



بهینه سازی فرآیند انعقاد و لخته سازی برای کاهش مواد آلی در پساب صنایع لاتکس با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

فریبا استوار^۱، سعید پورکریم مژدهی^۲، نیلوفر عابدین زاده^۳، محدثه توکلی^۴

- ۱- دکتری شیمی تجزیه، پژوهشگر پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
۲- سرپرست گروه بهره برداری تصفیه خانه های فاضلاب استان گیلان، اداره آب و فاضلاب استان گیلان، گیلان، ایران
۳- دکتری محیط زیست، عضو هیات علمی پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
۴- کارشناسی ارشد شیمی تجزیه، کارشناس پژوهشی پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	پساب صنایع تولید دستکش، به ویژه پساب حاوی لاتکس، به دلیل دارا بودن ترکیبات آلی مقاوم، کلونیدهای پایدار و مواد افزودنی شیمیایی، از جمله پساب های دشوار برای تصفیه محسوب می شود. هدف این پژوهش، بهینه سازی فرآیند شیمیایی انعقاد و لخته سازی برای کاهش بار آلی این نوع پساب با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) بود. برای این منظور، سه منعقدکننده شامل آلومینیم سولفات (Alum)، فریک کلراید (FeCl ₃) و پلی آلومینیوم کلراید (PAC) همراه با کمک منعقدکننده های آهک و پلی الکترولیت پلیمری (پلی آکریل آمید) مورد ارزیابی قرار گرفتند. طراحی آزمایش با روش مرکب مرکزی (CCD) و در قالب ۲۶ ترکیب آزمایشی اجرا شد و پارامتر COD به عنوان شاخص اصلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که PAC در مقایسه با سایر منعقدکننده ها، عملکرد بهتری در حذف COD داشته و در ترکیب بهینه با آهک و پلی الکترولیت، راندمان حذف بیش از ۸۹/۵ درصد با مقادیر غلظتی منعقد کننده، آهک و پلی الکترولیت به ترتیب ۲۱۱/۵ mg/L، ۴۱/۵ mg/L و ۲/۱ mg/L و غلظت COD باقیمانده حدود ۲۶ mg/L نشان داد. تحلیل واریانس (ANOVA) مدل نشان داد که اثرات خطی و درجه دوم PAC و همچنین اثر متقابل PAC و آهک از نظر آماری معنادار ($P < 0.01$) بودند، و مدل درجه دوم با F-value بالا، برازش مناسبی با داده ها داشت. در مجموع، استفاده ترکیبی از PAC، آهک و پلی آکریل آمید، روشی مؤثر، اقتصادی و قابل اعتماد برای تصفیه پیشرفته پساب های حاوی لاتکس است که می تواند در رسیدن به استانداردهای تخلیه به منظور استفاده مجدد در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹	
کلید واژه ها: تصفیه شیمیایی، پساب صنایع لاتکس، انعقاد و لخته سازی، پلی آلومینیوم کلراید (PAC)، روش سطح پاسخ (RSM)، COD	



Optimization of Coagulation–Flocculation Process for Organic Load Reduction in Latex Industry Wastewater Using Response Surface Methodology (RSM)

Fariba Ostovar^{1✉}, Saeed pourkarim Mozhdehi², Niloofar Abedinzadeh³, Mohadeseh Tavakoli⁴

- 1- Ph.D. in Analytical Chemistry, Researcher at Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Guilan, Iran
- 2- Supervisor of the Operation Group of Wastewater Treatment Plants in Guilan Province, Guilan Water and Wastewater Company, Rasht, Iran
- 3- Ph.D. in Environmental Science, Faculty Member at Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Rasht, Iran
- 4- M.Sc. in Analytical Chemistry, Research Expert at Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Rasht, Iran

Article Info	Abstract
Article type: Research Article	Wastewater generated from glove manufacturing industries, particularly latex-containing effluents, is challenging to treat due to the presence of refractory organic compounds, stable colloids, and various chemical additives. This study aimed to optimize the chemical coagulation–flocculation process to reduce the organic load of such wastewater using Response Surface Methodology (RSM). Three coagulants—aluminum sulfate (alum), ferric chloride (FeCl_3), and polyaluminum chloride (PAC)—were evaluated in combination with auxiliary coagulants, including lime and a polymeric polyelectrolyte (polyacrylamide). The experimental design was carried out using a Central Composite Design (CCD) comprising 26 experimental runs, with COD selected as the key performance indicator. The results showed that PAC outperformed the other coagulants in COD removal efficiency. Under optimal conditions, the combination of PAC, lime, and polyacrylamide achieved more than 89.5% COD removal, with respective concentrations of 211.5 mg/L (PAC), 41.5 mg/L (lime), and 2.1 mg/L (polyacrylamide), resulting in a residual COD concentration of approximately 183 mg/L. ANOVA results indicated that both the linear and quadratic effects of PAC, as well as its interaction with lime, were statistically significant ($P < 0.01$), and the second-order model demonstrated a strong fit with a high F-value. Overall, the combined use of PAC, lime, and polyacrylamide proved to be an effective, economical, and reliable method for the advanced treatment of latex-containing wastewater, potentially enabling compliance with discharge standards and facilitating reuse in agriculture.
Article history: Received: 2025/05/25 Accepted: 2025/08/31 Available online: 2025/09/20	
Keywords: Chemical treatment; Latex industry wastewater; Coagulation–flocculation; Polyaluminum chloride (PAC); Response Surface Methodology (RSM); COD	

مقدمه

با رشد فزاینده جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه صنایع، حجم تولید پساب‌های صنعتی و شهری به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. این پدیده، چالش‌های متعددی در زمینه حفاظت از منابع آب و محیط زیست ایجاد کرده است. در این میان، پساب صنایع حاوی لاتکس به دلیل ویژگی‌های خاص فیزیکی و شیمیایی، از جمله پایداری کلوئیدی، وجود ترکیبات آلی مقاوم و پتانسیل بالای آلودگی، به‌عنوان یکی از منابع مهم آلودگی زیست‌محیطی شناخته می‌شود (Nguyen & Luong, 2012; Tian et al., 2023). پساب‌های صنعتی حاوی ترکیبات آلی پایدار، به‌ویژه پساب‌هایی که شامل ذرات لاتکس هستند، از جمله منابع مهم آلودگی محیط زیست به شمار می‌روند. حضور مواد آلی مقاوم در این نوع پساب‌ها نه‌تنها موجب کاهش کیفیت منابع آبی پذیرنده می‌گردد، بلکه به‌دلیل ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاص لاتکس نظیر پایداری کلوئیدی و قابلیت امولسیون شدن، فرآیند تصفیه آن‌ها نیز با چالش‌های فنی و اقتصادی مواجه است. فاضلاب‌های حاصل از صنایع مبتنی بر لاتکس مانند تولید دستکش، لاستیک و امولسیون‌های پلیمری، معمولاً دارای ویژگی‌هایی از جمله بار آلی بالا (COD بالا تا چند هزار میلی‌گرم بر لیتر و بالتبع BOD بالا)، کدورت زیاد (به دلیل وجود ذرات پلیمری معلق با اندازه نانومتر تا میکرومتر)، و حضور ذرات کلوئیدی و امولسیونی پایدار هستند که حذف آن‌ها با روش‌های متداول تصفیه دشوار است. این نوع فاضلاب‌ها معمولاً دارای pH متغیر (بین ۴ تا ۱۰)، مواد معلق زیاد (TSS بالا)، و ترکیبات شیمیایی مقاوم مانند امولسیفایرها، بازها (نظیر آمونیاک)، فلزات سنگین و افزودنی‌های شیمیایی فرایند تولید، پایدارکننده‌ها و ضدکف‌ها می‌باشند که حذف آن‌ها از طریق روش‌های معمول فیزیکی یا بیولوژیکی به‌تنهایی دشوار است (Mohammadi, Man, Hassan, & Yee, 2010). همچنین، وجود برخی مونومرها و ترکیبات جانبی ممکن است موجب سمیت زیستی شده و در فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی اختلال ایجاد کند. در نتیجه، مدیریت و تصفیه مؤثر این نوع فاضلاب‌ها نیازمند روش‌های پیشرفته و ترکیبی است (Crini & Lichtfouse, 2019).

تاکنون روش‌های مختلفی برای تصفیه این نوع پساب مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته است، از جمله انعقاد و لخته‌سازی شیمیایی^۱، تصفیه بیولوژیکی هوازی و بی‌هوازی (Hien et al., 2017)، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته^۲ مانند ازن‌زنی و UV/H₂O₂ (Pendashteh, Haji, Chaibakhsh, Yazdi, & Pendashteh, 2017)، فرآیندهای غشایی مانند اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون (Abdelrasoul, Doan, Lohi, & Cheng, 2017; Lim, Jasimin, Ng, & Tan, 2022)، جذب سطحی با زغال فعال یا جاذب‌های نانو (Sun et al., 2022)، انعقاد الکتروشیمیایی^۳. روش‌های تصفیه پساب صنعتی (پساب شیمیایی) با توجه به تأثیرات منفی که ورود این پساب‌ها به محیط‌زیست به همراه دارند، دارای تنوع بالایی است. به‌طوریکه هر یک از این روش‌ها با توجه به نوع مواد آلاینده موجود در پساب شیمیایی طراحی شده و دارای ویژگی‌های خاصی هستند. در روش‌های تصفیه بیولوژیکی هوازی و بی‌هوازی، وجود امولسیون‌های پایدار و ترکیبات شیمیایی مقاوم مانند امولسیفایرها، مونومرها و ضد کف‌ها می‌تواند راندمان حذف را کاهش داده و حتی باعث سمیت برای میکروارگانیسم‌ها شود (Bindhu, Madhu, & Haritha, 2024). فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مانند ازن‌زنی و UV/H₂O₂ علی‌رغم توانایی بالا در تجزیه ترکیبات مقاوم، معمولاً هزینه‌بر بوده و در برخی موارد ممکن است ترکیبات جانبی سمی تولید کنند (Raagasweatha, Ahamed, Mahalingam, & Kalathi, 2025). فرآیندهای غشایی نظیر اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون، با وجود اثربخشی بالا، با مشکل گرفتگی غشاء^۴، مصرف انرژی زیاد و هزینه‌های عملیاتی بالا مواجه هستند (Gayatri et al., 2025). جذب سطحی با زغال فعال یا جاذب‌های نانو، اگرچه در حذف آلاینده‌های خاص مؤثر است، اما در حجم زیاد پساب، نیاز به مقادیر بالای جاذب داشته و احیای آن نیز هزینه‌بر و گاه غیراقتصادی است (Sutarut, Cheirsilp, & Boonsawang, 2023). همچنین، در انعقاد الکتروشیمیایی، میزان مصرف انرژی، خوردگی الکترودها و تولید لجن، از جمله محدودیت‌های اصلی به‌شمار می‌آید (Janagarajan, 2021). کاربرد پساب‌های تصفیه شده در کشورهای مختلف جهان از دیر باز رواج داشته است. در کشورهای پیشرفته فقط پساب‌های تصفیه

1. Chemical Coagulation-Flocculation

2. AOPs

3. Electrocoagulation

4. Fouling

شده با رعایت اصول و ضوابط زیست محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. محور این قوانین حفظ سلامتی انسان، حفاظت از محیط - زیست و جلوگیری از آلودگی خاک و آب بوده و در دوره‌های زمانی مشخصی مورد بازنگری قرار می‌گیرد. در حالی که در کشورهای در حال توسعه، علاوه بر پساب‌های تصفیه شده گاهاً از پساب‌های خام نیز برای تولید محصولات کشاورزی استفاده می‌شود (Mensah-Akutteh, Buamah, Wiafe, & Nyarko, 2022).

در میان روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب‌های حاوی لاتکس، انعقاد و لخته‌سازی شیمیایی همچنان یکی از گزینه‌های اصلی و قابل اتکاء محسوب می‌شود، چرا که نسبت به سایر روش‌ها از نظر سادگی اجرا، هزینه کمتر و سازگاری با تغییرات کیفی فاضلاب، عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهد. فرآیند انعقاد و لخته‌سازی^۱ فرآیندی است که در آن از مواد منعقدکننده برای ناپایداری ذرات کلئیدی و ایجاد لخته‌های قابل ته‌نشینی استفاده می‌شود (Riveros, 2018). مکانیسم عملکرد منعقدکننده‌ها شامل خنثی‌سازی بار ذرات کلئیدی و تسهیل تجمع آن‌هاست. آلوم و فریک کلراید با آزادسازی یون‌های Al^{+3} و Fe^{+3} موجب انعقاد می‌شوند، در حالی که PAC به‌دلیل ساختار پلیمری و پیش‌هیدرولیز خود، همزمان خنثی‌سازی بار و پل‌زنی مؤثرتر بین ذرات را فراهم می‌سازد (A. Badawi, Hassan, Farouk, Bakhoun, & Salama, 2024; Ratnaningsih & Widiyati, 2023). کارایی این فرآیند به پارامترهایی نظیر نوع و غلظت منعقدکننده، pH، زمان اختلاط و سرعت همزدن بستگی دارد. تعیین شرایط بهینه این متغیرها می‌تواند نقش مهمی در افزایش راندمان حذف و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری داشته باشد (Z. Zhao et al., 2019). با توجه به تأثیر متقابل پارامترهای متعدد در کارایی این فرآیند، استفاده از روش‌های آماری مانند روش سطح پاسخ^۲ برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، می‌تواند منجر به افزایش راندمان حذف و کاهش مصرف مواد شیمیایی گردد (Mensah-Akutteh et al., 2022).

در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی پاسخ سطح، تلاش شده است تا اثر متغیرهای کلیدی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از سه منعقد کننده آلومینیم سولفات (Alum)، فریک کلراید ($FeCl_3$) و پلی آلومینیم کلراید (PAC) بر کاهش مواد آلی محلول در پساب پیش تصفیه شده حاوی لاتکس بررسی و شرایط عملیاتی بهینه برای حداکثر کارایی حذف، تعیین گردد. نتایج این پژوهش می‌تواند به طراحی دقیق‌تر سیستم‌های تصفیه و بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌های صنعتی کمک شایانی نماید.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی مورد استفاده

مواد مصرفی در این پژوهش شامل آلومینیم سولفات ($Al_2(SO_4)_3$ ، آلوم)، فریک کلراید ($FeCl_3$)، پلی آلومینیم کلراید (PAC) اسید سولفوریک (H_2SO_4)، سدیم هیدروکسید (NaOH)، کلسیم هیدروکسید (آهک)، پلی آکریل آمید به عنوان کمک منعقد کننده آنیونی، پتاسیم هیدروژن فتالات (KHP)، پتاسیم دی کرومات ($K_2Cr_2O_7$)، نقره سولفات (Ag_2SO_4)، و جیوه (II) سولفات ($HgSO_4$) می‌باشد که نمک‌های استاندارد جهت آزمون از برند مرک آلمان و منعقد کننده‌های شیمیایی مورد استفاده از نمک صنعتی استفاده شدند. محلول‌های مورد نظر در غلظت‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، جهت تهیه محلول‌های رقیق و مادر از آب مقطر استفاده گردید.

دستگاه‌های مورد استفاده

جهت بررسی فرآیند تصفیه شیمیایی به روش انعقاد و لخته‌سازی، از دستگاه جارتست ۶ خانه زاگ شیمی استفاده شد. همچنین از دستگاه مولتی پارامتر pH، EC، DO و دما شرکت Aqualytic مدل AL15 استفاده گردید. دستگاه COD متر به همراه

¹. Coagulation-Flocculation

². Response Surface Methodology -RSM

اسپکتروفتومتر COD شرکت Aqualytic مدل AL250 نیز در این پژوهش جهت آنالیز ترکیبات آلی و غلظت COD باقیمانده مورد استفاده قرار گرفت.

روش آزمون

پساب استفاده شده در این پژوهش، حاوی ترکیبات لاتکس بوده که به صورت خام از کارخانه تولید محصولات لاتکس گرفته شد. با توجه به پایداری کلوئیدی بالای پساب‌های حاوی لاتکس و وجود ترکیبات آلی مقاوم، انجام پیش‌تصفیه با فرآیند فنتون به‌منظور تجزیه اولیه پلیمرها و کاهش پایداری امولسیون ضروری بود، چرا که این مرحله باعث افزایش کارایی انعقاد و بهبود تجمع ذرات در مرحله بعدی گردید. در نتیجه در این پژوهش، ابتدا از فرآیند پیش‌تصفیه اکسیداسیون پیشرفته به روش فنتون با بررسی تاثیر پارامترهای تاثیرگذار مانند غلظت اکسند H_2O_2 ، غلظت کاتالیزور Fe^{2+} ، اثر pH و زمان انجام واکنش بر روی پساب خام، غلظت COD پساب کاهش یافته و سپس، فرآیند انعقاد و لخته‌سازی جهت بررسی عملکرد و کاهش بار آلی پساب مورد استفاده قرار گرفت. آزمون انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از دستگاه جارتست انجام گرفت. فرآیند جارتست با بررسی همزمان ۶ نمونه مقدور می‌باشد. در این دستگاه جهت بررسی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، دور تند با سرعت ۱۲۰ rpm به مدت ۱ دقیقه و دور کند با سرعت ۳۰ rpm به مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفت. سپس به مدت ۲۰ دقیقه، نمونه ساکن قرار داده شد تا لخته‌های تشکیل‌شده ته‌نشین گشته و با استفاده از فیلتراسیون، جداسازی پساب تصفیه‌شده از لجن‌های هیدروکسیدی انجام گرفت. پارامتر اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) به عنوان پارامتر هدف انتخاب شد. آزمونهای پیش‌تست جهت تعیین محدوده اولیه غلظت منعقد کننده‌ها، کمک منعقد کننده و pH عملیاتی انجام گرفت. طراحی آزمایش جهت تعیین اثرات متقابل پارامترهای تاثیرگذار به روش سطح پاسخ و با استفاده از نرم افزار طراحی آزمایش (۱۳ Design Expert) به روش طراحی مرکب مرکزی (CCD^۱) و ۲۶ آزمون عملیاتی انجام شد. بررسی اثر pH اولیه در محدوده‌های اسیدی و بازی با استفاده از محلول‌های سدیم هیدروکسید و اسید سولفوریک در غلظت‌های مختلف ۰/۱ و ۰/۰۱ مولار نشان داد که به دلیل نوع پساب مورد بررسی و فرایند پیش‌تصفیه انجام شده، تغییرات pH تاثیر نامحسوسی در راندمان حذف داشت؛ در نتیجه، به عنوان پارامتر عملیاتی در طراحی آزمایش به روش دیزاین اکسپرت انتخاب نشد. جهت بررسی تصفیه‌پذیری پساب پیش‌تصفیه شده کارخانه تولید محصولات لاتکس، از فرآیند شیمیایی به روش انعقاد و لخته‌سازی استفاده شد و تاثیر غلظت‌های مختلف از قبیل غلظت منعقدکننده‌ها (۳۷۵-۵۰ mg/L)، غلظت کمک منعقد کننده آهک (۶۵-۱۵ mg/L) و غلظت کمک منعقد کننده پلیمری پلی آکریل آمید (۰/۴-۵ mg/L) بررسی شد. در نهایت، غلظت COD باقیمانده که بیانگر غلظت ترکیبات آلی در پساب می باشد؛ به روش استاندارد محیط زیست با استفاده از دستگاه COD متر و اسپکتروفتومتر با درون‌یابی منحنی کالیبراسیون و به روش رفلکس بسته محاسبه گردید (Chambers, 2019).

لازم به ذکر است که اگرچه نتایج این پژوهش در مقیاس پیلوت انجام شده است، اما به دلیل طراحی مهندسی مناسب و استفاده از شرایط عملیاتی نزدیک به واقعیت، قابلیت ارتقاء به مقیاس صنعتی با حداقل تعدیلات فرآیندی وجود دارد. همچنین، از جمله عوامل محیطی مؤثر، دما می‌باشد که در این مطالعه تحت شرایط محیطی معمول (۲۲-۲۸ درجه سانتی‌گراد) انجام شده و نتایج نشان می‌دهد که در این بازه دمایی، تغییرات قابل توجهی در عملکرد فرآیند مشاهده نشده است. با این حال، در مناطق با نوسانات دمایی شدید، ممکن است در میزان انعقاد، ویسکوزیته پساب یا دینامیک ذرات معلق، تفاوت‌هایی ایجاد شود که نیازمند بررسی بیشتر در شرایط خاص اقلیمی است. همچنین، کدورت اولیه فاضلاب یکی از متغیرهای مؤثر در راندمان حذف ذرات است؛ هرچند در این مطالعه بازه مشخصی از کدورت مورد بررسی قرار گرفته، اما افزایش یا کاهش بیش از حد کدورت اولیه ممکن است بر مقدار بهینه مواد شیمیایی مورد نیاز تاثیر بگذارد. با این حال، محدوده عملیاتی استفاده‌شده در این تحقیق منطبق با شرایط واقعی بسیاری از واحدهای صنعتی و تصفیه‌خانه‌ای است و از این رو، می‌تواند مبنای مناسبی برای توسعه صنعتی باشد.

^۱. Central Composite Design

یافته‌های پژوهش

مشخصات پساب هدف

پساب خام اولیه از یکی از کارخانجات تولید محصولات لاتکس گرفته شد و مورد آنالیز فیزیکی و شیمیایی قرار گرفت. جهت عدم تغییر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اولیه پساب، نمونه گرفته شده در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری شد و در محل با استفاده از مواد شیمیایی مورد نیاز، فیکس گردید. تمامی آزمایشات با روش استاندارد انجام شد (Beutler et al., 2014). آنالیز COD جهت تعیین غلظت ترکیبات آلی در پساب خام اولیه انجام شد و غلظت اولیه حدود ۳۶۵۵ mg/L بدست آمد. سپس پساب خام به روش اکسیداسیون پیشرفته، پیش تصفیه شد و پس از حصول حدود ۵۲ درصد راندمان حذف COD، پساب پیش تصفیه شده، جهت بررسی تصفیه پذیری به روش انعقاد و لخته سازی با منعقد کننده های آلوم، PAC و $FeCl_3$ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با توجه به استانداردهای سازمان محیط زیست جهت استفاده از پساب تصفیه شده در مصارف کشاورزی، پارامتر COD به عنوان پارامتر هدف انتخاب گردید. نتایج آنالیز پساب پیش تصفیه شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱) آنالیز فیزیکی و شیمیایی پساب پیش تصفیه شده کارخانجات تولید محصولات لاتکس

پارامتر	مقدار	واحد
pH	۶/۲	-
COD	۱۷۵۳	mg/L
BOD ₅	۶۵۰	mg/L
EC	۲/۱۱	mS/cm
کدورت	۲۴/۳۳	NTU
TSS	۴۷/۸	mg/L

بررسی فرآیند انعقاد و لخته سازی

طراحی آزمایش

فرآیند انعقاد و لخته سازی جهت خنثی سازی مواد کلوئیدی و حذف بار آلی و معدنی در پساب استفاده می شود. در این بررسی، منعقد کننده های آلوم، فریک کلراید و PAC مورد استفاده قرار گرفت و غلظت های مختلف منعقد کننده (۳۷۵-۵۰ mg/L) به همراه کمک منعقد کننده های آهک و پلی آکریل آمید (PAM^1) جهت بررسی میزان تصفیه پذیری پساب استفاده شد. طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار ۱۳ Design Expert به روش مرکب مرکزی (CCD) انجام گرفت و در نهایت، با انتخاب بهترین منعقد کننده با بالاترین راندمان حذف، بررسی های آماری انجام شد. طراحی آزمایش انجام شده با مقادیر درصد حذف COD در جدول ۲ نشان داده شده است.

بررسی اثر متقابل پارامترهای عملیاتی در فرآیند انعقاد و لخته سازی

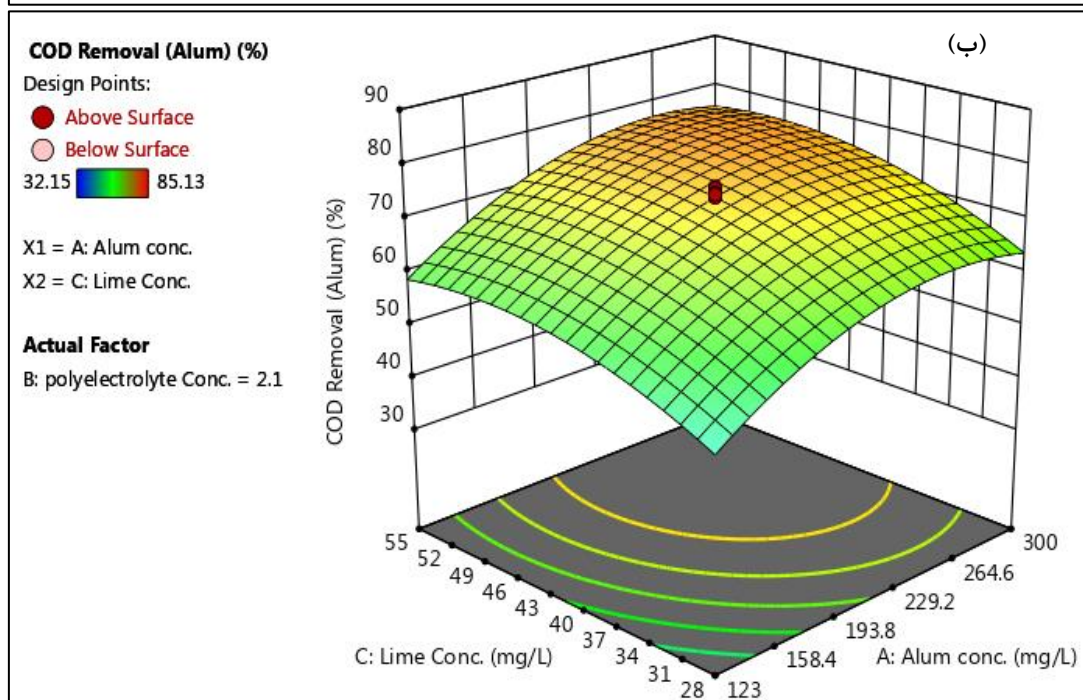
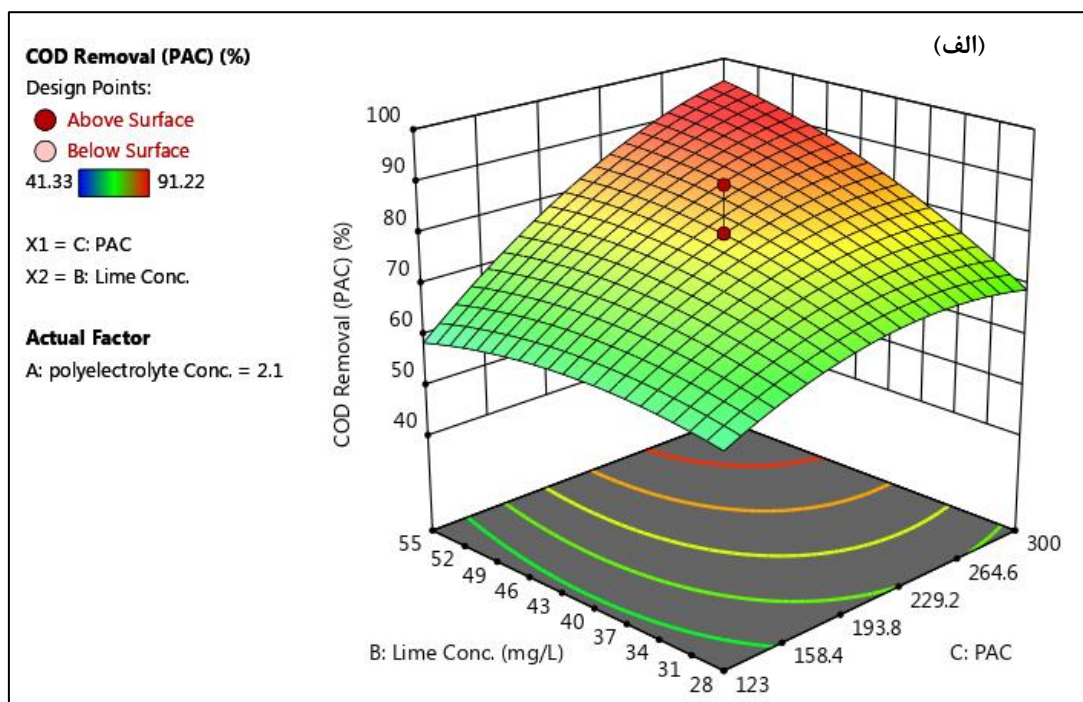
بررسی اثر متقابل غلظت منعقد کننده های مختلف و کمک منعقد کننده آهک

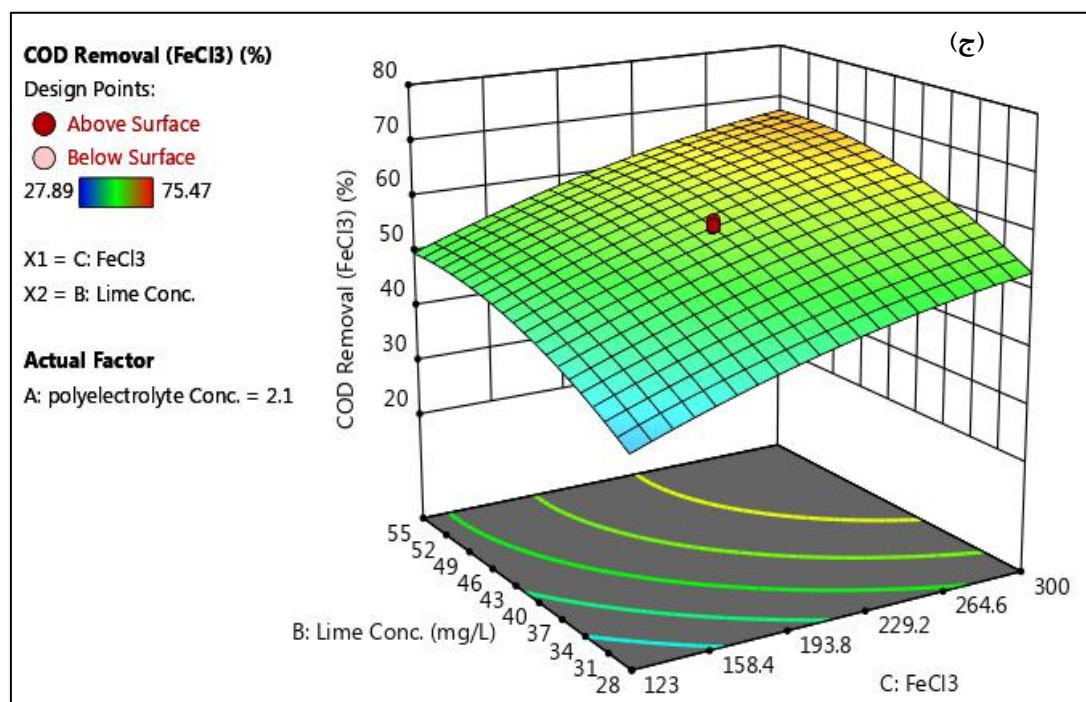
جهت بررسی اثر متقابل غلظت منعقد کننده های آلوم، PAC و فریک کلراید و کمک منعقد کننده آهک، مقادیر مختلف غلظتی منعقد کننده ها (۳۷۵-۵۰ mg/L) و کمک منعقد کننده آهک (۱۵-۶۵ mg/L) در حضور مقدار ثابت کمک منعقد کننده پلیمری پلی آکریل آمید برابر ۲/۱ mg/L بر راندمان حذف COD از پساب صنایع لاتکس بررسی گردید. نتایج در شکل ۱ (الف تا ج) نشان داده شده است.

¹. Polyacrylamide

جدول (۲) طراحی آزمایش به روش مرکب مرکزی (CCD) جهت تصفیه پساب صنایع لاتکس به روش انعقاد و لخته‌سازی

ردیف	غلظت منعقد کننده			غلظت کمک منعقد کننده (mg/L)			درصد حذف COD به تفکیک	
	Alum (mg/L)	PAC (mg/L)	FeCl ₃ (mg/L)	پلی الکترولیت	آهک	FeCl ₃ (mg/L)	PAC (mg/L)	Alum (mg/L)
۱	۱۲۳	۳۰۰	۳۰۰	۱/۲	۵۵	۵۶/۴۲	۸۸/۲۳	۸۳/۱۱
۲	۳۰۰	۳۰۰	۱۲۳	۱/۲	۵۵	۷۴/۷۸	۹۱/۲۲	۵۱/۳۲
۳	۲۱۱/۵	۳۷۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۷/۹۵	۸۹/۴۷	۷۵/۷۲
۴	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۷/۱۱	۷۹/۰۲	۷۴/۷۸
۵	۱۲۳	۳۰۰	۱۲۳	۳	۵۵	۳۱/۷۶	۸۵/۲۴	۴۷/۲۲
۶	۲۱۱/۵	۵۰	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۸/۰۸	۴۸/۳۲	۷۵/۲۴
۷	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۵۰	۲/۱	۴۱/۵	۵۷/۶۶	۷۸/۹۱	۳۷/۲۲
۸	۳۷۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۷۵/۴۷	۸۹/۵۲	۷۶/۰۱
۹	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۸/۰۱	۷۹/۷۱	۷۴/۸۸
۱۰	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۶۵	۶۰/۰۱	۸۱/۲۳	۷۵/۴۶
۱۱	۳۰۰	۱۲۳	۳۰۰	۱/۲	۵۵	۵۵/۸۷	۵۶/۱۴	۸۳/۰۱
۱۲	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۷/۸۵	۷۸/۱۱	۷۴/۱۷
۱۳	۳۰۰	۳۰۰	۱۲۳	۳	۲۸	۴۸/۱۲	۵۱/۳۲	۴۱/۴۱
۱۴	۳۰۰	۱۲۳	۱۲۳	۳	۵۵	۵۲/۷۱	۵۰/۱۲	۴۸/۲۱
۱۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۰/۵	۴۱/۵	۴۶/۳۶	۶۸/۴۱	۶۳/۲۲
۱۶	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۴	۴۱/۵	۴۷/۳۳	۷۰/۲۳	۶۵/۳۳
۱۷	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۸/۰۲	۷۹/۷۸	۷۴/۵۶
۱۸	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۱/۲	۲۸	۲۷/۸۹	۴۳/۵۵	۳۲/۱۵
۱۹	۳۰۰	۱۲۳	۱۲۳	۳	۲۸	۴۸/۳۲	۵۰/۴۶	۵۱/۳۶
۲۰	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۳۷۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۸/۳۲	۷۹/۳۸	۸۵/۱۳
۲۱	۱۲۳	۳۰۰	۳۰۰	۳	۲۸	۲۸/۱۲	۷۸/۵۵	۴۸/۰۲
۲۲	۱۲۳	۱۲۳	۳۰۰	۳	۵۵	۳۶/۶۴	۴۱/۳۳	۳۴/۲۲
۲۳	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۱۵	۳۸/۵۲	۶۹/۳۲	۶۱/۱۱
۲۴	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۵۸/۸۸	۸۰/۲۱	۷۳/۹۸
۲۵	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۱/۲	۲۸	۳۹/۷۸	۵۱/۱۵	۴۲/۶۳
۲۶	۵۰	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲/۱	۴۱/۵	۳۴/۷۱	۸۰/۱۲	۷۴/۰۸

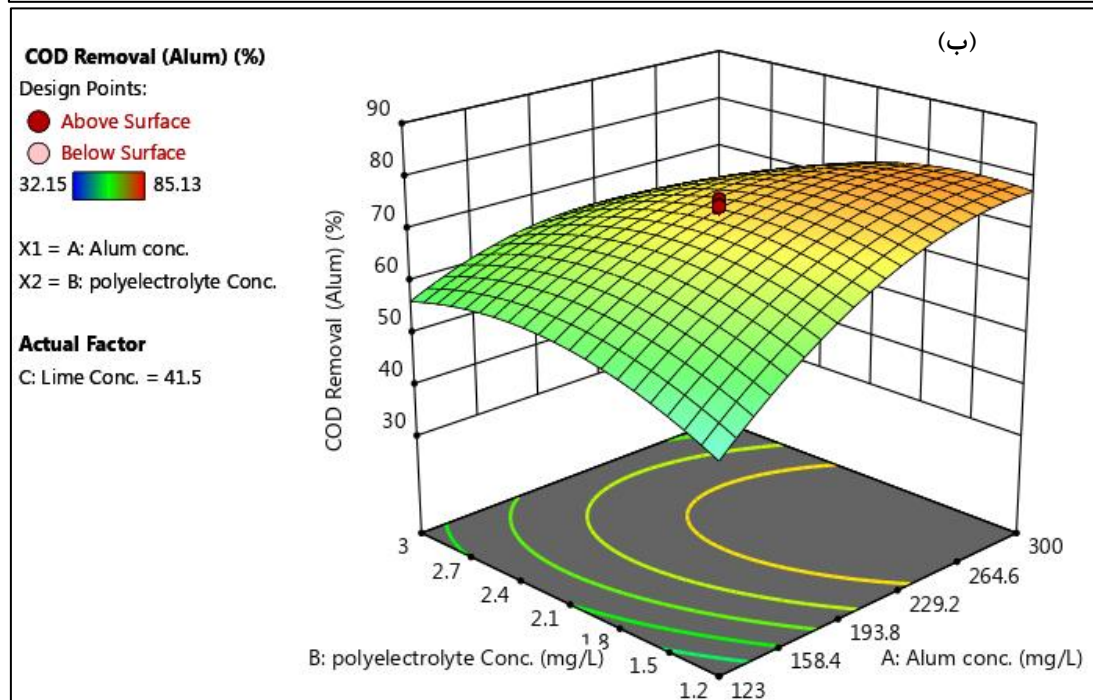
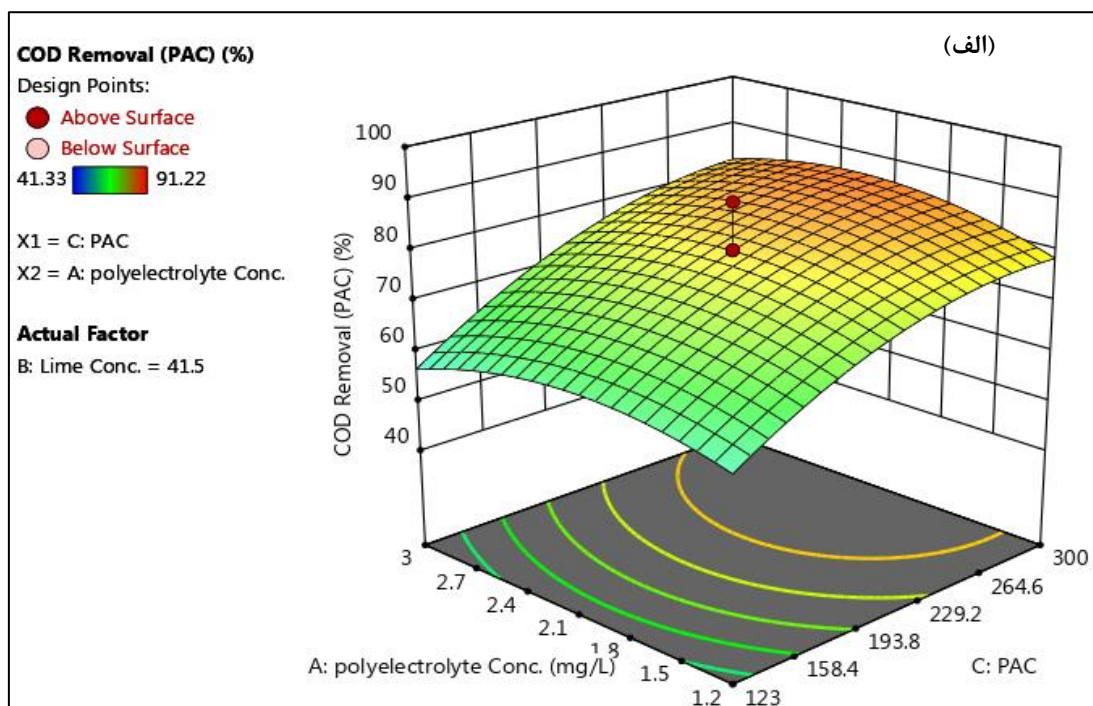


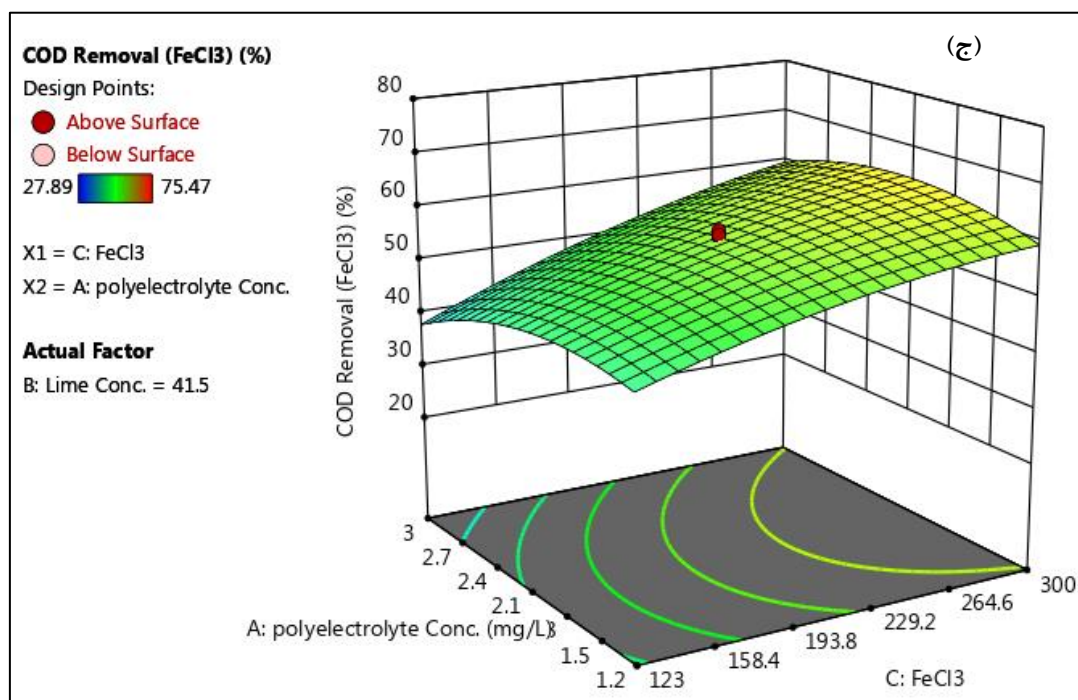


شکل (۱) اثر متقابل غلظت منعقد کننده‌های الف (PAC، ب) آلوم و ج) فریک کلراید و کمک منعقد کننده آهک در راندمان حذف COD از پساب صنایع لاتکس

بررسی اثر متقابل غلظت منعقد کننده و کمک منعقد کننده پلی آکریل آمید

در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، کمک‌منعقد کننده‌های پلیمری مانند پلی‌آکریل آمید نقش بسیار مهمی در بهبود ساختار و پایداری لخته‌ها ایفا می‌کنند و بررسی اثر متقابل منعقد کننده و پلیمر از اهمیت به سزایی برخوردار است. این پلیمرها که عمدتاً دارای وزن مولکولی بالا و زنجیره‌های بلند هستند، پس از ناپایدار شدن اولیه ذرات کلئیدی توسط منعقد کننده‌های معدنی (مانند آلوم یا PAC)، با ایجاد پل‌های فیزیکی بین ذرات، تجمع آن‌ها را تسهیل کرده و لخته‌های بزرگ‌تر، متراکم‌تر و سریع‌الته‌نشین‌تری تشکیل می‌دهند. اثر اصلی پلی‌آکریل آمید در مرحله لخته‌سازی قابل مشاهده است، جایی که افزایش تماس بین ذرات ناپایدار و تسریع فرآیند ته‌نشینی، منجر به افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها، کاهش حجم لجن تولیدی و کاهش مصرف منعقد کننده اصلی می‌شود. این عملکرد، به‌ویژه در فاضلاب‌هایی با کدورت یا بار آلی بالا، می‌تواند نقش کلیدی در بهینه‌سازی اقتصادی و عملیاتی فرآیند تصفیه ایفا کند. جهت بررسی اثر متقابل منعقد کننده‌های آلوم، PAC و فریک کلراید با پلی‌الکترولیت پلیمری پلی آکریل آمید، غلظت‌های مختلف منعقد کننده‌ها (۵۰-۳۷۵ mg/L) و کمک منعقد کننده پلیمری (۵/۵-۰/۳ mg/L) در حضور مقدار ثابت کمک منعقد کننده آهک برابر ۴۱/۵ mg/L بر راندمان حذف COD از پساب حاوی لاتکس بررسی گردید شکل ۲ (الف تا ج) نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد.

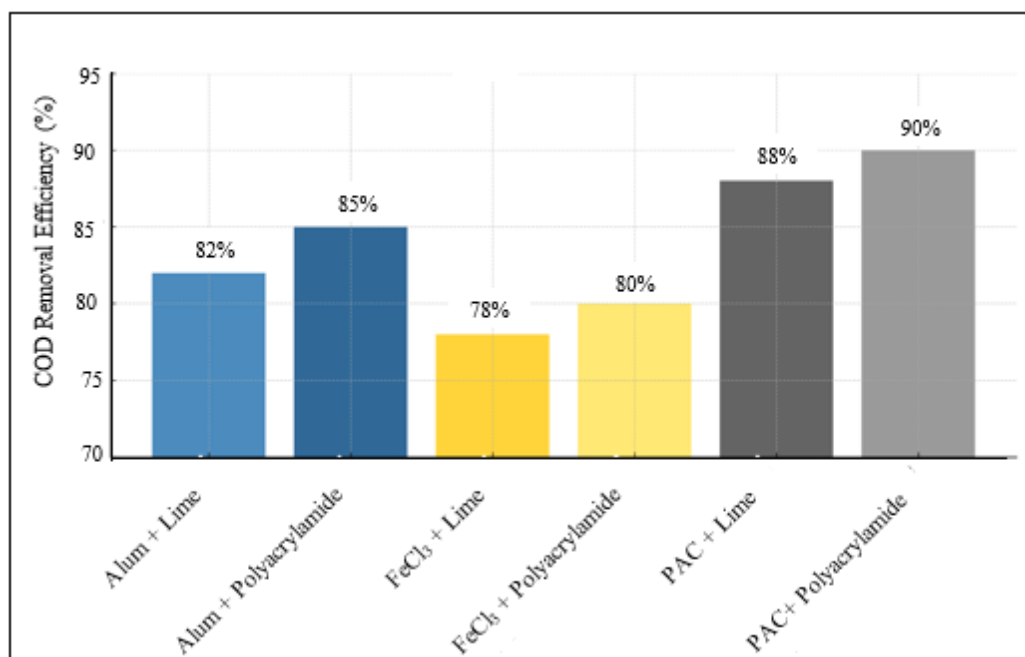




شکل (۲) اثر متقابل غلظت منعقد کننده‌های الف) PAC، ب) آلوم و ج) فریک کلراید و کمک منعقد کننده پلیمری در راندمان حذف COD از پساب صنایع لاتکس

مقایسه عملکرد منعقد کننده‌ها در حذف COD از پساب صنایع لاتکس

جهت تعیین منعقد کننده بهینه با بالاترین راندمان حذف COD و بررسی‌های آماری بیشتر، مقایسه عملکرد سه منعقد کننده آلوم، PAC و فریک کلراید حضور دو کمک‌منعقد کننده آهک و پلی‌آکریل‌آمید مورد استفاده قرار گرفته انجام شد. نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳) مقایسه عملکرد سه نوع منعقد کننده شامل آلوم، فریک کلراید (FeCl_3) و پلی‌آلومینیوم کلراید (PAC) در حضور دو کمک‌منعقد کننده آهک و پلی‌آکریل‌آمید

بررسی‌های آماری فرآیند تصفیه پساب صنایع لاتکس به روش انعقاد و لخته سازی با منعقد کننده PAC آنالیز واریانس داده‌ها

با انتخاب منعقد کننده پلی آلومینیم کلراید (PAC) به عنوان منعقد کننده بهینه با راندمان حدود ۹۰ درصد، جهت بررسی تأثیر غلظت منعقد کننده PAC و کمک منعقد کننده‌های آهک و پلی‌الکترولیت (پلی‌اکریل‌آمید) بر حذف COD از پساب حاوی لاتکس، از طراحی آزمایش CCD و روش سطح پاسخ استفاده شد. نتایج حاصل از مدل رگرسیون چندمتغیره با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) در جدول ۳ مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول (۳) بررسی آنالیز واریانس فرآیند تصفیه به روش انعقاد و لخته‌سازی پساب حاوی لاتکس با استفاده از منعقد کننده PAC

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۵۲۱۱/۷۶	۹	۵۷۹/۰۸	۸/۲۲	۰/۰۰۰۲
A- غلظت پلی‌الکترولیت	۱/۳۸	۱	۱/۳۸	۰/۰۱۹۶	۰/۸۹۰۴
B- غلظت آهک	۶۰۷/۵۱	۱	۶۰۷/۵۱	۸/۶۲	۰/۰۰۹۷
C- غلظت PAC	۲۱۲۷/۷۶	۱	۲۱۲۷/۷۶	۳۰/۱۹	<۰/۰۰۰۱
AB	۱۵۴/۴۷	۱	۱۵۴/۴۷	۲/۱۹	۰/۱۵۸۲
AC	۲۵/۹۴	۱	۲۵/۹۴	۰/۳۶۸۱	۰/۵۵۲۶
BC	۴۹۹/۷۳	۱	۴۹۹/۷۳	۷/۰۹	۰/۰۱۷۰
A ²	۶۰۲/۳۲	۱	۶۰۲/۳۲	۸/۵۵	۰/۰۰۹۹
B ²	۲۶۶/۸۷	۱	۲۶۶/۸۷	۳/۷۹	۰/۰۶۹۴
C ²	۶۳۱/۴۱	۱	۶۳۱/۴۱	۸/۹۶	۰/۰۰۸۶
باقیمانده	۱۱۲۷/۶۱	۱۶	۷۰/۴۸		
شانس تشابه	۶۱۹/۳۶	۵	۱۲۳/۸۷	۲/۶۸	۰/۰۸۰۳
خطای خالص	۵۰۸/۲۵	۱۱	۴۶/۲۰		
مجموع واریانس	۶۳۳۹/۳۷	۲۵			

انتخاب مدل مفهومی مناسب برای RSM

برای مدل‌سازی تأثیر هم‌زمان منعقد کننده پلی‌آلومینیم کلراید (PAC)، آهک و پلی‌الکترولیت بر حذف COD از پساب حاوی لاتکس، مدل‌های مختلف ریاضی از جمله مدل خطی، متقاطع (2FI)، درجه دوم (Quadratic) و مکعبی (Cubic) با یکدیگر مقایسه شدند. انتخاب مدل نهایی بر اساس شاخص‌های آماری مختلفی شامل مجموع و میانگین مربعات، مقدار P مدل کلی (Model p-value)، مقدار F مدل و همچنین عدم برازش (Lack of Fit) انجام گرفت. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول (۴) بررسی مدل مفهومی فرآیند تصفیه به روش انعقاد و لخته‌سازی پساب صنایع لاتکس با استفاده از منعقد کننده PAC

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
خطی	۲۷۶۰/۶۷	۱۱	۲۵۰/۹۷	۵/۴۳	۰/۰۰۴۶
2FI	۱۹۸۹/۱۷	۸	۲۴۸/۶۵	۵/۳۸	۰/۰۰۶۲
درجه دوم	۶۱۹/۳۶	۵	۱۲۳/۸۷	۲/۶۸	۰/۰۸۰۳
مکعبی	۵۲۴/۲۲	۱	۵۲۴/۲۲	۱۱/۳۵	۰/۰۰۶۳
خطای خالص	۵۰۸/۲۵	۱۱	۴۶/۲۰		

بحث و نتیجه گیری

بررسی اثر متقابل غلظت منعقد کننده‌های مختلف و کمک منعقد کننده آهک

اثر متقابل منعقد کننده PAC و آهک

با بررسی شکل‌ها و جداول حاصل از اثر متقابل پارامترهای عملیاتی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و طراحی آزمایش‌ها، نتایج نشان داد که با توجه به شکل (۱-الف)، تغییرات غلظت PAC و آهک اثر قابل توجهی بر راندمان حذف COD دارد. افزایش غلظت PAC تا حدود بهینه، موجب کاهش معنی‌دار در COD پساب شد. این کاهش ناشی از کارایی بالای PAC در ناپایداری ذرات کلوئیدی و مواد آلی محلول است. PAC به دلیل دارا بودن پلیمرهای هیدروکسی آلومینیوم، در pH نسبتاً پایین نیز کارآمد بوده و امکان تشکیل لخته‌های متراکم و پایدار را فراهم می‌کند (Abujazar, Karaagaç, Amr, Alazaiza, & Bashir, 2022). افزایش آهک در سطوح پایین، تأثیر کمی بر حذف COD داشت، اما در ترکیب با PAC و در محدوده خاصی از غلظت‌ها، اثر تقویتی^۱ مشاهده شد. دلیل این رفتار را می‌توان در تنظیم pH محیط واکنش و فراهم‌سازی شرایط مناسب برای فعالیت بهینه PAC دانست (Zhang et al., 2017). آهک همچنین ممکن است باعث ته‌نشینی بخشی از مواد آلی و ایجاد کربنات‌های فلزی شود (Zhang et al., 2017). بیشترین راندمان بهینه حذف COD حدود ۹۰ درصد در محدوده‌ای از غلظت میانی PAC که برابر ۹۰ mg/L و آهک ۴۵ mg/L بود؛ به دست آمد. این محدوده نشان‌دهنده نقطه بهینه هم‌افزایی PAC و آهک در حضور پلی‌آکریل‌امید برای حذف مؤثر بار آلی است. در مقادیر بیش از حد از PAC یا آهک، کاهش راندمان حذف COD مشاهده شد. این موضوع می‌تواند ناشی از پدیده بازپایداری ذرات در اثر شارژ اضافی^۲ یا افزایش شدید pH باشد که موجب کاهش بازده لخته‌سازی و ته‌نشینی می‌شود (C. Zhao et al., 2021). در مجموع، نتایج نشان‌دهنده رفتار غیرخطی و اثر متقابل معنی‌دار بین PAC و آهک بود.

اثر متقابل منعقد کننده آلوم و آهک

شکل (۱-ب) بیانگر اثر متقابل غلظت منعقد کننده آلوم و آهک بر راندمان حذف COD از پساب لاتکس می‌باشد و بیانگر اثر قابل توجه تغییرات غلظت آلوم و آهک بر راندمان حذف COD است. با افزایش غلظت آلوم، راندمان حذف COD در ابتدا روند افزایشی داشت که این موضوع نشان‌دهنده بهبود فرآیند انعقاد و حذف مؤثر مواد آلی محلول در پساب می‌باشد. با این حال، در غلظت‌های بالاتر از یک حد بهینه، افزایش بیشتر آلوم تأثیر کاهشی یا تثبیت‌شده بر راندمان نشان داد که می‌تواند به دلیل پدیده اشباع یا اضافه غلظت باشد؛ این امر را می‌توان به افزایش بار مثبت سطحی آلومینیوم هیدروکسی کمپلکس‌ها نسبت داد که باعث افزایش ناپایداری و لخته‌سازی مواد آلی کلوئیدی و محلول می‌گردد. در نتیجه، بارهای مثبت اضافی می‌توانند منجر به پایداری دوباره ذرات و کاهش اثربخشی انعقاد شوند (Kareem & Al-Ogaidi, 2023). در مورد آهک، نتایج نشان داد که افزایش مقدار آن نیز تا حد مشخصی موجب افزایش راندمان حذف COD و تشکیل پلیمرهای فلزی هیدروکسی کمپلکس شد. علت این موضوع را می‌توان به تنظیم pH به بازه مطلوب برای عملکرد مؤثر آلوم و تشکیل لخته‌های قوی‌تر نسبت داد. با این حال، افزایش بیش از حد آهک موجب کاهش نسبی راندمان شد که ممکن است به علت افزایش بیش از حد pH و ایجاد شرایط غیربهینه برای انعقاد باشد (Zhou et al., 2023). در محدوده‌ای خاص، افزایش همزمان آلوم و آهک باعث افزایش چشمگیر راندمان حذف COD شده، به گونه‌ای که اثر مجموع آن‌ها بیشتر از اثر جداگانه‌ی هر کدام بوده است. یعنی اگر فقط آلوم یا فقط آهک استفاده شود، راندمان حذف COD پایین‌تر از زمانی است که هر دو با هم و در مقادیر بهینه استفاده شوند. در غلظت‌های پایین آهک، اثر افزایش آلوم به تنهایی زیاد نیست. اما در حضور مقدار مناسبی از آهک، آلوم عملکرد بهتری دارد. این نشون‌دهنده‌ی اینه که آهک با تنظیم pH شرایط را برای عملکرد بهتر آلوم فراهم می‌کند. در غلظت‌های بالا از هر دو ماده، راندمان ممکنه کاهش پیدا کنه یا ثابت بشه، که نشان‌دهنده‌ی اثر منفی یا خنثی ناشی از افزایش بیش از حد هست. اثر متقابل آلوم و آهک مثبت و هم‌افزا

^۱. Synergistic Effect

^۲. Overdosing

است، یعنی وجود آهک در مقدار مناسب باعث می‌شود آلوم عملکرد بهتری داشته باشد و بالعکس. این اثر متقابل زمانی بیشترین تأثیر را دارد که غلظت هر دو ماده در محدوده بهینه قرار گیرد. افزایش بیش از حد هر کدام می‌تواند باعث کاهش اثربخشی سیستم شود، بنابراین طراحی دقیق غلظت‌ها و نسبت‌ها ضروری است. بیشترین راندمان بهینه حذف COD حدود ۸۳ درصد در ترکیبی از غلظت آلوم ۱۷۵ mg/L و آهک ۵۰ mg/L مشاهده شده است که این موضوع به وجود اثر هم‌افزایی بین این دو ماده در حضور پلی‌آکریل‌آمید اشاره دارد. در این ناحیه، تشکیل بهینه لخته‌ها و تجمع مؤثر مواد آلی صورت می‌گیرد. در سطوح بالاتر از مقدار بهینه آلوم یا آهک، کاهش راندمان مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از پدیده بازپایداری ذرات^۱ به دلیل بار اضافه یا کاهش بیش از حد pH باشد (Ningombam, Mana, Apum, Ningthoujam, & Singh, 2024). در این شرایط، سه‌گانه آلوم-آهک-پلیمر توانست شرایط مناسبی برای تشکیل لخته‌های مؤثر و پایدار فراهم نماید که در نتیجه منجر به حداکثر حذف COD شد.

اثر متقابل منعقد کننده فریک کلراید و آهک

در شکل (۱-ج)، اثر متقابل منعقد کننده فریک کلراید (FeCl_3) و کمک منعقد کننده آهک در حضور مقدار ثابت کمک منعقد کننده پلیمری پلی‌آکریل‌آمید (۲/۱ mg/L) بر راندمان حذف COD از پساب صنایع لاتکس بررسی شد. نتایج حاصل از نمودار نشان داد که ترکیب این مواد تأثیر قابل توجهی بر کاهش غلظت COD دارد. با افزایش غلظت فریک کلراید در مقادیر پایین تا میانه، راندمان حذف COD به طور قابل توجهی افزایش یافت که این موضوع نشان دهنده توانایی بالای FeCl_3 در لخته‌سازی ذرات آلی محلول و کلوئیدی موجود در پساب است (A. K. Badawi, Salama, & Mostafa, 2023). با این حال، در غلظت‌های بالاتر از مقدار بهینه، راندمان کاهش یا تثبیت شد که احتمالاً به دلیل افزایش بار مثبت بیش از حد و ناپایداری دوباره لخته‌ها رخ داده است (Al-Anzi, Naik, & Ahmad, 2022). در خصوص آهک نیز مشاهده شد که افزایش آن تا یک حد مشخص باعث بهبود راندمان حذف COD شد. این بهبود عملکرد را می‌توان به تنظیم مناسب pH سیستم و ایجاد شرایط بهینه برای فعالیت فریک کلراید نسبت داد. با این حال، افزایش بیش از حد آهک منجر به افزایش pH خارج از بازه مناسب انعقاد شده و کارایی فرآیند را کاهش داده است. بیشترین راندمان بهینه حذف COD حدود ۷۵ درصد در منطقه‌ای مشخص از ترکیب غلظت‌های بهینه FeCl_3 و آهک با غلظت‌های به ترتیب ۳۰۰ mg/L و ۴۰-۵۰ mg/L مشاهده شد. این یافته‌ها بیانگر یک اثر متقابل هم‌افزا بین این دو ماده در حضور پلی‌آکریل‌آمید هستند. در واقع، تنظیم pH توسط آهک شرایط مناسبی برای عملکرد فریک کلراید فراهم کرده و حضور پلی‌آکریل‌آمید با تقویت ساختار لخته‌ها، راندمان حذف را به حداکثر رسانده است (Kareem & Al-Ogaidi, 2023).

بررسی اثر متقابل غلظت منعقد کننده و کمک منعقد کننده پلی‌آکریل‌آمید

اثر متقابل منعقد کننده PAC و PAM

با توجه به شکل ۲-الف، ترکیب PAC با پلی‌آکریل‌آمید به عنوان کمک منعقد کننده، منجر به افزایش قابل توجهی در راندمان حذف COD می‌شود. PAC با ایجاد بار مثبت، ذرات کلوئیدی را ناپایدار می‌کند و پلی‌آکریل‌آمید با زنجیره‌های بلند خود، پل‌های فیزیکی بین ذرات ایجاد کرده و لخته‌های بزرگ‌تر و متراکم‌تری تشکیل می‌دهد. این ترکیب به‌ویژه در pH نزدیک به خنثی عملکرد بهتری دارد و باعث کاهش مصرف منعقد کننده و حجم لجن تولیدی می‌شود (Som, Ramlee, Puasa, & Hamid, 2021). با توجه به نتایج، در حضور پلی‌آکریل‌آمید، استفاده از PAC منجر به بیشترین راندمان حذف COD برابر با حدود ۸۹/۵٪ شد. این راندمان بهینه در ناحیه‌ای از غلظت بهینه PAC برابر ۲۱۰ mg/L و پلی‌الکترولیت ۲/۱ mg/L حاصل شده است. ترکیب PAC و پلی‌الکترولیت به دلیل توان بالای ناپایداری سازی کلوئیدها توسط PAC و پل‌سازی مؤثر زنجیره‌های پلیمری، باعث ایجاد لخته‌های متراکم و ته‌نشینی مؤثر شده است (Yao, Zhao, Guo, Yan, & Zheng, 2022).

^۱. Restabilization

اثر متقابل منعقد کننده آلوم و PAM

شکل ۲-ب نشان می‌دهد که در این ترکیب، آلوم به‌عنوان منعقدکننده اولیه عمل کرده و پلی‌آکریل‌آمید به‌عنوان کمک‌منعقدکننده، فرآیند لخته‌سازی را بهبود می‌بخشد. استفاده از پلی‌آکریل‌آمید در کنار آلوم باعث افزایش اندازه و پایداری لخته‌ها، تسریع ته‌نشینی و بهبود کیفیت پساب تصفیه‌شده می‌شود. این ترکیب می‌تواند به کاهش مصرف آلوم و کاهش هزینه‌های عملیاتی منجر شود. در حضور پلی‌الکترولیت، بالاترین راندمان حذف COD در مقادیر بهینه غلظتی آلوم حدود ۸۱-۸۳٪ به‌دست آمده است. این مقدار در غلظت‌های نسبتاً بالای آلوم ۳۰۰ mg/L و در ترکیب با پلی‌الکترولیت حدود ۲/۰ mg/L حاصل شده است. در مقایسه با PAC، برای رسیدن به راندمان مشابه، غلظت آلوم بیشتری مورد نیاز است و لخته‌ها نیز معمولاً حجیم‌تر و سبک‌تر هستند که ته‌نشینی را کندتر می‌کند (Tahraoui et al., 2024).

اثر متقابل منعقد کننده فریک کلراید و PAM

همچنین با بررسی شکل ۲-ج، ترکیب فریک کلراید با پلی‌آکریل‌آمید نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی در فرآیند تصفیه است. فریک کلراید با ناپایداری ذرات کلوئیدی و پلی‌آکریل‌آمید با ایجاد پل‌های فیزیکی بین ذرات، لخته‌های بزرگ‌تر و متراکم‌تری تشکیل می‌دهند. این ترکیب منجر به افزایش راندمان حذف COD، کاهش حجم لجن تولیدی و بهبود ویژگی‌های ته‌نشینی می‌شود (Lee, Teng, Morad, Poh, & Mahalingam, 2011). بیشترین راندمان حذف COD در ترکیب مقادیر غلظتی بهینه فریک کلراید و پلی‌الکترولیت در حدود ۸۵-۸۶٪ ثبت شد. این راندمان در غلظت‌های ۱۹۰ mg/L فریک کلراید و ۲/۲ mg/L پلی‌الکترولیت حاصل شده است. ترکیب $FeCl_3$ با پلی‌آکریل‌آمید از لحاظ راندمان در سطحی بین PAC و آلوم قرار دارد و لخته‌هایی با چگالی نسبتاً مناسب و سرعت ته‌نشینی قابل قبول ایجاد می‌کند.

مقایسه عملکرد منعقد کننده‌ها در حذف COD از پساب صنایع لاتکس

نتایج در شکل (۳) نشان داد که نوع منعقدکننده و کمک‌منعقدکننده تأثیر قابل توجهی بر راندمان حذف COD از پساب لاتکس دارند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، PAC در ترکیب با پلی‌آکریل‌آمید بالاترین راندمان حذف COD (حدود ۹۰٪) را ارائه داد. این موضوع بیانگر توان بالای PAC در تشکیل لخته‌های مؤثر و پایدار و همچنین تعامل مثبت آن با کمک‌منعقدکننده‌های پلیمری می‌باشد (He, Xie, Lu, Huang, & Ma, 2019). در مقابل، فریک کلراید پایین‌ترین راندمان حذف COD را در هر دو شرایط مورد بررسی (آهک و پلی‌آکریل‌آمید) از خود نشان داد (۷۸-۸۰٪)، که می‌تواند ناشی از تشکیل لخته‌های ضعیف‌تر یا حساسیت بیشتر به شرایط محیطی سیستم باشد. آلوم عملکردی بین دو منعقدکننده دیگر داشت و در حضور پلی‌آکریل‌آمید (۸۵٪) نسبت به آهک (۸۲٪) مؤثرتر عمل کرد. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که پلی‌آکریل‌آمید به‌عنوان کمک‌منعقدکننده، کارایی بیشتری نسبت به آهک داشته و استفاده همزمان آن با PAC می‌تواند بهترین گزینه برای افزایش راندمان تصفیه پساب‌های حاوی مواد آلی نظیر پساب لاتکس باشد. همچنین، در خصوص لجن تولیدی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، حجم لجن تولیدی در این مطالعه بسیار محدود بود (کمتر از ۰/۵٪ دبی پساب)، که با توجه به ماهیت غیرسمی و ترکیب آلی، امکان مدیریت ساده و بی‌نیاز از تجهیزات پیچیده مانند تغلیظ اولیه و خشک‌سازی ساده، و سپس، به‌عنوان زباله شبه‌خانگی دفع یا به خاک دفن را فراهم می‌سازد.

بررسی‌های آماری فرآیند تصفیه پساب صنایع لاتکس به روش انعقاد و لخته‌سازی با منعقد کننده PAC

آنالیز واریانس داده‌ها

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۳ و بررسی نتایج ANOVA، مدل پیشنهادی دارای معنای آماری بالا ($P < 0/0001$) است که بیانگر برازش قابل قبول داده‌ها به مدل رگرسیونی انتخاب‌شده می‌باشد. مقدار F-value بالا برای مدل، وجود تأثیر

قابل توجه متغیرهای مورد بررسی بر پاسخ (مقدار COD نهایی) را نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر پایین P-value برای متغیرهای اصلی و برهم‌کنش‌ها بیانگر معنی‌دار بودن این فاکتورها در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی است (Khettaf et al., 2021). بررسی ضرایب رگرسیون نشان می‌دهد که متغیر خطی PAC (عامل A) بیشترین تأثیر را در کاهش COD داشته و به دنبال آن، اثر متقابل PAC و آهک ($A \times B$) نیز نقش مؤثری در بهبود کارایی فرآیند داشته است. این موضوع از منظر علمی نیز قابل تبیین است، چراکه PAC با دارا بودن گونه‌های پلیمری هیدروکسی‌آلومینیوم، می‌تواند در طیف وسیعی از pH، ناپایدارسازی مؤثر ذرات آلی و کلوئیدی را انجام داده و لخته‌های متراکم و قابل ته‌نشینی ایجاد نماید. این نتایج هم‌راستا با داده‌های تجربی بوده و بیانگر اثر هم‌افزایی این دو ماده در تشکیل لخته‌های پایدار می‌باشد (GilPavas, Dobrosz-Gómez, & Gómez, 2017).

در مورد آهک (Ca(OH)_2)، ضریب خطی آن مثبت و از نظر آماری در سطح قابل قبول ($P < 0.05$) معنادار بود. این نشان‌دهنده آن است که آهک، اگرچه به‌تنهایی تأثیر محدودی دارد، اما در ترکیب با PAC می‌تواند با تنظیم pH به محدوده بهینه انعقاد، فرآیند حذف COD را تقویت کند. از سوی دیگر، پلی‌الکترولیت (پلی‌آکریل‌آمید)، علیرغم نقشش در تسریع ته‌نشینی لخته‌ها، از نظر آماری در غلظت بررسی‌شده تأثیر معناداری بر تغییرات COD نداشت ($P > 0.05$). این یافته بیانگر آن است که نقش اصلی پلی‌الکترولیت در فاز نهایی لخته‌سازی و جمع‌آوری ذرات است نه در ناپایدارسازی اولیه (Ayat, Arris, Abbaz, 2021). همچنین، اثر درجه دوم PAC (A^2) نیز از نظر آماری معنادار و ضریب آن منفی بود. این یافته نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد PAC می‌تواند باعث بازپایداری ذرات به دلیل بار مثبت اضافی و در نتیجه کاهش راندمان حذف COD گردد. سایر اثرات درجه دوم و برهم‌کنش‌ها فاقد معناداری آماری بودند، که بیانگر آن است که مدل به‌خوبی توانسته رفتار سیستم را با تأکید بر اثرات اصلی و تعامل PAC و آهک تبیین کند. در مجموع، تحلیل آماری ANOVA تأیید می‌کند که مدل توسعه‌یافته از اعتبار کافی برای بهینه‌سازی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی در حذف COD برخوردار است و متغیرهای PAC، آهک و پلی‌الکترولیت، هر سه به‌صورت معنی‌دار در این فرآیند نقش دارند.

انتخاب مدل مفهومی مناسب برای RSM

بر اساس مقادیر ارائه‌شده در جدول ۴، مدل درجه دوم بهترین برازش را برای داده‌ها ارائه داد. با توجه به نتایج، مقدار "Lack of Fit" غیرمعنادار ($P > 0.05$) در مدل درجه دوم نشان می‌دهد که اختلاف بین داده‌های مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده تصادفی است و مدل دارای خطای سیستماتیک نیست. این موضوع یکی از نشانه‌های کلیدی برای صحت مدل‌سازی و انتخاب مدل مناسب در روش RSM به شمار می‌رود (Shabanizadeh & Taghavijeloudar, 2023; Singh & Kumar, 2020). مدل‌های پایین‌تر مانند خطی یا FI^2 برازش ضعیف‌تری بودند و مدل مکعبی نیز به دلیل کمبود درجات آزادی و خطر بیش‌برازش^۱ حذف شد. لذا مدل درجه دوم از لحاظ آماری و تجربی برای تحلیل و پیش‌بینی عملکرد فرآیند انعقاد و لخته‌سازی انتخاب شد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی فرآیند شیمیایی انعقاد و لخته‌سازی جهت کاهش مواد آلی (COD) از پساب صنعتی حاوی لاتکس با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) انجام گرفت. برای این منظور، سه منعقدکننده شامل آلوم، فریک کلراید و پلی‌آلومینیوم کلراید (PAC) در ترکیب با دو کمک‌منعقدکننده آهک و پلی‌الکترولیت پلیمری (پلی‌آکریل‌آمید) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تجربی نشان داد که PAC در مقایسه با آلوم و فریک کلراید، بالاترین راندمان حذف COD را ارائه می‌دهد، به‌گونه‌ای که در شرایط بهینه (PAC برابر $211/5 \text{ mg/L}$ ، آهک: $41/5 \text{ mg/L}$ و پلی‌الکترولیت: $2/1 \text{ mg/L}$)، میزان حذف COD

^۱. Overfitting

به بیش از ۸۹/۵ درصد رسید. این راندمان بالا بیانگر توان بالقوه PAC در ایجاد لخته‌های پایدار و مؤثر حتی در شرایط عملیاتی نسبتاً ملایم است. همچنین، حضور آهک با تنظیم pH محیط به ناحیه مطلوب، موجب ارتقاء اثربخشی PAC گردید و نقش هم‌افزایی مؤثری در کنار آن ایفا کرد. از سوی دیگر، گرچه پلی‌الکترولیت در برخی سطوح آماری اثر معناداری نداشت، اما نقش فیزیکی آن در تسریع ته‌نشینی و تقویت ساختار لخته‌ها مشهود بود. مدل‌سازی آماری با استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) و تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که مدل درجه دوم (Quadratic) بهترین برازش را برای پیش‌بینی پاسخ‌ها ارائه می‌دهد. مدل از لحاظ آماری معنادار بوده و پارامترهای کلیدی آن از جمله غلظت PAC و اثرات متقابل PAC و آهک، اثر قابل توجهی در کاهش COD داشتند. وجود عدم برازش غیرمعنادار ($P > 0.05$) از اعتبار و صحت مدل پیشنهادی حمایت می‌کند.

از منظر اقتصادی، فرآیند بهینه‌شده انعقاد و لخته‌سازی با ترکیب PAC، آهک و پلی‌آکریل‌آمید، نه تنها کارایی بالایی در حذف COD از پساب‌های حاوی لاتکس دارد، بلکه از نظر هزینه‌های عملیاتی نیز مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. در شرایط بهینه به‌دست‌آمده، مجموع غلظت مصرفی مواد شیمیایی کمتر از ۲۶۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده که با احتساب قیمت تقریبی PAC (حدود ۱۲۰ هزار تومان به ازای هر kg)، آهک (حدود ۵ هزار تومان به ازای هر kg) و پلی‌آکریل‌آمید (حدود ۴۰۰ هزار تومان به ازای هر kg)، هزینه کل مصرفی برای تصفیه هر مترمکعب پساب حدود ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ تومان برآورد می‌شود. این در حالی است که در روش‌های جایگزین مانند ازن‌زنی یا UV/H₂O₂، هزینه تصفیه هر مترمکعب آب می‌تواند چندین برابر بیشتر باشد. بنابراین، استفاده از ترکیب پیشنهادی نه تنها عملکرد تصفیه مطلوبی فراهم می‌کند، بلکه از نظر اقتصادی نیز گزینه‌ای مناسب برای پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی یا نیمه‌صنعتی به‌شمار می‌رود. این ترکیب می‌تواند منجر به دستیابی به استانداردهای زیست‌محیطی جهت استفاده مجدد از پساب در آبیاری یا تخلیه ایمن به منابع طبیعی گردد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی سیستم‌های تصفیه شیمیایی در صنایع مشابه و توسعه راهکارهای بهینه‌سازی در مقیاس عملیاتی باشد.

منابع

- Abdelrasoul, A., Doan, H., Lohi, A., & Cheng, C.-H. (2017). The influence of aggregation of latex particles on membrane fouling attachments & ultrafiltration performance in ultrafiltration of latex contaminated water and wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 52, 118-129.
- Abujazar, M. S. S., Karaağaç, S. U., Amr, S. S. A., Alazaiza, M. Y., & Bashir, M. J. (2022). Recent advancement in the application of hybrid coagulants in coagulation-flocculation of wastewater: A review. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131133.
- Al-Anzi, B. S., Naik, M.-u.-d., & Ahmad, M. (2022). The imperative need of metal salt for the treatment of industrial wastewater via the synergic coagulation-flocculation method. *Polymers*, 14(9), 1651.
- Ayat, A., Arris, S., Abbaz, A., Bencheikh-Lehocine, M., & Meniai, A. H. (2021). Application of response surface methodology for modeling and optimization of a bio coagulation process (sewage wastewater treatment plant). *Environmental Management*, 67(3), 489-497.
- Badawi, A., Hassan, R., Farouk, M., Bakhoun, E., & Salama, R. (2024). Optimizing the coagulation/flocculation process for the treatment of slaughterhouse and meat processing wastewater: experimental studies and pilot-scale proposal. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(13), 8431-8446.
- Badawi, A. K., Salama, R. S., & Mostafa, M. M. M. (2023). Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: a review of recent developments. *RSC advances*, 13(28), 19355-19358.
- Beutler, M., Wiltshire, K., Meyer, B., Moldaenke, C., Luring, C., Meyerhofer, M., & Hansen, U. (2014). APHA (2005), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Washington DC: American Public Health Association. Ahmad, SR, and DM Reynolds (1999), Monitoring of water quality using fluorescence technique: Prospect of on-line process control. *Dissolved Oxyg. Dyn. Model. Case Study A Subtrop. Shallow Lake*, 217, 95.

- Bindhu, B., Madhu, G., & Haritha, M. (2024). Treatment of latex processing effluent using aerobic granulation technology. *International Journal of Environment and Waste Management*, 35(4), 446-456 .
- Chambers, P. (2019). *Standard methods for the examination of water and wastewater*: Scientific e-Resources.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental chemistry letters*, 17, 145-155 .
- Gayatri, R., Yuliwati, E., Agustina, T. E., Khalil, N. A., Hossain, M. S., Taweeprada, W., . . . Yahaya, A. N. A. (2025). Treatment of Natural Rubber Skim Latex Using Ultrafiltration Process with PVDF-TiO₂ Mixed-Matrix Membranes. *Polymers*, 17(12), 1598 .
- GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of environmental management*, 191, 189-197 .
- He, W., Xie, Z., Lu, W., Huang, M., & Ma, J. (2019). Comparative analysis on floc growth behaviors during ballasted flocculation by using aluminum sulphate (AS) and polyaluminum chloride (PACl) as coagulants. *Separation and Purification Technology*, 213, 176-185 .
- Hien, N. N., Van Tuan, D., Nhat, P. T., Van, T. T. T., Van Tam, N., Que, V. N. X., & Dan, N. P. (2017). Application of oxygen limited autotrophic nitrification/denitrification (OLAND) for anaerobic latex processing wastewater treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 124, 45-55 .
- Janagarajan, P. N. (2021). *The Effectiveness of Electrocoagulation Process in Latex Wastewater Treatment in Comparison to Conventional Physical Treatment*. University of Malaya (Malaysia) ,
- Kareem, S. A., & Al-Ogaidi, A. J. M. (2023). Reducing Pollutants in Wastewater by Coagulation and Flocculation as a Pre-Treatment Process for Environment Protection. *International Journal of Environmental Sciences*, 9 .(۲)
- Khettaf, S., Khouni, I., Louhichi, G., Ghrabi, A., Bousselmi, L., Bouhidel, K.-E., & Bouhelassa, M. (2021). Optimization of coagulation–flocculation process in the treatment of surface water for a maximum dissolved organic matter removal using RSM approach. *Water Supply*, 21(6), 3042-3056 .
- Lee, K. E., Teng, T. T., Morad, N., Poh, B. T., & Mahalingam, M. (2011). Flocculation activity of novel ferric chloride–polyacrylamide (FeCl₃-PAM) hybrid polymer. *Desalination*, 266(1-3), 108-113 .
- Lim, Y. P., Jasimin, A., Ng, L. Y., & Tan, H. L. (2022). Performance evaluation on ultrafiltration as tertiary treatment for rubber glove wastewater. *Materials Today: Proceedings*, 63, S267-S272 .
- Mensah-Akutteh, H., Buamah, R., Wiafe, S., & Nyarko, K. B. (2022). Optimizing coagulation–flocculation processes with aluminium coagulation using response surface methods. *Applied Water Science*, 12(8), 188 .
- Mohammadi, M., Man, H. C., Hassan, M. A., & Yee, P. L. (2010). Treatment of wastewater from rubber industry in Malaysia. *African Journal of Biotechnology*, 9(38), 6233-6243 .
- Nguyen, H. N., & Luong, T. T. (2012). Situation of wastewater treatment of natural rubber latex processing in the Southeastern region, Vietnam. *Journal of Vietnamese Environment*, 2(2), 58-64 .
- Ningombam, L., Mana, T., Apum, G., Ningthoujam, R., & Singh, Y. D. (2024). Nano-bioremediation: A prospective approach for environmental decontamination in focus to soil, water and heavy metals. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 21, 100931 .
- Pendashteh, A., Haji, F. A., Chaibakhsh, N., Yazdi, M., & Pendashteh, M. (2017). Optimized treatment of wastewater containing natural rubber latex by coagulation-flocculation process combined with Fenton oxidation. *J. Mater. Environ. Sci*, 8(11), 4015-4023 .
- Raagasweatha, R., Ahamed, A., Mahalingam, H., & Kalathi, J. T. (2025). Hybrid strategies for the treatment of latex-like wastewater from industries. In *Adaptive Engineering* (pp. 7-35): Elsevier.
- Ratnaningsih, W., & Widiyati, C. (2023). DISPERSING AGENTS WASTEWATER QUALITY FROM LATEX GLOVES MANUFACTURING BY TREATMENT USING Al₂ (SO₄)₃ AND PAC COAGULANT. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, dan Produk Kulit*, 22(2), 69-77 .
- Riveros, R. (2018). Chemical treatment and reuse applications for latex paint industry wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 103, 290-295 .
- Shabanizadeh, H., & Taghavijeloudar, M. (2023). A sustainable approach for industrial wastewater treatment using pomegranate seeds in flocculation-coagulation process: Optimization of COD and turbidity removal by response surface methodology (RSM). *Journal of water process engineering*, 53, 103651 .

- Singh, B., & Kumar, P. (2020). Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM). *Journal of water process engineering*, 36, 101317 .
- Som, A. M., Ramlee, A. A., Puasa, S. W., & Hamid, H. A. A. (2021). Optimisation of operating conditions during coagulation-flocculation process in industrial wastewater treatment using *Hylocereus undatus* foliage through response surface methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14 .
- Sun, W., Liu, T., Xia, K., Zhou, J., Liu, X., & Zhang, X. (2022). Preparation of adsorbent based on polyacrylate latex solid waste and its application in the treatment of dye wastewater. *ACS omega*, 7(15), 13243-13253 .
- Sutarut, P., Cheirsilp, B., & Boonsawang, P. (2023). The potential of oil palm frond biochar for the adsorption of residual pollutants from real latex industrial wastewater. *International Journal of Environmental Research*, 17(1), 16 .
- Tahraoui, H., Toumi, S., Boudoukhani, M., Touzout, N., Sid, A. N. E. H., Amrane, A., . . . Aboumustapha, M. (2024). Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment using aluminum sulfate on a polluted surface water source: A year-long study. *Water*, 16(3), 400 .
- Tian, S., Tu, Y., Li, R., Du, Y., Zhou, Z., Zhang, F., & Ren, Z. (2023). Comprehensive treatment of latex wastewater and resource utilization of concentrated liquid. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 57, 183-192 .
- Yao, B., Zhao, D., Guo, J., Yan, C., & Zheng, C. (۲۰۲۲). Preparation and performance evaluation of hybrid polymer flocculants (PAC-PAM), and comparison experiments with other flocculants. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(4), e13829 .
- Zhang, Z., Wang, J., Liu, D., Li, J., Wang, X., Song, B. . . , Song, Y. (2017). Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 162-169 .
- Zhao, C., Zhou, J., Yan, Y., Yang, L., Xing, G., Li, H., . . . Zheng, H. (2021). Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. *Science of The Total Environment*, 765, 142795 .
- Zhao, Z., Sun, W., Ray, M. B., Ray, A. K., Huang, T., & Chen, J. (2019). Optimization and modeling of coagulation-flocculation to remove algae and organic matter from surface water by response surface methodology. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13, 1-13 .
- Zhou, J., Ma, H., Lv, P., Su, W., Wang, Q., Gao, M., & Qin, H. (2023). Life Cycle Assessment of Fuel Ethanol Production from Food Waste in Consideration of By-Product Utilization. *Processes*, 11(6), 1672 .