

Research Paper

مقاله پژوهشی

Investigation of Arsenic Removal from Drinking Water Using Alum Coagulant

حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده آلوم

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

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

1- MS.c. 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: 14/12/2022

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

Revised: 09/04/2023

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

Accepted: 10/05/2023

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Increasing urbanization and industrialization of cities has 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 is 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 is determined by Jar test as 6. Then by selecting alum as coagulant, lime as coagulant and the optimal pH, the optimal amount of chemical material is obtained as 7.5 mg/lit. Determining the optimal places in the current situation can be the novelty of this paper. 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 is performed in two stages with alum coagulants. Based on 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 alum coagulants reached 88.46%, which is equal to 10 micrograms per liter, which according to the WHO, is an acceptable result. The result of this study indicates that the coagulation and flocculation method with alum coagulant and a constant amount of lime as a coagulant has a high efficiency in arsenic removal.

افزایش روزافزون جمعیت و همین‌طور تقاضای انسان برای زندگی راحت‌تر موجب استفاده بیش از حد از منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی شده و در نتیجه آن انواع عناصر سمی به محیط‌زیست وارد شده است. یکی از این عناصر سمی آرسنیک است. آرسنیک از سمی‌ترین و خطرناک‌ترین عنصرهای موجود در آب آشامیدنی شناخته می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی روش به حداقل رساندن میزان این ماده سمی به‌روش انعقاد و لخته‌سازی در آب آشامیدنی است. در روش انعقاد و لخته‌سازی برای حذف آلاینده یک مقدار بهینه از pH و ماده منعقدکننده وجود دارد که در کمتر و بیشتر از این مقادیر بهینه درصد کاهش حذف آلاینده کمتر می‌شود. به‌منظور تعیین شرایط بهینه حذف آرسنیک به‌روش انعقاد و لخته‌سازی، در مرحله اول میزان pH بهینه به کمک آزمایش جار تعیین شد و مقدار آن ۶ به‌دست آمد. سپس با انتخاب آلوم به‌عنوان ماده منعقدکننده و آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده و هم‌چنین میزان pH بهینه، مقدار بهینه ماده شیمیایی ۷/۵ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد، که تعیین نقاط بهینه در شرایط موجود را می‌توان نواوری در این تحقیق نامید. در پایان غلظت باقیمانده آرسنیک به‌روش طیف‌سنجی جذب اتمی هیدرید تعیین شد. با توجه به غلظت آرسنیک نمونه آب ورودی که برابر با ۹۱ میکروگرم بر لیتر بود، آزمایش جار در طی دو مرحله با منعقدکننده آلوم صورت گرفت. با توجه به میزان pH بهینه به‌دست آمده در غلظت‌های مختلفی از مواد منعقدکننده و هم‌چنین غلظت ثابتی از مواد کمک منعقدکننده، راندمان حذف آرسنیک در بهترین حالت با منعقدکننده آلوم به ۸۸/۴۶ درصد رسید که برابر با ۱۰ میکروگرم بر لیتر است و با توجه به میزان استاندارد سازمان بهداشت جهانی، نتیجه قابل‌قبولی است. نتیجه این پژوهش بیان‌گر آن است که روش انعقاد و لخته‌سازی با منعقدکننده آلوم و میزان ثابتی از آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده، کارایی قابل‌قبولی در حذف آرسنیک دارد و می‌تواند گزینه مناسبی برای حذف آرسنیک باشد.

Keywords: Alum, Arsenic, Coagulation and flocculation, Drinking water.

کلمات کلیدی: آرسینیک، آب آشامیدنی، انعقاد و لخته سازی، آلوم.

مزایای آن مانند راه‌اندازی ساده‌تر، بازسازی آسان‌تر و راندمان حذف بالاتر به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است (Nicomel et al., 2016). در مطالعه‌ای که توسط Ansari et al. (2017) برای حذف آرسنیک با کامپوزیت‌های مختلف بر مبنای CeO_2 انجام شد، از نانو کامپوزیت CeO_2/Fe_2O_3 برای حذف آرسنیک استفاده شد. مقدار K_F برای CeO_2 ، Fe_2O_3 و CeO_2/Fe_2O_3 براساس ایزوترم جذب فروندلیچ به ترتیب ۱/۳۱، ۱/۳۷ و ۵ به‌دست آمد که بیانگر جذب مطلوب‌تر توسط نانو کامپوزیت CeO_2/Fe_2O_3 است (Ansari et al., 2017). در این بین انعقاد و ته‌نشینی، قدیمی‌ترین روش شناخته شده برای حذف فلزات از آب است (Mólgora et al., 2013). انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و فیلتراسیون با نمک‌های فلزات و آهک جزء روش‌های مهم در حذف آرسنیک هستند. فرآیند انعقاد شیمیایی یک روش موثر برای کنترل آلاینده‌های فلزات سنگین است که می‌تواند به تنهایی یا همراه با دیگر روش‌های تصفیه آب مورد استفاده قرارگیرد (سلیمی، ۱۳۹۶). باغوند و همکاران (۱۳۹۰) به‌منظور یافتن شرایط عملیاتی بهینه برای آب‌های با سطح کدورت کم تا زیاد، سولفات آلومینیوم و کلرید فریک در pHهای مختلف و دوزهای مختلف مواد منعقدکننده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند استفاده از دوزهای پایین سولفات آلومینیوم و کلرید فریک می‌تواند کدورت‌های کم تا متوسط را به‌طور موثر کاهش دهد. در پژوهش هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) که برای حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی از آب آشامیدنی صورت گرفت، بیشترین درصد حذف آرسنیک ۷۹ درصد محاسبه شد.

Guo et al. (2006) برای حذف آرسنیک سه و پنج ظرفیتی از سیدریت ($FeCO_3$) استفاده کردند. نتایج نشان داد ظرفیت جذب برای آرسنیک سه و پنج ظرفیتی به ترتیب ۱۰۴۰ و ۵۲۰ میکروگرم بر گرم است. Goswami et al. (2012) از نانو ذرات مس دو ظرفیتی برای حذف آرسنیک سه ظرفیتی استفاده کردند. نتایج نشان داد یک گرم از نانو جاذب می‌تواند تا ۲۰۰ میکروگرم بر لیتر آرسنیک تا ۱۰۰ درصد حذف آرسنیک را داشته باشد. هم‌چنین در مطالعه Dharmadhikari and Zade (2007) مشخص شد Fe_2O_3 از Al_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. در تحقیقاتی توسط Nriagu and Kim (2000) فرآیند انعقاد و لخته‌سازی به کمک مواد شیمیایی از قبیل آلوم، کلرورفریک و سولفات فرو انجام شد که نتایج آن نشان‌داد یکی از مواد مناسب برای فرآیند انعقاد و

امروزه با توجه به آلودگی آب‌های سطحی توسط انواع آلاینده‌ها مانند صنایع، بسیاری از این آب‌ها در واقع به نوعی پساب تبدیل شده‌اند که باید با استفاده از انواع فرایندهای تصفیه آب برای استفاده به حدود کیفی موردنظر برسند. در میان این آلاینده‌ها فلزات سنگین به‌دلیل عدم تجزیه و همین‌طور اثرات مخرب بر روی سلامت انسان‌ها و موجودات زنده از اهمیت بالایی برخوردار هستند (Rajkumar et al., 2010). وجود فلزات سنگین در منابع آب به‌صورت طبیعی و یا بر اثر فعالیت‌های بشر صورت می‌گیرد (Hou et al., 2013). آب‌های سطحی ناشی از آب کشاورزی دارای نیترات، فسفات و آرسنیک هستند، به‌خصوص در مناطقی که از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در کشاورزی استفاده می‌شود (چالکش امیری، ۱۴۰۲). یکی از آلاینده‌ها آرسنیک است که بر اثر فعالیت‌های بشری و یا طبیعی موجب آلودگی منابع آب برخی مناطق شده است (Karim, 2000). آرسنیک یک شبه فلز موجود در پوسته زمین است که جزء اصلی بیش از ۲۰۰ ماده معدنی را تشکیل می‌دهد (Parmanik et al., 2016). این عنصر شبه فلزی است که برای انسان، گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها سمی است. متوسط غلظت آن در بین ۲ تا ۵ ppm است که یکی از آلاینده‌های غیر آلی آب آشامیدنی است (Baroni et al., 2000). این عنصر سمی به‌طور چشم‌گیری در قرن بیستم برای ساخت حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و مواد محافظ چوب کاربرد داشته است (Grover et al., 2010). آرسنیک غیرآلی می‌تواند در حالت‌های +۵، +۳، ۰ و -۳ ظرفیتی در واکنش‌ها وجود داشته باشد که فقط آرسنات (As^{+5}) و آرسنیت (As^{+3}) مربوط به آب آشامیدنی هستند که هر دو آن‌ها برای انسان‌ها و گیاهان سمی است (Choong Thomas et al., 2007). اثرات بهداشتی این آلاینده سمی منجر شد که سازمان بهداشت جهانی و سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا استاندارد آرسنیک در آب آشامیدنی را از ۵۰ میکروگرم بر لیتر را به ۱۰ میکروگرم بر لیتر کاهش دهد (Hu et al., 2012، Kong et al., 2017، Pio et al., 2017). براساس استاندارد آب آشامیدنی ایران، حد مجاز غلظت آرسنیک را برابر با همین مقدار تعیین نموده‌اند (Jong and Parry, 2003).

امروزه روش‌های مختلفی برای حذف آرسنیک از آب وجود دارد که شامل فرآیندهای تبادل یونی، اسمز معکوس، فرآیندهای غشایی، روش‌های شیمیایی، جاذب‌ها، سبک‌سازی با آهک، فیلتراسیون و در آخر انعقاد و لخته‌سازی است (Song et al., 2006). از میان روش‌های حذف آرسنیک فناوری جذب به‌دلیل

لخته‌سازی آلوم است، که در این آزمایش نیز از آن استفاده شد. در پژوهش حاضر با ایجاد شرایط بهینه در فرایند انعقاد و لخته سازی غلظت آرسنیک در آب آشامیدنی کاهش داده می‌شود. شرایط بهینه که نوآوری این پژوهش است با تعیین مقدار بهینه ماده افزودنی آلوم و کمک منعقدکننده آهک و PH بهینه به آب آلوده تعیین می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از آب طبیعی حاوی آرسنیک استفاده شده است. نمونه ورودی مورد استفاده در آزمایش از چاه شماره ۲ متعلق به شرکت آب و فاضلاب تأمین کننده آب آشامیدنی شهر آبرگرم واقع در شهرستان آوج استان قزوین تهیه شده است. انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه کنترل کیفیت تصفیه‌خانه شماره ۲ (کن) تهران متعلق به شرکت آب و فاضلاب استان تهران صورت گرفت. 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 شد، سپس به وسیله آب مقطر آب‌کشی شدند تا احتمال وجود هرگونه آلودگی از بین برود. پس از نمونه برداری برای اندازه گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شد. این آزمایش یک مدل کوچک از واحدهای انعقاد سریع، انعقاد آهسته و همین‌طور ته‌نشینی در تصفیه‌خانه است که می‌توان با افزودن مواد شیمیایی پارامترهای مورد مطالعه را در مقیاس آزمایشگاهی ارزیابی نمود. با استفاده از آزمایش جار، راهبر می‌تواند میزان تزریق مواد شیمیایی هنگامی که پارامترهای شاخص کیفیت آب تغییر می‌کند را به صورت تقریبی مشخص کند. با توجه به نتیجه به دست آمده از این آزمایش، میزان تزریق مواد شیمیایی به تصفیه‌خانه را می‌توان تنظیم کرد. این آزمایش برای دستیابی به شرایط بهینه در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول برای دستیابی به PH بهینه و در مرحله دوم برای یافتن مقدار بهینه ماده منعقدکننده انجام شده است. برای پیش‌بینی شرایط انعقاد و تعیین میزان مناسب PH و مواد شیمیایی مورد نیاز برای لخته‌سازی از دستگاه جارتست استفاده شده است. دستگاه جارتست از شش ظرف شیشه‌ای (بشر) به حجم یک لیتر و هم‌زن‌های کاملاً یکسان که با یک موتور کار می‌کنند، تشکیل می‌شوند. هر هم‌زن داخل یکی از ظرف‌ها قرار می‌گیرد. شرایط در تمامی بشرها یکسان است به طوری که حجم نمونه اولیه تمامی بشرها یک لیتر و سرعت هم‌زن‌های قرارداده داخل بشرها نیز یکسان است. غلظت اولیه

آرسنیک در نمونه آب ۹۱ میکروگرم بر لیتر محاسبه شد. مواد منعقدکننده مورد استفاده برای انجام آزمایش آلوم است و از آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده مورد استفاده قرار گرفته است. 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 ورودی به میزان 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 سانتی‌گراد صورت گرفت. تمام وسایل مورد استفاده در آزمایش با آب مقطر کاملاً آب‌کشی شده و تمام دستگاه‌های مورد استفاده نیز مطابق با دستورالعمل راهنمای دستگاه کالپیره شده است. در فرآیند انعقاد، برای تعیین PH بهینه که یک پارامتر مهم محسوب می‌شود، برای شروع آزمایش ابتدا در هر یک از ظروف (بشر) یک لیتر از نمونه آب خام اضافه شده است. با استفاده از محلول‌های اسیدی و بازی نام برده، PH هر یک از ظرف‌های حاوی نمونه آب ورودی (در دستگاه جارتست) با فاصله یک واحد از ۴ تا ۹ تغییر داده شده است. سپس مقدار ثابتی از منعقدکننده موردنظر (۵ میلی‌گرم آلوم) به صورت مجزا به داخل شش ظرف تزریق شده است. بعد از تزریق ماده دستگاه را روشن کرده و هم‌زن‌ها بر روی سرعت ۱۴۰ دور در دقیقه تنظیم شده است و به مدت دو دقیقه این شرایط برای انجام اختلاط سریع ادامه پیدا می‌کند. بعد از اتمام این زمان، سرعت هم‌زن‌ها به ۳۵ دور در دقیقه کاهش داده شد که این روند تا مدت زمان ۱۸ دقیقه ادامه پیدا کرد تا لخته‌سازی به طور کامل صورت گیرد. بعد از اتمام ۱۸ دقیقه دستگاه را خاموش کرده و ۳۰ دقیقه در حالت استراحت قرار داده تا عمل ته‌نشینی کاملاً صورت گیرد.

پس از اتمام مدت زمان مشخص شده نمونه‌ها را از عمق یک سانتی‌متری از سطح آب هر یک از ظرف‌ها به صورت جداگانه برداشت کرده تا میزان آرسنیک باقی‌مانده در PH‌های مختلف اندازه‌گیری شود. بعد از تعیین PH بهینه، مرحله دوم آزمایش شروع می‌شود. برای شروع اندازه‌گیری مقدار بهینه مواد منعقدکننده و تأثیر کمک منعقدکننده، مقدار PH نمونه ورودی را به مقدار PH بهینه تغییر داده و نمونه آب ورودی در داخل شش ظرف قرار داده شده و تمامی هم‌زن‌ها در داخل ظرف‌ها قرار گرفته است. سپس مقدار ۵ میلی‌گرم در لیتر از ماده شیمیایی (آلوم) به ظرف اول مانند مرحله اول (به‌عنوان شاهد) تزریق شده و در ظرف‌های آزمایش بعدی با افزایش وزن ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ از آلوم تزریق شده است. بعد از تزریق کامل ماده منعقدکننده در تمامی ظرف‌ها

سنجش کدورت را تا 4000 NTU فراهم می‌کند. برای اندازه‌گیری میزان آرسنیک از روش طیف‌سنجی جذب اتمی تولید هیدرید با نام اختصاری HG-AAS (Hydrid Generation Atomic Absorption Spectrometric)، عناصر به صورت گازهای هیدریدی وارد اتم‌ساز می‌شوند. دستگاه مورد استفاده از سری Agilent 33B AA است.

۳- نتایج

نمونه اولیه طبق استانداردهای گفته شده در ظرف تمیز به آزمایشگاه انتقال داد شد. پارامترهای، میزان آرسنیک، pH، هدایت الکتریکی و کدورت نمونه اندازه‌گیری شد. این اطلاعات در جدول ۱ آورده شده است. میزان آرسنیک نمونه اولیه برابر ۹۱ میکروگرم بر لیتر بود که از میزان استاندارد تعیین شده (۱۰ میکروگرم بر لیتر) بسیار بیشتر است.

برای افزایش راندمان حذف و جلوگیری از کاهش pH به دلیل اثر مواد منعقدکننده، در تمامی ظرف‌ها به اندازه ۱ میلی‌گرم در لیتر آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده تزریق شده است. سپس دستگاه را روشن کرده تا همانند روش تعیین pH بهینه، بهینه‌ترین مقدار ماده منعقدکننده به دست آید.

در پایان آزمایش از فاصله یک سانتی‌متری از سطح آب از تمامی ظرف‌ها نمونه برداشته تا با دستیابی به حداکثر کاهش غلظت آرسنیک به مقدار بهینه دسترسی پیدا شود. برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر رومیزی مدل ۷۸۰ شرکت Metrohm سوئیس استفاده شده است. دستگاه کدورت‌سنج مورد استفاده در این آزمایش مدل N2100 از شرکت HACH است که قابلیت اندازه‌گیری کدورت براساس واحد NTU را دارا است. برای کالیبراسیون این دستگاه باید از پنج محلول استاندارد استفاده کرد. این دستگاه بر اساس استاندارد جهانی USEPA180/1 نتایج آنالیز را ارائه می‌دهد. این مدل دارای سه دتکتور است که امکان

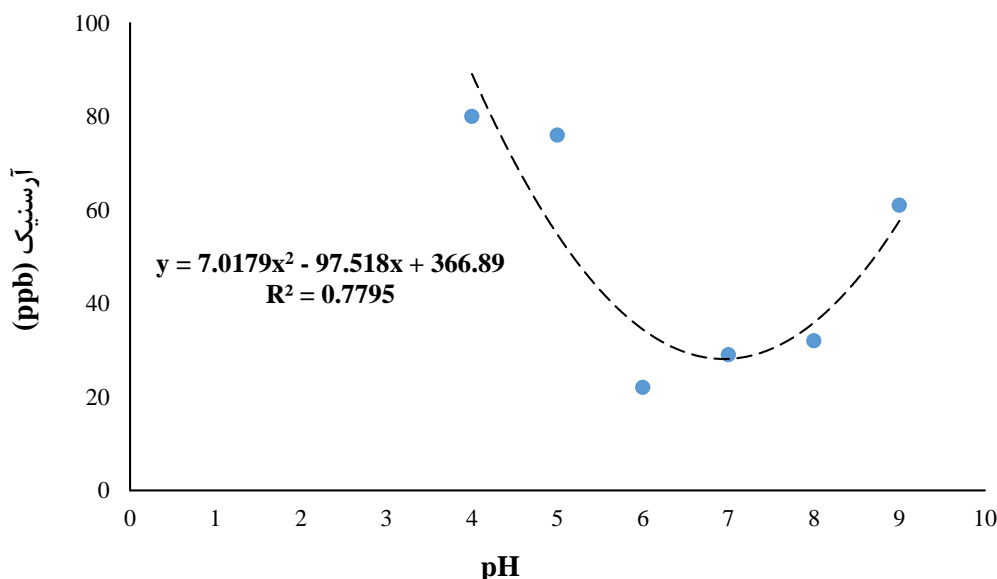
جدول ۱- مشخصات نمونه آب برداشت شده از چاه

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	آرسنیک (ppb)	۹۱
۲	pH	۸/۰۴
۳	EC (μcm)	۱۷۶۰
۴	کدورت (NTU)	۰/۲

۳-۱- مرحله اول: تعیین pH بهینه

مختلف با وجود منعقدکننده آلوم، بیشترین میزان حذف آرسنیک ۷۵/۸۲ درصد است که در میزان pH برابر با ۶ رخ داده است. پس در نتیجه pH بهینه برای منعقدکننده آلوم برابر با ۶ است.

در مرحله اول، آزمایش‌ها برای تعیین مقدار pH انجام شد. در این آزمایش مشاهده شد با توجه به تغییرات آرسنیک در pHهای



شکل ۱- تغییرات آرسنیک در pHهای مختلف برحسب منعقدکننده آلوم

جدول ۲- درصد حذف آرسنیک در pH های مختلف بر حسب منعقدکننده آلوم

pH	درصد حذف آرسنیک
۴	۱۲/۰۸
۵	۱۶/۴۸
۶	۷۵/۸۲
۷	۶۸/۱۳
۸	۶۴/۸۳
۹	۳۲/۹۶

یافته‌های جدول ۳، نشان دهنده خروجی SPSS مدنظر در این مبحث است که معنی‌داری کلی مدل رگرسیون را آزمون می‌کند. مقدار آماره آزمون معنی‌داری مدل همان آماره F با درجه آزادی ۱ است. البته با توجه به سطح معنی‌داری (p) مقدار آزمون که برابر ۰/۰۳۵ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است فرض صفر با اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود. یعنی مدل موجود با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک است. آلوم در تغییرات آرسنیک در شرایط pH بهینه موثر است.

جدول ۳- تجزیه واریانس تغییرات آرسنیک در pH های مختلف بر حسب منعقدکننده آلوم

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	۶۹۱/۴۲۹	۱	۶۹۱/۴۲۹	۱۰۸۳	۰/۰۰۳۵*
باقی مانده	۲۵۵۴/۵۷۱	۴	۶۳۸/۶۴۳		
مجموع	۳۲۴۶/۰۰۰	۵			

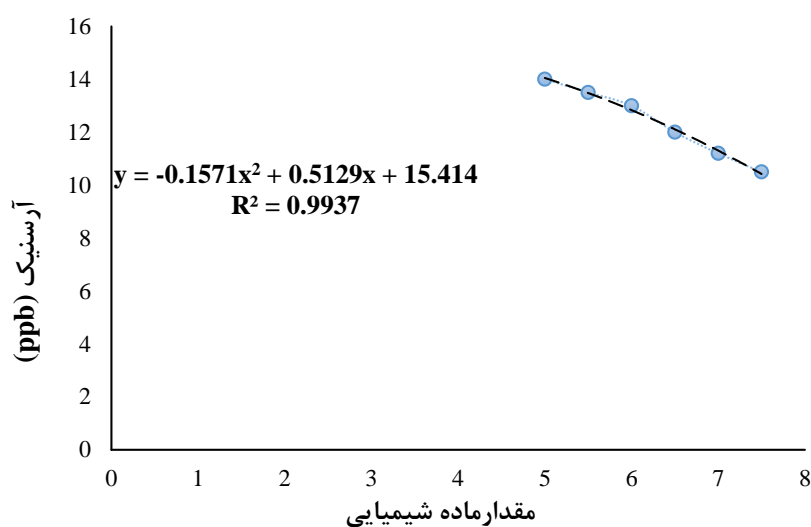
مقدار ۷/۵ میلی‌گرم بر لیتر با ۸۸/۴۶ درصد است.

۲-۳- مرحله دوم آزمایش: تعیین مقدار بهینه

مرحله پایانی برای رسیدن به شرایط بهینه در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی تعیین مقدار است. بعد از به دست آوردن pH بهینه و تغییر نمونه مورد آزمایش میزان بهینه، مقدارهای مختلفی از منعقدکننده را به سیستم اضافه کرده تا فرآیند صورت گیرد. پس از اتمام مرحله مقدار بهینه با منعقدکننده آلوم، میزان آرسنیک تمام نمونه‌ها براساس مقدار منعقدکننده اندازه‌گیری شد (جدول ۴). طبق مشاهدات با افزایش مقدار منعقدکننده آلوم درصد میزان کاهش آرسنیک نیز کاهش می‌یابد، که بیشترین میزان حذف با

جدول ۴- درصد حذف آرسنیک بر حسب مقادیر منعقدکننده آلوم

درصد حذف آرسنیک	مقدار ماده شیمیایی (mg/l)
۸۴/۶۱	۵
۸۵/۱۶	۵/۵
۸۵/۷۱	۶
۸۶/۸۱	۶/۵
۸۷/۶۹	۷
۸۸/۴۶	۷/۵



شکل ۲- تغییرات آرسنیک بر حسب واحد مقدار ماده منعقدکننده آلوم

F با درجه آزادی ۱ است. البته با توجه به سطح معنی‌داری (p) مقدار آزمون که برابر ۰/۰۰۰ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است فرض

معنی‌دار بودن مدل کلی رگرسیون داده‌های آزمون در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار آماره آزمون معنی‌داری مدل همان آماره

مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک است.

صفر با اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود یعنی مدل موجود با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این

جدول ۵- جدول تجزیه واریانس تغییرات آرسنیک بر حسب مقدار منعقدکننده آلوم

Sig.	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
.۰۰۰*	۷۳۹/۳۱۵	۹/۲۷	۱	۹/۷۱	رگرسیون
		۰/۲۹	۴	۰/۱۱۷	باقی مانده
			۵	۹/۳۳	مجموع

آزمایش برحسب مقدار منعقدکننده آلوم، سطح معنی‌داری (p) برابر ۰/۰۰۸ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است فرض صفر با اطمینان ۰/۹۵ درصد رد می‌شود. یعنی مدل موجود با اطمینان ۰/۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات pH است. در آزمایش‌های مربوط به بررسی تغییرات آرسنیک برحسب مقدار منعقدکننده آلوم، مقدار سطح معنی‌داری (p) آزمون برابر ۰/۰۰۰ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است، فرض صفر با اطمینان ۰/۹۵ درصد رد می‌شود. یعنی مدل موجود با اطمینان ۰/۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از روش انعقاد و لخته‌سازی انجام گرفت. ماده منعقدکننده مورد استفاده در آزمایش آلوم بود. در روش انعقاد و لخته‌سازی برای حذف آرسنیک تعیین pH بهینه و مقدار بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است که کمتر و بیشتر از مقدار بهینه باعث کاهش حذف آلاینده می‌شود. زیرا در مقدار بهینه لجن‌های ریزتری تشکیل شده و مقدار بیشتری آرسنیک از آب آشامیدنی حذف می‌شود. نتایج به دست آمده در مرحله اول آزمایش pH بهینه نشان داد زمانی که pH برابر ۶ باشد بیشترین کاهش در مقدار آرسنیک رخ می‌دهد. بعد از تعیین pH بهینه، مرحله دوم آزمایش یعنی مقدار بهینه ماده منعقدکننده تعیین شد. نتایج به دست آمده در این مرحله با وجود pH بهینه تعیین شد. براساس مشاهدات با افزایش مقدار منعقدکننده آلوم درصد میزان کاهش آرسنیک نیز افزایش می‌یابد، که در نتیجه آن بیشترین میزان حذف با مقدار ۷/۵ میلی‌گرم بر لیتر با درصد حذف آرسنیک ۸۸/۴۶ محاسبه شد. در نتیجه در حذف آرسنیک از آب آشامیدنی به وسیله ماده منعقدکننده آلوم نتایج قابل قبولی به دست آمد. در پژوهشی که توسط هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) برای حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی از آب آشامیدنی صورت گرفت pH بهینه برابر ۶/۴ و غلظت بهینه منعقدکننده آلوم ۱۴۱/۵۱ ppm به دست آمد که در نتیجه آن بیشترین درصد حذف آرسنیک ۷۹ درصد محاسبه شد. بذرافشان و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از عصاره دانه بنه به عنوان کمک منعقدکننده و منعقدکننده کلورفریک و pH برابر ۶ توانستند آرسنیک را تا ۹۴ درصد از آب آشامیدنی حذف کنند. در پژوهش کریمی و همکاران (۱۴۰۱) با منعقدکننده کلورفریک pH بهینه با استفاده از آزمون جار تست ۶ به دست آمد و مقدار بهینه منعقدکننده ۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر با درصد حذف ۹۸/۳۵ آرسنیک از آب آشامیدنی محاسبه شد. با توجه به آزمایش‌های مربوط به بررسی تغییرات pH بعد از

۵- مراجع

باغوند، ا.، رضازاده، نجمه، صالحی، م.، پورباور، م.، و دریابیگی، ع.، (۱۳۹۰)، "استفاده از فرایند لخته‌سازی و انعقاد در تصفیه آب آشامیدنی"، پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران.

بذرافشان، ا.، کرد مصطفی‌پور، ف.، احمد آبادی، م.، و افشارنیا، م.، (۱۳۹۴)، "بررسی کارایی عصاره دانه بنه به عنوان یک کمک منعقدکننده طبیعی در حذف آرسنیک از محیط‌های آب"، نشریه پژوهش و سلامت، ۵(۱)، ۴۲-۴۹.

چالکش امیری، م.، (۱۴۰۲)، اصول تصفیه آب، چاپ شانزدهم، نشر ارکان دانش، اصفهان.

سلیمی، ف.، (۱۳۹۶)، "مروری بر فرآیند انعقاد شیمیایی برای حذف فلزات سنگین از آب"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۴(۴)، ۵۳-۴۱.

<https://doi.org/10.22112/JWWSE.2018.91145.1033>

کریمی، س.، اعتدالی رضانی، ه.، و ستوده‌نیا، ع.، (۱۴۰۱)، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده کلورفریک"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب،

- solutes”, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 2381-2393, <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7994-1>.
- Nicomel, N.R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., and Du Laing, G., (2016), “Technologies for arsenic removal from water: Current status and future perspectives”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1), 62, <https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>.
- Mólgora, C.C., Dominguez, A.M., Avila, E.M., Drogui, P., and Buelna, G., (2013), “Removal of arsenic from drinking water: A comparative study between electrocoagulation- microfiltration and chemical coagulation-microfiltration process”, *Separation and Purification Technology*, 118, 645-651, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.08.011>.
- Pio, I., Scarlino, A., Bloise, E., Mele, G., Santoro, O., Pastore, T., and Santoro, D., (2015), “Efficient removal of low- arsenic concentrations from drinking water by combined coagulation and adsorption processes”, *Separation and Purification Technology*, 147, 284-291, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.002>.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002>.
- Song, S., Lopez-Valdivieso, A., Hernandez-campos, D.J., Peng, C., and Monroy-Fernandez, M.G., (2006), “Arsenic removal from high-arsenic water by enhanced coagulation with ferric and coarse calcite”, *Water Research*, 40(2), 364-372, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.046>.
- Street, J.J., Lindzay, W.L., and Sabey, B.R., (1977), “Solubility and plant uptake of cadmium in soils amended with cadmium and sewage sludge”, *Journal of Environmental Quality*, 6(1), 72-77, <https://doi.org/10.2134/jeq1977.0047242500060001016x>.
- World Health Organization (WHO), (2011), *Guidelines for drinking-water quality*, 4th Edition, 631 p, Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
- 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, <https://doi.org/10.1080/10934520701418565>.
- هاشمی، م.، مهدیارفر، م.، و آهنجی، ا.، (۱۳۹۵)، “بهبودسازی عوامل موثر در حذف آرسنیک از آب آشامیدنی به روش انعقاد و لخته‌سازی”، سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در شیمی و مهندسی شیمی، کنفدراسیون بین‌المللی مخترعان جهان (IFIA)، تهران.
- Ansari, R., Hassanzadeh, M., and Ostovar, F., (2017), “Arsenic removal from water samples using CeO₂/Fe₂O₃ Nanocomposite”, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13(4), 335-345.
- Baroni, F., Boscagli, A., Protano, G., and Riccobono, F., (2000), “Antimony accumulation in *Achillea ageratum*, *Plantago lanceolata* and *Silene vulgaris* growing in an old Sb-mining area”, *Environmental Pollution*, 109(2), 347-352.
- Choong, T.S., Chuah, T.G., Robiah, Y., Koay, F.G., and Azni, I., (2007). “Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: An overview”, *Desalination*, 217(1-3), 139-166.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.12.006>.
- Grover, K., Komarneni, S., and Katsuki, H., (2010), “Synthetic hydroxalite-type and hydrocalumite-type layered double hydroxides for arsenate uptake”, *Applied Clay Science*, 48(4), 631-637, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.03.017>.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.06.035>.
- Hu, C., Lio, H., Chen, G., and Qu, J., (2012), “Effect of aluminum speciation on arsenic removal during coagulation process”, *Separation and Purification Technology*, 89, 55-40, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.017>.
- Jong, T., and Parry D.L., (2003), “Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs”, *Water Research*, 37(14), 3379-3389, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00165-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00165-9).
- Karim, M., (2000), “Arsenic in groundwater and health problems in Bangladesh”, *Water Research*, 34(1), 304-310, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00128-1).
- 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, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00470-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00470-2).
- Kong, Y., Kang, J., Shen, J., Chen, Z., and Fan, L., (2017), “Influence of humic acid on the removal of arsenate and arsenic by ferric chloride: Effects of pH, As/Fe ratio, initial As concentration, and co-existing



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