

Research Paper

مقاله پژوهشی

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 Koohi² and Mehdi Mirzamohammadi²

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

2- M.Sc. in Organic Chemistry, Water and Wastewater Company of Ardabil Province, Ardabil, Iran.

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

Received: 05/01/2026

Revised: 15/06/2026

Accepted: 19/08/2026

© IWWA

Abstract

The aim of this research is to remove total arsenic from arsenic-contaminated water. In this research, the effect of different amounts coagulant and coagulant aids (chloroferric, polyaluminum chloride, bentonite, hydrated lime, and anionic polyelectrolyte) are studied on increasing the efficiency of arsenic removal from arsenic-contaminated water. Jarrest is 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 is used to measure arsenic. This study is conducted on surface water samples with a concentration of 86 mg/l. By examining different conditions of coagulants, coagulant aid, pH change, and perchlorine, the results were 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 منعقدکننده‌های کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک از آب آلوده در حضور غلظت‌های مختلف کمک منعقدکننده

توران آقاعلیزاده^{۱*}، بهزاد کوهی^۲ و مهدی میرزامحمدی^۲

۱- دانش‌آموخته دکتري، شرکت آب و فاضلاب استان اردبیل، اردبیل، ایران.

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

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

هدف از این کار تحقیقاتی حذف آرسنیک کل از آب‌های آلوده به آرسنیک است. در این مقاله، تاثیر مقدار مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده مختلف (کلروفریک، پلی آلومینیوم کلراید، بنتونیت، آهک هیدراته و پلی الکترولیت آنیونی) در افزایش راندمان حذف آرسنیک از آب آلوده به آرسنیک مورد مطالعه قرار گرفت. برای پیش‌بینی شرایط انعقاد، تعیین میزان مناسب pH و مقدار مواد شیمیایی مورد نیاز برای لخته‌سازی از آزمون جارتست استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقدار آرسنیک از روش طیف‌سنجی جذب اتمی مجهز به کوره و تیوب گرافیتی استفاده شد. این مطالعه بر روی نمونه‌های آب سطحی با غلظت ۸۶ میلی‌گرم بر لیتر انجام شد. با بررسی شرایط مختلف مواد منعقدکننده، کمک منعقدکننده، تغییر pH و پرکلرین، نتایج نشان داد که آرسنیک از حدود ۹۵٪ از آب آلوده آرسنیک حذف شده و بهینه‌ترین شرایط (pH = ۷/۵، پرکلرین = ۷/۵ ppm، کلروفریک = ۲۱ ppm، بنتونیت = ۲ ppm، آهک هیدراته = ۲ میلی‌گرم بر لیتر و پلی الکترولیت = ۰/۰۳ ppm) به‌دست آمده است.

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

۱- مقدمه

آب به عنوان یک جزء ویژه از خلقت و منبع حیات، مدت‌ها است چنان جزئی ناپذیر از وجود انسان شده است که حتی تصور ادامه زندگی بدون آن امکان‌پذیر 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 آلوده‌گی آب اتفاق می‌افتد (Pezeshki et al., 2023; Nasiri et al., 2022b; Nasiri 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 (Siddique et al., 2020; Zamora-Ledezma et al., 2021; Mohammad-Razdari and 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 (Pezeshki et al., 2023; Tseng et al., 2007; Hasanzadeh and Ostovar, 2020; Ahmed et al., 2022). آرسنیک چهار شکل شیمیایی اصلی با حالت‌های اکسیداسیون -3 ، 0 ، $+3$ و $+5$ دارد، اما در آب طبیعی، اشکال غالب آن اکسی‌آنیون‌های معدنی آرسنیت سه ظرفیتی (As^{+3}) یا آرسنات پنج ظرفیتی (As^{+5}) هستند (Smedley and Kinniburgh, 2002).

براساس 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 تلاش هستند 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., 2015, 2024; Sadee, 2022). 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، ۱۴۰۱؛ میرشاهی و همکاران، ۱۴۰۰; Sadee et al., 2021; Inam et al., 2021; Sadee, 2022; Yin et al., 2017; 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 et al., 2024; 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 پیاده‌سازی این روش به منظور حذف آرسنیک، از ترکیباتی هم‌چون کلرید آهن و کلرید آلومینیوم استفاده می‌شود. اضافه‌شدن 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 تحقیق تأثیر مقدار برخی مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب (کلروفریک، بنتونیت، آهک هیدراته و پرکلرین) در افزایش راندمان حذف آرسنیک کل، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های آلوده به آرسنیک با غلظت ۸۶ میلی گرم بر لیتر از آب

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

برای تعیین pH مناسب به منظور بررسی کارایی منعقدکننده کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در حذف آرسنیک در محدوده سه pH متفاوت (۸/۲، ۷/۵ 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.

۴-۲- 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.

۵-۲- 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.

۶-۲- بررسی ماده اکسیدکننده (پرکلرین)

به منظور بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰، ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، 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.

۷-۲- 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.

سطحی در آزمایشگاه تهیه شد. در این پژوهش از کلروفریک ۴۰٪، پرکلرین ۶۵٪، 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 کدورت‌سنج مدل 2100 از شرکت HACH انجام شد. برای کالیبراسیون این دستگاه از پنج محلول استاندارد استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان آرسنیک از روش طیف‌سنجی جذب اتمی مجهز به کوره و تیوب گرافیتی با نام اختصاری AAS (Atomic Absorption Spectrometric)، مورد استفاده قرار گرفت. برای پیش‌بینی شرایط انعقاد و تعیین میزان مناسب pH و مواد شیمیایی موردنیاز برای لخته‌سازی از دستگاه جارتست استفاده شد. این آزمایش مدل کوچک از واحدهای انعقاد سریع، انعقاد آهسته و همین‌طور ته‌نشینی در تصفیه‌خانه 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 تصفیه‌خانه‌ها (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.

۱-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقدکننده کلروفریک

به منظور تعیین مقدار بهینه برای منعقدکننده 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 منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید

به منظور تعیین مقدار بهینه منعقدکننده پلی آلومینیوم کلرید برای غلظت‌های متفاوت پلی آلومینیوم کلراید (۴ و ۲۶ 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 (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۳- نتایج و بحث

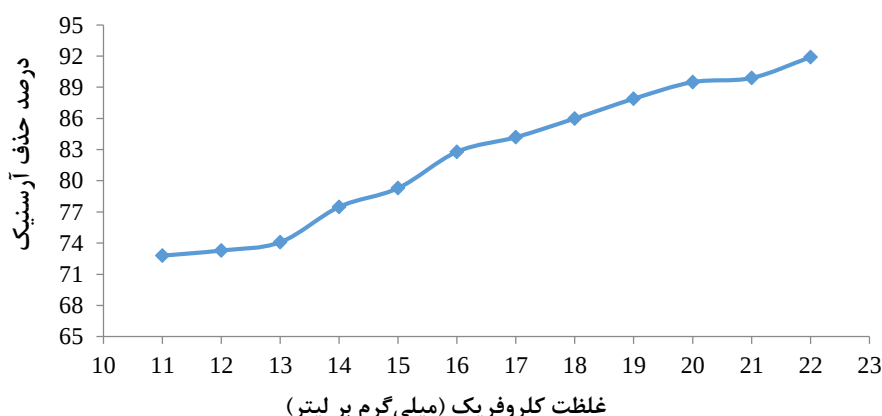
جدول ۱- مشخصات نمونه اولیه

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

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

جدول ۲- بررسی تاثیر غلظت های مختلف منعقدکننده کلروفیک در حذف آرسنیک

۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	کلروفیک (mg/l)
۷/۲۹	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 غلظت های مختلف منعقدکننده کلروفیک در حذف آرسنیک

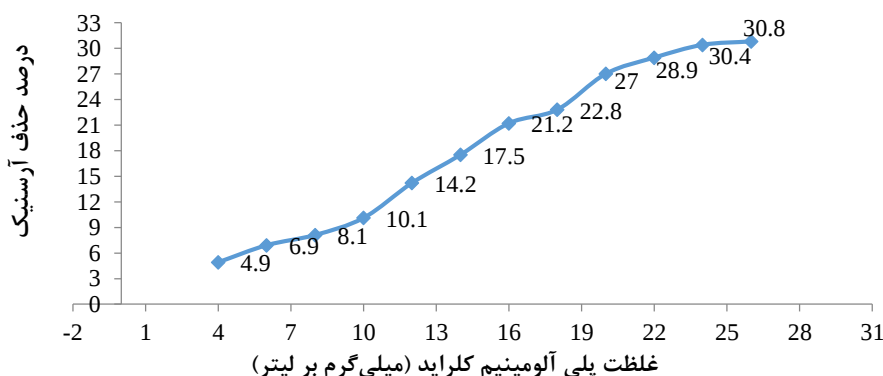
مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر اضافه و جارتست زده شد. نتایج به دست آمده در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول و شکل ۲، با افزایش غلظت پلی آلومینیوم کلراید، درصد حذف آرسنیک افزایش می یابد.

۳-۲- بررسی غلظت های متفاوت منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید

برای بررسی تاثیر غلظت های متفاوت منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک به نمونه غلظت های متفاوت از ماده منعقدکننده کلروفیک (۴ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در

جدول ۳- بررسی تاثیر غلظت های مختلف منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک

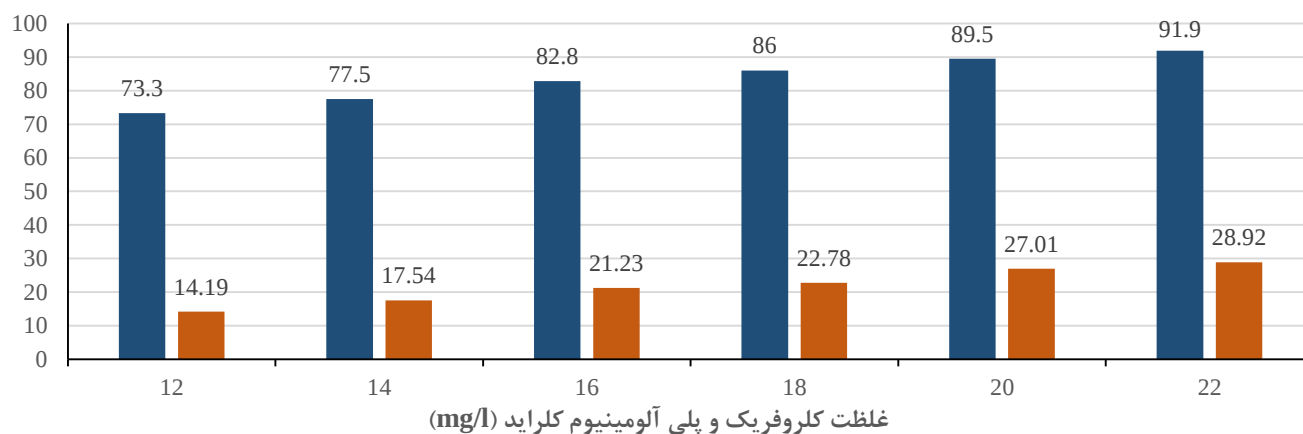
۲۶	۲۴	۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	پلی آلومینیوم کلراید (mg/l)
۶۱/۹۵	۶۲/۲۵	۶۳/۶۲	۶۵/۳۳	۶۹/۱۱	۷۰/۵	۷۳/۸	۷۶/۸	۸۰/۵	۸۲/۲۷	۸۳/۳۲	۸۵/۱۱	آرسنیک (ppb)
۳۰/۸	۳۰/۴	۲۸/۹	۲۷	۲۲/۸	۲۱/۲	۱۷/۵	۱۴/۲	۱۰/۱	۸/۱	۶/۹	۴/۹	درصد حذف آرسنیک



شکل ۲- بررسی تاثیر غلظت های مختلف منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک

رشته‌ها راندمان حذف آرسنیک افزایش می‌یابد. استفاده از پلی آلومینیوم کلراید به‌عنوان منعقد کننده به‌دلیل تمایل بسیار کم آرسنیک به جذب سطحی در ساختارهای پلیمری تاثیر بسیار کم در حذف آرسنیک نشان می‌دهد (شکل ۳).

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



غلظت کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید (mg/l)						درصد حذف آرسنیک توسط کلروفریک	درصد حذف آرسنیک توسط PAC
۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۹۱/۹	۸۹/۵
درصد حذف آرسنیک توسط کلروفریک						۲۸/۹۲	۲۷/۰۱
درصد حذف آرسنیک توسط PAC						۲۲/۷۸	۲۱/۲۳
						۱۷/۵۴	۱۴/۱۹

شکل ۳- مقایسه کارایی کلروفریک (FeCl_3) و پلی آلومینیوم کلراید (PAC)

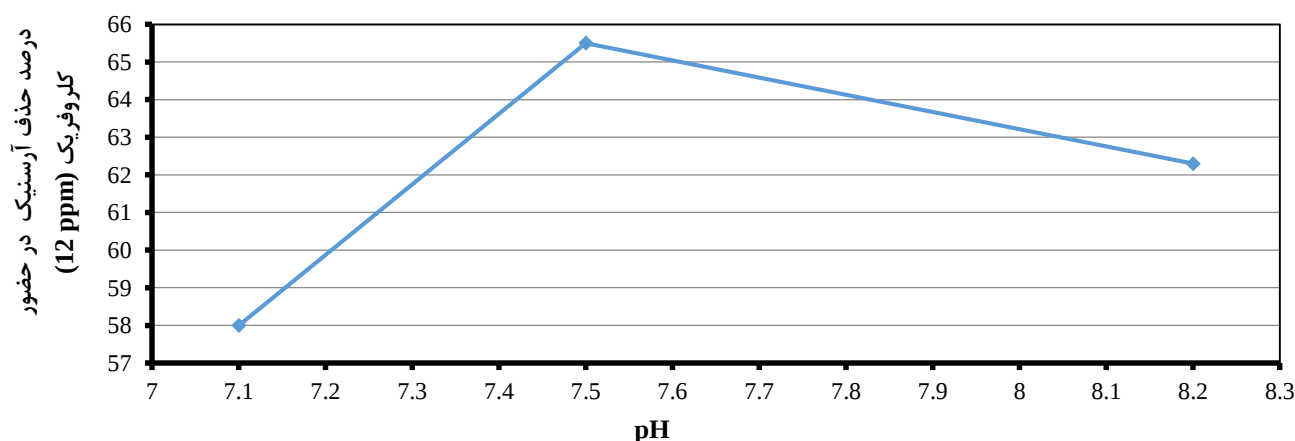
و متداول برای آب‌های سطحی استان اردبیل (۷/۱ و ۷/۵، ۸/۲) در مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به‌ترتیب غلظت ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ آمده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد در هر دو غلظت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر) بالاترین درصد حذف در $\text{pH} = 7.5$ به‌دست می‌آید (شکل ۴).

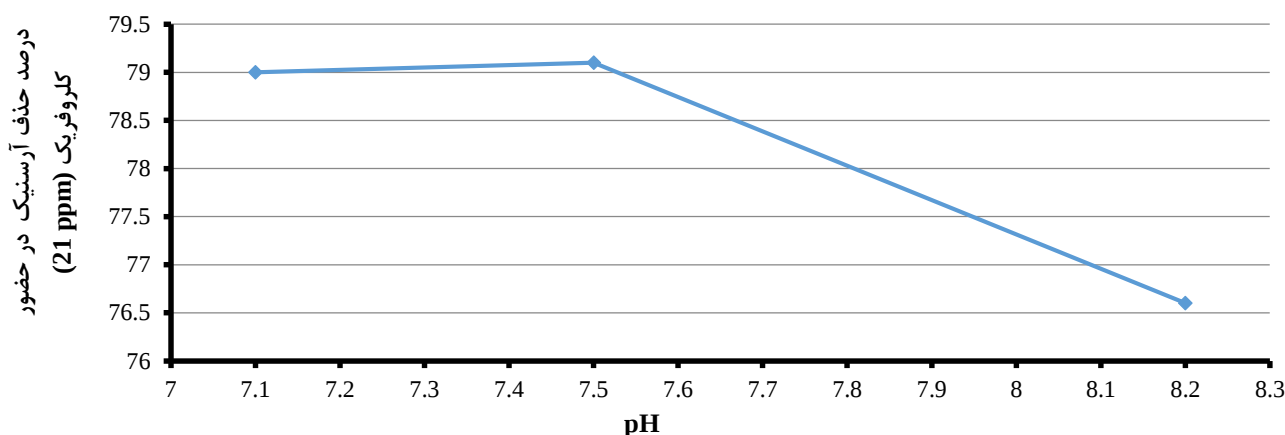
۳-۳- بررسی تاثیر pH بر راندمان حذف آرسنیک در حضور منعقدکننده کلروفریک

برای تعیین تاثیر pH مناسب بر راندمان حذف آرسنیک به‌منظور بررسی کارایی منعقدکننده کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر) در حذف آرسنیک در محدوده سه pH متفاوت

جدول ۴- تغییرات pH در حذف آرسنیک در حضور غلظت‌های ۱۲ و ۲۱ mg/l

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



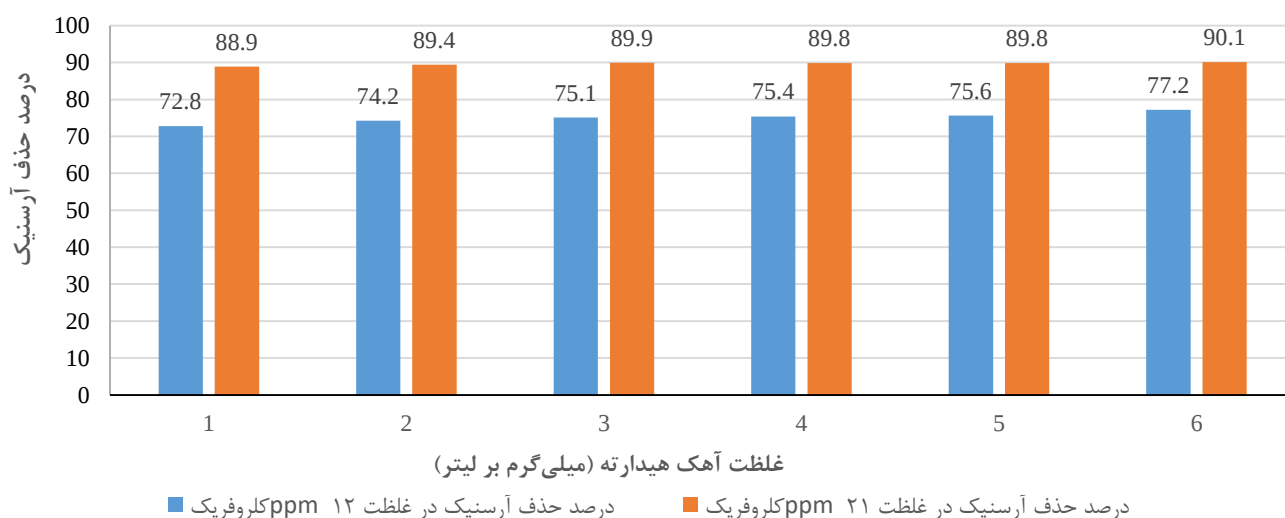


شکل ۴- تغییرات pH در حذف آرسنیک در حضور غلظت های ۱۲ و ۲۱ mg/l

آمده در شکل ۵ آمده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد در هر دو غلظت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر) افزایش غلظت کمک منعقدکننده 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 می‌دهد، به طوری که در آزمایش جارتست با غلظت کلروفریک ۱۲ میلی گرم بر لیتر در غیاب آهک هیدراته راندمان حذف آرسنیک ۶۶٪ رسید.

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

برای تعیین مقدار مناسب آهک هیدراته بر راندمان حذف آرسنیک به منظور بررسی کارایی منعقدکننده 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



شکل ۵- تاثیر مقادیر مختلف آهک (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب (۱۲ و ۲۱)، ۰/۰۳ و ۲ میلی گرم بر لیتر

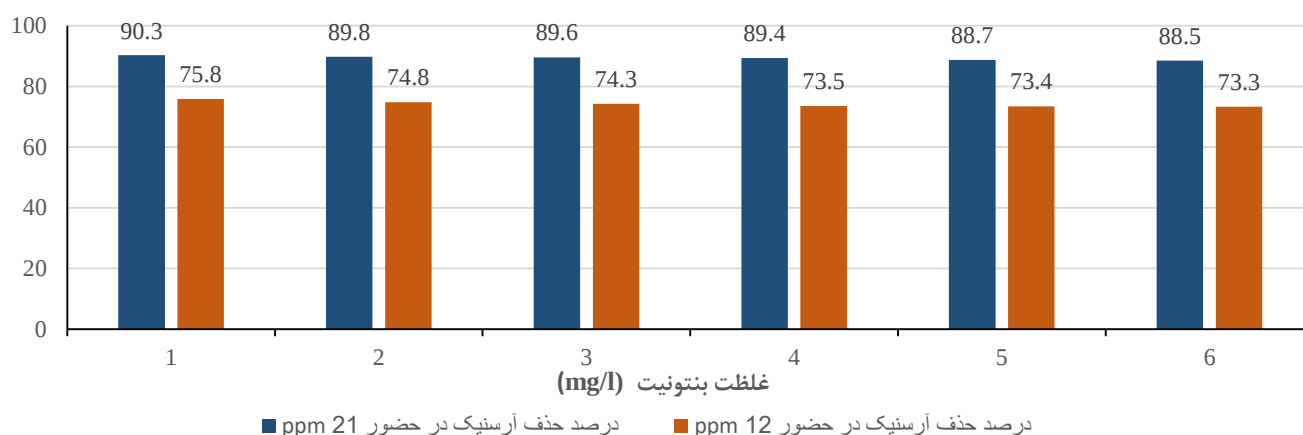
لیتر)، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش بنتونیت مقدار آرسنیک به صورت جزئی افزایش می‌یابد (جدول ۵ و شکل ۶). قابل ذکر است که نتایج فوق به محلول رویی جارتست مرتبط بوده، از طرفی بنتونیت در تشکیل حجم لجن تاثیر به سزایی داشته و به احتمال زیاد بعد از عبور محلول رویی از بستر لجن، راندمان حذف افزایش خواهد یافت.

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

به منظور تعیین مقدار بهینه بنتونیت بر راندمان حذف آرسنیک برای بررسی کارایی منعقدکننده کلروفریک برای مقادیر مختلف بنتونیت (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک، آهک هیدراته و پلی الکترولیت به ترتیب (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر

جدول ۵- مقایسه تاثیر غلظت‌های متفاوت بنتونیت ۱ تا ۶ (mg/l) در حضور منعقدکننده کلروفریک در حذف آرسنیک

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



شکل ۶- مقایسه تاثیر غلظت‌های متفاوت بنتونیت ۱ تا ۶ (mg/l) در حضور منعقدکننده کلروفریک در حذف آرسنیک

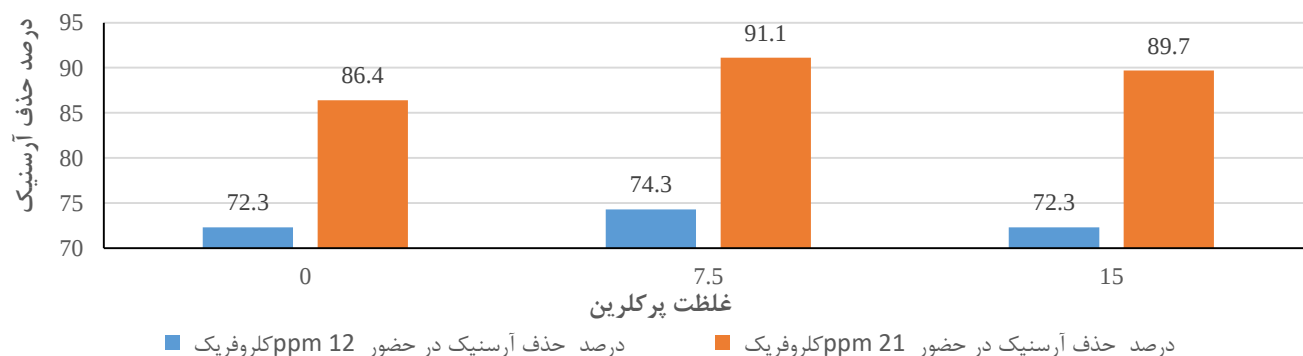
۳-۶- بررسی ماده اکسیدکننده (پرکلرین)

با توجه به این‌که کلر به‌عنوان یک اکسیدکننده قوی، آرسنیک سه ظرفیتی را به آرسنیک پنج ظرفیتی تبدیل می‌کند، این تغییر شیمیایی باعث می‌شود آرسنیک به‌راحتی از طریق روش‌هایی مانند جذب، رسوب‌گذاری یا فیلتراسیون حذف شود. لذا به‌منظور بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰، ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم

بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به‌ترتیب ۲، ۰/۳ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده‌شد (جدول ۶ و شکل ۷). با توجه به شکل ۷ بیشترین مقدار حذف آرسنیک در حضور ۷/۵ میلی گرم بر لیتر پرکلرین حاصل‌شده است. که می‌توان آن را به افزایش میزان اکسید شدن آرسنیک سه ظرفیتی به پنج ظرفیتی ارتباط داد (Sorlini and Gialdini, 2010). در غلظت‌های بالای کلر میزان اکسیدشدن کاهش پیدا کرده است.

جدول ۶- بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰ و ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۰/۳ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر

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



شکل ۷- بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰، ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۰/۳ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر

۳-۷- بررسی اثر کاغذ صافی در حذف آرسنیک

با توجه به اثر فرایند فیلتراسیون در تصفیه خانه های متعارف آب و تاثیر به سزای 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 جارست زده شد. بعد از اتمام جارست نمونه ها با کاغذ صافی واتمن ۴۰ صاف شد. مقدار آرسنیک نمونه ها قبل و بعد صافی با دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده در جدول ۷ آمده است.

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

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

۴- نتیجه گیری

بهینه، راندمان حذف آرسنیک از آب آلوده به این ماده حدود ۹۵٪ به دست 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 می دارند.

۶- اظهارنامه استفاده از هوش مصنوعی

در هیچ یک از مراحل تهیه و نگارش این مقاله از ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

۷- مراجع

- کریمی، س.، اعتدالی، ر.، و هادی نیا، س.، (۱۴۰۱)، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده کلورفریک"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱۷(۱)، ۵۵-۶۱، <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2021.284006.1271>
- میرشاهی، م.، و ایران دوست، م.، (۱۴۰۰)، "بررسی کاربرد روش رویه پاسخ در بهینه سازی فرایند 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,

در این تحقیق برای حذف آرسنیک از آب آلوده و بررسی تاثیر مواد منعقدکننده و کمک کننده (کلورفریک، پلی آلومینیوم کلراید، آهک هیدراته، بنتونیت) در pH های مختلف، در حضور اکسیدکننده پرکلرین مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می دهد که با افزایش غلظت کلورفریک از ۱۱ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر کاهش قابل ملاحظه ای در غلظت آرسنیک باقی مانده مشاهده می شود. با توجه به نتایج حاصله و مقدار معمول مصرف کلورفریک در تصفیه خانه های استان برای تعیین مقدار بهینه مواد کمک منعقدکننده، غلظت کلورفریک برای ادامه پژوهش، ۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر (غلظت بهینه) انتخاب شد. مشاهده شد که مقدار آهک هیدراته مصرفی بر روی کاهش غلظت آرسنیک به صورت جزئی موثر بوده به طوری که با افزایش مقدار آهک هیدراته مقدار آرسنیک به طور جزئی کاهش نشان می دهد.

افزایش غلظت بنتونیت تاثیر برعکس بر روی غلظت آرسنیک داشته و سبب افزایش جزئی غلظت آرسنیک می شود. استفاده از سیستم کلرزی اولیه به دلیل خاصیت اکسیدکنندگی کلر تاثیر به سزایی در کاهش مقدار آرسنیک داشته، به طوری که با افزایش غلظت تزریقی کلر از ۰ تا ۱۵ میلی گرم بر لیتر مقدار آرسنیک کاهش بیشتری نشان می دهد. به طور کلی با افزایش مقدار کلورفریک در حضور کلرزی اولیه و استفاده مواد کمک منعقدکننده آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت مقدار حذف آرسنیک قابل ملاحظه است. استفاده از منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید به جای کلورفریک با وجود کاهش محسوس کدورت ولی بر روی کاهش غلظت آرسنیک به اندازه کلورفریک موثر نبوده، به طوری که با افزایش مقدار پلی آلومینیوم کلراید مقدار آرسنیک کاهش کمی نشان می دهد. در این پژوهش با استفاده از شرایط

- 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 techniquesM 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)
- 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/10.29252/4.6.39>
- Hamid, N.H.A., Rushdan, A.I., Nordin, A.H., Faiz Norrahim, 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., Amir, 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", A non-peer reviewed preprint submitted to EarthArXiv, 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

- Vu, K.B., Kaminski, M.D., and Nuñez, L., (2003), *Review of arsenic removal technologies for contaminated groundwaters*, Chemical Engineering Division, Argonne National Laboratory, Argonn, Illinois, <https://doi.org/10.2172/815660>
- 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 bath 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>



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