

بهینه‌سازی فرایند انعقاد ذره‌های میکرونی کک برای سامانه‌های تصفیه و جداسازی ثقلی

کبرا پور عبدالله**

گروه مهندسی شیمی، پژوهشکده مهندسی شیمی و نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

چکیده: حجم چشمگیری از ذره‌های میکرونی کک همراه با پساب واحدهای کک‌زدایی و الفین دفع می‌شوند و تاکنون روش‌های جداسازی آن‌ها به عنوان منابع آلاینده زیست‌محیطی مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله برای اولین بار مناسب‌ترین کمک منعقدکننده برای جداسازی ذره‌های میکرونی کک انتخاب شد و در ادامه، شرایط بهینه فرایند آزمایشگاهی انعقاد/لخته‌سازی همزمان این ذره‌ها بر اساس معیار بیش‌ترین تعداد ذره‌های قابل ته‌نشینی تعیین شد. سپس با فرضیه "تراکم حداکثری" شرایط بهینه این روش بر اساس بیش‌ترین بازدهی سامانه تصفیه یا سامانه جداسازی ثقلی برای ذره‌های کک منعقد شده محاسبه شد. مجموعه آزمایش‌های هدفمند مطابق روش سطح پاسخ و با استفاده از منعقدکننده‌های $FeSO_4$ ، $Al_2(SO_4)_3$ و $FeCl_3$ در غلظت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ppm و pHهای ۵، ۷ و ۹ و همچنین کمک منعقدکننده‌های پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی (Zetafloc 7563)، خنثی (Besfloc K300N) و آنیونی (Megafloc 3045PWG) در غلظت‌های ۳، ۵ و ۷ ppm انجام شد. بر اساس شاخص قطر ذره‌های قابل ته‌نشینی ($d > 21 \mu m$)، ضریب‌های یکنواختی و خمیدگی برای مناسب‌ترین شرایط انعقادسازی این ذره‌ها محاسبه شد. نتیجه‌ها نشان داد که با توجه به بار الکتریکی منفی سطح ذره‌های کک، بیش‌ترین حجم ذره‌های قابل ته‌نشینی با بازدهی ۹۶٪ در حضور منعقدکننده کلرید آهن (III) با غلظت ۸ ppm، کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید آنیونی (Megafloc) با غلظت ۲ ppm در $pH = 6$ تشکیل می‌شوند. همچنین نتیجه‌ها نشان داد که بر اساس شاخص‌های یکنواختی و خمیدگی، سولفات آهن (II) مناسب‌ترین منعقدکننده برای افزایش بازدهی سامانه جداسازی تصفیه است؛ زیرا توزیع قطر ذره‌های منعقد شده باعث ایجاد بیش‌ترین تخلخل در کیک فیلتر شده و زمان عملکرد فیلتر و حجم کیک انباشته را افزایش می‌دهد. درحالی‌که در سامانه جداسازی ثقلی، نوع منعقدکننده تأثیری بر بازدهی جداسازی ذره‌های کک منعقد شده ندارد. بر اساس نتیجه‌ها، نسبت بهینه غلظت منعقدکننده به غلظت کمک منعقدکننده برای سامانه‌های تصفیه و جداسازی ثقلی به ترتیب ۳ و کم‌تر از ۳ (۳-۱/۵) می‌باشد.

واژگان کلیدی: انعقاد و لخته‌سازی، کک پیرولیتیکی، ضریب یکنواختی، ضریب خمیدگی

KEYWORDS: Coagulation and flocculation, Pyrolytic coke, Uniformity coefficient, Curvature coefficient

مقدمه

پساب خروجی از واحدهای کک‌زدایی، تصفیه گاز، گازی‌سازی^۱، کربونیزاسیون و کراکینگ^۲ دارای آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌های پلی‌سیکلیک آروماتیک^۳ [۱] و ذره‌های میکرونی کک [۲] هستند. گرچه تاکنون درباره نقش آلاینده‌های میکرونی پلی‌سیکلیک آروماتیک مطالعه‌های بسیاری انجام شده اما درخصوص ذره‌های میکرونی کک مطالعه‌های اندکی گزارش شده است. روش جداسازی ذره‌های میکرونی کک تابع ساختار داخلی آن‌ها است و با استفاده از روش‌های معمول استخراج قابل جداسازی نیستند؛ بنابراین لازم است که برای جداسازی آن‌ها از روش‌های خاص استفاده شود. بررسی سوابق پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که فلزهایی مانند آهن، نیکل، کروم و کبالت در دماهای بالا با سازوکارهای متفاوتی وارد ساختار کک می‌شوند [۳]. هنگامی که واکنش‌های منجر به تولید کک در راکتورهایی با جداره فولاد انجام شود، فلز آهن از جداره راکتور به ساختار کک نفوذ یافته و به عنوان کاتالیست فرایند گرافیت شدن کک عمل می‌نماید [۴]. برحسب مقدار آهن نفوذ یافته به ساختار کک، دما و سرعت انجام این فرایند متفاوت است [۵، ۶]. در راکتورهای لوله‌ای با دمای بالا (حدود ۸۰۰°C)، بخشی از کک دارای فلزهای نفوذ یافته، بر روی سطوح داخلی راکتور لوله‌ای رسوب نموده [۷] (کک کاتالیستی^۴) و بخش دیگر به شکل ذره‌های جامد در جهت جریان حرکت می‌کنند (کک پیرولیتیکی^۵) [۸]. پس از خروج ذره‌های کک پیرولیتیکی از راکتور لوله‌ای، فرایند خنک‌سازی در فاز آب^۶ انجام شده و در نتیجه ذره‌های کک دارای فلزهای آهن، نیکل و کروم به صورت سوسپانسیون^۷ در فاز آبی معلق می‌گردند. صرف نظر از فلزهای نفوذ یافته به ساختار کک پیرولیتیکی، استخراج ذره‌های کک میکرونی به حالت سوسپانسیون (۱-۱۰۰ μm) با استفاده از فیلترهای بستر گرانول، سیکلون‌ها، هیدروسیکلون‌ها و فرایندهای انعقادسازی (با ایجاد پل بین ذره‌های میکرونی کک از فاز آب) انجام می‌شود [۹]. اما تاکنون روش انعقاد/لخته‌سازی برای جداسازی ذره‌ها میکرونی کک دارای فلزهای آهن، نیکل و کروم مورد استفاده قرار نگرفته است.

همچنین بر اساس نتیجه‌های پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرایند انعقادسازی مشخص شد که پارامترهایی مانند pH

محلول، دمای آب، شدت همزدن، اثر همزدن ثانویه، نوع و مقدار ترکیب‌های منعقدکننده و کمک منعقدکننده بر بازدهی فرایند انعقاد/لخته‌سازی موثرند. بر اساس نتیجه‌های مطالعه‌ها، نوع و مقدار تزریق ماده منعقدکننده تابعی از شرایط محلول مانند دما، مقدار ذره‌های جامد معلق و پارامترهای دیگر است که البته سطح pH به عنوان موثرترین پارامتر شناخته می‌شود. با توجه به این که بازه pH بهینه هر منعقدکننده متمایز از سایر منعقدکننده‌هاست، بنابراین بازه pH فرایند انعقاد/لخته‌سازی بر اساس نوع منعقدکننده مشخص می‌شود [۱۰]. با انتخاب بازه مناسب و تنظیم دقیق سطح pH محلول، استفاده اقتصادی و موثرتری از افزودنی‌های شیمیایی انعقادساز و لخته‌ساز خواهد شد. دمای آب نیز یکی از فاکتورهای تاثیرگذار در فرایند انعقادسازی است؛ زیرا در دمای ملایم لخته‌ها با سرعت بیشتری تشکیل شده و بنابراین مقدار تزریق ماده منعقدکننده در فصول زمستان و تابستان متفاوت است. شدت همزدن محلول نیز بر فرایند انعقاد/لخته‌سازی موثر است؛ زیرا با افزایش شدت همزدن ماده منعقدکننده در فاز آبی، فرایند انعقاد نیز با سرعت بیشتری انجام می‌شود.

نتیجه‌های پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که نوع منعقدکننده و کمک منعقدکننده نیز تاثیر چشمگیری بر بازدهی انعقادسازی دارد. نوع و حجم تزریق این افزودنی‌ها برحسب ماهیت شیمیایی و بار سطحی ذره‌های پراکنده در آب تعیین می‌گردند تا فرایند انعقاد/لخته‌سازی بهینه باشد [۱۱، ۱۲]. پس از بهینه‌سازی فرایند انعقاد/لخته‌سازی، لازم است بازدهی سامانه‌های جداسازی که معمولاً پس از سامانه انعقادسازی نصب می‌شوند نیز بهینه‌سازی شوند زیرا این سامانه‌ها تاثیر چشمگیری در تصفیه پساب دارای ذره‌های میکرونی کک خواهند داشت. با توجه به مطالب فوق، در این پژوهش، عملکرد ترکیب‌های منعقدکننده و کمک منعقدکننده (لخته‌ساز) برای جداسازی ذره‌های میکرونی کک گرافیتی دارای فلزهای آهن، نیکل و کروم در محیط آبی مورد بررسی قرار گرفته، پارامترهای موثر بر این فرایند ارزیابی شده و شرایط بهینه جداسازی تعیین می‌گردند. همچنین چگونگی انتخاب سامانه‌های جداسازی مانند تصفیه و جداسازی ثقلی نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

(۱) Gasification

(۳) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)

(۵) Pyrolytic coke

(۷) Suspension

(۲) Cracking

(۴) Catalytic coke

(۶) Quenching

بخش تجربی

مواد و تجهیزات مورد استفاده

سه منعقدکننده سولفات آلومینیوم، کلرید آهن(III) و سولفات آهن(II) فرآورده شرکت مرک^۱ و سه کمک منعقدکننده تجاری بر پایه پلی‌اکریل‌آمید با نشان تجاری Zetaflocc 7563 (کاتیونی)، Megaflocc 3045PWG (آنیونی) و Besflocc K300N (خنثی) از شرکت رسوب‌گیری در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. برای انجام آزمایش‌های انعقاد/لخته‌سازی و کنترل شرایط عملیاتی از یک راکتور طرح بوچی و برای اندازه‌گیری توزیع قطر ذره‌ها در فاز آبی از دستگاه PSA^۲ مدل Sympatec Hellos سری KF ساخت شرکت Sympatec با لنزهای R₁ و R₃ استفاده شد. ذره‌های میکرونی کک در کوره‌های الفین یکی از مجتمع‌های پتروشیمی جنوب کشور تولید و پس از ورود به جریان آب، نمونه‌گیری شد.

انجام آزمایش‌ها

برای کنترل پارامترهای فیزیکی، آزمایش‌ها در راکتور همزن‌دار یک لیتری طرح بوچی انجام شد. در ابتدا در حدود ۷۰۰ سی‌سی از نمونه آب دارای ذره‌های میکرونی کک و ترکیب‌های هیدروکربنی به مخزن راکتور منتقل شده و سپس طراحی آزمایش‌ها با روش سطح پاسخ^۳ و طراحی مرکب مرکزی^۴ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۵ نسخه ۱۰.۰۰۶ انجام و پارامترهای pH و مقدارهای ماده منعقدکننده و کمک منعقدکننده در سطوح مشخص تنظیم شد. شرایط فرایندی مورد بررسی در این آزمایش‌ها بر اساس شرایط عملیاتی یکی از واحدهای صنعتی در جنوب کشور انتخاب شد. بنابراین بازه مجاز تغییرهای شرایط فرایندی بر اساس بازه تغییرهای شرایط عملیاتی آن واحد صنعتی تعریف شدند. طبق محدودیت‌های این واحد صنعتی، برخی شرایط عملیاتی فرایند انعقاد/لخته‌سازی مانند دما، زمان ماند و عدد Re (نشان دهنده میزان همزدن) در آزمایش‌ها قابل تغییر نیستند؛ بنابراین دمای فرایند در دمای مشخص ۷۰°C، زمان همزدن در بازه ثابت ۱/۰۶ ساعت و عدد رینولدز نیز در مقدار ثابت ۱۷۷۰۰ در نظر گرفته شد. بنابراین به دلیل محدودیت واحد صنعتی برای تغییر سرعت همزدن مطابق با آزمایش‌ها، از بررسی دو سرعت همزدن (سرعت همزدن کند و سرعت همزدن تند) صرف‌نظر شد. همچنین به دلیل پیوسته بودن

جریان در واحد صنعتی، زمان جداگانه‌ای برای ته‌نشینی در نظر گرفته نشد. بنابراین بر اساس عدد رینولدز، میزان دور همزن راکتور که نشان دهنده سرعت همزدن است، ۱۴۴ rpm محاسبه و تنظیم شد. پس از اتمام زمان همزدن و بدون اعمال زمان ماند، از خروجی مخزن راکتور همزدن نمونه‌گیری شد و بلافاصله با استفاده از دستگاه PSA توزیع قطر ذره‌های کک اندازه‌گیری شد. در زمان نمونه‌گیری از خروجی مخزن راکتور همزدن، به دلیل محدودیت زمانی، فرصت جداسازی و ته‌نشینی ذره‌ها داده نشد تا خطای نتیجه‌های دستگاه PSA به حداقل برسد. بنابراین در این مرحله از مخازن مخروطی، فرایند تصفیه یا جداسازی ثقیل استفاده نشد.

تراکم ساختاری ذره‌های منعقدشده

گرچه بیش‌ترین بازدهی سامانه انعقادسازی بر اساس بیش‌ترین تعداد ذره‌های منعقدشده بزرگ‌تر از ۲۱ μm تعریف شده است، اما بازدهی سامانه‌های جداسازی که معمولاً پس از سامانه انعقادسازی نصب می‌شوند نیز دارای اهمیت بوده و تاثیر چشمگیری در تصفیه پساب دارای ذره‌های میکرونی کک خواهند داشت. بررسی‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد، پس از فرایند انعقادسازی معمولاً از دو روش جداسازی مانند تصفیه و جداسازی ثقیل برای خارج نمودن ذره‌های منعقد شده از فاز آب استفاده می‌شود. در روش تصفیه، هرچه تراکم ذره‌های منعقدشده در کیک فیلتر کم‌تر باشد، فضای بین آن‌ها بیش‌تر بوده و تراوایی کیک فیلتر نیز بیش‌تر خواهد بود؛ بنابراین در چنین شرایطی پیش از رسیدن به ΔP تعریف شده، حجم بیش‌تری از ذره‌های منعقد شده قابل جداسازی خواهند بود. از طرف دیگر، در روش جداسازی ثقیل (ستلر^۶ یا میکسر-ستلر^۷) هرچه تراکم ذره‌های منعقدشده در کیک ته‌نشینی شده بیش‌تر باشد، فضای بین آن‌ها کم‌تر بوده و در برابر تلاطم جریان ورودی یا جریان تخلیه مقاومت بیش‌تری خواهد داشت. شکل ۱ اهمیت تشکیل توده‌های متراکم در جداسازی ثقیل و توده‌های متخلخل در تصفیه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

بنابراین، تراکم و پایداری مکانیکی ذره‌های منعقد شده حین فرایند جداسازی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر بازدهی سامانه جداسازی است. این تراکم و پایداری از نمودار توزیع قطر ذره‌های منعقد شده محاسبه شده که در انتخاب سامانه جداسازی

(۱) Merck

(۳) Response surface methodology (RSM)

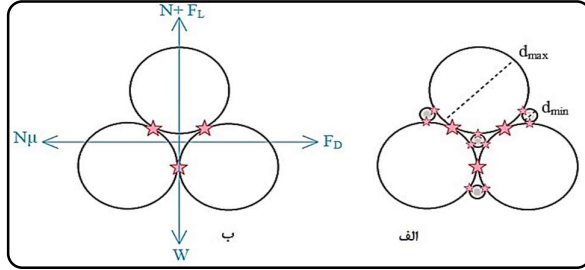
(۵) Design Expert

(۷) Mixer-Settler

(۲) Particle size analyzer

(۴) Central composite design (CCD)

(۶) Settler

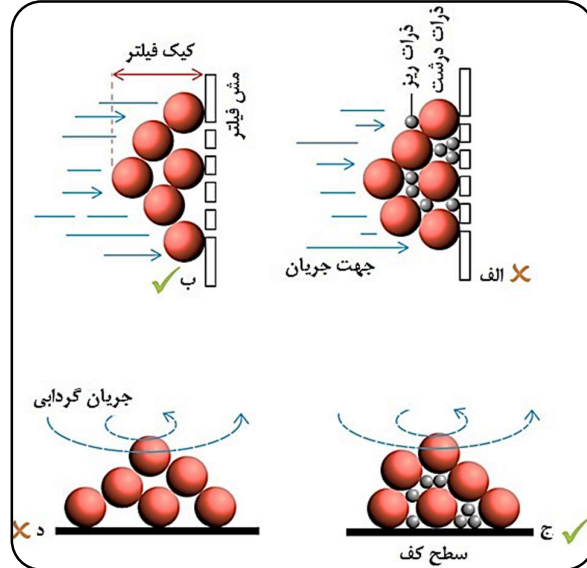


شکل ۲ - تاثیر بازه توزیع ذره‌ها بر استحکام مکانیکی توده به‌دست آمده از انباشتگی و تراکم ذره‌های منعقد شده. (الف) تجمع ذره‌ها با قطرهای متفاوت، نقاط اتصال بیشتر و استحکام مکانیکی بیشتر و (ب) تجمع ذره‌ها با قطرهای تقریباً یکسان، نقاط اتصال کم‌تر و استحکام مکانیکی کم‌تر

در جهت پایین (W) قرار دارند [۱۰]. بر این اساس، برای نخستین بار فرضیه "تراکم حداکثری" مطرح می‌شود که بر اساس آن با تشکیل دامنه وسیعی از قطر ذره‌های منعقد شده، استحکام مکانیکی و پایداری توده‌های به‌دست آمده از انباشتگی و تراکم آن‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه بازدهی فرایند انعقاد/لخته‌سازی در بخش ته‌نشینی (جداسازی ثقلی) افزایش چشمگیری خواهد داشت. بر اساس این فرضیه، در جداسازی ثقلی شرایط انعقادسازی و لخته‌سازی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که ذره‌های منعقد شده علاوه بر بیش‌ترین قطر متوسط از بیش‌ترین توزیع اندازه‌ها نیز برخوردار باشند. از طرف دیگر، بر اساس این فرضیه با تشکیل ذره‌های منعقد شده با قطر یکسان، استحکام مکانیکی و پایداری توده‌های به‌دست آمده از انباشتگی و تراکم آن‌ها کاهش می‌یابد و متقابلاً تخلخل و تراوایی آن‌ها افزایش خواهد یافت؛ در نتیجه بازدهی فرایند انعقاد/لخته‌سازی در بخش تصفیه افزایش خواهد داشت. بر اساس این فرضیه، در روش تصفیه شرایط انعقادسازی به صورتی تعیین می‌شود که ذره‌های منعقد شده دارای بیش‌ترین قطر متوسط و حداقل توزیع اندازه باشند. بنابراین لازم است معیاری برای سنجش کمی استحکام مکانیکی یا پایداری توده‌های به‌دست آمده از تجمع ذره‌های منعقد شده تعریف شده و مورد استفاده قرار گیرد. یکی از روش‌های تعیین تراکم ساختاری ذره‌های معلق بر اساس ضریب‌های یکنواختی^۴ (Cu) و خمیدگی^۵ (Cc) است [۱۳] که با استفاده از داده‌های منحنی توزیع قطر ذره‌ها و از معادله‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

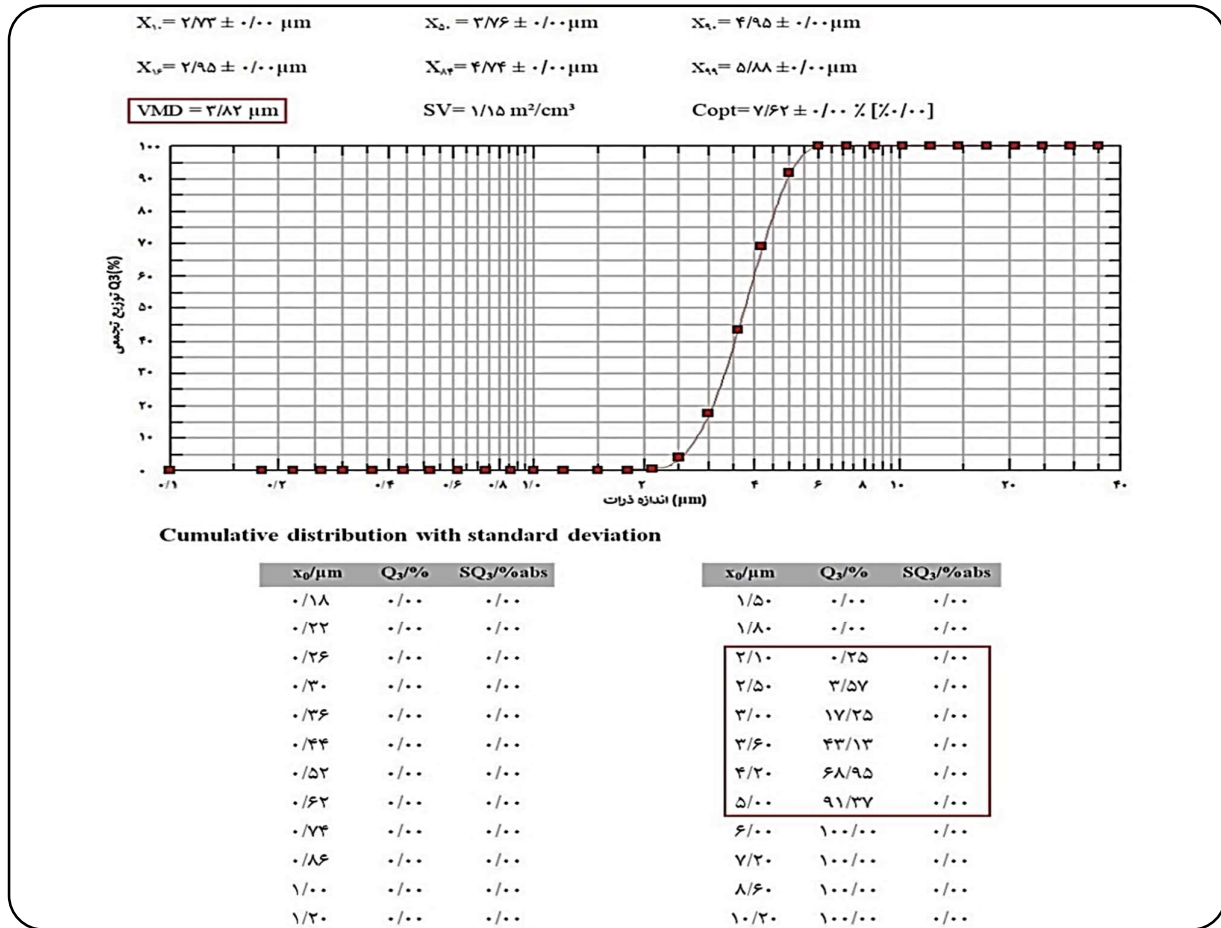
- (۱) Drag force
(۳) Lift force
(۵) Coefficient of curvature



شکل ۱ - شماتیک توزیع قطر ذره‌ها در توده‌های متراکم (الف و ج) و توده‌های متخلخل (ب و د) به‌دست آمده از انعقادسازی ذره‌های معلق و تاثیر آن بر فرایندهای جداسازی تصفیه (الف و ب) و جداسازی ثقلی (ج و د). فرایند جداسازی در تصویرهای الف و د از بازدهی پایین و در تصویرهای ب و ج از بازدهی بالایی برخوردار است.

(تصفیه یا جداسازی ثقلی) تاثیر زیادی دارد. بر اساس الگوی نشان داده شده در شکل ۲ می‌توان یک شاخص کمی برای تعیین تراکم و انباشتگی ذره‌های منعقد شده با قطرهای بسیار متفاوت (تصویر الف) و قطرهای تقریباً یکسان (تصویر ب) تعریف نمود. بر اساس شکل ۲-الف، در صورتی که توزیع دامنه قطر ذره‌ها قابل توجه باشد، ذره‌ها با قطر d_{min} در فضای بین ذره‌ها با قطر d_{max} قرار گرفته و با تشکیل ۱۲ نقطه اتصال، استحکام مکانیکی و ساختاری ذره‌های منعقد شده با یکدیگر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر همان گونه که در شکل ۲-ب دیده می‌شود، در شرایطی که پراکندگی قطر ذره‌ها محدود باشد، برای تشکیل کلونی ذره‌های منعقد شده صرفاً ۳ نقطه اتصال دیده می‌شود و در نتیجه توده به‌دست آمده از انباشتگی و تراکم ذره‌های منعقد شده از پایداری مکانیکی ضعیفی برخوردار است. بر اساس شکل ۳، توده‌های تشکیل شده از اتصال ذره‌های منعقد شده همواره در معرض نیروهای گوناگونی مانند نیروی دراگ^۱ در جهت جریان (F_D)، تنش برشی^۲ در جهت خلاف جریان ($N\mu$)، نیروی بالا رونده^۳ در جهت بالا ($N+F_L$) و نیروی جاذبه و ته‌نشینی

- (۲) Shear stress
(۴) Uniformity coefficient



شکل ۳ - تصویر داده‌های خروجی دستگاه PSA شامل نمودار و جدول داده‌های میانگین قطر ذره‌های کک در سیال آب پیش از اجرای فرایند انعقاد/لخته‌سازی

جدول توزیع (در کادر پایین شکل) و نمودار توزیع قطر ذره‌های کک در سیال آب را پیش از فرایند انعقاد/لخته‌سازی نشان می‌دهد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که بار الکتریکی منفی سطح ذره‌های کک تحت تاثیر بارهای الکتریکی قطب مخالف قرار گرفته و ترکیب‌های منعقدکننده را جذب می‌نماید. وانگ^۱ و همکاران [۱۴] و یانگ^۲ و همکاران [۱۵] بار الکتریکی سطح ذره‌های کک در pH=7/0 را به ترتیب در بازه -20 mV و -10 mV تعیین نمودند در حالی که He و همکاران بار الکتریکی سطح ذره‌های کک نفتی را در بازه 32-57 mV گزارش کردند [۱۶].

بنابراین بار سطحی ذره‌های کک تا حدودی خنثی شده و نیروهای دافعه بین ذره‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه ذره‌های کک با نیروهای واندروالسی ضعیف به یکدیگر نزدیک شده و ذره‌های بزرگ‌تری

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (2)$$

در این معادله‌ها، d_{60} قطر ذره‌ای که 60٪ تعداد کل ذره‌ها را تشکیل می‌دهد، d_{10} و d_{30} به ترتیب قطر ذره‌ای که 10٪ و 30٪ تعداد کل ذره‌ها را تشکیل می‌دهد.

نتیجه‌ها و بحث

برای بررسی اثر پارامترهای موثر بر فرایند انعقاد/لخته‌سازی، ابتدا توزیع قطر ذره‌های معلق کک در سیال ورودی به مخزن اختلاط تعیین شد و نتیجه‌ها نشان داد که توزیع قطر ذره‌های کک پراکنده شده در سیال ورودی در بازه 5-9/2 μm و قطر میانگین 3/72 μm است. شکل ۳ داده‌های میانگین قطر ذره‌ها (در کادر بالای شکل)،

(1) Wang

(2) Yang

جدول ۱ - عملکرد کمک منعقدکننده‌های کاتیونی، خنثی و آنیونی در حضور منعقدکننده FeCl_3 با غلظت ۳۰ ppm در $\text{pH}=7/0$

نوع کمک منعقدکننده	علامت تجاری	بازه قطر ذره‌ها (μm)	قطر میانگین (μm)
کمک منعقدکننده کاتیونی	Zetafloc 7563	۰/۴۷-۶۰/۳۶	۲/۶۶
کمک منعقدکننده خنثی	Besfloc K300N	۰/۲۳-۷۳/۵۸	۲/۰۴
کمک منعقدکننده آنیونی	Megafloc 3045PWG	۳/۱۷۳-۰۰/۵۰	۱۱۴/۵۱

تشکیل می‌شوند [۱۷]. با افزایش قطر ذره‌ها، نیروی وزن آن‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه سرعت ته‌نشینی و جداسازی ذره‌های معلق کم نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که گفته شد به استثنای پارامترهای دما، زمان ماند و سرعت همزدن (که غیر قابل تغییر هستند)، پارامترهایی مانند pH، نوع و غلظت منعقدکننده و همچنین نوع و غلظت کمک منعقدکننده بر فرایند انعقاد/لخته‌سازی موثرند که در این پژوهش به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند. با توجه به این که عملکرد کمک منعقدکننده‌های آنیونی، کاتیونی و خنثی در حضور منعقدکننده‌ها و در pHهای گوناگون با یکدیگر متفاوت است، بنابراین آزمایش‌های اولیه‌ای برای انتخاب مناسب‌ترین کمک منعقدکننده انجام شد.

انتخاب کمک منعقدکننده مناسب

در این بخش، فرایند انعقادسازی در حضور کمک منعقدکننده‌های آنیونی، کاتیونی و خنثی (۱۰ ppm)، در $\text{pH}=7$ و در حضور منعقدکننده FeCl_3 (۳۰ ppm) که یکی از پرکاربردترین منعقدکننده‌های صنعتی است انجام شد. توزیع قطر ذره‌ها به روش PSA تعیین شد و نتیجه‌ها در جدول ۱ ارایه شده است.

نتیجه‌ها نشان داد که عملکرد کمک منعقدکننده آنیونی نسبت به دو کمک منعقدکننده دیگر بسیار مناسب‌تر بوده و قطر ذره‌ها به میزان چشمگیری از بازه $2-3 \mu\text{m}$ به $114 \mu\text{m}$ افزایش یافته است. گرچه بار منفی سطح ذره‌های کمک تحت تاثیر بار مثبت منعقدکننده (FeCl_3) فرار گرفته و این ذره‌ها منعقد می‌شوند؛ اما با تزریق کمک منعقدکننده، قطر ذره‌های منعقد شده به میزان چشمگیری افزایش یافته و با سرعت بیشتری از سیال آب ته‌نشین و جداسازی می‌شوند. پس از تعیین نوع کمک منعقدکننده (آنیونی)، بازه غلظت‌های بهینه آن تعیین شد. ابتدا بازه غلظت این افزودنی

جدول ۲ - عملکرد کمک منعقدکننده آنیونی در غلظت‌های گوناگون در حضور منعقدکننده FeCl_3 (۳۰ ppm) در $\text{pH}=7/0$

غلظت کمک منعقدکننده آنیونی (ppm)	بازه قطر ذره‌ها (μm)	قطر میانگین (μm)
۲۰	۱۷۳-۶	۱۰۶/۲۵
۱۰	۱۷۳-۳/۵	۱۱۴/۵۱
۵	۴/۱۷۳-۵/۶	۱۱۹/۰۵

بر اساس مستندات علمی انتخاب و سپس بر اساس جدول ۲ در $\text{pH}=7/0$ برای آزمون‌های بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌های آزمایش نشان داد که با کاهش غلظت کمک منعقدکننده آنیونی از مقدار بهینه، قطر ذره‌های منعقد شده به قطر اولیه ذره‌ها نزدیک می‌شود. بنابراین، بازه تغییرهای غلظت منعقدکننده و کمک منعقدکننده آنیونی به ترتیب ۲۰-۱۰ ppm و ۳-۷ ppm در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که افزایش بیش از مقدار بهینه غلظت کمک منعقدکننده می‌تواند باعث افزایش مقدار اکسیژن‌خواهی شیمیایی^۱ سیال و در نتیجه مشکل‌های زیست محیطی شود [۱۹، ۱۸]. شکل ۴ نمودار تاثیر نوع و غلظت کمک منعقدکننده بر قطر میانگین ذره‌های کمک منعقد شده را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار شکل ۴-الف کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید خنثی و کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید کاتیونی هیچ تاثیری بر افزایش قطر ذره‌های کمک نداشته و قطر ذره‌ها در مقدار اولیه ($2-3 \mu\text{m}$) باقی ماندند؛ در حالی که با استفاده از کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید آنیونی در شرایط یکسان، قطر متوسط ذره‌های کمک از بازه $2-3 \mu\text{m}$ به $114/5 \mu\text{m}$ افزایش یافت. از طرف دیگر، بر اساس نمودار شکل ۴-ب با افزایش غلظت کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید آنیونی در بازه ۲۰-۵ ppm و در شرایط یکسان، قطر متوسط ذره‌های کمک منعقد شده از $119 \mu\text{m}$ به $106 \mu\text{m}$ کاهش یافت. بنابراین تصمیم گرفته شد که در طراحی نوع و بازه پارامترهای روش طراحی آزمایش، نه تنها از دو نوع کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید خنثی و کاتیونی استفاده نشود؛ بلکه بازه غلظت کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید آنیونی نیز در بازه‌ای کم‌تر از ۱۰ ppm انتخاب شود.

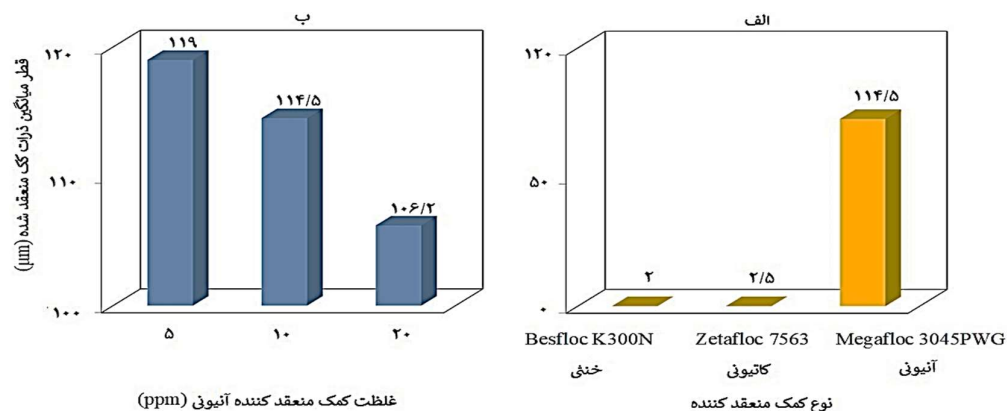
طراحی و بهینه‌سازی آزمایش‌های انعقادسازی

غفاری و همکاران [۲۰] پارامترهای فرایند انعقادسازی شیرابه محل‌های دفن زباله توسط $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ و پلی‌آلومینیوم کلرید را به

(۱) Chemical oxygen demand (COD)

جدول ۳ - آزمایش‌های طراحی شده در روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی

درصد ذره‌های بزرگ‌تر از $21 \mu\text{m}$ (Y)	پارامترها				شماره آزمایش
	غلظت کک منعقدکننده/ppm (P _D)	غلظت منعقدکننده/ppm (P _C)	نوع منعقدکننده (P _B)	pH (P _A)	
۸۶/۱۴	۷	۲۰	FeSO ₄	۵	۱
۸۶/۷۹	۳	۲۰	Al ₂ (SO ₄) ₃	۵	۲
۹۰/۷۳	۵	۱۵	FeCl ₃	۷	۳
۹۰/۶۷	۵	۱۵	FeCl ₃	۷	۴
۵۳/۰۳	۵	۱۵	FeCl ₃	۹	۵
۹۲/۲	۵	۱۵	FeCl ₃	۷	۶
۷۳/۶۶	۷	۲۰	Al ₂ (SO ₄) ₃	۹	۷
۹۴/۲۸	۳	۱۰	Al ₂ (SO ₄) ₃	۵	۸
۹۲/۰۱	۵	۲۰	FeCl ₃	۷	۹
۶۳/۳۹	۳	۱۰	FeSO ₄	۹	۱۰
۹۳/۲۹	۵	۱۰	FeCl ₃	۷	۱۱
۸۷/۹۵	۵	۱۵	FeSO ₄	۷	۱۲
۹۱/۹۱	۳	۱۵	FeCl ₃	۷	۱۳
۹۲/۰۶	۷	۱۵	FeCl ₃	۷	۱۴
۹۱/۰۴	۵	۱۵	FeCl ₃	۵	۱۵
۵۴/۱	۳	۲۰	FeSO ₄	۹	۱۶
۹۱/۷	۷	۱۰	FeSO ₄	۵	۱۷
۵۴/۶۶	۷	۱۰	Al ₂ (SO ₄) ₃	۹	۱۸
۹۴/۰۷	۵	۱۵	Al ₂ (SO ₄) ₃	۷	۱۹



شکل ۴ - نمودار تاثیر (الف) نوع کمک منعقدکننده‌های پلی‌اکریل‌آمید در غلظت ۱۰ ppm و (ب) غلظت کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید آنیونی (Megafloc 3045PWG) بر قطر میانگین ذره‌های منعقد شده کک در حضور منعقدکننده FeCl₃ (۳۰ ppm)، سرعت هم‌زدن ۱۴۴ rpm و pH=۷.

بر این اساس، روش فوق برای بهینه‌سازی فرایند انعقادسازی ذره‌های کک توسط سه نوع منعقدکننده و یک کمک منعقدکننده آنیونی هر یک در سه غلظت متفاوت و در محلول‌هایی با سه pH گوناگون انجام شد. در روش طراحی آزمایش، درصد ذره‌های بزرگ‌تر از $21 \mu\text{m}$ (Y) به عنوان شاخصی برای پاسخ در نظر گرفته شد

روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی بهینه‌سازی نمودند. در این آزمایش‌ها، غلظت ترکیب‌های منعقدکننده و pH محلول به عنوان متغیرهای فرایندی انتخاب شدند. نتیجه‌ها نشان داد که با روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی می‌توان پارامترهای تاثیرگذار بر فرایند انعقادسازی را به نحو مطلوب بهینه‌سازی نمود.

جدول ۴ - نتیجه‌های جدول آنالیز واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته برای راندمان (ANOVA) در روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی

منبع	مجموع مربعات	متوسط مربعات	شاخص F	شاخص P
مدل	۳۹۸۷/۶۷	۳۹۸/۷۷	۲۹۸/۰۱	> ۰/۰۰۰۱
پارامتر pH (P _A)	۷۲۲/۳۸	۷۲۲/۳۸	۵۳۹/۸۵	> ۰/۰۰۰۱
پارامتر نوع منعقدکننده (P _B)	۴۰/۷۲	۴۰/۷۲	۳۰/۴۳	۰/۰۰۰۶
پارامتر غلظت منعقدکننده (P _C)	۲/۱۳	۲/۱۳	۱/۶۰	۰/۲۴۳۲
پارامتر غلظت کمک منعقدکننده (P _D)	۶/۰۱	۶/۰۱	۴/۴۹	۰/۰۶۷۰
اندرکنش پارامترهای P _C و P _A	۶۴/۷۵	۶۴/۷۵	۴۸/۳۹	۰/۰۰۰۱
اندرکنش پارامترهای P _C و P _B	۸۶/۸۶	۸۶/۸۶	۶۴/۹۱	> ۰/۰۰۰۱
اندرکنش پارامترهای P _D و P _B	۳۷/۹۱	۳۷/۹۱	۲۸/۳۳	> ۰/۰۰۰۷
اندرکنش پارامترهای P _D و P _C	۱۱۴/۱۶	۱۱۴/۱۶	۸۵/۳۱	> ۰/۰۰۰۱
اندرکنش پارامترهای P _A و P _A	۱۰۴۳/۱۲	۱۰۴۳/۱۲	۷۷۹/۵۴	> ۰/۰۰۰۱
اندرکنش پارامترهای P _C و P _C	۱۸/۶۹	۱۸/۶۹	۱۳/۹۷	۰/۰۰۵۷

جدول ۵ - ضریب‌های همبستگی پیش‌بینی شده، تجربی و محاسبه‌های به همراه میانگین، انحراف استاندارد و صحت نتیجه‌ها

ضریب همبستگی پیش‌بینی شده	۰/۹۴۶۴	میانگین	۸۲/۸۳
ضریب همبستگی تجربی	۰/۹۹۷۳	انحراف استاندارد	۱/۱۶
ضریب همبستگی محاسبه‌های	۰/۹۹۴۰	دقت کافی ^۴	۴۶/۳۴۳

ضریب‌های همبستگی پیش‌بینی شده، تجربی و محاسبه‌ها به همراه میانگین، انحراف استاندارد و صحت نتیجه‌ها را نشان می‌دهد.

با استفاده از روش آماری سطح پاسخ، معادله (۳) برای پیش‌بینی درصد ذره‌ها منعقد شده کک با قطر بزرگ‌تر از $21 \mu\text{m}$ (Y) برحسب متغیرهای در نظر گرفته شده در طراحی آزمایش (P_A-P_D) ارائه می‌شود.

$$\%Y = -25.6 + 49.9 (P_A) + 20.0 (P_B) - 5.6 (P_C) - 0.4 (P_D) + 0.3 (P_A P_D) - 0.7 (P_B P_C) - 2.4 (P_B P_D) + 0.4 (P_C P_D) - 4.5 (P_A)^2 + 0.1 (P_C)^2 \quad (3)$$

در شکل ۵ نمودارهای همبستگی و احتمال نرمال که به ترتیب نشان‌دهنده دقت روش انتخاب شده و چگونگی پراکندگی خطاها است، نشان داده شده است. با توجه به این که ترم‌های خطا دارای توزیع نرمال هستند، اعتبار مدل پیشنهادی تایید می‌شود.

تأثیر همزمان دو متغیر pH و غلظت منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده

پس از تطبیق داده‌های آزمایشگاهی با روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی، نمودارهای سه بعدی و دو بعدی اثر همزمان دو متغیر pH و غلظت منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده رسم شد و به ترتیب در شکل ۶-الف و ۶-ب نشان داده شده‌اند. بر اساس

که نتیجه‌های آن در جدول ۳ ارائه شده است.

پس از انجام آزمایش‌های طراحی شده توسط روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی، داده‌ها با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت (نسخه ۱۰.۰.۰۶) پردازش شده و با شاخص p تحلیل شدند.

با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده از تحلیل آماری آنالیز واریانس^۲ که در جدول ۴ ارائه شده است؛ مقدارهای شاخص p کم‌تر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری پارامتر موردنظر بر تابع هدف است.

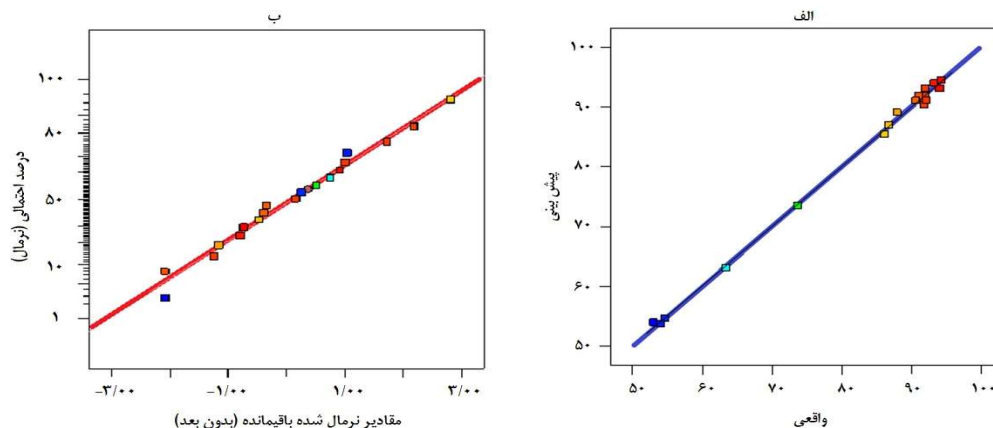
همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، مدل انتخابی به‌طور کامل معنادار بوده و مقدارهای شاخص p برای متغیرهای pH و نوع منعقدکننده بسیار کم‌تر از مقدار ۰/۰۵ بوده که نشان‌دهنده تأثیر این دو پارامتر بر بازدهی فرایند انعقادسازی است. همچنین مقدارهای شاخص p برای پارامترهای غلظت منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده به ترتیب بیش‌تر از مقدار ۰/۰۵ و نزدیک به ۰/۰۵ است؛ بنابراین پارامترهای مذکور تأثیر کم‌تری بر بازدهی فرایند انعقادسازی داشته و در میان این دو پارامتر، تأثیر غلظت کمک منعقدکننده بیش‌تر از تأثیر غلظت منعقدکننده است. همچنین هر چه میزان شاخص F^۲ بزرگ‌تر و مقدار شاخص p کوچک‌تر باشد به این معناست که مدل ارائه شده با داده‌های به‌دست آمده از آزمایش تطابق بالاتری دارد. بر اساس داده‌های جدول ۴، مقدار شاخص F بالا و در مقابل مقدار شاخص p بسیار کوچک‌تر از ۰/۰۵ است که نشان‌دهنده تطبیق داده‌ها و پراکندگی کم‌تر آن‌ها است. بر این اساس، مقدار ضریب همبستگی تجربی و میانگین انحراف استاندارد به ترتیب ۰/۹۹۷۳ و ۱/۱۶٪ محاسبه شدند. جدول ۵

(۱) p-value

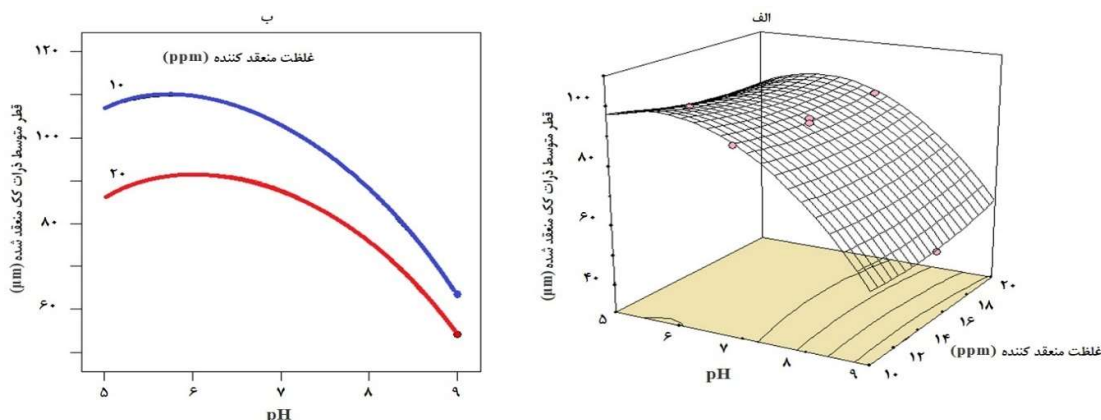
(۳) F-value

(۲) Analysis of variance (ANOVA)

(۴) Adeq precision



شکل ۵ - نمودارهای (الف) همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و مقدارهای پیش‌بینی شده توسط مدل و (ب) احتمال نرمال برای مدل پیشنهادی



شکل ۶ - نمودارهای (الف) سه بعدی و (ب) دو بعدی اثر همزمان دو متغیر pH و غلظت منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده کک

و منگوک^۳ تاثیر pH بر بازدهی فرایند انعقادسازی ذره‌های اکسید تیتانیوم (TiO_2) و قطر ذره‌های به‌دست آمده از انعقاد آن‌ها بدون استفاده از ترکیب‌های منعقدکننده و کمک منعقدکننده را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش pH در بازه $pH > 6/0$ قطر ذره‌های منعقد شده کاهش می‌یابد [۲۲].

با تلفیق دو تئوری گوی-چاپمن^۴ و برونستد-لوری^۵ می‌توان تاثیر افزایش pH محلول بر قطر ذره‌های کک منعقد شده را توضیح داد. بر اساس شماتیک نشان داده شده در شکل ۷ ذره‌های کک دارای بار سطحی منفی بوده و بنابراین ترکیب‌های منعقدکننده با بار سطحی مخالف (مثبت) در موقعیت صفحه هلمولتز بیرونی و حدفاصل لایه استرن، در مجاورت سطح ذره‌های کک

نتیجه‌ها، با افزایش pH تا حدود ۶/۵ الی ۷، قطر ذره‌ها منعقد شده افزایش یافته اما با ادامه افزایش pH، قطر این ذره‌ها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش غلظت منعقدکننده از ۱۰ ppm تا ۲۰ ppm نیز قطر ذره‌های منعقد شده کاهش می‌یابد.

تاثیر pH بر افزایش قطر ذره‌های منعقد شده تابعی از بار سطحی ذره‌ها (مثبت یا منفی)، نوع ترکیب‌های کمک منعقدکننده و همچنین بازه pH انتخاب شده است. گودی مچوک^۱ و همکاران تاثیر pH بر بازدهی فرایند انعقادسازی ذره‌های هماتیت (Fe_2O_3) و قطر ذره‌های به‌دست آمده از انعقاد آن‌ها توسط اسیدهای آمینه گلاسنین، لایسین و گلوتامین را بررسی نمودند و نتیجه‌های آن‌ها نیز نشان داد که با افزایش pH قطر ذره‌های منعقد شده کاهش می‌یابد [۲۱]. آلگبوری^۲

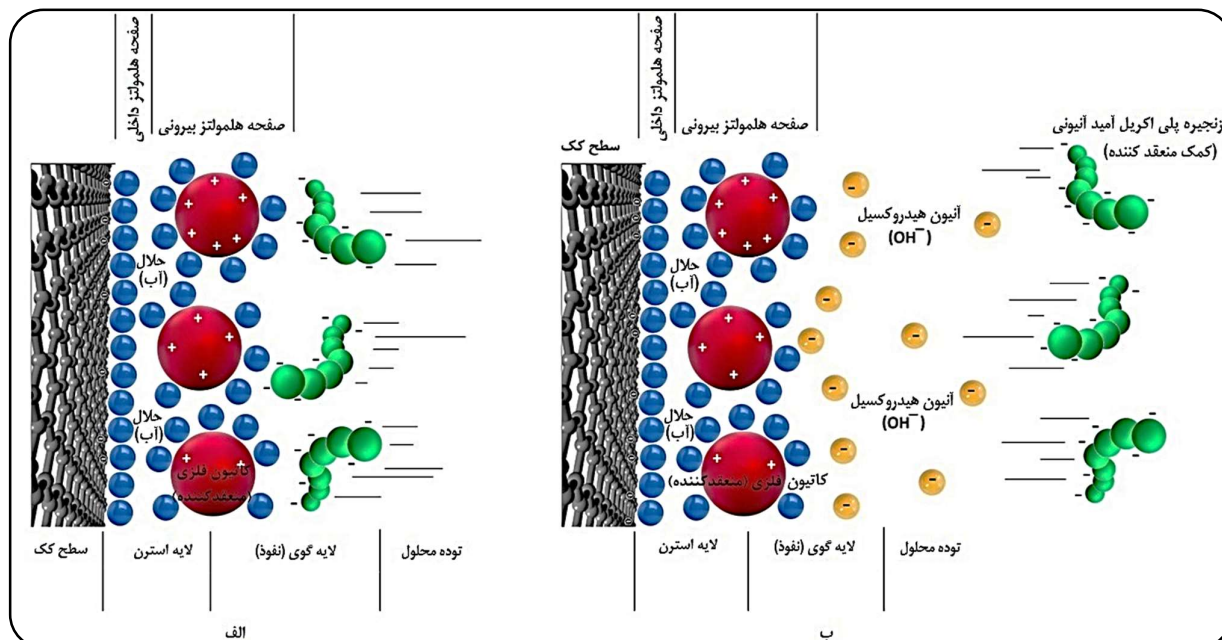
(۱) Godymchuk

(۳) Mengüç

(۵) Brønsted-Lowry theory

(۲) Al-Gebory

(۴) Gouy-Chapman theory



شکل ۷ - شماتیک تاثیر افزایش pH محلول بر قطر ذره‌های کک منعقد شده بر اساس تلفیق دو تئوری گوی-چایمن و برونستد-لوری. (الف) در بازه $\text{pH}=6-7$ زنجیره‌های کمک منعقدکننده آنیونی جذب سطح لایه استرن کاتیونی می‌شوند و (ب) در بازه‌های $\text{pH}>7$ بار سطحی لایه استرن توسط یون‌های هیدروکسیل کاهش یافته و مقدار جذب زنجیره‌های کمک منعقدکننده آنیونی بر سطح لایه استرن کاهش می‌یابد.

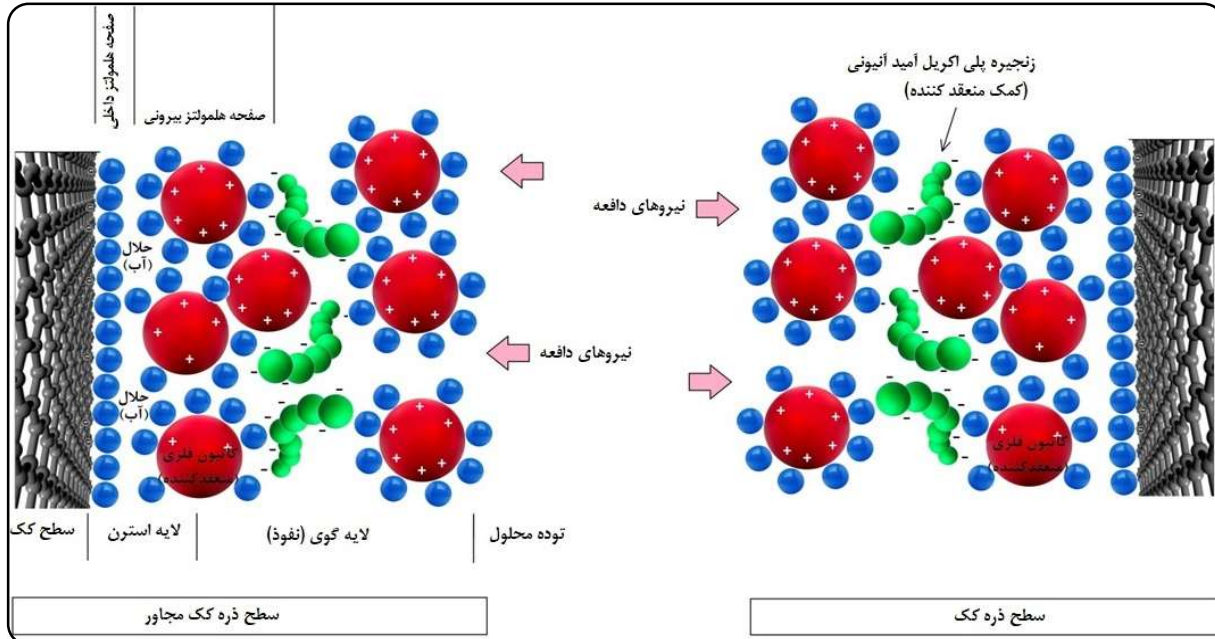
می‌یابد. در این شرایط، تشکیل توده‌های بزرگ‌تر مرکب از چندین ذره کک امکان‌پذیر نبوده و ذره‌های منعقد شده از قطر چشمگیری برخوردار نخواهند بود.

سارینا^۱ و همکاران [۲۳] تاثیر افزایش غلظت دو منعقدکننده $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ و کیتین بر افزایش قطر ذره‌های منعقد شده نمونه‌های آب را بررسی نموده و نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش غلظت منعقدکننده در بازه بالاتر از مقدار بهینه، قطر ذره‌های منعقد شده کاهش می‌یابند و دلیل این پدیده را تداخل در توازن بار الکتریکی سطحی ذره‌ها و منعقدکننده عنوان نمودند و توضیح‌های بیشتری داده نشد. یوکلسن^۲ و گرگوری^۳ گزارش نمودند که افزایش غلظت منعقدکننده در بازه بالاتر از مقدار بهینه باعث وارونگی بار الکتریکی در سطح ذره‌ها و پایداری مجدد آن‌ها می‌شود و در نتیجه فرایند انعقادسازی و افزایش قطر ذره‌ها بازدهی چشمگیری نخواهند داشت [۲۴]. هرست^۴ و همکاران نیز تاثیر افزایش غلظت منعقدکننده در فرایند انعقادسازی ذره‌های معلق در نمونه آب توسط $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ را بررسی نمودند و نتیجه‌ها نشان داد که به دلیل پدیده وارونگی بار الکتریکی، با افزایش غلظت منعقدکننده در بازه بالاتر از مقدار بهینه

قرار می‌گیرند. حداقل بین سطح ذره‌های کک و ترکیب‌های منعقدکننده و همچنین پیرامون آن‌ها همواره حلال‌پوشی بوده و بار الکتریکی مثبت در لایه استرن مستقر شده است. مطابق شماتیک شکل ۷-الف در محلول‌هایی با $\text{pH}=6/5-7$ که غلظت یون‌های هیدروکسیل به دست آمده از هیدروکافت آب ناچیز است، نیروی جاذبه بین ترکیب‌های کمک منعقدکننده آنیونی با بار الکتریکی منفی و لایه استرن با بار سطحی مثبت تشدید شده و ترکیب‌های کمک منعقدکننده از جهت‌های گوناگون بر سطح ذره‌های کک جذب می‌شوند و به تدریج توده حجیمی شامل ذره‌های کک و زنجیره‌های پلیمری تشکیل می‌شود. در این حالت کاتیون‌های منعقدکننده بین سطح کک و زنجیره‌های پلیمری کمک منعقدکننده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر، مطابق شماتیک شکل ۷-ب در محلول‌های قلیایی که غلظت یون‌های هیدروکسیل به دست آمده از هیدروکافت آب قابل توجه است، چگالی بار الکتریکی مثبت در سطح لایه استرن توسط گروه‌های هیدروکسیل خنثی شده و نیروی جاذبه زنجیره‌های پلیمری کمک منعقدکننده (با دانسیته بار منفی) به سمت لایه استرن کاهش

(۱) Saritha
(۳) Gregory

(۲) Yukselen
(۴) Hurst



شکل ۸ - شماتیک تاثیر افزایش غلظت منعقدکننده بر قطر ذره‌های کک منعقد شده بر اساس تلفیق دو تئوری گوی-چاپمن و وارونگی بار الکتریکی. با افزایش غلظت منعقدکننده بار سطحی لایه نفوذ تغییر یافته (وارونگی بار) و با هم‌بار شدن تمام ذره‌ها، نیروهای دافعه بین آن‌ها افزایش یافته و قطر ذره‌های منعقد شده کاهش می‌یابد.

در نتیجه دو ذره مجاور تحت تاثیر بارهای هم‌نام مثبت قرار گرفته، نیروی دافعه بین آن‌ها افزایش یافته، سرعت تجمع ذره‌ها و فرایند انعقاد کاهش یافته و قطر ذره‌ها نهایی کمتر از حالت بهینه خواهد بود.

تأثیر همزمان دو متغیر نوع و غلظت منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده

در شکل ۹ نمودارهای سه بعدی و دو بعدی اثر همزمان دو متغیر نوع و غلظت منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده رسم شده‌اند. بر اساس نتیجه‌ها، در مقایسه با سایر منعقدکننده‌ها، منعقدکننده $FeCl_3$ تاثیر بیش‌تری بر افزایش قطر ذره‌های منعقد شده کک دارد؛ اما این تاثیر با افزایش غلظت منعقدکننده کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که بر اساس شکل ۹-ب در غلظت ۲۰ ppm تفاوتی بین عملکرد سه نوع منعقدکننده مذکور دیده نمی‌شود. از طرف دیگر، با افزایش غلظت منعقدکننده از ۱۰ ppm تا ۲۰ ppm قطر ذره‌های منعقد شده کاهش می‌یابد. شدت این روند کاهشی بر اساس شکل ۹-ب برای منعقدکننده $FeCl_3$ بیش‌ترین و برای $Al_2(SO_4)_3$ کم‌ترین است.

پایداری ذره‌های منعقد شده کاهش می‌یابد [۲۵]. /وجو^۱ و /یفلبوگو^۲ نیز با بررسی سامانه انعقادسازی ذره‌های فسفر موجود در لجن فعال، تاثیر معکوس افزایش غلظت منعقدکننده $Al_2(SO_4)_3$ را به پدیده وارونگی بار الکتریکی در سطح ذره‌های معلق نسبت دادند [۲۶]. پریاتاریشینی^۳ و مختار^۴ نیز تاثیر افزایش غلظت یک منعقدکننده طبیعی بر نمونه‌های آب را مورد بررسی قرار داده و علل کاهش قطر ذره‌های منعقد شده با افزایش غلظت منعقدکننده در نسبت‌های بالاتر از بازه بهینه را به پدیده وارونگی بار الکتریکی سطحی این ذره‌ها نسبت دادند [۲۷].

با تلفیق دو تئوری گوی-چاپمن و وارونگی بار الکتریکی^۵ می‌توان تاثیر افزایش غلظت منعقدکننده در بازه بالاتر از ۸ ppm بر کاهش قطر ذره‌های کک منعقد شده را توضیح داد. بر اساس الگوی نشان داده شده در شکل ۸ با افزایش غلظت کاتیون‌های منعقدکننده در محلول، دانسیته سطحی این کاتیون‌ها بر سطح ذره افزایش یافته و ضمن گسترش لایه گوی (نفوذ) باعث افزایش بار الکتریکی مثبت در سطح خارجی زنجیره‌های کمک منعقدکننده می‌شود.

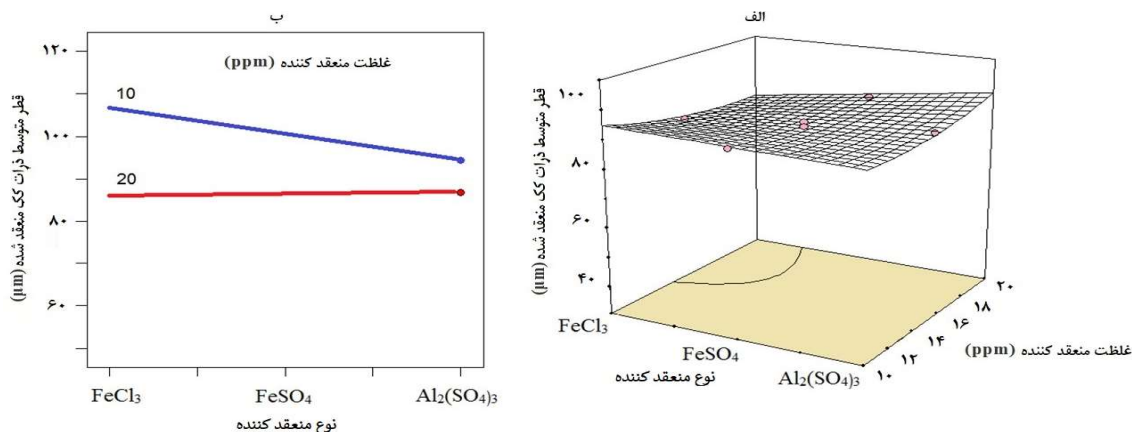
(۱) Ojo

(۳) Priyatharishini

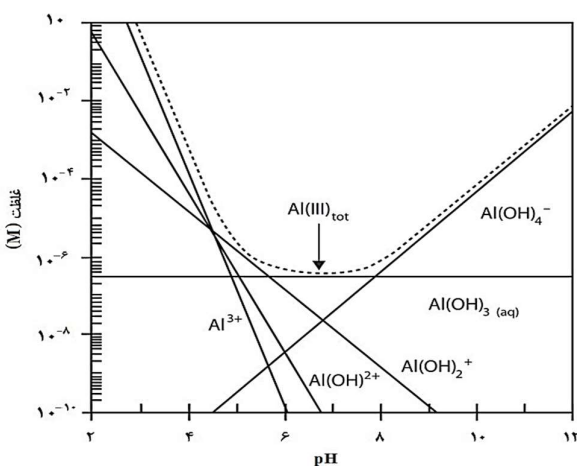
(۵) Charge reversal

(۲) Ifelebuegu

(۴) Mokhtar



شکل ۹ - نمودارهای (الف) سه بعدی و (ب) دو بعدی اثر همزمان دو متغیر نوع و غلظت منعقدکننده بر قطر ذره‌ها منعقد شده کک



شکل ۱۰ - نمودار هیدرولیز Al₂(SO₄)₃ به طیف وسیعی از گونه‌های مونومری و رسوب‌ها معلق هیدروکسیدی، پس از انحلال در محلول آبی و کاهش غلظت یون‌های آلومینیوم(III) [۳۹].

تأثیر همزمان دو متغیر غلظت منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده

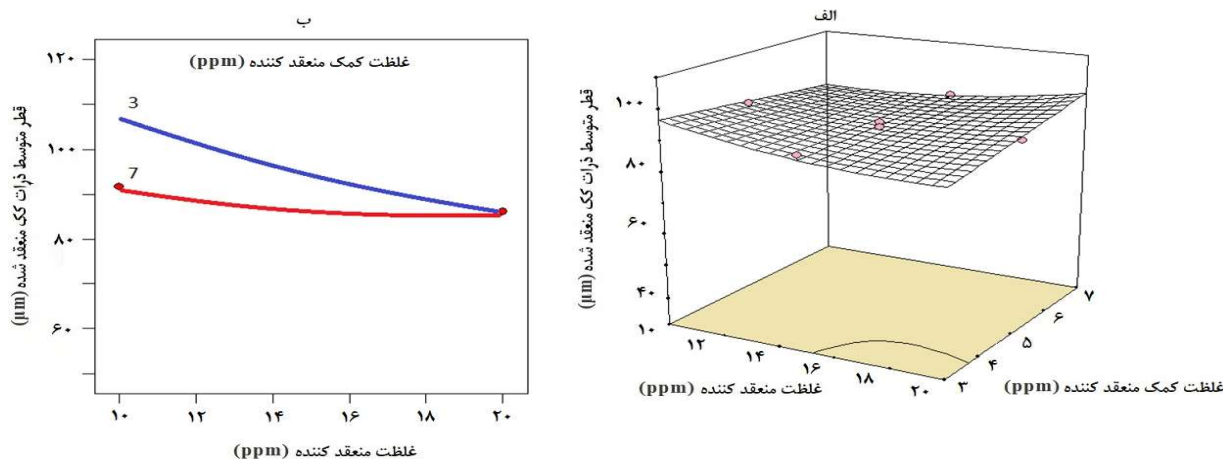
نمودارهای سه بعدی و دو بعدی اثر همزمان دو متغیر غلظت منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده بر قطر ذره‌ها منعقد شده در شکل ۱۱ رسم شده‌اند. بر اساس نتیجه‌ها نشان داده شده در این شکل، با افزایش غلظت منعقدکننده در بازه ۱۰-۲۰ ppm قطر ذره‌ها منعقد شده کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش غلظت کمک منعقدکننده در بازه ۳-۷ ppm نیز قطر ذره‌ها منعقد شده کاهش می‌یابد؛ اما شدت این روند کاهشی بر اساس شکل ۱۱-ب در غلظت‌های کمتر منعقدکننده (حدود ۱۰ ppm) بیش‌ترین مقدار و در

عبدالعزیز^۱ و همکاران تأثیر سه منعقدکننده FeSO₄، FeCl₃ و Al₂(SO₄)₃ بر بازدهی فرایند انعقادسازی ذره‌های معلق، رنگ و اکسیژن‌خواهی شیمیایی شیرابه محل دفن زباله‌های شهری را بررسی نمودند و نتیجه‌ها نشان داد که منعقدکننده FeCl₃ نسبت به دو منعقدکننده دیگر از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است. همچنین در حضور منعقدکننده Al₂(SO₄)₃ ضعیف‌ترین نتیجه‌ها به دست آمد اما در دلایل و توجیه برتری FeCl₃ نسبت به دو منعقدکننده دیگر ارایه نشد [۲۸].

با تلفیق دو تئوری گوی-چاپمن و پویسون-بولتزمن^۲ می‌توان تأثیر رتبه‌بندی سه منعقدکننده FeCl₃ < FeSO₄ < Al₂(SO₄)₃ بر افزایش قطر ذره‌های کک منعقد شده را توضیح داد. برتری عملکرد منعقدکننده FeCl₃ نسبت به عملکرد منعقدکننده FeSO₄ به دلیل اختلاف بار سطحی Fe(III) در مقایسه با Fe(II) و تأثیر آن بر چگالی بار لایه استرن است. با افزایش چگالی بار مثبت در لایه استرن، نیروی جذب زنجیره‌های کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید با بار الکتریکی مخالف (منفی) افزایش یافته و ضمن بهبود بازدهی فرایند انعقادسازی، قطر ذره‌های منعقد شده افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با انحلال منعقدکننده Al₂(SO₄)₃ در بازه pH=۶-۷، بخش چشمگیری از غلظت یون‌های آلومینیوم به گونه‌های مونومری و رسوب‌های معلق هیدروکسیدی تبدیل می‌شود. بنابراین غلظت نهایی یون‌های آلومینیوم قابل دسترس برای جذب در لایه استرن بسیار کمتر از یون‌های مشابه دو منعقدکننده FeSO₄ و FeCl₃ است. شکل ۱۰ هیدرولیز Al₂(SO₄)₃ به طیف وسیعی از گونه‌های مونومری و رسوب‌های معلق هیدروکسیدی در محلول‌های آبی را نشان می‌دهد [۳۹].

(۱) Abdul Aziz

(۲) Poisson-Boltzmann theory



شکل ۱۱ - نمودارهای (الف) سه بعدی و (ب) دو بعدی اثر همزمان دو متغیر غلظت منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده کک.

نوع منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده رسم شده‌اند. در غلظت‌های پایین کمک منعقدکننده (۳ ppm) از بین منعقدکننده‌های بررسی شده، منعقدکننده FeCl_3 تاثیر بیشتری بر افزایش قطر ذره‌های منعقد شده کک دارد. اما این تاثیر با افزایش غلظت کمک منعقدکننده معکوس می‌شود؛ به گونه‌ای که بر اساس شکل ۱۲-ب در غلظت ۷ ppm $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ کمک منعقدکننده، تاثیر $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ بر بازدهی فرایند انعقادسازی اندکی بیش از تاثیر FeCl_3 خواهد بود.

بنابراین در غلظت‌های پایین کمک منعقدکننده (۳ ppm) رتبه‌بندی $\text{FeCl}_3 < \text{FeSO}_4 < \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ و در غلظت‌های بالای کمک منعقدکننده (۷ ppm) رتبه‌بندی $\text{FeCl}_3 > \text{FeSO}_4 > \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ برقرار است. با افزایش غلظت کمک منعقدکننده پلی‌اکریل آمید آنیونی از ۳ ppm به ۷ ppm تاثیر عامل محدودکننده غلظت منعقدکننده $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (شامل تشکیل گونه‌های مونومری و رسوب‌های معلق هیدروکسیدی) جبران می‌شود و در این شرایط برتری یون‌های $\text{Al}(\text{III})$ به $\text{Fe}(\text{III})$ برای فرایند انعقادسازی ذره‌های کک نمایان می‌شود.

پس از تعیین پارامترهای موثر بر فرایند انعقادسازی و ارایه مدل فرایند انعقاد/لخته‌سازی، برای دست‌یابی به شرایط تشکیل بیش‌ترین قطر ذره‌ها، مقدارهای بهینه پارامترهای انتخابی با روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی تعیین شدند و نتیجه‌ها نشان داد که در شرایط بهینه فرایند انعقاد/لخته‌سازی ($\text{pH}=6$)، منعقدکننده FeCl_3 با غلظت حدود ۸ ppm و کمک منعقدکننده آنیونی با غلظت حدود ۲ ppm نسبت فراوانی ذره‌های بزرگ‌تر از $21 \mu\text{m}$ در حدود ۹۶٪ خواهد بود.

غلظت‌های بالای منعقدکننده (حدود ۲۰ ppm) کم‌ترین مقدار است. ارسوی^۱ و همکاران [۳۰] تاثیر تزریق منعقدکننده‌های FeCl_3 و $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ به همراه کمک‌منعقدکننده پلی‌اکریل آمید آنیونی برای انعقادسازی پساب یک واحد صنعتی تولیدات سنگی را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه‌ها نشان داد که با تزریق همزمان یکی از منعقدکننده‌ها با کمک‌منعقدکننده بازدهی فرایند انعقادسازی افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش نسبت غلظت منعقدکننده به غلظت کمک منعقدکننده، بازدهی سامانه کاهش یافته و شاخص کدورت افزایش می‌یابد. به منظور توجیه تاثیر متقابل غلظت منعقدکننده و کمک منعقدکننده، بر اساس یافته‌های گرگوری [۳۱] سهم دو مکانسیم خنثی‌سازی بار^۲ و انعقاد روبشی^۳ در فرایند انعقادسازی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در غلظت‌های پایین منعقدکننده، فرایند انعقادسازی از روش سازوکار خنثی‌سازی بار و در غلظت‌های بالای منعقدکننده، فرایند انعقادسازی از روش سازوکار انعقاد روبشی انجام می‌شود. براین اساس، تاثیر متقابل غلظت دو افزودنی منعقدکننده و کمک منعقدکننده از روش نوع سازوکارهای غالب و مغلوب در فرایند انعقادسازی است. افزایش غلظت یکی از دو افزودنی باعث تقویت یکی از سازوکارها شده و به طور متقابل با افزایش غلظت افزودنی دیگر، سازوکار دیگری در فرایند انعقادسازی تقویت می‌شود.

تاثیر همزمان دو متغیر نوع منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده

در شکل ۱۲ نمودارهای سه بعدی و دو بعدی اثر همزمان دو متغیر

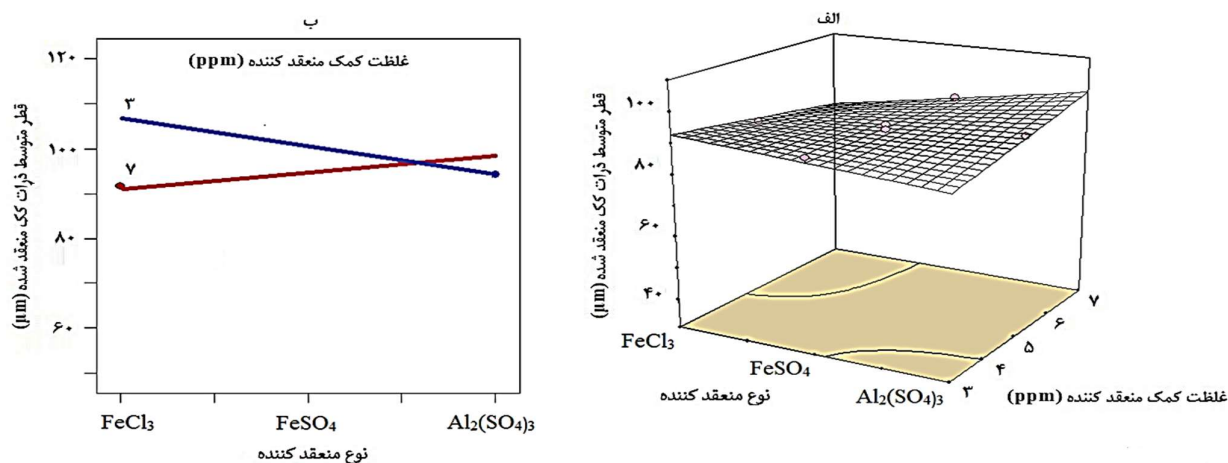
(۱) Ersoy

(۳) Sweep coagulation

(۲) Charge neutralization

جدول ۶ - ضریب‌های Cu و Cc توده‌های منعقد شده کک در آزمایش‌های طراحی شده سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی

شماره آزمایش	Cu	Cc	شماره آزمایش	Cu	Cc	شماره آزمایش	Cu	Cc
۱	۸/۷	۴/۶	۸	۲/۶	۱/۱	۱۵	۵/۵	۳/۵
۲	۶/۸	۱/۰	۹	۴/۴	۱/۸	۱۶	۴۰/۰	۰/۲
۳	۵/۵	۲/۲	۱۰	۳۶/۸	۰/۶	۱۷	۵/۲	۳/۵
۴	۵/۴	۳/۳	۱۱	۳/۹	۱/۴	۱۸	۴۰/۰	۰/۲
۵	۳۱/۳	۰/۴	۱۲	۸/۴	۵/۱	۱۹	۳/۴	۱/۰
۶	۵/۰	۲/۶	۱۳	۵/۱	۳/۱			
۷	۱۴/۵	۱/۳	۱۴	۴/۳	۲/۸			



شکل ۱۲ - نمودارهای (الف) سه بعدی و (ب) دو بعدی اثر همزمان دو متغیر نوع منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده بر قطر ذره‌های منعقد شده کک

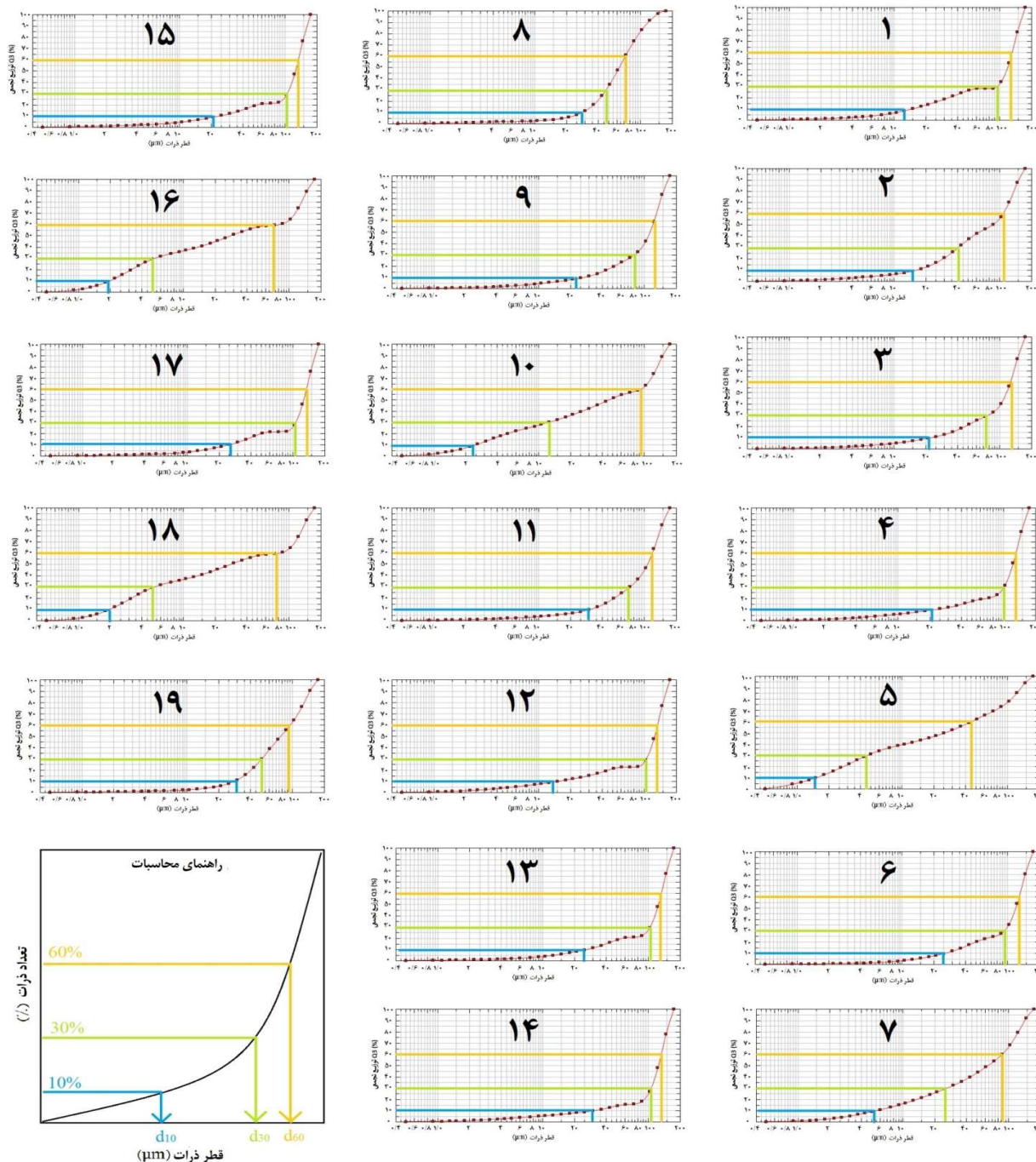
مقدار Cc آن‌ها در حالت میانگین بوده در حالی که کم‌ترین مقدار Cu برای آن‌ها محاسبه شده است. سرانجام ذره‌های منعقد شده با کم‌ترین مقدار Cc و بیش‌ترین مقدار Cu در گروه ج شامل ۴ مورد مشخص شده‌اند. همچنین شرایط مرکزی روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی که شامل سه آزمون با شرایط یکسان است در کادر مشخص شده‌ای که در گروه ب قرار گرفته است نشان داده شده و بیانگر دقت روش یا تکرارپذیری نتیجه‌ها است.

بر اساس شکل ۱۴، آزمایش‌های انعقادسازی شماره ۱ و ۱۲ در شرایطی انجام شدند که پایداری مکانیکی توده‌های منعقد شده به دست آمده در گروه الف قرار می‌گیرند. از طرف دیگر آزمایش‌های شماره ۵، ۱۱، ۱۷ و ۱۹ نشان‌دهنده شرایط تشکیل توده‌هایی هستند که در گروه ج قرار دارند. سایر آزمایش‌ها که شامل ۳ آزمایش تکراری در شرایط یکسان (بر اساس الگوی پیش‌فرض روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی) و ۱۰ آزمایش در شرایط دیگر هستند نیز در گروه ب قرار دارند. با در نظر گرفتن مفاهیم ارائه شده در شکل ۱ و تطبیق نتیجه‌های

بررسی تأثیر تراکم ساختاری ذره‌ها منعقد شده در فرایند جداسازی

برای تعیین میزان تراکم ساختاری ذره‌های منعقد شده در این آزمایش‌ها لازم است ضریب‌های Cu و Cc توده‌های فرضی به دست آمده از ذره‌های منعقد شده محاسبه گردند که این محاسبه‌ها برای آزمایش‌های ۱۹ گانه فوق بر اساس شکل ۱۳ انجام شده و نتیجه‌های آن در جدول ۶ نشان داده شده است.

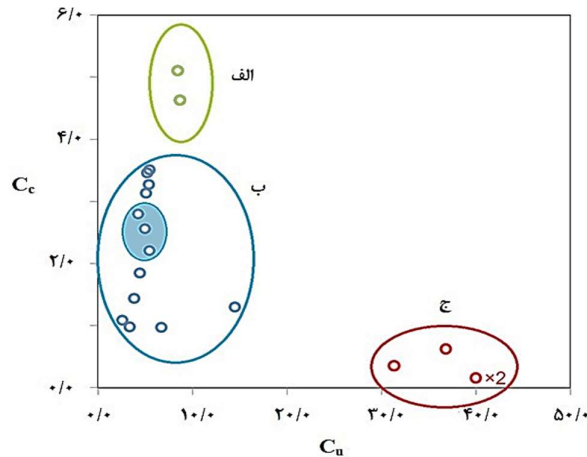
با رسم نمودار $Cc=f(Cu)$ برای نتیجه‌های آزمایش‌های فوق می‌توان شرایط فرایندهای انعقادسازی را از دیدگاه پایداری توده‌های به دست آمده از انباشتگی ذره‌های منعقد شده بررسی نمود. همان‌گونه که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، ذره‌های منعقد شده کک در سه گروه الف، ب و ج تقسیم‌بندی شده‌اند که نشان دهنده سه سطح پایداری مکانیکی توده‌های به دست آمده از انباشتگی آن‌ها بر روی فیلتر یا در کف ستلر می‌باشد. ذره‌های طبقه‌بندی شده (۲ مورد) در گروه الف دارای بیش‌ترین مقدار Cc بوده و مقدار Cu آن‌ها در شرایط میانگین محاسبه شده است. در بیش‌تر آزمایش‌ها (۱۳ مورد) ذره‌های تشکیل شده‌اند که در گروه ب قرار گرفته و



شکل ۱۳ - نمودار توزیع قطر ذره‌های منعقد شده کک در هریک از آزمایش‌ها طراحی شده به روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی. ضریب‌های Cu و Cc توده‌های منعقد شده کک در هر یک از آزمایش‌ها بر اساس الگوی D₁₀، D₃₀ و D₆₀ نشان داده شده در بخش راهنما محاسبه شده است.

تعیین شده در آزمایش‌های شماره ۱ و ۱۲ تأثیرگذار خواهند بود. از طرف دیگر مناسب‌ترین شرایط جداسازی ذره‌ها منعقد شده به روش ثقی در آزمایش‌های شماره ۵، ۱۱، ۱۷ و ۱۹ اعمال شده است.

شکل ۱۴ با آن، شرایط انعقادسازی مطلوب‌تر برای جداسازی ثقی و تصفیه ذره‌ها منعقد شده تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای بهبود بازدهی تصفیه پس از انعقادسازی، شرایط



شکل ۱۴ - طبقه‌بندی آزمون‌های انعقادسازی بر اساس پایداری مکانیکی توده‌های منعقد شده کک، (الف) ذره‌های منعقد شده با مقدار C_c بالا و مقدار C_u متوسط، (ب) ذره‌های منعقد شده با مقدار C_c متوسط و مقدار C_u پایین و (ج) ذره‌های منعقد شده با مقدار C_c پایین و مقدار C_u بالا.

در $pH=7$ و در حضور منعقدکننده کلرید آهن (۳۰ ppm) و هر یک از سه نوع کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید صنعتی با ماهیت آنیونی، کاتیونی و خنثی (۱۰ ppm) انجام شد و نتیجه‌ها نشان داد که با وجود بار الکتریکی منفی در سطح ذره‌های میکرونی کک، کمک منعقدکننده آنیونی نسبت به دو کمک منعقدکننده دیگر بازدهی بالاتری (۹۶٪) در سامانه انعقادسازی دارد. الگوی چیدمان آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۰.۰.۰۶ نشان داد که بیش‌ترین ذره‌های قابل ته‌نشینی با بازدهی ۹۶٪ در حضور منعقدکننده $FeCl_3$ (۸ ppm)، کمک منعقدکننده پلی‌اکریل‌امید آنیونی (۲ ppm) و محیط تقریباً خنثی ($pH=6$) تشکیل می‌شوند. همچنین بر اساس نمودارهای توزیع قطر ذره‌های منعقد شده کک، ضریب‌های یکنواختی و خمیدگی این ذره‌ها محاسبه شد و نتیجه‌ها نشان داد که $FeSO_4$ مناسب‌ترین منعقدکننده برای افزایش بازدهی سامانه جداسازی تصفیه است؛ زیرا با توجه به قطر ذره‌های منعقد شده کک، در کیک رسوب‌های فیلتر بیش‌ترین تخلخل ایجاد می‌شود و در نتیجه زمان عملکرد فیلتر افزایش یافته و قابلیت دریافت حجم بیش‌تری از کیک را خواهد داشت. از طرف دیگر در سامانه جداسازی ثقلی، نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که نوع منعقدکننده تأثیری بر بازدهی سامانه جداسازی ذره‌های کک منعقد شده ندارد؛ زیرا هر یک از منعقدکننده‌های آزمایش شده در شرایط بهینه جداسازی قرار داشتند. علاوه بر این، نتیجه‌های

جدول ۷ - شرایط انعقادسازی ذره‌های میکرونی کک برای جداسازی ثقلی و تصفیه

pH	غلظت (ppm)		نوع منعقدکننده	روش بهینه جداسازی
	کمک منعقدکننده	منعقدکننده		
۵	۷	۲۰	$FeSO_4$	تصفیه
۷	۵	۱۵	$FeSO_4$	
۹	۵	۱۵	$FeCl_3$	جداسازی ثقلی
۷	۵	۱۰	$FeCl_3$	
۵	۷	۱۰	$FeSO_4$	
۷	۵	۱۵	$Al_2(SO_4)_3$	

جدول ۷ شرایط انعقادسازی ذره‌ها میکرونی کک برای افزایش بازدهی جداسازی به روش تصفیه و روش ثقلی را نشان می‌دهد. با توجه به نتیجه‌های جدول ۷، اهمیت انتخاب روش انعقادسازی بر اساس تجهیزات صنعتی قابل دسترس مورد تأکید قرار می‌گیرد. در خصوص انعقادسازی و جداسازی ذره‌های میکرونی کک در واحدهای صنعتی مجهز به سامانه تصفیه و یا فیلترهای شنی، تنها گزینه مورد انتخاب $FeSO_4$ خواهد بود زیرا با توجه به قطر ذره‌های منعقد شده کک، بیش‌ترین تخلخل در کیک رسوب‌های سامانه تصفیه ایجاد شده و در نتیجه زمان عملکرد فیلتر افزایش یافته و قابلیت دریافت حجم بیش‌تری از کیک را خواهد داشت. از طرف دیگر، نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که در سامانه جداسازی ثقلی، نوع منعقدکننده تأثیری بر بازدهی سامانه جداسازی ذره‌های کک منعقد شده ندارد؛ زیرا هر یک از منعقدکننده‌های آزمایش شده در شرایط بهینه جداسازی قرار دارند و در صورت نصب تجهیزات جداسازی ثقلی در واحد صنعتی، با رعایت بازه بهینه غلظت منعقدکننده، کمک منعقدکننده و درجه pH می‌توان از هر یک از منعقدکننده‌های فوق استفاده نمود. علاوه بر این، نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که در سامانه‌های تصفیه نسبت بهینه غلظت منعقدکننده به غلظت کمک منعقدکننده برابر ۳ بوده؛ درحالی‌که این نسبت در جداسازی ثقلی در بازه ۳-۱/۵ قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان داد که بار الکتریکی منفی در سطح ذره‌های معلق کک در محیط آبی قادر به جذب منعقدکننده‌های کاتیونی و کمک منعقدکننده‌های آنیونی بوده و ذره‌های کک معلق در آب منعقد می‌گردند. ابتدا فرایند انعقادسازی

آزمایش‌ها نشان داد که در سامانه‌های تصفیه نسبت بهینه غلظت منعقدکننده به غلظت کمک منعقدکننده برابر ۳ بوده؛ درحالی‌که این نسبت در جداسازی ثقی در بازه ۳-۱/۵ قرار می‌گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

مراجع

- [1] Pourabdollah K., [Self-Assembled Monolayers, the Agglomeration Binders of Pyrolytic Coke Fines](#), *Powder Technol.*, **339**: 130–138 (2018).
 - [2] Aladejebi O.A., Monaghan B.J., Reid M.H., Panhuis M., Longbottom R.J., [Metallic Iron Effects on Coke Analog Carbon Bonding and Reactivity](#), *Steel Res. Int.*, **88**: 1700039 (2017).
 - [3] Case P.A., Wheeler M.C., DeSisto W.J., [Effect of Residence Time and Hot Gas Filtration on the Physical and Chemical Properties of Pyrolysis Oil](#), *Energy Fuel*, **28**: 3964–3969 (2014).
 - [4] Weber S., Briens C., Berruti F., Chan E., Gray M., [Stability of Agglomerates Made from Fluid Coke at Ambient Temperature](#), *Powder Technol.*, **209**: 53–64 (2011).
 - [5] Pietsch W., [An Interdisciplinary Approach to Size Enlargement by Agglomeration](#), *Powder Technol.*, **130**: 8–13 (2003).
 - [6] Merzouk B., Gourich B., Madani K., Vial C., Sekki A., [Removal of a Disperse Red Dye from Synthetic Wastewater by Chemical Coagulation and Continuous Electrocoagulation. A Comparative Study](#), *Desalination*, **272**: 246–253 (2011).
 - [7] Sharrer M.J., Rishel K., Summerfelt S., [Evaluation of Geotextile Filtration Applying Coagulant and Flocculant Amendments for Aquaculture Biosolids Dewatering and Phosphorus Removal](#), *Aquacul. Eng.*, **40**: 1–10 (2009).
 - [8] Simate G.S., Iyuke S.E., Ndlovu S., Heydenrych M., [The Heterogeneous Coagulation and Flocculation of Brewery Wastewater using Carbon Nanotubes](#), *Water Res.*, **46**: 1185–1197 (2012).
 - [9] Duran A., Monteagudo J.M., Sanmartin I., Garcia-Pena F., Coca P., [Treatment of IGCC Power Station Effluents by Physico-Chemical and Advanced Oxidation Processes](#), *J. Env. Manag.*, **90**: 1370–1376 (2009).
- [۱۰] حسوندا، هاشم‌آبادی س.ح.، شبیه‌سازی CFD انتقال نیوماتیک ذره‌های پرپلیمر و محاسبه سرعت ته‌نشینی آن‌ها، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۱) ۳۰: ۳۳ تا ۵۲ (۱۳۹۰).
- [11] Teh C.Y., Budiman P.M., Shak K.P.Y., Wu T.Y., [Recent Advancement of Coagulation–Flocculation and its Application in Wastewater Treatment](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **55**: 4363–4389 (2016).
 - [12] Verma A.K., Dash R.R., Bhunia P., [A Review on Chemical Coagulation/Flocculation Technologies for Removal of Colour from Textile Wastewaters](#), *J. Env. Manag.*, **93**: 154–168 (2012).
 - [13] Bazargan J., Eskandari H.R., [Investigating the Influence of Filter Uniformity Coefficient and Effective Pore Size on Critical Hydraulic Gradient and Maximum Erosion of Dispersive and non-Dispersive Samples](#), *J. Water Sci. Res.*, **5**: 13–24 (2013).

- [14] Wang L., Gao Q., Li Z., Wang Y., [Improved Removal of Quinoline from Wastewater using Coke Powder with Inorganic Ions](#), *Processes*, **8**: 156 (2020).
- [15] Yang Z., Zhuoyue M., Zhihua L., Sitong W., [Synthesis and Application of Itaconic Acid Water-Coke Slurry Dispersant](#), *Mater. Sci. Forum.*, **896**: 167–174 (2017).
- [16] He Q., Wang R., Wang W., Xu R., Hu B., [Effect of Particle Size Distribution of Petroleum Coke on the Properties of Petroleum Coke–Oil Slurry](#), *Fuel*, **90**: 2896–2901 (2011).
- [17] Pourabdollah K., [Simultaneous \$\epsilon\$ -Keggin \$Al_{13}\$ Chloride Salt and Anionic Polyacrylamide Coagulation-Flocculation System for Agglomeration of Trimetallic Cr-Ni-Fe Doped Core-Shell Microspheres of Graphitized Coke](#), *Chem. Eng. J.*, **411**: 128583 (2021).
- [18] Kusnin N., Syed M.A., Ahmad S.A., [Toxicity, Pollution and Biodegradation of Acrylamide – A Mini Review](#), *JOBIMB*, **3**: 6–12 (2015).
- [19] Van Dijk-Looijaard A., Van Genderen J., [Levels of Exposure from Drinking Water](#), *Food Chem. Toxicol.*, **38**: 37–42 (2000).
- [20] Ghafaria S., Abdul Aziz H., Hasnain Isac M., Zinatizadeh A.A., [Application of Response Surface Methodology \(RSM\) to Optimize Coagulation–Flocculation Treatment of Leachate using Poly-Aluminum Chloride \(PAC\) and Alum](#), *J. Hazard. Mater.*, **163**: 650–65 (2009).
- [21] Godymchuk A., Papina I., Karepina E., Kuznetsov D., Lapin I., Svetlichnyi V., [Agglomeration of Iron Oxide Nanoparticles: pH Effect is Stronger than Amino Acid Acidity](#), *J. Nanopart. Res.*, **21**: 208 (2019).
- [22] Al-Gebory L., PinarMengüç M., [The effect of pH on particle agglomeration and optical properties of nanoparticle suspensions](#), *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, **219**: 46–60 (2018).
- [23] Saritha V., Srinivas N., Srikanth Vuppala N.V., [Analysis and Optimization of Coagulation and Flocculation Process](#), *Appl. Water Sci.*, **7**: 451–460 (2017).
- [24] Yukselen M.A., Gregory J., [The Effect of Rapid Mixing on the Break-Up and Re-Formation of Flocs](#), *J. Chem. Technol. Biot.*, **79**: 782–788 (2004).
- [25] Hurst M., Weber-Shirk M., Lion L.W., [Influence of Alum Coagulant dose and Influent Turbidity on Floc Blanket Growth Rate, Steady-State Suspended Solids Concentration, and Turbidity Removal](#), *J. Environ. Eng.*, **143**: 04016081 (2017).
- [26] Ojo P., Ifeiebuegu A.O., [The Impact of Aluminium Salt dosing for Chemical Phosphorus Removal on the Settleability of Activated Sludge](#), *Environments*, **5**: 88 (2018).
- [27] Priyatharishini M., Mokhtar N.M., [Study on the Zeta Potential Effect of *Artocarpus Heterophyllus* Natural-based Coagulant in Wastewater Treatment](#), *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, **991**: 012094 (2020).
- [28] Abdul Aziz H., Alias S., Assari F., Nordin Adlan M., [The use of Alum, Ferric Chloride and Ferrous Sulphate as Coagulants in Removing Suspended Solids, colour and COD from Semi-Aerobic Landfill Leachate at Controlled pH](#), *Waste Manag Res.*, **25**: 556–565 (2007).
- [29] Bensadok K., Benammar S., Lapique F., Nezzal G., [Electrocoagulation of Cutting Oil Emulsions using Aluminium Plate Electrodes](#), *J. Hazard. Mater.*, **152**: 423–430 (2008).

- [30] Ersoy B., Tosun I., Günay A., Dikmen S., [Turbidity Removal from Wastewaters of Natural Stone Processing by Coagulation/Flocculation Methods](#), *Clean*, **37**: 225–232 (2009).
- [31] Gregory J., O'Melia C.R., [Fundamentals of flocculation](#), *Crit. Rev. Environ. Contr.*, **19**: 185–230 (1989).