

Research Paper

مقاله پژوهشی

Investigation of Arsenic Removal from Drinking Water Using Ferric Chloride Coagulant

بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقد کننده کلورفریک

Sina Karimi¹, Hadi Ramezani Etedali^{2*} and Abbas Sotoodehnia²

سینا کریمی^۱، هادی رضانی اعتدالی^{۲*} و عباس ستوده‌نیا^۲

1- M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

*Corresponding Author, Email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

*نویسنده مسئول، ایمیل: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Received: 04/05/2021

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

Revised: 19/11/2021

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

Accepted: 09/12/2021

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Increasing urbanization and industrialization of cities have led to an increase in pollutants and the production of many toxic elements. One of these pollutants is arsenic, which is known as one of the most toxic and dangerous elements in drinking water. The aim of this study was to investigate the method of minimizing the amount of this toxic substance by coagulation and flocculation in drinking water. In order to determine the optimal conditions for arsenic removal by coagulation and flocculation methods, in the first stage, the optimal pH was determined by Jar experiment, then by selecting ferric chloride as a coagulant and lime as coagulant and also the optimal pH. The optimal amount of chemical is obtained, at the end, the residual concentration of arsenic is determined by atomic hydride absorption spectroscopy. According to the concentration of arsenic in the incoming water sample which is equal to 91 micrograms per liter The jar test was performed in two stages with chloroform coagulants, which according to the optimal pH obtained in different concentrations of coagulants and also a constant concentration of coagulants, the arsenic removal efficiency in the best case in chlorofrictor coagulants. It reached 98.3%, which is equal to 1.5 micrograms per liter, which according to the standard of the WHO (2011), 10 micrograms per liter had an acceptable result. The result of this study indicates that the coagulation and flocculation method with chloride-chloride coagulant and a constant amount of lime as a coagulant has high efficiency in arsenic removal.

افزایش شهرنشینی و صنعتی شدن شهرها موجب افزایش آلاینده‌ها و تولید عناصر سمی بسیاری شده است. یکی از این آلاینده‌ها آرسنیک است که در دسته سمی‌ترین و خطرناک‌ترین عنصرهای موجود در آب آشامیدنی قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش به حداقل رساندن میزان آرسنیک در آب آشامیدنی به روش انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از کلورفریک است. در روش انعقاد و لخته‌سازی برای حذف آلاینده موردنظر یک pH و یک مقدار بهینه وجود دارد که چه کمتر و چه بیشتر از این مقادیر بهینه باعث کاهش حذف آلاینده می‌شود. زیرا در مقدار بهینه، لجن‌های ریزتری تشکیل می‌شود. بنابراین برای تعیین شرایط بهینه حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی، در مرحله اول میزان pH بهینه به کمک آزمایش جار تعیین شد. سپس با انتخاب کلورفریک به عنوان ماده منعقدکننده و آهک به عنوان کمک منعقدکننده و هم‌چنین میزان pH بهینه، مقدار بهینه ماده شیمیایی تعیین شد. در پایان غلظت باقیمانده آرسنیک به روش طیف‌سنجی جذب اتمی هیدرید اندازه‌گیری شد. غلظت آرسنیک نمونه آب اولیه برابر با ۹۱ میکروگرم بر لیتر بود. آزمایش جار در طی دو مرحله با منعقدکننده کلورفریک صورت گرفت. در مرحله اول میزان pH بهینه ۶ و در مقدار غلظت ثابت برابر ۵ میلی‌گرم بر لیتر کلورفریک به دست آمد. در مرحله دوم با ثابت نگه داشتن مقدار pH بهینه ۶، غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر آهک به عنوان کمک منعقدکننده و تغییر غلظت کلورفریک، راندمان حذف آرسنیک در بهترین حالت به کمک ماده منعقدکننده کلورفریک با غلظت ۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر، به ۹۸/۳ درصد رسید، که برابر با ۱/۵ میکروگرم بر لیتر بود. با توجه به میزان استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۱۰ میکروگرم بر لیتر) نتیجه قابل‌قبولی را به همراه داشت. نتیجه این پژوهش بیانگر آن است که روش انعقاد و لخته‌سازی با منعقدکننده کلورفریک و میزان ثابتی از آهک به عنوان کمک منعقدکننده کارایی بالایی در حذف آرسنیک دارد.

Keywords: Arsenic, Drinking water, Coagulation and flocculation, Ferric chloride

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، آب آشامیدنی، انعقاد و لخته‌سازی، کلورفریک

است (پناهی و همکاران، ۱۳۹۱). از روش‌های متداول حذف آرسنیک از منابع آبی می‌توان به اکسیداسیون، انعقاد و لخته‌سازی، اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون، تعویض یونی، گیاه پالایی و فناوری‌های نوین با تکیه بر استفاده از نانو ذرات اشاره نمود. یافته‌ها نشان داد علی‌رغم درصد بالای حذف آرسنیک با استفاده از روش‌هایی مانند اکسیداسیون، تعویض یونی و شناورسازی با هوای محلول، این روش‌ها از لحاظ اقتصادی به‌صرفه نبوده و مدت زمان حصول به راندمان بهینه بالا است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ حسن‌زاده و استوار، ۱۳۹۸).

معمولا آرسنیک معدنی در آب به دو صورت آرسنیت ۳ ظرفیتی و آرسنات ۵ ظرفیتی وجود دارد. آرسنات یک مولکول با بار منفی بوده و حذف آرسنیک آن نسبتا ساده است. زیرا به راحتی روی سطح ذرات هیدروکسید فلزی جذب می‌شود. اما حذف آرسنیک اگر به صورت آرسنیت باشد به دلیل خنثی بودن از نظر بار الکتریکی مشکل است. بنابراین اگر آب مورد تصفیه دارای آرسنیت باشد (یا مقدار آن در حد حداکثر مجاز باشد) تصفیه باید با یک مرحله اکسیداسیون به منظور تبدیل تمام آرسنیت به آرسنات شروع شود. اکسیداسیون برای حذف آرسنیک با کاربرد کلریناسیون ساده، ازناسیون یا پرمنگنات پتاسیم قابل دستیابی است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۷).

Guo et al. (2007) برای حذف آرسنیک ۳ و ۵ ظرفیتی از سیدریت ($FeCO_3$) استفاده کردند. نتایج نشان داد ظرفیت جذب برای آرسنیک ۳ و ۵ ظرفیتی به ترتیب ۱۰۴۰ و ۵۲۰ میکروگرم بر گرم است. همچنین Goswami et al. (2012) از نانوذرات مس ۲ ظرفیتی برای حذف آرسنیک ۳ ظرفیتی استفاده کردند. نتایج نشان داد ۱ گرم از نانوجاذب می‌تواند تا ۲۰۰ میکروگرم بر لیتر آرسنیک تا ۱۰۰ درصد حذف آرسنیک را داشته باشد. همچنین در مطالعه Zade and Dharmadhikari (2007) مشخص شد Al_2O_3 از Fe_2O_3 در جذب آرسنیک مؤثرتر است.

در سیستم‌های تصفیه آب‌های سطحی با فرآیند متداول با استفاده از مواد منعقدکننده فریک یا آلوم، آرسنیک به آسانی در طول فرآیند انعقاد-ته‌نشینی حذف می‌شود (Palood, 2020). فرآیند انعقاد و لخته‌سازی به کمک مواد شیمیایی از قبیل آلوم، کلورفریک و سولفات فرو انجام شد (Kim and Nriagu, 2000). باتوجه به مطالعات انجام شده، موثرترین آن‌ها کلورفریک بود، که در این آزمایش نیز از آن استفاده شد. حذف آرسنیک با این روش به عوامل مختلفی از قبیل نوع ماده منعقدکننده، مقدار مصرفی ماده منعقدکننده، pH و غلظت اولیه آرسنیک وابسته بود (Sorg and Logsdon, 1978).

امروزه با گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت و همین‌طور پیشرفت علم و فناوری باعث افزایش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی شده است که موجب افزایش ورود آلاینده‌ها به محیط‌زیست شده است (Sarma et al., 2010). این آلاینده‌ها موجب اختلال در محیط‌زیست می‌شود. از میان این آلاینده‌ها فلزات سنگین به دلیل عدم تجزیه و همین‌طور اثرات مخرب بر روی سلامت انسان‌ها و موجودات زنده بسیار حائز اهمیت هستند (Rajkumar et al., 2010).

وجود فلزات سنگین در منابع آب به صورت طبیعی و یا بر اثر فعالیت‌های بشر صورت می‌گیرد (Hou et al., 2013). از میان فلزات سنگین، آرسنیک (As) یک عنصر بسیار سمی است که به صورت فعالیت‌های طبیعی و غیرطبیعی وارد منابع آب می‌شود (Baroni et al., 2000). برخی از این آلاینده‌ها با آلوده‌سازی محیط‌زیست وارد چرخه غذایی شده و منابع آبی را آلوده نموده‌اند. این مسئله تأثیر مستقیم بر سلامت انسان دارد که علاوه بر شیوع بیماری‌های مختلف، موجب سرطان و حتی باعث مرگ نیز می‌شوند. یکی از این آلاینده‌ها آرسنیک است که بر اثر فعالیت‌های بشری و یا طبیعی موجب آلودگی منابع آب برخی مناطق شده است (Karim, 2000).

آرسنیک شبه فلز و عنصری سمی است که مواجهه انسان با آن اغلب از طریق مصرف آب شرب است که به صورت طبیعی با آرسنیک آلوده شده باشد. آلودگی آرسنیک در آب به دلیل سمیت و مخاطره‌آمیز بودن آن، به عنوان یک مشکل اساسی در جوامع مختلف مطرح است. از زمان شناسایی مشکلات بهداشتی ناشی از حضور آرسنیک در آب آشامیدنی، تلاش‌های فراوانی توسط دانشمندان در نقاط مختلف دنیا برای حذف آرسنیک از آب شرب با استفاده از روش‌های مختلف به عمل آمده است. بررسی روش‌های حذف آرسنیک از آب آشامیدنی مهم‌ترین گام برای کاهش اثرات خطرناک آن محسوب می‌شود (پناهی و همکاران، ۱۳۹۱). بسیاری از آلاینده‌های موجود در آب برای سلامتی انسان و محیط‌زیست، مضر و سمی شناخته شده‌اند. در میان این آلاینده‌ها آرسنیک از اهمیت بیشتری برخوردار است، چرا که میلیون‌ها نفر در معرض آب آشامیدنی آلوده به آن قرار دارند. سازمان بهداشت جهانی، حد مجاز آن را کمتر از ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر (۱۰ میکروگرم در لیتر) در آب آشامیدنی مشخص کرده است. حد مجاز آرسنیک در استاندارد ۱۰۵۳ (سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۹) نیز همین مقدار گزارش شده

هدف پژوهش حاضر کاهش غلظت آرسنیک از آب آشامیدنی، با استفاده از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی در شرایط بهینه است. لذا این مطالعه سعی دارد pH بهینه و همین‌طور میزان مقدار ماده افزودنی کلرورفریک به‌عنوان مواد منعقدکننده و آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده به آب آلوده به آرسنیک تعیین شود.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه کنترل کیفیت تصفیه‌خانه شماره ۲ (کن) تهران متعلق به شرکت آب و فاضلاب استان تهران در سال ۱۳۹۹ صورت گرفت. در این پژوهش از آب طبیعی حاوی آرسنیک استفاده شد. نمونه اولیه مورد استفاده در آزمایش از چاه شماره ۲ متعلق به شرکت آب و فاضلاب تأمین‌کننده آب آشامیدنی شهر آبگرم واقع در شهرستان آوج استان قزوین تهیه شد. برای نمونه‌برداری و انجام آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی از دو ظرف پلاستیکی به حجم ۱۰ لیتر استفاده شد. ظرف‌های مورد استفاده برای نمونه‌برداری با آب شهری شسته و سپس به‌وسیله آب مقطر آب‌کشی شدند تا احتمال وجود هرگونه آلودگی از بین برود. پس از نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شد. برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر رومیتری مدل ۷۸۰ شرکت Metrohm سوئیس استفاده شد. دستگاه کدورت‌سنج مورد استفاده در این آزمایش مدل N2100 از شرکت HACH بود که قابلیت اندازه‌گیری کدورت بر اساس واحد NTU را دارا بود. برای کالیبراسیون این دستگاه از پنج محلول استاندارد استفاده شد. این دستگاه براساس استاندارد جهانی USEPA180/1 نتایج آنالیز را ارائه داد. این مدل دارای سه دتکتور بود که امکان سنجش کدورت را تا ۴۰۰۰ NTU فراهم کرد. برای اندازه‌گیری میزان آرسنیک از روش طیف‌سنجی جذب اتمی تولید هیدرید با نام اختصاری HG-AAS (Hydrid Generation Atomic Absorption Spectrometric)، عناصر به‌صورت گازهای هیدریدی وارد اتم‌ساز شد. دستگاه مورد استفاده از سری Agilent 33B AA بود.

برای پیش‌بینی شرایط انعقاد و تعیین میزان مناسب pH و مواد شیمیایی مورد نیاز برای لخته‌سازی از دستگاه جارتست استفاده شد. آزمایش جار در تصفیه‌خانه برای نشان دادن تأثیر مواد شیمیایی طراحی شده است که یک روش عمومی برای ارزیابی انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی است. دستگاه جارتست از شش ظرف شیشه‌ای (بشر) به حجم یک لیتر و هم‌زن‌های کاملاً یکسان که با یک موتور کار می‌کردند، تشکیل شد. هر هم‌زن

داخل یکی از ظرف‌ها قرارگرفت. شرایط در تمامی بشرها یکسان بود، به‌طوری که حجم نمونه اولیه تمامی بشرها یک لیتر و سرعت هم‌زن‌های قرارداده داخل بشرها نیز یکسان بود. این آزمایش یک مدل کوچک از واحدهای انعقاد سریع، انعقاد آهسته و همین‌طور ته‌نشینی در تصفیه‌خانه بود که با افزودن مواد شیمیایی پارامترهای مورد مطالعه را در مقیاس آزمایشگاهی ارزیابی کرد. آزمایش حاضر، موجب شد کاربر بتواند میزان تزریق مواد شیمیایی را هنگامی که پارامترهای شاخص کیفیت آب تغییر می‌کرد، به‌صورت تقریبی مشخص کند و نتیجه به‌دست آمده آزمایش فوق، میزان تزریق مواد شیمیایی به تصفیه‌خانه را تنظیم کرد. در این آزمایش تلاش شد تا کلیه شرایط فرآیند انعقاد و لخته‌سازی که در تصفیه‌خانه (مقیاس بزرگ) اجرا می‌شد، به‌صورت آزمایشگاهی (مقیاس کوچک) شبیه‌سازی شود.

این آزمایش برای دستیابی به شرایط بهینه در دو مرحله صورت گرفت، در مرحله اول برای دستیابی به pH بهینه و در مرحله دوم برای یافتن مقدار بهینه ماده منعقدکننده. مواد شیمیایی مورد استفاده در این آزمایش از شرکت مهاد مهر تجارت ایرانیان تهیه شد. مواد منعقدکننده مورد استفاده برای انجام آزمایش کلرورفریک بود و آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده مورد استفاده قرار گرفت. برای تنظیم pH نیز از اسیدکلریک ۱ نرمال و هیدروکسید سدیم ۰/۰۵ نرمال استفاده شد. در هر دو مرحله ۴ ساعت قبل از انجام آزمایش به نمونه اولیه به‌میزان ۱ ppm کلر برای تبدیل آرسنیک سه ظرفیتی به آرسنیک پنج ظرفیتی تزریق شد. تمامی مراحل انجام آزمایش جار در دمای اتاق ۲۰-۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. به‌علاوه تمام وسایل مورد استفاده در آزمایش با آب مقطر کاملاً آب‌کشی شد و تمام دستگاه‌های مورد استفاده نیز مطابق با دستورالعمل راهنمای دستگاه کالیبره شد.

در فرآیند انعقاد، pH بهینه یک پارامتر مهم محسوب می‌شود. برای شروع آزمایش ابتدا در هر یک از ظروف (بشر) یک لیتر از نمونه آب خام اضافه شد. سپس با استفاده از محلول‌های اسیدی و بازی نام برده، pH هر یک از ظرف‌های حاوی نمونه آب اولیه با فاصله یک واحد از ۴ تا ۹ تغییر داده شد. سپس مقدار ثابتی از منعقدکننده موردنظر (۵ میلی‌گرم کلرورفریک) به‌صورت مجزا به داخل شش ظرف تزریق شد. بعد از تزریق ماده، دستگاه روشن شده و هم‌زن‌ها بر روی سرعت ۱۴۰ دور در دقیقه تنظیم شد و به‌مدت دو دقیقه این شرایط برای انجام اختلاط سریع ادامه پیدا کرد. بعد از اتمام این زمان، سرعت هم‌زن‌ها به ۳۵ دور در دقیقه کاهش یافت که این روند تا مدت زمان ۱۸ دقیقه ادامه پیدا کرد

فاصله یک سانتی‌متری از سطح آب از تمامی ظرف‌ها نمونه برداشته شد تا به حداکثر کاهش غلظت آرسنیک به مقدار بهینه دسترسی پیدا شود.

۳- نتایج

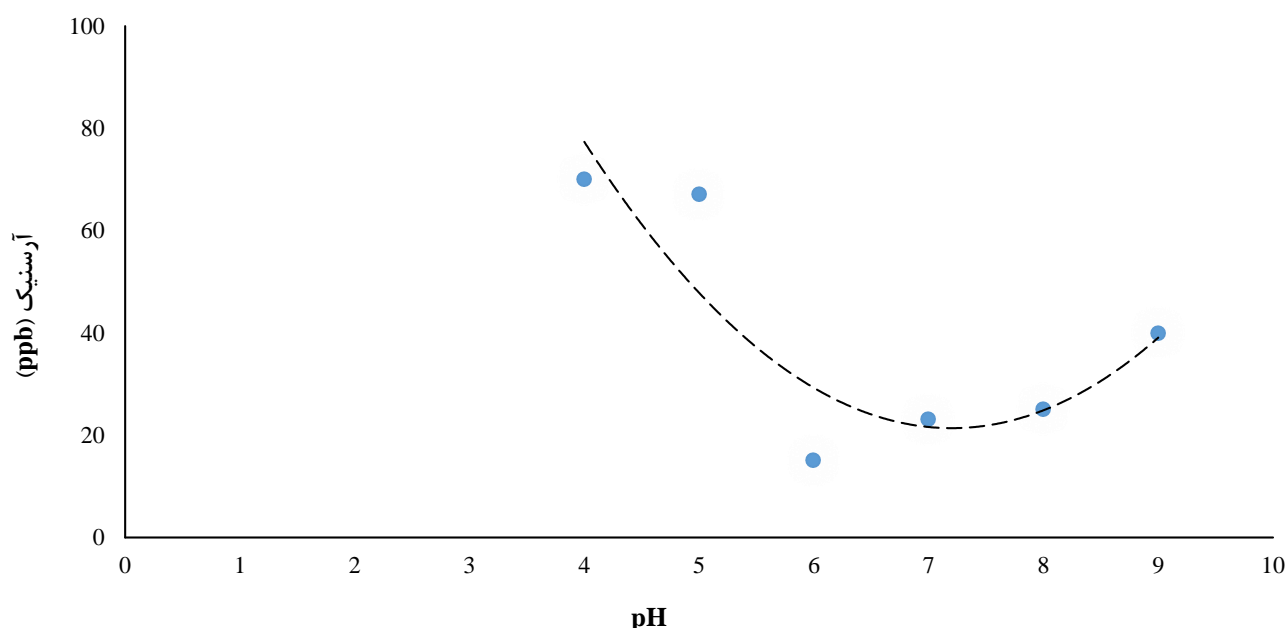
بعد از انتقال نمونه اولیه به آزمایشگاه، میزان آرسنیک، pH، هدایت الکتریکی و کدورت اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ آورده شده است. میزان آرسنیک نمونه اولیه مطابق جدول برابر ۹۱ میکروگرم بر لیتر بود که از میزان استاندارد (۱۰ میکروگرم بر لیتر) بسیار بالاتر بود.

جدول ۱- مشخصات نمونه اولیه

پارامتر	مقدار
آرسنیک (ppb)	۹۱
pH	۸/۰۴
EC (ms/cm)	۱/۷۶
کدورت (NTU)	۰/۲

۳-۱- مرحله اول آزمایش (pH بهینه)

پس از اتمام مرحله اول آزمایش (pH بهینه) با منعقدکننده کلوروفریک، آرسنیک تمامی نمونه‌ها با pH های مختلف اندازه‌گیری شد که میزان درصد حذف آرسنیک در جدول ۲ قابل مشاهده است. با توجه به جدول ۲ و شکل ۱، pH بهینه برای منعقدکننده کلوروفریک برابر ۶ با ۸۳/۵۱ درصد حذف است.



شکل ۱- نمودار رگرسیون تغییرات آرسنیک در وضعیت pH های مختلف برای منعقدکننده کلوروفریک

تا لخته‌سازی به‌طور کامل صورت‌گیرد. بعد از اتمام ۱۸ دقیقه دستگاه را خاموش کرده و ۳۰ دقیقه در حالت استراحت قرار داده تا عمل ته‌نشینی کاملاً صورت‌گیرد. پس از اتمام مدت زمان مشخص شده نمونه‌ها از عمق یک سانتی‌متری از سطح آب هر یک از ظرف‌ها به‌صورت جداگانه برداشت شد تا میزان آرسنیک باقی‌مانده در pH های مختلف اندازه‌گیری شود.

بعد از تعیین pH بهینه، مرحله دوم آزمایش شروع شد. برای شروع اندازه‌گیری مقدار بهینه مواد منعقدکننده و تأثیر کمک منعقدکننده، مقدار pH نمونه اولیه را به مقدار pH بهینه تغییر داده و نمونه آب اولیه در داخل شش ظرف قرار داده شده و تمامی هم‌زن‌ها در داخل ظرف‌ها قرار گرفت. سپس مقدار ۵ میلی‌گرم در لیتر از ماده شیمیایی (کلوروفریک) به ظرف اول مانند مرحله اول (به‌عنوان شاهد) تزریق شد و در ظرف‌های بعدی با فواصل یکسان ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر (۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷، ۷/۵) از کلوروفریک تزریق شد. بعد از تزریق کامل ماده منعقدکننده در تمامی ظرف‌ها برای افزایش راندمان حذف و جلوگیری از کاهش pH به‌دلیل اثر مواد منعقدکننده، در تمامی ظرف‌ها به اندازه ۱ میلی‌گرم در لیتر آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده تزریق شد. سپس با روشن کردن دستگاه و قرار دادن سرعت هم‌زن‌ها بر روی ۱۴۰ دور در دقیقه به مدت ۲ دقیقه، اختلاط سریع صورت‌گرفت. بعد از آن سرعت هم‌زن‌ها به ۳۵ دور در دقیقه به مدت زمان ۱۸ دقیقه کاهش یافت تا لخته‌سازی به‌خوبی انجام شود. بعد از اتمام این مدت زمان دستگاه خاموش شده و به مدت ۳۰ دقیقه برای ته‌نشینی کامل ذرات در حالت استراحت قرار داده شد. سپس از

جدول ۲- درصد حذف آرسنیک در وضعیت pHهای مختلف برای

منعقد کننده کلوروفریک

pH	درصد حذف آرسنیک
۴	۲۳/۰۷
۵	۲۶/۳۷
۶	۸۳/۵۱
۷	۷۴/۷۲
۸	۷۲/۵۲
۹	۵۶/۰۴

با توجه به جدول ۳ مقدار pH بر درصد حذف آرسنیک با استفاده از منعقد کننده کلوروفریک موثر بود و نشان دهنده معنی داری کلی مدل رگرسیون بود. مقدار آماره آزمون معنی داری مدل، همان آماره F با درجه آزادی ۱ بود. البته با توجه به سطح معناداری (p) مقدار آزمون که برابر ۰/۰۰۲ و بیشتر از ۰/۰۵ بود فرض صفر با اطمینان ۹۵ درصد تایید شد یعنی مدل موجود با اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بوده و براساس داده های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک بود.

جدول ۳- تجزیه واریانس تغییرات آرسنیک در pHهای مختلف برای منعقد کننده کلوروفریک

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	۱۰۲۶/۰۵۷	۱	۱۰۲۶/۰۵۷	۲/۳۵۶	۰/۰۰۲*
باقی مانده	۱۷۴۱/۹۴۳	۴	۴۳۵/۴۸۶		
مجموع	۲۷۶۸/۰۰۰	۵			

*معنی داری در سطح ۹۵٪

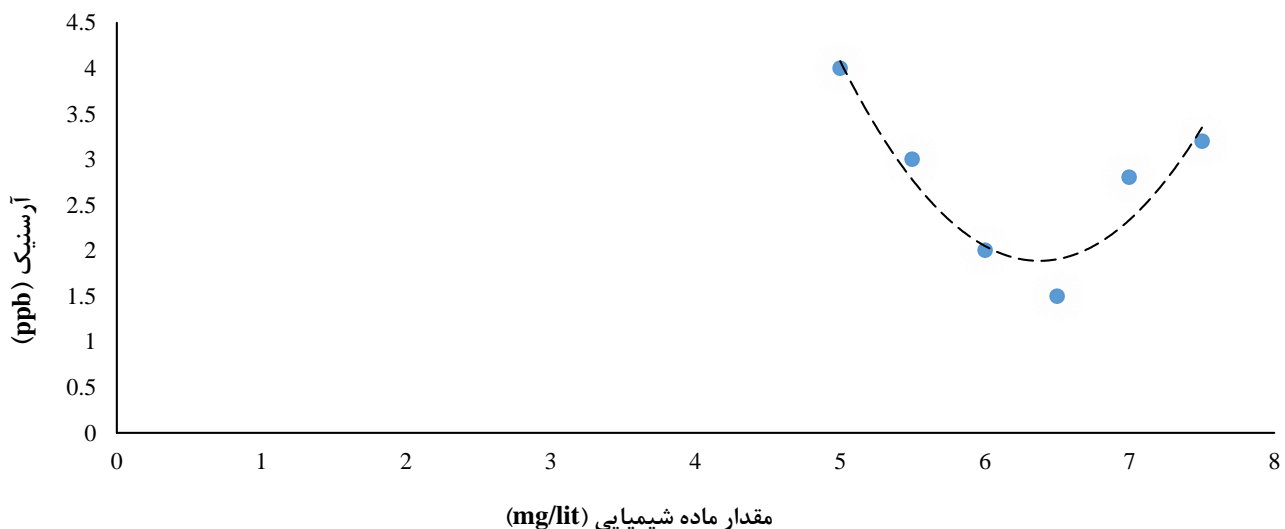
۲-۳- مرحله دوم آزمایش (مقدار بهینه)

اندازه گیری شد، که در جدول ۴ و شکل ۲ قابل مشاهده است. با توجه به جدول ۴ مقدار بهینه منعقد کننده کلوروفریک برابر ۶/۵ میلی گرم بر لیتر با ۹۸/۳۵ درصد حذف است.

بعد از دستیابی به مقدار pH بهینه، مرحله دوم آزمایش (مقدار بهینه) آغاز شد. پس از اتمام مرحله مقدار بهینه با منعقد کننده کلوروفریک، میزان آرسنیک تمام نمونه ها براساس مقدار منعقد کننده

جدول ۴- درصد حذف آرسنیک بر حسب مقادیر منعقد کننده کلوروفریک

درصد حذف آرسنیک	مقدار ماده شیمیایی (mg/lit)
۹۵/۶۰	۵
۹۶/۷۰	۵/۵
۹۷/۸۰	۶
۹۸/۳۵	۶/۵
۹۶/۹۲	۷
۹۶/۵۹	۷/۵



شکل ۲- نمودار رگرسیون تغییرات آرسنیک بر حسب مقادیر منعقد کننده کلوروفریک

تایید شد. یعنی مدل موجود با اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک است. کلرورفریک در تغییرات آرسنیک مؤثر بود.

جدول ۵ نشان دهنده معنی داری کلی مدل رگرسیون است. مقدار آماره آزمون معنی داری مدل، همان آماره F با درجه آزادی ۱ بود. البته با توجه به سطح معناداری (P) مقدار آزمون برابر ۰/۰۴۱۰ بود که بیشتر از ۰/۰۵ است. فرض صفر با اطمینان ۹۵ درصد

جدول ۵- جدول تجزیه واریانس تغییرات آرسنیک بر حسب مقادیر منعقدکننده کلرورفریک

Sig.	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
۰/۰۴۱۰*	۰/۵۲۳	۰/۴۴۸	۱	۰/۴۴۸	رگرسیون
		۰/۸۵۶	۴	۳/۴۲۵	باقی مانده
			۵	۳/۸۷۳	مجموع

*معنی داری در سطح ۰/۰۵

۵- مراجع

۴- بحث و نتیجه گیری

پناهی، م.، نجفی، خ.، و زارعی، م. (۱۳۹۱)، "مروری بر روش‌های حذف آرسنیک از آب‌های آشامیدنی"، ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران.

حسن‌زاده، م.، و استوار، ف. (۱۳۹۸)، مطالعه مروری روش‌های حذف آرسنیک از منابع آب، پژوهش فناوری محیط زیست، ۴(۶)، ۳۹-۴۶.

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۸۹)، مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب آشامیدنی، استاندارد ۱۰۵۳، نسخه پنجم، ۱۸ ص، قابل دسترس از طریق <http://www.isiri.org/std/1053.pdf>

سلیمانی، ا.، فرقانی، گ.، و گودرزی، ن. (۱۳۹۷)، "حذف آرسنیک از محلول‌های آبی با استفاده از نانوذرات گل قرمز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Baroni, F., Boscagli, A., Protano, G., and Riccobono, F., (2000), "Accumulation in *Achillea ageratum*, *Plantago lanceolata* and *Silene vulgaris* growing in an old Sb-mining area", *Environmental Pollution*, 109(2), 347-352.

Eisler, R., (2000), *Handbook of chemical risk assessment*, Boca Raton, CRC press.

World Health Organization (WHO), (2011), *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4th Edition. 631p. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.

Guo, H., Stüben, D., and Berner, Z., (2007), "Adsorption of Arsenic (III) and Arsenic (V) from groundwater using natural siderite as the adsorbent", *Journal of colloid and interface science*, 315(1), 47-53.

Goswami, A., Raul, P.K., and Purkait, M.K., (2012), "Arsenic adsorption using copper (II) oxide nanoparticles", *Chemical Engineering Research and Design*, 90(9), 1387-1396.

پژوهش حاضر به بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی به روش انعقاد و لخته‌سازی انجام گرفت. مواد منعقدکننده مورد استفاده آزمایش کلرورفریک بود. در روش انعقاد و لخته‌سازی برای حذف آرسنیک تعیین pH بهینه و مقدار بهینه اهمیت وجود دارد که کمتر و بیشتر از مقدار بهینه باعث کاهش حذف آلاینده می‌شود. زیرا در مقدار بهینه لجن‌های ریزتری تشکیل می‌شود. نتایج به‌دست آمده در این آزمایش به شرح زیر است:

مرحله اول آزمایش برای دستیابی به میزان pH بهینه بود. بیشترین میزان حذف در pH برابر ۶ رخ داد که درصد حذف آرسنیک برابر با ۸۳/۵۱ و مقدار باقی‌مانده آرسنیک در این pH برابر ۱۵ میکروگرم بر لیتر بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده در مرحله اول آزمایش میزان pH بهینه برابر ۶ تعیین شد.

مرحله دوم آزمایش برای دستیابی به میزان مقدار بهینه بود. بیشترین میزان حذف در مقدار ۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر با درصد حذف ۹۸/۳۵ درصد بود. مقدار باقیمانده آرسنیک در این مقدار برابر با ۱/۵ میکروگرم بر لیتر بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده در مرحله دوم آزمایش مقدار بهینه برابر با ۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر بود.

در آزمایش‌های مربوط به بررسی تغییرات آرسنیک بر حسب مقدار منعقدکننده کلرورفریک، مقدار سطح معناداری برابر ۰/۰۴۱ بوده و کمتر از ۰/۰۵ بود. در نتیجه فرض صفر با اطمینان ۹۵ درصد رد شد. یعنی مدل موجود با اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک بود. کلرورفریک در تغییرات آرسنیک مؤثر بود.

- Hou, D., He, J., Lü, C., Ren, L., Fan, Q., Wang, J., and Xie, Z., (2013), "Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 93, 135-144.
- Karim, M., (2000), "Arsenic in groundwater and health problems in Bangladesh", *Water Research*, 34(1), 304-310.
- Kim, M.J., and Nriagu, J., (2000), "Oxidation of arsenite in groundwater using ozone and oxygen", *Science of The Total Environment*, 247(1), 71-79.
- Litter, M.I., Morgada, M.E., and Bundschuh, J., (2010), "Possible treatment for arsenic removal in Latin American water for human consumption", *Environmental Pollution*, 158(5), 1105-1118.
- Rajkumar, M., Ae, N., Prasad, M.N.V., and Freitas, H., (2010), "Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction", *Trends in Biotechnology*, 28(3), 142-149.
- Sarma, H.P., Buragohain, M., and Bhuyan, B., (2010), "Seasonal variations of lead, arsenic, cadmium and aluminium, contamination of groundwater in Dhemaji district, Assam, India", *Environmental monitoring and assessment*, 170(1), 345-351.
- Smedley, P., and Kinniburgh, D., (2002), "A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters", *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-68.
- Sorg, T.J., and Logsdon, G.S., (1978), "Treatment technology to meet the interim primary drinking water regulations for inorganics: Part 2", *Journal of American Water Works Association (AWWA)*, 70, 379-393.
- Uddin, M.M., Haurun-Ar-Rashid, A.K.M., Hossain, S.M., Hafiz, M.A., and Mubin, S.H., (2006), "Slow arsenic poisoning of the contaminated groundwater users", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 3(4), 447-53.
- Zade, P.D., and Dharmadhikari, D.M., (2007), "Removal of arsenic as arsenite from groundwater/wastewater as stable metal ferrite", *Journal of Environmental Science and Health*, 42(8), 1073-1079.
- Zaw, M., Emmett, M.T., (2002), "Arsenic removal from water using advanced oxidation processes", *Toxicology Letters*, 133(1), 113-118.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.