

مدل سازی کمی حذف آرسنیک از محیط‌های آبی توسط زئولیت اصلاح شده با CTAB

سعید موسوی مغانجوی^۱، شهرزاد خرم‌نژادیان^{۲*}، ابراهیم فتایی^{۳*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲)

چکیده

وجود آرسنیک در آب، به دلیل سمیت و مخاطره آمیز بودن آن، به‌عنوان یک مشکل اساسی در جوامع مطرح است. روش‌های متفاوتی برای حذف آرسنیک از آب وجود دارد. این مطالعه با هدف بررسی کارایی زئولیت کلینوپتیلولایت اصلاح شده با سورفاکتانت کاتیونی (CTAB) در حذف آرسنیک از محلول‌های آبی و همچنین مدل‌سازی تأثیر pH (۳-۹)، زمان تماس (۱-۲۰ دقیقه) و مقادیر مختلف زئولیت اصلاح شده با CTAB (۱-۱۰ گرم بر لیتر) بر درصد حذف آرسنیک انجام شد. برای این منظور طرح مرکب مرکزی با ۲۰ آزمایش و بر اساس مقادیر کدبندی شده متغیرهای مستقل طراحی شد. نتایج نشان داد که مدل طرح مرکب مرکزی قابلیت مطلوبی ($R^2 = 0.985$) در پیش‌بینی مقدار آرسنیک دارد. تحلیل حساسیت مدل طرح مرکب مرکزی نشان داد که از بین سه متغیر مورد بررسی، pH بیشترین تأثیر را بر حذف آرسنیک داشت، بطوری‌که درصد اثر این متغیر بر مقدار آرسنیک برابر با ۷۱ درصد به دست آمد. زمان تماس نیز تأثیر معنی‌داری بر حذف آرسنیک داشت. مقادیر بهینه pH، زمان تماس و مقدار زئولیت برای دستیابی به بهینه حذف آرسنیک به ترتیب ۳/۲، ۱۶/۸ دقیقه و ۱ گرم بر لیتر بدست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد که زئولیت اصلاح شده با CTAB به دلیل قدرت بالا در حذف آرسنیک از محلول‌های آبی و دسترسی آسان و ارزان قیمت زئولیت می‌تواند به‌عنوان یک روش موثر و ارزان قیمت برای حذف آلاینده آرسنیک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: زئولیت، آرسنیک، کارایی حذف، مدل‌سازی، طرح مرکب مرکزی

موسوی مغانجوی س.، خرم‌نژادیان ش.، فتایی ا. ۱۴۰۲. مدل‌سازی کمی حذف آرسنیک از محیط‌های آبی توسط زئولیت اصلاح شده با CTAB. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۱، شماره ۱. صفحه: ۸۷-۹۹.

۱- دانشجوی دکتری گروه محیط زیست، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

۲- دانشیار گروه محیط زیست، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

۳- استادیار گروه محیط زیست، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

*پست الکترونیک: ebfataei@gmail.com; khoramnezhadian@yahoo.com

مقدمه

آرسنیک یکی از سمّی‌ترین آلاینده‌های موجود در آب‌های زیرزمینی و سطحی است که سلامت انسان و سایر موجودات زنده را به خطر می‌اندازد. وجود غلظت‌های بالا و خطرناک آرسنیک در منابع آب‌های طبیعی اکنون به صورت مشکلی جهانی درآمده است (Hao *et al.*, 2018). حداکثر غلظت مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی (Peng *et al.*, 2017) و همچنین مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI, 2009)، ۱۰ میکروگرم در لیتر می‌باشد. حد قابل قبول آرسنیک معدنی ۰/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن بدن در هفته و برای آب آشامیدنی ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر است (WHO, 2011). آلودگی مزمن آرسنیک می‌تواند منجر به ایجاد بیماری‌هایی نظیر سرطان پوست، اختلالات دستگاه گوارش، دیابت، اختلال عملکرد سیستم کلیه، بیماری قلبی عروقی و سرطان‌های داخلی شود (Hassan, 2018).

سمیت آرسنیک به نوع ترکیب این عنصر بستگی دارد. مهمترین انواع موجود در طبیعت که در آب‌های سطحی و زیرزمینی یافت می‌شود، نمونه‌های غیرآلی آن است که برای آرسنیت HAsO_3^{2-} و H_2AsO_3^- و برای آرسنات HAsO_4^{2-} و H_2AsO_4^- هستند (Oremland & Stolz, 2003). مکانیسم‌هایی نظیر انحلال کاهشی اکسیدهای آهن، واجذب قلیایی، اکسیداسیون سولفیدی و فعالیت‌های ژئوترمال باعث آزادسازی آرسنیک به آب‌های زیرزمینی می‌شود (Ravenscroft *et al.*, 2009). حلالیت ترکیبات آرسنیک بسته به pH و شرایط یونی محیط تغییر می‌کند (Singh *et al.*, 2015). روش‌های متفاوتی برای حذف آرسنیک از آب وجود دارد و مطالعات گسترده‌ای در راستای استفاده از انواع جاذب‌ها به دلیل خاصیت ارزانی، امکان دسترسی بالا، جذب سریع، ظرفیت بالای جذب، قابلیت احیاء و استفاده مجدد انجام شده است (Hao *et al.*, 2018; Pantti & Wareham, 2011; Šiljeg *et al.*, 2012). یکی از جاذب‌هایی که در سال‌های اخیر مطالعات زیادی روی آن صورت گرفته است، زئولیت‌ها بوده که جزء خانواده آلومینوسیلیکات‌های معدنی کریستالی و هیدراته فلزات قلیایی و قلیایی خاکی با شبکه سه بعدی هستند و به دو گروه طبیعی از جمله کلینوپتیلولیت، آنالسیم، لامومتایت، فیلیپسیت، موردنیت

و مصنوعی یا سنتزی از جمله W و ZSM تقسیم می‌شوند. کلینوپتیلولایت $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_4\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ متداول‌ترین زئولیت طبیعی است که دارای منافذ و ساختار کانالی است و توسط آب و کاتیون‌های تبدالی مانند K^+ ، Na^+ ، Ca^{2+} و غیره اشغال شده است (Rodríguez *et al.*, 2019). قیمت پایین، دسترسی آسان و ظرفیت بالای زئولیت کلینوپتیلولایت در جذب آلاینده‌های کاتیونی، زمینه استفاده از آنها را در فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب و حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی از جمله فلزات سنگین از آب‌های آلوده و فاضلاب‌های شهری و صنعتی ضروری ساخته است (Mohammadi *et al.*, 2012; Leung *et al.*, 2007).

برای اصلاح سطح زئولیت‌ها و بهبود کارایی جذب زئولیت‌های طبیعی از کاتیون‌های فلزی یا سورفکتانت‌ها و تیمار اسید/باز استفاده می‌شود (Taamneh & Šiljeg *et al.*, 2017). نتایج سیلژق و همکاران (Šiljeg *et al.*, 2012) نشان داد که استفاده از زئولیت صربستان اصلاح‌شده با آهن و سدیم (Fe-Na-SZ) برای حذف آرسنات از آب حاوی ۳۰ میکروگرم بر لیتر مطلوب بود. بر اساس نتایج مطالعات باسکان و پالا (Baskan & Pala, 2011)، در غلظت اولیه کمتر آرسنیک، سرعت و مقدار حذف آرسنیک از آب آشامیدنی توسط زئولیت طبیعی اصلاح‌شده با FeCl_3 ۰/۱ مولار بیشتر بود. حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2017) حذف آرسنیک از محیط‌های آبی توسط الکتروریسی آلومینای نانولیفی را انجام دادند و نشان دادند حذف آرسنیک تحت تأثیر پارامترهای pH، زمان تماس، غلظت اولیه فلز، حجم محلول و مقدار جاذب بوده و کارایی حذف آرسنیک را در شرایط بهینه (pH برابر ۲، زمان تماس ۶۰ دقیقه، غلظت اولیه فلز ۵ ppm، حجم محلول ۵۰ میلی‌لیتر و مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم) حدود ۹۰ درصد بدست آوردند. ندافی و همکاران (Nadafi *et al.*, 2014) کارایی زئولیت طبیعی اصلاح شده در حذف ۶،۴،۲ تری کلروفلن (TCP) از محلول‌های آبی را بررسی کردند؛ بر اساس نتایج این محققین، زئولیت ایرانی اصلاح‌شده در مقایسه با زئولیت‌های دیگر نقاط دنیا، قابلیت خوبی در حذف TCP دارد و با افزایش غلظت از ۵۰ به ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، میزان جذب از ۴/۰۴ به ۱۲/۲۲ میلی‌گرم بر گرم؛ با افزایش pH از ۳ به ۹ میزان جذب از ۷/۰۲ به ۴/۱۶ میلی‌گرم در

آلودگی منابع آب تخت سلیمان شهرستان تکاب به آرسنیک، یکی از چالش‌های زیست محیطی در دهه اخیر بوده است. در پایین دست این منطقه معدنی وجود دارند که برداشت مکرر مواد معدنی سبب آزاد شدن فلزات سنگینی مثل آرسنیک به آب‌های سطحی می‌گردند؛ لذا حذف آرسنیک در پایین دست به دلیل استفاده از آب‌های آلوده در فعالیت‌های کشاورزی و ورود آرسنیک به زنجیره غذایی و محصولات زراعی و باغی، ضروری می‌باشد. با توجه به بالا بودن هزینه حذف فلزات سنگین و لزوم استفاده از جاذب‌های ارزان-قیمت و در دسترس و با در نظر گرفتن ظرفیت بالای زئولیت در حذف عناصر سنگین، هدف از این مطالعه کاربرد زئولیت کلینوپتیلولایت اصلاح شده با CTAB^۴، به عنوان جاذبی ارزان و قابل دسترس در منطقه، برای حذف آرسنیک از آب‌های آلوده و مدل سازی کمی اثر توأم متغیرهای pH، زمان تماس و مقدار زئولیت اصلاح شده با CTAB بر کارایی حذف آرسنیک از محلول آبی و تعیین شرایط بهینه فرایند حذف آرسنیک توسط زئولیت اصلاح شده با CTAB بود.

مواد و روش‌ها

تهیه زئولیت اصلاح شده با CTAB

زئولیت از معدن افرازند شهرستان سمنان واقع در شمال کشور ایران تهیه گردید. حدود ۵۰۰ گرم از نمونه زئولیت از الک با مش‌های ۷۰ (۰/۲ میلی‌متر) عبور داده شدند و به منظور زدودن گل و لای چندین بار با آب شستشو داده و به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر اشباع شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند (Chutia et al., 2009). برای تعیین ترکیب شیمیایی زئولیت منتخب طبیعی از دستگاه فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) استفاده شد و برای آنالیز جاذب زئولیت از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل (Philips Analytical X-Ray PW1800,) $\lambda = 0.15418 \text{ nm}$ (using Cu-K α radiation) استفاده شد. به منظور افزایش و بهبود قابلیت جذب زئولیت از اصلاح کننده CTAB (C₁₉H₄₂BrN) از شرکت مرک آلمان که یک نوع سورفکتانت کاتیونی است، استفاده شد. مقدار ۵

گرم؛ و با افزایش دوز جاذب از ۱۰ به ۶۰ گرم بر لیتر در غلظت ثابت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کارایی حذف از ۶۰/۴۱ درصد به ۸۷/۲۹ درصد و ظرفیت جذب از ۱۲/۷۸ میلی‌گرم در گرم به ۸۵/۲ میلی‌گرم در گرم رسید. صوری و همکاران (Saboori et al., 2018) با بررسی حذف آرسنیک در محیط آبی با روش اسمز معکوس و نانوذره آهن صفر ظرفیتی گزارش کردند که در هر دو روش اسمز معکوس و استفاده از نانوذره آهن، با افزایش غلظت آرسنیک، کارایی حذف افزایش می‌یابد و با کاربرد نانوذره آهن با افزایش زمان تماس و دما کارایی حذف آرسنیک افزایش و با افزایش pH کارایی حذف آرسنیک کاهش می‌یابد. پانتی و وارهام (Pantti & Wareham, 2011) از شن‌های حاوی آهن در نیوزیلند برای حذف آرسنیک ۳ و ۴ ظرفیتی از آب استفاده نمودند و بیشترین جذب آرسنیک ۳ ظرفیتی را در pH ۷/۵ و بیشترین جذب آرسنیک ۴ ظرفیتی را در pH ۳ به دست آوردند. نتایج مطالعه گاگنون و گیبون (Gibbons & Gagnon, 2010) که از زائادات جامد تصفیه آب (حاوی آلوم، فریک و آهک (کلسیم اکسید) برای جذب آرسنیک از آب‌های زیرزمینی منطقه جدید اسپانیا استفاده کرده بودند نشان داد که زائادات آهن و آهک، جاذب‌های مناسبی برای جذب آرسنیک از آب زیرزمینی بودند.

روش سطح پاسخ^۱ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است و در بهینه‌سازی فرآیندهایی بکار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و اثر کلیه ضرایب مدل رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم و اثر متقابل فاکتورها قابل برآورد هستند (Myers & Montgomery, 2002). روش سطح پاسخ دارای چهار مرحله اصلی، شامل طراحی آزمایش‌ها، برازش مدل، راستی آزمایی مدل و تعیین شرایط بهینه است. روش پاسخ سطح با استفاده از طرح‌های مختلف مانند باکس-بنکن^۲ و یا طرح مرکب مرکزی^۳ انجام پذیر است. در سال‌های اخیر این روش‌ها به عنوان ابزارهایی توانمند در پژوهش‌های مربوط به مدل سازی و بهینه‌سازی فرآیند در علوم مهندسی و بیولوژی مورد استفاد قرار گرفته‌اند (Mousavi et al., 2013).

4 - Cetrimonium bromide

1- Response Surface Methodology

2- Box-Behnken

3- Central Composite Design (CCD)

در روش پاسخ سطح از یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم (معادله‌ی ۲) که شامل ترکیب خطی، درجه دوم و همچنین برهمکنش بین متغیرها براساس مقادیر گذشته است، برای پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده می‌شود.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{0i} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

در این معادله، Y متغیر پاسخ (درصد حذف آرسنیک)، X_i و X_j متغیرهای مستقل کد شده، k تعداد متغیرهای مستقل، ε باقیمانده‌های مدل (اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده مدل) و β_0 ، β_i ، β_{ii} ، β_{ij} نیز به ترتیب نشان دهنده‌ی اثر عرض از مبدأ، اثر توابع خطی، درجه دو و برهمکنش بین متغیرها است. بر مبنای طرح مرکب مرکزی در مجموع ۲۰ آزمایش با هفت نقطه مرکزی که معادل با مقادیر میانگین دامنه متغیرهای مورد استفاده است، طراحی و اجرا گردید (جدول ۳). برای تهیه محلول آرسنیک از نمک $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ استفاده شد. برای انجام هر آزمایش حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول آرسنیک با غلظت مشخص در یک ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتر ریخته شده سپس pH با استفاده از اسید نیتریک (HNO_3) و هیدروکسید سدیم (NaOH) ۰/۱ مولار تنظیم و زئولیت اصلاح شده با CTAB به آن افزوده شد. در هر آزمایش بسته به زمان تماس سوسپانسیون زئولیت و محلول آرسنیک، در دستگاه شیکر مدل Heidolph MR3001K با دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه تکان داده شد. پس از اتمام زمان هر آزمایش، محلول تعادلی از طریق سانتریفیوژ کردن از زئولیت جدا شده و غلظت آرسنیک در محلول با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل Agilent- AA240 ساخت کشور آمریکا) تعیین شد.

گرم در لیتر زئولیت به مدت ۲۴ ساعت در ۵۰ میلی‌لیتر از محلول ۵ میلی‌مولار CTAB بر روی شیکر با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در تماس قرار داده شد. پس از شستشو با آب مقطر، نمونه زئولیت در دیسکاتور به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید (Nadafi; Kuleyin, 2006).
(*et al.*, 2014)

(۲)

مدل‌سازی حذف آرسنیک

بمنظور مدل‌سازی و نیز ارزیابی تأثیر متغیرهای مؤثر بر میزان حذف آرسنیک توسط زئولیت اصلاح‌شده با CTAB از طرح مرکب مرکزی استفاده شد. طراحی آزمایش‌ها با ترکیب مقادیر مختلف هر یک از متغیرهای مستقل با استفاده از روش پاسخ سطح و بر مبنای طرح مرکب مرکزی انجام شد. دامنه‌ی متغیرهای مورد نظر شامل pH، زمان تماس و همچنین مقدار زئولیت اصلاح‌شده با CTAB براساس مقادیر واقعی و همچنین مقادیر کد شده α_+ ، α_0 ، α_- ارائه شده است. کدبندی مقادیر واقعی متغیرها با استفاده از معادله‌ی ۱ انجام شد.

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x_i} \quad (1)$$

در این رابطه x_0 و x_i به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار کدشده‌ی متغیر، مقدار واقعی هر متغیر و میانگین دامنه‌ی هر متغیر است. Δx نیز مقدار تغییر گام^۱ هر پارامتر است. براساس جدول ۱ مقدار x_0 برای متغیرهای pH، زمان تماس و مقدار زئولیت به ترتیب برابر با ۶، ۱۰/۵ دقیقه و ۵/۵ گرم بر لیتر بود. مقدار Δx نیز برای این متغیرها به ترتیب برابر با ۳، ۹/۵ و ۴/۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تجزیه و تحلیل‌های مربوط به طرح مرکب مرکزی با استفاده از نرم‌افزار 14 MINITAB انجام شد.

جدول ۱- دامنه مقادیر آزمایشی متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی

Table 1. Range of independent variables used in the modeling processes

Independent variable	(Factor)	(Range & values)				
	X_i	α_+	+1	0	-1	α_-
(pH)	x_1	7.78	9	6	3	4.22
(Contact time) (min)	x_2	16.15	20	10.5	1	4.85
(Zeolite dosage)(gL^{-1})	x_3	8.17	10	5.5	1	2.82

سورفکتانت‌های کاتیونی تمایل بالایی برای جذب بار منفی دارند، لذا به منظور اصلاح سطح بیرونی زئولیت و افزایش ظرفیت تبادل یونی از اصلاح‌کننده CTAB استفاده شد. شکل ۱ الگوهای پراش اشعه ایکس زئولیت خام را قبل از اصلاح توسط سورفکتانت کاتیونی نشان می‌دهد. بر اساس الگوهای XRD، زئولیت مورد استفاده در این مطالعه به دلیل داشتن پیک‌های قوی در 2θ ۹/۸، ۲۲ و ۲۷ درجه با فواصل ۸.۹، ۳.۹ و ۳.۱ از نوع کلینوپتیلولیت می‌باشد (شکل ۱). نتیجه مشابهی توسط باسکان و پالا (Baskan & Pala, 2011) گزارش شده است.

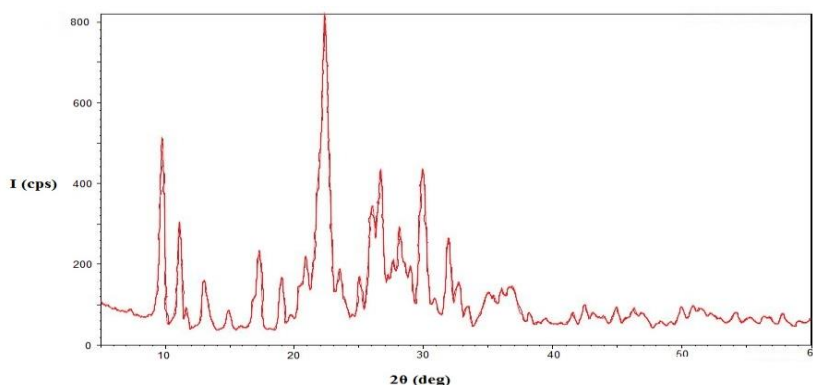
کارایی حذف نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$R = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (3)$$

در این معادله C_i غلظت اولیه (میلی‌گرم بر لیتر)، C_e غلظت باقیمانده پس از جذب (میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد.

نتایج و بحث

برای تولید بار کاتیونی روی سطح زئولیت و افزایش پتانسیل آن برای جذب آلاینده‌های آنیونی، لازم است سطح زئولیت با یک عامل کاتیونی اصلاح شود.



شکل ۱- الگوی پراش پرتو X زئولیت طبیعی خام کلینوپتیلولیت

Figure 1. X-ray diffraction pattern of raw natural zeolite clinoptilolite

زئولیت‌های طبیعی با نسبت Si/Al بیشتر از ۴، زئولیت از نوع کلینوپتیلولیت است (Torabian *et al.*, 2010). این نتایج و اطلاعات نتایج آنالیز XRD را نیز تایید می‌کند که این زئولیت بطور عمده از کلینوپتیلولیت تشکیل شده است. همچنین نتایج XRF نشان داد که زئولیت مورد استفاده عمدتاً از اکسیدهای مختلف فلزی تشکیل شده که گروه‌های عاملی را در سطح زئولیت ایجاد می‌کنند.

در فرایندهای جذب، تعیین ترکیبات موجود در ساختار جاذب از نکات مهم و مورد توجه می‌باشد. بر اساس جدول ۲ آنالیز ترکیب شیمیایی زئولیت با استفاده از تکنیک XRF نشان می‌دهد که بیشترین ترکیبات تشکیل دهنده زئولیت طبیعی خام SiO_2 و Al_2O_3 می‌باشد. آنالیز XRF زئولیت طبیعی نشان داد که زئولیت مورد استفاده در این تحقیق به دلیل داشتن نسبت Si/Al بیشتر از ۶/۲۲، در

جدول ۲- نتایج آنالیز XRF نمونه زئولیت طبیعی خام

Table 2. XRF analysis of natural raw zeolite

CEC	pH _{ZPC}	Cl	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	LOI
meq gr ⁻¹	-	mg L ⁻¹	%								
2.6	4.6	1600	0.9-0.2	0.04	0.03	0.01	68.5	11	3.8	0.6	10-12

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ LOI: افت حرارتی یا تقلیل وزنی حرارتی

CEC: cation exchange capacity; Cl: chlorine; LOI: loss on ignition

جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول مقدار مشاهده‌ای برای هر آزمایش نیز ارائه شده است.

ترکیب آزمایش‌های مورد نیاز بر مبنای طرح مرکب مرکزی با سه متغیر pH، زمان تماس و مقدار زئولیت در

جدول ۳- ماتریس مقادیر متغیرهای کد شده در مدل سازی روش طرح مرکب مرکزی

Table 2. Central composite design matrix for coded variables

Run	pH	Contact time (min)	Zeolite dosage (g L ⁻¹)	As removal (%)
1	0.59	0.59	0.59	57.6
2	0.00	0.00	0.00	60.55
3	0.00	0.00	1.00	55.59
4	0.00	0.00	0.00	60.55
5	1.00	0.00	0.00	42.8
6	0.00	-1.00	0.00	52.08
7	0.00	1.00	0.00	78.42
8	0.59	-0.59	-0.59	46.82
9	-0.59	0.59	-0.59	79.75
10	-1.00	0.00	0.00	90.45
11	-0.59	-0.59	-0.59	76.83
12	-0.59	0.59	0.59	82.57
13	0.00	0.00	-1.00	59.63
14	0.00	0.00	0.00	60.55
15	0.59	-0.59	0.59	44.19
16	0.00	0.00	0.00	60.55
17	0.00	0.00	0.00	60.55
18	-0.59	-0.59	0.59	59.06
19	0.00	0.00	0.00	60.55
20	0.59	0.59	-0.59	44.63

خطی متغیرهای مستقل شامل pH و زمان تماس (0.01) در بخش درجه‌ی دوم معادله نیز اثر pH و مقدار زئولیت بر درصد حذف آرسنیک معنی‌دار است ($P < 0.05$). نتایج جدول ۳ نشان دهنده‌ی این است که برهمکنش متغیرهای pH و زمان ($P < 0.05$)، برهمکنش pH و مقدار زئولیت ($P < 0.01$) و همچنین برهمکنش زمان تماس و زئولیت ($P < 0.01$) بر درصد حذف آرسنیک معنی‌دار می‌باشد.

بر مبنای طرح مرکب مرکزی و براساس ورودی‌های جدول ۳ برای متغیرهای مستقل (شامل pH، زمان تماس و مقدار زئولیت) و متغیر پاسخ (درصد حذف آرسنیک) جدول ۴ برای ضرایب هر یک از پارامترهای خطی، درجه دوم و برهمکنش متغیرها به دست آمد. در این جدول ضرایب هر یک از بخش‌های معادله‌ی چندجمله‌ای به همراه سطح معنی‌داری آن‌ها براساس P value ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، اثر

جدول ۴- ضرایب تابع چند جمله‌ی طرح مرکب مرکزی برای پیش‌بینی درصد حذف آرسنیک

Table 3. Coefficient of the central composite design full quadratic model for prediction of as removal

(Part of model)	(Model parameters)	(Coefficients)	(T value)	(P value)
(Model constant)	Constant	60.613	65.309	0.000
(Linear)	pH	-13.554	-22.012	0.000
	Time	6.000	9.746	0.000
	Zeolite	-0.833	-1.353	0.206
(Square)	pH × pH	1.748	2.916	0.015
	Time × Time	1.263	2.108	0.061
	Zeolite × Zeolite	-1.439	-2.401	0.037
(Interaction)	pH × Time	-1.901	-2.363	0.040
	pH × Zeolite	3.161	3.929	0.003
	Time × Zeolite	4.523	5.623	0.000

$$R^2 = 98.48\% \quad R^2_{adj} = 97.14\%$$

درصد حذف آرسنیک براساس مقدار کد شده‌ی متغیرهای مستقل به دست آمد.

براساس نتایج جدول ۴ و با توجه به سطح معنی‌داری عوامل موثر بر حذف آرسنیک معادله‌ی ۴ برای پیش‌بینی

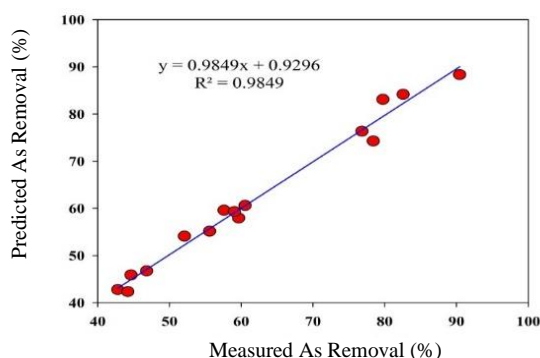
نموده است (شکل ۱). براساس مقدار ضریب تبیین مدل طرح مرکب مرکزی، میتوان گفت که ۹۸/۵ درصد از تغییرات درصد حذف آرسنیک توسط این مدل قابل تبیین است. همچنین براساس شکل ۳ توزیع مقادیر باقیمانده مدل مرکب مرکزی نیز نرمال بوده و براساس علامت (مثبت و یا منفی بودن) مقادیر باقیمانده مدل می-توان نتیجه گرفت که مدل مذکور فاقد بیش برآوردی و یا کم برآوردی سیستماتیک بوده و جهت خطای آن تابعی از مقدار درصد حذف آرسنیک نبوده و حالت تصادفی دارد. جدول ۵ نتایج مربوط به تجزیه واریانس بخش های خطی، درجه دو و برهمکنش تابع چند جمله ای طرح مرکب مرکزی را به صورت کلی و تفکیک شده نشان می دهد. نتایج تجزیه واریانس مربوط به مدل طرح مرکب مرکزی حاکی از اثر معنی دار بخش خطی، برهمکنش (۰/۰۰۱) $P <$ و درجه دو (۰/۰۱) $P <$ بر درصد حذف آرسنیک بود.

(۴)

$$\text{As removal (\%)} = 60.613 - 13.554X_1 + 6.000X_2 + 1.748X_1^2 - 1.439X_3^2 - 1.901X_1X_2 + 3.161X_1X_3 + 4.523X_2X_3$$

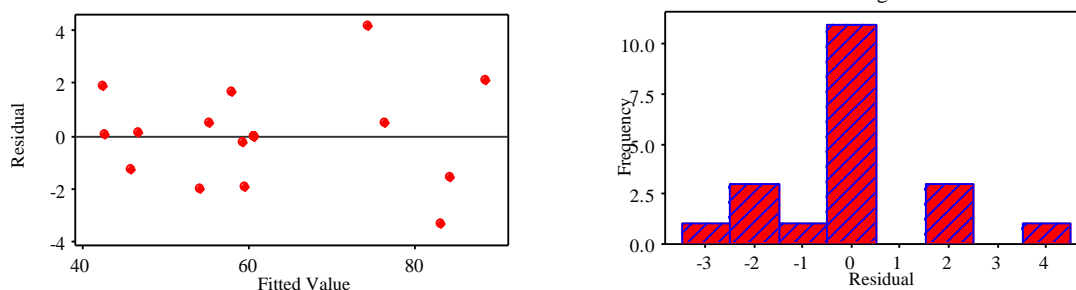
$$R^2 = 98.48\% \quad R_{\text{adj.}}^2 = 97.14\%$$

در این معادله X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب مربوط به مقادیر کد شده pH، زمان تماس و مقدار زئولیت می باشند. معادله ۴ به روشنی نشان می دهد که pH (X_1) دارای اثر منفی و معنی دار بر درصد حذف آرسنیک دارد. درحالی که زمان تماس (X_2) و مقادیر متفاوت زئولیت (X_3) تأثیر مثبت و افزایش دهنده ای بر درصد حذف آرسنیک داشتند. در شکل ۲، درصد حذف آرسنیک مشاهده شده در آزمایش های طرح مرکب مرکزی در مقابل درصد حذف آرسنیک محاسبه شده از روی مدل طرح مرکب مرکزی (معادله ۴) ترسیم شده است. مدل طرح مرکب مرکزی به طور مطلوبی درصد حذف آرسنیک مشاهده شده را برآورد



شکل ۲- مقایسه مقادیر آرسنیک حذف شده مشاهده ای و پیش بینی شده با استفاده از مدل طرح مرکب مرکزی

Figure 2. Comparison between predicted values and experimental results of as removal



شکل ۳- هیستوگرام باقیمانده های مدل طرح مرکب مرکزی به همراه توزیع مقادیر باقیمانده در مقابل تیمارها و مقادیر برازش یافته

Figure3 - Histogram of central composite design model residuals with distribution of residual values against treatments and fitted values.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس مدل طراحی مرکب مرکزی برای پیش بینی درصد حذف آرسنیک

Table 5 - Results of analysis of variance of the central composite design model to predict the percentage of arsenic removal

(Source of variation)	(Degrees of freedom)	(Mean of squares)	(F value)	(P value)
(Model)	9	376.34	72.68	0.000
(Linear)	3	1003.39	193.77	0.000
(Square)	3	34.77	6.71	0.009
(Interaction)	3	90.86	17.55	0.000

بر این اساس به منظور تفسیر بهتر نتایج مدل و تحلیل حساسیت مدل طرح مرکب مرکزی برای تشخیص درصد تاثیر هر یک از ورودی‌های مدل بر درصد حذف آرسنیک از شاخص تحلیل حساسیت پارتو^۱ که با معادله ۵ محاسبه می‌شود استفاده شد (Salari *et al.*, 2013).

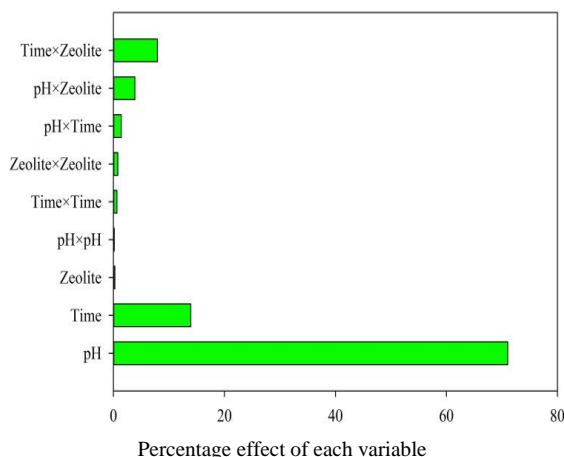
بر این اساس به منظور تفسیر بهتر نتایج مدل و تحلیل حساسیت مدل طرح مرکب مرکزی برای تشخیص درصد تاثیر هر یک از ورودی‌های مدل بر درصد حذف آرسنیک از شاخص تحلیل حساسیت پارتو^۱ که با معادله ۵ محاسبه می‌شود استفاده شد (Salari *et al.*, 2013).

$$P_i = \frac{\beta_i^2}{\sum \beta_i^2} \times 100 \quad i \neq 0 \quad (5)$$

در این رابطه؛ P_i درصد اثر هر یک از متغیرهای طرح مرکب مرکزی و β_i نیز ضرایب معادله چندجمله‌ای درجه دو (جدول ۴) است. درصد اثر هر یک از پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی بر اساس تحلیل حساسیت پارتو در شکل ۴ نشان داده شده است. از بین متغیرهای بررسی شده به ترتیب pH، زمان تماس و برهمکنش زمان تماس و مقدار زئولیت بیشترین تاثیر را بر درصد حذف آرسنیک دارند (شکل ۴)، به طوری که درصد اثر این سه متغیر به ترتیب برابر با ۷۱، ۱۳/۹ و ۷/۹ بوده و مجموع درصد اثرات این متغیرها نیز برابر با ۹۲/۸ درصد است. به منظور نشان دادن اثر ترکیبی متغیرها شامل pH، زمان تماس و مقدار زئولیت نمودار سه بعدی تغییرات درصد حذف آرسنیک برای این متغیرها به صورت دو به دو (با ثابت نگه داشتن متغیر سوم در یک سطح دلخواه) و بر اساس مدل طرح مرکب مرکزی ترسیم شده و در شکل ۵ ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود کاهش pH و افزایش مقدار زئولیت منجر به افزایش درصد حذف آرسنیک از محلول شده است. مقدار pH تعیین کننده گونه‌های غالب آرسنیک موجود در آب می‌باشد و می‌تواند از طریق تاثیر بر ساختار آرسنیک و بار سطحی زئولیت، در فرایند جذب موثر باشد. در یک pH معمولی از ۵ تا ۸ آب طبیعی، گونه‌های مهم آرسنات پنج ظرفیتی شامل

بر این اساس به منظور تفسیر بهتر نتایج مدل و تحلیل حساسیت مدل طرح مرکب مرکزی برای تشخیص درصد تاثیر هر یک از ورودی‌های مدل بر درصد حذف آرسنیک از شاخص تحلیل حساسیت پارتو^۱ که با معادله ۵ محاسبه می‌شود استفاده شد (Salari *et al.*, 2013).

در این رابطه؛ P_i درصد اثر هر یک از متغیرهای طرح مرکب مرکزی و β_i نیز ضرایب معادله چندجمله‌ای درجه دو (جدول ۴) است. درصد اثر هر یک از پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی بر اساس تحلیل حساسیت پارتو در شکل ۴ نشان داده شده است. از بین متغیرهای بررسی شده به ترتیب pH، زمان تماس و برهمکنش زمان تماس و مقدار زئولیت بیشترین تاثیر را بر درصد حذف آرسنیک دارند (شکل ۴)، به طوری که درصد اثر این سه متغیر به ترتیب برابر با ۷۱، ۱۳/۹ و ۷/۹ بوده و مجموع درصد اثرات این متغیرها نیز برابر با ۹۲/۸ درصد است. به منظور نشان دادن اثر ترکیبی متغیرها شامل pH، زمان تماس و مقدار زئولیت نمودار سه بعدی تغییرات درصد حذف آرسنیک برای این متغیرها به صورت دو به دو (با ثابت نگه داشتن متغیر سوم در یک سطح دلخواه) و بر اساس مدل طرح مرکب مرکزی ترسیم شده و در شکل ۵ ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود کاهش pH و افزایش مقدار زئولیت منجر به افزایش درصد حذف آرسنیک از محلول شده است. مقدار pH تعیین کننده گونه‌های غالب آرسنیک موجود در آب می‌باشد و می‌تواند از طریق تاثیر بر ساختار آرسنیک و بار سطحی زئولیت، در فرایند جذب موثر باشد. در یک pH معمولی از ۵ تا ۸ آب طبیعی، گونه‌های مهم آرسنات پنج ظرفیتی شامل



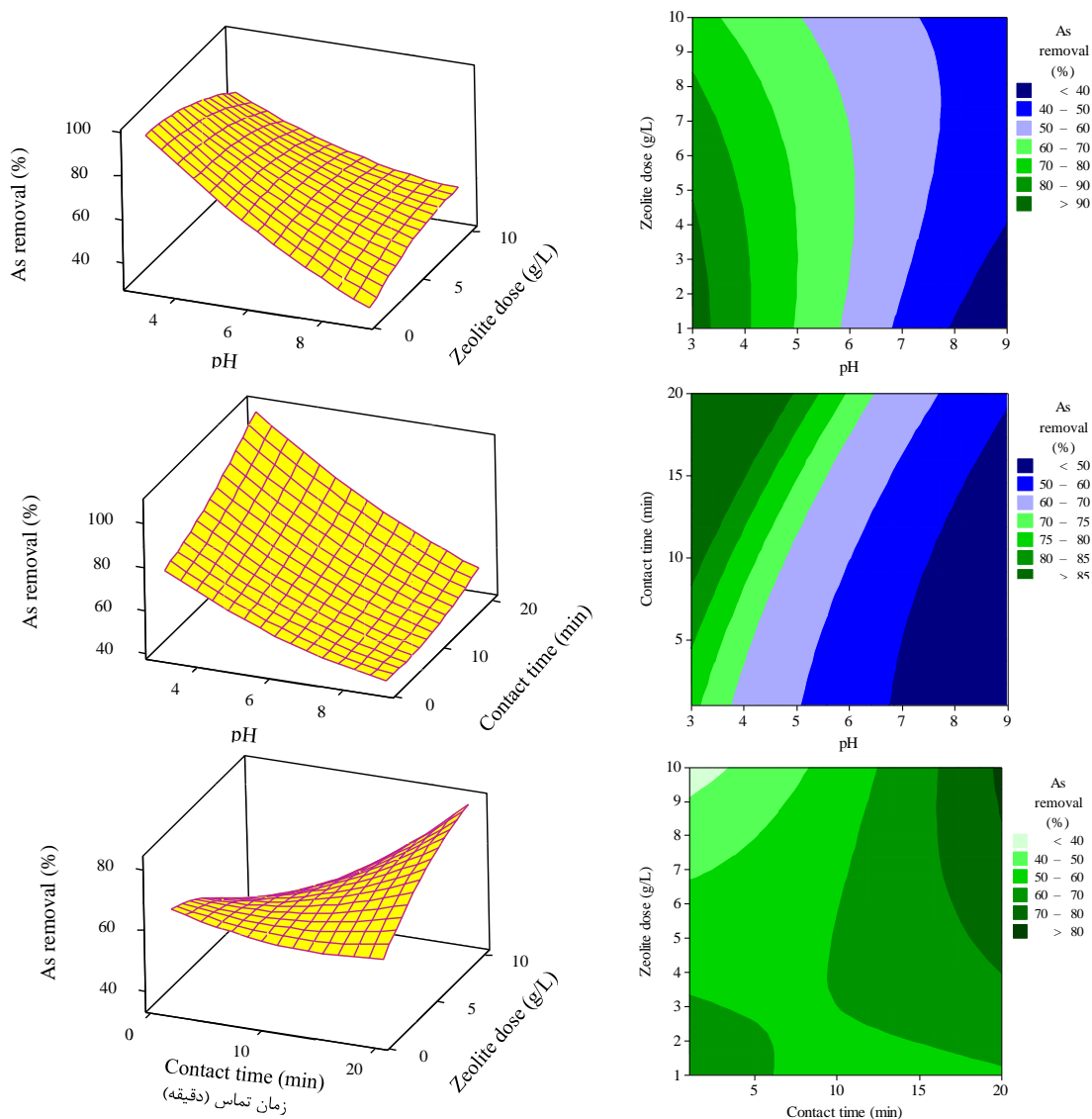
شکل ۴- نتایج تحلیل پارتو برای مقایسه اثر پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی بر حذف آرسنیک
Figure 4. Pareto graph analysis for independent variables of As removal

آرسنیک افزایش می‌یابد تا به تعادل برسد. در زمان‌های اولیه، جذب سریع‌تر بوده و سپس آهسته می‌گردد تا به تعادل می‌رسد؛ به این دلیل که در مراحل اولیه سایت‌های خالی بیشتری در دسترس بوده و با گذشت زمان، اشغال سایت‌های خالی باقی‌مانده به دلیل نیروی دافعه بین مولکول‌های ماده حل‌شونده در فاز جامد و محلول مشکل می‌گردد (Dianati *et al.*, 2013). در تحقیقی که توسط ژان و همکاران (Zhan *et al.*, 2011) بر روی جذب اسید هیومیک زئولیت اصلاح شده با سورفکتانت HDTMA انجام شد، نتایج نشان داد که میزان جذب اسید هیومیک با گذشت زمان افزایش یافت و پس از ۲۵۰ دقیقه به تعادل رسید.

نتایج نشان داد که فرایند جذب سطحی آرسنیک توسط زئولیت به pH، زمان تماس و همچنین مقدار بستگی داشته و بین pH، زمان تماس و همچنین مقدار جذب برهمکنش معنی‌داری وجود دارد (جدول ۵). به عبارت دیگر زمان تماس مطلوب به pH محلول و مقدار جذب نیز بستگی دارد. مقادیر بهینه pH، زمان تماس و مقدار زئولیت برای دستیابی به بهینه حذف آرسنیک به ترتیب ۳/۲، ۱۶/۸ دقیقه و ۱/۰ گرم بر لیتر بدست آمد (جدول ۶).

با افزایش مقدار جاذب راندمان جذب کاهش یافت. این روند کاهشی در ظرفیت جذب با افزایش مقدار جاذب به-خاطر تعداد زیاد سایت‌های غیراشباع جذب است. در واقع با افزایش مقدار جاذب تعداد زیادی از سایت‌های جذبی که می‌تواند در عمل جذب شرکت نماید به صورت آزاد باقی خواهد ماند (Wan & Hanafih, 2008). در تحقیق چوتیا و همکاران (Chutia *et al.*, 2009) برای حذف آرسنیک آب از زئولیت اصلاح‌شده، مشخص گردید که دوز بهینه زئولیت با ابعاد ماکرو ۰/۵ تا ۱ گرم بر لیتر بود. در مطالعه موسوی و همکاران (Moussavi *et al.*, 2017) بر روی حذف اسید هیومیک با زئولیت طبیعی اصلاح‌نشده نیز گزارش شد که با افزایش دوز جاذب از ۲ به ۱۰ گرم بر لیتر، راندمان حذف از ۳۰ به ۸۰ درصد افزایش یافت. دلیل افزایش راندمان حذف را با افزایش میزان جاذب این‌گونه بیان کردند که افزایش نیروهای جذب واندروالس و نیروهای جذب الکترواستاتیکی بین زئولیت طبیعی و مولکول‌های اسید هیومیک باعث افزایش راندمان حذف می‌شود.

همچنین با افزایش زمان تماس محلول با زئولیت، ابتدا کارایی حذف آرسنیک به سرعت زیاد شده و پس از آن، در زمان‌های بیش از ۵ دقیقه کارایی جذب با شیب کمتری افزایش می‌یابد. با افزایش زمان تماس، راندمان حذف



شکل ۵- نمایش سه بعدی و منحنی کنتور تغییرات حذف آرسنیک در مقابل متغیرهای ورودی مدل طرح مرکب مرکزی (pH، زمان تماس (دقیقه) و مقدار زئولیت (گرم بر لیتر))

Figure 5. Response surface plots and meter curve of the As removal as function of pH, contact time (min), and zeolite dosage (g L^{-1})

جدول ۶- مقادیر بهینه پارامترها برای دستیابی به بهینه حذف آرسنیک

Table 6. Optimal values of parameters for achieving optimal arsenic removal

As removal (%)		Zeolite dose (g L^{-1})	Contact time (min)	(pH)
Measured \pm SD	Prediction			
4.43 \pm 92.31	95	1.00	16.77	3.19

توأم متغیرهای pH، زمان تماس و زئولیت براساس تعدادی آزمایش محدود با استفاده از طرح مرکب مرکزی موفقیت آمیز بوده و مدل توسعه داده شده با دقت قابل قبولی ($R^2 = 0.985$) توانایی پیش‌بینی درصد حذف آرسنیک برای دامنه‌ی نسبتاً وسیعی از متغیرهای مستقل را دارد. نتایج تحلیل حساسیت مدل طرح مرکب مرکزی

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش اثر متغیرهایی مانند pH، زمان تماس و مقدار زئولیت بر درصد حذف آرسنیک از محلول آبی توسط زئولیت اصلاح‌شده با CTAB با استفاده از روش پاسخ سطح و بر مبنای طرح مرکب مرکزی به صورت کمی مدل سازی شد. نتایج نشان داد که مدل سازی اثر

ژئولیت اصلاح شده با سورفکتانت می توان از آن به عنوان جاذب با کارایی بالا برای حذف آرسنیک از محلول آبی استفاده کرد. بنابراین با توجه به منبع عظیم ژئولیت در ایران و سادگی اصلاح آن، می توان این منابع ارزان و در دسترس را بطور گسترده در حذف آرسنیک از محیط های آبی بکار برد.

با استفاده از شاخص پارتو بیانگر اهمیت بیشتر pH محلول بر درصد حذف آرسنیک بود. به طور کلی کاهش pH محیط و افزایش مقدار ژئولیت سبب افزایش درصد حذف آرسنیک از محلول شد. در رابطه با اثر زمان تماس نیز نتایج نشان داد که کارایی حذف آرسنیک توسط ژئولیت با افزایش زمان تماس رابطه مستقیم دارد. با توجه به عملکرد قابل قبول و حذف مناسب آرسنیک توسط

Reference

- Baskan M.B., and Pala A. 2011. Removal of arsenic from drinking water using modified natural zeolite. *Desalination*, 281: 396-403.
- Camacho L.M., Parra R.R., and Deng S. 2011. Arsenic Removal from Groundwater by MnO₂-Modified Natural Clinoptilolite Zeolite: Effects of pH and Initial Feed Concentration. *Journal of Hazardous Materials*, 189(1): 286-93.
- Chutia P., Kato S., Kojima T., and Satokawa S. 2009. Adsorption of As (V) on surfactant-modified natural zeolites. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1):204-11.
- Chutia P., Kato S., Kojima T., and Satokawa S. 2009. Adsorption of As (V) on surfactant-modified natural zeolites. *Journal of Hazardous materials*, 162(1): 204-211.
- Dianati R., Kahe D., and Zazouli M. 2013. Efficiency of zeolite clinoptilolite in removal of ammonium ion from polluted waters. *Jouranal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 97: 250-6.
- Gibbons M.K., and Gagnon G.A. 2010. Adsorption of arsenic from a Nova Scotia groundwater onto Water treatment residual Solids. *Water Research*, 44: 5740-5749.
- Hao L., Liu M., Wang N., and LI G. 2018. A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents. *RSC Advances*, 8: 39545-39560.
- Hassan M.M. 2018. Arsenic in groundwater: poisoning and risk assessment. Crc Press.
- Hosseini H.S, Javid A.H., Abromand P., and Hassani A.H. 2017. Removal Arsenic from from aqueous solutions by electrospun alumina nanofiber. *Journal of Environmental Science and Technology*, (19): 1-10. (In Persian)
- ISIRI. 2009. Drinking water -Physical and chemical specifications. Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
- Leung S., Barrington S., Wan Y., Zhao X., and ElHusseini B. 2007. Zeolite (clinoptilolite) as feed additive to reduce manure mineral content. *Bioresource Technology*, 98(17): 3309-3316.
- Mohammadi A., Bina B., Ebrahimi A., Hajizadeh Y., Amin M.M., and Pourzamani H. 2012. Effectiveness of nanozeolite modified by cationic surfactant in the removal of disinfection by-product precursors from water solution. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 1(1): 9-14.
- Moussavi G., Talebi S., Farrokhi M., and Sabouti R.M. 2017. The investigating of mechanism, kinetic and isotherm of ammonia and humic acid co-adsorption onto natural zeolite. *Chemical Engineering Journal*, 171(3): 1159-1172.
- Myers R.H., and Montgomery D.C. 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments, 2nd Ed. John Wiley and Sons, UK.
- Nadafi K., Rastkari N., Nabizadeh R., Gholami M., and Sarkhosh M. 2014. Performance of Modified Natural Zeolite for Removal of 2,4,6-Trichlorophenol from Aqueous Solutions. *Tooloo Behdasht*, 12 (4): 36-47. (In Persian)
- Oremland R.S., and Stolz J.F. 2003. The ecology of arsenic. *Science*, 300: 939-944.
- Pantti S., and Wareham D. 2011. Removal of arsenic from water using the adsorbent: New Zealand iron-sand. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(13): 1533-1538.
- Peng L., Liu Y., Sun J., Wang D., Dai X., and Ni B.J. 2017. Enhancing immobilization of arsenic in groundwater: A model-based evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 166: 449-457.

- Ravenscroft P., Brammer H., and Richards K. 2009. Arsenic pollution: a global synthesis (Vol. 28). John Wiley and Sons.
- Rodríguez A., Sáez P., Díez E., GómezGarcía J.M., and Bernabé I. 2019. Highly efficient low-cost zeolite for cobalt removal from aqueous solutions: Characterization and performance. *Environl Prog Sustain Energy*, 38: 352-365.
- Saboori N., Azizi Mobaser J., and Asadi A. 2018. Arsenic Removal Efficiency in Aqueous Solutions Using Reverse Osmosis and Zero-Valent Iron Nanoparticles. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 28(6): 39-47. (In Persian)
- Salari D., Niaei A., Amanpour J., Mousavi S.M., and Panahi P. 2013. Optimization of Cu/Activate carbon catalyst in low temperature selective catalytical reduction of NO process using response surface methodology. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48: 879-886.
- Šiljeg M., Foglar L., and Gudelj I. 2012. The removal of arsenic from water with natural and modified clinoptilolite. *Chemistry and Ecology*, 28: 75-87.
- Singh R., Singh S., Parihar P., Singh V.P., and Prasad S.M. 2015. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 112: 247-270.
- Taamneh Y., and Sharadqah S. 2017. The removal of heavy metals from aqueous solution using natural Jordanian zeolite. *Applied Water Science*, 2021-2028.
- Targan Ş. 2016. Arsenic (III) Removal from Contaminated Water using Low-Cost Adsorbents: A Batch Adsorption Study. *Celal Bayar University Journal of Science*, 12(3): 437-448.
- Torabian A., Kazemian H., and Seifi L. 2010. Removal of Petroleum Aromatic Hydrocarbons by Surfactantmodified Natural Zeolite: The Effect of Surfactant. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 38(1): 77 - 83.
- Wan Ngah W.S., and Hanafiah M.A.K.M. 2008. Adsorption of copper on rubber (*Hevea brasiliensis*) leaf powder: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Biochemical Engineering Journal*, 39(3):521- 30.
- WHO N. 2011. Nitrite in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinkingwater quality. World Health Organization, Geneva.
- Wingenfelder U., Nowack B., Furrer G., and Schulin R. 2005. Adsorption of Pb and Cd by AmineModified Zeolite. *Water Research*, 39: 3287-3297.
- Zhan Y., Lin J., Qiu Y., Gao N., and Zhu Z. 2011. Adsorption of humic acid from aqueous solution on bilayer hexadecyltrimethyl ammonium bromide-modified zeolite. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 5(1): 65-75.

Quantitative Modeling of Arsenic Removal from Aqueous Solution by CTAB-modified Zeolite Using Central Composite Design

Saeed Mousavi Moghanjooghi¹, Shahrzad Khoramnejadian^{2*}, Ebrahim Fataei^{3*}

(Received: 2022 February Accepted: 2022 February)

Abstract

The presence of arsenic in water is a major problem in communities due to its toxicity and hazard. There are various processes to remove arsenic from water. The purpose of this study was to evaluate the removal efficiency of arsenic by CTAB-modified clinoptilolite zeolite from aqueous solution, and modeling the effects of pH (3-9), contact time (1-20 min), and different amounts of CTAB-modified zeolite (1-10 gr L⁻¹) on arsenic removal. A Central composite design with 20 experiments was employed to evaluate the effects of the coded independent variables on arsenic removal. Results indicated that the central composite design has high efficiency ($R^2= 0.985$) in predicting arsenic removal. Sensitivity analysis of the central composite design revealed that the pH is the most important factors in arsenic removal, so that the percentage effect of these factors on arsenic removal is 71. Contact time also had a significant effect on arsenic removal. Optimal pH, contact time and zeolite values for maximum arsenic removal were obtained 3.2, 16.8 minutes and 0.1 g L⁻¹, respectively. Results from this study suggested that, the zeolite modified with CTAB can be used as an effective and inexpensive adsorbent to remove arsenic from aqueous solutions, since it is a low-cost, abundant and locally available.

Keywords: Zeolite, Arsenic, Removal efficiency, Modeling, Central composite design

Mousavi Moghanjooghi S., Khoramnejadian SH., Fataei E. 2023. Quantitative Modeling of arsenic removal from aqueous solution by CTAB-modified Zeolite. *Applied Soil Research*, 11(1):87-99.

1. Department of Environment, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, IRAN

2. Department of Environment, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, IRAN

3. Department of Environment, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, IRAN

* Corresponding Author Email: khoramnejadian@yahoo.com; ebfataei@gmail.com