

بررسی کارایی فرآیند انعقاد تشدید یافته با استفاده از سیلیکای فعال در تصفیه آب و حذف اسیدهای هیومیک

انوشیروان محسنی بندپی^{۱*}، فاطمه سلیمانی^۲، محمد رفیعی^۲، عباس اکبرزاده^۳

^۱ مرکز تحقیقات کیفیت هوا و تغییر اقلیم، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۲ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۳ مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی

چکیده

زمینه و اهداف: کدورت و مواد آلی طبیعی (NOM) از مهم‌ترین آلاینده‌های مؤثر بر کیفیت آب هستند و می‌توانند کارایی فرآیندهای تصفیه را کاهش دهند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی فرآیند انعقاد تشدید یافته با استفاده از کلوروفریک همراه با سیلیکای فعال در تصفیه آب و حذف اسیدهای هیومیک انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه از روش سطح پاسخ (RSM) با طرح مرکب مرکزی (CCD) و جارتست برای ارزیابی تأثیر پارامترهای کدورت اولیه، TOC اولیه، قلیائیت و غلظت منعقدکننده کلوروفریک و سیلیکای فعال بر فرآیند انعقاد استفاده شد. برای حذف کدورت و اسید هیومیک از نمونه‌های سنتتیک آب دارای کدورت اولیه ۴۵-۵ NTU و TOC اولیه ۱۲-۲ mg/L و کلوروفریک در غلظت ۵-۲۵ mg/L و سیلیکای فعال با غلظت ۱۰-۲ mg/L SiO₂ مورد استفاده قرار گرفتند. در انجام این پژوهش و استفاده از منابع، رعایت موازین اخلاقی انجام گردید.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان داده که مدل درجه دوم پیشنهادی برای کارایی حذف کدورت با ضریب همبستگی $R^2=0/9909$ و برای کارایی حذف TOC با ضریب همبستگی $R^2=0/9800$ مناسب بودن رفتار فرآیند را پیش‌بینی می‌نماید و در شرایط بهینه کدورت اولیه ۱۰ NTU، TOC به میزان ۸ mg/L، قلیائیت ۱۴۰ mg/L CaCO₃ و غلظت کلوروفریک ۲۵ mg/L به همراه ۱۰ mg/L SiO₂ راندمان حذف کدورت و TOC، ۸۱٪ و ۸۳/۷۵٪ بود.

نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که استفاده هم‌زمان از کلوروفریک و سیلیکای فعال موجب افزایش چشمگیر در راندمان حذف کدورت و TOC می‌شود و نسبت به فرآیند متداول تصفیه با کلوروفریک، کارایی بالاتری را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: انعقاد تشدید یافته؛ سیلیکای فعال؛ کدورت؛ مواد آلی طبیعی (NOM)؛ فرآورده‌های جانبی گندزدایی (DBPs).

Please cite this article as: Mohseni Bandpey A, Soleimani F, Rafiee M, Akbarzadeh A. The efficacy study of enhanced coagulation using activated silica in water treatment and removal of humic acids. Journal of Health in the Field 2025; 13(3):28-36. **Doi:** <https://doi.org/10.22037/jhf.v13i3.47232>.

*نویسنده مسئول: گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

Email: amohsenibandpi@sbmu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

مقدمه

در طول سال‌ها، تقاضا برای آب آشامیدنی سالم و با کیفیت بالا به طور قابل توجهی افزایش یافته است و این یکی از مهمترین چالش‌ها برای بشریت در جوامع، به ویژه در کشورهای در حال توسعه است [۱]. در میان منابع گوناگون تأمین آب، آب‌های سطحی منبع اصلی تأمین آب آشامیدنی هستند [۲]. در کشورهای در حال توسعه و صنعتی، شهرنشینی، رشد سریع جمعیت، گسترش صنایع و فعالیت‌های کشاورزی منجر به آلودگی قابل توجه آب‌های سطحی توسط آلاینده‌های مختلف آلی و معدنی شده و نگرانی‌های قابل توجهی را در این زمینه ایجاد کرده است [۳]. کدورت و مواد آلی طبیعی از جمله مهمترین آلاینده‌های منابع آب هستند که می‌توانند بر کیفیت آب و فرآیندهای تصفیه آن تأثیر منفی بگذارند [۲]. مواد آلی طبیعی (Natural Organic Matter: NOM) مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات آلی گوناگون است که از تجزیه گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌های زنده و مرده مشتق شده و به طور گسترده در منابع آب وجود دارند [۴]. مواد آلی طبیعی موجود در آب‌ها بر اساس قطبیت به دو دسته آب‌گریز و آب‌دوست تقسیم می‌شوند. بخش آب‌گریز از مواد هیومیک شامل اسیدهای هیومیک، اسیدهای فولیک و هیومین است و بخش آب‌دوست از مواد غیرهیومیک مانند پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و پلی‌ساکاریدها تشکیل شده است [۵]. مواد هیومیک به ویژه اسیدهای هیومیک، یکی از اجزای اصلی مواد آلی طبیعی در منابع آب هستند [۶]. وجود مواد آلی طبیعی در آب خام باعث مشکلات متعددی از جمله اثرات نامطلوب بر کیفیت ظاهری آب، مانند طعم نامطبوع، بو و رنگ زرد مایل به قهوه‌ای، گرفتگی غشا، تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین و افزایش حمل و نقل آنها، رشد مجدد باکتری‌ها در شبکه توزیع و همچنین تشکیل فرآورده‌های جانبی گندزدایی (Disinfection By Products: DBPs) می‌شود [۷]. گندزدایی آب یکی از مهمترین مراحل تصفیه آب آشامیدنی است که در از بین بردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در طول تصفیه آب آشامیدنی و جلوگیری از بیماری‌های منتقله از آب مانند حصبه و وبا نقش دارد [۸]. طیف وسیعی از گندزداها مانند کلر، کلرامین، ازن، دی‌اکسید کلر و اشعه ماوراء بنفش (UV) مورد استفاده قرار می‌گیرند که در بین این گندزداها، کلر به دلیل هزینه پایین، راندمان بالا در از بین بردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و ماندگاری در شبکه توزیع بیشترین کاربرد را در سطح جهان و از جمله ایران دارد [۹]. در اثر واکنش مواد آلی طبیعی موجود در آب و عوامل گندزدا از جمله کلر، ترکیبات جدیدی به نام فرآورده‌های جانبی گندزدایی تشکیل می‌شود [۱۰]. در حال حاضر بیش از ۷۰۰ فرآورده جانبی گندزدایی شناسایی و گزارش شده است [۱۱] که در میان آن‌ها، تری‌هالومتان‌ها (Trihalomethanes: THMs) و هالواسیتیک‌اسیدها (Haloacetic acids: HAAs) در بالاترین غلظت در آب آشامیدنی تصفیه شده یافت می‌شوند [۱۲]. بر اساس مطالعات

سم‌شناسی و اپیدمیولوژیک، قرار گرفتن مزمن در معرض DBPs پیامدهایی از جمله سرطان مثانه، روده بزرگ و معده، نارسایی کلیه و کبد و همچنین اثرات نامطلوبی را بر تولید مثل همچون ناباروری، سقط جنین، نقایص مادرزادی، مرده‌زایی و کاهش رشد نوزادان دارد [۱۳، ۱۴]. با توجه به اثرات نامطلوب فرآورده‌های جانبی گندزدایی بر سلامت انسان، آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا (USEPA)، حداکثر غلظت آلاینده برای مجموع تری‌هالومتان‌ها (THM4)؛ کلرو فرم، برومو فرم، برومو دی کلرومتان، کلرو دی برومومتان) و پنج هالواسیتیک اسید (HAA5؛ مونو کلرو استیک اسید، مونو برومو استیک اسید، دی کلرو استیک اسید، دی برومو استیک اسید، تری کلرو استیک اسید) را به ترتیب ۸۰ میکروگرم در لیتر و ۶۰ میکروگرم در لیتر گزارش کرده است [۱۵]. با توجه به تشکیل ترکیبات بالقوه سرطان‌زا و همچنین اتخاذ استانداردهای سختگیرانه، به حداقل رساندن یا حذف مؤثر پیش‌سازهای فرآورده‌های جانبی گندزدایی قبل از مرحله گندزدایی یک مسئله حیاتی در تولید آب آشامیدنی با کیفیت بالا است [۱۶]. در طی چندین سال گذشته روش‌های متعددی برای حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب مطرح شده است که شامل تبادل یونی، جذب سطحی، فرآیندهای غشایی، اکسیداسیون پیشرفته، انعقاد و انعقاد تشدید یافته می‌باشد [۱۷-۲۰]. در میان این فرآیندها، آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا، انعقاد تشدید یافته را به عنوان روشی کارآمد در حذف مواد آلی طبیعی از آب آشامیدنی به دلیل مزایای متعدد از جمله هزینه سرمایه‌گذاری پایین، عدم نیاز به ساخت سازه‌های جدید، عدم اشغال زمین، هزینه‌های عملیاتی پایین، عدم نیاز به تغییر در سیستم تصفیه موجود و راندمان بالای حذف پیش‌سازهای فرآورده‌های جانبی گندزدایی، توصیه می‌کند [۲۱].

انعقاد تشدید یافته بهبود شرایط انعقاد از طریق روش‌هایی از جمله افزودن مقدار بیش از حد منعقدکننده نسبت به حذف کدورت، کنترل pH و یا افزودن کمک منعقدکننده برای دستیابی به حذف مواد آلی طبیعی اشاره دارد [۲۲]. اگرچه سولفات آلومینیوم (آلوم) و نمک‌های آهن به دلیل عملکرد تأیید شده، در دسترس بودن گسترده و مقرون به صرفه بودن، منعقدکننده رایج در تصفیه آب هستند اما بر اساس سوابق منتشر شده، در صورت استفاده از نمک‌های آهن، غلظت آهن در آب تصفیه شده افزایش می‌یابد و باقیمانده منعقدکننده‌های مبتنی بر آهن باعث افزایش خوردگی آب و همچنین گرفتگی لوله‌ها می‌شود که نیاز به تعویض لوله‌ها و یا نیاز به تعمیر و نگهداری گران قیمت را به دنبال دارد [۲۳]. بنابراین، برای کاهش اثرات نامطلوب استفاده از منعقدکننده کلروفریک بر سلامت انسان و محیط زیست، لزوم استفاده از منعقدکننده‌های کارآمد جدید یا کمک منعقدکننده‌ها با عملکرد مناسب برای حذف NOM و کدورت ضروری است [۲۴]. سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) یکی از پرکاربردترین ترکیبات شیمیایی است که به طور

۱۲-۲، قلیائیت در محدوده CaCO_3 ۵۰-۱۵۰ mg/L و میزان تزریق کلرورفریک ۵-۲۵ mg/L و سیلیکای فعال ۴۰٪ نسبت به کلرورفریک مورد بررسی قرار گرفت. بررسی همزمان متغیرهای مستقل، طراحی آزمایش و آنالیز و بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار Design Expert با استفاده از روش سطح-پاسخ (RSM) انجام گرفت. جدول شماره ۱ متغیرهای مستقل و سطوح مد نظر ارائه شده است.

جدول ۱- متغیرهای مستقل و سطوح آنها در آزمایشات CCD

Table 1- Independent variables and their levels in central composite design (CCD) experiments

نام متغیر	واحد	سطح متغیر				
		-α	-۱	۰	+۱	+α
کدورت	NTU	۵	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵
TOC	mg/L	۲	۴/۵	۷	۹/۵	۱۲
قلیائیت	mg/L CaCO_3	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰
غلظت کلرورفریک	mg/L	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵

آزمایشات انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از دستگاه جارتست مدل (PHIPPS & BIRD STIRRED, 7790-42) و در دمای اتاق انجام گردید. در فرآیند انعقاد ابتدا اختلاط سریع به مدت ۱ دقیقه و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه، سپس دو مرحله اختلاط کند ۷/۵ دقیقه‌ای با سرعت ۴۰ و ۲۰ دور در دقیقه انجام گردید و در نهایت، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه جهت ته‌نشینی در حالت سکون قرار گرفتند [۳۱]. پس از ته‌نشینی از عمق ۱۰ سانتی‌متری سطح آب توسط پیت نمونه‌برداری و پارامترهای مورد نظر اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است نتایج حاصل از آزمایشات، میانگین سه بار تکرار آزمایش‌ها است. آزمایش‌ها بر اساس روش‌های مندرج در کتاب Standard Methods for the Examination of water and wastewater صورت گرفت [۳۲]. بر این اساس کدورت با استفاده از کدورت‌سنج (HACH, 2100N) و TOC با استفاده از اسپکتروفتومتر (UV-VIS HACH DR5000TM) اندازه‌گیری شد. کارایی حذف (RE) در فرآیند انعقاد-لخته‌سازی با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید:

$$RE (\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

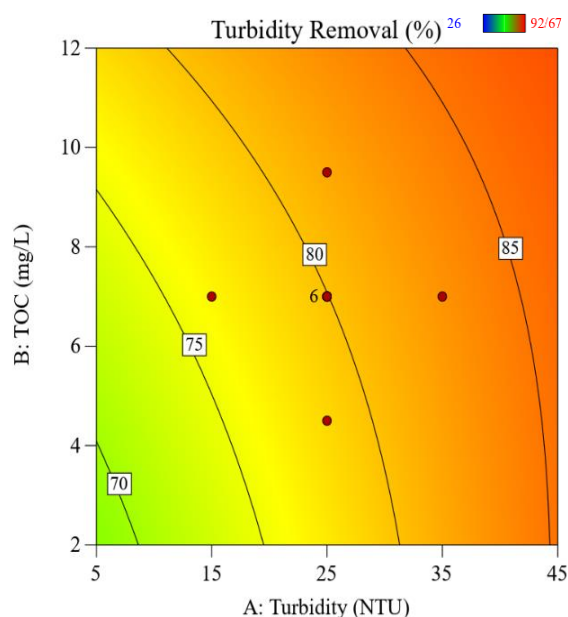
که در آن C_0 و C_e غلظت اولیه و نهایی هستند [۳۳].

پس از انجام آزمایشات و وارد کردن مقادیر پاسخ در جدول طراحی آزمایش نرم‌افزار، مدل مناسب انتخاب گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمون ANOVA انجام شد که طی آن شاخص‌های عدم برازش (Lack of fit)، P-value، F-value و ضریب تعیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفتند [۳۴]. مقدار F-value بیانگر میزان معناداری مدل است به

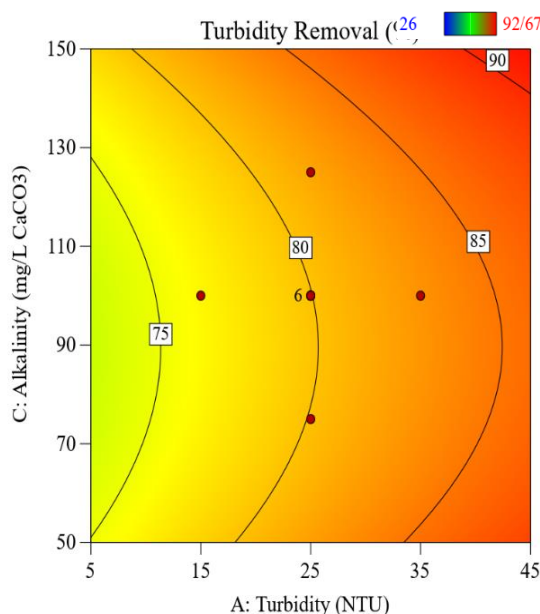
گسترده در صنایع شیشه و بلور، کاشی و سرامیک، کاغذسازی، ساخت چسب، رنگ، مواد شوینده و صنایع آب و فاضلاب کاربرد دارد [۲۵]. عنصر اصلی سیلیکات سدیم، سیلیس (Si) است که تقریباً ۲۸٪ از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد و به دلیل دامنه کاربرد وسیع، غیرسمی و ارزان بودن حجم زیادی از آن تولید می‌شود [۲۶]. سیلیکای فعال که از واکنش سیلیکات سدیم با عوامل فعال‌کننده، از جمله سولفوریک اسید، هیدروکلریک اسید، دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، تری‌اکسید گوگرد و کلر تهیه می‌شود، اولین فلوکولانت مورد استفاده در تصفیه آب بود و اولین کاربرد آن در صنعت تصفیه آب و فاضلاب توسط گراهام در سال ۱۸۸۴ گزارش گردید [۲۷]. مطالعات نشان داده است که استفاده از سیلیکای فعال در انعقاد، موجب افزایش اندازه، چگالی ذرات و سرعت تشکیل ذرات، ته‌نشینی سریع‌تر و اغلب صرفه‌جویی در هزینه‌های تصفیه شیمیایی ناشی از کاهش مقدار آلوم یا نمک‌های آهن مورد نیاز برای انعقاد می‌شود [۲۸]. مطالعه حاضر با هدف بررسی کارایی فرآیند انعقاد تشدید یافته با استفاده از سیلیکای فعال در حذف کدورت و اسیدهای هیومیک، با استفاده از آزمایش جار و روش سطح پاسخ (RSM)، از آب دارای کدورت و اسید هیومیک مصنوعی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه از نوع تجربی-آزمایشگاهی بوده و در آزمایشگاه شیمی محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی در سال ۱۴۰۳ و بر روی نمونه‌های سنتتیک آب دارای کدورت و اسید هیومیک انجام شد. جهت تهیه کدورت سنتتیک از کائولن $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ ساخت شرکت سیگما آلدریج استفاده گردید. مقدار ۱۰ گرم کائولن توزین و در بالن ۱۰۰۰ mL به حجم رسانده شد و به مدت ۲۰ دقیقه بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا پراکندگی یکنواخت ذرات کائولن ایجاد شود. محلول فوق به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد و سپس از مایع رویی جمع‌آوری گردید و از این سوسپانسیون به عنوان محلول استوک برای تهیه نمونه‌های آب با کدورت‌های مورد نظر برای آزمایشات انعقاد استفاده گردید [۲۹] و همچنین جهت تهیه TOC‌های مختلف از استوک اسید هیومیک استفاده گردید که به منظور تهیه محلول استوک اسید هیومیک (HA)، مقدار ۱ گرم اسید هیومیک پودری ساخت شرکت سیگما آلدریج، توزین و در بالن ۱۰۰۰ mL با آب مقطر به حجم رسانده شد و pH محلول با استفاده از NaOH ۰/۱ مولار بر روی ۱۰ تنظیم گردید. محلول فوق به مدت ۲۴ ساعت به منظور اختلاط کامل بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و پس از آن با استفاده از کاغذ صافی و سپس با استفاده از فیلتر غشائی $0/45 \mu$ صاف گردید تا مواد معلق حذف گردد. در نهایت محلول استوک در شرایط تاریکی و دمای ۴ درجه سانتیگراد نگهداشته شد [۳۰]. میزان راندمان حذف کدورت و TOC در محدوده کدورت ۵-۴۵ NTU، TOC در محدوده



شکل ۱- تأثیر دو متغیر کدورت و TOC بر کارایی حذف کدورت
Figure 1- Effects of turbidity and TOC on turbidity removal efficiency



شکل ۲- تأثیر دو متغیر کدورت و قلیائیت بر کارایی حذف کدورت
Figure 2- Effects of turbidity and alkalinity on turbidity removal efficiency

تأثیر پارامترهای TOC و کدورت بر کارایی حذف TOC در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که شکل نشان می‌دهد در غلظت ثابت کلروفریک ۱۵ mg/L به همراه سیلیکای فعال ۶ mg/L SiO₂

گونه‌ای که افزایش مقدار آن نشان‌دهنده اعتبار آماری بالاتر مدل می‌باشد. همچنین مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ تاییدکننده معنی‌داری مدل محسوب می‌شود. در نهایت، متغیر پاسخ در قالب مدل رگرسیون چندجمله‌ای ارائه شد که در معادله (۲) به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل نمایش داده شده است [۳۵].

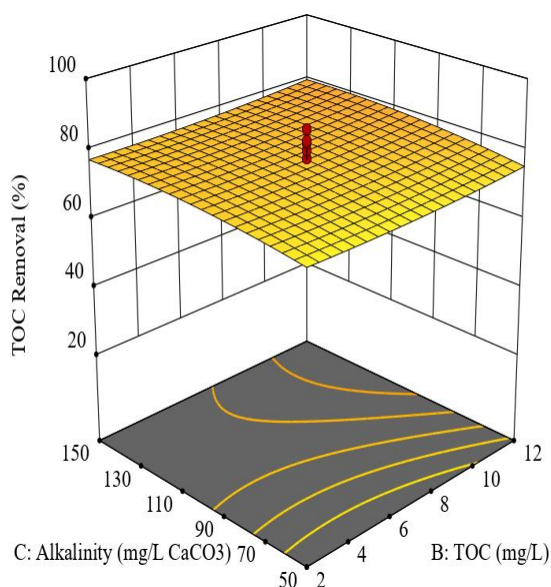
$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

که در معادله فوق، Y پاسخ پیش بینی شده، b₀ ضریب ثابت، k تعداد متغیرهای مستقل، b_{ij}، b_{ii}، b_i به ترتیب ضرایب خطی، مربع و درجه دوم، x_i و x_j متغیرهای مستقل و ε عبارت باقیمانده (خطای آزمایش) است [۳۶]. در انجام این پژوهش در تمامی مراحل انجام آزمایشات و همچنین استفاده از منابع، رعایت موازین اخلاقی انجام شد.

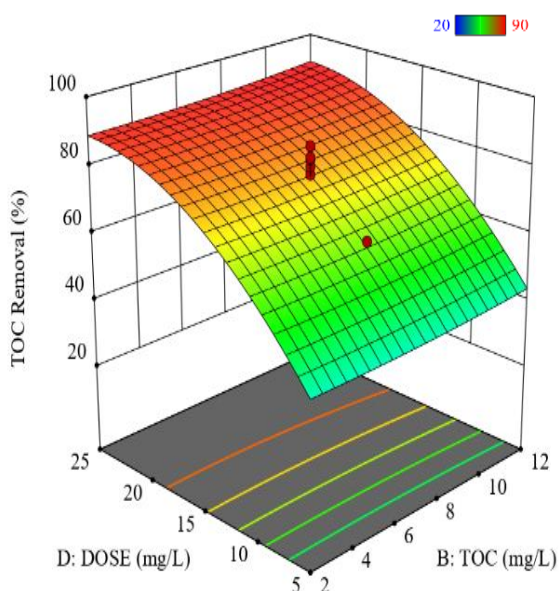
یافته‌ها

شکل (۱) تأثیر متقابل دو متغیر مستقل کدورت و TOC در قلیائیت ۱۵۰ mg/L CaCO₃ و غلظت ۱۵ mg/L کلروفریک به همراه ۶ mg/L SiO₂ سیلیکای فعال بر راندمان حذف کدورت را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش کدورت و TOC راندمان حذف کدورت افزایش یافته است. در محدوده کدورت ۳۵-۴۵ NTU و TOC ۷-۱۲ میلی گرم در لیتر بیشترین راندمان حذف (۸۵٪) می‌باشد و در محدوده کدورت ۵-۱۰ NTU و TOC ۲-۴ میلی گرم در لیتر کمترین راندمان حذف (۷۰٪) می‌باشد. همچنین مطابق جدول ANOVA این برهمکنش با P < ۰/۰۰۰۱ تأثیر معناداری بر کارایی حذف کدورت داشته است. تأثیر دو متغیر کدورت و قلیائیت بر راندمان حذف کدورت در شکل (۲) نمایش داده شده است. با توجه به شکل، افزایش کدورت و قلیائیت اثر افزایشی بر کارایی حذف کدورت داشته است. پس بنابر نمودار بالاترین کارایی حذف (۹۰٪) در کدورت ۱۵-۴۵ NTU و قلیائیت ۱۴۰-۱۵۰ mg/L CaCO₃ به دست آمده است، همچنین مطابق جدول ANOVA برهمکنش بین این دو متغیر تأثیر معناداری در کارایی حذف کدورت نداشته است (P = ۰/۹۸۵۶). تأثیر متقابل دو متغیر مستقل کدورت و غلظت منعقدکننده بر کارایی حذف کدورت در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل، افزایش کدورت و افزایش غلظت منعقدکننده اثر افزایشی بر کارایی حذف کدورت داشته است. به‌صورتی که در محدوده کدورت ۴۰-۴۵ NTU و غلظت کلروفریک ۱۷-۲۳ mg/L به همراه غلظت سیلیکای فعال ۶/۸-۹/۲ mg/L SiO₂ بیشترین راندمان برابر با ۹۰٪ و در محدوده کدورت ۵-۱۵ NTU و غلظت کلروفریک ۵-۷ mg/L به همراه غلظت سیلیکای فعال ۲-۲/۸ mg/L SiO₂ کمترین راندمان حذف برابر با ۴۰٪ می‌باشد.

و TOC راندمان حذف TOC افزایش یافته است. در TOC ۱۱-۱۲ میلی گرم در لیتر و قلیائیت CaCO_3 ۱۵۰-۱۰۰ بیشترین کارایی حذف TOC (۷۹٪) حاصل شده است.

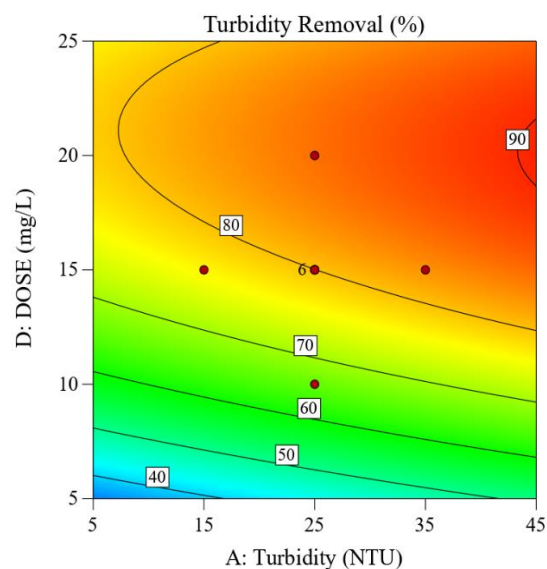


شکل ۵- تأثیر دو متغیر TOC و قلیائیت بر کارایی حذف TOC
Figure 5- Effects of TOC and alkalinity on TOC removal efficiency

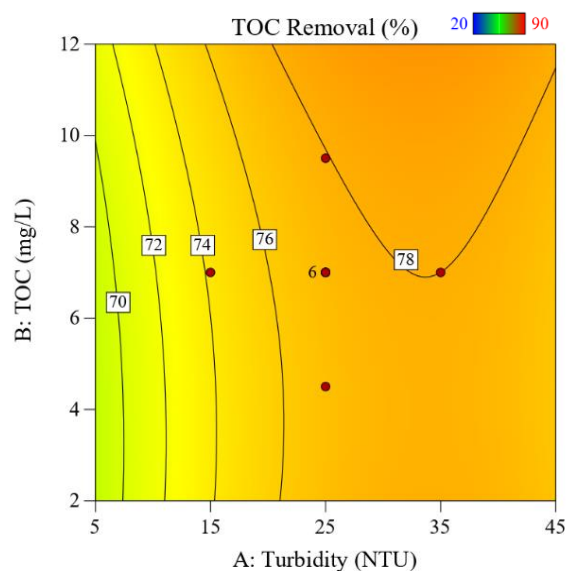


شکل ۶- تأثیر دو متغیر TOC و غلظت منعقدکننده بر کارایی حذف TOC
Figure 6- Effects of TOC and coagulant concentration on TOC removal efficiency

افزایش کدورت و افزایش TOC راندمان حذف TOC افزایش یافته است. به صورتی که در محدوده کدورت ۲۰-۴۵ NTU و TOC ۷-۱۲ میلی گرم در لیتر بالاترین راندمان حذف TOC برابر با ۷۸٪ می باشد.



شکل ۳- تأثیر دو متغیر کدورت و غلظت منعقدکننده بر کارایی حذف کدورت
Figure 3- Effects of turbidity and coagulant concentration on turbidity removal efficiency



شکل ۴- تأثیر دو متغیر کدورت و TOC بر کارایی حذف TOC
Figure 4- Effects of turbidity and TOC on TOC removal efficiency

تأثیر همزمان دو متغیر TOC و قلیائیت بر کارایی حذف TOC در شکل ۵ نمایش داده شده است و نتایج حاکی از آن است که با افزایش قلیائیت

بحث

یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در فرآیند انعقاد تشدید یافته، کدورت و TOC اولیه می‌باشد. در این مطالعه کدورت اولیه در محدوده NTU ۴۵-۵ و TOC اولیه ۱۲-۲ میلی گرم در لیتر مورد مطالعه قرار گرفت، همان طور که نمودار ۱ و ۴ نشان می‌دهد، افزایش کدورت و TOC اولیه منجر به افزایش کارایی حذف کدورت و TOC می‌شود، به طوری که با افزایش کدورت از ۵ تا NTU ۴۵ و TOC از ۲ تا ۱۲ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف کدورت از ۷۰٪ به ۸۵٪ و راندمان حذف TOC از ۷۰٪ به ۷۸٪ افزایش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان به افزایش تعداد ذرات کلوئیدی موجود در آب نسبت داد که احتمال برخورد میان ذرات و ماده منعقدکننده را بیشتر کرده و منجر به تشکیل فлак می‌گردد. همچنین کدورت بیشتر به معنای وجود ذرات بیشتر است که می‌توانند مواد آلی را جذب کرده و کمپلکس تشکیل دهند، در نتیجه راندمان حذف TOC افزایش می‌یابد [۳۷].

قلیائیت یکی دیگر از عوامل مؤثر در فرآیند انعقاد می‌باشد. تغییرات قلیائیت در محدوده ۵۰ تا ۱۵۰ mg/L CaCO₃ اعمال شد و تأثیر آن بر راندمان حذف کدورت و TOC سنجیده شد. نتایج نشان داد که با افزایش قلیائیت کارایی حذف افزایش می‌یابد به طوری که قلیائیت برابر با ۱۵۰ mg/L CaCO₃ بهترین راندمان را از خود نشان می‌دهد. دلیل افزایش کارایی حذف با افزایش قلیائیت را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که منعقدکننده کلوروفریک قلیائیت را در مکانیسم انعقاد جارویی مصرف کرده و به گونه‌های هیدروکسید آهن نامحلول تبدیل می‌شوند و در نهایت سیلیکای فعال با ایجاد پل میان فлак‌های تشکیل شده باعث ایجاد لخته‌های سنگین‌تر می‌گردد [۳۷].

در فرآیند انعقاد، غلظت منعقدکننده یکی از مهمترین مسائلی است که باید مورد توجه قرار گیرد. کلوروفریک در محدوده ۵ تا ۲۵ میلی گرم در لیتر و سیلیکای فعال در محدوده ۱۰-۲ mg/L SiO₂ اعمال شد و تأثیر آن بر کارایی حذف کدورت و TOC مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده در قلیائیت ثابت با افزایش غلظت منعقدکننده راندمان حذف کدورت و TOC افزایش می‌یابد. همان طور که نمودار ۳ و ۶ نشان می‌دهد، وقتی کدورت و قلیائیت ثابت و برابر با ۲۵ NTU و ۱۰۰ mg/L CaCO₃ و غلظت کلوروفریک برابر با ۵ میلی گرم بر لیتر باشد، راندمان حذف کدورت برابر با ۴۰٪ است و هنگامی که غلظت کلوروفریک به ۲۵ میلی گرم بر لیتر برسد، کارایی حذف کدورت به ۹۰٪ می‌رسد و همچنین بیشترین راندمان حذف TOC در غلظت کلوروفریک ۲۵ میلی گرم بر لیتر برابر با ۹۰٪ می‌باشد.

دلیل این امر را می‌توان اینگونه اظهار داشت که ذرات کلوئیدی دارای بار سطحی منفی و مواد هیومیک پلی الکترولیت‌های آنیونی هستند و در صورت افزودن کلوروفریک به عنوان منعقدکننده به یون Fe³⁺ هیدرولیز شده و با خنثی سازی بار منفی کلوئیدها و اسیدهای هیومیک

تأثیر همزمان دو متغیر TOC و غلظت منعقدکننده بر کارایی حذف TOC در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش دوز منعقدکننده کارایی حذف افزایش یافته همچنین با افزایش TOC کارایی حذف TOC به مقدار جزئی افزایش یافته است. در TOC ۹-۱۲ mg/L و غلظت کلوروفریک ۲۵-۲۰ mg/L و غلظت سیلیکای فعال ۱۰-۸ mg/L SiO₂ بیشترین راندمان حذف (۹۰٪) حاصل شده است. شکل (۷) تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از انجام فرآیند انعقاد تشدید یافته با استفاده از کلوروفریک به همراه سیلیکای فعال را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- (الف) نمونه آب سنتتیک پیش از انجام فرآیند، (ب) نمونه آب پس از انجام فرآیند انعقاد تشدید یافته با استفاده از کلوروفریک به همراه سیلیکای فعال و (ج) نمایی از لخته‌های تشکیل شده

Figure 7- (a) Synthetic water sample before the process, (b) water sample after the enhanced coagulation process using ferric chloride with activated silica, and (c) an illustration of the formed flocs

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری تمام افراد و سازمان‌هایی که در انجام پژوهش همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تضاد یا تعارض منافی ندارند.

تامین مالی مطالعه

مقاله بدون حمایت مالی انجام گرفته است.

ملاحظات اخلاقی

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط با کد اخلاق IR.SBMU.PHNS.REC.1403.055 می‌باشد. مصوب دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

ایده و طراحی مطالعه: انوشیروان محسنی بندپی، محمد رفیعی، عباس اکبرزاده، فاطمه سلیمانی
جمع‌آوری داده‌ها: فاطمه سلیمانی
تحلیل و تفسیر داده‌ها: محمد رفیعی، فاطمه سلیمانی
نگارش پیش‌نویس مقاله: فاطمه سلیمانی
بازبینی مقاله از نظر محتوای علمی: فاطمه سلیمانی

استفاده از هوش مصنوعی

در تدوین این مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

از طریق مکانیسم جذب سطحی و خنثی سازی بار باعث ناپایداری آنها و در نتیجه حذف کدورت می‌شوند. با این حال، با افزایش هر چه بیشتر غلظت کلرورفریک، رسوبات هیدروکسید فلزی $Fe(OH)_3$ تشکیل می‌شود. این رسوبات سنگین‌تر از آب بوده و ضمن ته‌نشین شدن کلوئیدها و اسیدهای هیومیک را به دام انداخته و ته‌نشین می‌نمایند (مکانیسم انعقاد جارویی). در ادامه لخته‌های کوچک به دلیل عدم وجود نیروی دافعه الکترواستاتیک تشکیل می‌شوند و سیلیکای فعال با ایجاد پل میان این لخته‌ها منجر به تشکیل لخته‌های بزرگتر قابل ته‌نشین می‌گردد [۳۸]. در مطالعه Sun و همکارانش در سال ۲۰۱۸ در صورت استفاده از منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید راندمان حذف DOC 79% و در صورت استفاده از پلی‌ساکارید استخراج شده از انترومورفا (EP) به همراه منعقدکننده اصلی راندمان حذف DOC به 94% افزایش یافته است [۳۹]. بر اساس مطالعه Zhao در سال ۲۰۱۴ با افزایش دوز آلوم و کلرورفریک از ۵ تا ۶۰ میلی گرم در لیتر، راندمان حذف DOC افزایش یافته است و در دوز بهینه 60 mg/L راندمان حذف DOC با استفاده از منعقدکننده آلوم و کلرورفریک به ترتیب برابر 43% و 57% حاصل گردیده است [۴۰].

نتیجه‌گیری

فرآیند انعقاد تشدید یافته با استفاده از کلرورفریک به همراه سیلیکای فعال برای حذف کدورت و اسید هیومیک از نمونه آب سنتتیک مورد استفاده قرار گرفت و تأثیر پارامترهایی همچون کدورت اولیه، TOC اولیه، قلیائیت و غلظت منعقدکننده با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش و طرح مرکب مرکزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تحت شرایط بهینه که شامل کدورت اولیه 10 NTU ، TOC اولیه 8 mg/L در لیتر، قلیائیت 140 mg/L CaCO_3 و غلظت کلرورفریک 25 mg/L به همراه غلظت سیلیکای فعال 10 mg/L SiO_2 ، 81% از کدورت و 83% از TOC حذف گردید.

References

- 1- Ribeiro AR, Nunes OC, Pereira MFR, Silva AMT. An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. Environment International 2015; 75:33-51.
- 2- Dayarathne N, Angove MJ, Aryal R, Abuel-Naga H, Mainali B. Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. Journal of Water Process Engineering 2021; 40:101820. Doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101820.

- 3- Tshindane P, Mamba PP, Moss L, Swana UU, Moyo W, Motsa MM, et al. The occurrence of natural organic matter in South African water treatment plants. Journal of Water Process Engineering. 2019; 31:100809. Doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100809.
- 4- Särkkä H, Vepsäläinen M, Sillanpää M. Natural organic matter (NOM) removal by electrochemical methods— A review. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2015; 755:100-08.
- 5- Anderson LE, DeMont I, Dunnington DD, Bjorndahl P, Redden DJ, Brophy MJ, et al. A review of long-term change in surface water natural organic matter concentration in the northern hemisphere and the

- implications for drinking water treatment. *Sci Total Environ* 2023; 858(Pt 1):159699. Doi: 10. 1016/ j. scitotenv. 2022.159699.
- 6- Tang S, Tang J, Yuan D, Wang Z, Zhang Y, Rao Y. Elimination of humic acid in water: Comparison of UV/PDS and UV/PMS. *RSC Adv* 2020; 10(30):17627-34.
- 7- Tak S, Vellanki BP. Natural organic matter as precursor to disinfection byproducts and its removal using conventional and advanced processes: State of the art review. *Journal of Water & Health* 2018; 16(5):681-703.
- 8- Srivastav AL, Patel N, Chaudhary VK. Disinfection by-products in drinking water: Occurrence, toxicity and abatement. *Environ Pollution* 2020; 267:115474. Doi: 10.1016/j.envpol.2020.115474.
- 9- Gilca AF, Teodosiu C, Fiore S, Musteret CP. Emerging disinfection byproducts: A review on their occurrence and control in drinking water treatment processes. *Chemosphere* 2020; 259:127476. Doi: 10. 1016/ j. chemosphere. 2020.127476.
- 10- Wang XX, Liu BM, Lu MF, Li YP, Jiang YY, Zhao MX, et al. Characterization of algal organic matter as precursors for carbonaceous and nitrogenous disinfection byproducts formation: Comparison with natural organic matter. *Journal of Environmental Management* 2021; 282:111951. Doi: 10.1016/j.jenvman.2021.111951.
- 11- Diana M, Felipe-Sotelo M, Bond T. Disinfection byproducts potentially responsible for the association between chlorinated drinking water and bladder cancer: A review. *Water Research* 2019; 162:492-504. Doi: 10.1016/j.watres.2019.07.014.
- 12- Qadafi M, Rosmalina RT, Pitoi MM, Wulan DR. Chlorination disinfection by-products in Southeast Asia: A review on potential precursor, formation, toxicity assessment, and removal technologies. *Chemosphere* 2023; 316:137817. Doi: 10. 1016/ j. chemosphere. 2023.137817
- 13- Benítez JS, Rodríguez CM, Casas AF. Disinfection byproducts (DBPs) in drinking water supply systems: A systematic review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 2021; 123:102987. Doi: 10. 1016/ j. pce. 2021. 102987.
- 14- Chaves RS, Guerreiro CS, Cardoso VV, Benoliel MJ, Santos MM. Hazard and mode of action of disinfection by-products (DBPs) in water for human consumption: Evidences and research priorities. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol* 2019; 223:53-61.
- 15- Yang L, Chen X, She Q, Cao G, Liu Y, Chang VW, et al. Regulation, formation, exposure, and treatment of disinfection by-products (DBPs) in swimming pool waters: A critical review. *Environment International* 2018; 121(Pt 2):1039-57.
- 16- Chaukura N, Marais SS, Moyo W, Mbali N, Thakalekoala LC, Ingwani T, et al. Contemporary issues on the occurrence and removal of disinfection byproducts in drinking water - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2020; 8(2):103659. Doi: 10.1016/j.jece.2020.103659.
- 17- Bhatnagar A, Sillanpää M. Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption- A review. *Chemosphere* 2017; 166:497-510.
- 18- Bolto B, Dixon D, Eldridge R, King S, Linge K. Removal of natural organic matter by ion exchange. *Water Research* 2002; 36(20):5057-65.
- 19- Zazouli MA, Kalankesh LR. Removal of precursors and disinfection by-products (DBPs) by membrane filtration from water; a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 2017; 15:25. Doi: 10. 1186/ s40201-017-0285-z
- 20- Sillanpää M, Ncibi MC, Matilainen A. Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management* 2018; 208:56-76.
- 21- Wang P, Ding S, Xiao R, An G, Fang C, Chu W. Enhanced coagulation for mitigation of disinfection by-product precursors: A review. *Advances in Colloid and Interface Science* 2021; 296:102518. Doi: 10. 1016/ j.cis.2021.102518.
- 22- Sun Y, Zhou S, Chiang P-C, Shah KJ. Evaluation and optimization of enhanced coagulation process: Water and energy nexus. *Water-Energy Nexus* 2019; 2(1):25-36.
- 23- Alenazi M, Hashim KS, Hassan AA, Muradov M, Kot P, Abdulhadi B. Turbidity removal using natural coagulants derived from the seeds of *strychnos potatorum*: Statistical and experimental approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 888(1):012064.
- 24- Narges S, Ghorban A, Khotanlou H, Khazaei M. Prediction of the optimal dosage of coagulants in water treatment plants through developing models based on artificial neural network fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 2021; 19:1543-53. Doi: 10.1007/s40201-021-00710-0.
- 25- Merrill RC. Activated silica sols in water treatment. *industrial & engineering chemistry* 1948; 40(8):1355-59.
- 26- Van Dokkum HP, Hulskotte JHJ, Kramer KJM, Wilmot J. Emission, Fate and Effects of Soluble Silicates (Waterglass) in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology* 2004; 38(2):515-21.
- 27- Robles A. Method for preparing activated silica for water treatment. Google Patents; 2006.

- 28-Black CA, Griffin A. Activation of Silica for Use in Water Treatment [with Discussion]. Journal (American Water Works Association) 1953; 45(10):1101-09.
- 29-Daverey A, Tiwari N, Dutta K. Utilization of extracts of Musa paradisica (banana) peels and Dolichos lablab (Indian bean) seeds as low-cost natural coagulants for turbidity removal from water. Environmental Science and Pollution Research 2019; 26(33):34177-83.
- 30-Song J, Jin P, Jin X, Wang XC. Synergistic effects of various in situ hydrolyzed aluminum species for the removal of humic acid. Water Research 2019; 148:106-14.
- 31-Iwuozor KO. Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. Advanced Journal of Chemistry-Section A 2019; 2(2):105-27.
- 32-Association APH. Standard methods for the examination of water and wastewater: American public health association; 1926.
- 33-Kusuma HS, Amenaghawon AN, Darmokoesoemo H, Neolaka YA, Widyaningrum BA, Anyalewechi CL, et al. Evaluation of extract of Ipomoea batatas leaves as a green coagulant-flocculant for turbid water treatment: Parametric modelling and optimization using response surface methodology and artificial neural networks. Environmental Technology & Innovation 2021; 24:102005. Doi: 10.1016/j.eti.2021.102005.
- 34-Yoosefian M, Ahmadzadeh S, Aghasi M, Dolatabadi M. Optimization of electrocoagulation process for efficient removal of ciprofloxacin antibiotic using iron electrode; kinetic and isotherm studies of adsorption. Journal of Molecular Liquids 2017; 225:544-53.
- 35-Zaviska F, Drogui P, Blais J-F, Mercier G, Lafrance P. Experimental design methodology applied to electrochemical oxidation of the herbicide atrazine using Ti/IrO₂ and Ti/SnO₂ circular anode electrodes. Journal of hazardous materials 2011; 185(2-3):1499-507.
- 36-Salmani ER, Ghorbanian A, Ahmadzadeh S, Dolatabadi M, Nemanifar N. Removal of reactive red 141 dye from synthetic wastewater by electrocoagulation process: investigation of operational parameters. Iranian Journal of Health, Safety and Environment 2016; 3(1):403-11.
- 37-Annadurai G, Sung S, Lee D-J. Simultaneous removal of turbidity and humic acid from high turbidity stormwater. Advances in Environmental Research 2004; 8(3-4):713-25.
- 38-Chua S-C, Chong F-K, Malek M, Ul Mustafa MR, Ismail N, Sujarwo W, et al. Optimized use of ferric chloride and Sesbania seed gum (SSG) as sustainable coagulant aid for turbidity reduction in drinking water treatment. Sustainability 2020; 12(6):2273. Doi: 10.3390/su12062273.
- 39-Sun J, Gao B, Luo Y, Xue M, Xu X, Yue Q, et al. Application and mechanism of polysaccharide extracted from Enteromorpha to remove nano-ZnO and humic acid in coagulation process. Frontiers of Environmental Science & Engineering 2018; 12(3):11. Doi: 10.1007/s11783-018-1029-8
- 40-Zhao Y, Gao B, Zhang G, Qi Q, Wang Y, Phuntsho S, et al. Coagulation and sludge recovery using titanium tetrachloride as coagulant for real water treatment: A comparison against traditional aluminum and iron salts. Separation and Purification Technology. 2014; 130:19-27.



Journal homepage: <https://journals.sbmu.ac.ir/jhf>

**Journal of
Behdasht dar Arseh
(i.e., Health in the Field)**



Shahid Beheshti University of Medical Sciences
School of Public Health and Safety

Vol.13, No.3, Autumn 2025

The efficacy study of enhanced coagulation using activated silica in water treatment and removal of humic acids

Anooshiravan Mohseni Bandpey¹, Fatemeh Soleimani², Mohammad Rafiee², Abbas Akbarzadeh³

¹ Air Quality and Climate Change Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

² Department of Environmental Health Engineering, School of Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

³ Water and Wastewater Research Center, Water Research Institute, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Aims: Turbidity and natural organic matter (NOM) are among the most significant contaminants affecting water quality and can reduce the efficiency of water treatment processes. The present study was conducted to evaluate the performance of an enhanced coagulation process using ferric chloride in combination with activated silica for water treatment and humic acid removal.

Materials and Methods: In this study, Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD) and jar test experiments were applied to evaluate the effects of initial turbidity, initial TOC, alkalinity, and the concentrations of ferric chloride and activated silica on the coagulation process. Synthetic water samples with an initial turbidity of 5–45 NTU and an initial TOC of 2–12 mg/L were used. Ferric chloride was applied at concentrations of 5–25 mg/L and activated silica at concentrations of 2–10 mg/L as SiO₂. Ethical principles were observed throughout the study and in the use of all resources.

Results: The findings indicated that the proposed quadratic model adequately predicted the process performance, with a coefficient of determination of $R^2=0.9909$ for turbidity removal efficiency and $R^2=0.9800$ for TOC removal efficiency. Under the optimal conditions of initial turbidity of 10 NTU, TOC of 8 mg/L, alkalinity of 140 mg/L as CaCO₃, ferric chloride concentration of 25 mg/L, and activated silica concentration of 10 mg/L as SiO₂, the removal efficiencies of turbidity and TOC were 81% and 83.75%, respectively.

Conclusion: The findings of the study indicate that the simultaneous application of ferric chloride and activated silica leads to a significant increase in the removal efficiency of turbidity and TOC and demonstrates higher performance compared with the conventional coagulation process using ferric chloride alone.

Keywords: Enhanced coagulation; Activated Silica; Turbidity; Natural organic matter (NOM); Disinfection by-products (DBPs).

Please cite this article as: Mohseni Bandpey A, Soleimani F, Rafiee M, Akbarzadeh A. The efficacy study of enhanced coagulation using activated silica in water treatment and removal of humic acids. Journal of Health in the Field 2025; 13(3):28-36. Doi: <https://doi.org/10.22037/jhf.v13i3.47232>.

Corresponding Author: Department of Environmental Health Engineering, School of Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Corresponding Author: Department of Environmental Health Engineering, School of Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Email: amohsenibandpi@sbmu.ac.ir

Received: 8 January 2025

Accepted: 25 April 2026