Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 3, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.3.72761

Optimum Dose Identification of Organic and Inorganic Coagulants for Stone Quarrying Industries' Wastewater Treatment

Narges Sobhani-Malekabadi, Mohammad Nemati Varnosfaderany, Nourollah Mirghaffari* and Monireh Sadeghi-Rad[1]

(Received: November 17-2026; Revised: June 12-2026; Accepted: July 19-2026)

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*Corresponding Author, Email: mnorolah@iut.ac.ir

Abstract

The application of coagulation processes for the treatment of stone quarrying wastewater has increased considerably in recent years. However, limited information is available regarding the appropriate coagulant type, optimum dosage, and pollutant removal efficiency. This study aimed to evaluate the performance of several organic and inorganic coagulants, including polyaluminum chloride (PAC), aluminum sulfate (alum), ferric chloride, zeolite, anionic polyacrylamide (APAM), and cationic polyacrylamide (CPAM), for the treatment of wastewater generated from different stone-processing industries (granite, marble, and travertine) located in Mahmoudabad Industrial Town, Isfahan, Iran. In this experimental study, the effects of coagulant dosage and mixing conditions on the treatment of four types of raw wastewater were investigated using the Response Surface Methodology (RSM). The results indicated that the optimum dosages of zeolite, ferric chloride, and PAC were 200 mg/L, while the optimum dosage of aluminum sulfate was 100 mg/L. For both anionic and cationic polyacrylamide, the optimum dosage was 0.5 mg/L. APAM, CPAM, and PAC exhibited the highest treatment performance among the tested coagulants, respectively. Zeolite showed the lowest removal efficiency (16.5%) for white travertine wastewater, whereas APAM achieved the highest removal efficiency (98.1%) for marble wastewater. Furthermore, analysis of the operational parameters demonstrated that mixing speed and coagulant dosage had the greatest influence on turbidity removal, whereas mixing time showed a comparatively lower effect. Overall, polymer-based coagulants, particularly APAM and CPAM, proved to be highly effective for the treatment of stone-processing wastewater

Keywords: Quarry industry, Wastewater treatment, Polyacrylamide, Response Surface Method, Jar test

How to cite this article: Sobhani-Malekabadi, N., M. Nemati Varnosfaderany, N. Mirghaffari and M. Sadeghi-Rad. 2026. Optimum Dose Identification of Organic and Inorganic Coagulants for Stone Quarrying Industries' Wastewater Treatment. *J. Water and Soil Sci.* 30(3): 47-65. DOI: 10.47176/jwss.30.3.72761

Copyright © 2026 Sobhani-Malekabadi et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره سوم / پاییز ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۴۷ تا ۶۵ DOI: 10.47176/jwss.30.3.72761

تعیین میزان بهینه منعقدکننده‌های آلی و معدنی در تصفیه پساب سنگ‌بری

نرگس سبحانی ملک‌آبادی، محمد نعمتی ورنوسفادرانی، نورالله میرغفاری*و منیره صادقی راد[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۶ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۲۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۸)

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mnorolah@iut.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از فرایند انعقاد در تصفیه پساب کارخانه‌های سنگ‌بری گسترش یافته است؛ اما اطلاعات دقیقی درباره نوع منعقدکننده، میزان بهینه مصرف و راندمان حذف آلاینده‌ها وجود ندارد. این پژوهش با هدف بررسی کارایی منعقدکننده‌های مختلف آلی و معدنی شامل پلی‌آلومینیوم کلراید، سولفات آلومینیوم، کلرید آهن، زئولیت، پلی‌اکریل‌آمید آنیونی و کاتیونی در تصفیه پساب انواع سنگ تولیدی (شامل گرانیت، مرمریت و تراورتن) کارخانه‌های سنگ‌بری شهرک صنعتی محمودآباد اصفهان انجام شد. در این مطالعه آزمایشگاهی، اثر غلظت منعقدکننده و شرایط اختلاط در تصفیه چهار نوع پساب خام با استفاده از روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مقادیر بهینه مصرف برای زئولیت، کلرید آهن و پلی‌آلومینیوم کلراید برابر ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، برای سولفات آلومینیوم ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و برای پلی‌اکریل‌آمید آنیونی و کاتیونی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر است. در بین مواد مورد بررسی، پلی‌اکریل‌آمید آنیونی، پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و پلی‌آلومینیوم کلراید به ترتیب بهترین عملکرد را داشتند. زئولیت با راندمان حذف ۱۶/۵ درصد برای پساب تراروتن سفید و پلی‌اکریل‌آمید آنیونی با راندمان ۹۸/۱ درصد برای پساب مرمریت به ترتیب ضعیف‌ترین و مؤثرترین منعقدکننده شناخته شد. همچنین، از بین سه عامل زمان انعقاد، سرعت اختلاط و مقدار ماده منعقدکننده، سرعت اختلاط و دوز ماده منعقدکننده بیشترین تأثیر را بر حذف کدورت داشتند.

واژه‌های کلیدی: صنعت سنگ‌بری، تصفیه پساب، پلی‌اکریل‌آمید، روش سطح پاسخ، آزمون جار

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

مقدمه

صنعت سنگ‌بری جزء صنایع مهم و توسعه یافته در ایران است. در چند سال اخیر تولید، صادرات و استفاده از سنگ‌های ساختمانی و زینتی منجر به رشد اقتصادی بسیاری شهرها شده است. سنگ‌های تولیدشده، در صنعت سنگ‌بری به وسیله آب برش داده شده و مورد سایش و پرداخت قرار می‌گیرد. آب از طریق کاهش اصطکاک و گرمای تولیدشده، فرایند برش و سایش را تسهیل و از ایجاد گردوغبار در محیط کار جلوگیری می‌کند. آب خروجی از سیستم سنگ‌بری که به عنوان پساب شناخته می‌شود، به دلیل وجود ذرات معلق کیفیت بسیار کمی دارد (۲۶). در صورت استفاده مجدد از پساب، ذرات معلق موجود در پساب منجر به اختلال در فرایند سایش سنگ می‌شود و احتمال رسوب جامدات معلق در لوله‌ها و اتصالات دستگاه‌های برش سنگ افزایش می‌یابد (۴). تخلیه پساب ناشی از صنایع سنگ‌بری در مناطقی که منابع آب آشامیدنی وجود دارد، می‌تواند مشکلاتی برای سلامت انسان ایجاد کند (۱۸). از طرفی در صورت تخلیه پساب صنایع سنگ‌بری به محیط‌زیست، جامدات معلق به اراضی پایین‌دست نفوذ پیدا کرده و منجر به کاهش کیفیت خاک منطقه می‌شود. همچنین با گذشت زمان در اثر تبخیر، رطوبت موجود در لجن سنگ کاهش یافته و عناصری مثل پتاسیم، منیزیوم و فسفات در محیط آزاد می‌شود (۲۳). بر همین اساس استفاده از فرایند تصفیه پساب و بازگشت آب به سیستم کارخانه امری ضروری است (۲۴ و ۳۴). تصفیه پساب به دو روش سنتی و پیشرفته انجام می‌شود. در روش سنتی آب پس از گردش در دستگاه‌ها از طریق سیستم کانال‌کشی در کف سالن به سمت حوضچه‌های بتی و به هم مرتبط هدایت می‌شود. پس از گذشت چند روز و ته‌نشین شدن ذرات معلق، آب نسبتاً شفاف از طریق پمپ به سیستم کارخانه هدایت می‌شود. این روش به دلیل نیاز به فضای کافی برای ساخت حوضچه‌ها، زمان‌بر بودن و عدم ته‌نشست کامل ذرات معلق بازدهی کمی دارد و امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش پیشرفته، با استفاده از مواد منعقدکننده و انجام عمل انعقاد، ذرات معلق به سرعت ته‌نشین می‌شود. پس از عبور پساب از دستگاه فیلترپرس، کلیه جامدات ته‌نشین شده از آب جدا می‌شود و آب خالص با کیفیت مطلوب در سیستم گردش پیدا می‌کند. امروزه بسیاری از کارخانه‌های سنگ‌بری به همین شیوه پساب را تصفیه می‌کنند (۱۵). در سال‌های اخیر منعقدکننده‌هایی مانند پلی‌آلومینیوم‌کلراید، سولفات آلومینیوم، کلروفریک، سولفات فریک و سولفات‌فرو مورد استفاده قرار گرفته است (۱۴). دسته دیگری از مواد شیمیایی که به عنوان منعقدکننده شناخته می‌شوند، پلی‌الکترولیت‌ها هستند. این مواد پلیمرهای دارای بار الکتریکی‌اند که از معروف‌ترین آنها می‌توان به پلی‌اکریل‌آمید اشاره کرد. در حال حاضر پلی‌اکریل‌آمید در سه نوع کاتیونی، آنیونی و بدون بار به عنوان کارآمدترین منعقدکننده شناخته شده و در صنایع سنگ‌بری، نساجی، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، داروسازی و کاغذسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۳). مطالعات بسیاری با هدف مقایسه کارایی و انتخاب بهترین منعقدکننده صورت گرفته است. در مطالعه‌ای از سه نوع پی‌اکریل‌آمید کاتیونی، آنیونی و غیریونی به همراه بررسی تأثیر نشاسته در حذف کدورت پساب سنگ مرمر استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد پلی‌اکریل‌آمید آنیونی عملکرد بهتری نسبت به سایر مواد دارد و کدورت پساب از NTU ۳۰۰ به NTU ۳۸ کاهش پیدا کرده است. از سویی دیگر افزودن نشاسته به پساب باعث بهبود فرایند انعقادسازی نمی‌شود (۱۱). در مطالعه دیگری پلی‌الکترولیت پلی‌اکریل‌آمید در تصفیه سه نوع پساب مرمر، تراورتن و گرانیت استفاده شد. نتیجه حاصل از این مطالعه نشان داد از بین پلی‌اکریل‌آمید آنیونی، کاتیونی و غیریونی، نوع آنیونی عملکرد لخته‌سازی بهتری دارد و کدورت پساب سنگ مرمر از NTU ۱۲۰۰۰ به NTU ۳ کاهش پیدا کرده است (۷). در مطالعه ارسلان و همکاران (۶) به منظور تصفیه پساب سنگ مرمر در فرایند برش و پرداخت سنگ از منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید به صورت ترکیبی با سولفات آلومینیوم و کلریدآهن استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه میزان حذف کدورت پساب با استفاده از سه منعقدکننده سولفات آلومینیوم، کلرید آهن و پلی‌اکریل‌آمید را به ترتیب ۹۹/۳٪، ۹۸٪ و ۹۹/۵٪

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

نشان داد. همچنین پلی‌اکریل‌آمید به عنوان کارآمدترین منعقدکننده در تصفیه پساب کارخانه گزارش شد. در صنایع مشابه صنعت سنگ از منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید به منظور تصفیه پساب استفاده می‌شود. برای نمونه در صنعت تولید آجر و کاشی نیز پلی‌اکریل‌آمید عملکرد قابل‌توجهی دارد و حذف بیش از ۹۸ تا ۹۹ درصد جامدات معلق گزارش شده است (۱۹ و ۲۸). البته این موضوع به معنای کارایی ضعیف سایر منعقدکننده‌ها نیست. منعقدکننده‌های معدنی مانند پلی‌آلومینیوم‌کلراید به منظور عمل تصفیه پساب در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب (۳۰) و کارخانه نورد گرم فولاد (۱۷) استفاده می‌شود. گل و همکاران (۱۶) به منظور تصفیه پساب صنعت چاپ از فرایند انعقاد به همراه میکروفیلتراسیون استفاده کردند. در این مطالعه از دو منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید و آهن (Ⅲ) سولفات استفاده شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر از منعقدکننده پلی‌آلومینیوم‌کلراید در pH ۶/۵ و مدت‌زمان ۱۵۰ دقیقه ۹۸ درصد جامدات معلق و ۹۴ درصد کل کربن آلی را حذف کرده است. همچنین استفاده از کربن فعال به عنوان جاذب و انجام میکروفیلتراسیون، منجر به افزایش کیفیت پساب خروجی شده است. به صورت کلی انتخاب بهترین منعقدکننده به عوامل متعددی از جمله نوع پساب، نوع ذرات معلق، نوع صنعت، pH و دما بستگی دارد (۷، ۱۰ و ۱۲). اما نکته قابل توجه این است که فرایند تصفیه پساب و استفاده مجدد آن در صنعت تا حد بسیار زیادی مصرف آب تازه را کاهش می‌دهد. انتخاب و استفاده از منعقدکننده ای مطلوب و متناسب با خصوصیات شیمیایی پساب در راستای بهینه‌سازی و افزایش کیفیت پساب خروجی به منظور استفاده مجدد در صنعت، اهمیت و ضرورت انجام این پژوهش را بیان می‌کند.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان به عنوان یکی از قطب‌های بزرگ صنعت سنگ کشور شناخته می‌شود. یکی از شهرک‌های صنعتی مهم این استان، محمودآباد است که در شمال شهر اصفهان و در کیلومتر ۵ بزرگراه اصفهان - تهران واقع شده است. بیشترین نوع سنگ تولیدی در شهرک صنعتی محمودآباد از انواع تراورتن و مرمریت است. البته در ۱۰ سال گذشته بخش قابل توجهی از تولید سنگ ساختمانی در این شهرک به سنگ گرانیت اختصاص داشت که در سال‌های اخیر تولید آن بسیار کاهش یافته است. با توجه به تفاوت ذاتی بین مشخصات فیزیکی و شیمیایی پساب حاصل از تولید انواع سنگ ساختمانی (تراورتن، مرمریت و گرانیت)، در این مطالعه انواع مختلف پساب با توجه به ۴ نوع اصلی سنگ تولیدی در شهرک صنعتی محمودآباد مبنای نمونه‌برداری قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌برداری از پساب کارخانه‌های سنگ‌بری بر اساس معیارهای، فراوری روزانه بیش از ۴۰۰ مترمربع سنگ ساختمانی و فراوری یکی از چهار نوع سنگ مرمریت، تراورتن سفید، تراورتن زرد و گرانیت انجام شد. در هر کارخانه پساب خام از کانال اصلی جمع‌آوری پساب (در محلی که هیچ ماده منعقدکننده‌ای اضافه نشده است) در یک ظرف ۲۰ لیتری پلی‌اتیلنی برداشت شد. میزان pH، هدایت الکتریکی (EC) و کدورت هر نمونه پساب با استفاده از دستگاه‌های قابل حمل (به ترتیب pH سنج مدل Jenway 3330، EC سنج مدل Jenway 4310 و کدورت‌سنج مدل (Lovibond DRT-15CE) در کانال اصلی جمع‌آوری پساب هر کارخانه اندازه‌گیری شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه نیز میزان pH، هدایت الکتریکی (EC) و کدورت هر نمونه پساب نیز با استفاده از الکترودهای رومیزی اندازه‌گیری شد. به منظور همگن‌سازی هر نمونه پساب خام طی دوره آزمایش‌ها از تشتک‌های ۳۰ لیتری دارای همزن برقی استفاده شد.

طراحی آزمایش و تعیین بازدهی تصفیه پساب

طراحی آزمایش روشی کارآمد است که در آن علاوه بر بررسی اثر عوامل مختلف، اثرات متقابل هر یک از پارامترها نیز دیده می‌شود (۲). همچنین به کمک طراحی آزمایش، عوامل جزئی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

از عوامل مهم تفکیک شده و عوامل ضروری در عملکرد فرایند مشخص می‌شوند (۲۵). با توجه به مزایای روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology) نسبت به دیگر روش‌ها (تعداد آزمایش کمتر برای ارزیابی متغیرهای چندگانه) به منظور طراحی آزمایش‌ها و بررسی اثر هر یک از فاکتورها از روش سطح پاسخ (طرح بهینه) استفاده شد. در این پژوهش با توجه به بررسی منابع و آزمایش‌های اولیه تعیین دوز مناسب، برای منعقدکننده‌های پلی‌اکریل‌آمید آنیونی و کاتیونی (گروه اول) و دیگر منعقدکننده‌ها شامل پلی‌آلومینیوم‌کلراید، کلریدآهن، سولفات آلومینیوم و زئولیت (گروه دوم) دو طراحی آزمایش به صورت جداگانه انجام شد. همچنین برای آزمایش‌های انعقادسازی ۳ فاکتور زمان اختلاط، سرعت اختلاط، میزان منعقدکننده و برای هر فاکتور ۴ سطح در نظر گرفته شد (جدول ۱و ۲).

آزمون جار (Jar test) یک آزمایش ساده و تجربی است که برای ارزیابی انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی در تصفیه‌خانه‌های آب‌وفاضلاب استفاده می‌شود. قبل از شروع هر آزمایش جار ابتدا پساب‌های مورد استفاده به خوبی مخلوط شدند و پیش از قرارگیری در دستگاه جارتست، منعقدکننده‌ها با مقدار مشخص به پساب اضافه شد و با سرعت و زمان مشخص‌شده در طراحی آزمایش‌ها با پساب مخلوط شدند. پس از پایان زمان اختلاط، پساب‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حال سکون قرار گرفتند. پس از انجام هر مرحله از طرح‌های آزمایش برای ۶ منعقدکننده، پارامترهای pH، کدورت و EC پساب‌ها اندازه‌گیری شد.

در ادامه برای تعیین مقدار ذرات معلق در پساب‌ها، سه منعقدکننده که میزان حذف کدورت بیشتری را از پساب داشتند انتخاب و سپس از هر پساب میزان ۱۰۰ میلی‌لیتر برداشته شد و با استفاده از سه منعقدکننده برتر، طی سه بار تکرار با مقدار بهینه ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر پلی‌آلومینیوم کلراید و ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر پلی‌آکریل‌آمید آنیونی و کاتیونی، فرایند انعقادسازی انجام شد. اندازه‌گیری مواد جامد معلق (TSS) و مواد جامد محلول (TDS) هر نمونه پساب بر اساس روش سازمان بهداشت جهانی انجام گرفت. طبق این روش ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ فیلتر شد. مواد جامد روی فیلتر و آب فیلترشده جمع‌آوری‌شده در بشر شیشه‌ای در آون تبخیر و اختلاف وزن حاصل اندازه‌گیری شد (۵).

از تجزیه‌وتحلیل آزمون ANOVA شاخص‌های F-Value و p-Value تعیین شدند. با توجه به نتایج حاصل از آزمون جار در بررسی کارایی منعقدکننده‌های استفاده شده، اثر متقابل سه فاکتور زمان اختلاط، سرعت اختلاط و دوز منعقدکننده در میزان حذف کدورت چهار نوع پساب سنگ‌بری بررسی شد.

نتایج و بحث

مشخصه‌یابی پساب

در این پژوهش کارایی منعقدکننده‌های زئولیت، پلی‌آلومینیوم‌کلراید، کلرید آهن، سولفات آلومینیوم، پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و آنیونی در حذف کدورت، کل جامدات معلق و محلول چهار نوع پساب صنعت سنگ‌بری بررسی شد. هنگام انجام فرایند انعقاد هر منعقدکننده، ۲ لیتر از هر پساب به صورت همگن برداشته شد و تأثیر مواد منعقدکننده بر تغییر pH، هدایت الکتریکی و میزان کدورت پساب مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصات اولیه ۴ نوع پساب در جدول ۳ آمده است.

آزمایش‌های انجام‌شده به روش سطح پاسخ

نتایج درصد حذف کدورت از چهار نوع پساب سنگ‌بری با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Design-Expert را نشان می‌دهد. بر اساس فاکتورهای مورد مطالعه شامل زمان اختلاط، سرعت اختلاط و دوز منعقدکننده، بیشترین درصد حذف کدورت مربوط به منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید آنیونی است. این مقدار در پساب گرانیت ۹۷/۸ درصد، پساب تراورتن زرد ۹۸ درصد، پساب تراورتن سفید ۹۷/۶ درصد و برای پساب مرمریت ۹۸/۱ درصد اندازه‌گیری شد. همچنین کمترین میزان حذف کدورت مربوط به منعقدکننده زئولیت با ۵۲/۴ درصد برای پساب گرانیت، ۷۵/۹ درصد برای پساب تراورتن زرد،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

جدول ۱. فاکتور و سطوح درنظرگرفته‌شده برای آزمایش منعقدکننده

Table 1. Factors and levels considered for the coagulant experiment

Group	Factor	Unit	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Group 1	A:Mixing Time	(min)	1	2	5	10
	B:Mixing Speed	(rpm)	50	100	150	200
	C:Coagulant Dose	(mg/L)	0.5	1	10	20
Group 2	A:Mixing Time	(min)	1	2	5	10
	B:Mixing Speed	(rpm)	50	100	150	200
	C:Coagulant Dose	(mg/L)	20	50	100	200

جدول ۲. آزمایش‌های طراحی‌شده برای گروه‌های اول و دوم به روش سطح پاسخ

Table 2. Designed experiments for the first and second groups using the response surface methodology

Experiment No. Group 1	Time (min)	Speed (rpm)	Coagulant Dose (mg/L)	Experiment No. Group 2	Time (min)	Speed (rpm)	Coagulant Dose (mg/L)
1	5	50	10	1	1	150	100
2	5	150	0.5	2	1	50	200
3	5	200	10	3	10	150	100
4	10	100	20	4	50	200	100
5	1	100	10	5	5	100	200
6	10	50	10	6	10	50	200
7	1	50	20	7	1	200	200
8	1	100	10	8	5	200	100
9	1	100	10	9	10	100	50
10	10	150	1	10	5	200	100
11	5	100	20	11	10	50	20
12	10	200	10	12	5	100	20
13	5	200	10	13	5	100	200
14	5	50	0.5	14	1	150	20
15	1	200	0.5	15	10	200	200
16	2	100	1	16	1	50	100
17	10	200	20	17	10	150	100
18	10	150	1	18	10	200	20
19	1	200	20	19	5	100	20
20	5	100	20	20	2	200	50

۱۶/۵ درصد برای پساب تراورتن سفید و ۶۲/۵ درصد برای پساب مرمریت می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر، مطالعه فهیمی‌نیا و همکاران (۱۳) و دهرآزما و همکاران (۹) نشان می‌دهد با افزایش مقدار منعقدکننده‌های زئولیت، پلی‌آلومینیوم‌کلراید، کلریدآهن و سولفات آلومینیوم درصد حذف کدورت در فرایند انعقاد افزایش می‌یابد؛ ولی برای دو منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و آنیونی با افزایش مقدار منعقدکننده کاهش درصد حذف کدورت دیده می‌شود. هر دو منعقدکننده در مقدار ۰/۵ میلی‌گرم و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب بیشترین و کمترین درصد حذف کدورت را دارند. طبق مطالعات صورت‌گرفته با کاهش مقدار پلی‌اکریل‌آمید درصد حذف کدورت پساب افزایش می‌یابد (۷). بیشترین و کمترین

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

جدول ۳. مشخصات پارامترهای کیفی پساب سنگ‌بری‌های مورد مطالعه

Table 3. Qualitative parameters of the studied stone-cutting wastewater

Parameter	Granite Wastewater	Yellow Travertine Wastewater	White Travertine Wastewater	Marble Wastewater
pH	9.3 ± 0.1	8.8 ± 0.2	8.4 ± 0.3	8.63 ± 0.1
EC (µS/cm)	7790 ± 0.4	1333 ± 0.6	7490 ± 0.8	7624 ± 0.5
Turbidity (NTU)	1172 ± 0.2	1049 ± 0.1	1402 ± 0.5	1461 ± 0.3

درصد حذف کدورت توسط هر منعقدکننده بر اساس فاکتور زمان اختلاط، دوز منعقدکننده و سرعت اختلاط در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج تجزیه‌وتحلیل آزمون ANOVA نشان می‌دهد اثر معنی‌داری بین دوز منعقدکننده و سرعت اختلاط بین تیمارهای مختلف وجود دارد و از بین متغیرهای یادشده عامل زمان اختلاط در بین بیشتر منعقدکننده‌ها دارای اختلاف معنی‌داری نیست. بر همین اساس زمان اختلاط در بیشتر منعقدکننده‌ها اثرگذاری کم و دوز منعقدکننده در تمامی تیمارها دارای اثرگذاری زیاد است (جدول ۵).

اثر متقابل فاکتورهای تعیین شده

منعقدکننده زئولیت

نمودارهای اثر متقابل عامل‌های تعیین‌شده نشان می‌دهد منعقدکننده زئولیت در برخی از نمونه‌های پساب دارای راندمان حذف کدورت کمتری نسبت به سایر منعقدکننده‌هاست. علت این امر ماهیت عملکرد زئولیت است. زئولیت به دلیل ظرفیت تبادل یونی و ویژگی‌های جذب سطحی به عنوان جاذب، کاربرد گسترده‌ای در تصفیه آب و پساب دارد. در فرایند انعقاد ناپایدارسازی ذرات معلق از طریق خنثی‌سازی بار الکتریکی، تشکیل ذرات درشت و ته‌نشینی انجام می‌شود. منعقدکننده‌های شیمیایی رایج با آزادسازی یون‌های فلزی چندظرفیتی موجب کاهش نیروی دافعه بین ذرات و تشکیل لخته‌های پایدار می‌شوند. در مقابل، زئولیت به دلیل داشتن بار سطحی منفی و عدم تولید یون‌های منعقدکننده، توانایی محدودی در ایجاد این مکانیسم دارد. به همین دلیل، کارایی آن در حذف کدورت، کمتر از منعقدکننده‌های متداول گزارش شده است (۲۲). اثر متقابل دو فاکتور زمان اختلاط و مقدار منعقدکننده نشان می‌دهد زمان اختلاط تأثیر کمی در فرایند انعقاد هر چهار نوع پساب صنعت سنگ دارد؛ درحالی‌که با افزایش مقدار منعقدکننده زئولیت درصد حذف کدورت هر چهار پساب افزایش می‌یابد. شیب ملایم نمودار پساب گرانیت نشان می‌دهد که مقدارهای ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر از منعقدکننده، دارای راندمان حذف ۸۰٪ است. شیب نمودار در پساب تراورتن سفید نیز به صورت ملایم می‌باشد؛ با این تفاوت که بیشترین درصد حذف کدورت در این پساب با دوز ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ۵۲ درصد رسیده است و کمترین میزان حذف کدورت تقریباً ۲۰ درصد است. با توجه به شیب تند در نمودارهای پساب تراورتن زرد و مرمریت مشخص است که در پساب تراورتن زرد، میزان درصد حذف کدورت در دوز ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، ۹۰ درصد است و در پساب مرمریت ۷۹/۹ درصد می‌باشد؛ اما بعد از آن در دوزهای کم‌تر راندمان حذف کدورت به سرعت کاهش می‌یابد (شکل ۱). نمودار اثر متقابل سرعت اختلاط و مقدار منعقدکننده نشان می‌دهد اثر تک فاکتوری سرعت اختلاط در میزان درصد حذف کدورت کم است؛ اما زمانی که مقدار منعقدکننده و سرعت اختلاط با هم تغییر می‌کنند، درصد حذف کدورت به میزان بیشتری تغییر می‌یابد. به عبارتی تغییرات راندمان حذف کدورت زمانی که سرعت اختلاط و مقدار منعقدکننده به طور هم‌زمان در حال تغییر هستند، نوسان بیشتری دارد. با کاهش هم‌زمان سرعت اختلاط و مقدار منعقدکننده درصد حذف کدورت کاهش می‌یابد. این مقدار در پساب گرانیت تقریباً به ۶۰ درصد، پساب تراورتن زرد ۷۵ درصد، پساب تراورتن سفید ۱۶ درصد و در پساب مرمریت به ۷۰ درصد می‌رسد. با توجه به اثرگذاری کم زمان اختلاط، نمودار اثر متقابل زمان اختلاط و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

جدول ۴. بیشترین و کمترین درصد حذف کدورت توسط هر منعقدکننده (نتایج آزمایش‌های طراحی‌شده به روش RSM)

Table 4. Maximum and minimum turbidity removal percentages for each coagulant (Results from RSM-designed experiments)

Coagulant Type	Mixing Time (min)	Mixing Speed (rpm)	Coagulant Dose (mg/L)	Maximum and Minimum Turbidity Removal Percentage			
				Marble	White Travertine	Yellow Travertine	Granite
Anionic Polyacrylamide	10	150	1	97.8			
	5	150	0.5		98	97.6	98.1
Cationic Polyacrylamide	5	150	0.5	95.8	95	94.6	95.6
Aluminum Sulfate	5	200	200	88.5	88.3	86.1	87.4
Ferric Chloride	10	50	200	89.9			
	5	100	200		89.6		
	10	200	200			90.1	90.4
Poly Aluminum Chloride	1	200	200	95	94.5	87.5	92.4
Zeolite	5	100	200	81.4	90.5	52.5	79.9
Anionic Polyacrylamide	1	50	20	80.5	81.9		
	5	100	20			81.8	83.7
Cationic Polyacrylamide	1	50	20	83.4	79.9	77	81.8
Aluminum Sulfate	5	100	20	79	79.6	78.4	79
Ferric Chloride	5	100 50	20	79.7	78.7	77.5	77.8
Poly Aluminum Chloride	10		20	78.1	76.2	67.5	74.5
Zeolite	10	50	20	52.4	75.9	16.5	62.5

سرعت اختلاط نشان می‌دهد، هر دو فاکتور تقریباً به میزان یکسان در تمامی پساب‌ها اثر داشته‌اند و با افزایش سرعت اختلاط تا حدی راندمان حذف کدورت افزایش یافته است. با این تفاوت که در شکل ۲ نمودار پساب تراورتن زرد بدون شیب می‌باشد، ولی در سه پساب دیگر در میانه نمودار یعنی ۱۰۰ تا ۱۵۰ دور در دقیقه بیشترین درصد حذف کدورت دیده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از مطالعه، زئولیت در دوز ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر قابلیت حذف کدورت بیش از ۹۰ درصد در پساب تراورتن زرد و ۷۹ درصد در پساب مرمریت را دارد. در مطالعه اونن و همکاران (۲۷) زئولیت به عنوان یک ماده طبیعی کمک منعقدکننده مورد استفاده قرارگرفت و در دوز ۶۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۹۷ درصد کدورت پساب سنگ تراورتن را کاهش داد. با توجه به مصرف زیاد آب در صنایع سنگ‌بری برای تصفیه پساب کارخانه سنگ لازم است مقادیر بسیار زیادی زئولیت مصرف شود که قاعدتاً از نظر اقتصادی و محیط زیستی به صرفه نیست (۸).

منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید

مطابق شکل ۲ پلی‌آلومینیوم‌کلراید با بازدهی ۷۰ تا ۹۰ درصد یکی از منعقدکننده‌های مناسب برای تصفیه پساب سنگ‌بری

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

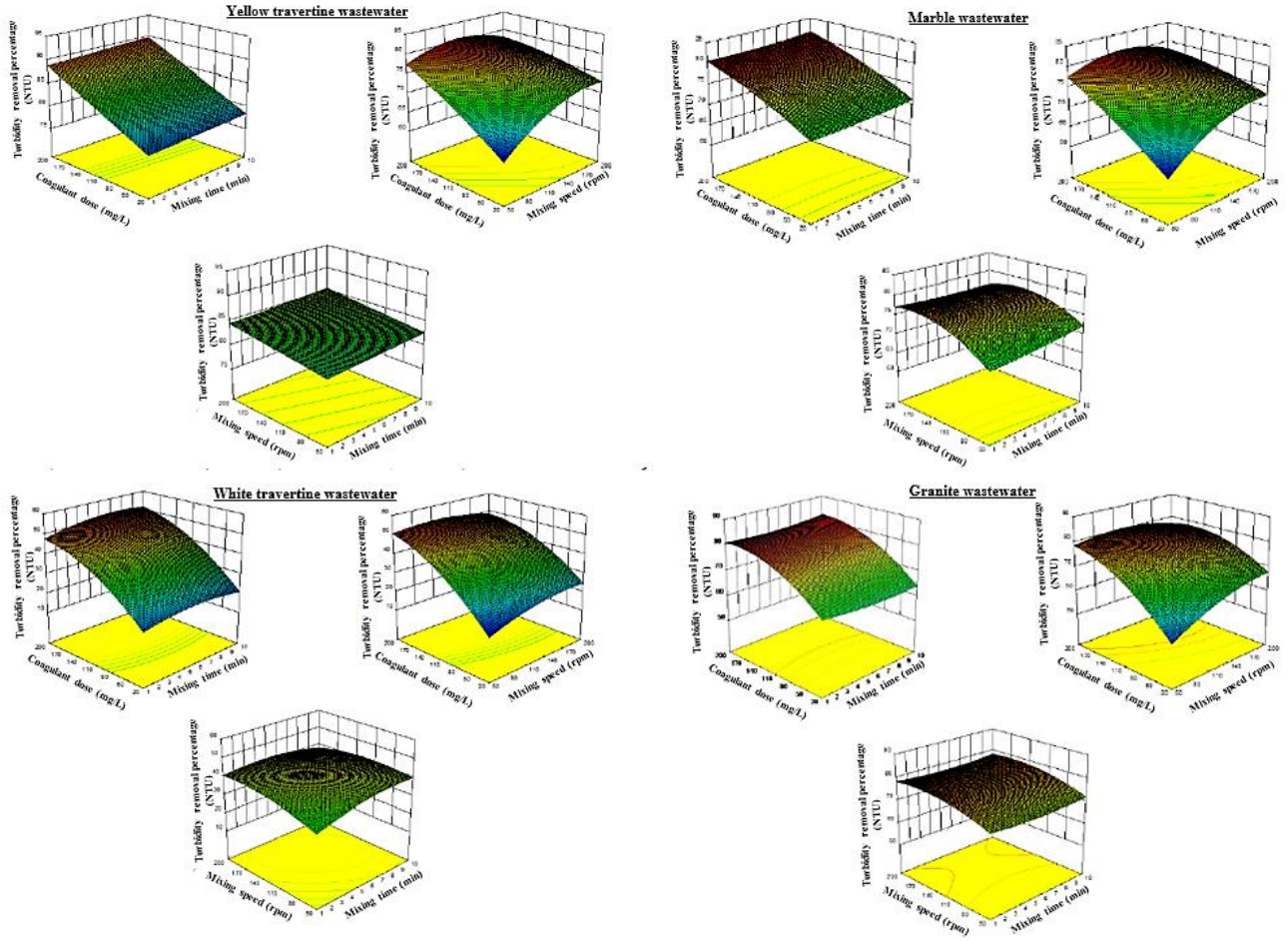
جدول ۵. نتایج آزمون آماری ANOVA

Table 5. Results of the ANOVA statistical analysis

Coagulant	Wastewater	Index	Model	Mixing time	Mixing speed	Coagulant dosage
Polyacrylamide Anionic	Granite	F	216.37	22.14	79.55	1621.44
		P	<0.0001	0.0008	<0.0001	<0.0001
	Yellow travertine	F	174.50	20.03	92.91	1251.92
		P	<0.0001	0.0012	<0.0001	<0.0001
	White travertine	F	44.46	0.32	8.28	236.07
		P	<0.0001	0.5795	0.129	<0.0001
	Marble	F	107.51	11.74	44.09	790.48
		P	<0.0001	0.0065	<0.0001	<0.0001
Polyacrylamide Cationic	Granite	F	121.25	0.24	9.19	354.82
		P	<0.0001	0.9562	0.0079	<0.0001
	Yellow travertine	F	105.88	0.32	14.46	575.91
		P	<0.0001	0.5796	0.0022	<0.0001
	White travertine	F	86.29	0.78	40.14	611.19
		P	<0.0001	0.3977	<0.0001	<0.0001
	Marble	F	84.86	5.07	24.26	660.76
		P	<0.0001	0.9825	0.0006	<0.0001
Aluminum Sulfate	Granite	F	58.83	2.79	17.03	165.98
		P	<0.0001	0.1257	0.0021	<0.0001
	Yellow travertine	F	47.57	4.11	13.50	127.36
		P	<0.0001	0.0700	0.0043	<0.0001
	White travertine	F	54.83	1.09	11.23	240.11
		P	0.0001	0.3205	0.0074	<0.0001
	Marble	F	42.13	1.21	11.46	119.88
		P	<0.0001	0.2965	0.0069	<0.0001
Iron Chloride	Granite	F	20.69	2.21	0.096	61.34
		P	<0.0001	0.1561	0.7607	<0.0001
	Yellow travertine	F	215.27	7.21	43.33	1694.49
		P	<0.0001	0.0229	<0.0001	<0.0001
	White travertine	F	206.82	2.69	25.90	809.37
		P	<0.0001	0.1320	0.0005	<0.0001
	Marble	F	206.82	2.69	41.08	1655.61
		P	<0.0001	0.1320	<0.0001	<0.0001
Polyaluminum Chloride	Granite	F	196.15	3.36	7.66	1419.55
		P	<0.0001	0.0968	0.0199	<0.0001
	Yellow travertine	F	20.02	0.12	1.25	155.34
		P	<0.0001	0.7358	0.9724	<0.0001
	White travertine	F	33.71	0.46	3.74	26.234
		P	<0.0001	0.5134	0.0881	<0.0001
	Marble	F	81.78	1.04	3.44	624.11
		P	<0.0001	0.3311	0.0932	<0.0001
Zeolite	Granite	F	14.37	0.029	10.19	92.21
		P	<0.0001	0.8688	0.0096	0.0001
	Yellow travertine	F	174.50	20.03	91.92	1215.92
		P	<0.0001	0.0012	<0.0001	<0.0001
	White travertine	F	44.46	0.32	8.28	236.07
		P	<0.0001	0.5795	0.0129	<0.0001
	Marble	F	107.51	11.74	44.09	48.79
		P	<0.0001	0.0065	<0.0001	<0.0001

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]



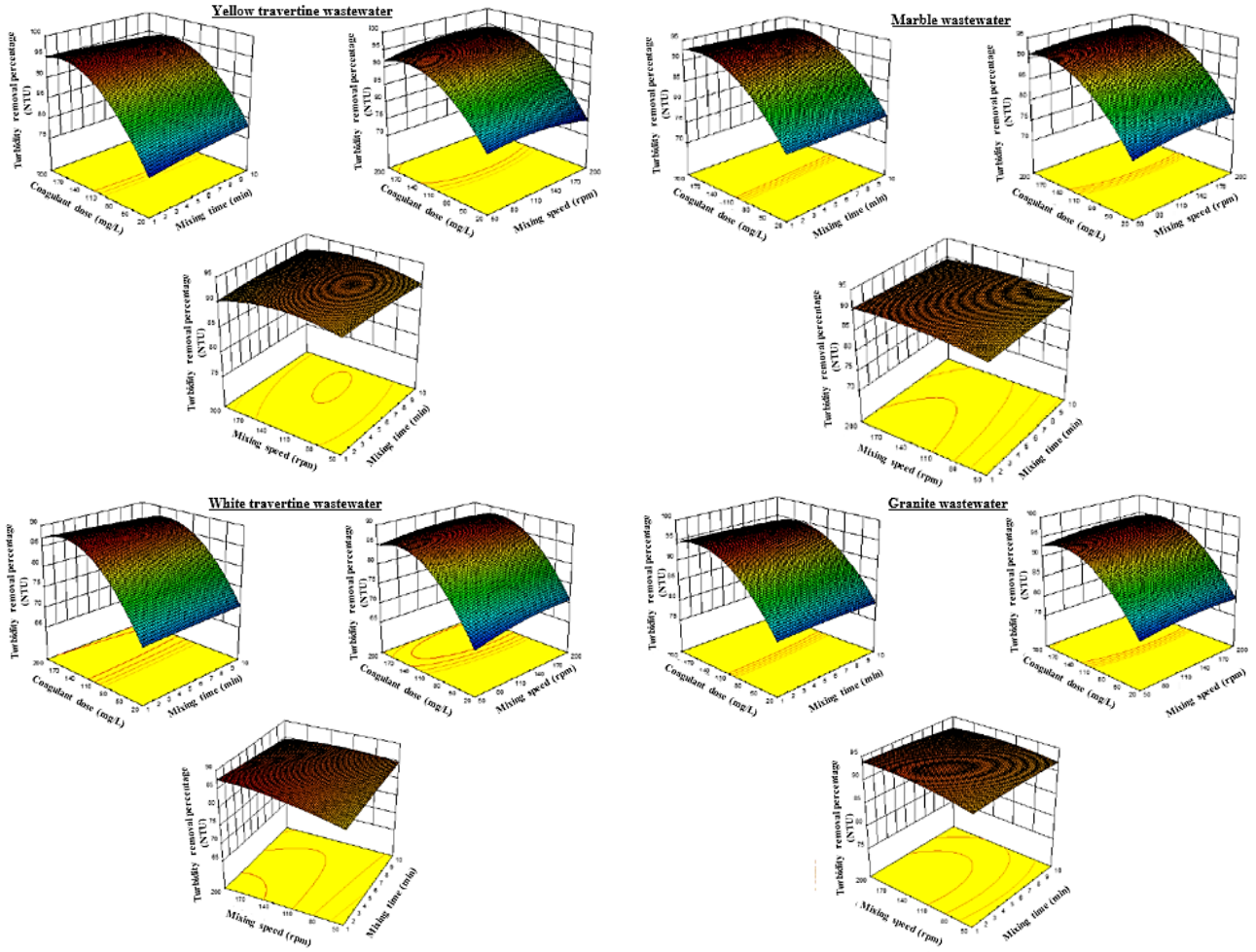
شکل ۱. اثر متقابل زمان اختلاط – دوز منعقدکننده، سرعت اختلاط – دوز منعقدکننده و زمان و سرعت اختلاط در حذف کدورت از ۴ نوع پساب سنگ‌بری با استفاده از زئولیت

Figure 1. Interaction effects of mixing time - coagulant dosage, mixing speed - coagulant dosage, and mixing time - mixing speed on turbidity removal from 4 types of stone-cutting wastewater using zeolite

است. نتایج حاصل از مطالعه صالحی و همکاران (۳۱) نشان می‌دهد پلی‌آلومینیوم‌کلراید در مقایسه با کلرید آهن از عملکرد خوبی برخوردار است و با مقدار کمتر در مدت‌زمان کوتاهی لخته‌های درشت‌تری تشکیل می‌دهد. جهرمی و همکاران (۲۱) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر از پلی‌آلومینیوم‌کلراید در pH=۷ به عنوان منعقدکننده و ۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر از ماده Gfloc-C125 با ۸۹/۴ درصد بیشترین درصد حذف کدورت را در پساب کارخانه روغن نباتی دارد. نتایج حاصل از اثر متقابل مقدار منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید، فاکتور زمان و سرعت اختلاط نشان می‌دهد با کاهش هر سه فاکتور، بازدهی حذف کدورت نیز کاهش می‌یابد. گفتنی است با افزایش دوز منعقدکننده تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف کدورت افزایش می‌یابد و سپس روند نزولی پیدا می‌کند. این نتیجه در چهار نوع پساب استفاده‌شده مشابه است. با این تفاوت که کمترین میزان درصد حذف کدورت در پساب تراورتن سفید ۶۹ درصد و بیشترین میزان درصد حذف کدورت ۹۵ درصد مربوط به پساب گرانیت است، اثر هم‌زمان دو فاکتور زمان و سرعت اختلاط بیانگر تأثیر مستقیم هر دو فاکتور بر روند انعقادسازی می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت و زمان اختلاط درصد حذف کدورت افزایش می‌یابد و با کاهش هم‌زمان هر دو فاکتور، کاهش راندمان حذف کدورت دیده می‌شود.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]



شکل ۲. اثر متقابل زمان اختلاط – دوز منعقدکننده، سرعت اختلاط – دوز منعقدکننده و زمان و سرعت اختلاط در حذف کدورت از ۴ نوع پساب سنگ‌بری با استفاده از پلی‌آلومینیوم کلراید

Figure 2. Interaction effects of mixing time – coagulant dosage, mixing speed – coagulant dosage, and mixing time – mixing speed on turbidity removal from 4 types of stone-cutting wastewater using polyaluminum chloride

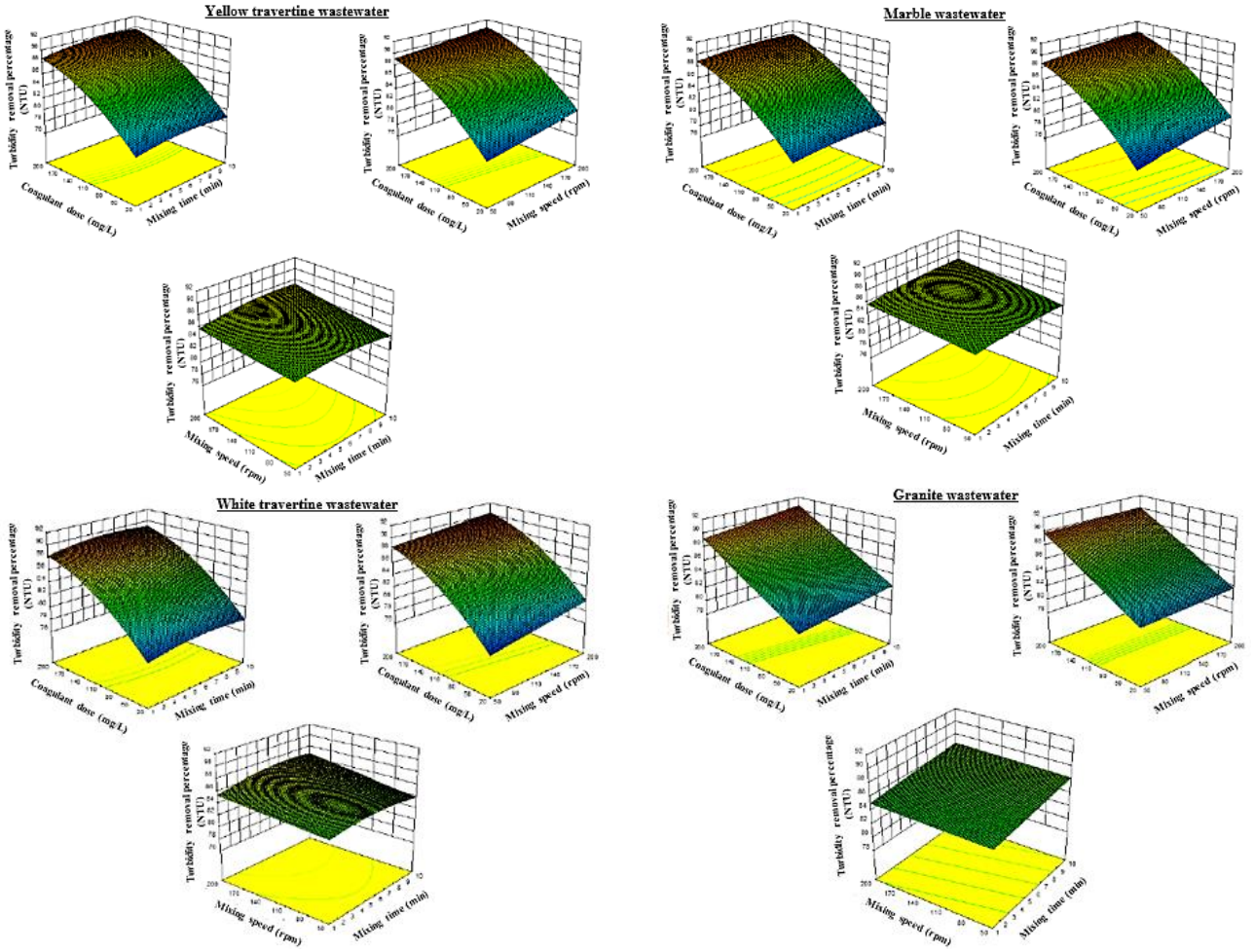
منعقدکننده آهن کلرید

شکل ۳ نتایج مربوط به تأثیر منعقدکننده کلرید آهن بر کاهش کدورت پساب را نشان می‌دهد. در پساب گرانیت برخلاف سه پساب دیگر شیب نمودارهای دوز منعقدکننده – زمان اختلاط و دوز منعقدکننده – سرعت اختلاط تند است که این امر نشان‌دهنده کاهش سریع درصد حذف کدورت در غلظت‌های کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. بیشترین میزان حذف کدورت در پساب گرانیت با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۹۰/۹ درصد است؛ درحالی‌که در نمودارهای سه پساب دیگر این شیب ملایم‌تر و کاهش درصد حذف کدورت تحت تأثیر فاکتور زمان و سرعت اختلاط نیز قرار می‌گیرد. همچنین اثر متقابل دو فاکتور زمان و سرعت اختلاط در فرایند انعقادسازی به طور یکسان عمل کرده است؛ یعنی اثر هر دو تقریباً به یک اندازه بوده است. مقایسه عملکرد کلرید آهن و سولفات آلومینیوم در مطالعه احتشامی و همکاران (۱۲) نشان می‌دهد؛ کلرید آهن با ۸۸ درصد حذف کدورت، اثرگذاری بهتری داشته است.

منعقدکننده آلومینیوم سولفات

شکل ۴ نشان می‌دهد که در نمودارهای اثر متقابل مقدار منعقدکننده – زمان اختلاط و سرعت اختلاط – دوز منعقدکننده در محدوده

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]



شکل ۳ . اثر متقابل زمان اختلاط – دوز منعقدکننده، سرعت اختلاط – دوز منعقدکننده و زمان و سرعت اختلاط در حذف کدورت از ۴ نوع پساب سنگ‌بری با استفاده از کلرید آهن

Figure 3. Interaction effects of mixing time – coagulant dosage, mixing speed – coagulant dosage, and mixing time – mixing speed on turbidity removal from 4 types of stone-cutting wastewater using ferric chloride

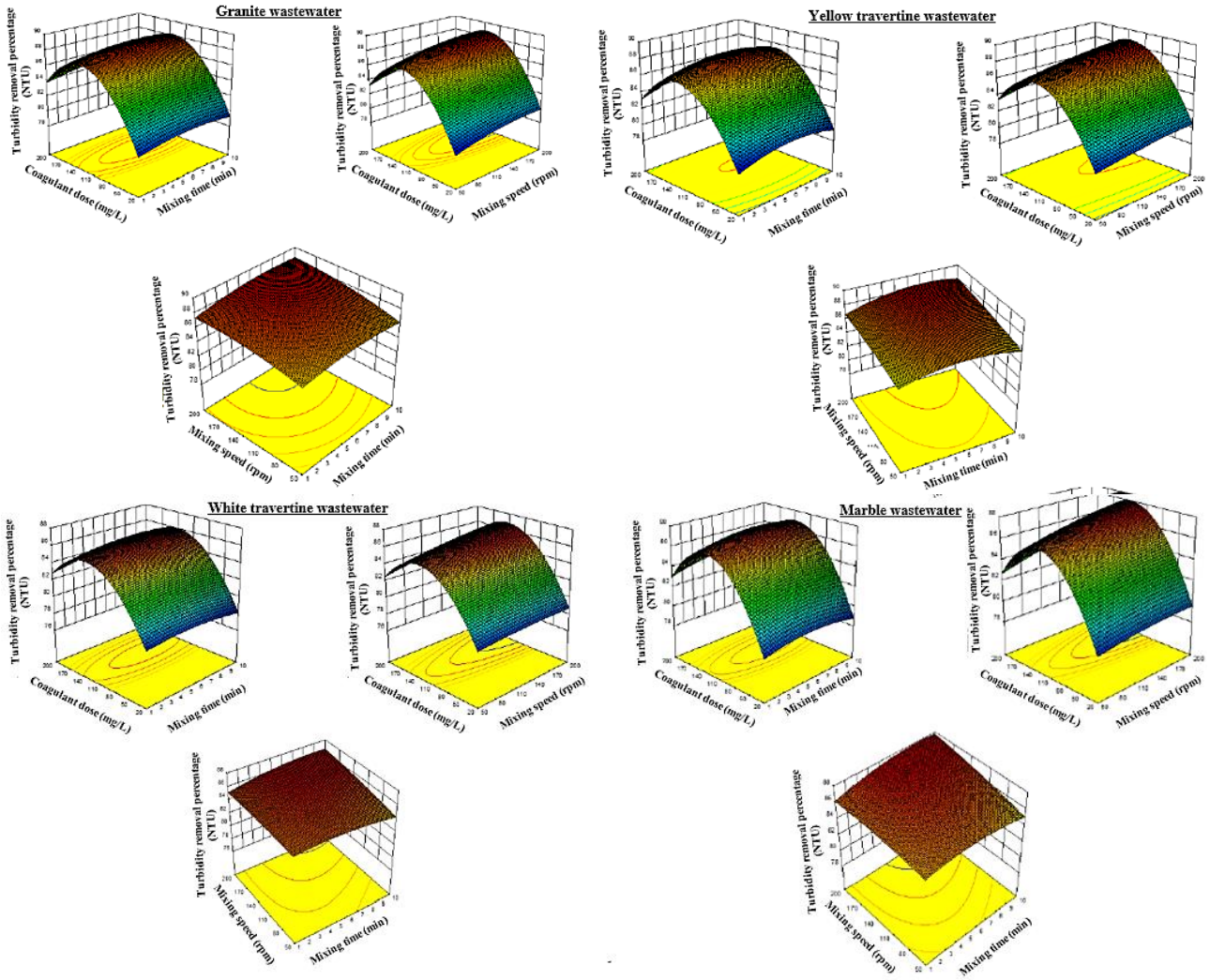
۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر دارای بیشترین راندمان حذف کدورت است. اما برخلاف اثر تک فاکتوری زمان و سرعت اختلاط، در فاکتور مقدار منعقدکننده تغییرات چشمگیری دیده می‌شود. بیشترین درصد حذف کدورت در پساب گرانیت با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر ۸۸/۴ درصد است و کمترین درصد حذف کدورت در پساب تراورتن سفید با غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر ۷۷/۹ درصد می‌باشد. برآمدگی موجود در قسمت میانه نمودارهای مربوط به منعقدکننده سولفات آلومینیوم که فقط در این منعقدکننده این دیده می‌شود، بیشترین راندمان حذف را نشان می‌دهد (مقدار دوز ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر). مطالعه فهیمی‌نیا و همکاران (۱۳) بر کارایی منعقدکننده‌ها در صنعت سنگ نشان می‌دهد آلومینیوم سولفات تا ۸۶/۴ درصد در حذف کدورت و ۸۶/۷ درصد در حذف ذرات معلق از پساب مؤثر بوده است. همچنین این منعقدکننده تا ۹۹/۳ درصد در حذف کدورت از پساب مرمر و ۹۸ درصد حذف کدورت از پساب تراورتن بیشترین عملکرد را دارد (۶ و ۹).

منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید

منعقدکننده‌های پلی‌اکریل‌آمید از لحاظ دوز مصرف و راندمان حذف کدورت با دیگر منعقدکننده‌ها متفاوت است. نقطه بهینه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

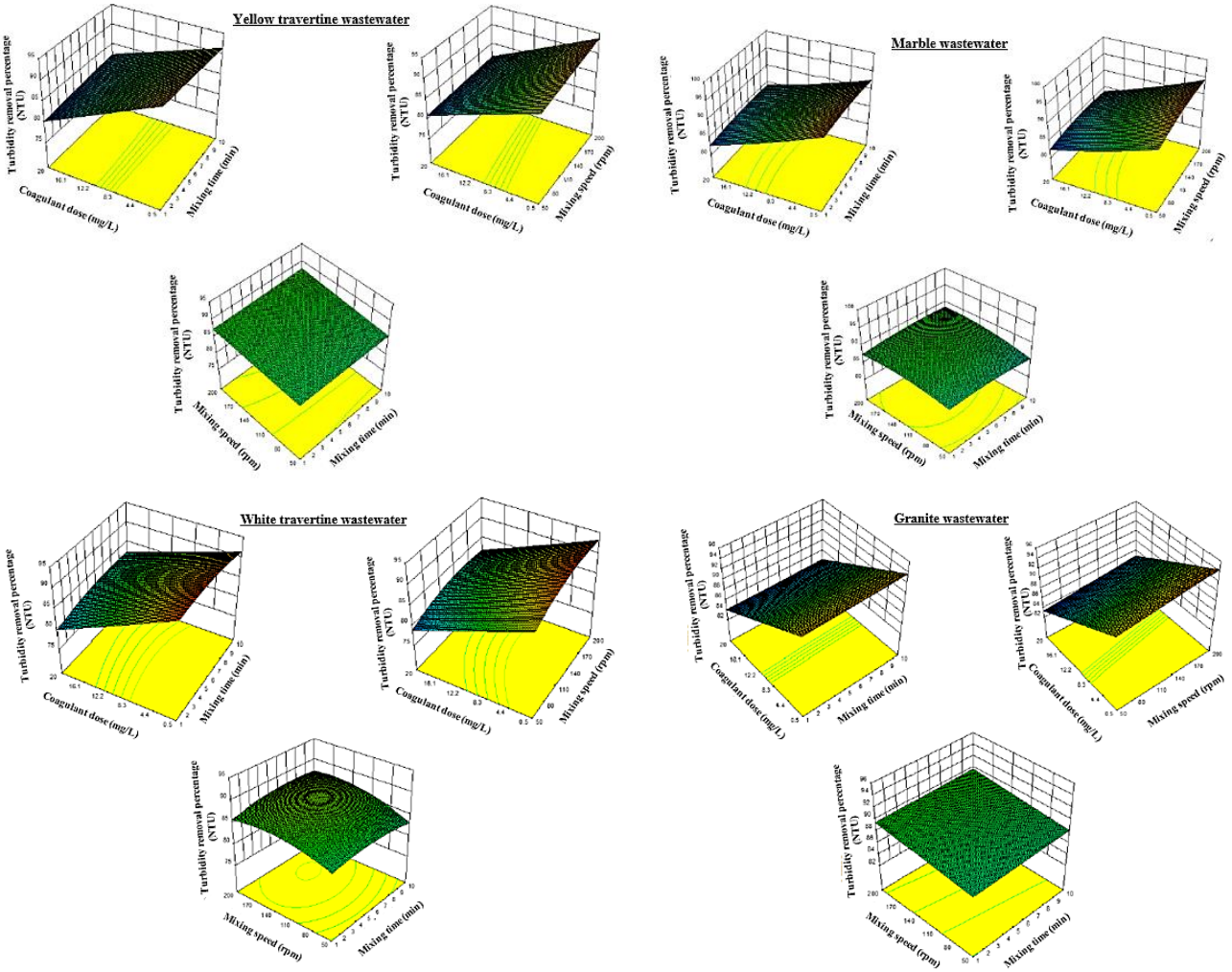


شکل ۴. اثر متقابل زمان اختلاط – دوز منعقدکننده، سرعت اختلاط – دوز منعقدکننده و زمان و سرعت اختلاط در حذف کدورت از ۴ نوع پساب سنگ‌بری با استفاده از سولفات آلومینیوم

Figure 4. Interaction effects of mixing time – coagulant dosage, mixing speed – coagulant dosage, and mixing time – mixing speed on turbidity removal from 4 types of stone-cutting wastewater using aluminum sulfate

پیش‌بینی‌شده منعقدکننده‌های پلی‌اکریل‌آمید در دوز ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه و مدت‌زمان ۵ دقیقه است و در این نقطه بیشتر حذف کدورت اتفاق می‌افتد. نتایج حاصل از درصد حذف کدورت در جدول ۵ نشان می‌دهد پلی‌اکریل‌آمید آنیونی نسبت به نوع کاتیونی و غیریونی قابلیت بهتری در کاهش کدورت و لخته‌سازی دارد. اوراکیا و همکاران (۲۸) عملکرد پلی‌اکریل‌آمید آنیونی و کاتیونی را در حذف کدورت و کاهش ذرات معلق بررسی کرد. نتایج حاصل از مطالعه نشان می‌دهد پلی‌اکریل‌امید آنیونی با ۹۹ درصد حذف کدورت بهترین لخته‌ساز است. استفاده از پلی‌اکریل‌آمید آنیونی به عنوان کمک منعقدکننده نیز تأثیر مثبتی در کاهش مقدار کدورت دارد (۳۲). نکته دارای اهمیت در خصوص این ماده دوز مصرف منعقدکننده است. با افزودن بیشتر ماده منعقدکننده به پساب، پراکندگی ذرات افزایش یافته و سبب بازگشت به آب تصفیه شده می‌شود (۱۱)؛ درنتیجه کاربرد غلظت‌های کم از این ماده مقرون‌به‌صرفه است و اثرگذاری بیشتری دارد (۳).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]



شکل ۵. اثر متقابل زمان اختلاط – دوز منعقدکننده، سرعت اختلاط – دوز منعقدکننده و زمان و سرعت اختلاط در حذف کدورت از ۴ نوع پساب سنگ‌بری با استفاده از پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی

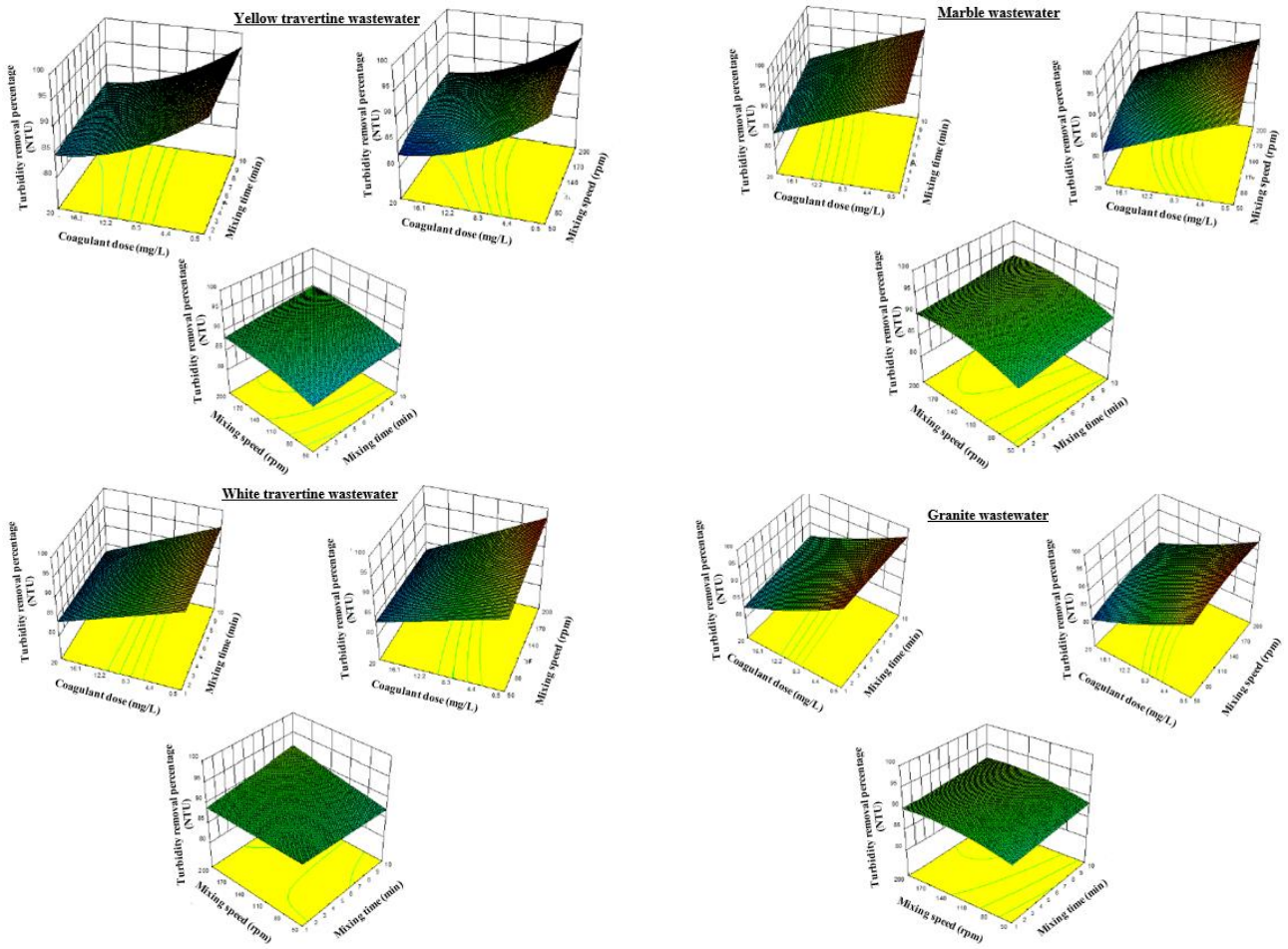
Figure 5. Interaction effects of mixing time–coagulant dosage, mixing speed–coagulant dosage, and mixing time–mixing speed on turbidity removal from 4 types of stone-cutting wastewater using cationic polyacrylamide

عملکرد دو فاکتور زمان و سرعت اختلاط در حذف کدورت از پساب‌ها تقریباً یکسان است (شکل‌های ۵ و ۶).

به صورت کلی اثر متقابل سه فاکتور زمان اختلاط، سرعت اختلاط و دوز منعقدکننده بر درصد حذف کدورت برای ۴ نوع پساب نشان می‌دهد، مدت‌زمان اختلاط نمونه پساب با ماده منعقدکننده تأثیر چندانی در کاهش کدورت پساب ندارد؛ اما اگر ماده منعقدکننده در نمونه پساب به خوبی مخلوط شود و فرایند پل‌سازی پلیمری به خوبی انجام شود، کدورت پساب تا حد قابل قبولی کاهش می‌یابد. سرعت اختلاط نیز تأثیر به سزایی در فرایند لخته‌سازی دارد. درصورتی‌که سرعت اختلاط نمونه زیاد باشد، امکان شکسته‌شدن لخته‌های تشکیل‌شده افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از سرعت اختلاط نشان می‌دهد که در سرعت‌های ۱۵۰ و ۲۰۰ دور در دقیقه راندمان حذف کدورت افزایش می‌یابد. همچنین استفاده درست و به اندازه از منعقدکننده تأثیر قابل توجهی بر حذف کدورت و تشکیل لجن سنگ دارد. نتایج حاصل از بررسی دوز منعقدکننده مطلوب (پلی‌اکریل‌آمید آنیونی) در این مطالعه نشان می‌دهد با افزایش دوز منعقدکننده به بیش از ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر، راندمان حذف

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]



شکل ۶. اثر متقابل زمان اختلاط – دوز منعقدکننده، سرعت اختلاط – دوز منعقدکننده و زمان و سرعت اختلاط در حذف کدورت از ۴ نوع پساب سنگ‌بری با استفاده از پلی‌اکریل‌آمید آنیونی

Figure 6. Interaction effects of mixing time–coagulant dosage, mixing speed–coagulant dosage, and mixing time–mixing speed on turbidity removal from 4 types of stone-cutting wastewater using anionic polyacrylamide

کدورت کاهش پیدا می‌کند. احتمال می‌رود علت این امر افزایش حضور بار هم‌نام به سبب دوز زیاد منعقدکننده باشد. همین عامل منجر به افزایش ذرات معلق و کدورت پساب می‌شود.

اثر زمان ته‌نشینی

زمان ته‌نشینی یکی از عوامل مؤثر در کارایی فرایند تصفیه و حذف آلاینده‌ها از پساب است. در این پژوهش، زمان ته‌نشینی پس از فرایند انعقاد برای تمامی منعقدکننده‌ها و انواع پساب برابر با ۳۰ دقیقه به صورت ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که پس از این مدت، تغییرات محسوسی در کیفیت پساب دیده شده و ته‌نشینی ذرات نقش مهمی در کاهش کدورت و بهبود راندمان تصفیه ایفا می‌کند.

اثر فرایند انعقاد بر هدایت الکتریکی و pH

نتایج حاصل از تأثیر غلظت منعقدکننده بر هدایت الکتریکی و pH نشان می‌دهد با افزایش غلظت کلیه منعقدکننده‌ها، pH کاهش می‌یابد و این مقدار در منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید آنیونی به حالت اسیدی نیز نزدیک می‌شود (۱ و ۲۹). میزان هدایت الکتریکی نیز در تمامی منعقدکننده‌ها، با افزایش دوز منعقدکننده کاهش می‌یابد (جدول ۶). گفتنی است در فرایند انعقادسازی با

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

جدول۶. مقادیر هدایت الکتریکی و pH

Table 6. Electrical conductivity (EC) and pH values

Coagulant	Wastewater	Initial pH	Final pH	Initial EC	Final EC
Zeolite	Granite	9.2±0.1	8.6±0.1	8270	7333
	Yellow travertine	9.1±0.2	8.7±0.06	1252	1108
	White travertine	8.9±0.1	8.1±0.1	7690	6810
	Marble	8.8±0.1	8.3±0.05	7740	6180
Polyaluminum Chloride	Granite	9.1±0.5	7.5±0.2	7340	6146
	Yellow travertine	8.6±0.05	7.9±0.1	1088	2340
	White travertine	8.2±0.05	7.7±0.1	6760	7852
	Marble	8.3±0.1	7.8±0.2	7720	8242
Iron Chloride	Granite	8.8±0.1	7.4±0.4	7921	3961
	Yellow travertine	8.6±0.05	7.5±0.3	1358	872
	White travertine	9.1±0.2	7.8±0.4	7966	4333
	Marble	9.3±0.1	7.7±0.2	7542	4184
Aluminum Sulfate	Granite	9.8±0.02	7.3±0.05	8310	5526
	Yellow travertine	8.8±0.05	7.6±0.05	1535	984
	White travertine	8.2±0.1	7.9±0.1	8420	5376
	Marble	8.7±0.05	7.8±0.05	8340	5845
Polyacrylamide Cationic	Granite	8.9±0.2	7.5±0.3	7620	2720
	Yellow travertine	8.5±0.1	7.3±0.4	1124	682
	White travertine	8.1±0.2	7.8±0.3	7070	4443
	Marble	8.3±0.5	7.8±0.3	7380	4268
Polyacrylamide Anionic	Granite	8.1±0.3	6.8±0.05	7410	1946
	Yellow travertine	8.8±0.2	6.9±0.1	1618	534
	White travertine	8.7±0.1	7.2±0.1	7511	2114
	Marble	8.9±0.2	7.1±0.2	7100	1887

پلی‌آلومینیوم کلراید به منظور تصفیه پساب تراورتن و مرمریت، مقدار هدایت الکتریکی با افزایش ماده منعقدکننده، افزایش می‌یابد و دلیل این امر احتمالاً حل‌شدن نمک‌های موجود در سنگ‌های تراورتن و مرمریت است (۸).

بهینه‌سازی فرایند انعقادسازی در تصفیه پساب سنگ‌بری

نتایج حاصل از اندازه‌گیری کلیه ذرات جامد معلق (TSS) و ذرات جامد محلول (TDS) نشان می‌دهد که پلی‌اکریل‌آمید آنیونی با ۹۸/۶ درصد حذف ذرات جامد محلول از پساب تراورتن زرد و ۹۸/۵ درصد حذف ذرات جامد معلق از پساب گرانیت، بیشترین کارایی را بین منعقدکننده‌ها دارد. میزان حذف جامدات محلول و معلق به وسیله هر سه منعقدکننده بیش از ۹۰ درصد است و این نتیجه عملکرد خوب هر سه منعقدکننده را نشان می‌دهد (جدول ۷). نتایج حاصل از حذف جامدات محلول با استفاده از فرایند انعقاد – لخته‌سازی در تصفیه پساب رنگرزی صنعت نساجی نشان می‌دهد، ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پلی‌آلومینیوم‌کلراید بیش از ۹۰ درصد رنگ پساب را حذف کرده و از طریق حذف رنگینه‌ها، مواد آلی محلول با وزن مولکولی زیاد و ذرات کلوئیدی کاهش قابل توجهی در مقادیر هدایت الکتریکی، جامدات محلول و معلق حاصل شده است. بیشترین راندمان حذف جامدات محلول ۸۵ درصد، هدایت الکتریکی ۸۳ درصد و جامدات معلق ۸۲ درصد گزارش شده است (۲۰). در پساب سنگ‌بری، بخش قابل توجهی از جامدات محلول و ذرات ریز، منشأ معدنی داشته و قابلیت تجمع و ته‌نشینی بیش‌تری در حضور منعقدکننده دارند؛ درحالی‌که در پساب نساجی بخش عمده آلاینده‌ها شامل رنگینه‌ها، مواد آلی محلول و ترکیبات شیمیایی پایدار است که حذف آنها دشوارتر است؛ بنابراین، پلی‌آلومینیوم‌کلراید در پساب سنگ‌بری توانسته است عملکرد مطلوب‌تری در کاهش جامدات محلول از خود نشان دهد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی شش ماده شامل زئولیت، پلی‌آلومینیوم

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

جدول ۷. بررسی کارایی حذف جامدات معلق و محلول در پساب با استفاده از سه منعقدکننده برتر

Table 7. Evaluation of suspended and dissolved solids removal efficiency in wastewater using the three best coagulants

Coagulant	Wastewater	Initial TDS (mg/L)	Final TDS (mg/L)	TDS removal percentage	Initial TSS (mg/L)	Final TSS (mg/L)	TSS removal percentage
Polyaluminum Chloride	Granite	1962	203	89.7	1232	105	91.5
	Yellow travertine	1444	125	91.3	2370	162.2	93.2
	White travertine	3218	442	86.3	2734	298	89.1
	Marble	1224	139	88.6	1676	156	90.7
Polyacrylamide Cationic	Granite	1962	102	94.8	1232	61	95
	Yellow travertine	1444	61	95.8	2370	74	96.9
	White travertine	3218	318	90.1	2734	213	92.2
	Marble	1224	105	91.4	1676	94	94.4
Polyacrylamide Anionic	Granite	1962	57	97.1	1232	19	98.5
	Yellow travertine	1444	20	98.6	2370	45	98.1
	White travertine	3218	159	95.1	2734	88	96.8
	Marble	1224	31	97.5	1676	40	97.6

کلراید، سولفات آلومینیوم، کلرید آهن، پلی‌اکریل‌آمید آنیونی و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به عنوان منعقدکننده در تصفیه پساب سنگ‌بری حاصل از فراوری مرمریت، تراورتن و گرانیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش جار نشان داد که تمامی مواد مورد مطالعه در کاهش کدورت و حذف ذرات معلق مؤثر بوده، اما میزان کارایی آنها با توجه به نوع ماده و ویژگی‌های پساب متفاوت است. پلی‌اکریل‌آمید آنیونی بهترین عملکرد را از خود نشان داد. این ماده در مقادیر کمتر نسبت به سایر مواد، راندمان بیشتری در کاهش کدورت و حذف جامدات ایجاد کرد. عملکرد مطلوب این پلیمر به توانایی آن در ایجاد پل بین ذرات و تشکیل لخته‌های پایدار و قابل ته‌نشینی نسبت داده می‌شود. همچنین پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی و پلی‌آلومینیوم کلراید نیز راندمان قابل قبولی در تصفیه پساب سنگ‌بری دارند و در مقایسه با زئولیت، سولفات آلومینیوم و کلرید آهن عملکرد بهتری از خود نشان دادند.

نتایج نشان داد که زئولیت، سولفات آلومینیوم و کلرید آهن تنها در مقادیر بیشتر قادر به دستیابی به راندمان‌های مطلوب هستند که این موضوع می‌تواند استفاده از آنها را از نظر اقتصادی و بهره‌برداری با محدودیت مواجه کند. در مقابل، پلی‌اکریل‌آمیدهای آنیونی و کاتیونی به دلیل نیاز به مقادیر مصرفی کمتر و راندمان بیشتر، گزینه‌های مناسب‌تری برای کاربرد در واحدهای سنگ‌بری محسوب می‌شوند.

بررسی پارامترهای کیفی پساب تصفیه‌شده نشان داد که استفاده از پلی‌آلومینیوم کلراید در برخی نمونه‌های مرمریت و تراورتن با افزایش هدایت الکتریکی پساب همراه است. ازاین‌رو، استفاده از این ماده در واحدهایی که پساب تصفیه‌شده را مجدداً در فرایند تولید به کار می‌گیرند، نیازمند توجه به تغییرات کیفیت شیمیایی آب خروجی است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پلی‌اکریل‌آمید آنیونی به دلیل راندمان بیشتر در حذف کدورت و جامدات محلول معلق، عملکرد مناسب در انواع پساب‌های مورد مطالعه و نیاز به مقادیر مصرفی کمتر، به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای تصفیه پساب سنگ‌بری معرفی می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

1. Abasi, A., H. Karimi and B. Honarvar. 2013. Studying the effect of polyaluminum chloride (PAC) and alum coagulants on turbidity removal under different conditions of coagulant doses, pH, and temperature. National Conference on Knowledge Based Development of Oil, Gaz and Petrochemical Industries, Khouzestan, Mahshahr, Iran (in Farsi).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

2. Ahmadi, S., L. Mohammadi, C. Igwegbe, S. Rahdar and A. Banach. 2018. Application of response surface methodology in the degradation of Reactive Blue 19 using H_2O_2/MgO nanoparticles advanced oxidation process. *International Journal of Industrial Chemistry* 9(3): 241–253.
3. Al Momani, F and B. Örmeci. 2014. Measurement of polyacrylamide polymers in water and wastewater using an in-line UV–vis spectrophotometer. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2 (2): 765-772.
4. Alzboon, K and K. Mahasneh. 2009. Effect of using stone cutting waste on the compression strength and slump characteristics of concrete. *International Journal of Environmental Science and Engineering* 1(4): 167-172.
5. APHA 1992. Standard methods for the examination of water and waste water ,18th Edition. American Public Health Association,Washington, D.C.
6. Arslan, E.I., S. Aslan, U. Ipek, S. Altun and S. Yazicioğlu. 2005. Physico-chemical treatment of marble processing wastewater and recycling of its sludge. *Waste Management and Research* 23(6): 550-559.
7. Basaran, H. and T. Taşdemir. 2014. Determination of flocculation characteristics of natural stone powder suspensions in the presence of different polymers. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii - Physicochemical Problems of Mineral Processing* 50(1): 169-184.
8. Birjandi, N., H. Younesi and N. Bahramifar. 2015. Comparison of the Efficiency of Alum and Polyaluminium Chloride for Removal of Paper Mill Wastewater Pollution. *Environmental Sciences* 13(1): 67-74 (in Farsi).
9. Dahrazma, B., A. Havehji, F. Sagharvani and A. R. Ahmadifard. 2018. 16 th Iranian Hydraulics Conference, Ardebil. Iran (in Farsi).
10. Domopoulou, A., K. Gudulas, E. Papastergiadis and V. Karayannis. 2015. Coagulation / flocculation / sedimentation applied to marble processing wastewater treatment. *Modern Applied Science* 9(6): 137.
11. Duzyol, S. 2015. Evaluation of flocculation behavior of marble powder suspensions. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 51(1): 5-14.
12. Ehteshami, M., S. Maghsoodi and E. Yaghoobnia. 2016. Optimum turbidity removal by coagulation / flocculation methods from wastewaters of natural stone processing. *Desalination and Water Treatment* 57: 1-9.
13. Fahiminia, M., M. Ansari, Sh. Nazari, G. Majidi, Z. Ahmadi and V. Fahiminia. 2018. Investigating the effectiveness of aluminum sulfate, ferric chloride, polyaluminum chloride, polymer and lime in stone cutting wastewater treatment. *Environmental Science and Technology Quarterly* 19 (3): 17-27 (in Farsi).
14. Fahiminia, M., R. Ardani, S. Hashemi and M. Alizadeh. 2013. Wastewater treatment of stone cutting industries by coagulation process. *Environmental Science and Technology* 2(1): 16-22.
15. Fatahi Majlej, A., A. Adami Dehkordi and M. Rabiei Farahani. 2007. An attitude on the modern method of water purification in stone-cutting factories and its comparison with the traditional method. *In:* The first conference on building stones and related industries, Islamic Azad University, Mahalat Branch, Mahalat, Iran (in Farsi).
16. Gull, M.; Z.; Shahid, A.; Raza, S.; Mazhar. and Z, Masood. 2025. Comparative investigation of PFS and PAC coagulants with activated carbon in cellulose microfiltration systems for treatment of real printing ink wastewater. *Cleaner Water* 3: 100086.
17. Habibi, M.; M.; Nourouzi, A, Chamani. and Chuah abdullah, L. 2024. Evaluation of the efficiency of polyaluminum chloride in removing the turbidity of simulated effluent of hot rolled steel plant. *Iranian Water Research Journal* 16(1):79-87.
18. Hasan., H. A. S, Saharuddin. and M. Muhamad. 2025. Unlocking the potential of polyvinyl alcohol (PVA) as a biocarrier for enhanced wastewater treatment: a comprehensive review. *Journal of Water Process Engineering* 74: 40-53.
19. Hosseinzadeh, K., M. Ghayebzadeh, M. Shahi and Z. Hosseini. 2019. Polymer induced flocculation for treatment of a tile factory wastewater using Polyacrylamide (PAM): Optimization by tesponse surface methodological analysis. *Medbiotech Journal* 3(2): 1-7 (in Farsi).
20. Islam, M. S. and M. G. Mostafa. 2020. Characterization of textile dyeing effluent and its treatment using polyaluminum chloride. *Applied Water Science* 10 (5): 119.
21. Jahromi, M., A. Ataee, K. Ghasemipanah and A. Sarafi. 2021. Investigating the effect of polyaluminum chloride coagulant along with coagulant aid in reducing pollutants in vegetable oil plants. *Petroleum Research* 19. 30-40 (in Farsi).
22. Kumari, S.; J. Chowdhry, M. Kumar and M. Chandra Garg. 2024. Zeolites in wastewater treatment: A comprehensive review on scientometric analysis, adsorption mechanisms, and future prospects. *Environmental Research* 260: 119782.
23. Mahmoudabadi, T., F. Abbasi, M. Jalili and P. Talebi. 2019. Effectiveness of Plantago major extract as a natural coagulant in removal of Reactive Blue 19 dye from wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16(3): 1-8.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]

24. Mirghaffari, N.; M. Soleimani and A. Tayebi. 2026. Using Clinoptilolite Natural Zeolite in the Removal of Methylene Blue and Disperse Red 60 from Aqueous Solutions. *Journal of Water and Soil Science* 30 (1): 13 (in Farsi).
25. Moradi, M., M. Fazlzadehdavilb, M. Pirsaheb, A. Mansouri, T. Khosravi and K. Sharafi. 2016. Response surface methodology (RSM) and its application for optimization of ammonium ions removal from aqueous solutions by pumice as a natural and low cost adsorbent. *Archives of Environmental Protection* 42(2): 33-43.
26. Naderi, A., M. Masoudian and M. Habibian. 2020. Stone cutting industries wastewater recycling and reuse by using hydrocyclone, an economical approach for reducing water consumption. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab* 31(3): 147-153 (in Farsi).
27. Onen, V., P. Beyazyuz and E. Yel. 2018. Removal of turbidity from travertine processing wastewaters by coagulants, flocculants and natural materials. *Mine Water and the Environment* 37(3): 482–492
28. Oraeki, T., G. Skouteris and S. Ouki. 2018. Optimization of coagulation-flocculation process in the treatment of wastewater from the brick-manufacturing industry. *Water Practice and Technology* 13: 780-793.
29. Pirsaheb, M., A. Zinatizadeh and A. Dargahi. 2012. Performance Evaluation of Coagulation Process in Removal of Low Turbidity and Color from Water Using Different Inorganic Coagulants. *Water and Wastewater* 23(1): 111-118. (in Farsi).
30. Rana, S. and S, Suresh. 2017. Comparison of different Coagulants for Reduction of COD from Textile industry wastewater. *Materials Today* 4 (2): 567-574.
31. Salehi., A. N. Salmani and A. Shevidi. 2022. Comparison of the performance of polyaluminum chloride, polyferric sulfate, and ferric chloride coagulants in removing total organic carbon from water (case study of Tehran's third water treatment plant). 6th International Congress of Developing Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, Tabriz. Iran (in Farsi).
32. Seifi., A. H. Ahmadi, M. Peyravi and M. Esfahanian. 2021. Studying the effect of polymeric coagulants and flocculants on the quality of paper mill wastewater. *Journal of Research in Environmental Health* 7(4): 345-353 (in Farsi).
33. Taherkhani, Z. 2021. Investigating the performance of polyacrylamide polyelectrolytes in water treatment applications. *Iranian Polymer Technology Research and Development Quarterly* 6(1): 39-50 (in Farsi).
34. Xiong, F.; Z. Su, Y. Tang, T. Dai and D. Wen. 2024. Global WWTP Microbiome-based Integrative Information Platform: From experience to intelligence. *Environmental Science and Ecotechnology* 20: 100370.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.72671]