

Investigating the efficiency of chloroferric and polyaluminum chloride coagulants in removing arsenic from contaminated water in the presence of different doses of coagulant aid

Tooran Aghaalizadeh^{1*}, behzad Koochi² and Mehdi Mirzamohammadi²

1- Ph.D., Water and Wastewater Company, Ardabil, Ardabil Province, Iran

2- Master's degree in organic chemistry., Water and Wastewater Company, Ardabil, Ardabil Province, Iran

*Corresponding Author, Email: T.aghalizadeh@gmail.com

Received: 05/01/2026

Revised: 15/06/2026

Accepted: 19/08/2026

Abstract

The aim of this research work is to remove total arsenic from arsenic-contaminated water. In this research work, we studied the effect of different amounts coagulant and coagulant aids (chloroferric, polyaluminum chloride, bentonite, hydrated lime, and anionic polyelectrolyte) on increasing the efficiency of arsenic removal from arsenic-contaminated water. Jarrest was used to predict coagulation conditions, determine the appropriate pH, and the amount of chemicals required for flocculation. Atomic absorption spectrometry equipped with a graphite furnace and tube was used to measure arsenic. This study was conducted on surface water samples with a concentration of 86 mg/l. By examining different conditions of coagulants, coagulant aid, pH change, and perchlorine, we succeeded in removing arsenic by about 95% from arsenic-contaminated water and obtained the most optimal conditions (pH = 7.5, perchlorine = 7.5 ppm, ferric chloride = 21 ppm, bentonite = 2 ppm, hydrated lime = 2 mg/l, and polyelectrolyte = 0.03 ppm).

Keywords: arsenic, contaminated water, chlorferric, bentonite, perchlorine.

بررسی کارایی منعقد کننده های کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک از آب آلوده در حضور غلظت های مختلف کمک منعقد کننده

توران آقاعلیزاده^{۱*}، بهزاد کوهی^۲، مهدی میرزا محمدی^۲

ایمیل نویسنده مسئول *: T.aghalizadeh@gmail.com

۱- دانش آموخته دکتری، شرکت آب و فاضلاب استان اردبیل، اردبیل، ایران.

۲- کارشناس ارشد شیمی آلی، شرکت آب و فاضلاب استان اردبیل، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

چکیده

هدف از این کار تحقیقاتی حذف آرسنیک کل از آب های آلوده به آرسنیک است. در این کار تحقیقاتی، ما تاثیر مقدار مواد منعقد کننده و کمک منعقد کننده مختلف (کلروفریک، پلی آلومینیوم کلراید، بنتونیت، آهک هیدراته و پلی الکترولیت آنیونی) را در افزایش راندمان حذف آرسنیک از آب آلوده به آرسنیک مورد مطالعه قرار دادیم. برای پیش بینی شرایط انعقاد، تعیین میزان مناسب pH و مقدار مواد شیمیایی مورد نیاز برای لخته سازی از آزمون جارتست استفاده شد. برای اندازه گیری مقدار آرسنیک از روش طیف سنجی جذب اتمی مجهز به کوره و تیوب گرافیتی استفاده شد. این مطالعه بر روی نمونه های آب سطحی با غلظت ۸۶ میلی گرم بر لیتر انجام گرفت. ما با بررسی شرایط مختلف مواد منعقد کننده، کمک منعقد کننده، تغییر pH و پرکلرین، موفق شدیم آرسنیک را حدود ۹۵ درصد از آب آلوده به آرسنیک حذف کرده و بهینه ترین شرایط (pH = ۷/۵، پرکلرین = ۷/۵ ppm، کلروفریک = ۲۱ ppm، بنتونیت = ۲ ppm، آهک هیدراته = ۲ میلی گرم بر لیتر و پلی الکترولیت = ۰/۰۳ ppm) را بدست آوریم.

کلمات کلیدی: آرسنیک، آب آلوده، کلروفریک، بنتونیت، پرکلرین

۱- مقدمه

آب به عنوان یک جزء ویژه از خلقت و منبع حیات، مدت‌هاست چنان جزئی جدایی ناپذیر از وجود انسان شده است که حتی تصور ادامه زندگی بدون آن امکان پذیر نیست. با این حال، همان آبی که به انسان‌ها حیات می‌بخشد. ممکن است آنها را بکشد و این امر به طور عمده به دلیل مداخله انسان و آلودگی آب اتفاق می‌افتد (Nasiri et al., 2022b; Nasiri et al., 2023; Pezeshki et al., 2022a). با افزایش نرخ رشد جمعیت جهانی، پیشرفت‌های علمی و به دنبال آن رشد فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، آلودگی آب به یکی از مهمترین نگرانی‌های جهانی تبدیل شده است. با این حال، در همین زمان، منابع آب شیرین کاهش یافته و تهدیدی جدی برای سلامت عمومی محسوب می‌شود (Mohammad-Razdari and Siddique et al., 2020; Zamora-Ledezma et al., 2021; Fanaee, 2021; Ahmadi, 2022).

وجود فلزات سنگین بیش از حد مشخصی در آب آشامیدنی و جذب و تجمع آنها در بخش‌های خوراکی و غیرخوراکی گیاهان، می‌تواند منجر به مشکلات سلامتی در حیوانات و انسان‌ها شود (Sadee et al., 2025; Sadee, 2022). آرسنیک یکی از این فلزات سنگین بسیار سمی است زیرا مصرف مقدار بالای این عنصر مخرب و خطرناک است (Tseng et al., 2007; Pezeshki et al., 2023; Hasanzadeh and Ostovar, 2020; Ahmed et al., 2022; As³⁺ و As⁵⁺ دارد، اما در آب طبیعی، اشکال غالب آن اکسی‌آنیون‌های معدنی آرسنیت سه ظرفیتی (As³⁺) یا آرسنات پنج ظرفیتی (As⁵⁺) هستند (Smedley and Kinniburgh, 2002). بر اساس استاندارد آب سازمان بهداشت جهانی (WHO) و استاندارد ملی شماره ۱۰۵۳ ایران مقدار حداکثر مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی ۱۰ میکروگرم بر لیتر است، اما همه کشورهای در حال توسعه که تحت تأثیر آب‌های زیرزمینی آلوده قرار دارند، هنوز در تلاشند تا با مقدار دستورالعمل قبلی WHO یعنی ۵۰ میکروگرم در لیتر مطابقت داشته باشند (Vu et al., 2003). قرار گرفتن مزمن در معرض آرسنیک بالای ۵۰ میکروگرم در لیتر در آب آشامیدنی می‌تواند منجر به مشکلات جدی برای سلامتی شود. علائم قرار گرفتن مزمن در معرض آب‌های زیرزمینی آلوده به آرسنیک در غلظت‌های قابل توجه بالای ۵۰ میکروگرم در لیتر شامل اختلالات پوستی، قلبی عروقی، کلیوی، خونی و تنفسی است (Smedly et al., 2002). آلودگی ناشی از آرسنیک، که به عنوان یک ماده سرطان‌زای انسانی شناخته می‌شود، صدها میلیون نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد. آرسنیک معدنی یکی از عوامل اصلی ایجاد سرطان در پوست، ریه‌ها، مثانه، کبد، پروستات و کلیه‌ها در انسان است (Inam et al., 2021). بسیاری از مناطق کره زمین به این ماده آلوده هستند زیرا آرسنیک به طور طبیعی در آب و خاک وجود دارد و در اثر فعالیتهای انسانی مانند کشاورزی و معدن کاری نیز به وجود می‌آید (Sadee et al., 2025; Srivastava, 2020; Sadee, 2022; Sadee et al., 2024; Yin et al., 2017; et al., 2015). آرسنیک یک آلاینده رایج در آب سطحی و زیرزمینی است. خطرناک‌ترین مشکل در این زمینه این است که در بسیاری از مناطق جهان، آب آشامیدنی آلوده به آرسنیک است (Rahman et al., 2024). با توجه به اهمیت سلامت آب آشامیدنی و اثرات مخرب آرسنیک بر سلامتی انسان حذف آرسنیک از آب آشامیدنی یکی از مهمترین دغدغه‌های جوامع بشری است. بر همین اساس روش‌های مختلفی در زمینه کاهش یا حذف آرسنیک از آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفته است (کریمی و همکاران، 2022؛ میرشاهی و همکاران، ۲۰۲۲؛ Yin et al., 2025; Sadee et al., 2021; Inam et al., 2017; Sadee et al., 2025). در حال حاضر فناوری‌های موجود برای حذف آرسنیک شامل روش‌های رسوب شیمیایی، جذب، تبادل یونی، فیلتراسیون غشایی، گیاه‌پالایی و انعقاد الکتریکی هستند (Sarkar., 2023; Pramanik., 2026; Rahidul Hassan., 2023; Hamid et al., 2024). یکی از تکنیک‌های تصفیه آب که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش انعقاد و لخته‌سازی و حذف ذرات کلوئیدی است (Sancha., 2006). برای پیاده سازی این روش به منظور حذف آرسنیک، از ترکیباتی همچون کلرید آهن و کلرید آلومینیوم استفاده می‌شود. اضافه شدن این ترکیبات به آب باعث می‌شود در مدت زمان بسیار کوتاه و حدود یک دقیقه، ذرات و یون‌ها با بار منفی به هم متصل شده و در نهایت منجر به اتصال آرسنیک به این رشته‌ها خواهند شد. سرانجام لخته‌های ایجاد شده به کمک تجهیزات مختلف از قبیل فیلترها جمع‌آوری خواهند شد.

در این کار تحقیقاتی ما سعی کردیم تاثیر مقدار برخی مواد منعقد کننده و کمک منعقد کننده مورد استفاده در تصفیه خانه‌های آب (کلروفریک، بنتونیت، آهک هیدراته و پرکلرین) را در افزایش راندمان حذف آرسنیک کل مورد مطالعه قرار دهیم. ما توانستیم با بررسی شرایط مختلف مواد منعقد کننده و کمک منعقد کننده تا ۹۵ درصد آرسنیک را از آب آلوده به آرسنیک حذف کرده و بهینه‌ترین شرایط را بدست آوریم.

۲- مواد و روشها

نمونه‌های آلوده به آرسنیک با غلظت 86 میلی گرم بر لیتر از آب سطحی در آزمایشگاه تهیه شد. در این پژوهش از کلروفریک ۴۰ درصد، پرکلرین ۶۵ درصد، بنتونیت با مش ۴۰۰ میکرون، آهک هیدراته و پلی آکریل آمید آنیونی گرید خوراکی استفاده شد. برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر رومیزی مدل 780 شرکت Metrohm سوئیس استفاده شد. اندازه‌گیری کدورت براساس NTU با دستگاه کدورت سنج مدل 2100 از شرکت HACH انجام گرفت. برای کالیبراسیون این دستگاه از پنج محلول استاندارد استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان آرسنیک از روش طیف سنجی جذب اتمی مجهز به کوره و تیوب گرافیتی با نام اختصاری (Atomic) AAS Absorption Spectrometric، مورد استفاده قرار گرفت. برای پیش‌بینی شرایط انعقاد و تعیین میزان مناسب pH و مواد شیمیایی مورد نیاز برای لخته‌سازی از دستگاه جارتست استفاده شد. این آزمایش مدل کوچک از واحدهای انعقاد سریع، انعقاد آهسته و همین‌طور ته‌نشینی در تصفیه خانه است که با افزودن مواد شیمیایی پارامترهای مورد مطالعه را در مقیاس آزمایشگاهی می‌توان ارزیابی کرد. در این آزمایش تلاش شد تا کلیه شرایط فرآیند انعقاد و لخته‌سازی که در تصفیه خانه‌ها (مقیاس بزرگ) اجرا می‌شود، به صورت آزمایشگاهی (مقیاس کوچک) شبیه‌سازی شود. حجم نمونه مورد استفاده برای آزمون جارتست برای هر آزمایش یک لیتر است. تعداد ۷۰ نمونه در این کار تحقیقاتی مورد آزمایش قرار گرفت.

۲-۱- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقد کننده کلروفریک

به منظور تعیین مقدار بهینه برای منعقد کننده کلروفریک، برای مقادیر متفاوت از کلروفریک (۱۱ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت از نوع پلی آکریل آمید آنیونی گرید خوراکی (۰/۰۳) میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد.

۲-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید

به منظور تعیین مقدار بهینه منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید برای غلظت‌های متفاوت پلی آلومینیوم کلراید (میلی گرم بر لیتر ۴-۲۶) در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۲-۳- بررسی تاثیر pH بر راندمان حذف آرسنیک در حضور منعقد کننده کلروفریک

برای تعیین pH مناسب به منظور بررسی کارایی منعقد کننده کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در حذف آرسنیک در محدوده سه pH متفاوت (۷/۵-۸/۲ و ۷/۱) در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۲-۴- بررسی غلظت‌های متفاوت آهک هیدراته

به منظور تعیین مقدار بهینه آهک هیدراته برای مقادیر مختلف آهک هیدراته (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۲-۵- بررسی غلظت‌های متفاوت بنتونیت

به منظور تعیین مقدار بهینه بنتونیت، برای مقادیر مختلف بنتونیت (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۲-۶- بررسی ماده‌ی اکسید کننده (پرکلرین)

به منظور بررسی تاثیر اکسید کننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (میلی گرم بر لیتر ۰ و ۷/۵ و ۱۵) در مجاورت کلروفریک (میلی گرم بر لیتر ۱۲ و ۲۱)، غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۲-۷- بررسی اثر کاغذ صافی در حذف آرسنیک

برای بررسی اثر کاغذ صافی در حذف آرسنیک برای دو غلظت ۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر کلروفریک در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد. بعد از اتمام جارتست نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن ۴۰ صاف شد. مقدار آرسنیک نمونه‌ها قبل و بعد از صافی با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

بعد از تهیه نمونه اولیه ابتدا مقدار pH، کدورت، هدایت و آرسنیک نمونه اندازه‌گیری شد (جدول ۱). مطابق جدول شماره ۱ مقدار آرسنیک ۸۶ میکروگرم بر لیتر است.

جدول ۱: مشخصات نمونه اولیه

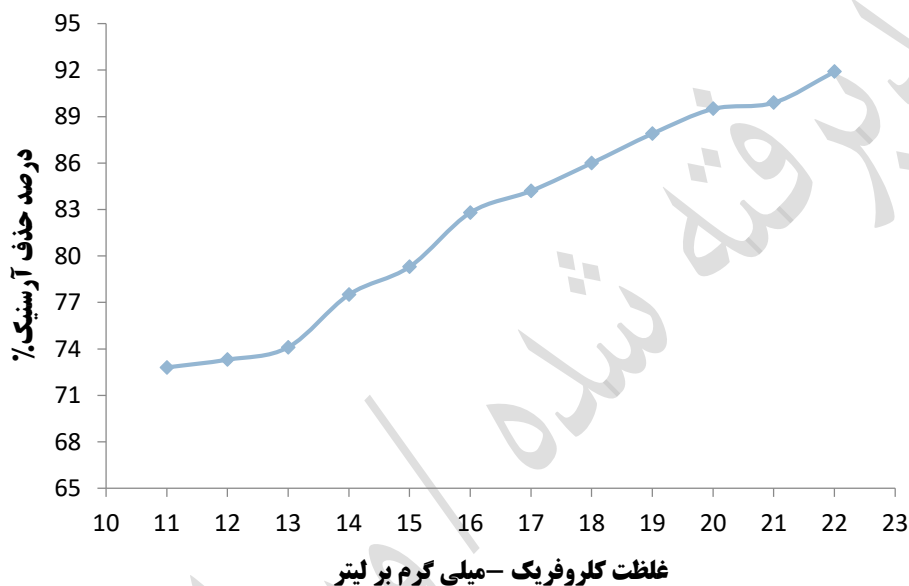
پارامتر	مقدار
هدایت الکتریکی ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	۷۸۵
pH	۸/۰۳
کدورت (NTU)	۶/۶
آرسنیک (ppb)	۸۶

۳-۱- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقد کننده کلروفریک

برای بررسی تاثیر غلظت‌های متفاوت منعقد کننده کلروفریک در حذف آرسنیک به نمونه غلظت‌ها متفاوت از ماده منعقد کننده کلروفریک (۱۱ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر اضافه شد و آزمون جارتست انجام گرفت. نتایج بدست آمده در جدول شماره ۲ آمده است. با توجه به جدول شماره ۲ و شکل ۱ با افزایش غلظت کلروفریک درصد حذف آرسنیک افزایش می‌یابد.

جدول ۲: بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقد کننده کلروفریک در حذف آرسنیک

۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	کلروفریک (mg/l)
۷/۳۹	۹/۰۵	۹/۴۲	۱۰/۷۹	۱۲/۵۱	۱۴/۱۲	۱۵/۴	۱۸/۵	۲۰/۱۱	۲۳/۲۱	۲۳/۹	۲۴/۳	آرسنیک (ppb)
۹۱/۹	۸۹/۹	۸۹/۵	۸۷/۹	۸۶	۸۴/۲	۸۲/۸	۷۹/۳	۷۷/۵	۷۴/۱	۷۳/۳	۷۲/۸	درصد حذف آرسنیک



شکل ۱: بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقد کننده کلروفریک در حذف آرسنیک

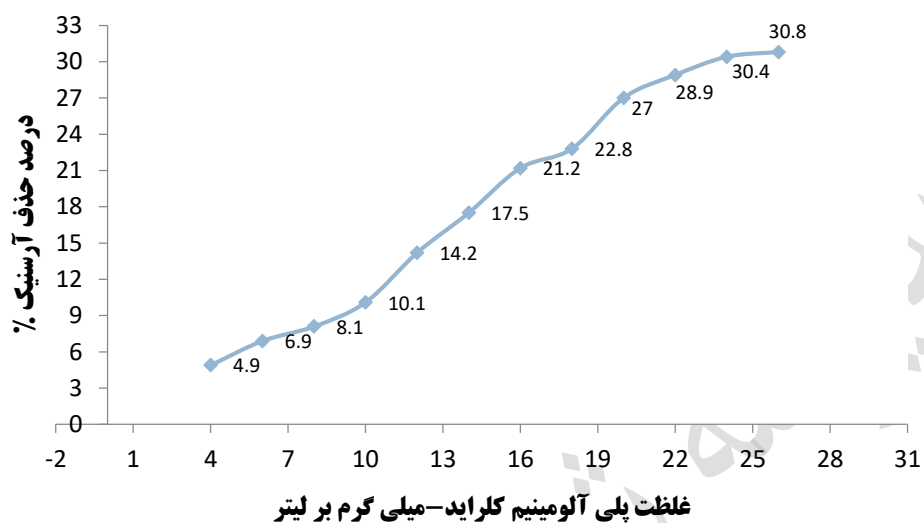
۳-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید

برای بررسی تاثیر غلظت‌های متفاوت منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک به نمونه غلظت‌های متفاوت از ماده منعقد کننده کلروفریک (۴ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر اضافه و جارتست زده شد. نتایج بدست آمده در جدول شماره ۳ آمده است. با توجه به جدول شماره ۳ و شکل ۲ با افزایش غلظت پلی آلومینیوم کلراید درصد حذف آرسنیک افزایش می‌یابد.

جدول ۳: بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک

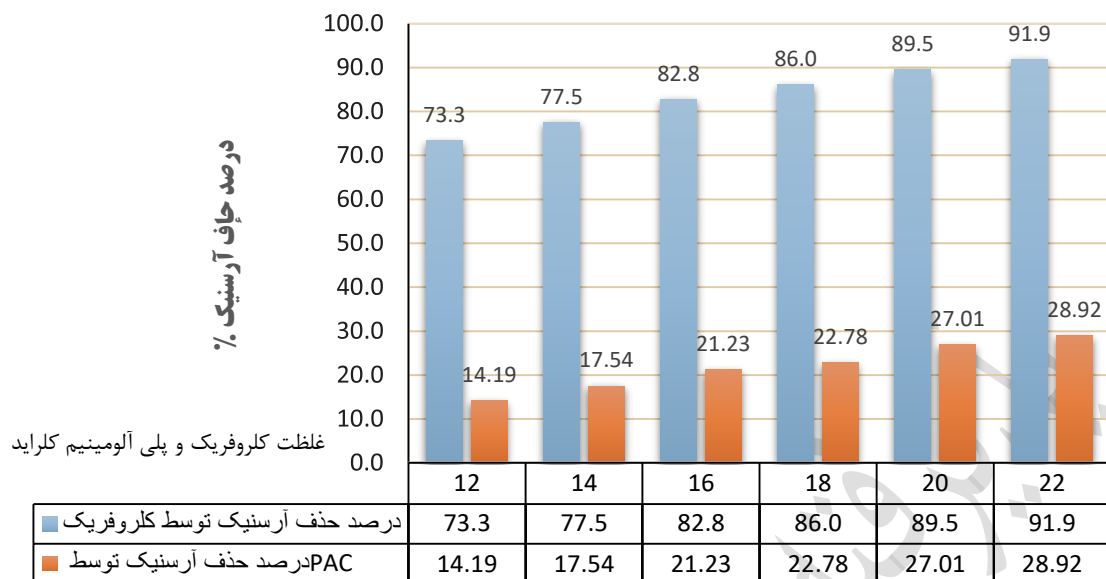
۲۶	۲۴	۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	پلی آلومینیوم کلراید (mg/l)
۶۱/۹۵	۶۲/۲۵	۶۳/۶۲	۶۵/۳۳	۶۹/۱۱	۷۰/۵	۷۳/۸	۷۶/۸	۸۰/۵	۸۲/۲۷	۸۳/۳۲	۸۵/۱۱	آرسنیک (ppb)

۳۰/۸	۳۰/۴	۲۸/۹	۲۷	۲۲/۸	۲۱/۲	۱۷/۵	۱۴/۲	۱۰/۱	۸/۱	۶/۹	۴/۹	درصد حذف آرسنیک
------	------	------	----	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	--------------------



شکل ۲: بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک

مقایسه کارایی حذف آرسنیک توسط کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید (شکل ۳) نشان می‌دهد توانایی کلروفریک در حذف آهن نسبت به پلی آلومینیوم کلراید بیشتر است. با افزایش غلظت کلروفریک تعداد ذرات و یون‌ها با بار منفی به هم متصل شده افزایش می‌یابد و در نهایت با اتصال آرسنیک به این رشته‌ها راندمان حذف آرسنیک افزایش می‌یابد. استفاده از پلی آلومینیوم کلراید به عنوان منعقد کننده به دلیل تمایل بسیار کم آرسنیک به جذب سطحی در ساختارهای پلیمری تاثیر بسیار کم در حذف آرسنیک نشان می‌دهد (شکل ۳).



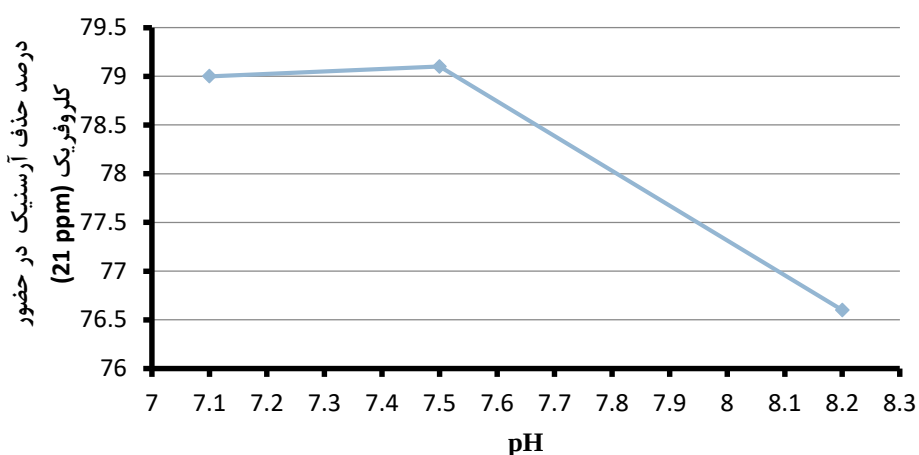
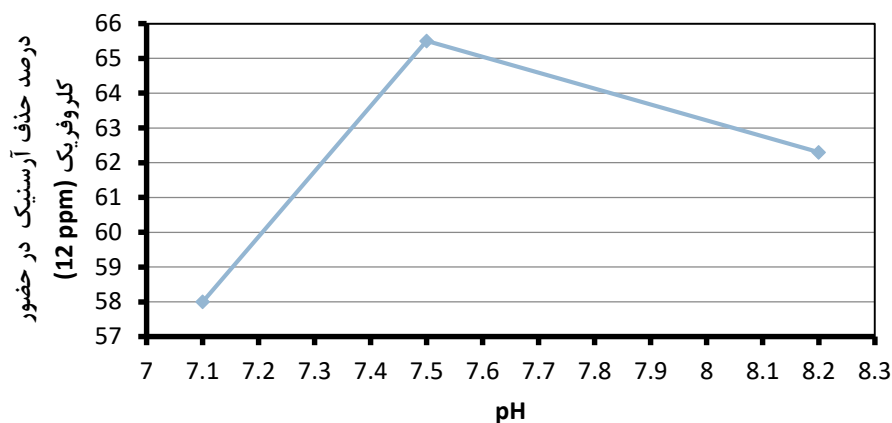
شکل ۳: مقایسه کارایی کلروفریک (FeCl_3) و پلی آلومینیم کلراید (PAC)

۳-۳- بررسی تاثیر pH بر راندمان حذف آرسنیک در حضور منعقد کننده کلروفریک

برای تعیین تاثیر pH مناسب بر راندمان حذف آرسنیک به منظور بررسی کارایی منعقد کننده کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در حذف آرسنیک در محدوده سه pH متفاوت و متداول برای آب های سطحی استان اردبیل (۸/۲ - ۷/۵ و ۷/۱) در مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب غلظت ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج بدست آمده در جدول ۴ آمده است. نتایج حاصل نشان می دهد در هر دو غلظت کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) بالاترین درصد حذف در pH= ۷,۵ بدست می آید (شکل ۴).

جدول ۴: تغییرات pH در حذف آرسنیک در حضور غلظت های ۱۲ و ۲۱ mg/l

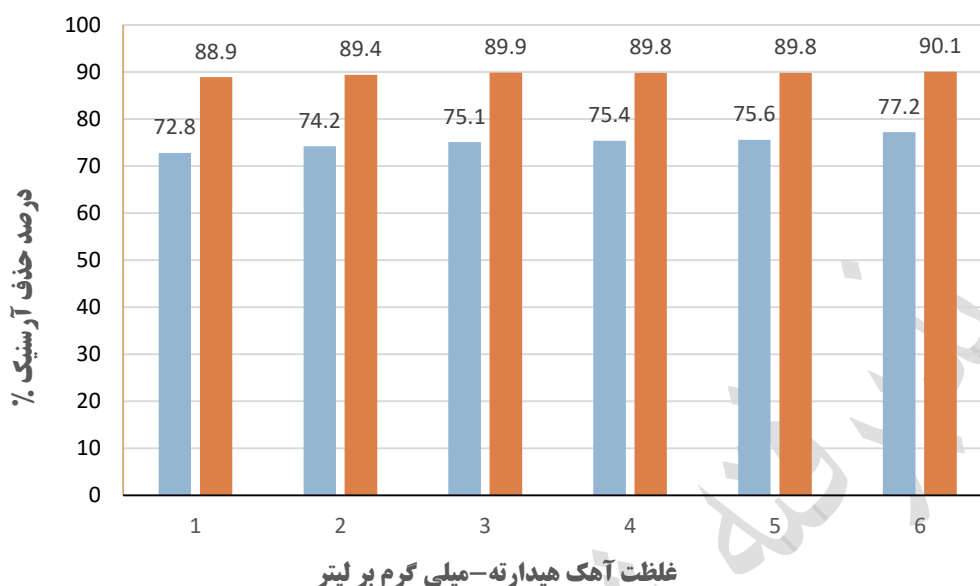
۲۱	۲۱	۲۱	۱۲	۱۲	۱۲	FeCl_3 (mg/l)
۸/۲	۷/۵	۷/۱	۸/۲	۷/۵	۷/۱	pH
۷۹	۷۹/۱	۷۹	۶۲/۳	۶۵/۵	۵۸	درصد حذف آرسنیک



شکل ۴: تغییرات pH در حذف آرسنیک در حضور غلظت های ۱۲ و ۲۱ mg/l

۳-۴- مقایسه غلظت های متفاوت آهک هیدراته در حضور منعقد کننده کلروفریک

برای تعیین مقدار مناسب آهک هیدراته بر راندمان حذف آرسنیک به منظور بررسی کارایی منعقد کننده کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) مقادیر مختلف آهک هیدراته از (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب غلظت ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج بدست آمده در شکل ۵ آمده است. نتایج حاصل نشان می دهد در هر دو غلظت کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) افزایش غلظت کمک منعقد کننده آهک هیدراته از ۱ تا ۶ تاثیر جزئی در راندمان حذف آرسنیک دارد، ولی در صورت استفاده نکردن از آهک هیدراته میزان راندمان حذف آرسنیک کاهش زیادی نشان می دهد به طوری که در آزمایش جارتست با غلظت کلروفریک ۱۲ میلی گرم بر لیتر در غیاب آهک هیدراته راندمان حذف آرسنیک ۶۶ درصد رسید.



■ درصد حذف آرسنیک در غلظت ۲۱ ppm کلروفریک ■ درصد حذف آرسنیک در غلظت ۱۲ ppm کلروفریک

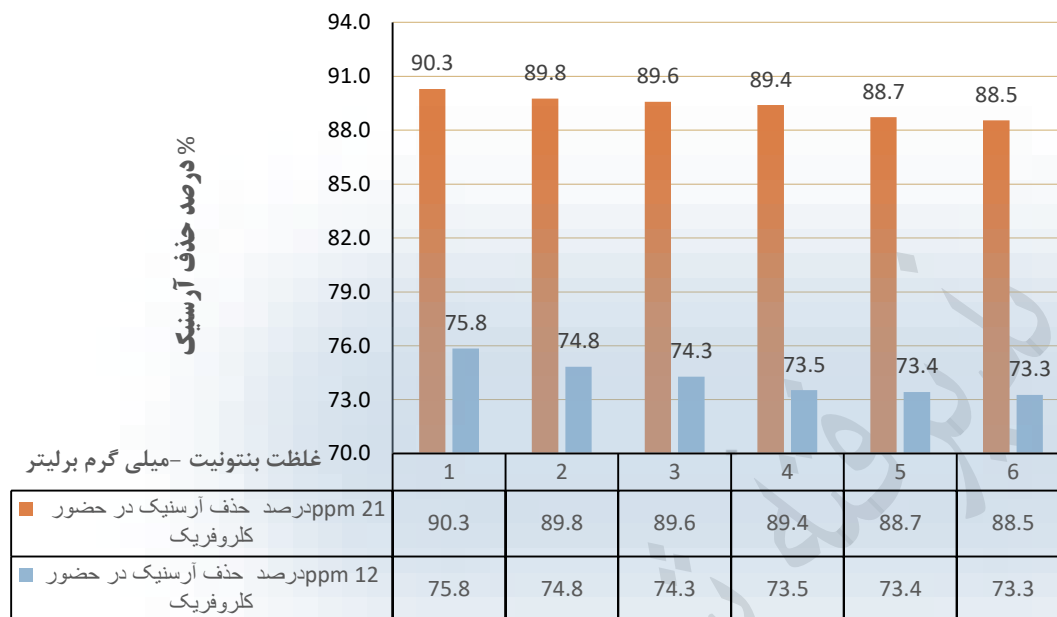
شکل (۵): تاثیر مقادیر مختلف آهک (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب (۱۲ و ۲)، و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر

۳-۵- بررسی تاثیر غلظت های متفاوت بنتونیت در حضور منعقد کننده کلروفریک در حذف آرسنیک

به منظور تعیین مقدار بهینه بنتونیت بر راندمان حذف آرسنیک برای بررسی کارایی منعقد کننده کلروفریک برای مقادیر مختلف بنتونیت (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک، آهک هیدراته و پلی الکترولیت به ترتیب (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر)، ۲، و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج بدست آمده نشان می دهد با افزایش بنتونیت مقدار آرسنیک به صورت جزئی افزایش می یابد (جدول ۵ و شکل ۶). قابل ذکر است که نتایج فوق به محلول رویی جارتست مرتبط بوده از طرفی بنتونیت در تشکیل حجم لجن تاثیر بسزایی داشته و به احتمال زیاد بعد از عبور محلول رویی از بستر لجن راندمان حذف افزایش خواهد یافت.

جدول ۵: مقایسه تاثیر غلظت های متفاوت بنتونیت (۱ تا ۶) در حضور منعقد کننده کلروفریک در حذف آرسنیک

بنتونیت (mg/l)						
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۷۳/۳	۷۳/۴	۷۳/۵	۷۴/۳	۴۸/۸	۷۵/۸	درصد حذف آرسنیک در حضور ۱۲ mg/l کلروفریک
۸۸/۵	۸۸/۷	۸۹/۴	۸۹/۶	۸۹/۸	۹۰/۳	درصد حذف آرسنیک در حضور ۲۱ mg/l کلروفریک



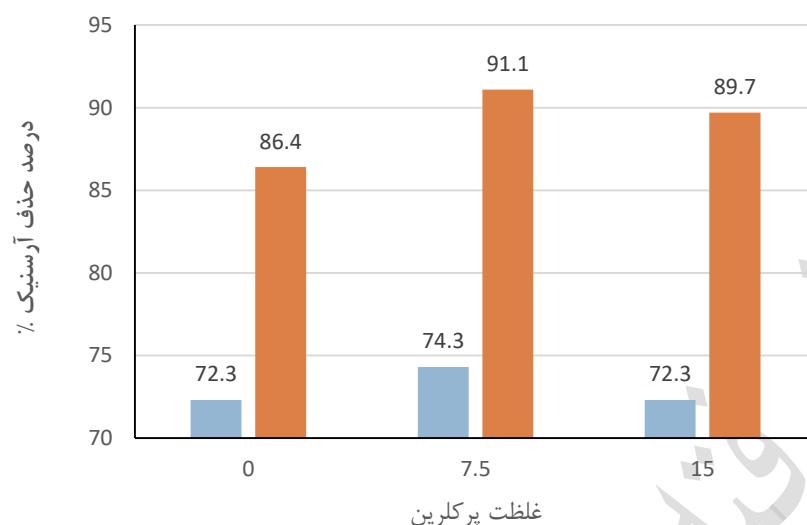
شکل ۶: مقایسه تاثیر غلظت‌های متفاوت بنتونیت (۱ تا ۶) در حضور منعقد کننده کلروفریک در حذف آرسنیک

۳-۶- بررسی ماده‌ی اکسیدکننده (پرکلرین)

با توجه به اینکه کلر به عنوان یک اکسیدکننده قوی، آرسنیک سه ظرفیتی را به آرسنیک پنج ظرفیتی تبدیل می‌کند. این تغییر شیمیایی باعث می‌شود آرسنیک به راحتی از طریق روش‌هایی مانند جذب، رسوب‌گذاری یا فیلتراسیون حذف شود. فلذا به منظور بررسی تاثیر اکسید کننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (میلی گرم بر لیتر ۰ و ۷/۵ و ۱۵) در مجاورت کلروفریک (میلی گرم بر لیتر ۱۲ و ۲۱)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد (جدول ۶ و شکل ۷). با توجه به شکل ۷ بیشترین مقدار حذف آرسنیک در حضور ۷/۵ میلی گرم بر لیتر پرکلرین حاصل شده است. که می‌توان به افزایش میزان اکسید شدن آرسنیک سه ظرفیتی به پنج ظرفیتی ارتباط داد (Sorlini and Gialdini, 2010). در غلظت‌های بالای کلر میزان اکسید شدن کاهش پیدا کرده است.

جدول ۶: بررسی تاثیر اکسید کننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (میلی گرم بر لیتر ۰ و ۷/۵ و ۱۵) در مجاورت کلروفریک (میلی گرم بر لیتر ۱۲ و ۲۱)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر

پرکلرین (میلی گرم بر لیتر)	۰	۷/۵	۱۵
ماده کواگولانت (میلی گرم بر لیتر)	۱۲	۱۲	۱۲
ماده کواگولانت (میلی گرم بر لیتر)	۲۱	۲۱	۲۱
درصد حذف آرسنیک در حضور میلی گرم بر لیتر ۱۲ کلروفریک	۷۲/۳	۷۴/۳	۷۲/۳
درصد حذف آرسنیک در حضور میلی گرم بر لیتر ۲۱ کلروفریک	۸۶/۴	۹۱/۱	۸۹/۷



درصد حذف آرسنیک در حضور 21 ppm کلروفریک (■) درصد حذف آرسنیک در حضور 12 ppm کلروفریک (■)

شکل ۷: بررسی تاثیر اکسید کننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (میلی گرم بر لیتر ۰ و ۷/۵ و ۱۵) در مجاورت کلروفریک (میلی گرم بر لیتر ۱۲ و ۲۱)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر

۷-۳- بررسی اثر کاغذ صافی در حذف آرسنیک

با توجه به اثر فرایند فیلتراسیون در تصفیه خانه‌های متعارف آب و تاثیر بسزای آن در کاهش غلظت آرسنیک، برای بررسی اثر فیلتراسیون از کاغذ صافی در حذف آرسنیک برای دو غلظت ۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر کلروفریک در مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر استفاده و جارتست زده شد. بعد از اتمام جارتست نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن ۴۰ صاف شد. مقدار آرسنیک نمونه‌ها قبل و بعد صافی با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده در جدول شماره ۷ آمده است.

جدول شماره ۷: بررسی تاثیر کاغذ صافی در حذف آرسنیک (مقادیر تزریقی آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر)

بررسی تاثیر کاغذ صافی		
۲۱	۱۲	FeCl ₃ (mg/l)
۲۴/۳	۴۰/۲	مقدار آرسنیک باقیمانده قبل از صافی (ppb)
۵/۰۵	۹/۷	آرسنیک بعد از صافی (ppb)

۴- نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی برای حذف آرسنیک از آب آلوده و بررسی تاثیر مواد منعقد کننده و کمک کننده (کلروفریک، پلی آلومینیوم کلراید، آهک هیدراته، بنتونیت) در pH های مختلف، در حضور اکسید کننده پرکلرین مورد مطالعه قرار گرفت نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش غلظت کلروفریک از ۱۱ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر کاهش قابل ملاحظه‌ای در غلظت آرسنیک باقیمانده مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج حاصله و مقدار معمول مصرف کلروفریک در تصفیه خانه‌های استان برای تعیین مقدار بهینه مواد کمک منعقد کننده، غلظت کلروفریک برای ادامه پژوهش، ۱۲ و ۲۱ (غلظت بهینه) میلی گرم بر لیتر انتخاب شد. مشاهده شد که مقدار آهک هیدراته مصرفی بر روی کاهش غلظت آرسنیک به صورت جزیی موثر بوده به طوری که با افزایش مقدار آهک هیدراته مقدار آرسنیک به طور جزیی کاهش نشان می‌دهد. افزایش غلظت بنتونیت تاثیر برعکس بر روی غلظت آرسنیک داشته و سبب افزایش جزیی غلظت آرسنیک می‌شود. استفاده از سیستم کلرزی اولیه به دلیل خاصیت اکسید کنندگی کلر تاثیر بسزایی در کاهش مقدار آرسنیک داشته به طوری که با افزایش غلظت تزریقی کلر از صفر تا ۱۵ میلی گرم بر لیتر مقدار آرسنیک کاهش بیشتری نشان می‌دهد. به طور کلی با افزایش مقدار کلروفریک در حضور کلرزی اولیه و استفاده مواد کمک منعقد کننده آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت مقدار حذف آرسنیک قابل ملاحظه است. استفاده از منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید به جای کلروفریک با وجود کاهش محسوس کدورت ولی بر روی کاهش غلظت آرسنیک به اندازه کلروفریک موثر نبوده به طوری که با افزایش مقدار پلی آلومینیوم کلراید مقدار آرسنیک کاهش کمی نشان می‌دهد. در این پژوهش با استفاده از شرایط بهینه، راندمان حذف آرسنیک از آب آلوده به این ماده حدود ۹۵ درصد بدست آمد.

۵- قدردانی

بدین وسیله نویسندگان این مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان اردبیل که شرایط و امکانات لازم برای پیشبرد این پروژه تحقیقاتی فراهم ساخت، مراتب قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

۶- مراجع

کریمی، س.، اعتدالی، ر.، هادی نیا، س.، ۱۴۰۱، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقد کننده کلروفریک"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱۷(۱)، ۵۵-۶۱.

<https://doi.org/10.22112/JWWSE.2021.284006.1271>.

میرشاهی، مجید، ایران دوست، م.، ۱۴۰۰، "بررسی کاربرد روش رویه پاسخ در بهینه سازی فرآیند انعقاد جهت حذف آرسنیک از آب" نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۴)، ۷۷-۸۶.

<https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i4.2108.1072>.

Ahmadi, A., (2022). "Evaluation of heavy metal pollution in water resources of tabriz plain using qualitative indicators", Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 15(6), 1421-31,

<https://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.6.16.6>.

Ahmed, S. F., Kumar, P. S., Rozbu, M. R., Chowdhury, A. T., Nuzhat, S., Rafa, N., Mahlia, T., Ong, H. C. and Mofijur, M., (2022), Heavy metal toxicity, sources, and remediation techniques for contaminated water and soil". Environmental Technology & Innovation, 25, 102114,

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102114>

Hasanzadeh, M., and Ostovar, F., (2020). "A review of arsenic removal methods from water resources". Journal of Environmental Research and Technology, 6(6), 39,

<https://doi.org/6.39.20.1001.1.26763060.1398.4.6.5.4>

Hamid, N.H.A., Rushdan, A.I., Nordin, A.H., Faiz Norrrahim, M.N., Muhamad, S.N.H., Tahir, M.I.H.M., Rosli, N.S.B., Pakrudin, N.H.M., Roslee, A.S., Asyraf, M.R.M. and Knight, V.F., 2024. "A review: The state-of-the-art of arsenic removal in wastewater". Water Reuse, 14(3), 279-311,

<https://doi.org/10.2166/wrd.2024.142>.

- Inam, M. A., Khan, R., Lee, K. H., and Wie, Y. M., (2021), "Removal of arsenic oxyanions from water by ferric chloride—optimization of process conditions and implications for improving coagulation performance". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 981, <https://doi.org/10.3390/ijerph18189812>.
- Mohammad-razdari, V., and Fanaee, S. A., (2021) "Comprehensive review of different types of water desalination". *Journal of Renewable and New Energy*, 8(1), 21-32, <https://doi.org/20.1001.1.24234931.1400.8.1.3.7>.
- Nasiri, A., Rajabi, S., Amiri, A., Fattahizade, M., Hasani, O., Lalehzari, A., and Hashemi, M., (2022). "Adsorption of tetracycline using CuCoFe₂O₄@ Chitosan as a new and green magnetic nanohybrid adsorbent from aqueous solutions: Isotherm, kinetic and thermodynamic study". *Arabian Journal of Chemistry*, 15(8), 104014, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104014>.
- Nasiri, A., Rajabi, S., Hashemi, M., and Nasab, H., (2022). "CuCoFe₂O₄@ MC/AC as a new hybrid magnetic nanocomposite for metronidazole removal from wastewater: bioassay and toxicity of effluent", *Separation and Purification Technology*, 296, 121366, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121366>.
- Pezeshki, H., Hashemi, M., and Rajabi, S., (2023), "Removal of arsenic as a potentially toxic element from drinking water by filtration: a mini review of nanofiltration and reverse osmosis techniques", *Heliyon*, 9(3), 14246, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14246>.
- Pramanik, S., (2026), "A suspended adsorbent filter for arsenic removal from water to address UN 2030 agenda for sustainable development", 1-31, <https://doi.org/10.31223/X5NJ3Z>.
- Rahidul Hassan, H., (2023), "A review on different arsenic removal techniques used for decontamination of drinking water". *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 35(1), 2165964, <https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2165964>.
- Rahman, M.E., Uddin, M.K., Shamsuzzaman, S.M., Mahmud, K., Abd Shukor, M.Y., Abd Ghani, S.S., Nabayi, A., Sadeq, B.M., Chompa, S.S., Akter, A. and Halmi, M.I.E.B., (2024), "Potential use of Pennisetum purpureum for phytoremediation of arsenic in treatment sand: A phytotoxicity study". *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 60, 103300, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103300>.
- Sadee, B., Foulkes, M.E. and Hill, S.J., (2015) "Coupled techniques for arsenic speciation in food and drinking water: a review". *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 30(1), 102-118, <https://doi.org/10.1039/C4JA00269E>.
- Sadee, B. A., (2022), "Determination of elements in indigenous vegetables using ICP-MS". *Cihan University-Erbil Scientific Journal*, 6(1), 26-31, <https://doi.org/10.24086/cuesj.v6n1y2022.pp26-31>.
- Sadee, B.A., Galali, Y. and Zebari, S.M., (2024), "Recent developments in speciation and determination of arsenic in marine organisms using different analytical techniques". *A review. RSC advances*, 14(30), 21563-21589, <https://doi.org/10.1039/D4RA03000A>.
- Sadee, B.A., Zebari, S.M., Galali, Y. and Saleem, M.F., (2025) "A review on arsenic contamination in drinking water: sources, health impacts, and remediation approaches". *RSC advances*, 15(4), 2684-2703, <https://doi.org/10.1039/d4ra08867k>.
- Sancha, A.M., (2006), "Review of coagulation technology for removal of arsenic: case of Chile". *Journal of health, population, and nutrition*, 24(3), 267.
- Sarkar, S., Hazra, S., Chakraborty, K., Nayak, A. and Saha, P., (2023), "Hybrid technique for removal of arsenic from drinking water". *Chemical Engineering & Technology*, 46(2), 242-255, <https://doi.org/10.1002/ceat.202100603>.
- Siddique, T.A., Dutta, N.K. and Roy Choudhury, N., (2020) "Nanofiltration for arsenic removal: challenges, recent developments, and perspectives". *Nanomaterials*, 10(7), 1323, <https://doi.org/10.3390/nano10071323>.
- Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., (2002), A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters". *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5).
- Smedley, P.L., Nicolli, H.B., Macdonald, D.M.J., Barros, A.J. and Tullio, J.O., (2002) "Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina". *Applied geochemistry*, 17(3), 259-284, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00082-8).
- Sorlini, S. and Gialdini, F., (2010), "Conventional oxidation treatments for the removal of arsenic with chlorine dioxide, hypochlorite, potassium permanganate and monochloramine". *Water Research*, 44(19), 5653-5659, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.032>.
- Srivastava, S, (2020), *Arsenic in drinking water and food*, Springer.
- Tseng, C.H., Chong, C.K., Tseng, C.P. and Centeno, J.A., (2007), "Blackfoot disease in Taiwan: its link with inorganic arsenic exposure from drinking water". *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(1), 82-84, [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[82:bditil\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[82:bditil]2.0.co;2).

- Vu, K.B., Kaminski, M.D. and Nuñez, L., (2003). "Review of arsenic removal technologies for contaminated groundwaters".
- Yin, H., Kong, M., Gu, X. and Chen, H., (2017), "Removal of arsenic from water by porous charred granulated attapulgite-supported hydrated iron oxide in batch and column modes". Journal of Cleaner Production, 166, 88-97, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.026>.
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F. and Guerrero, V.H., (2021), "Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods". Environmental Technology & Innovation, 22, 101504, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>.

پذیرفته شده / ویرایش نشده