (US).

Weston, M.C., Gerner, M.D. and Fritsch, I. 2010. Magnetic fields for fluid motion. *Analytical Chemistry*, 82(9): 3411-3418.

Yean, S., Cong, L., Yavuz, C., Mayo, J., Yu, W., Kan, A., et al. 2005. Effect of magnetite particle size on adsorption and desorption of arsenite and arsenate. *Journal of Materials Research*. 20(12): 3255-3264.

Zhang, Y., Yang, M. and Huang, X. 2003. Arsenic (V) removal with a Ce (IV)-doped iron oxide adsorbent. *Chemosphere*, 51(9): 945-952.