مقاله پژوهشی
مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان
دوره ۲۱، مرداد ۱۴۰۱، ۵۵۰-۵۳۳

تصفیه فاضلاب صنایع کاغذ و مقواسازی به وسیله فرآیند انعقاد و لخته‌سازی و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ: یک مطالعه آزمایشگاهی

طاهره زارعی محمودآبادی[۱]، محمدحسن احرامپوش[۲]، پروانه طالبی[۳]، هادی اسلامی[۴]

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۴ ارسال مقاله به نویسنده جهت اصلاح: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲ دریافت اصلاحیه از نویسنده: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲

چکیده

زمینه و هدف: تصفیه فاضلاب صنایع بازیافت کاغذ و مقواسازی با هدف بازچرخش آب، یکی از نیازهای صنایع می‌باشد. لذا هدف این مطالعه، تصفیه فاضلاب صنایع بازیافت کاغذ بوسیله فرآیند انعقاد و لخته‌سازی و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه آزمایشگاهی، از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکـزی جهت طراحی آزمایش‌ها، تعیین اثرات متغیرهای مورد مطالعه (pH، غلظت‌های آلوم، پلی آلومینیوم کلراید (Poly- aluminum chloride; PAC) و پلیمرکاتیونی) بر راندمان حذف جامدات معلق کل (Total suspended solid; TSS) و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (Chemical oxygen demand; COD) استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون آماری ANOVA با سطح معنی‌دار ۰/۰۵ انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که ترکیب پلی آلومینیوم کلراید با پلیمر کاتیونی (شرایط بهینه؛ pH=۷/۵، غلظت PAC = ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت پلیمر کاتیونی = ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر) راندمان حذف TSS و COD به ترتیب ۹۷/۳۴ و ۷۵/۷۶ درصد بود. ترکیب آلوم با پلیمر کاتیونی (شرایط بهینه؛ pH=۸/۵، غلظت آلوم= ۵۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت پلیمر کاتیونی = ۲ میلی‌گرم بر لیتر) راندمان حذف ۹۸/۹۶ و ۷۷/۸۳ درصد بود. اثرات هم‌زمان دو متغیر مستقل pH و غلظت به طور معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) در حذف متغیرهای TSS و COD تأثیر داشتند.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج، ترکیب PAC با پلیمر کاتیونی کارآیی بهتری داشته و هم‌چنین مقدار COD و TSS در پساب نهایی به ترتیب بالاتر و پایین‌تر از مقادیر استاندارد بوده است. لذا فرآیند انعقاد شیمیایی به عنوان پیش‌تصفیه توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: انعقاد و لخته‌سازی، بهینه‌سازی، صنایع کاغذ و مقواسازی، تصفیه فاضلاب، روش سطح پاسخ

۱- کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم و فناوریهای محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران
۲- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم و فناوریهای محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران
۳- کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، مرکز تحقیقات علوم و فناوریهای محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران
۴- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات ایمنی و سلامت شغلی، شرکت ملی صنایع مس ایران، سازمان جهانی ایمنی و دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، رفسنجان، ایران
تلفن: ۰۳۴-۳۱۳۱۵۲۴۱، دورنگار: ۰۳۴-۳۴۲۸۰۰۷۱، پست الکترونیکی: Hadieslami1986@yahoo.com

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

مقدمه

با توجه به مشکلات مربوط به کمبود مواد اولیه چوبی برای صنایع خمیرکاغذ و جلوگیری از اثرات تخریب محیط زیست، یکی از بهترین راه حل‌های ممکن در دنیا، بازیافت کاغذهای باطله می‌باشد. مزایای بازیافت کاغذ به عنوان کالای استراتژیک و ارزشمند در کشور ما به دلایل سودآوری آن، کاهش وابستگی به واردات این محصول، کاهش هزینه تبدیل و تولید آن از الیاف گیاهی به کاغذ، از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد [۱]. اما مصرف بالای آب در صنایع بازیافت کاغذ سبب ایجاد مقادیر زیادی از فاضلاب می‌شود و صنعت کاغذسازی در میان مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های صنعتی قرار دارد و بنابراین یکی از صنایع نگران کننده می‌باشد [۲]. تصفیه فاضلاب صنایع بازیافت کاغذ با هدف استفاده مجدد آب و کاهش آسیب به محیط زیست یکی از نیازهای روز صنعت تصفیه فاضلاب در دنیا می‌باشد [۳]. فاضلاب خروجی از کارخانه‌های بازیافت کاغذ، حاوی مقادیر بالایی از ذرات معلق، رنگ، مواد آلی و برخی ترکیبات شیمیایی شامل اسیدهای رزین، فنل‌ها، دی‌اکسین‌ها و فوران‌ها، مواد آلی و معدنی، فلزات سنگین، سیانیدها، سولفیدها و دیگر مواد محلول می‌باشد که فرآیند بازچرخش پساب تصفیه شده را با مشکلات زیادی همراه می‌کند. جداسازی ذرات معلق و مواد آلی یکی از ملزومات اصلی تصفیه فاضلاب این صنایع و کاهش مشکلات مربوط به آن می‌باشد [۴].

انواع مختلفی از فرآیندهای تصفیه از جمله (تصفیه بیولوژیکی هوازی و بی‌هوازی [۵]، اکسیداسیون پیشرفته، جذب، الکتروگوالاسیون [۶]، فیلتراسیون غشایی [۷] و انعقاد و لخته سازی) برای به حداقل رساندن تخلیه فاضلاب صنایع بازیافت کاغذ به محیط زیست مورد بررسی قرار گرفته است. طبق تحقیقات صورت گرفته بر روی چندین نوع فاضلاب این صنعت به طور کلی نسبت BOD_5/COD (Biochemical oxygen demand; اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی) کم‌تر از ۰/۳ برآورد شده که این نسبت جهت استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی مناسب نمی‌باشد. هم‌چنین مشخص شده است که فرآیند انعقاد و لخته‌سازی بر روی افزایش قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی پساب مقواسازی اثر مثبت دارد و نسبت COD/BOD بالای این پساب را پایین می‌آورد [۹-۸]. استفاده از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی به دلیل سادگی و کارآیی یکی از روش‌های مؤثر در جداسازی و بازیافت ترکیبات مزاحم در فاضلاب صنایع مقواسازی می‌باشد که از طریق بررسی پارامترهای مختلف مانند pH، دوز منعقدکننده، زمان ته نشینی و غیره می‌توان راندمان فرآیند را افزایش داد [۱۰-۶]. البته محدودیت‌ها و چالش‌های فرآیند انعقاد لخته‌سازی مانند سمیت و خطر سلامتی ناشی از منعقد کننده‌ها و تولید مقدار زیاد لجن باید در نظرگرفته شود [۱۱].

در آزمایش‌های متداول انعقاد و لخته‌سازی، در هر نوبت از آزمایش یکی از عوامل به صورت متغیر و سایر عوامل به صورت ثابت در نظر گرفته و راندمان حذف آلاینده‌های مورد بررسی

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

محاسبه می‌شوند [۱۲]. به کارگیری این روش سنتی، علاوه بر نیاز به زمان طولانی و مواد شیمیایی بیشتر، به دلیل خطای زیاد، دارای دقت پایینی است. هم‌چنین این روش قادر به بررسی اثرات متقابل متغیرها نیست [۱۳-۱۴]. با استفاده از روش سطح پاسخ (Respond Surface Method; RSM) ضمن رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی، اثرات متقابل متغیرهای مستقل مختلف در سطوح گوناگون و اثرات آن‌ها روی یک‌دیگر را مورد مطالعه قرار می‌دهد [۱۵]. این روش دارای چهار مرحله اصلی شامل؛ طراحی آزمایش‌ها، برازش مدل، راستی آزمایی مدل و بهینه‌سازی فرآیند است. طرح آزمایش‌هایی مثل مرکب مرکزی (Central Composite Design; CCD) برای روش سطح پاسخ مفید است [۱۷-۱۶]. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از روش سطح - پاسخ صرفه جویی در وقت و هزینه از طریق کاهش در تعداد آزمایشات، تعیین حالت بهینه برای هر پارامتر و نیز تهیه مدل رگرسیونی فرآیند مورد بررسی است [۱۸]. لذا هدف از مطالعه حاضر بهینه سازی شرایط انعقاد و لخته‌سازی (pH، غلظت منعقدکننده‌های آلوم، PAC و پلیمر کاتیونی) در تصفیه فاضلاب صنعت بازیافت کاغذ با استفاده از روش سطح پاسخ بوده است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه از نوع آزمایشگاهی بوده که در آزمایشگاه دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد در سال ۱۳۹۷ (با کد اخلاق: IR. SS. SPH. REC.1396.99) صورت گرفت.

نمونه برداری از فاضلاب ورودی به حوضچه ته نشینی تصفیه خانه شرکت بازیافت کاغذ و مقواسازی شهر یزد انجام شد. پارامترهای pH، هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity; EC) در محل اندازه‌گیری و بعد از انتقال به آزمایشگاه پارامترهای کدورت، TSS، کل جامدات محلول (Total Dissolved Solids; TDS)، COD مطابق با روش‌های ارائه شده در کتاب روش‌های استاندارد جهت آزمایش‌های آب و فاضلاب اندازه‌گیری گردید [۱۹].

pH و EC پساب با استفاده از مولتی پارامتر HACH مدل HQ40 ساخت آمریکا، TSS و کدورت با استفاده از DR2000 و TDS بر اساس روش وزن سنجی که در بخش 2540-C استاندارد توضیح داده شده است، مورد سنجش قرار گرفتند [۱۹]. اندازه‌گیری COD با استفاده از ویال COD، ساخت شرکت HACH انجام شد به این‌صورت که به مدت ۲ ساعت در دستگاه هاضم (HACH) در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته شد و بعد از سرد شدن با استفاده از دستگاه DR2000 HACH قرائت گردید. هم‌چنین از دستگاه جارتست مدل ۷۷۹۰ -۴۰۲ (Phipps & Bird، آمریکا) جهت انجام آزمایشات و بهینه‌سازی مراحل مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه از PAC و آلوم به عنوان منعقدکننده و پلیمر کاتیونی C-270 ساخت شرکت Acquah سوئیس به عنوان کمک منعقدکننده مورد استفاده قرار گرفتند. هم‌چنین از هیدروکسید سدیم و اسید کلریدریک (یک نرمال) ساخت شرکت مرک آلمان برای تنظیم pH استفاده گردید [۱۲].

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

در ادامه پارامترهای pH در مقادیر(۵/۵، ۶/۵، ۷/۵، ۸/۵، ۹/۵) غلظت PAC و آلوم (۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) و غلظت پلیمر کاتیونی C_{270} (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر) تنظیم شد و وارد نرم افزار Minitab گردید و بر اساس روش سطح - پاسخ و مدل CCD طراحی آزمایش انجام شد. که برای بهینه‌سازی مراحل انعقاد و لخته‌سازی برای هر کدام از منعقدکننده‌ها ۳۱ آزمایش طراحی شد. تمام مراحل بهینه سازی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با سرعت و مدت زمان اختلاط تند ۱۵۰ دور در دقیقه در ۲ دقیقه، سرعت و مدت زمان اختلاط کند ۴۰ دور در دقیقه در ۲۰ دقیقه انجام گردید [۱۵].

بهینه‌سازی مرحله انعقاد و لخته سازی از طراحی آزمایش سطح - پاسخ و به روش طراحی کامپوزیت مرکزی(CCD) و تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار Minitab نسخه ۱۶ و آزمون آماری ANOVA در سطح معنی‌دار ($P<۰/۰۵$) انجام شد.

نتایج

خصوصیات فاضلاب خام صنعت بازیافت کاغذ استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- خصوصیات فاضلاب صنعت بازیافت کاغذ

پارامتر	واحد	میانگین	انحراف معیار
pH	-	۶/۸۹	۰/۳۶
هدایت الکتریکی (EC)	mS/cm	۱۰/۲۹	۵۷۴/۶۳
کدورت	NTU	۱۹۵۷/۶۶	۱۷۷/۴۱
کل جامدات معلق (TSS)	mg/L	۲۵۴۹/۶۳	۳۶۶/۷۶
کل جامدات محلول (TDS)	mg/L	۸۲۰۳/۲۴	۴۲۹/۷۶
اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (COD)	mg/L	۱۲۴۶۳/۱۱	۱۷۸۷/۱۷

در ابتدا تأثیر pH، غلظت PAC و پلیمر کاتیونی بر بازده فرآیند و بهینه‌سازی این متغیرها با استفاده از طرح آزمایشی بررسی شد. تعداد آزمایشات طراحی شده و راندمان حذف آلاینده‌های TSS و COD مربوط به هر اجرا در جدول ۲ گزارش شده است.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

جدول ۲- طراحی آزمایش برای PAC در ترکیب با پلیمر کاتیونی

Order Run	pH	PAC (mg/L)	C_{270} (mg/L)	سطح پاسخ (راندمان حذف بر حسب درصد)	
				TSS	COD
۱	۶/۵	۵۵۰	۲	۸۲/۱۸	**۴۹/۲**
۲	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۸۴	**۷۷/۲۴**
۳	۶/۵	۳۵۰	۱	۶۶/۸	**۴۰/۸۹**
۴	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۰۴	**۷۷/۳۸**
۵	۸/۵	۳۵۰	۱	۹۵/۸	**۶۴/۵۹**
۶	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۱۸	**۷۶/۸۹**
۷	۹/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۶۸	**۷۲/۱۴**
۸	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۸۸	**۷۷/۰۱**
۹	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸	**۷۷**
۱۰	۶/۵	۵۵۰	۲	۸۲/۸۸	**۴۹/۵۳**
۱۱	۶/۵	۳۵۰	۲	۷۲/۳۳	**۴۴/۲**
۱۲	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۰۱	**۷۶/۷۶**
۱۳	۷/۵	۶۵۰	۱/۵	۹۹/۴۱	**۷۸/۷۹**
۱۴	۸/۵	۵۵۰	۱	۹۶/۲۵	**۷۵**
۱۵	۷/۵	۴۵۰	۰/۵	۹۲/۱۹	**۶۷/۴۲**
۱۶	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۹۷	**۷۷/۴**
۱۷	۶/۵	۵۵۰	۱	۷۸/۳۷	**۴۷/۱۵**
۱۸	۶/۵	۳۵۰	۱	۶۶	**۴۰/۱۱**
۱۹	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۰۵	**۷۸/۳۱**
۲۰	۶/۵	۵۵۰	۱	۷۸/۹۱	**۴۷/۷۲**
۲۱	۸/۵	۵۵۰	۲	۹۷/۱۷	**۷۴/۱۸**
۲۲	۷/۵	۲۵۰	۱/۵	۸۶/۵۴	**۵۳/۹۶**
۲۳	۶/۵	۳۵۰	۲	۷۱/۸۸	**۴۳/۲**
۲۴	۸/۵	۳۵۰	۱	۹۵/۰۱	**۶۵/۱۹**
۲۵	۵/۵	۴۵۰	۱/۵	۶۳/۴۴	**۳۸/۷۹**
۲۶	۸/۵	۳۵۰	۲	۹۷/۱۳	**۶۸/۶۸**
۲۷	۷/۵	۴۵۰	۲/۵	۹۵/۸۶	**۷۱**
۲۸	۸/۵	۵۵۰	۲	۹۷	**۷۵/۴**
۲۹	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۸/۱۵	**۷۷/۶۸**
۳۰	۸/۵	۳۵۰	۲	۹۶/۱۴	**۶۸/۹۱**
۳۱	۸/۵	۵۵۰	۱	۹۷	**۷۵/۴**

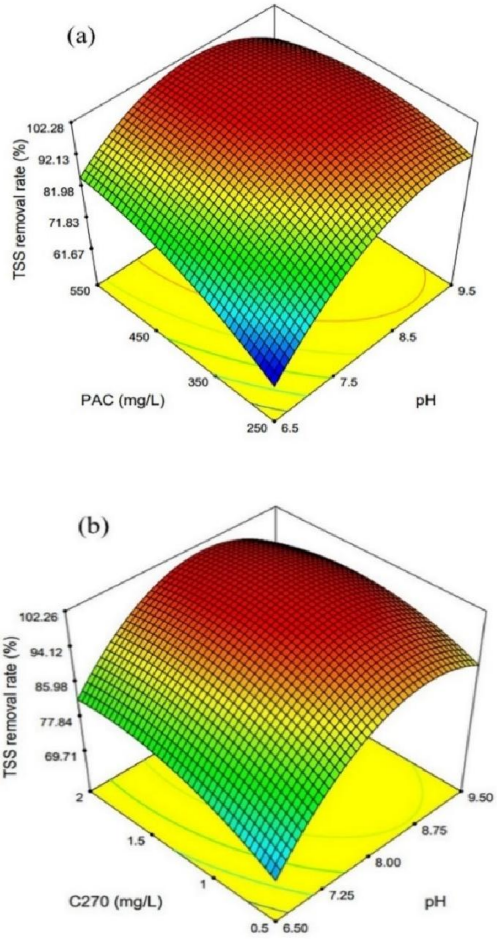
تأثیر مقادیر مختلف pH و غلظت‌های مختلف PAC در ترکیب با پلیمر کاتیونی بر راندمان حذف TSS و COD در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

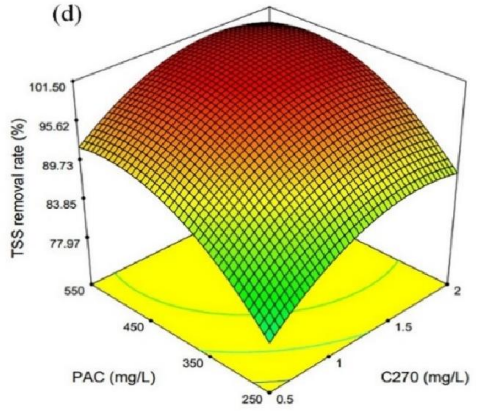
راندمان حذف TSS و COD با افزایش pH در غلظت‌های مختلف PAC افزایش می‌یابد و این افزایش تا pH برابر ۷/۵ با افزایش همراه بوده و در pH بالاتر راندمان حذف کاهش یافته است. در ادامه راندمان حذف با افزایش pH در غلظت‌های مختلف پلیمر کاتیونی، راندمان حذف تا pH برابر ۷/۵ ادامه داشته و در pH بالاتر راندمان حذف کاهش یافته است. با افزایش غلظت PAC و پلیمر کاتیونی راندمان حذف افزایش می‌یابد. این افزایش راندمان برای پلیمر کاتیونی در غلظت ۱/۵میلی‌گرم بر لیتر و برای PAC در غلظت ۴۵۰ میلی‌گرم بر

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

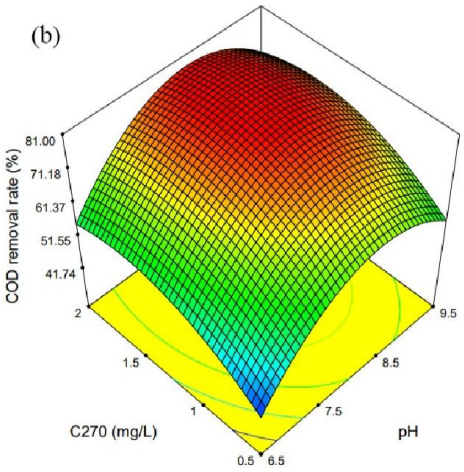
لیتر ادامه داشته و در غلظت‌های بالاتر راندمان حذف کاهش نشان داده است.

در نهایت حداکثر راندمان حذف TSS و COD به ترتیب ۹۷/۳۴ و ۷۵/۷۶ درصد در شرایط بهینه با pH برابر ۷/۵، غلظت ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر PAC و غلظت ۱/۵ میلی‌گرم پلیمر کاتیونی (C_{270}) اتفاق افتاده است.

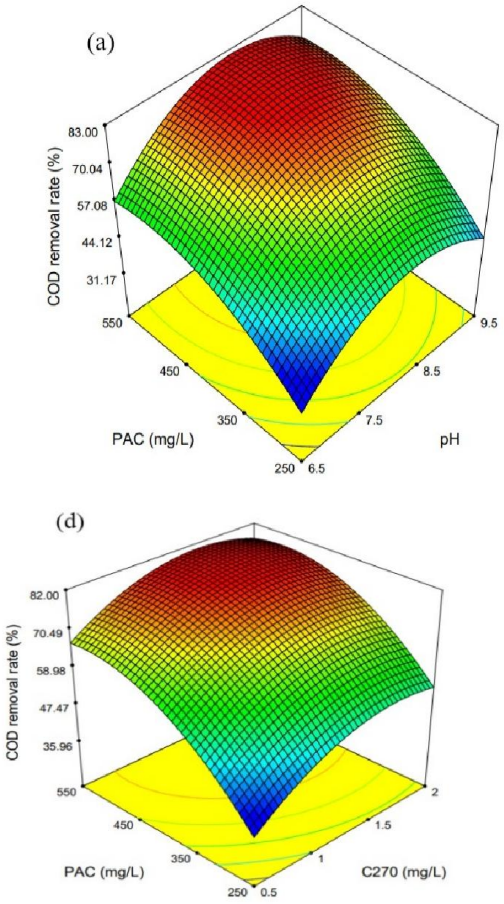




شکل ۱- اثرات pH محلول، غلظت PAC و پلیمر کاتیونی بر راندمان حذف TSS



[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]



شکل ۲- اثرات pH محلول، غلظت PAC و پلیمر کاتیونی بر راندمان حذف COD

در جدول ۲ خصوصیات آماری مدل با استفاده از PAC در ترکیب با پلیمر کاتیونی ارائه شده است. در این جدول ضریب هبستگی (R^2)، ضریب همبستگی اصلاح شده (Adj-R^2) و ضریب همبستگی پیش بینی کننده (Pred R^2) وجود دارد. در یک تحلیل آماری مناسب ضریب همبستگی بهتر است نزدیک به ۱ باشد. ضرایب همبستگی اصلاح شده و پیش بینی کننده، اختلافی بیش از ۰/۲ نداشته باشند. هم‌چنین پارامتر دقت کافی که نسبت سیگنال به نویز (Adeq Precision; A.P) را اندازه گیری می‌کند. در حالت کلی این نسبت بزرگ‌تر از ۴ باشد مطلوب است [۶].

جدول ۲- خصوصیات آماری مدل به منظور حذف TSS و COD با استفاده از PAC در ترکیب پلیمر کاتیونی

پاسخ	معادله نهایی با متغیرهای رمزگذاری شده	R^2	Adj R^2	Pred R^2	Adeq Precision	مقدار P	C.V	S. D
TSS	$98.69+10.07A+6.26B+4.31C-5.9AB-2.22AC-0.73BC-11.71A^2-5.01B^2-4.42C^2$	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۷۵	۲۲/۰۱	< ۰/۰۰۰۱	۳/۷۶	۳/۳۸
COD	$74.89+6.61A+13.69B+6.94C+1.04AB-0.46A-1.57BC-15.3A^2-7.57C^2$	۰/۹	۰/۸۵	۰/۷	۱۶/۵	< ۰/۰۰۰۱	۸/۵۷	۵/۵۵

در ادامه تأثیر pH، غلظت منعقدکننده آلوم و پلیمر کاتیونی بر راندمان حذف آلاینده‌های TSS و COD مربوط به هر اجرا در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳- طراحی آزمایش برای آلوم در ترکیب با پلیمر کاتیونی

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

آزمایشات	pH	آلوم (mg/L)	C_{270} (mg/L)	سطح پاسخ (راندمان حذف بر حسب درصد)	
				TSS	COD
۱	۶/۵	۵۵۰	۲	۸۵/۲	۵۳/۴۱
۲	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۱/۳۳	۷۲/۴
۳	۶/۵	۳۵۰	۱	۷۰/۰۱	۳۸/۸
۴	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۲/۲۱	۷۳/۲۹
۵	۸/۵	۳۵۰	۱	۸۴/۹۶	۶۹/۱۹
۶	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۱/۴	۷۳/۶۹
۷	۹/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۳/۰۹	۷۳/۸۷
۸	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۳/۸	۷۳
۹	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۳	۷۴/۱۵
۱۰	۶/۵	۵۵۰	۲	۸۶/۶۴	۵۳/۲
۱۱	۶/۵	۳۵۰	۲	۷۶	۴۱/۵
۱۲	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۲/۵۳	۷۵/۰۵
۱۳	۷/۵	۶۵۰	۱/۵	۹۲/۱۶	۷۰/۸۶
۱۴	۸/۵	۵۵۰	۱	۹۷/۳۱	۷۴
۱۵	۷/۵	۴۵۰	۰/۵	۸۶/۳۳	۶۵/۵
۱۶	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۳/۱۲	۷۴/۰۲
۱۷	۶/۵	۵۵۰	۱	۸۲/۳۵	۶۴/۲
۱۸	۶/۵	۳۵۰	۱	۷۱/۹۸	۳۸/۱۹
۱۹	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۲/۴۸	۷۴/۷۵
۲۰	۶/۵	۵۵۰	۱	۸۳/۸۵	۴۳/۱۴
۲۱	۸/۵	۵۵۰	۲	۹۹/۲۹	۷۸/۹۳
۲۲	۷/۵	۲۵۰	۱/۵	۸۱/۵۶	۵۹/۶۶
۲۳	۶/۵	۳۵۰	۲	۷۵/۱۲	۴۰/۹
۲۴	۸/۵	۳۵۰	۱	۸۴/۷۵	۶۹/۰۸
۲۵	۵/۵	۴۵۰	۱/۵	۶۶/۹۱	۳۶/۲
۲۶	۸/۵	۳۵۰	۲	۸۲/۹۲	۶۷/۶۹
۲۷	۷/۵	۴۵۰	۲/۵	۹۳/۸۷	۷۱
۲۸	۸/۵	۵۵۰	۲	۹۹/۵۱	۷۸/۱۲
۲۹	۷/۵	۴۵۰	۱/۵	۹۳/۰۳	۷۴/۸۲
۳۰	۸/۵	۳۵۰	۲	۸۲/۰۱	۶۷
۳۱	۸/۵	۵۵۰	۱	۹۷/۵۹	۷۴/۳۹

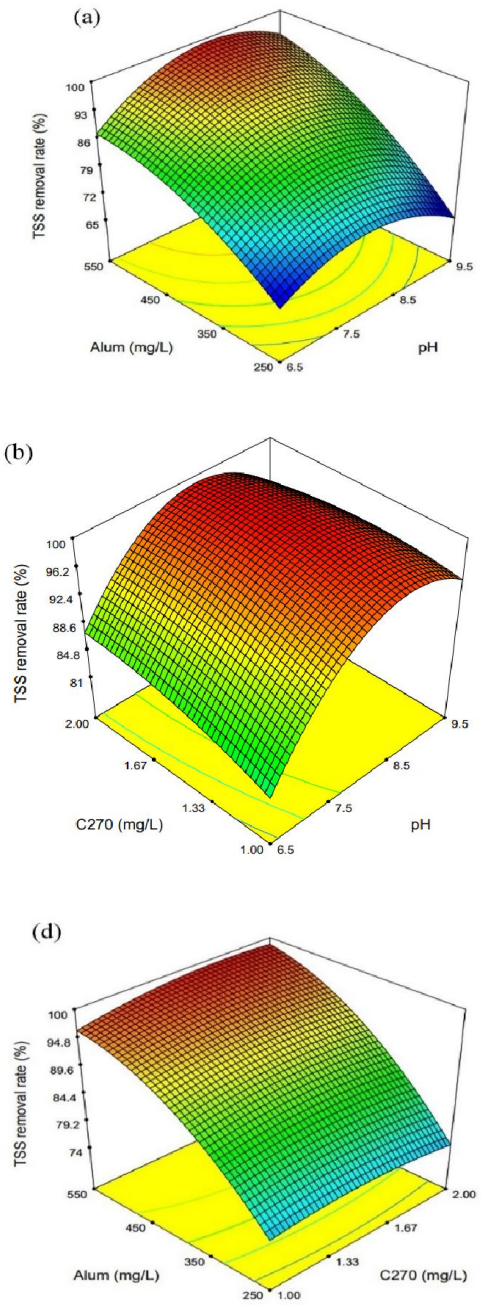
شکل‌های ۳ و ۴ تأثیر مقادیر مختلف pH و غلظت‌های آلوم در ترکیب با پلیمر کاتیونی بر راندمان حذف TSS و COD نشان داده شده است.

راندمان حذف TSS و COD با افزایش pH در غلظت‌های مختلف آلوم افزایش می‌یابد و این افزایش تا pH برابر ۸/۵ افزایش داشته و در pH بالاتر راندمان حذف کاهش می‌یابد. در ادامه راندمان حذف با افزایش pH در غلظت‌های مختلف پلیمر کاتیونی، راندمان حذف تا pH برابر ۸/۵ ادامه داشته و در pH بالاتر راندمان حذف کاهش یافته است. با افزایش غلظت آلوم و پلیمر کاتیونی راندمان حذف کدورت افزایش می یابد. این افزایش راندمان برای پلیمر کاتیونی تا بالاترین غلظت یعنی غلظت ۲ میلی‌گرم بر لیتر و برای آلوم تا غلظت ۵۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ادامه داشته است.

در نهایت حداکثر راندمان حذف TSS و COD به ترتیب ۹۸/۹۶ و ۷۷/۸۳ درصد در شرایط بهینه بر اساس پیش بینی

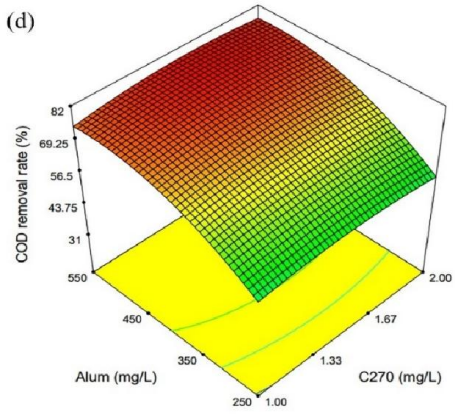
[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

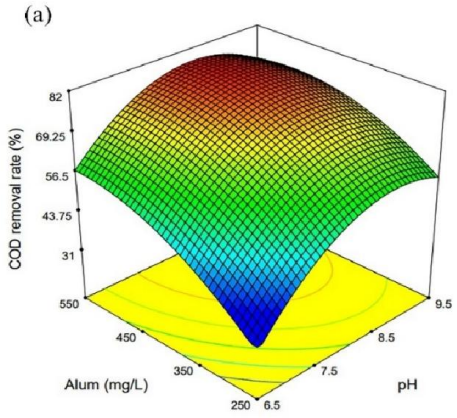
مدل در pH برابر ۸/۵، غلظت ۵۵۰ میلی‌گرم بر لیتر آلوم و غلظت ۲ میلی‌گرم پلیمر کاتیونی (C_{270}) به دست آمد.

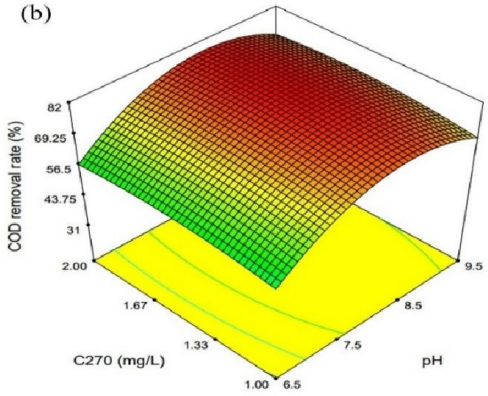


شکل ۳- اثرات pH محلول، غلظت آلوم و پلیمر کاتیونی بر راندمان حذف TSS

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]







شکل ۴- اثرات pH محلول، غلظت آلوم و پلیمر کاتیونی بر راندمان حذف COD

خصوصیات آماری مدل با استفاده از منعقدکننده آلوم در ترکیب با پلیمر کاتیونی در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴- خصوصیات آماری مدل به منظور حذف TSS و COD با استفاده از آلوم در ترکیب با پلیمر کاتیونی

پاسخ	معادله نهایی با متغیرهای رمزگذاری شده	R^2	Adj R^2	Pred R^2	Adeq. Precision	مقدار P	Coefficient of variance (C.V)	Standard Deviation (S. D)
TSS	$91.25+2.72A+11.32B+0.47C+2.1748-1.59AC+0.79BC-8.04A^2-4.47B^2-1.3C^2$	۰/۹۳	۰/۹	۰/۷۲	۲۱/۲	<۰/۰۰۰۱	۳	۲/۶۴
COD	$74.55+9.83A+10.39B+0.69C-3.11AB+0.038AC+0.57BC-12.91A^2-6.88B^2-2.31C^2$	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۷۸	۲۵/۶۲	<۰/۰۰۰۱	۸/۱۹	۵/۲۷

بحث

نتایج نشان داد که ترکیب PAC با پلیمر کاتیونی اثرات قابل توجهی در حذف TSS و COD داشته است. مقادیر P-Value برای حذف TSS و COD نشان می‌دهد مدل‌ها برای حذف مؤثر پاسخ‌های ذکر شده معنی‌دار هستند. ضریب همبستگی R^2 که نسبت کل تغییرات پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل را ارائه می‌دهد، نشان دهنده مجموع مربعات ناشی از رگرسیون به کل مجموع مربعات می‌باشد. بزرگ بودن مقادیر

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

و نزدیک بودن به ۱ مطلوب می‌باشد و یک توافق مطلوب با ضرایب همبستگی اصلاح شده ضروری است [۲۱-۲۰]. در این پژوهش در مرحله استفاده از PAC در ترکیب با پلیمر کاتیونی، در تمامی موارد R^2 بزرگتر از ۰/۹ و مطلوب می‌باشد. وجود توافق منطقی بین R^2 و ضریب اصلاح شده لازم است. با توجه به اینکه اختلاف بین این دو بیش از ۰/۲ نمی‌باشد که نشان دهنده توافق بالای داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده با داده‌های برآورد شده با مدل است. شاخص نسبت سیگنال به نویز (Adeq. Precision) مقادیر پیش بینی شده در نقاط طراحی را با متوسط خطای پیش بینی شده مقایسه می‌نماید [۲۲]. در این پژوهش نسبت سیگنال به نویز برای حذف TSS و COD به ترتیب برابر ۲۲/۰۱ و ۱۶/۵ بوده که در تمامی موارد بزرگتر از ۴ می‌باشد در نتیجه داده‌ها مطلوب بوده و نشان دهنده وجود سیگنال کافی و توان بالای مدل در پیش بینی نتایج می‌باشد. ضریب تغییرات (C.V) تکرار مدل را تعریف می‌کند. به طور نرمال در صورتی می‌توان یک مدل را تکرار پذیر در نظر گرفت که مقدار ضریب تغییرات آن بیش‌تر از ۱۰ درصد نباشد [۲۳]. ضریب تغییرات در این پژوهش در تمامی موارد زیر ۱۰ درصد می‌باشد.

نتایج آنالیز واریانس برای هر پاسخ در ترکیب آلوم با پلیمر کاتیونی در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر P-Value در حذف TSS و COD نشان می‌دهد مدل‌ها برای حذف مؤثر پاسخ‌های ذکر شده معنی‌دار هستند. ضریب همبستگی R^2 برای TSS و COD به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۵ می‌باشد که نزدیک به یک بوده و توافق مطلوب با ضرایب همبستگی اصلاح شده را دارا می‌باشد. توافق منطقی بین R^2 و ضریب اصلاح شده بیش از ۰/۲ نمی‌باشد که نشان دهنده توافق بالای داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده با داده‌های برآورد شده با مدل است. در این ترکیب نسبت سیگنال به نویز برای حذف TSS و COD به ترتیب برابر ۲۱/۲ و ۲۵/۶۲ بوده که بزرگتر از ۴ می‌باشد در نتیجه داده‌ها مطلوب بوده و نشان دهنده وجود سیگنال کافی و توان بالای مدل در پیش بینی نتایج است. ضریب تغییرات نیز برای هر دو پاسخ TSS و COD زیر ۱۰ درصد است.

نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که تغییر pH اولیه، بازده حذف آلاینده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تحقیقات متعددی نیز در این زمینه نشان دادند که pH اولیه محلول اثر قابل توجهی بر روی عملکرد فرآیند انعقاد و لخته سازی دارد [۲۴]. در فرایند انعقاد و لخته‌سازی، pH فاکتور بسیار مهمی است و بر روی همه تعادل‌های هیدرولیزی که منشأ گونه‌های متفاوت در محلول است، اثر می‌گذارد [۲۵]. در این مطالعه بیش‌ترین راندمان فرآیند انعقاد و لخته‌سازی برای منعقدکننده PAC در ترکیب با پلیمر کاتیونی در pH خنثی برابر ۷/۵ بدست آمد. در محیط‌های اسیدی، آلومینیوم موجود بیشتر به شکل Al^{3+} وجود دارد که منجر به جذب، ایجاد اتصال و چسبندگی بین کلوئیدها نمی‌گردد. در نتیجه راندمان انعقاد کاهش می‌یابد. بر عکس در محیط های قلیایی گونه‌های پلیمری بر روی سطح ذرات کلوئیدی جذب شده و باعث تجمع

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

ذرات کلوئیدی می‌گردد و راندمان انعقاد افزایش می‌یابد. در pHهای بالاتر از ۸/۵، آلومینیوم موجود در محلول بیش‌تر به شکل $Al(OH)_4$ دارای بار منفی می‌باشد در نتیجه راندمان حذف COD به علت نیروی دافعه بین ذرات کلوئیدی دارای بار منفی و یون‌های $Al(OH)_4$ کاهش می‌یابد. Birjandi و همکاران در مطالعه خود بر روی تصفیه فاضلاب صنایع کاغذ و مقوا با استفاده PAC به pH بهینه ۹/۵ دست یافتند [۲۵].

یکی دیگر از پارامترهای مهم به منظور بهره برداری بهینه عملکرد در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، غلظت ماده منعقدکننده است [۲۷-۲۶]. اساساً، غلظت ناکافی و یا غلظت بیش از حد منجر به عملکرد ضعیف تشکیل لخته می‌شود. لذا، برای کاهش هزینه‌های فرآیند تصفیه و تشکیل لجن مناسب و هم‌چنین برای به دست آوردن بهترین عملکرد در تصفیه، تعیین غلظت بهینه منعقدکننده مهم می‌باشد [29-28]. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت راندمان حذف آلاینده‌ها افزایش یافته است. افزایش غلظت منعقدکننده تا مقادیری بالاتر از مقدار بهینه، سبب پایداری مجدد کلوئیدها می‌شود. افزایش حذف COD با افزایش دوز منعقد کننده مصرفی به دلیل افزایش غلظت گونه‌های مختلف هیدرولیز شده است که ذرات کلوئیدی را ناپایدار می‌سازند. در مطالعه‌ای توسط Birjandi و همکاران مشخص شد که حداکثر راندمان حذف کدورت و COD در غلظت بهینه ۱۵۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از آلوم و ۱۳۱۴ میلی‌گرم بر لیتر PAC به ترتیب ۸۳/۲۳ و ۸۰/۰۲ درصد به دست آمد [۳۰]. که نسبت به مطالعه حاضر به راندمان حذف بیش‌تری برای COD دست یافتند که این می‌تواند به علت استفاده از غلظت بیش‌تر منعقدکننده‌های مصرفی باشد.

پلیمرها با ایجاد پل بین زنجیره‌های طولانی بین فلوک‌های ریز حاصل از کار منعقد کننده‌ها، آن‌ها را به صورت لخته‌های درشت و سنگین در آورده، عمل ته نشینی را سرعت می‌دهد، غلظت ماده منعقدکننده مصرفی و هم‌چنین حجم لجن نیز کاهش می‌یابد. عملکرد لخته سازها در ابتدا به نوع لخته ساز استفاده شده، وزن مولکولی آن، طبیعت یونی، نوع مواد در سوسپانسیون فاضلاب و نوع فاضلاب بستگی دارد. چنان‌چه مقدار پلیمری که استفاده می‌شود بیش از حد باشد ممکن است کلوئید دوباره ثبات یابد، در این حالت تمام سطح کلوئیدها به وسیله پلیمر پوشیده می‌شود و محلی برای ایجاد پل بین آن‌ها باقی نمی‌گذارد [۱۸]. Wangو همکاران از کلراید آلومینیوم به عنوان منعقدکننده و از پلیمر طبیعی (starch-g-PAM-g-PDMC) به عنوان لخته ساز برای تصفیه فاضلاب کارخانه کاغذ و خمیر کاغذ استفاده کردند. آن‌ها در شرایط بهینه (غلظت منعقدکننده = ۸۷۱ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت لخته‌ساز = ۲۲/۳ میلی‌گرم بر لیتر و pH برابر ۸/۵) به راندمان حذف ۹۵/۷ درصد برای کدورت و ۷۲/۶ درصد بازیافت آب دست یافتند [۳۱]. Ansari و همکاران در تصفیه فاضلاب صنایع بازیافت کاغذ، با استفاده از ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر PAC در ترکیب با ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر پلی آکریل امید کاتیونی (PAM-C) به راندمان حذف ۳۹ درصد برای COD و

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

۳۱ درصد برای BOD در pH طبیعی پساب (۶/۹) دست یافتند [۳۲].

از جمله محدودیت‌های این تکنولوژی می‌توان به تأثیر گذاری دمای پایین پساب ورودی، قلیائیت کم و اختلاط ضعیف بر روی راندمان فرآیندهای انعقاد و لخته‌سازی اشاره کرد و برای داشتن عملکرد مطلوب، نرخ جریان پیوسته و ثابت پساب ضروری می‌باشد. هزینه‌های بالای بهره برداری و تبعات نامطلوب زیست محیطی دفع لجن تولیدی باید در نظر گرفته شود. هم‌چنین علاوه بر این موارد اپراتورهای آموزش دیده برای بهره‌برداری مناسب و مطمئن از سیستم لازم می‌باشد [۳]. بنابراین پیشنهاد می شود در مطالعات آتی از سایر منعقد کننده ها و هم‌چنین ترکیب روش انعقاد و لخته سازی با سایر روش‌ها جهت تصفیه کامل‌تر فاضلاب صنایع بازیافت کاغذ و مقوا استفاده گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بهینه‌سازی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از منعقدکننده‌های آلوم و PAC در ترکیب با پلیمر کاتیونی C-270 به منظور حذف TSS و COD پرداخته شده است. متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه، شامل پنج عامل غلظت منعقدکننده، غلظت کمک منعقدکننده، pH، TSS و COD بوده است که آزمایشات بر اساس روش سطح پاسخ طراحی گردید. در مرحله بهینه‌سازی مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی با هدف حداکثر حذف TSS، COD و حداقل میزان ماده مصرفی، بیان‌گر ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر PAC به عنوان منعقدکننده و ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر پلیمر کاتیونی به عنوان کمک منعقدکننده در pH برابر ۷/۵ است. با توجه به راندمان قابل قبول، در دسترس بودن و کاربرد آسان می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی در مقیاس‌های بزرگ برای تصفیه فاضلاب صنایع بازیافت کاغذ به عنوان یک مرحله پیش تصفیه وکاهش بار آلی ورودی به سیستم برای فرآیند بیولوژیکی استفاده شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله قسمتی از طرح تحقیقاتی تصویب شده در مرکز تحقیقات علوم و فناوری‌های محیط زیست دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد (با کد ۵۲۴۳) می‌باشد. نویسندگان این مقاله از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد به جهت حمایت مالی از این طرح تحقیقاتی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

References

[1] Liu M, Tan S, Zhang M, He G, Chen Z, Fu Z, et al. Waste paper recycling decision system based on material flow analysis and life cycle assessment: A case study of waste paper recycling from China. *J Environ Manage* 2020; 255: 109859.

[2] Zazouli MA, Ahmadi M, Charati JY. Pretreatment of paper recycling plant wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *J Mater Environ Sci* 2017; 8(6): 2140-6.

[3] Zarei Mahmoudabadi T, Ehrampoush MH, Talebi P, Fouladi-Fard R, Eslami H. Comparison of poly ferric chloride and poly titanium tetrachloride in coagulation and flocculation process for paper and cardboard wastewater treatment. *Environ Sci Pollut Res* 2021; 28(21): 27262-72.

[4] Graich A, Mghaiouini R, Bellarbi A, Khaidar M, Laamyem A, Monkade M, et al. Use of a cascade system based on marine sand and bottom ash in the treatment of cardboard manufacturing wastewater by infiltration percolation. *Phys Scr* 2021; 96(12): 125-711.

[5] Tawfik A, Bakr MH, Nasr M, Haider J, Lim H, Qyyum MA, et al. Economic and environmental sustainability for anaerobic biological treatment of wastewater from paper and cardboard manufacturing industry. *Chemosphere* 2022; 289: 133-66.

[6] Mehralian M, Khashij M, Dalvand A. Treatment of cardboard factory wastewater using ozone-assisted electrocoagulation process: optimization through response surface methodology. *Environ Sci Pollut Res* 2021; 28(33): 45041-9.

[7] Sousa MRS, Lora-García J, López-Pérez M-F, Santafé-Moros A, Gozálvez-Zafrilla JM. Operating conditions optimization via the Taguchi method to remove colloidal substances from recycled paper and cardboard production wastewater. *Membranes* 2020; 10(8): 170.

[8] Toczyłowska-Mamińska R. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment–A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 78: 764-72.

[9] Eslami H, Zarei Mahmoudabadi T. Modified coagulation processes using polyferric chloride and polytitanium tetrachloride for the removal of anionic dye from aqueous solution. *Int J Environ Sci Technol* 2022; 19(3): 1811-8.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

[10] Eslami H, Esmaeili A, Ehrampoush MH, Ebrahimi AA, Taghavi M, Khosravi R. Simultaneous presence of poly titanium chloride and Fe2O3-Mn2O3 nanocomposite in the enhanced coagulation for high rate As (V) removal from contaminated water. *J Water Process Eng* 2020; 36: 1013-42.

[11] Teh CY, Budiman PM, Shak KPY, Wu TY. Recent advancement of coagulation–flocculation and its application in wastewater treatment. *Ind Eng Chem Res* 2016; 55(16): 4363-89.

[12] Zarei Mahmudabadi T, Ebrahimi A, Ehrampoush M, Eslami H. Investigating the effect of coagulation and flocculation-adsorption process on boron removal from industrial wastewater (Case study: Ceramic tile industry). *J Rafsanjan Univ* 2021; 19(10): 1015-34.

[13] Abdulgader M, Yu QJ, Zinatizadeh AA, Williams P, Rahimi Z. Application of response surface methodology (RSM) for process analysis and optimization of milk processing wastewater treatment using multistage flexible fiber biofilm reactor. *J Environ Chem En* 2020; 8(3): 103797.

[14] Dargahi A, Mohammadi M, Amirian F, Karami A, Almasi A. Phenol removal from oil refinery wastewater using anaerobic stabilization pond modeling and process optimization using response surface methodology (RSM). *Desalin Water Treat* 2017; 87: 199-208.

[15] Zarei Mahmudabadi T, Ebrahimi AA, Eslami H, Mokhtari M, Salmani MH, Ghaneian MT, et al. Optimization and economic evaluation of modified coagulation–flocculation process for enhanced treatment of ceramic-tile industry wastewater. *AMB Express* 2018; 8(1): 1-12.

[16] Darvishmotevalli M, Zarei A, Moradnia M, Noorisepehr M, Mohammadi H. Optimization of saline wastewater treatment using electrochemical oxidation process: Prediction by RSM method. *MethodsX* 2019; 6: 1101-13.

[17] Momeni MM, Kahforoushan D, Abbasi F, Ghanbarian S. Using chitosan/CHPATC as coagulant to remove color and turbidity of industrial wastewater: optimization through RSM design. *J Environ Manage* 2018; 211: 347-55.

[18] Tetteh EK, Rathilal S. Effects of a polymeric organic coagulant for industrial mineral oil wastewater treatment using response surface methodology (RSM). *Water Sa* 2018; 44(2): 155-61.

[19] APHA A. WEF.(2012)"Standard Methods for examination of water and wastewater". 22nd

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

American Public Health Association (Eds.). Washington. 1360 pp. *ed* 2014.

[20] Kim S-C. Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation–flocculation process for pre-treating paper wastewater. *J Ind Eng Chem* 2016; 38: 93-102.

[21] Zahrim A, Nasimah A, Hilal N. Coagulation/ flocculation of lignin aqueous solution in single stage mixing tank system: modeling and optimization by response surface methodology. *J Environ Chem Eng* 2015; 3(3): 2145-54.

[22] Daud NM, Abdullah SRS, Hasan HA. Response surface methodological analysis for the optimization of acid-catalyzed transesterification biodiesel wastewater pre-treatment using coagulation–flocculation process. *Saf Environ Prot* 2018; 113: 184-92.

[23] Guvenc SY, Erkan HS, Varank G, Bilgili MS, Engin GO. Optimization of paper mill industry wastewater treatment by electrocoagulation and electro-Fenton processes using response surface methodology. *Water Sci Technol* 2017; 76(8): 2015-31.

[24] Fendri I, Khannous L, Timoumi A, Gharsallah N, Gdoura R. Optimization of coagulation-flocculation process for printing ink industrial wastewater treatment using response surface methodology. *Afr J Biotechnol* 2013; 12(30): 4819-26.

[25] Birjandi N, Younesi H, Bahramifar N, Ghafari S, Zinatizadeh AA, Sethupathi S. Optimization of coagulation-flocculation treatment on paper-recycling wastewater: application of response surface methodology. *J Environ Sci Health A* 2013; 48(12): 1573-82.

[26] Trinh TK, Kang LS. Response surface methodological approach to optimize the coagulation–flocculation process in drinking water treatment. *Chem Eng Res Des* 2011; 89(7): 1126-35.

[27] Ghafari S, Aziz HA, Isa MH, Zinatizadeh AA. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. *J Hazard Mater* 2009; 163(2-3): 650-6.

[28] Ahmad A, Wong S, Teng T, Zuhairi A. Optimization of coagulation–flocculation process for pulp and paper mill effluent by response surface methodological analysis. *J Hazard Mater* 2007; 145(1-2): 162-8.

[29] Kakoi B, Kaluli JW, Ndiba P, Thiong'o G. Optimization of Maerua Decumbent bio-coagulant in paint industry wastewater treatment with response

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

surface methodology. *J Clean Prod* 2017; 164: 1124-34.

[30] Birjandi N, Younesi H, Bahramifar N. Treatment of wastewater effluents from paper-recycling plants by coagulation process and optimization of treatment conditions with response surface methodology. *Appl Water Sci* 2016; 6(4): 339-48.

[31] Wang J-P, Chen Y-Z, Wang Y, Yuan S-J, Yu H-Q. Optimization of the coagulation-flocculation process for pulp mill wastewater treatment using a combination of uniform design and response surface methodology. *Water Res* 2011; 45(17): 5633-40.

[32] Alavi J, Ansari S, Technical evaluation and economic optimization of coagulation-flocculation process for the pre-treatment of over-reused effluent of paper mills in cardboard recycling industry. *Int J Environ Anal Chem* 2021: 1-19.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]

[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]

Paper and Cardboard Industries Wastewater Treatment by Coagulation and Flocculation Process and Optimization with Response Surface Methodology: A Laboratory Study

Tahereh Zarei Mahmoudabadi[1], Mohammad Hassan Ehrampoush[2], Parvaneh Talebi[3], Hadi Eslami[4]

Received: 25/05/22 Sent for Revision: 24/07/22 Received Revised Manuscript: 01/08/22 Accepted: 03/08/22

Background and Objectives: Wastewater treatment of paper recycling and cardboard industries with the aim of water recycling and reducing environmental impact is one of the daily needs of industries. Therefore, the aim of the present study was to optimize the conditions of coagulation and flocculation process in wastewater treatment of paper recycling industries using the response surface method.

Materials and Methods: In this laboratory study, response surface method and central composite design were used to design the experiments and to determine the effects of the studied variables (pH, concentrations of alum, Poly aluminum chloride (PAC), and cationic polymer) on the total suspended solid (TSS) and chemical oxygen demand (COD) removal efficiency. Data analysis was done using ANOVA statistical test with a significant level of 0.05.

Results: The results showed that in the combination of PAC with cationic polymer (optimal conditions; pH=7.5, PAC concentration=450 mg/L, cationic polymer concentration=1.5 mg/L), the TSS and COD removal efficiency were 97.34% and 75.76%, respectively. In combination of alum with cationic polymer (optimal conditions; pH=8.5, alum concentration=550 mg/L, cationic polymer concentration=2 mg/L), removal efficiencies were 98.96% and 77.83%, respectively. The simultaneous effects of two independent variables, pH and concentration, had a significant effect ($p<0.05$) in removing TSS and COD variables.

Conclusion: The results showed that the combination of PAC with cationic polymer had a better efficiency. Also, the COD and TSS in the final effluent were higher and lower than the standard values, respectively. Therefore, chemical coagulation process is proposed as pretreatment.

Key words: Coagulation and flocculation, Optimization, Paper and cardboard industries, Wastewater treatment, Response surface methodology

Funding: This study was funded by Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran.

Conflict of interest: None declared.

Ethical approval: The Ethics Committee of Shahid Sadoughi University of Medical Sciences approved the study (IR.SSU.SPH.REC.1396.99).

How to cite this article: Zarei Mahmoudabadi Tahereh, Ehrampoush Mohammad Hassan, Talebi Parvaneh, Eslami Hadi. Paper and Cardboard Industries Wastewater Treatment by Coagulation and Flocculation Process and Optimization with Response Surface Methodology: A Laboratory Study. *J Rafsanjan Univ Med Sci* 2022; 21 (05): 533-50. [Farsi]

1. MSc, Dept. of Environmental Health Engineering, Environmental Science and Technology Research Center, School of Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran
2- Prof., Dept. of Environmental Health Engineering, Environmental Science and Technology Research Center, School of Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran
3- MSc, Dept. of Environmental Health Engineering, Environmental Science and Technology Research Center, School of Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran
4- Assistant Prof., Dept. of Environmental Health Engineering, School of Health, Occupational Safety and Health Research Center, NICICO, World Safety Organization and Rafsanjan University of Medical Sciences, Rafsanjan, Iran, ORCID: 0000-0001-5137-4764 (Corresponding Author) Tel: (034) 31315241, Fax: (034) 34280071, E-mail: Hadieslami1986@yahoo.com

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-05]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1401.21.5.2.7]
[DOI: 10.52547/jrums.21.5.533]