

Optimization of Turbidity Removal from Stormwater Runoff Using Sodium Ferrate as an Effective and Multifunctional Compound

Mohammadreza Mallah¹, Daryoush Yousefi Kebria^{2*}, Mofid Gorji-Bandpy³

1. Master's student in Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
2. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
3. Professor, Department of Thermal Engineering and Fluid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

In recent years, rising turbidity in stormwater runoff has become a major challenge for water resource management and environmental protection. This study aimed to evaluate the efficiency of sodium ferrate as a dual-function coagulant and oxidizing agent for turbidity removal and stormwater treatment. The effects of pH, coagulant dosage, and initial turbidity were examined using Design-Expert software to assess both their individual and interactive impacts on removal efficiency. The results showed that at a pH of 7.5–8, with sodium ferrate in liquid form applied at approximately 210 mg/L, and initial turbidity of 250–300 NTU, turbidity removal efficiency reached around 85%. Overall, sodium ferrate, through its simultaneous oxidation and coagulation-flocculation processes, offers a sustainable, rapid, and promising method for urban stormwater treatment and safe reuse under water-scarce conditions.

Review History

Received: Jul 27, 2025

Revised: Apr 15, 2026

Accepted: Jun 7, 2026

Keywords

Stormwater runoff

Coagulation and
flocculation, Oxidation

Sodium ferrate

Turbidity removal

* Corresponding Author Email: dy.kebria@nit.ac.ir



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بهینه‌سازی حذف کدورت از رواناب سیلابی با استفاده از فرات سدیم به عنوان یک ترکیب کارآمد و چند منظوره

محمد رضا ملاح^۱، داریوش یوسفی کبریا^{۲*}، مفید گرجی بندپی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
۲. دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
۳. استاد گروه مهندسی حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در سال‌های اخیر، افزایش کدورت در رواناب‌های سیلابی به یکی از چالش‌های اصلی مدیریت منابع آب و حفظ کیفیت محیط‌زیست تبدیل شده است. این مطالعه با هدف بررسی کارایی فرات سدیم به عنوان یک منعقدکننده و اکسیدکننده کارآمد در حذف کدورت و تصفیه سیلاب انجام شد. در این مطالعه، اثر متغیرهای pH، دوز ماده منعقدکننده و کدورت اولیه با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert بررسی شد تا اثرات هم‌زمان و هم‌افزای آن‌ها بر راندمان حذف مشخص شود. نتایج نشان داد که در محدوده pH بین ۷/۵ تا ۸/۵ و در دوز حدود ۲۱۰ میلی گرم بر لیتر از فرات سدیم (شکل مایع)، با کدورت اولیه ۲۵۰ تا ۳۰۰ NTU، راندمان حذف به حدود ۸۵ درصد رسید. به طور کلی، استفاده از فرات سدیم با عملکرد هم‌زمان در اکسیداسیون و انعقاد-لخته‌سازی، روشی پایدار، سریع و امیدبخش برای تصفیه سیلاب‌های شهری و استفاده‌ی مجدد ایمن از آن در شرایط کم‌آبی به شمار می‌آید.

کلمات کلیدی

رواناب سیلابی
انعقاد-لخته‌سازی
اکسیداسیون
فرات سدیم
حذف کدورت

۱- مقدمه

فیزیکی و شیمیایی متعددی وجود دارد که کدورت و مواد جامد معلق (TSS) از مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت آب محسوب می‌شوند (Zhang et al., 2020, Vigneswaran et al., 2025). در تصفیه‌خانه‌های آب، از ترکیبات آلومینیوم مانند سولفات آلومینیوم (آلوم) و ترکیبات آهن مانند کلرید فریک (کلروفریک) به دلیل هزینه پایین، دسترسی مناسب و کارایی بالای آن‌ها در حذف کدورت و رنگ از آب به عنوان رایج‌ترین منعقدکننده‌ها استفاده می‌شود (de Jesus et al., 2024). با این حال، این ترکیبات معایبی

با توجه به رشد جمعیت، افزایش نیاز به آب شرب و تأثیرات تغییرات اقلیمی، استفاده از منابع جایگزین در تامین آب ضروری است. در این میان، رواناب ناشی از سیلاب‌ها به عنوان منبعی که کمتر بهره‌برداری شده است، در صورت تصفیه مناسب و کارآمد، ظرفیت بالایی برای استفاده مجدد در مصارف شرب و غیرشرب دارد و می‌تواند تنش وارده بر منابع متعارف آب را کاهش دهد (Mendoza et al., 2025). در رواناب‌های سیلابی، شاخص‌های

* رایانامه نویسنده مسئول: dy.kebria@nit.ac.ir

دارند؛ از جمله حساسیت زیاد به تغییرات pH، تولید لجن فراوان و احتمال نشت یون‌های فلزی از لجن به آب‌های زیرزمینی، که موجب نگرانی‌های زیست‌محیطی جدی می‌شود. همچنین، این مواد در حذف ذرات بسیار ریز کلوئیدی به‌تنهایی کارایی محدودی داشته و برای تسریع ته‌نشینی، معمولاً نیاز به استفاده از کمک‌منعقدکننده‌ها دارند (Maćczak et al., 2020). کدورت به عنوان معیاری از کیفیت آب، اغلب به ذرات ریز معلق در آب اشاره دارد که مانع از عبور نور از آب می‌شوند (Zhang et al., 2020). این ذرات شامل رسوبات، گرد و غبار، مواد آلی و سایر آلاینده‌هایی هستند که از سطوح مختلف وارد آب‌های پذیرنده شده و معمولاً فلزات سنگین، ترکیبات آلی فرار، میکروارگانیزم‌های بیماری‌زا و مواد مغذی اضافی مانند نیتروژن و فسفر را نیز با خود حمل می‌کنند (Zevenbergen et al., 2010, Liu et al., 2015). کدورت و کل جامدات معلق^۱ از مهم‌ترین ناخالصی‌های پایدار در آب‌های آلوده به‌ویژه رواناب‌های سیلابی هستند. این ترکیبات علاوه بر انتقال هم‌زمان آلاینده‌های شیمیایی و فلزات، باعث انسداد فیلترها، کاهش هدایت هیدرولیکی و کاهش کارایی سیستم‌های تصفیه می‌شوند. حذف مؤثر کدورت در مراحل اولیه برای حفظ عملکرد فیلترها و بهبود حذف آلاینده‌های محلول ضروری بوده و نقش مهمی در طراحی و پایداری سامانه‌های تصفیه رواناب سیلابی دارد (Pritchard et al., 2022). ذرات معلق با جذب آلاینده‌های میکروبی، مواد مغذی و ترکیبات شیمیایی می‌توانند وارد زنجیره غذایی شوند و به مرور زمان، اثرات مخربی بر سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشند (Zhang et al., 2020). افزایش کدورت در رواناب‌های سیلابی، می‌تواند با ایجاد رسوب و انسداد بسترهای تخم‌ریزی آبزیان، به‌طور جدی به اکوسیستم‌های رودخانه‌ای آسیب وارد کند. همچنین، ورود غلظت بالای ذرات معلق به تصفیه‌خانه‌های آب، سبب افزایش مصرف مواد شیمیایی و هزینه‌های تصفیه می‌شود و به‌طور قابل توجهی کیفیت بصری و قابلیت بهره‌برداری تفریحی منابع آبی را کاهش می‌دهد (Müller et al., 2020). به همین دلیل، مدیریت و کنترل کدورت و مواد جامد معلق (TSS) در رواناب‌های سیلابی، نقش کلیدی در جلوگیری از انتقال آلاینده‌ها و افزایش کارایی مراحل بعدی تصفیه دارد. حذف این آلاینده‌ها پیش شرط لازم برای بهبود

کیفیت آب و امکان استفاده مجدد ایمن از رواناب است. در نتیجه، توجه به این موضوع، پایداری و بهره‌وری سامانه‌های مدیریت و باز استفاده از سیلاب را تضمین می‌کند (Feng et al., 2022). در سال‌های اخیر، ترکیبات آهن شش‌ظرفیتی مانند فرات‌سدیم ($\text{Na}_2\text{FeO}_4^{2-}$) به دلیل ویژگی‌های شیمیایی منحصر به فرد و عملکرد چندمنظوره، به‌عنوان گزینه‌ای نوین و مؤثر در تصفیه آب و فاضلاب شناخته شده‌اند (Dar et al., 2021, Yu et al., 2023, Gaber et al., 2024). فرات (VI) به دلیل پتانسیل اکسیداسیون بالا، قادر به حذف گستره وسیعی از آلاینده‌های آلی و معدنی است. در جریان اکسیداسیون، این یون به آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{3+}) تبدیل می‌شود و در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی نقش فعالی دارد. فرات (VI) به دلیل عدم تولید محصولات جانبی مضر و عملکرد هم‌زمان در اکسیداسیون، گندزدایی و انعقاد، یک اکسیدکننده سبز و کارآمد محسوب می‌شود (Talaiekhosani et al., 2017). این ترکیب شامل یون آهن با حالت اکسیداسیون $+6$ (Fe^{6+}) است که به‌صورت ساختار چهاروجهی (FeO_4^{2-}) پایدار می‌باشد و قدرت اکسیدکنندگی بسیار بالایی دارد. فرات (VI) با تجزیه در محیط آبی، گونه‌های اکسیدکننده بسیار فعال‌تری مانند Fe(V) و Fe(IV) تولید می‌کند که توانایی بالایی در حذف آلاینده‌های مقاوم دارند (Guo et al., 2025).

پس از مرحله نخست اکسیداسیون، که در آن یون فرات (VI) با ذرات معلق و کلوئیدی واکنش داده و با کاهش بار سطحی و تجزیه ساختار آن‌ها، تجمع ذرات را تسهیل می‌کند، این یون به محض ورود به محیط آبی به آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{3+}) کاهش می‌یابد و در نقش یک منعقدکننده ثانویه، با تشکیل فلاک‌های هیدروکسیدی (Fe(OH)_3)، ذرات را از طریق خنثی‌سازی بار، پل‌زنی و جذب سطحی به دام می‌اندازد. این فرآیندها منجر به تشکیل لخته‌های درشت‌تر با قابلیت ته‌نشینی بالاتر شده و نهایتاً کاهش چشمگیر کدورت را به دنبال دارند (Tran et al., 2020). از جمله عوامل مؤثر بر کارایی فرآیند انعقاد با فرات (VI)، pH محیط واکنش است که نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع و مقدار گونه‌های هیدروکسیدی فلزی تشکیل شده دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین، افزایش pH از ۶ به ۹ منجر به بهبود چشم‌گیر در حذف TSS گردید. این ارتقاء راندمان، ناشی از افزایش تشکیل هیدروکسید آهن و تقویت مکانیسم جاروبی در محیط قلیایی است

¹ Total Suspended Solids

مونت موریلونیت خشک با اندازه ≥ 75 میکرون بعنوان عامل ایجاد کدورت و تهیه سیلاب شبیه سازی شده استفاده شد. سایر مواد شیمیایی مورد نیاز از شرکت مرک آلمان تهیه شد.

۲-۲- روش کار

برای بهبودسازی شرایط عملیاتی مؤثر بر حذف کدورت از سیلاب شبیه سازی شده، از نرم افزار Design-Expert، نسخه ۱۱/۰/۳/۰ استفاده شد. در این طراحی، راندمان حذف کدورت به عنوان متغیر وابسته و pH (در بازه ۴ تا ۱۰)، غلظت اولیه منعقدکننده (محلول فرات سدیم) در محدوده ۸۰ تا ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر و کدورت اولیه نمونه ها (در بازه ۱۰۰-۳۰۰ NTU) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. برای شبیه سازی کدورت رواناب های سیلابی، از ذرات رس مونت موریلونیت با اندازه ≥ 75 میکرون استفاده شد. مقدار معینی از این پودر در آب لوله کشی حل شد و با همزن مغناطیسی به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط گردید تا سوسپانسیونی یکنواخت ایجاد شود. نمونه ها به مدت ۲ ساعت در حالت سکون نگهداری شدند تا ذرات درشت تر ته نشین و ذرات ریزتر به صورت پایدار معلق باقی بمانند. کدورت باقی مانده پس از این مرحله به عنوان نمونه کدورت پایدار برای انجام آزمایش های انعقاد و لخته سازی به کار گرفته شد. آب لوله کشی به عنوان آب پایه انتخاب شد، زیرا ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آن به رواناب های سیلابی واقعی نزدیک است و استفاده از آن شبیه سازی دقیق تر و قابل اعتمادتری از فرآیند تصفیه فراهم می کند. به منظور بررسی کارایی فرآیند انعقاد و لخته سازی در حذف کدورت از نمونه ها، تمام آزمایش ها در دمای محیط و با استفاده از آزمون جار در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. پس از افزودن دوز منعقدکننده و تنظیم pH طبق شرایط تعیین شده در نرم افزار Design-Expert، نمونه ها در سه مرحله زیر انجام شدند:

۱- انعقاد به مدت ۱ دقیقه با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه،

۲- لخته سازی به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۳۰ دور بر دقیقه،

۳- ته نشینی به مدت ۳۰ دقیقه در حالت سکون.

در پایان، نمونه برداری از بخش زلال بالایی بشر انجام و جهت سنجش میزان کدورت باقی مانده مورد استفاده قرار گرفت.

۳- روش های تحلیلی

اندازه گیری کدورت نمونه ها با استفاده از روش نفلومتری بر

که به افزایش اندازه، چگالی و ته نشینی مؤثرتر لخته ها کمک می کند (Al Umairi et al., 2021). در نهایت، رویکردهای نوین تصفیه با استفاده از فرات (VI) این امکان را فراهم می کنند که چندین فرآیند کلیدی به طور هم زمان انجام شوند و حذف مؤثر لخته های آهن نیز محقق گردد. این فرآیندها شامل انعقاد، بی ثبات سازی ذرات کلوئیدی، لخته سازی برای تشکیل ذرات درشت تر، اکسیداسیون شیمیایی آلاینده ها، گندزدایی و تخریب مواد آلی طبیعی^۱ برای کاهش تشکیل محصولات جانبی نامطلوب^۲ هستند. یون های Fe^{3+} حاصل از کاهش فرات (VI) با تشکیل نانوذرات هیدروکسید آهن، ظرفیت بالایی برای جذب ذرات معلق و یون های محلول دارند. ذرات ریز باقیمانده نیز می توانند در مراحل تکمیلی مانند فیلترهای گرانولی یا میکروفیلتراسیون به طور مؤثر حذف شوند و این موضوع در کاهش کدورت و بهبود کیفیت نهایی آب اهمیت دارد (Lee et al., 2023, Deng et al., 2024). به دلیل این خواص منحصر به فرد، فرات (VI) به ویژه در تصفیه آب های دارای کدورت بالا مانند رواناب های سیلابی، به عنوان یک گزینه مؤثر و دوستدار محیط زیست شناخته می شود. با وجود تحقیقات پیشین در سطح آزمایشگاهی، کاربرد صنعتی این ترکیب همچنان با چالش هایی نظیر پایداری محلول، کنترل دقیق pH و بهبود شرایط عملیاتی مواجه است. با این حال، رویکردهای نوین در طراحی فرآیندها، نویدبخش توسعه سامانه های تصفیه فشرده، کارآمد و انعطاف پذیر برای مصارف متنوع از مقیاس خانگی تا شهری هستند. بر این اساس، در این پژوهش تأثیر متغیرهای مختلف pH، دوز ماده منعقدکننده و کدورت اولیه بر میزان راندمان حذف کدورت سیلاب با استفاده از فرات سدیم حاوی یون فرات (VI)، به عنوان یک منعقدکننده چند منظوره مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد شیمیایی مورد استفاده

محلول فرات سدیم ($Na_2FeO_4^{2-}-NaOH$) با نام تجاری فرسول (FerSol-30) و غلظت ۳۰ گرم بر لیتر (خلوص ۳ درصد) از شرکت سرور پویان رستخیز تهیه شد. ذرات رس

^۱ Natural Organic Matter

^۲ Disinfection By-Products

می‌کند، باید در بازه قابل قبول ۰/۱ تا ۶ انتخاب شود. تعداد کل آزمایش‌ها در طراحی CCD با سه متغیر مستقل، معمولاً ۲۰ است. نرم‌افزار Design-Expert برای طراحی آزمایش‌ها، تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند استفاده می‌شود. مدل‌های چندجمله‌ای، مانند مدل مکعبی، برای بیان رابطه میان متغیرها و پاسخ‌ها کاربرد دارند و به کمک این مدل‌ها می‌توان به نتایج با دقت بالا و قابلیت پیش‌بینی مطلوب دست یافت (Vahdatkhoram et al., 2025). مقدار α در این تحقیق برابر با ۱/۶۸ و نسخه نرم‌افزار Design-Expert استفاده شده ۱۱/۰/۳/۰ می‌باشد. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی رواناب سیلابی و ارزیابی عملکرد فرآیند در حذف کدورت، محدوده کدورت نمونه‌ها در بازه ۱۰۰-۳۰۰ NTU و با استناد به داده‌های استخراج‌شده از پایگاه ملی کیفیت رواناب‌های سیلاب شهری ایالات متحده (NSQD) و پایگاه بین‌المللی بهترین شیوه‌های مدیریت رواناب‌های شهری (BMP) تعیین گردید (Pamuru et al., 2021). همچنین، محدوده pH بین ۴ تا ۱۰ انتخاب شد تا عملکرد منعقدکننده در شرایط اسیدی تا قلیایی بررسی شود. این دامنه، بازه معمول pH رواناب‌های سیلابی (۴/۵ تا ۸/۷) را نیز در بر می‌گیرد (Makepeace et al., 1995). در همین راستا، دوز محلول فرات سدیم نیز در محدوده ۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و بر پایه نتایج آزمایشات اولیه تعیین شد تا ضمن دستیابی به راندمان حداکثری، از باقی‌ماندن ماده فعال در پساب جلوگیری شود. تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای طراحی مرکب مرکزی (CCD) بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود که این رابطه ترکیبی از آزمایش‌های اصلی، نقاط ستاره‌ای و تکرارهای مرکز است.

$$N = 2^n + 2n + n_c \quad (3)$$

که در این معادله، n تعداد متغیرهای مستقل، n_c تعداد تکرار در نقطه مرکزی (۶ تکرار) و N تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز برای طراحی مرکب مرکزی (CCD) است. همچنین، سطوح واقعی و کدگذاری‌شده هر یک از متغیرهای مستقل به‌همراه مقدار میانگین آن‌ها، در جدول ۱ و داده‌های مربوط به مقادیر ورودی و پاسخ‌های تجربی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. این داده‌ها به‌عنوان مبنای برای انجام تحلیل واریانس (ANOVA)، مدل‌سازی آماری، و بررسی روابط کمی میان متغیرهای مستقل و متغیر پاسخ در مراحل بعدی پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اساس استاندارد متد به شماره 2130B انجام شد. برای این منظور از کدورت‌سنج مدل HI93703 (HANNA, USA) استفاده گردید. اندازه‌گیری pH نمونه‌ها نیز با pH متر مدل 86502 (AZ Instruments, Taiwan) صورت گرفت. به‌منظور بررسی باقی‌مانده یون فرات (VI) در پساب نمونه بهینه، از دستگاه اسپکتروفتومتر UV/VIS مدل UNICO 2800 ($\lambda = 505 \text{ nm}$) به‌عنوان نقطه بیشینه جذب نوری یون فرات (VI) و برای تعیین مقدار کل جامدات معلق (TSS) موجود، از روش وزنی بر اساس استاندارد متد به شماره 2540D استفاده شد. همچنین جهت انجام فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، از دستگاه جارتست بهره‌گیری شد. درصد حذف کدورت و TSS، به ترتیب بر اساس روابط ۱ و ۲ محاسبه گردید:

$$R(\%) = 100 \times \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (1)$$

که در آن، R درصد حذف، C_0 کدورت اولیه و C_t کدورت پس از فرایند انعقاد و لخته‌سازی است.

$$TSS(\%) = 100 \times \frac{(\text{وزن ظرف} - \text{نمونه خشک با وزن ظرف})}{\text{وزن نمونه مرطوب}} \quad (2)$$

۳-۱- طراحی آزمایش

تأثیر متغیرهای مستقل شامل کدورت اولیه، pH و غلظت اولیه محلول فرات سدیم به عنوان منعقدکننده (به ترتیب با A، B و C نشان داده شده‌اند) بر راندمان حذف کدورت از سیلاب مصنوعی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) مبتنی بر طراحی مرکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار گرفت. روش سطح پاسخ (RSM) یک تکنیک آماری است که برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای تحت تأثیر چندین متغیر مستقل به کار می‌رود. این روش با استفاده از طراحی‌های آزمایشی، رابطه بین متغیرهای ورودی و پاسخ خروجی را تخمین زده و شرایط بهینه را شناسایی می‌کند. طراحی مرکب مرکزی (CCD) یکی از رایج‌ترین طراحی‌های RSM است که با قرار دادن نقاط ستاره‌ای در فاصله‌ای مشخص (α) از مرکز فضای طراحی، امکان مدل‌سازی اثرات غیرخطی و متقابل متغیرها را فراهم می‌کند. نقاط کدگذاری‌شده در سطوح -۱، ۰ و +۱ بیانگر سطوح پایین، متوسط و بالا برای هر متغیر مستقل هستند. در این روش، مقدار آلفا (α) که فاصله نقاط ستاره‌ای از مرکز را تعیین

جدول ۱- متغیرهای مستقل و سطوح تغییرات آنها

متغیر	نماد	واحد	حد پایین کدگذاری شده	میانگین	حد بالا کدگذاری شده
			-۱	۰	+۱
کدورت اولیه	A	NTU	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
pH	B	-	۴	۷	۱۰
دوز فرسول	C	mg/L	۸۰	۱۹۰	۳۰۰

جدول ۲- نتایج آزمایش‌ها براساس طراحی مرکب مرکزی (CCD) به همراه سطوح متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها

شماره آزمایش	شرایط آزمایش			پاسخ راندمان حذف (%)
	A: کدورت اولیه (NTU)	B: pH	C: دوز فرسول (mg/L)	
۱	۲۰۰	۱/۹۵	۱۹۰	۷۵/۲۹
۲	۳۱/۸۲	۷	۱۹۰	۱۸/۶۶
۳	۱۰۰	۴	۸۰	۱۱/۸۲
۴	۲۰۰	۷	۱۹۰	۷۴/۳۸
۵	۳۰۰	۴	۸۰	۷۷/۱۵
۶	۲۰۰	۷	۱۹۰	۷۳/۵۶
۷	۳۰۰	۱۰	۳۰۰	۸۶/۹۶
۸	۱۰۰	۱۰	۳۰۰	۸۵/۱
۹	۲۰۰	۷	۱۹۰	۷۲/۸۷
۱۰	۱۰۰	۱۰	۸۰	۵۷/۳۷
۱۱	۳۰۰	۱۰	۸۰	۸۵/۵۳
۱۲	۲۰۰	۷	۱۹۰	۷۳/۸۹
۱۳	۳۶۸/۱۷	۷	۱۹۰	۸۶/۸۶
۱۴	۲۰۰	۷	۱۹۰	۷۲/۲۴
۱۵	۳۰۰	۴	۳۰۰	۸۵/۸۴
۱۶	۱۰۰	۴	۳۰۰	۴۹/۸۲
۱۷	۲۰۰	۷	۱۹۰	۶۲/۵۸
۱۸	۲۰۰	۷	۳۷۴/۹۹	۶۲/۸۴
۱۹	۲۰۰	۱۲	۱۹۰	۹۷/۰۳
۲۰	۲۰۰	۷	۵	۳۰/۲۱

۴- نتایج و بحث

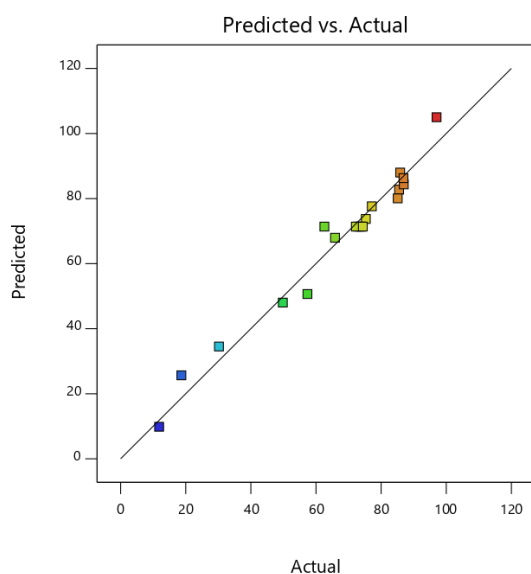
۴-۱- تحلیل آماری داده‌ها (ANOVA) و اعتبارسنجی مدل

در جدول ۳، نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر میزان حذف کدورت نشان داده شده است. مدل کلی با مقدار $p < ۰/۰۰۰۱$ و $F = ۳۲/۸۲$ معنی‌دار بود و توانایی بالایی در تبیین تغییرات پاسخ نشان داد. همچنین، اثرات اصلی متغیرهای

کدورت اولیه و دوز منعقدکننده با مقادیر p کمتر از $۰/۰۰۰۱$ و متغیر pH با مقدار p برابر با $۰/۰۰۰۱$ در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار گزارش شدند. برهم‌کنش‌های AB و AC نیز به ترتیب با مقادیر $p = ۰/۰۰۱۴$ و $p = ۰/۰۰۶۸$ معنادار بودند، در حالی که برهم‌کنش BC با مقدار $p = ۰/۳۰۹۵$ اثر معناداری نداشت. اثرات درجه دوم متغیرها نیز همگی معنادار بوده و تأکید بر ماهیت غیرخطی رابطه بین متغیرها و پاسخ دارد. پارامتر فقدان برازش

جدول ۳- نتایج آزمایش‌ها براساس طراحی مرکب مرکزی (CCD) به همراه سطوح متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها

فاکتور	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار f	مقدار p
مدل کلی	۹۹۰۷/۴۹	۹	۱۱۰۰/۸۳	۳۲/۸۲	۰/۰۰۰۱>
کدورت اولیه A:	۴۴۳۴/۰۰	۱	۴۴۳۴/۰۰	۱۳۲/۱۹	۰/۰۰۰۱>
B: pH	۱۱۷۸/۸۳	۱	۱۱۷۸/۸۳	۳۵/۱۴	۰/۰۰۰۱
دوز فرسول C:	۱۳۵۰/۳۴	۱	۱۳۵۰/۳۴	۴۰/۲۶	۰/۰۰۰۱>
AB	۶۳۶/۱۷	۱	۶۳۶/۱۷	۱۸/۹۷	۰/۰۰۱۴
AC	۳۸۶/۴۲	۱	۳۸۶/۴۲	۱۱/۵۲	۰/۰۰۶۸
BC	۳۸/۴۶	۱	۳۸/۴۶	۱/۱۵	۰/۳۰۹۵
A ²	۴۲۸/۷۳	۱	۴۲۸/۷۳	۱۲/۷۸	۰/۰۰۵۱
B ²	۵۸۱/۹۰	۱	۵۸۱/۹۰	۱۷/۳۵	۰/۰۰۱۹
C ²	۷۳۱/۹۳	۱	۷۳۱/۹۳	۲۱/۸۲	۰/۰۰۰۹
خطای باقیمانده	۳۳۵/۴۴	۱۰	۳۳/۵۴	-	-
عدم برازش	۲۳۵/۲۴	۵	۴۷/۰۵	۲/۳۵	۰/۱۸۵۳
خطای خالص	۱۰۰/۲۰	۵	۲۰/۰۴	-	-
کل	۱۰۲۴۲/۹۳	۱۹	-	-	-



شکل ۱- نمودار مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی راندمان حذف کدورت

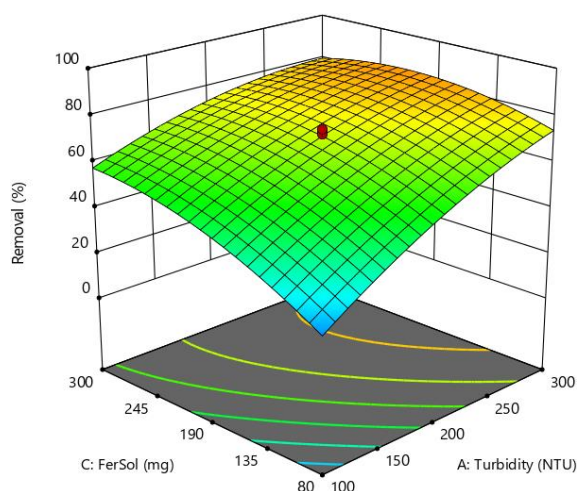
جدول ۴- شاخص‌های آماری برازش مدل RSM برای حذف کدورت

۰/۹۶۷۳	ضریب تعیین
۰/۹۳۷۸	ضریب تعیین تعدیل شده
۰/۸۱۱۸	ضریب تعیین پیش‌بینی شده
۲۳/۲۳۰۶	دقت مناسب مدل
۵/۷۹	انحراف معیار
۶۷/۱۵	میانگین
۸/۶۲	ضریب تغییرات (%)

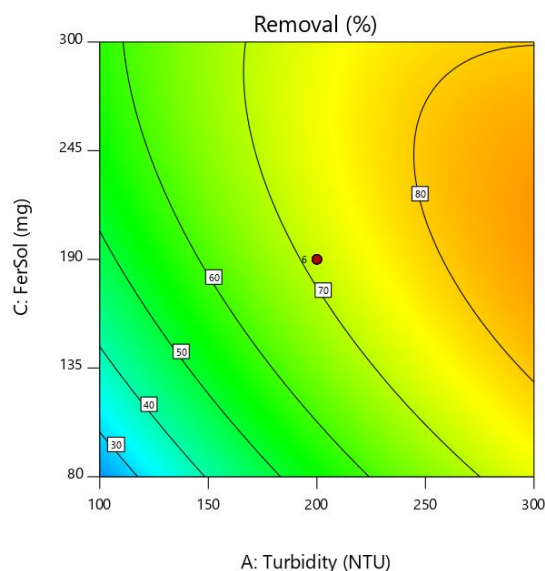
(Lack of Fit) با P-value برابر با ۰/۱۸۵۳ نشان‌دهنده برازش مناسب مدل با داده‌های تجربی است. این نتایج مؤید اعتبار آماری مدل و قابلیت آن در پیش‌بینی و تحلیل حذف کدورت است. بر اساس مطالب اشاره شده، مدل نهایی رگرسیونی تنها با ضرایب معنی‌دار به صورت رابطه ۴ ارائه شده است.

$$R = 71.40 + 18.02 \times A + 9.29 \times B + 9.94 \times C - 8.92 \times A \times B - 6.95 \times A \times C - 5.45 A^2 + 6.35 B^2 - 7.13 C^2 \quad (4)$$

برای ارزیابی کیفیت برازش مدل و پایداری نتایج، شاخص‌های آماری مکمل شامل ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده ($Adj-R^2$)، انحراف استاندارد، ضریب تغییرات (C.V) و نسبت پیش‌بینی (AP) در جدول ۴ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج این جدول، مقدار بالای ضریب تعیین (۰/۹۶۷۳) و ضریب تعیین تعدیل شده (۰/۹۳۷۸) نشان‌دهنده توان بالای مدل در تبیین تغییرات پاسخ و دقت مناسب آن با در نظر گرفتن تعداد متغیرها است. همچنین، مقدار پایین انحراف استاندارد (۵/۷۹) و ضریب تغییرات (۸/۶۲ درصد) مؤید پایداری نتایج و همگنی داده‌هاست. نسبت پیش‌بینی ($AP = 23/23.06$) که بسیار بالاتر از معیار ۴ است، نشان می‌دهد مدل قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی پاسخ در فضای طراحی دارد. این شاخص‌ها در مجموع حاکی از برازش قوی، دقت قابل توجه و اعتبار آماری بالای مدل هستند. بنابراین، مدل طراحی شده را می‌توان به عنوان پایه‌ای معتبر برای تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند در نظر گرفت. شکل ۱ نیز مطابقت خوب بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی را به خوبی نشان می‌دهد.



ب



الف

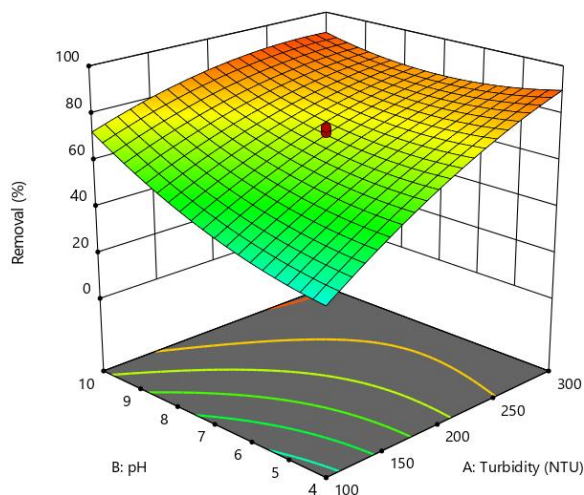
شکل ۲- نمودار سطح پاسخ، الف) کانتور، ب) سه‌بعدی مربوط به کدورت و دوز منعقدکننده

۳-۴- تأثیر هم‌زمان کدورت اولیه و pH بر درصد حذف کدورت

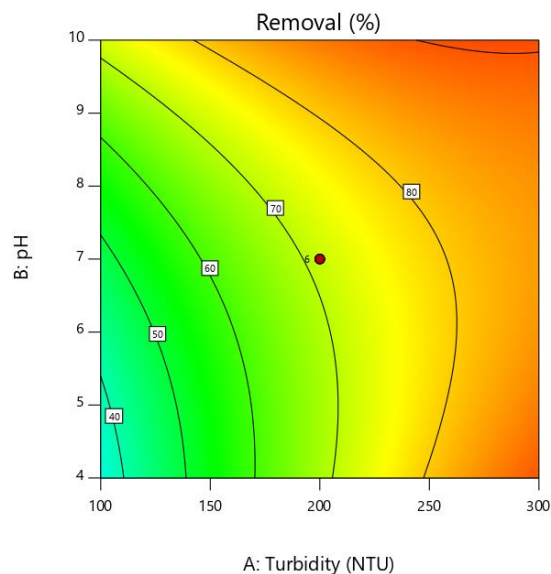
شکل ۳ رابطه اثر هم‌زمان کدورت اولیه و pH را بر راندمان حذف کدورت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش کدورت اولیه در بازه ۲۵۰-۳۰۰ NTU، همراه با افزایش pH تا حدود ۸، منجر به حداکثر راندمان حذف شده است. در این شرایط، سیستم به‌طور هم‌زمان از قدرت اکسیدکنندگی بالای یون فرات (VI) و پایداری گونه‌های لخته‌ساز آهنی نظیر Fe^{3+} و $\text{Fe}(\text{OH})_3$ بهره‌مند می‌شود. در pH کمتر از ۷، کاهش پایداری گونه‌های آهن سه‌ظرفیتی و افت سرعت واکنش‌های اکسیداسیون فرات سدیم، موجب کاهش راندمان حذف می‌شود. همچنین در pH بالاتر از ۹، به دلیل افزایش بار منفی سطح ذرات و تضعیف پیوندهای لخته‌ساز، کارایی فرآیند افت می‌کند. علاوه بر این، در شرایط کدورت پایین‌تر، حتی در حضور pH بهینه، راندمان حذف به مقدار مطلوب نمی‌رسد، که اهمیت وجود غلظت کافی از ذرات معلق برای عملکرد مؤثر فرآیند را نشان می‌دهد. تحلیل ANOVA نیز نشان داد که اثر متقابل بین کدورت اولیه و pH از نظر آماری معنی‌دار است ($p=0/0014$)، که بر اهمیت بررسی و کنترل دقیق این دو پارامتر به‌صورت هم‌زمان در بهینه‌سازی فرآیند تأکید دارد.

۲-۴- تأثیر هم‌زمان کدورت اولیه و دوز محلول فرات سدیم بر درصد حذف کدورت

شکل ۲ نمودارهای سطح پاسخ و کانتور مربوط به اثر هم‌زمان کدورت اولیه و دوز محلول فرات سدیم بر راندمان حذف کدورت را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که افزایش کدورت اولیه در محدوده ۱۰۰-۳۰۰ NTU، در حضور دوز مناسب محلول فرات سدیم (۲۰۰ تا ۲۲۰ میلی‌گرم بر لیتر)، موجب بهبود چشمگیر راندمان حذف می‌شود. افزایش کدورت اولیه موجب فراهم شدن سطح واکنش بیشتر و ایجاد پل‌های لخته‌ای گسترده‌تر می‌گردد و حذف مؤثرتر ذرات معلق را تسهیل می‌کند. در دوزهای کمتر از ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، حتی در شرایط کدورت بالا، راندمان حذف کاهش می‌یابد که بیانگر ناکافی بودن مقدار منعقدکننده برای ناپایدارسازی و لخته‌سازی مؤثر است. از سوی دیگر، در صورت پایین بودن کدورت اولیه، حتی افزایش دوز فرات سدیم نیز موجب بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در راندمان حذف نمی‌شود، که اهمیت وجود ذرات معلق کافی در کارایی فرآیند را نشان می‌دهد. تحلیل ANOVA نیز اثر متقابل بین کدورت اولیه و دوز فرات سدیم را از نظر آماری معنی‌دار گزارش کرده است ($p=0/0068$)، که بر نقش تعیین‌کننده این دو عامل در کنار هم در افزایش راندمان حذف تأکید دارد.

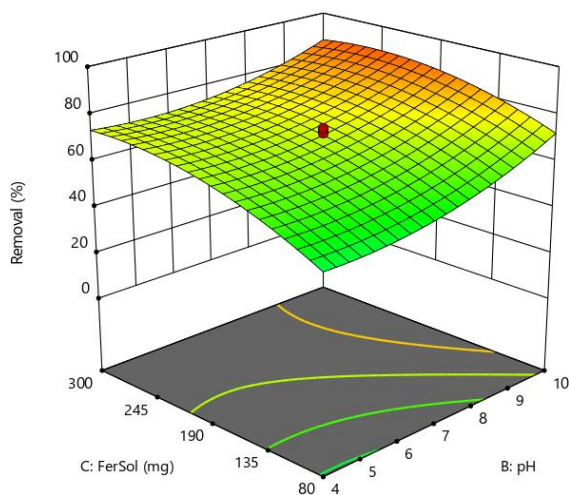


ب

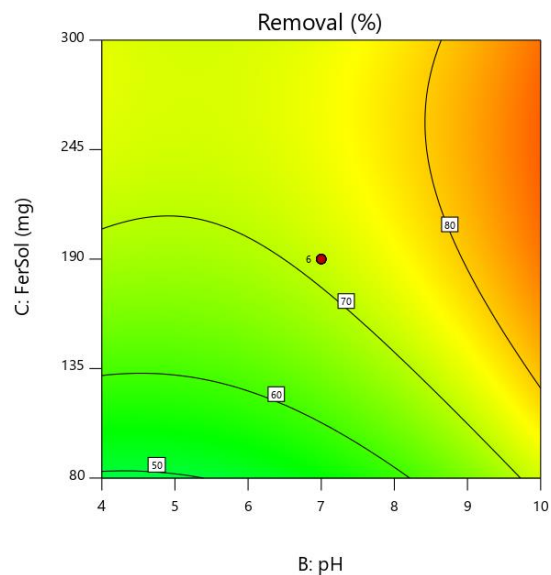


الف

شکل ۳- نمودار سطح پاسخ، الف) کانتر، ب) سه بعدی مربوط به کدورت و pH



ب



الف

شکل ۴- نمودار سطح پاسخ، الف) کانتر، ب) سه بعدی مربوط به pH و دوز منعقدکننده

آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) به عنوان یک منعقدکننده ثانویه نیز عمل می کند؛ در نتیجه، تشکیل لخته های حجیم و متراکم تسهیل می گردد. افزایش pH تا محدوده ی بهینه موجب بهبود وضعیت بار سطحی ذرات و کاهش پایداری آن ها می شود. در مقابل، دوزهای بیش از ۲۲۰ میلی گرم بر لیتر احتمال تشکیل بیش از حد لخته و اشباع نقاط واکنش را بالا می برد که می تواند راندمان را کاهش دهد. تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که هر دو پارامتر pH و دوز منعقدکننده به طور مستقل تأثیر معنی داری بر حذف کدورت داشتند، اما اثر متقابل آن ها از نظر آماری معنادار نبود ($p=0.3095$).

۴-۴- تأثیر هم زمان دوز محلول فرات سدیم و pH بر درصد حذف کدورت

شکل ۴ نتایج نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی و کانتر مربوط به اثر هم زمان دوز محلول فرات سدیم و pH را بر راندمان حذف کدورت نشان می دهد. بر اساس این نتایج، بیشترین راندمان حذف در بازه ی pH حدود ۷/۵ تا ۸/۵ و دوز فرات سدیم بین ۲۱۰ تا ۲۲۰ میلی گرم بر لیتر مشاهده شد. در این شرایط، فرات سدیم با بهره گیری از خاصیت اکسیدکنندگی قوی یون فرات (VI)، منجر به تجزیه و ناپایداری ساختار ذرات کلوئیدی شده و با کاهش به یون

با این حال، نمودارهای سطح پاسخ نشان دادند که ترکیب سطوح بهینه این دو پارامتر می‌تواند راندمان حذف را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

۴-۵- بهینه‌سازی

فرآیند بهینه‌سازی به‌عنوان یکی از مراحل کلیدی در ارزیابی عملکرد سامانه‌های تصفیه، با هدف شناسایی شرایط عملیاتی بهینه جهت دستیابی به حداکثر راندمان حذف کدورت و رعایت الزامات استاندارد کیفیت آب خروجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نرم‌افزار Design Expert نشان داد که شرایط بهینه در مقدار pH برابر ۸، کدورت اولیه ۳۰۰ NTU و دوز منعقدکننده معادل ۲۰۷/۴۳ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که انتخاب pH برابر ۸ در این مطالعه با رویکرد حفظ کیفیت آب تصفیه‌شده در بازه قابل قبول برای مصارف آشامیدنی و کشاورزی انجام شده است. بر اساس استانداردهای زیست‌محیطی، محدوده مجاز pH برای پساب‌های قابل استفاده مجدد معمولاً بین ۶ تا ۸/۵ در نظر گرفته می‌شود (Ayers et al., 1985, Torabian et al., 2009)؛ از این‌رو، تنظیم pH در این بازه ضمن بهبود کارایی فرآیند انعقاد، تضمین‌کننده کیفیت مناسب آب خروجی نیز خواهد بود. در شرایط بهینه، راندمان پیش‌بینی‌شده حذف کدورت برابر با ۸۴/۹۷ درصد و شاخص مطلوبیت معادل ۰/۹۲۷ برآورد شد که نشان‌دهنده انطباق بالا با اهداف طراحی و عملکرد مطلوب فرآیند است. نتایج آزمایشگاهی نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کنند، به‌گونه‌ای که مقدار حذف کدورت تجربی به‌طور میانگین ۸۳/۵۷ درصد به‌دست آمد و اختلاف آن با مقدار پیش‌بینی‌شده برابر با ۱/۴ درصد بود. این هم‌خوانی بیانگر دقت مناسب مدل در پیش‌بینی رفتار فرآیند و قابلیت اطمینان آن در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه می‌باشد. به‌منظور بررسی مقدار باقی‌مانده یون فرات (VI) در پساب نهایی، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV/VIS مدل UNICO 2800 در طول

موج ۵۰۵ نانومتر و بر اساس منحنی استاندارد تهیه‌شده در آزمایشگاه آنالیز شدند. مطابق این منحنی، دوز بهینه محلول فرات سدیم (۲۰۷/۴۳ میلی‌گرم بر لیتر)، تعیین شده با روش سطح پاسخ (RSM) و نرم‌افزار Design-Expert، معادل ۴/۴۱ میلی‌گرم بر لیتر یون فرات (VI) و ۶/۱ میلی‌گرم بر لیتر فرات سدیم بود. همچنین، میزان جامدات معلق کل (TSS) حذف‌شده از پساب نمونه پس از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی بر اساس روش استاندارد متد اندازه‌گیری شد. برای ایجاد کدورت اولیه ۳۰۰ NTU، مقدار ۲۰۱/۴ میلی‌گرم بر لیتر خاک مونت‌موریلونیت به نمونه اضافه شد. نتایج نشان داد که غلظت فرات باقی‌مانده در پساب برابر با ۰/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر و مقدار جامدات معلق حذف‌شده معادل ۱۷۰/۶۲ میلی‌گرم بر لیتر بود. این نتایج بیانگر کارایی بالای فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با فرات سدیم در کاهش چشمگیر کدورت و جامدات معلق است، به‌طوری‌که علاوه بر حذف مؤثر آلاینده‌ها، دوز بهینه محلول فرات سدیم (۲۰۷/۴۳ میلی‌گرم بر لیتر)، به دلیل مکانیسم دوگانه اکسیداسیون-انعقاد، کارایی بالا، کاهش حجم لجن و حذف همزمان آلاینده‌های آلی و کدورت، فرآیند از نظر اقتصادی نیز قابل توجیه است و در مقیاس عملی مقرون‌به‌صرفه ارزیابی می‌شود. همچنین، میزان باقی‌مانده یون فرات در پساب در محدوده قابل قبول استانداردهای زیست‌محیطی قرار گرفت. یون‌های فرات (VI) در محیط آبی، پس از اینکه به‌سرعت به آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{3+}) تبدیل می‌شوند، به‌صورت $Fe(OH)_3$ رسوب می‌کنند. این ترکیب پایدار، غیرسمی و زیست‌سازگار بوده و عمدتاً از هیدروکسید فریک تشکیل شده و پس از خشک‌سازی می‌تواند به‌عنوان ماده پرکننده یا اصلاح‌کننده خاک استفاده شود و خطر آلودگی ثانویه ندارد. این موضوع قابلیت به‌کارگیری فرات سدیم را به‌عنوان یک گزینه پایدار و ایمن در تصفیه رواناب‌های سیلابی تقویت می‌کند. جزئیات مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۵- مقادیر بهینه پیش‌بینی‌شده و آزمایشگاهی برای حذف کدورت

A:	B:	C:	راندمان حذف	راندمان حذف	راندمان حذف فرات
کدورت اولیه (NTU)	pH	دوز فرسول (mg/L)	کدورت (%)	TSS (%)	(VI) (%)
در محدوده	هدف	در محدوده	بیشترین	-	-
۳۰۰	۸	۲۰۷/۴۳	۸۴/۹۷	-	-
۳۰۰	۸	۲۰۷/۴۳	۸۳/۵۷	۸۴/۷۲	۹۴/۳۲
-	-	-	۱/۴	-	-
درصد خطا					

۵- نتیجه گیری

(VI) باقی مانده نیز در محدوده مجاز قرار داشت که ایمنی فرآیند را تأیید می کند. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه سطوح pH، دوز منعقدکننده و کدورت اولیه اثر هم افزا بر راندمان حذف کدورت دارد و حضور کافی ذرات معلق برای اثربخشی فرآیند ضروری است. در محیط قلیایی، تشکیل گونه های هیدروکسید آهن و فعال شدن مکانیزم جارویی باعث افزایش قابل توجه راندمان فرآیند شد. در نهایت این روش، رویکردی سریع، اقتصادی و پایدار همراه با کارایی بالا برای مدیریت رواناب و استفاده مجدد ایمن از منابع آب در شرایط بحران آبی را فراهم می سازد. بررسی عملکرد در مقیاس واقعی برای توسعه صنعتی پیشنهاد می شود.

یافته های این مطالعه نشان می دهد، محلول فرات سدیم (FerSol) به عنوان یک منعقدکننده و اکسیدکننده چندمنظوره، عملکرد بسیار مؤثری در حذف کدورت و TSS از رواناب سیلابی دارد. بهینه سازی با روش سطح پاسخ، شرایط عملیاتی مطلوب شامل pH برابر ۸ (مطابق با استانداردهای مصارف کشاورزی و آشامیدنی)، دوز منعقدکننده (محلول فرات سدیم) معادل ۲۰۷/۴۳ میلی گرم بر لیتر و کدورت اولیه ۳۰۰ NTU را تعیین کرده است. در این شرایط، راندمان حذف کدورت به ۸۳/۵۷ درصد و راندمان حذف TSS به ۸۴/۷۲ درصد رسید. همچنین، مقدار یون فرات

References

- Mendoza, K. G. C., Rupin, M. D. J. V., & Rubi, R. V. (2025). Mitigating the global potable water crisis: a systematic review of emerging urban stormwater conversion technologies. *Environmental and earth sciences proceedings*, 32(1), 8.
- Zhang, Y., Zhao, W., Chen, X., Jun, C., Hao, J., Tang, X., & Zhai, J. (2020). Assessment on the effectiveness of urban stormwater management. *Water*, 13(1), 4.
- Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Ratnaweera, H. (2025). High rate stormwater treatment for water reuse and conservation. *Applied sciences*, 15(2), 590.
- De Jesus, J. O. N., Medeiros, D. L., Esquerre, K. P. O., Sahin, O., & DE Araujo, W. C. (2024). Water treatment with aluminum sulfate and tanin-based biocoagulant in an oil refinery: the technical, environmental, and economic performance. *Sustainability*, 16(3), 1191.
- Maćczak, P., Kaczmarek, H., & Ziegler-Borowska, M. (2020). Recent achievements in polymer bio-based flocculants for water treatment. *Materials*, 13(18), 3951.
- Zhang, K., Bach, P. M., Mathios, J., Dotto, C. B., & Deletic, A. (2020). Quantifying the benefits of stormwater harvesting for pollution mitigation. *Water research*, 171, 115395.
- Zevenbergen, C., Ashley, R., Garvin, S., Pasche, E., & Evelpidou, N. (2010). *Urban flood management*. CRC Press.
- Liu, A., Goonetilleke, A., & Egodawatta, P. (2015). Role of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. Springer.
- Pritchard, J. C., Hawkins, K. M., Cho, Y. M., Spahr, S., Struck, S. D., Higgins, C. P., & Luthy, R. G. (2022). Black carbon-amended engineered media filters for improved treatment of stormwater runoff. *ACS Environmental Au*, 3(1), 34-46.
- Müller, A., Osterlund, H., Marsalek, J., & Viklander, M. (2020). The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of the Total Environment*, 709, 136125.
- Feng, W., Liu, Y., & Gao, L. (2022). Stormwater treatment for reuse: Current practice and future development – A review. *Journal of Environmental Management*, 301, 113830.
- Dar, A. A., Pan, B., Qin, J., Zhu, Q., Lichtfouse, E., Usman, M., & WANG, C. (2021). Sustainable ferrate oxidation: reaction chemistry, mechanisms and removal of pollutants in wastewater. *Environmental Pollution*, 290, 117957.
- YU, J., Sumita, Zhang, K., ZHU, Q., WU, C., HUANG, S., ... & PANG, W. (2023). A review of research progress in the preparation and application of ferrate (VI). *Water*, 15(4), 699.
- Gaber, O., Elbarki, W., Fayed, M., & Aly, S. A. A. (2024). Ferrate as a coagulant prior to sand filters treating secondary wastewater effluent for reuse. *Water Science & Technology*, 90(1), 61-74.
- Guo, Q., XU, Z., Chu, W., Zhou, Y., Gao, X., & YE, C. (2025). Exploring the degradation of ofloxacin in sewer overflows by Fe(VI)/PMS, Fe(VI)/PDS, and Fe(VI)/SPC: Overlooked synergistic effect of oxidation and in-situ coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 488, 137333.
- Talaiekhosani, A., Talaei, M. R., & Rezaei, S. (2017). An overview on production and application of ferrate (VI) for chemical oxidation, coagulation and disinfection of water and wastewater. *Journal of environmental*

- chemical engineering, 5(2), 1828-1842.
- Tran, T. K., Nguyen, D. H. C., Hoang, G. P., Nguyen, T. T., & Nguyen, N. H. (2020). Application of ferrate as coagulant and oxidant alternative for purifying Saigon river water. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 36(4).
- AL Umairi, A. R., How, Z. T., & El-Din, M. G. (2021). Enhanced primary treatment during wet weather flow using ferrate as a coagulant, coagulant aid and disinfectant. *Journal of Environmental Management*, 290, 112603.
- Lee, J., Wang, J., OH, Y., & Jeong, S. (2023). Highly efficient microplastics removal from water using in-situ ferrate coagulation: Performance evaluation by micro-Fourier-transformed infrared spectroscopy and coagulation mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 451(Part 2), 138556.
- Deng, Y., & Guan, X. (2024). Unlocking the potential of ferrate(VI) in water treatment: Toward one-step multifunctional solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 464, 132920.
- Vahdatkhoram, F., Ghoreyshi, A. A., & Chaichi, M. J. (2025). Development of a New UiO-66 Metal–Organic Framework with Two-Dimensional Nanosheet Structure Under Optimized Conditions for Enhanced Removal of Heavy Metals from Water. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-21.
- Pamuru, S. T., Forgione, E., Croft, K., Kjellerup, B. V., & Davis, A. P. (2021). Chemical characterization of urban stormwater: Traditional and emerging contaminants. *Science of The Total Environment*, 794, 151887.
- Makepeace, D. K., Smith, D. W., & Stanley, S. J. (1995). Urban stormwater quality: summary of contaminant data. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 25(2), 93-139.
- Torabian, A. (2009). Drinking water: Physical and chemical specifications. ISIRI Standard No. 1053, 5th revision, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Tehran, Iran.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and agriculture organization of the United Nations.