





دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست

بررسی رشد و ساختار فلاک‌های حاصل از انعقاد شیمیایی با تکنیک پردازش
تصویر

نگارنده: عاطفه هوه‌جی

اساتید راهنما:

دکتر بهناز دهرآزما

دکتر سید فضل‌الله ساغروانی

استاد مشاور:

دکتر علیرضا احمدی‌فرد

دی ماه ۱۳۹۶

شماره: ۹۲۳۷
تاریخ: ۲۴/۱۰/۹۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم عاطفه هوه جی با شماره دانشجویی ۹۴۱۹۰۰۴ رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی محیط زیست تحت عنوان بررسی رشد و ساختار فلاک های حاصل از انعقاد شیمیایی با تکنیک پردازش تصویر که در تاریخ ۹۶/۱۰/۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ...): مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر بهناز دهر آرما	۱- استاد راهنمای اول
	دانشیار	دکتر سید فضل الله ساغروی	۲- استاد راهنمای دوم
	دانشیار	دکتر علیرضا احمدی فرد	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مهدی گلی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سعید گلپیان	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر سعید فراه چلو	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده مهندسی عمران
تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز) مجاز است تا در جلسه دفاع مجدد شرکت نماید.
محدد نباد زودتر از ۴ ماه برگزار شود.

تقدیم نامہ

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

نظر به اینکه قدردانی زحمت خیرخواهان و نیکوکاران امری ضروری است و برگشت آن به شکر خداوند متعال می‌باشد، لذا لازم دانسته از راهنمایی‌های اساتید گرامی، سرکار خانم دکتر بهناز دهرآزما و جناب آقای دکتر سید فضل‌الله ساغروانی و مشاوره‌های راه‌گشای جناب آقای دکتر علیرضا احمدی‌فرد کمال تشکر را داشته باشم. ادای پاداش همه‌ی این بزرگواران را به خداوند جلیل، واگذار می‌کنم.

تعهدنامه

اینجانب عاطفه هوه‌جی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه "بررسی رشد و ساختار فلاک های حاصل از انعقاد شیمیایی با تکنیک پردازش تصویر" تحت راهنمایی "دکتر بهنار دهرآزما" و "دکتر سید فضل‌الله ساغروانی" متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام گردیده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت گردیده است.

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

از جمله مشکلات عمده در تصفیه پساب سنگ‌بری کدورت بالای آن است. تحقیق حاضر با هدف استفاده از منعقدکننده‌ی آلوم^۱ و پک^۲، جهت حذف کدورت از پساب حاصل از برش سنگ تراورتن و بررسی خواص فلاک‌های تشکیل شده شامل (قطر متوسط، بعد فراکتال و نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها) در فرآیند انعقاد به وسیله پردازش تصویر انجام گرفت. فرآیند ته‌نشینی فلاک‌ها طی ۳۰ دقیقه با فاصله زمانی ۳ ثانیه تصویربرداری و توسط نرم‌افزار MATLAB پردازش شد. فرآیند انعقاد برای غلظت‌های مختلف منعقدکننده‌های مورد استفاده بهینه‌سازی و کینتیک فرآیند ته‌نشینی بررسی گردید. همچنین تغییرات پارامترهای pH، EC و TDS در حین فرآیند انعقاد مورد مطالعه قرار گرفت. حداکثر درصد حذف کدورت در غلظت بهینه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر برای منعقدکننده‌های آلوم و پک ۹۹٪ بدست آمد. فرآیند انعقاد باعث کاهش pH و افزایش EC و TDS در پساب گردید. همچنین مطالعات کینتیک واکنش نشان داد، که در پنج دقیقه ابتدایی پس از شروع ته‌نشینی، فرآیند کاهش کدورت با سرعت بالایی (۹۳٪-۹۰٪ حذف کدورت) رخ می‌دهد. کینتیک ته‌نشینی فلاک‌ها در فرآیند انعقاد برای هر دو منعقدکننده از مرتبه‌ی دوم بود. بررسی خواص فلاک‌ها با پردازش تصویر، نشان داد که متوسط اندازه فلاک‌های پک در شروع ته‌نشینی در مقایسه با آلوم بزرگتر و در پایان ته‌نشینی کوچکتر می‌باشد. نتایج نشان داد که بعد فراکتال و سرعت ته‌نشینی فلاک‌های پک نسبت به آلوم، بیشتر می‌باشد که این نشان‌دهنده نزدیکتر بودن شکل فلاک‌های پک به دایره است. همچنین در ته‌نشینی بعد از شکست نیز نسبت به حالت قبل از شکست در هر دو منعقدکننده‌ی آلوم و پک، اندازه فلاک‌ها، نرخ تغییر اندازه و بعد فراکتال کاهش یافت. با توجه به نتایج، در فرآیند انعقاد، منعقدکننده‌ی پک در مقایسه با آلوم کارایی بهتری را در حذف کدورت از پساب سنگ تراورتن نشان داد.

کلمات کلیدی: پساب سنگ‌بری، فرآیند انعقاد، پردازش تصویر، خواص فلاک

¹ Alum (Aluminum Sulfate)

² PAC (Poly Aluminum Chloride)

لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه

- ۱- هوه‌جی ع، دهرآزما ب و ساغروانی س ف، (۱۳۹۶)، " تأثیر پلی‌آلومینیوم کلراید بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی و کینتیک فرآیند انعقاد در تصفیه پساب فرآوری سنگ تراورتن"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، ۲ و ۳ خرداد ماه، دانشگاه تهران، تهران.
- ۲- هوه‌جی ع، دهرآزما ب، ساغروانی س ف و احمدی فرد ع، (۱۳۹۶)، " تأثیر دوز منعقدکننده سولفات‌آلومینیوم بر کدورت، pH، EC و کینتیک فرآیند انعقاد در تصفیه پساب فرآوری سنگ تراورتن"، شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۵ و ۱۶ شهریور، اردبیل.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	بیان مسأله و ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱	اهداف تحقیق	۳
۴-۱	مراحل انجام تحقیق	۴
۵-۱	ساختار پایان نامه	۴

فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲	مقدمه	۶
۲-۲	کدورت	۶
۱-۲-۲	ذرات کلوئیدی	۷
۲-۲-۲	کدورت ناشی از پساب سنگی	۱۲
۳-۲	فرآیند انعقاد و مکانیسم آن	۱۲
۱-۳-۲	منعقدکننده شیمیایی	۱۶
۲-۳-۲	انعقاد و حذف کدورت از پساب فرآوری سنگ	۱۷
۴-۲	پردازش تصویر	۱۹
۱-۴-۲	برنامه‌نویسی به زبان MATLAB و پردازش تصویر	۱۹
۲-۴-۲	پردازش تصویر و تفسیر فرآیند انعقاد	۲۰
۵-۲	کینتیک ته‌نشینی فلاک‌ها	۲۲

فصل سوم مواد و روش‌ها

۱-۳	مقدمه	۲۶
۲-۳	مواد مورد استفاده	۲۶

۳-۳	روش‌های مورد استفاده	۲۶
۳-۳-۱	آماده‌سازی پودر سنگ و بررسی مشخصات آن	۲۶
۳-۳-۲	روش انجام فرآیند انعقاد	۲۷
۳-۳-۳	روش استفاده از پردازش تصویر جهت بررسی خصوصیات فلاک‌ها در فرآیند انعقاد	۲۹

فصل چهارم: نتایج و بحث

۱-۴	مقدمه	۴۲
۲-۴	خصوصیات سنگ تراورتن مورد استفاده	۴۲
۳-۴	تأثیر غلظت منعقدکننده بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی پساب	۴۳
۱-۳-۴	درصد حذف کدورت از پساب سنگ	۴۳
۲-۳-۴	pH پساب سنگ	۴۶
۳-۳-۴	EC و TDS پساب سنگ	۴۷
۴-۴	بررسی کینتیک ته‌نشینی فلاک‌ها در فرآیند انعقاد	۴۹
۵-۴	بررسی خصوصیت فلاک‌ها و پردازش تصویر	۵۴
۱-۵-۴	تصویر فلاک‌های ایجاد شده در فرآیند انعقاد در زمان ته‌نشینی	۵۴
۲-۵-۴	قطر متوسط فلاک‌ها	۶۰
۳-۵-۴	تغییرات بعد فراکتال	۶۶
۴-۵-۴	نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها	۶۸

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵	مقدمه	۷۲
۲-۵	جمع بندی نتایج حذف کدورت توسط فرآیند انعقاد	۷۲
۱-۲-۵	بهینه‌سازی غلظت منعقدکننده	۷۲
۲-۲-۵	تأثیر منعقدکننده بر خواص فیزیکوشیمیایی و کینتیک فرآیند انعقاد	۷۲
۳-۵	جمع‌بندی نتایج پردازش تصویر و فرآیند انعقاد	۷۳

- ۷۳ ۱-۳-۵ قطر متوسط فلاک‌ها
- ۷۳ ۲-۳-۵ بعد فراکتال فلاک‌ها
- ۷۴ ۳-۳-۵ نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها
- ۷۴ ۴-۵ پیشنهادها برای مطالعات آتی
- ۷۵ مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: لایه‌ی دوگانه در اطراف یک ذره کلئیدی (Wang et al, 2005) ۱۱
- شکل ۲-۲: ذره کلئید منفی با میدان الکترواستاتیک پیرامونی (Reynolds and Richards, 1996) ۱۴
- شکل ۱-۳: دستگاه جارتست مورد استفاده در این تحقیق ۲۸
- شکل ۲-۳: تصویر پایلوت ساخته شده جهت عکس‌برداری در تحقیق حاضر ۳۰
- شکل ۳-۳: پایلوت در هنگام عکس‌برداری با اتاق تاریک و دوربین ۳۲
- شکل ۴-۳: فلوجارت استفاده شده ۳۴
- شکل ۵-۳: تصویر اولیه (خاکستری) ۳۵
- شکل ۶-۳: تصویر فلاک‌ها (تصویر حاصل از تفاضل تصویر ورودی و پس زمینه) ۳۶
- شکل ۷-۳: تصویر فلاک‌ها پس از اعمال آستانه روشنایی‌های مختلف (الف: ۱۰۰ ب: ۲۰۰ ج: ۳۰۰) ۳۶
- شکل ۱-۴: نتایج XRD سنگ تراورتن مورد استفاده ۴۳
- شکل ۲-۴: تأثیر غلظت منعقدکننده بر کدورت نهایی پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۴۵
- شکل ۳-۴: تأثیر غلظت منعقدکننده بر درصد حذف کدورت از پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۴۵
- شکل ۴-۴: تأثیر غلظت منعقدکننده بر pH پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۴۷
- شکل ۵-۴: تأثیر غلظت منعقدکننده بر هدایت الکتریکی پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU و EC اولیه = ۹۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$) ۴۸
- شکل ۶-۴: تأثیر غلظت منعقدکننده بر TDS پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU و TDS اولیه = ۶۰ mg/L) ۴۹
- شکل ۷-۴: کینتیک حذف کدورت پساب در غلظت‌های مختلف از منعقدکننده پک (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۵۰

شکل ۴-۸: کینتیک حذف کدورت پساب در غلظت‌های مختلف از منعقدکننده آلوم (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۵۱

شکل ۴-۹: نمودار کینتیک مرتبه اول برای منعقدکننده پک در غلظت‌های مختلف ۵۱

شکل ۴-۱۰: نمودار کینتیک مرتبه اول برای منعقدکننده آلوم در غلظت‌های مختلف ۵۲

شکل ۴-۱۱: نمودار کینتیک مرتبه دوم برای منعقدکننده پک در غلظت‌های مختلف ۵۲

شکل ۴-۱۲: نمودار کینتیک مرتبه دوم برای منعقدکننده آلوم در غلظت‌های مختلف ۵۳

شکل ۴-۱۳: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده قبل از شکست با استفاده از منعقدکننده پک در زمان‌های مختلف ته‌نشینی، الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ذ: دقیقه‌ی ۲۰، ر: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۵۶

شکل ۴-۱۴: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده بعد از شکست با استفاده از منعقدکننده پک در زمان‌های مختلف ته‌نشینی، الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ذ: دقیقه‌ی ۲۰، ر: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۵۷

شکل ۴-۱۵: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده قبل از شکست با استفاده از منعقدکننده آلوم در زمان‌های مختلف ته‌نشینی، الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ذ: دقیقه‌ی ۲۰، ر: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۵۸

شکل ۴-۱۶: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده بعد از شکست با استفاده از منعقدکننده آلوم در زمان‌های مختلف ته‌نشینی، الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ذ: دقیقه‌ی ۲۰، ر: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۵۹

شکل ۴-۱۷: تغییرات قطر متوسط فلاک نسبت به زمان برای منعقدکننده‌ی آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۶۰

شکل ۴-۱۸: تغییرات قطر متوسط فلاک نسبت به زمان برای منعقدکننده‌ی آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۶۱

شکل ۴-۱۹: فراوانی قطر متوسط فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در تمام زمان ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۶۱

شکل ۴-۲۰: فراوانی قطر متوسط فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در تمام زمان ته‌نشینی بعد از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۶۲

شکل ۴-۲۱: تغییرات بعد فراکتال فلاک‌ها نسبت به زمان برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)..... ۶۷

شکل ۴-۲۲: تغییرات بعد فراکتال فلاک‌ها نسبت به زمان برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته نشینی بعد از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)..... ۶۸

شکل ۴-۲۳: نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)..... ۶۹

شکل ۴-۲۴: نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی بعد از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)..... ۷۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱: نتایج XRF سنگ تراورتن مورد استفاده (/). ۴۲.....
- جدول ۴-۲: پارامترهای اولیه پساب فرآوری سنگ تراورتن ۴۳.....
- جدول ۴-۳: ثابت‌های کینتیک محاسبه‌شده برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در غلظت‌های مختلف ۵۳.....
- جدول ۴-۴: کدورت و قطر متوسط فلاک‌های حاصل از استفاده از آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۶۲.....
- جدول ۴-۵: توزیع قطر متوسط فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی قبل و پس از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU) ۶۳.....
- جدول ۵-۱: نتایج کلی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق ۷۳.....

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

رشد جمعیت، بهبود سطح زندگی و توسعه شهرنشینی و صنایع از جمله عواملی هستند که باعث افزایش مصرف آب و آلودگی محیط‌زیست می‌شوند (پری‌زنگنه و همکاران، ۱۳۸۳). در حال حاضر وضعیت منابع آب در سطح جهان مساعد نبوده و حفظ و حراست از آن‌ها برای نسل‌های آینده ضرورت دارد. افزایش مصرف آب و ورود مواد آلاینده به روش‌های مختلف باعث افزایش آلودگی آب می‌شود. مجمع عمومی سازمان ملل متحد به‌منظور اداره بهتر امور مربوط به آب و حفظ و حراست از آن سال ۲۰۰۳ را سال بین‌المللی آب شیرین اعلام کرد (باقری و بوداقپور، ۱۳۹۰). فراهم کردن آب آشامیدنی سالم برای سلامتی و رفاه جامعه امری ضروری است. مهم‌ترین نگرانی‌ها در خصوص آب آشامیدنی شامل باکتری‌های بیماری‌زا (پاتوژن‌ها)، کمبود و یا غلظت بالای بعضی یون‌ها و ذرات معلق در آب و وجود کدورت بالا می‌باشد. مصرف آب آلوده بر سلامت انسان تاثیر نامطلوبی داشته و در طول تاریخ سبب شیوع بیماری‌های مختلف شده است، بنابراین تمام منابع آبی قبل از مصرف به شکل‌های مختلف بایستی تصفیه شوند. با توجه به ویژگی‌های اولیه آب، روش‌های متعددی برای تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از خصوصیات تصفیه آب سطحی، تنوع فصلی زیاد در کدورت است (باغوند و همکاران، ۱۳۹۰، Saritha et al, 2015). کدورت بالا از جمله مشکلات منابع آبی می‌باشد که عموماً در اثر ورود پساب‌های صنعتی از قبیل صنعت شن‌شویی و صنعت فرآوری سنگ ایجاد می‌گردد. در واقع از جمله مشکلات اصلی در صنعت فرآوری سنگ ایجاد پساب با میزان کدورت بسیار بالا و استفاده از حجم بالای آب است.

جهت حذف کدورت از آب روش‌های متعددی وجود دارد. یکی از تکنیک‌های حذف کدورت استفاده از فرآیند انعقاد است. در این فرآیند ذرات کلوئیدی با استفاده از منعقدکننده‌های مختلف به یکدیگر چسبیده و لخته‌های درشت و قابل‌ته‌نشینی تشکیل می‌دهند (منزوی، ۱۳۸۴).

در مطالعه‌ی حاضر، حذف کدورت از پساب سنگ‌بری تراورتن به وسیله منعقدکننده‌های پلی-آلومینیوم کلراید و سولفات آلومینیوم بهینه‌سازی و رشد و ساختار فلاک‌های تشکیل شده در فرآیند

انعقاد، با استفاده از پردازش تصویر بررسی شده است.

۲-۱ بیان مسأله و ضرورت انجام تحقیق

پساب‌های صنعتی و شهری تاثیرات سویی بر محیط‌زیست دارند. تخیله‌ی پساب صنعت سنگ‌بری بدون تصفیه، به محیط‌زیست خصوصاً منابع آبی می‌تواند مشکلات جدی برای انسان و محیط‌زیست ایجاد کند، لذا تصفیه آن و ایجاد یک پساب خروجی استاندارد امری ضروری است (Mimi et al, 2007, Ammary et al, 2003). از جمله روش‌های متداول جهت تصفیه پساب و کاهش کدورت آن استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی، فرآیندهای انعقاد/لخته‌سازی و فیلتراسیون است (Nourouzi et al, 2010). کارآیی مناسب در فرآیند انعقاد زمانی ممکن است که با استفاده از مقدار ماده منعقدکننده کمتر بتوان لخته‌های درشت‌تری را تشکیل داد (ترابیان و همکاران، ۱۳۸۶).

مصرف متوسط سالیانه آب در صنعت سنگ‌بری کشور فلسطین ۵/۰ میلیون مترمکعب است و یکی از راه‌های کاهش مصرف آب استفاده مجدد از پساب است (Palestinian Water Authority, 1999). با توجه به مصرف حجم زیادی از آب در صنعت سنگ‌بری، تصفیه و استفاده مجدد از آن ضرورت پیدا می‌کند. از جمله ویژگی‌های این پساب حضور یک سوسپانسیون پایدار دارای ذرات ریز است که کدورت را تا حد زیادی بالا می‌برد (Önenc, 2001).

به این دلیل که حذف موثر کدورت از پساب سنگ‌بری تراورتن در شرایط بهینه انجام می‌شود، در این پژوهش ابتدا بهینه‌سازی منعقدکننده‌ها برای حذف کدورت توسط دو ماده منعقدکننده سولفات آلومینیوم و پلی آلومینیوم کلراید انجام گرفت و در ادامه تحقیق با استفاده از تکنیک پردازش تصویر روند تشکیل فلاک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. انتظار می‌رود که بتوان با بررسی فرآیند انعقاد با تکنیک پردازش تصویر، ویژگی‌های فلاک‌های حاصل در فرآیند انعقاد را بیان کرد.

۳-۱ اهداف تحقیق

هدف کلی این تحقیق عبارت است از: بررسی رشد و ساختار فلاک‌های حاصل از انعقاد شیمیایی با

تکنیک پردازش تصویر

در این تحقیق اهداف جزئی زیر دنبال می‌شود:

- ✓ تعیین دوز بهینه منعقدکننده
- ✓ بررسی تاثیر دوز منعقدکننده بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی پساب
- ✓ تعیین کینیتیک واکنش
- ✓ بررسی فرآیند شکست فلاک‌ها پس از ته‌نشینی اولیه
- ✓ عکس‌برداری از ته‌نشینی فلاک‌ها در ته‌نشینی قبل و بعد از شکست
- ✓ بررسی خواص فلاک‌ها در ته‌نشینی قبل و بعد از شکست با استفاده از پردازش تصویر

۴-۱ مراحل انجام تحقیق

مراحل انجام تحقیق به ترتیب زیر بوده است:

۱. مطالعات کتابخانه‌ای برای بررسی پژوهش‌هایی که در این زمینه در سطح منطقه‌ای و جهانی انجام شده است.
۲. انتخاب مواد مناسب برای ایجاد کدورت
۳. انتخاب منعقدکننده‌های مناسب
۴. بهینه‌سازی دوز منعقدکننده برای حذف کدورت
۵. تهیه عکس از ته‌نشینی فلاک‌ها
۶. پردازش تصویر عکس‌های تهیه شده
۷. تجزیه و تحلیل نتیجه‌های حاصل از آزمایش از طریق رسم جداول و نمودار
۸. بحث و بررسی نهایی

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۵ فصل می‌باشد که به ترتیب زیر سازمان‌بندی شده است:

۱- فصل اول: کلیات

در این فصل از پایان‌نامه به بیان محدودیت منابع آب، آلودگی آب و افزایش کدورت ناشی از پساب سنگی، اهداف و ضرورت انجام تحقیق حاضر و ساختار کلی تحقیق اشاره شده است.

۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

در این بخش از تحقیق کدورت ناشی از پساب سنگی، بررسی روش تصفیه پساب با استفاده از فرآیند انعقاد و روش مورد استفاده برای پردازش تصویر فلاک‌های تشکیل‌شده در فرآیند انعقاد بیان گردیده است. در ادامه نیز به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه پردازش تصویر و فرآیند انعقاد پرداخته شده است.

۳- فصل سوم: مواد و روش‌ها

در این فصل مواد و روش‌های مورد استفاده در این تحقیق جهت بهینه‌سازی فرآیند انعقاد، ساخت پایلوت جهت عکس‌برداری، روش عکس‌برداری و روش مورد استفاده جهت پردازش تصویر بیان شده است.

۴- فصل چهارم: نتایج و بحث

در این قسمت از پایان‌نامه، نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها و پردازش تصویر بصورت گراف‌ها و تفسیر آنها ارائه شده است. روند نتایج بدست آمده تحلیل شده و نتایج حاصل از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و پردازش تصویر بیان گردیده است.

۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این بخش از تحقیق حاضر، جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده از کلیه آزمایشات انجام شده به طور خلاصه بیان گردیده است. همچنین پیشنهادات جهت انجام مطالعات آتی ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر صنعت سنگ‌بری در ایران گسترش قابل توجهی پیدا کرده است. ورود پساب صنعت سنگ‌بری به محیط‌زیست باعث آلودگی منابع آب و محیط‌زیست می‌شود. یکی از نیازهای ضروری جامعه تأمین آب آشامیدنی سالم برای حفظ کیفیت محیط‌زیست و توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی است.

برای تصفیه‌ی آب، واحدهای مختلفی در تصفیه‌خانه‌ها طراحی می‌شوند که از مهم‌ترین این واحدها می‌توان به واحدهای آشغال‌گیری، انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی، صافی‌سازی و گندزدایی اشاره کرد (کرد مصطفی پور و همکاران، ۱۳۸۷).

در این فصل ابتدا کدورت (کدورت ایجاد شده به وسیله سنگ تراورتن) و روش‌های اندازه‌گیری آن بیان شده و سپس ذرات کلوئیدی در آب و پایداری آن‌ها بررسی گردیده است. در ادامه فرآیند انعقاد، مکانیسم آن، انواع منعقدکننده‌های شیمیایی و پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با حذف کدورت از آب توضیح داده شده است. در انتها مطالعات انجام‌شده در راستای استفاده از پردازش تصویر در تفسیر فرآیند انعقاد بیان شده است.

۲-۲ کدورت

کدورت یکی از پارامترهای مهم کیفی آب محسوب می‌گردد که باعث پراکندگی یا جذب نور عبوری در یک خط مستقیم توسط ذرات معلق در آب می‌شود. علیرغم اینکه کدورت آب ناشی از وجود مواد معلق در آن است، ولی مرتبط کردن آن با اندازه‌های کمی مواد معلق در آب مانند شکل و اندازه ذرات موجود در محلول که در خاصیت پراکنده ساختن نور دخالت دارند، مشکل است (شریعت پناهی، ۱۳۹۱).

کدورت در آب‌های سطحی ناشی از فرسایش مواد کلوئیدی مانند خاک رس و اکسیدهای فلزی خاک است. تعداد متنوعی از مواد کدورت‌زا در فاضلاب‌های خانگی و صنعتی موجود است. میکروارگانیزم‌ها

و رشته‌های گیاهی نیز باعث افزایش کدورت می‌شوند.

کدورت به روش فتوشیمیایی و با اندازه‌گیری نوری که با یک شدت معین جذب و پراکنده می‌شود، محاسبه می‌شود. کدورت‌سنج جکسون دستگاه اولیه‌ی اندازه‌گیری کدورت بوده است. این دستگاه از یک لوله‌ی بلند و شمع استاندارد تشکیل شده و نحوه‌ی اندازه‌گیری آن بر مبنای جذب نور بوده است. در سال‌های اخیر کدورت‌سنج مجهز به لامپ الکتريکی جایگزین این دستگاه شده است و واحد کدورت فورمازین یا FTU^۱ است. واحد NTU^۲ زمانی به کار می‌رود که آزمایش طبق اصول پراکندگی نور انجام شود. طبق استاندارد EPA برای آب آشامیدنی حداکثر مقدار مجاز کدورت معادل ۱ FTU است (EPA, 2011).

۲-۱-۲ ذرات کلوئیدی

آب‌های طبیعی دارای سه نوع ذره غیرقابل ته‌نشینی هستند که به ترتیب اندازه از بزرگ به کوچک عبارت‌اند از: ذرات معلق، ذرات کلوئیدی و مواد محلول.

- مواد جامد معلق به وسیله جریان طبیعی آب حمل می‌شوند و در آب به صورت معلق وجود دارند.

- کلوئیدها با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند ولی اثرات آن‌ها به صورت رنگ یا کدورت در آب ظاهر می‌شوند. از جمله ذرات کلوئیدی در آب، ذرات ریز مانند گل و لای و میکروب‌ها هستند.

- مواد محلول در آب، مواد آلی یا معدنی مانند، نمک‌ها و گازها هستند که مانند کلوئیدها با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند. این مواد در آب ته‌نشین نمی‌شوند و مشکلاتی مانند رنگ، مزه و بو برای مصرف‌کنندگان ایجاد می‌کنند و با فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی می‌توانند رسوب داده شوند (شریعت پناهی، ۱۳۹۱).

در تصفیه آب و فاضلاب به‌طور عمومی دو نوع سیستم کلوئیدی شامل ذرات معلق کلوئیدی

¹ Formazin Turbidity Unit

² Nephelometric Turbidity Unit

(به‌عنوان مثال ذرات معلق خاک در آب) و امولسیون‌ها (مایع‌های نامحلول به‌عنوان مثال ذرات معلق روغن در آب) وجود دارد، که در هر دو آن‌ها آب به‌عنوان فاز حلال است. خواص یک ماده معلق کلوئیدی به شرح زیر است:

- کلوئیدها نمی‌توانند به وسیله فیلتراسیون از سوسپانسیون حذف شوند، هر چند می‌توانند به وسیله اولترافیلتراسیون و یا تجزیه از طریق غشای تخصصی حذف شوند.

- ذرات کلوئیدی به‌وسیله میکروسکوپ‌های معمولی قابل دیدن نیستند. هرچند وقتی که پرتو نور از سوسپانسیون عبور داده می‌شود، آن‌ها مانند لکه‌هایی از نور دیده می‌شوند. این پدیده اثر تیندال^۱ نامیده می‌شود، که به پراکندگی نور توسط ذرات کلوئیدی توصیف شده است.

- حرکت براونی از ته‌نشینی ذرات جلوگیری می‌کند. بعضی از ذرات کلوئیدی به‌وسیله سانتریفیوژ می‌توانند حذف شوند.

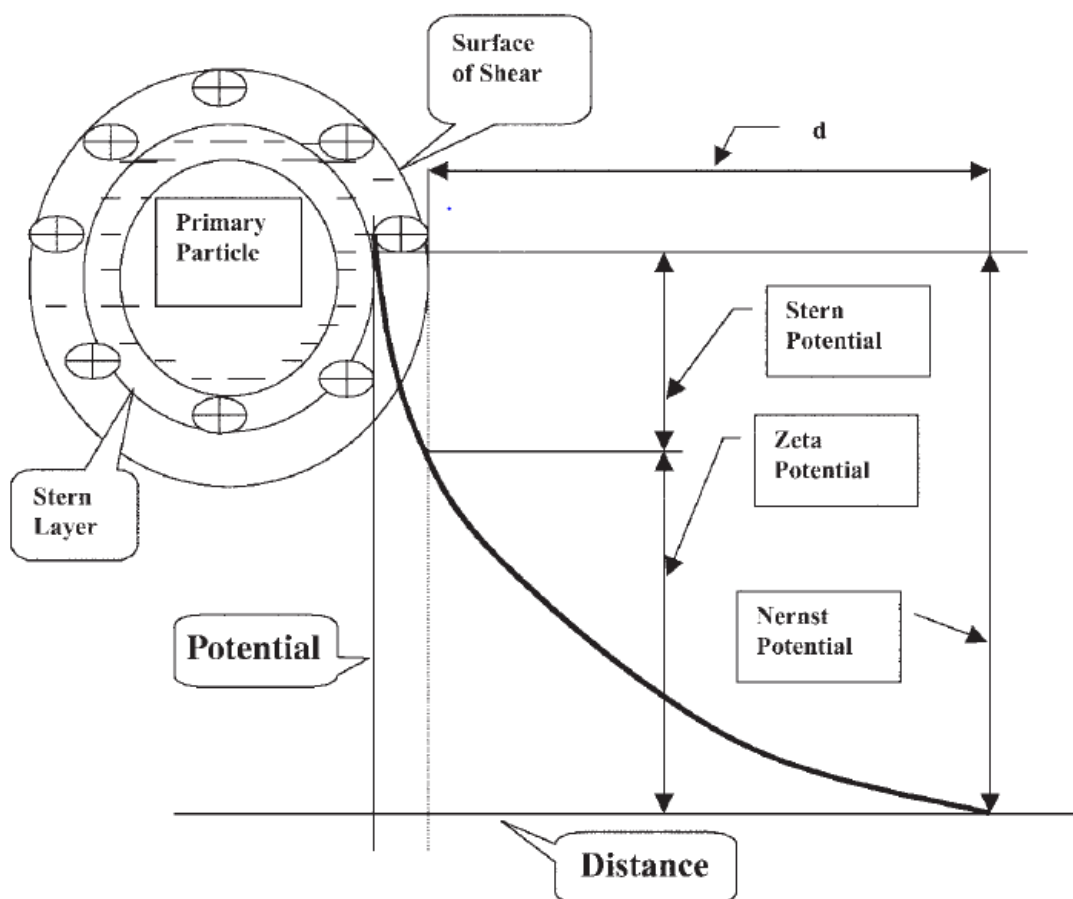
- یک گرایش طبیعی برای کلوئیدها برای انعقاد و ته‌نشینی وجود دارد. گاهی اوقات این گرایش توسط دافعه متقابل ذرات و یا به‌وسیله جاذبه قوی بین ذرات مقابله می‌شود. اگر این نیروهای بین ذرات قوی باشند و انعقاد انجام نشود سوسپانسیون پایدار نامیده می‌شود (Scholz, 2016).

پراکندگی ذرات جامد کلوئیدی در آب در حالت کلی شامل دو نوع کلوئیدهای آب‌گریز و آب‌دوست است. این طبقه‌بندی بر مبنای جاذبه‌ی سطح ذره نسبت به آب است. جاذبه‌ی بین ذرات آب‌گریز و آب کم، ولی بین ذرات آب‌دوست و آن زیاد است. وجود بار سطحی بر روی کلوئید یکی از عوامل مهم در پایداری آن است. روش‌های مختلف به‌وجود آمدن این بار به ترکیب شیمیایی محیط و کلوئید بستگی دارد. برای ته‌نشینی ذرات باید آن‌ها را به ذرات با اندازه‌های بزرگ‌تر و قابل ته‌نشینی تبدیل یا به عبارتی باید آن‌ها را ناپایدار کرد. بار سطحی از طریق جذب سطحی انتخابی و یونش ایجاد می‌شود؛ برای مثال، قطره‌های روغن یا سایر مواد پراکنده در آب از طریق جذب سطحی انتخابی آنیون‌ها بار

¹ Tyndall Effect

منفی پیدا می‌کنند. پروتئین‌ها و میکروارگانیزم‌ها، بار سطحی را از طریق یون‌های هیدروکسیل آمینه کسب می‌کنند.

در زمان باردار شدن سطح کلئید یا ذره، برخی یون‌های با بار مخالف به سطح می‌چسبند. این یون‌ها به دلیل قدرت کافی نیروهای الکترواستاتیکی و واندروالسی، در جای خود باقی می‌مانند تا بر تغییرات گرمایی غالب شوند. دور این لایه‌ی ثابت یونی یک لایه‌ی پخشی یونی وجود دارد که به دلیل تغییرات گرمایی لایه‌ی متراکم دوگانه از آن تشکیل نمی‌شود (شکل ۱-۲). این لایه دوگانه از یک لایه‌ی متراکم (استرن^۱) که در آن کاهش نیروی پتانسیل از ϕ_0 به ϕ_s است و یک لایه‌ی پخشی^۲ که در آن کاهش نیروی پتانسیل از ϕ_s به ۰ است تشکیل می‌شود.



شکل ۱-۲: لایه‌ی دوگانه در اطراف یک ذره کلئیدی (Wang et al, 2005)

¹ Stern Layer

² Diffuse Layer

پتانسیل زتا از طریق اندازه‌گیری پتانسیل در سطح ابر (سطح برش^۱) به دست می‌آید. مقدار اندازه-گیری شده برای پتانسیل زتا کاربرد محدودی دارد زیرا این مقدار نسبت به ماهیت اجزای محلول متغیر بوده و به این دلیل اندازه‌گیری آن قابل تکرار نیست (چبانوگوس، ۱۳۷۴).

۲-۲-۲ کدورت ناشی از پساب سنگی

صنعت فرآوری سنگ‌های طبیعی (مرمر، تراورتن، سنگ آهک و ...) از جمله متداول‌ترین صنایع در بسیاری از نقاط جهان است. کدورت در پساب‌های فرآوری سنگ به‌طور معمول در بازه‌ی NTU ۱۰۰-۱۰۰۰ است (Ersoy et al, 2009, Domopoulou et al, 2015).

مراحل برش، سایش و صیقل دادن سنگ، اصلی‌ترین مراحل این صنعت است. این مراحل توسط دستگاه‌هایی انجام می‌گردد که برای خنک‌سازی تجهیزات و حذف ذرات ریز گرد و غبار، مصرف آب بالایی دارند (Capitano et al, 2014)؛ بنابراین استفاده مجدد از پساب خروجی این صنایع می‌تواند از نقطه‌نظر اقتصادی و زیست‌محیطی موردتوجه قرار گیرد. از آنجا که وجود ذرات پودر سنگ در آب ممکن است باعث مشکلاتی در طول مرحله صیقل دادن شود و همچنین گرفتگی لوله‌ها را به‌همراه داشته باشد، لذا ضروری است پیش از استفاده مجدد، تصفیه‌های لازم بر روی پساب خروجی انجام گردد. لازم به ذکر است، چنانچه پساب خروجی مورد استفاده مجدد قرار نگیرد، در این صورت باز هم پیش از ورود به محیط‌زیست انجام تصفیه‌های لازم ضروری است (Acar, 2001).

۲-۳ فرآیند انعقاد و مکانیسم آن

انعقاد شیمیایی با افزودن منعقدکننده‌هایی مثل سولفات آلومینیوم و پلی آلومینیوم کلرید انجام می‌شود. اگرچه مکانیسم انعقاد به‌طور دقیق شناسایی نشده است، اما می‌توان فرض کرد که از چهار مرحله کلی تشکیل شده است، که عبارت‌اند از فشردگی لایه‌ی یونی، جذب سطحی و خنثی شدن بار،

¹ Shear plane

محصور شدن در یک توده لخته‌ای و بالاخره جذب سطحی و تشکیل پیوند پلی بین ذرات.

فشردگی لایه یونی

در هنگام افزودن ماده منعقدکننده در سیستم کلوئیدی، غلظت یونی زیاد باعث فشردگی لایه‌ی یون‌های مخالف به سمت کلوئید می‌شود (شکل ۲-۲). اگر این لایه به‌اندازه‌ی کافی متراکم شود در آن صورت نیروی واندروالسی در محیط غالب می‌شود، به‌گونه‌ای که نیروی برآیند جاذبه است. فشردگی لایه‌ی یونی زمانی که نهر کدر به اقیانوس می‌ریزد، در طبیعت اتفاق می‌افتد. در این زمان مقدار یون در آب افزایش زیادی می‌یابد و انعقاد همراه با ته‌نشینی صورت می‌پذیرد. اگرچه برای منعقد کننده‌های معمول استفاده‌شده در تصفیه آب، دوزهای مصرفی کم بوده و بر فشردگی لایه‌ی یونی مؤثر نیست.

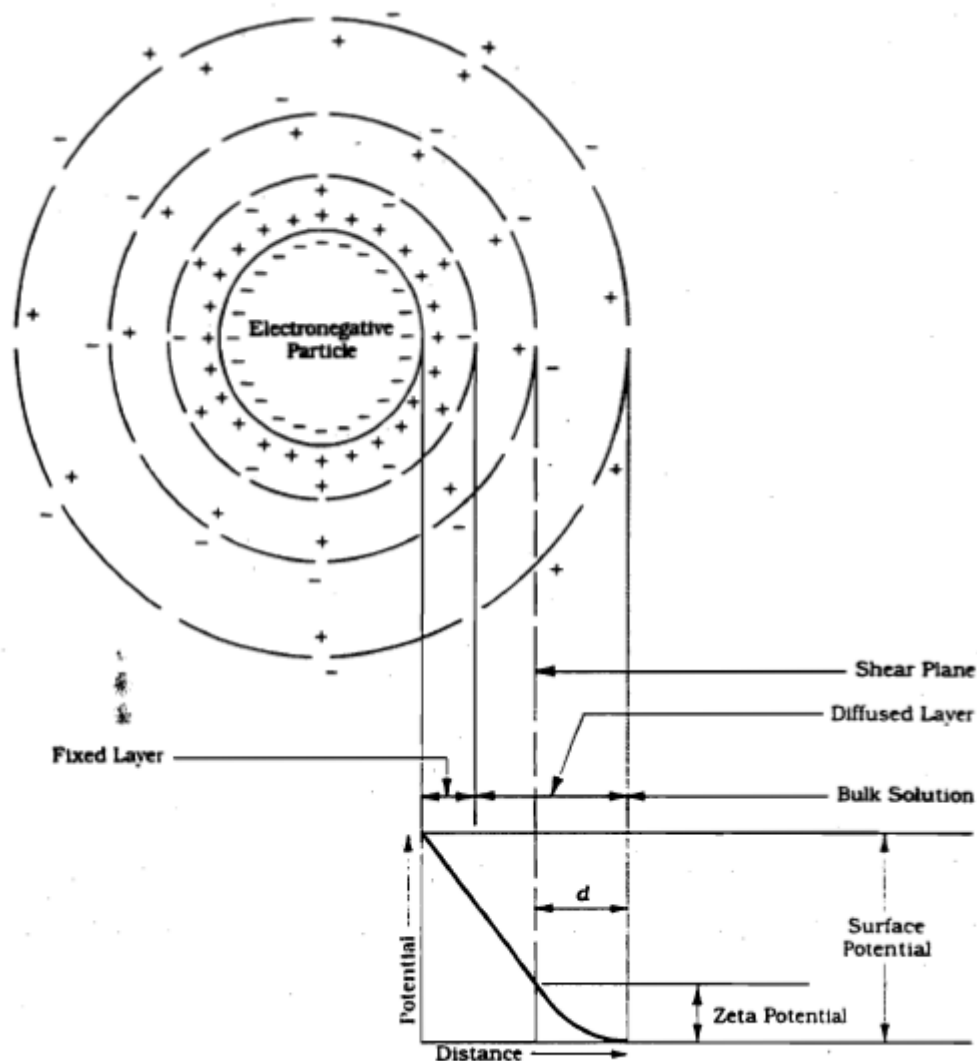


FIGURE 8.3 A Negative Colloidal Particle with Its Electrostatic Field

شکل ۲-۲: ذره کلئوئید منفی با میدان الکترواستاتیک پیرامونی (Reynolds and Richards, 1996)

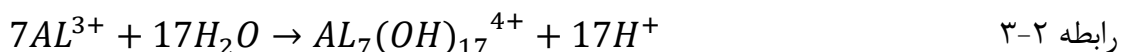
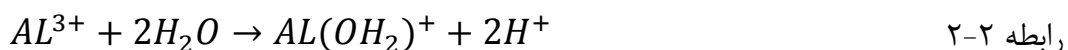
جذب سطحی و خنثی شدن بار

در این مکانیسم، نوع بار یون به جای تعداد آن دارای اهمیت است. آنیون‌های سولفات و کاتیون‌های آلومینیوم به وسیله یونیزاسیون سولفات آلومینیوم در آب تولید می‌شود. یون‌های سولفات بدون تغییر باقی مانده و یا با کاتیون‌های دیگر واکنش می‌دهند. ولی کاتیون‌های Al^{3+} با آب واکنش داده و یون آبی فلزی همراه با هیدروژن تولید می‌کنند. یون‌های آبی فلزی تشکیل شده در قسمتی از ابر یونی اطراف کلئوئید قرار می‌گیرند و به دلیل تمایل زیاد به سطح کلئوئید، جذب سطح شده و باعث خنثی

شدن بار سطح می‌شوند. خنثی شدن بار سطح باعث پخش ابر یونی و از بین رفتن پتانسیل الکترواستاتیکی می‌شود، به طوری که ذرات به راحتی به یکدیگر برخورد می‌کنند. دوز زیاد منعقدکننده ممکن است باعث پایداری دوباره محلول شود، چون با جذب تعداد کافی از یون‌های فلزی به سطح کلئید، بارهای سطح و ابرهای یونی معکوس می‌شود.

محصور شدن در یک توده لخته‌ای و انعقاد جاروبی

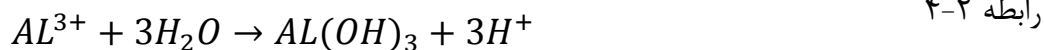
سولفات آلومینیوم به آب کدر اضافه و به یون‌های آلومینیوم و سولفات هیدرولیز می‌شود، یون سولفات بدون تغییر مانده و یا با کاتیون‌های دیگر واکنش می‌دهد، ولی یون آلومینیوم با مولکول‌های آب وارد واکنش شده و نتیجه‌ی این واکنش رابطه‌های ۱-۲ تا ۴-۲ است. محصول نهایی از هیدرولیز آلوم، هیدروکسید آلومینیوم $Al(OH)_3$ طبق رابطه ۴-۲ است. فلاک‌های ژله‌مانند تشکیل می‌دهد که به دلیل وزن زیاد نسبت به آب در اثر نیروی وزن خود ته‌نشین می‌شوند. با تشکیل فلاک‌ها، کلئیدها احتمالاً در آن محصور شده و یا به لخته در حال ته‌نشینی اتصال پیدا کنند. انعقادی که در اثر آن کلئیدها از محلول رفته (حذف) می‌شوند، انعقاد جاروبی خوانده می‌شود.



.

.

.



تشکیل پیوند پلی بین ذرات

پلیمرهای مصنوعی نیز به عنوان منعقدکننده یا کمک منعقدکننده استفاده شده و برای انجام واکنش در سطح تمایل زیادی دارند. در مکانیسم انعقاد، چندین کلئید به یک پلیمر ممکن است متصل شده و گروه‌های پلیمر-کلئیدی را تشکیل دهند که در نهایت، یک توده‌ی ته‌نشین شونده ایجاد می‌شود. علاوه بر نیروهای جذب سطحی، بارهای پلیمر نیز بر فرآیند انعقاد ممکن است مؤثر باشند (پوی،

۲-۳-۱ منعقدکننده شیمیایی

برای انعقاد شیمیایی ناخالصی‌ها در تصفیه آب، منعقدکننده‌ها بایستی مقرون به صرفه باشند و در حد امکان تأثیر سمی و نامطلوب در آب باقی نگذارد (Scholz, 2016). منعقدکننده‌های مختلفی مثل نمک‌ها و پلی‌الکترولیت‌ها در تصفیه آب استفاده می‌شوند. مواد منعقدکننده بار الکتریکی مثبت دارند که بار منفی ذرات معلق در آب را خنثی کرده و رسوب می‌دهند. تعداد یون‌های مثبت بعضی از منعقدکننده‌ها بیشتر از دیگران است. منعقدکننده‌های حاوی یون مثبت سه‌ظرفیتی و دو ظرفیتی مانند Al^{3+} و Fe^{2+} به ترتیب ۷۰۰۰ تا ۱۰۰۰ مرتبه از منعقدکننده‌های با یون مثبت یک ظرفیتی مانند Na^{+} و ۵۰ تا ۶۰ مرتبه از منعقدکننده‌های با یون‌هایی مثبت، مانند Ca^{2+} ، مؤثرتر هستند.

عوامل فیزیکی و شیمیایی، مانند شرایط اختلاط، pH و کدورت بر کارایی یک منعقدکننده تأثیر می‌گذارد. برای مثال آلوم در $pH = 4/5 - 8/5$ خیلی خوب عمل می‌نماید. اگر آلوم خارج از این محدوده pH مصرف شود، یا ذرات کاملاً تجمع نیافته و یا اینکه در pH بالاتر یا پایین‌تر حل خواهند شد. افزایش کدورت در بهبود فرآیند انعقاد مؤثر است. بسیاری از عوامل ناشناخته وجود دارند که بر فرآیند انعقاد-تجمع ذرات مؤثر می‌باشند، از این رو نوع و مقدار منعقدکننده برای هر آب خام باید به وسیله آزمایش، مانند آزمایش جار، تعیین گردد (شریعت پناهی، ۱۳۹۱).

پلی‌الکترولیت‌ها مولکول‌های بینهایت بزرگی هستند که بارهای الکتریکی و یا گروه‌های قابل یونش دارند. سه نوع پلی‌الکترولیت وجود دارد: پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی، پلی‌الکترولیت‌های آنیونی و پلی-الکترولیت‌های غیریونی. پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی مانند پلی‌آلومینیوم کلراید پلیمرهایی هستند که وقتی در آب حل می‌شوند، یون‌هایی با بار مثبت تولید می‌کنند. به دلیل اینکه ذرات معلق و مواد کلوئیدی موجود در آب عموماً دارای بار منفی هستند، از آن‌ها به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. پلیمرهای کاتیونی به‌عنوان منعقدکننده اولیه و یا کمک منعقدکننده استفاده می‌شوند. مزیت‌های استفاده از این منعقدکننده شامل کاهش مقدار منعقدکننده، ته‌نشینی بهتر فلاک‌ها، حساسیت کمتر

به pH و بهبود لخته‌سازی ارگانیزم‌های زنده (باکتری و جلبک) هستند.

پلی‌الکترولیت آنیونی پلیمرهایی هستند که وقتی حل می‌شوند یون‌هایی با بار منفی تولید می‌کنند و برای حذف ذرات با بار مثبت استفاده می‌شوند. آن‌ها در درجه اول به‌عنوان کمک‌منعقدکننده با منعقدکننده‌های آهن یا آلومینیوم استفاده می‌شوند. ماده شیمیایی آنیونی اندازه جریان را افزایش داده، ته‌نشینی را بهبود بخشیده و فلاک‌های محکم‌تری تولید می‌کند. pH و کدورت بر عملکرد این منعقدکننده‌ها تأثیر قابل‌توجهی ندارد.

پلی‌الکترولیت‌های غیریونی بار خنثی یا متعادل دارند، اما به‌محض حل شدن یون‌های منفی و مثبت آزاد می‌کنند. پلی‌الکترولیت غیریونی به‌عنوان منعقدکننده یا کمک منعقدکننده ممکن است استفاده شود. مقدار لازم پلی‌الکترولیت‌ها در مقایسه با کمک‌منعقدکننده‌های دیگر بسیار کم‌تر است. محدوده معمول دوز برای پلیمرهای کاتیونی و آنیونی $1-10 \text{ mg/L}$ و برای پلیمرهای غیریونی در محدوده $1-10 \text{ mg/L}$ است (Scholz, 2016).

۲-۳-۲ انعقاد و حذف کدورت از پساب فرآوری سنگ

جهت حذف کدورت توسط منعقدکننده‌های شیمیایی از پساب صنعت فرآوری سنگ، تاکنون تحقیقات بسیاری صورت پذیرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. طی تحقیقی برای حذف کدورت پساب سنگ مرمر منعقدکننده‌های آلوم، کلریدفریک و سولفات فریک در دوزهای مختلف بررسی شدند. طبق نتایج، کلریدفریک بالاترین توانایی حذف کدورت را در دوز تقریبی 0.375 g/L و سولفات فریک توانایی ناچیزی در حذف نشان داد (Domopoulou et al, 2015).

در پژوهشی عملکرد منعقدکننده‌های پک، آلوم و کلریدفریک به‌تنهایی و همراه با کمک منعقدکننده نشاسته برای حذف کدورت ناشی از کائولین بررسی شد. طبق بررسی روند ته‌نشینی منعقدکننده‌ها، سرعت ته‌نشینی فلاک‌ها با پلی آلومینیوم کلرید زیاد بود. در غلظت‌های بالاتر پک، افزودن نشاسته

تأثیری بر حذف کدورت نداشت. در حالی که در غلظت‌های پایین‌تر، نشاسته باعث حذف قابل توجهی از کدورت شد (بنی‌هاشمی و همکاران، ۱۳۸۷).

طبق پژوهشی کارایی چهار منعقدکننده معدنی (پلی‌آلومینیوم کلراید، سولفات فرو، کلروفریک و سولفات آلومینیوم) با استفاده از دستگاه جارتست در حذف کدورت ناشی از خاک رس از آب بررسی گردید. پلی‌آلومینیوم کلراید در غلظت 5mg/L درصد حذف بالایی نشان داد. با افزایش دوز منعقدکننده، اندازه لخته همچنان ریز باقی ماند ولی سرعت ته‌نشینی آن بالاتر رفت و هدایت الکتریکی روند افزایشی و قلیابیت روند کاهشی داشت. بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش میزان هدایت الکتریکی به ترتیب در منعقدکننده کلروفریک و پلی‌آلومینیوم کلراید حاصل شد (پیرصاحب و همکاران، ۱۳۹۱).

احتشامی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ برای تصفیه پساب صنایع سنگ‌بری از منعقدکننده‌های کلریدفریک، سولفات آلومینیوم و کلرید آلومینیوم استفاده کردند. بیشترین کارایی در حذف کدورت و TSS برای منعقدکننده‌های کلریدفریک، سولفات آلومینیوم و کلرید آلومینیوم به ترتیب در pH های برابر با ۱۰/۱۲، ۱۰/۶۲ و ۹/۲۳ و غلظت‌های منعقدکننده برابر با 0.519 g/L ، $1/0.92$ و $0/78$ به دست آمد (Ehteshami et al, 2016).

دوزیل^۲ در سال ۲۰۱۵ کارایی منعقدکننده‌های پلی‌آکریل‌آمید (کاتیونی، آنیونی و بدون بار) و نشاسته را در حذف کدورت از پساب سنگ مرمر بررسی کرد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، منعقدکننده‌ی پلی-آکریل‌آمید (نوع بدون بار) بالاترین کارایی در حذف کدورت را در بین سایر منعقدکننده‌ها نشان داد (Duzyol, 2015).

ارسوی^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۹ در سه آزمایش به‌طور مجزا کارایی فرآیند لخته‌سازی، فرآیند انعقاد و کارایی هم‌زمان این دو فرآیند، در حذف کدورت پساب ناشی از کارخانه سنگ‌بری را بررسی کردند.

¹ Ehteshami

² Duzyol

³ Ersoy

نتایج حاصل از تحقیق نشان داد، فرآیند لخته‌سازی به‌تنهایی برای حذف کدورت نسبت به دو روش دیگر (انعقاد و انعقاد همراه با لخته‌سازی) از کارایی پایین‌تری برخوردار است. همچنین نتایج کارایی بالاتر منعقدکننده $AlCl_3$ نسبت به سایر منعقدکننده‌های استفاده‌شده به‌منظور حذف کدورت، در pH ۶ و ۹ را نشان داد (Ersoy et al, 2009).

ناصرالدین و همکاران در سال ۲۰۰۹ مدیریت زیست‌محیطی صنعت سنگ‌بری را در هرین^۱ مورد بررسی قرار دادند. ده طرح آزمایشی مختلف، برای کاهش دادن و از بین بردن تخلیه‌ی نادرست پساب صنعت سنگ‌بری به محیط‌زیست و همچنین بهبود کیفیت پساب خروجی مطرح شد. بررسی روش‌های موجود با استفاده از آزمایش‌های جار برای بهینه‌سازی تصفیه آب انجام پذیرفت. با توجه به نتایج آزمایش‌های بهینه‌سازی، منعقدکننده فکلند^۲ در غلظت $1/5 \text{ mg/L}$ کارایی قابل‌قبولی را در حذف کدورت نشان داد. تکمیل پروژه‌های آزمایشی منجر به جلوگیری از تخلیه پساب با کدورت بالا به محیط‌زیست و بهبود کیفیت آب بازیافتی شد (Nasserdine et al, 2009).

۴-۲ پردازش تصویر

تصویر را می‌توان یک تابع دوبعدی مثل $f(x,y)$ در نظر گرفت که x و y مختصات (صفحه) مکانی هستند و دامنه f در مختصات (x,y) شدت تصویر در آن نقطه است. وقتی x و y و مقادیر شدت f ، متناهی و کمیت‌هایی گسسته باشند، تصویر را تصویر دیجیتال می‌نامیم. تصویر دیجیتال، مرکب از تعداد متناهی از عناصر است، که هر کدام دارای مکان و مقدار خاصی است. این عناصر را عناصر تصویر و پیکسل می‌نامند (گونزالس، ۱۳۹۱).

۱-۴-۲ برنامه‌نویسی به زبان MATLAB و پردازش تصویر

متلب (MATLAB) زبانی برای محاسبات تکنیکی است. این زبان، محاسبات، بصری‌سازی، و برنامه‌نویسی را در یک محیط مناسب با هم ترکیب می‌کند. بعضی از کاربردهای آن عبارت است از:

^۱Herbon
^۲fokland

ریاضیات و محاسبات، توسعه الگوریتم، جمع‌آوری داده، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و ساخت نمونه اولیه، تحلیل داده و بصری‌سازی.

متلب یک سیستم محاوره‌ای است که عنصر داده‌ای پایه‌ی آن ماتریس است. به این دلیل، فرمول‌بندی جواب بسیاری از مسائل محاسباتی، مخصوصاً آن‌هایی که شامل نمایش ماتریس‌ها است، در زمان کوتاهی صورت می‌گیرد. این زبان برای آسان‌سازی دستیابی به ماتریس و نرم‌افزار جبر خطی نوشته شد. متلب شامل نرم‌افزار محاسبات عددی آماده است که برای پردازنده‌ها و معماری‌های حافظه مدرن، بهینه‌سازی گردیده است (گونزالس، ۱۳۹۱).

۲-۴-۲ پردازش تصویر و تفسیر فرآیند انعقاد

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی پردازش تصاویر فرآیند انعقاد انجام شده است، که در ادامه بعضی از آن‌ها آورده شده است.

طی تحقیقی برای تجزیه و تحلیل فلاک‌هایی که در انعقاد آب دریاچه و سوسپانسیون رس مونتوریونیت به وسیله اضافه کردن منعقدکننده آلوم تشکیل گردیده بود، از عکاسی همراه با تکنیک پردازش تصویر استفاده شد. فرآیند انعقاد شامل سه مرحله اختلاط سریع، آرام و ته‌نشینی است، که عکس‌ها در انتهای اختلاط آرام گرفته شدند. این روش تحلیل برای امتحان فرضیه‌ای فلاک‌هایی که در مکانیسم‌های مختلف انعقاد تولید می‌شوند و ویژگی‌های متفاوتی را دارا هستند، استفاده می‌شود. ویژگی‌های ذرات قبل از اضافه کردن منعقدکننده نیز تعیین می‌شود. بعد فراکتال برای انعقاد جاروگونه که در آن لخته‌های بزرگ‌تر و نامنظم‌تری تولید می‌شوند، کمتر است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، اطلاعات بیشتری برای تفسیر داده‌های جارتست فراهم می‌شود که به توضیح ته‌نشینی بهتر لخته‌های انعقاد جاروگونه نسبت به انعقاد خنثی‌سازی بار کمک می‌کند (Chakraborti et al, 2000).

در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های آب، لخته‌سازی واحدی کلیدی است که انجام صحیح آن عملکرد قابل‌قبول تصفیه‌خانه را باعث می‌شود. عموماً لخته‌سازی به‌وسیله چشم غیرمسلح یا روش‌های دستی

نظارت می‌شود. در تصفیه‌خانه‌های مدرن برای تخمین ضروری‌ترین پارامترهای کیفی فلاک در واحد انعقاد با استفاده از پردازش تصویر از یک سیستم آنلاین استفاده می‌شود. مساحت سطح ذرات فلاک تعریف شده با استفاده از عکس‌ها و داده‌های اندازه‌گیری شده از فرآیند انعقاد با یکدیگر مقایسه و یک مدل رگرسیون چندمتغیره برای آن ایجاد می‌شود.

معمولاً آب چاه‌ها و رودخانه‌ها قبل از ورود به شبکه توزیع تصفیه می‌شود. آب در ابتدا فیلتر شده و در مرحله بعد آب با استفاده از منعقدکننده تصفیه می‌شود. بعد از انعقاد لخته‌ی انعقاد به وسیله رسوب-گذاری یا شناورسازی جدا گردیده و در ادامه از فیلتراسیون شنی استفاده می‌شود. در آخرین مرحله آب به وسیله کلرزایی گندزدایی می‌شود. اندازه فلاک شکل گرفته در تصفیه آب زیرزمینی در مقایسه با آب سطحی کوچک‌تر است (Juntunen et al, 2014).

با پردازش و تحلیل عکس، تغییر در اندازه ذره به خوبی قابل محاسبه است. با استفاده از لخته‌سازی پی‌درپی، شکست برشی و لخته‌سازی دوباره می‌توان سرعت تشکیل فلاک، مقاومت فلاک، برگشت فلاک‌های شکسته و خاصیت‌های شکل‌شناسی و ساختاری آن‌ها را توصیف کرد. طی تحقیقی که، از پردازش تصویر برای بررسی دینامیک انعقاد برای منعقدکننده‌های متفاوت در آب استفاده شد، آزمایش‌های جار برای انعقاد در آب کدر شده با ترکیب کائولین و مقادیر متفاوتی از هیومیک‌اسید ۰، ۳ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام گردید. با توجه به تغییرات زتاپتانسیل و نتایج جارست، غلظت بهینه آلوم برای آب‌های حاوی ۰، ۳ و ۱۰ mg/L هیومیک‌اسید به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ و غلظت بهینه فریک به ترتیب ۱۰، ۲۵ و ۳۰ بوده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی مقاومت ذره و قابلیت برگشت‌پذیری می‌توان دریافت که فلاک‌های هیومیک‌اسید مقاومت قابل ملاحظه‌ای دارند، همچنین با افزایش غلظت هیومیک‌اسید در شرایط سرعت برشی بالاتر، قابلیت برگشت‌پذیری کاهش می‌یابد. با توجه به رشد دوباره محدود، می‌توان دریافت اتصالاتی که فلاک‌های هیومیک‌اسید را کنار یکدیگر نگاه می‌دارند، صرفاً اتصالات فیزیکی نیستند. افزایش فشردگی فلاک‌ها به توضیح در رابطه با محدودیت رشد دوباره آن‌ها کمک می‌کند. با توجه به عملکرد آلوم و فریک

می‌توان دریافت که فلاک‌های هیومیک‌اسید وابسته به نوع منعقدکننده، خواص متفاوتی دارند. آلوم فلاک‌های هیومیک‌اسید بزرگ‌تری تولید می‌کند، که بعد از شکست به دلیل سرعت برشی، قابلیت برگشت بالاتری دارند (Xiao et al, 2011).

طی تحقیق دیگری تأثیر سرعت اختلاط در سه مرحله قبل از شکست، حین شکست و پس از شکست بر رشد دوباره فلاک‌ها با استفاده از گرفتن عکس و تکنیک پردازش تصویر بررسی شد. عملکرد انعقاد با تغییر سرعت اختلاط طی هر مرحله بر اندازه و ساختار فلاک‌های دوباره رشد یافته بررسی گردید. طبق نتایج اندازه فلاک‌ها بعد از شکست نسبت به حالت قبل از شکست کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت اختلاط فلاک‌های کوچک‌تر با فشردگی بالاتری تولید می‌شوند. تأثیر افزایش سرعت اختلاط آرام قبل از شکست، بر اندازه‌ی فلاک‌های دوباره رشد یافته به دلیل مقاومت طی شکست کمتر است، که منجر به تغییر کارایی انعقاد به صورت جزئی می‌گردد. در اختلاط سریع منجر به شکست فلاک‌ها، افزایش سرعت اختلاط به صورت قابل توجهی کارایی انعقاد را کاهش می‌دهد، که می‌تواند ناشی از تأثیر بیشتر سرعت اختلاط بر اندازه فلاک‌های دوباره رشد یافته باشد. هرچند با افزایش سرعت اختلاط آرام بعد از شکست، کارایی انعقاد افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند، این امر ناشی از تأثیر بیشتر اختلاط آرام بعد از شکست بر ساختار فلاک‌های دوباره رشد یافته است (Nan et al, 2016).

۲-۵ کینتیک ته‌نشینی فلاک‌ها

معادله‌ی عمومی کینتیک می‌تواند به صورت زیر، رابطه (۲-۵) نشان داده شود:

$$dc / dt = -kc^n \quad \text{رابطه (۲-۵)}$$

در رابطه ۲-۵ n مرتبه‌ی واکنش، k ثابت فرآیند انعقاد و c غلظت ذرات برحسب (mg/L) در زمان t برحسب (min) است.

در صورتی که در رابطه ۲-۵ n به ترتیب برابر با یک و دو و غلظت در زمان صفر و t به ترتیب برابر با c_0 و c باشد، با استفاده از انتگرال گیری از آن، به ترتیب رابطه‌های کینتیک مرتبه اول (۲-۶) و مرتبه دوم

(۷-۲) حاصل می‌گردد:

$$lnc = (lnc_0 - (k_1 * t)) \longrightarrow c = c_0 e^{-k_1 t} \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} + k_2 t \longrightarrow c = c_0 / (1 + c_0 k_2 t) \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

در فرآیند انعقاد، کدورت اولیه (c_0) و کدورت در زمان t (c) در رابطه‌های (۶-۲) و (۷-۲) می‌تواند به صورت NTU بیان گردد. در صورتی که کدورت‌ها برحسب NTU بیان شوند، واحد k_1 و k_2 به ترتیب برابر با min^{-1} و $\text{min}^{-1} \cdot \text{NTU}^{-1}$ می‌گردد (Chapra, 1997, Al-Sameraiy, 2017).

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱ مقدمه

انتخاب منعقدکننده مناسب و پردازش تصویر فلاک‌های تشکیل‌شده در فرآیند انعقاد، برای رسیدن به اهداف تحقیق لازم و ضروری است. این بخش به معرفی مواد استفاده‌شده، شیوه کلی انتخاب منعقدکننده‌های مناسب، روند آزمایش‌های بهینه‌سازی، محاسبات بکار رفته برای بدست‌آوردن نتایج، تهیه عکس از روند تشکیل فلاک در حالت بهینه و پردازش تصاویر می‌پردازد. برای افزایش قابلیت اطمینان و کاهش خطای آزمایش کلیه آزمایش‌های انجام‌شده با سه بار تکرار (Triplicate) صورت گرفت.

۳-۲ مواد مورد استفاده

- سنگ تراورتن: سنگ تراورتن از شرکت کانساران بینالود تهیه گردید.
- پلی‌آلومینیوم کلراید (پک): منعقدکننده پک از شرکت رسوب‌گیری در تهران خریداری شد.
- آلومینیوم‌سولفات (آلوم): منعقدکننده آلوم از شرکت رسوب‌گیری در تهران خریداری شد.
- دوربین عکاسی: Nikon D7100 ساخت کارخانه Nikon کشور ژاپن مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۳ روش‌های مورد استفاده

۳-۳-۱ آماده‌سازی پودر سنگ و بررسی مشخصات آن

- آماده‌سازی پودر سنگ

سنگ تراورتن استفاده‌شده در شرکت کانساران بینالود پودر گردید و از الک شماره ۲۰۰ (قطر منافذ معادل $75 \mu\text{m}$) عبور داده شد.

- آنالیز XRD پودر سنگ

ترکیب معدنی سنگ موردنظر با استفاده از آنالیز XRD در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان آنالیز گردید.

- آنالیز XRF پودر سنگ

ترکیب شیمیایی سنگ موردنظر با استفاده از آنالیز XRF در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان آنالیز گردید.

۳-۲-۳ روش انجام فرآیند انعقاد

- مبنای انتخاب منعقدکننده

- انتخاب منعقدکننده‌های مناسب بر مبنای حذف کدورت از آب بوده است.
- در استفاده از این مواد به‌عنوان منعقدکننده، صرفه اقتصادی و دسترسی آسان نیز مدنظر بود.
- برای اطمینان از قابلیت منعقدکننده در حذف کدورت، آزمایش‌های اولیه انعقاد به وسیله منعقدکننده‌ها انجام شد.

- روش تهیه پساب سنگ‌بری

برای تهیه پساب موردنظر، مخلوط ۷۰ گرم پودر سنگ تراورتن با ۶۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت یک ساعت روی استیرر با سرعت ۱۵۰۰rpm قرار داده شد. پس از اتمام مرحله اختلاط به‌منظور ته‌نشین شدن ذرات معلق، پساب یک ساعت در شرایط ساکن باقی ماند؛ و سپس ۵۰۰ میلی‌لیتر از پساب رویی به آرامی برداشته شد (Nan et al, 2016). برای سنجش کدورت پساب از دستگاه کدورت-سنج مدل TB 210 IR ساخت شرکت Lovibond استفاده شد. برای اندازه‌گیری pH، EC و TDS دستگاه pH متر (EC متر) مدل YK-2001CT ساخت شرکت Lutron به کار گرفته شد.

- روش کلی انجام آزمایش انعقاد

پس از تهیه پساب با کدورت موردنظر و اندازه‌گیری پارامترهای اولیه، به‌منظور انجام آزمایش‌های انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی از دستگاه جارتست مدل JTR90 ساخت شرکت زاگ شیمی (شکل ۳-۱) استفاده گردید. در ابتدا پس از افزودن منعقدکننده به پساب، فرآیندهای اختلاط سریع و اختلاط آرام در دستگاه جارتست به ترتیب با سرعت‌های ۱۶۰ و ۶۰ rpm و در مدت زمان‌های ۲ و ۱۰ دقیقه

انجام شد. سپس پساب به مدت ۳۰ دقیقه در شرایط ته‌نشینی قرار گرفت. سپس از پساب رویی نمونه‌برداری گردید و پارامترهای کدورت، pH، EC و TDS قبل و پس از انجام فرآیند انعقاد اندازه‌گیری شد.



شکل ۳-۱: دستگاه جارتست مورد استفاده در این تحقیق

- بررسی تأثیر غلظت منعقدکننده بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی پساب

تأثیر بر میزان حذف کدورت از پساب

در طی فرآیند انعقاد، شرایط انجام آزمایش بر حذف کدورت تأثیر زیادی دارد؛ بنابراین با استفاده از ماده منعقدکننده که در شرایط اولیه درصد حذف خوبی را نشان داد، لازم است پارامترهای مؤثر بر فرآیند انعقاد بررسی و بهینه‌سازی شود تا منعقدکننده به بیشترین درصد حذف خود برسد. در این پژوهش غلظت منعقدکننده به‌عنوان عامل مؤثر بر فرآیند انعقاد بررسی شد.

جهت بررسی تأثیر غلظت منعقدکننده بر درصد حذف کدورت از چهار غلظت مختلف منعقدکننده-های آلوم و پک شامل ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ mg/L استفاده گردید. آزمایش جار در غلظت‌های مذکور انجام و میزان کدورت محلول در ابتدا و انتهای آزمایش با استفاده از دستگاه کدورت‌سنج مدل

TB 210 IR ساخت شرکت Lovibond اندازه‌گیری گردید.

تأثیر بر پارامترهای pH، TDS و EC پساب

در تمامی آزمایش‌های انجام شده با غلظت‌های مختلف منعقدکننده‌های آلوم و پک میزان پارامترهای pH، TDS و EC قبل و پس از فرآیند انعقاد اندازه‌گیری شد و تأثیر فرآیند انعقاد بر پارامترهای مذکور به صورت نمودار ترسیم و تفسیر گردید.

- بررسی کینتیک فرآیند انعقاد

جهت بررسی کینتیک فرآیند پس از آغاز مرحله ته‌نشینی در بازه‌های زمانی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ دقیقه از پساب در عمق ۲ سانتی‌متری ظرف، نمونه‌برداری و کدورت آن سنجیده و تطابق کینتیک فرآیند انعقاد با مدل‌های کینتیک مرتبه اول و دوم بررسی شد.

- روش محاسبه درصد حذف کدورت از محلول

درصد حذف کدورت از محلول با استفاده از منعقدکننده توسط رابطه ۱-۳ محاسبه گردید.

$$\%R = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100 \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

در رابطه (۱-۳)، R، درصد حذف کدورت، T_1 و T_2 به ترتیب کدورت اولیه و ثانویه برحسب NTU در فرآیند انعقاد بوده است.

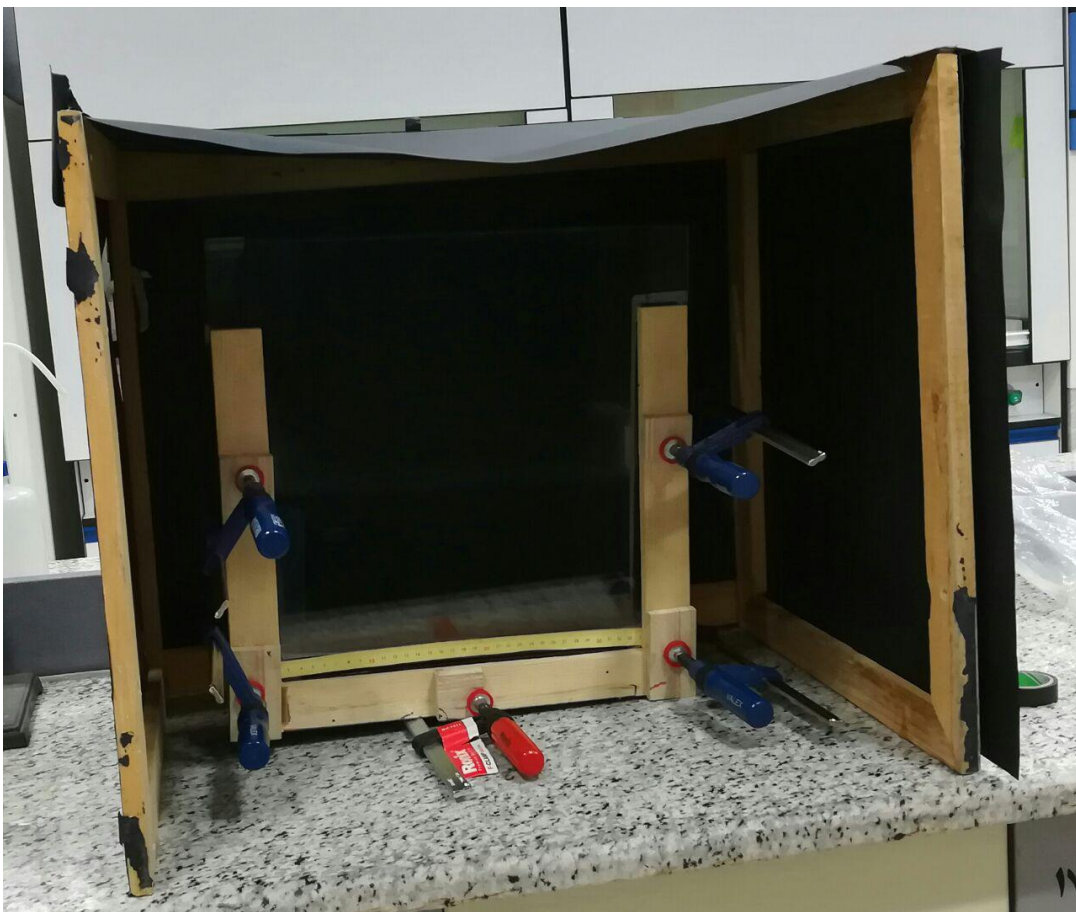
۳-۳-۳ روش استفاده از پردازش تصویر جهت بررسی خصوصیات فلاک‌ها در فرآیند انعقاد

تحلیل خصوصیات فلاک‌های انعقاد از جمله تحقیقات ضروری است. دلیل این ضرورت را می‌توان چنین توجیه نمود که عملکرد فرآیندهای انعقاد، رسوب‌گذاری، فیلتراسیون و گندزدایی در سیستم تصفیه‌ی آب به شدت تحت تأثیر خصوصیات فلاک‌های انعقاد قرار می‌گیرد.

خصوصیات فلاک‌های ایجادشده در اثر فرآیند انعقاد و پس از شکست دوباره به‌وسیله دو منعقدکننده آلوم و پک با استفاده از پردازش تصویر بررسی و با یکدیگر مقایسه گردید. مراحل انجام این فرآیند و خصوصیات مورد بررسی در فلاک‌ها در ادامه آورده شده است.

- تهیه پایلوت جهت عکس برداری

پایلوت تهیه شده در این تحقیق از دو شیشه‌ی مربع شکل با ابعاد $40 \times 40 \text{ cm}^2$ و لاستیک با ضخامت 1 cm تشکیل شد. لاستیک بین دو قسمت شیشه‌ای قرار گرفته و از گیره‌هایی جهت محکم کردن لاستیک بین دو شیشه و عایق بندی فضای داخلی استفاده گردید. برای توزیع یکسان فشار حاصل از گیره‌ها از یک شاسی چوبی در دو طرف شیشه‌ها استفاده شد، به طوری که توزیع فشار حاصل از گیره‌ها بر مدل یکنواخت و از شکستگی شیشه‌ها جلوگیری شد. در شکل ۲-۳ تصویر پایلوت ساخته شده جهت عکس برداری در تحقیق حاضر نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: تصویر پایلوت ساخته شده جهت عکس برداری در تحقیق حاضر

روش تصویربرداری

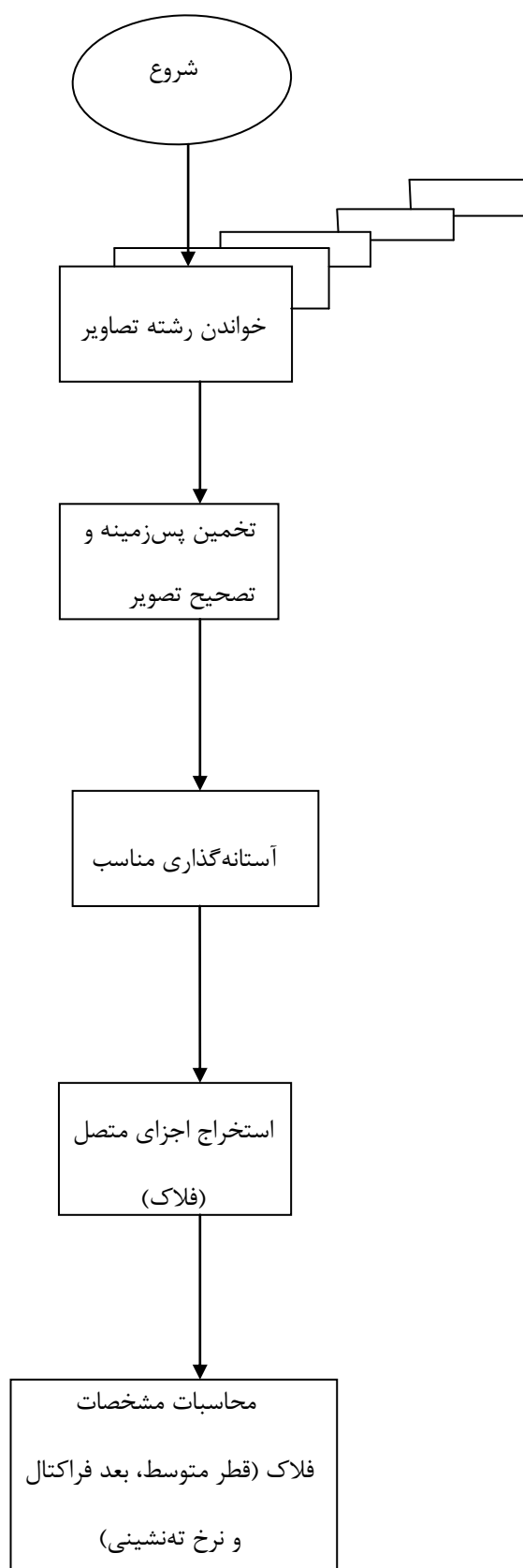
برای محاسبه ساختار و اندازه فلاک، تصویر برداری از نمونه در انتهای اختلاط آرام شروع شد و تا انتهای فرآیند ته‌نشینی به مدت ۳۰ دقیقه ادامه داشت. شرایط آزمایشگاهی مانند نورپردازی، فاصله دوربین از مدل و سایر پارامترها به‌گونه‌ای تنظیم شدند که فلاک‌ها و حرکت آن‌ها به‌خوبی شناسایی گردند. در این مطالعه ابتدا دوربین در فاصله ۸۰ سانتی‌متری از مدل قرار گرفت و تمرکز بر نمونه به‌گونه‌ای انتخاب گردید که تصاویر تهیه شده وضوح کافی برای تفکیک فلاک‌ها را داشته باشد. نورپردازی توسط ۲ لامپ LED ۵ واتی صورت گرفت. برای تفکیک پذیری بهتر فلاک‌ها نور از پشت به محلول تابانیده شد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳: پایلوت در هنگام عکسبرداری با اتاق تاریک و دوربین

برای به حداقل رساندن تاثیر سایر منابع روشنایی در صحنه، آزمایش در اتاق تاریک انجام گردید. پشت مدل آزمایشگاهی از یک صفحه مشکی استفاده شد تا فلاکها از پس زمینه بهتر تفکیک شوند.

تصویربرداری از فلاک‌ها با فاصله زمانی ۳ ثانیه صورت پذیرفت و رزولوشن تصویر 4000×6000 پیکسل انتخاب شد. تنظیمات دوربین در تمام آزمایش‌ها در حالت دستی قرار گرفت تا بتوان سرعت شاتر، دیافراگم، ایزو و وایت بالانس را با توجه به حرکت فلاک‌ها و شرایط نوری تنظیم کرد. با توجه به سرعت حرکت و ته‌نشینی فلاک‌ها، از سرعت شاتر بالای $1/1000$ ثانیه استفاده گردید. با توجه به اینکه با افزایش سرعت شاتر نور کمتری وارد دوربین می‌شود، بنابراین دیافراگم بر روی $f/4.5$ تنظیم گردید تا نور مناسب از طریق دریچه دیافراگم وارد دوربین شود. حساسیت سنسور تصویربردار در دوربین که با پارامتر ایزو مشخص می‌گردد، به مقدار ۱۰۰۰ محدود شد تا نویز در تصویر حداقل و تصویر تهیه شده با کیفیت گردد. وایت بالانس در تصویر فلورسنت است. لنز دوربین نیکون Nikon D7100 در محدوده ۱۴۰-۱۸ میلی‌متر و فاصله‌ی کانونی استفاده شده در تهیه‌ی تصویر برابر با ۳۵ میلی‌متر است. تصاویر خروجی با فرمت RAW برای تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری پارامترها ذخیره و با استفاده از نرم‌افزار vixNX2 به فرمت TIF ۱۶ بیتی تبدیل شد. در تغییر فرمت تصویر از RAW به TIF، تغییری در تنظیمات تصویر مانند فشرده‌سازی، تغییر رنگ و اندازه‌ی تصویر ایجاد نگردید. برای بررسی و استخراج پارامترهای موردنظر فلاک مانند مساحت، محیط و ... تصاویر تهیه شده به صورت خودکار تجزیه و تحلیل شدند. برای این منظور الگوریتم پیشنهادی در محیط نرم‌افزار (R2014a) Matlab پیاده گردید (شکل ۳-۴) که مراحل انجام آن به ترتیب زیر است:

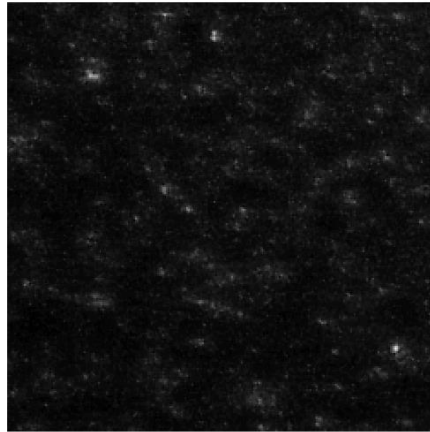


شکل ۳-۴: فلوجارت استفاده شده

پیش پردازش

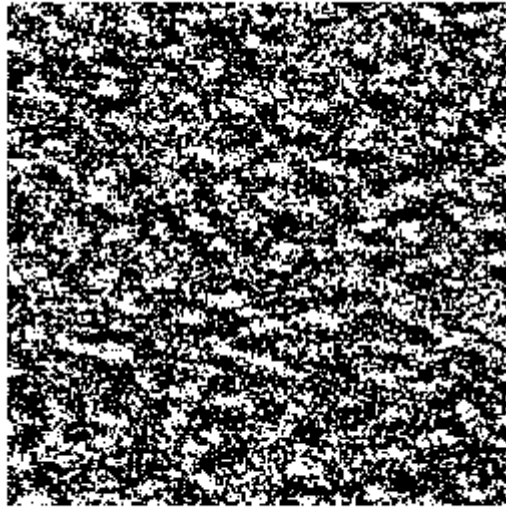
در این مرحله ابتدا تصویر اولیه به تصویر خاکستری تبدیل شد (شکل ۳-۵). با توجه به غیریکنواختی در روشنایی پس زمینه ابتدا پس زمینه تصویر تخمین زده می شود، برای تخمین تصویر پس زمینه می بایست فلاکها را حذف نمود برای این منظور از یک فیلتر گوسین $n \times n$ با انحراف معیار σ استفاده گردید (رابطه ۳-۲). براساس نتایج تجربی $n = 71$ و $\sigma = 5$ انتخاب شد و پس زمینه تصویر استخراج گردید.

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$



شکل ۳-۵: تصویر اولیه (خاکستری)

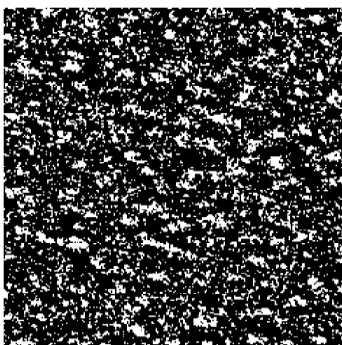
پس زمینه استخراج شده از تصویر خاکستری ورودی تفاضل می گردد تا فلاکها بهتر استخراج شوند (شکل ۳-۶).



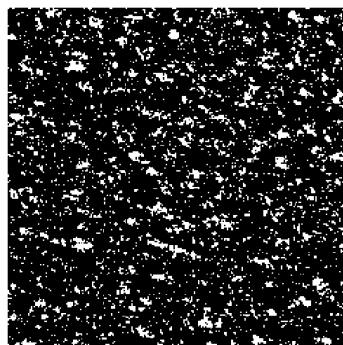
شکل ۳-۶: تصویر فلاک‌ها (تصویر حاصل از تفاضل تصویر ورودی و پس‌زمینه)

استخراج داده‌ها

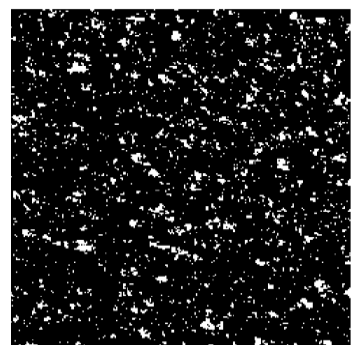
آستانه‌روشنایی برای تبدیل تصویر خاکستری بدست آمده به تصویر باینری (سیاه و سفید) که در آن فلاک‌ها سفید و پس‌زمینه سیاه می‌باشد، به صورت تجربی ۲۰۰ انتخاب گردید. شکل ۳-۷ تصویر باینری بدست آمده را با تغییر آستانه به اندازه‌های (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰) نشان می‌دهد. به گونه‌ای که تصویر حاصل بیشترین تطابق را با فلاک‌ها در مدل آزمایشگاهی داشته باشد.



الف



ب



ج

شکل ۳-۷: تصویر فلاک‌ها پس از اعمال آستانه‌روشنایی‌های مختلف (الف: ۱۰۰، ب: ۲۰۰، ج: ۳۰۰)

پنجره‌ای از تصویر باینری شده با توجه به محدوده‌ی تهنشینی فلاک‌ها انتخاب و اجزای متصل^۱ در این محدوده بطور خودکار از تصویر استخراج شدند. هر جز متصل به‌عنوان یک فلاک در نظر گرفته شد و برچسب گذاری گردید. به ازای هر جز برچسب زده شده (یک فلاک) تعداد پیکسل‌های فلاک محاسبه گردید. مساحت متوسط هر فلاک با شمارش تعداد پیکسل‌های هر فلاک و ضرب آن‌ها در فاکتور کالیبراسیون تصویربرداری به‌دست آمد. فاکتور کالیبراسیون با توجه به معلوم بودن ابعاد مدل برحسب سانتی‌متر و تعداد سطر و ستون‌های تصویر دیجیتال ۰/۰۰۳۶ سانتی‌متر بر پیکسل بدست آمد. فلاک‌های استخراج شده مورد آنالیز قرار گرفت تا مساحت فلاک‌ها، بعد فراکتال فلاک‌ها و نرخ تهنشینی فلاک‌ها محاسبه گردد.

پردازش کل داده‌ها

برای تمام تصاویر تهیه شده با فاصله‌ی زمانی ۳ ثانیه از آزمایش، پیش پردازش و استخراج داده‌ها به صورت خودکار انجام شد و پارامترهای موردنظر محاسبه گردید.

محاسبه اندازه (قطر متوسط) فلاک‌ها

مساحت متوسط فلاک‌ها در محیط MATLAB براساس پیکسل و اندازه فلاک‌ها (قطر متوسط فلاک‌ها) با استفاده از مساحت متوسط فلاک‌ها و فرض کروی بودن آن و فاکتور کالیبراسیون در نرم‌افزار Excel، توسط رابطه (۳-۴) محاسبه شد.

$$F_{cal} = (0.0036), (\text{cm/pixel}) \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

$$D = 2 * 10^4 * (F_{cal})^2 * (A/\pi)^{1/2} \quad \text{رابطه (۴-۳)}$$

در رابطه‌های (۳-۳) و (۴-۳)، D قطر متوسط فلاک (میکرومتر)، A مساحت متوسط فلاک (پیکسل) و F_{cal} فاکتور کالیبراسیون (cm/pixel) است. F_{cal} (فاکتور کالیبراسیون) با استفاده از تبدیل هر واحد پیکسل به سانتی‌متر بدست می‌آید.

^۱Connected Components

محاسبه نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها

مجموع مساحت فلاک‌ها در نرم‌افزار MATLAB و مجموع قطر فلاک‌ها با قرار دادن مجموع مساحت فلاک‌ها در رابطه‌ی (۳-۴) توسط نرم‌افزار Excel محاسبه گردید. مجموع قطر فلاک‌های ته‌نشین شده با تفاضل آن‌ها در زمان ته‌نشینی موردنظر به‌دست آمد. نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها با توجه به ته‌نشینی فلاک‌ها، با تقسیم مجموع قطر فلاک‌های ته‌نشین شده تقسیم بر زمان ته‌نشینی توسط رابطه (۳-۵) به دست آمد.

$$V = (D_1 - D_2) / ((t_1 - t_2) * 60) \quad \text{رابطه (۳-۵)}$$

در رابطه‌ی (۳-۵) V نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها (میکرومتر بر ثانیه)، D_1 و D_2 به‌ترتیب مجموع قطر فلاک‌ها (میکرومتر) در زمان t_1 و t_2 (دقیقه) است.

محاسبه بعد جزیی فلاک‌ها

هندسۀ برخالی^۱ (فراکتال) مفهوم نوینی است که نخستین بار در سال ۱۹۷۷ توسط مندلبرت ارائه گردید و امکان توصیف پیچیدگی‌های اشکال طبیعی را فراهم نمود (Gonzales et al, 2008). هندسۀ فراکتال، قواعد خود را از اشیای طبیعی نتیجه می‌گیرد. اشیا در طبیعت دارای هندسۀ متمایزی هستند که می‌توانند به‌عنوان هندسۀ اقلیدسی در مقیاس کوچک‌تر تعریف شوند. هندسۀ فراکتال به اشیا طبیعی به‌گونه‌ای نگاه می‌کند که از الگوهای خودمتشابه متمایز ساخته شده‌اند. بعد فراکتال^۲ به‌عنوان یک شاخص آماری تعریف شده است که تناسب شی (منظم) با ابعاد جاسازی شده و وابستگی شی نامنظم به مقیاس اندازه‌گیری را توصیف می‌کند (Lopes and Betrouni, 2009). این نوع جدید از هندسۀ غیراقلیدسی، ساختارهای قطعه قطعه شده را قابل اندازه‌گیری می‌کند. الگوهای موجود در هندسۀ فراکتال به نظریه‌ی نفوذی که در آن ذرات از لحاظ تعداد و خواص، برای اشغال فضا درجه‌ی احتمال متفاوتی دارند، ارجاع داده می‌شود. در نظریه‌ی نفوذ، نیروهای مخالف و موافق رشد (فضاهای اشغال شده و نشده) برای ایجاد تعادل تلاش می‌کنند. طی این تلاش برای ایجاد

^۱Fractal Geometry

^۲Fractal Dimension

تعداد، اغلب الگوهای فراکتال با ساختار خود متشابه مجزا ساخته می‌شوند (Essam, 1980). از آنجایی که فلاک‌های شکل‌گرفته حین فرآیند انعقاد ساختار فراکتال دارند، تئوری فراکتال به خوبی ساختار پیچیده‌ی فلاک‌ها را به‌عنوان یک روش جدید کمی توضیح می‌دهد (Jiang and Logan, 1991, Zhu et al, 2009). ساختار فلاک به‌وسیله بعد فراکتال دوبعدی می‌تواند توصیف شود. بعد فراکتال دوبعدی (D_2)، شیب نمودار لگاریتم مساحت در مقابل لگاریتم خواص طولی، طبق رابطه (۶-۳) است.

$$A \sim I^{D_2} \quad \text{رابطه (۶-۳)}$$

در رابطه (۶-۳)، I خواص طولی فلاک (در دایره قطر) و A مساحت فلاک است. در حقیقت D_2 ، مورفولوژی فلاک را در عکس دوبعدی منعکس می‌کند، که می‌تواند مقداری بین ۱ و ۲ داشته باشد (Logan and Kilps 1995, Chakraborti et al, 2000, Yu et al, 2010).

فصل چهارم

نتایج و بحث

۱-۴ مقدمه

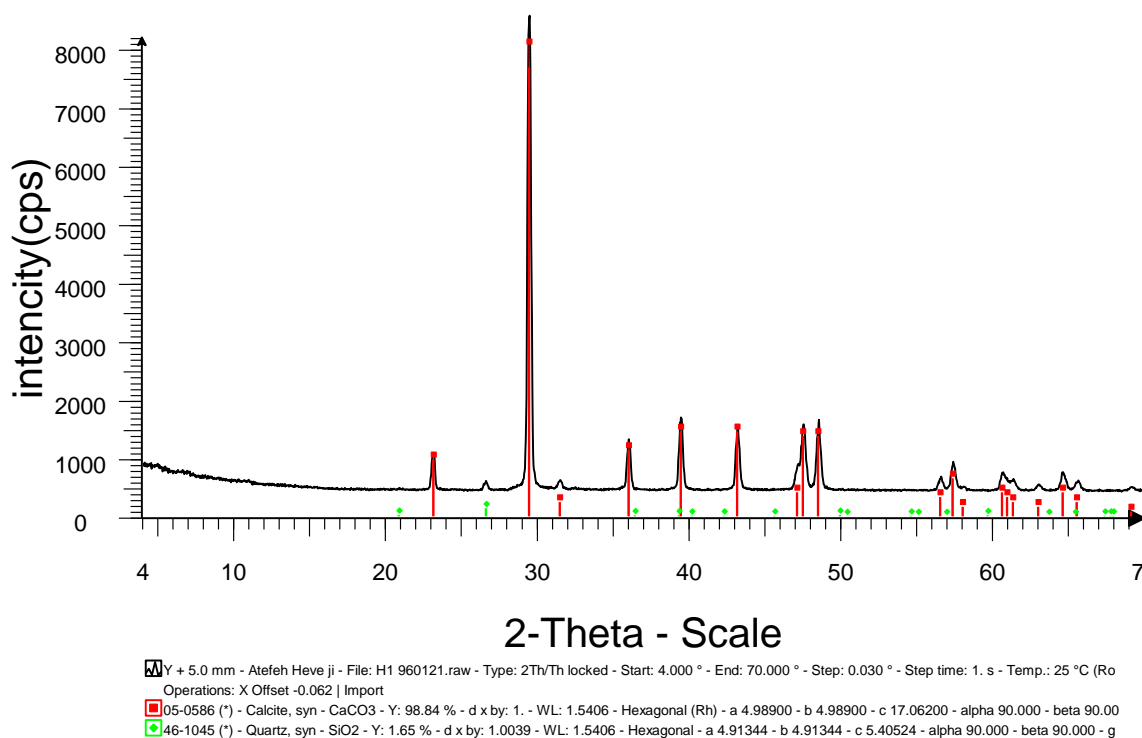
در تحقیق حاضر، اهداف اصلی حذف کدورت از پساب سنگی تراورتن به وسیله منعقدکننده‌های آلومینیوم سولفات و پلی‌آلومینیوم کلراید و بررسی خصوصیات فلاک‌های تشکیل شده در فرآیند انعقاد توسط پردازش تصویر است. در این فصل نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها ارائه و پیرامون این نتایج بحث شده است.

۲-۴ خصوصیات سنگ تراورتن مورد استفاده

ترکیب شیمیایی سنگ مورد نظر با استفاده از XRF بررسی و در جدول ۱-۴ آورده شده است. ترکیب معدنی سنگ نیز با استفاده از XRD بررسی گردید که به ترتیب شامل ۹۸/۸۴٪ کربنات کلسیم و ۱/۶۵٪ کوارتز بود (شکل ۱-۴).

جدول ۱-۴: نتایج XRF سنگ تراورتن مورد استفاده (٪)

۰/۰۵۲	K₂O	۵۵/۲۹۸	CaO
۰/۰۱۵	SrO	۰/۸۷۲	SiO₂
۰/۴۰۸	MgO	۰/۳۴۶	Al₂O₃
۰/۰۹۷	SO₃	۰/۱۸۰	Fe₂O₃
۴۲/۳۹۹	L.O.I	۰/۰۸۴	ZnO



شکل ۴-۱: نتایج XRD سنگ تراورتن مورد استفاده

۳-۴ تأثیر غلظت منعقدکننده بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی پساب

در این بخش غلظت بهینه منعقدکننده جهت حذف کدورت از پساب سنگ تراورتن مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر غلظت آن‌ها بر pH، EC و TDS پساب تحقیق شده است. پارامترهای اولیه پساب تهیه شده در جدول ۴-۲ آورده شده است.

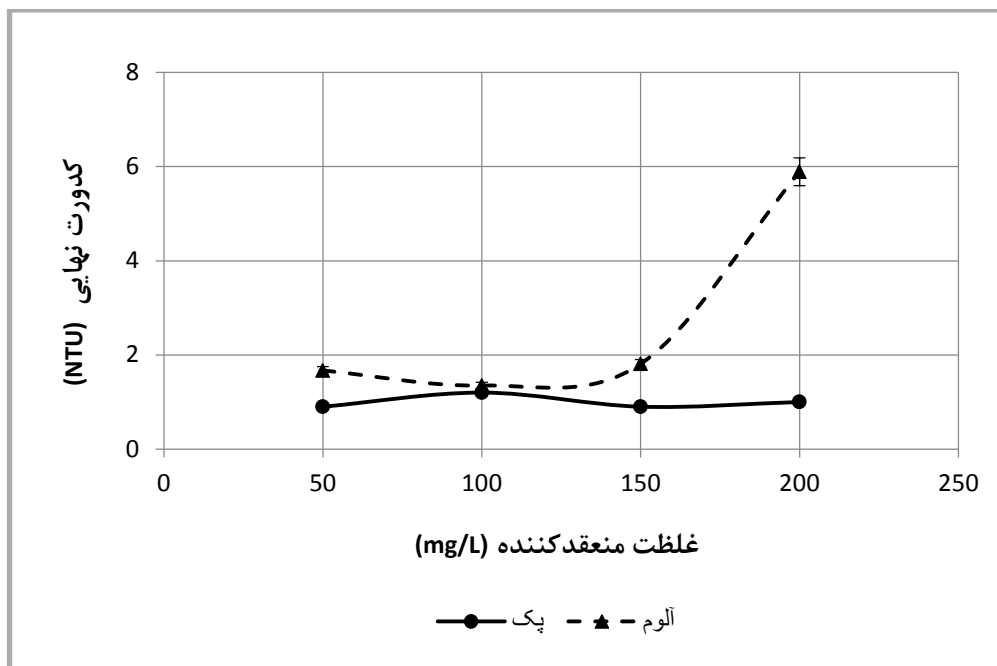
جدول ۴-۲: پارامترهای اولیه پساب فرآوری سنگ تراورتن

TDS (mg/L)	EC ($\mu\text{S/cm}$)	pH	کدورت (NTU)
۶۰	۹۰	۹	۱۱۰

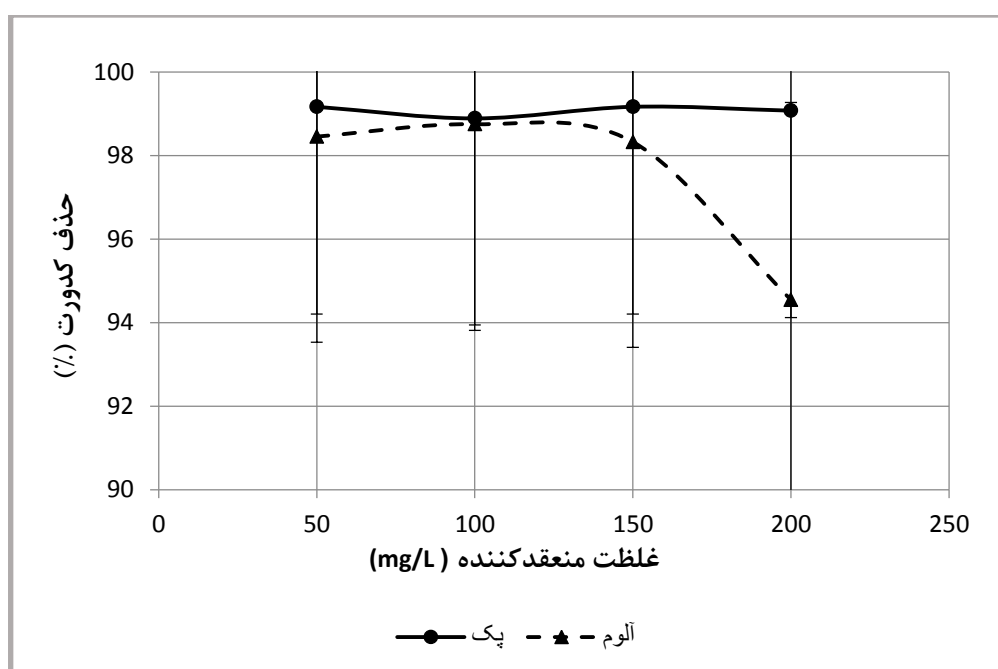
۳-۴-۱ درصد حذف کدورت از پساب سنگ

برای بررسی تأثیر غلظت منعقدکننده pH اولیه پساب معادل ۹ انتخاب گردید (Domopoulou et al ,)

(2015) و چهار غلظت مختلف ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ mg/L از پک و آلوم مورد آزمایش قرار گرفت. شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴، به ترتیب نتایج تأثیر غلظت منعقدکننده بر کدورت نهایی و درصد حذف کدورت را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه‌شده، افزایش غلظت پک از ۱۰۰ mg/L به ۱۵۰ mg/L باعث افزایش ۱ درصد حذف کدورت می‌گردد. افزایش غلظت Alum نیز از ۱۵۰ mg/L به ۲۰۰ mg/L باعث کاهش ۴ درصدی حذف کدورت می‌گردد. از آنجا که این مقادیر بسیار ناچیز است، می‌توان گفت تمامی غلظت‌های پک و آلوم کارایی بالایی در حذف کدورت داشته و میزان کدورت را از ۱۱۰ NTU به ترتیب به محدوده ۰/۷۱-۱/۷۱ NTU و ۵/۸۹ - ۱/۳۵ NTU می‌رساند (حدود ۹۸ درصد حذف کدورت). در واقع می‌توان گفت که بیشترین حذف کدورت از پساب در غلظت ۵۰ mg/L از پک و آلوم صورت پذیرفته است و کدورت نهایی پساب در حد مجاز کدورت در استاندارد آب آشامیدنی (استاندارد ایران ۱۰۵۳) که معادل ۵ NTU است قرار می‌گیرد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت مذکور، عملکرد پک (کدورت نهایی پساب = ۱/۷۱) نسبت به آلوم (کدورت نهایی پساب = ۱/۸۷) بهتر است. کدورت نهایی پساب با استفاده از منعقدکننده پک از غلظت ۵۰ mg/L تا ۱۵۰ mg/L در محدوده مجاز کدورت نهایی (کمتر از ۵ NTU) بوده است. ولی برای منعقدکننده آلوم در غلظت ۲۰۰ mg/L کدورت نهایی پساب برابر با ۶/۹۲ NTU و اندکی از محدوده مجاز بالاتر است، در واقع می‌توان گفت عملکرد آلوم تا غلظت ۱۵۰ mg/L قابل قبول بوده و بعد از این غلظت، کاهش نسبی می‌یابد. در بررسی محققین دیگر نیز کاهش عملکرد آلوم در غلظت‌های بالاتر مشاهده شده است (Ehteshami et al, 2016, Domopoulou et al, 2015).



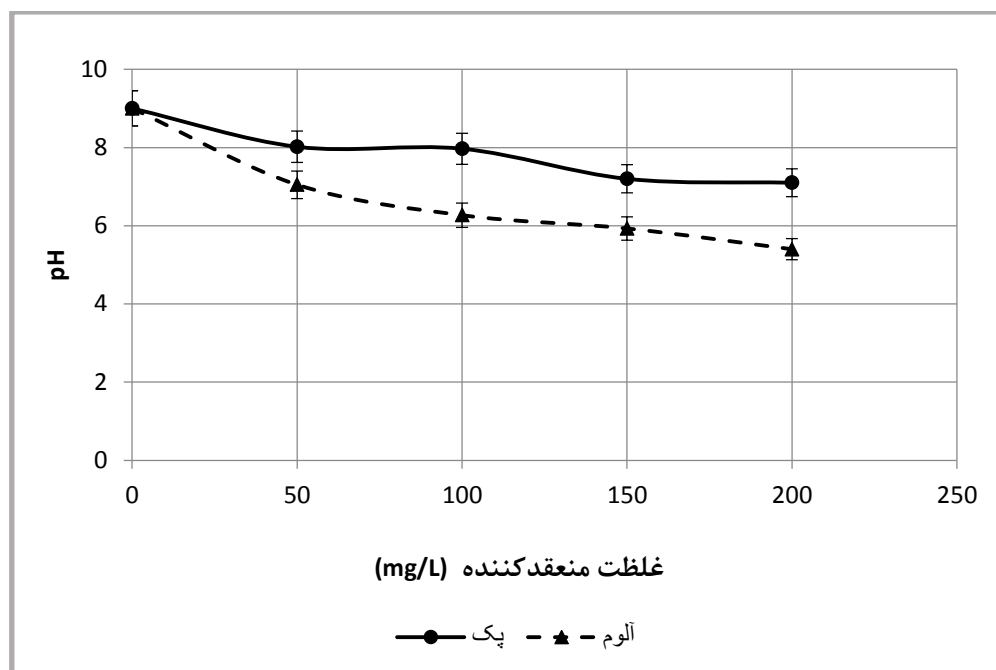
شکل ۴-۲: تأثیر غلظت منعقدکننده بر کدورت نهایی پساب (pH اولیه = ۹ ، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



شکل ۴-۳: تأثیر غلظت منعقدکننده بر درصد حذف کدورت از پساب (pH اولیه = ۹ ، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

۴-۳-۲ pH پساب سنگ

میزان تغییر pH پس از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی اندازه‌گیری شد. در شکل ۴-۴ میزان تغییر این پارامتر در چهار غلظت مختلف منعقدکننده پک و آلوم ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود، در تمامی غلظت‌های منعقدکننده‌های استفاده‌شده، pH اولیه (برابر ۹) کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که هم‌زمان با افزایش غلظت منعقدکننده تغییرات pH نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که pH محلول نهایی پس از استفاده از پک و آلوم در غلظت منعقدکننده ۵۰ mg/L به ترتیب معادل ۸ و ۷ و در غلظت منعقدکننده ۲۰۰ mg/L به ترتیب معادل ۷ و ۵/۵ بوده است. روند تغییرات pH هنگام استفاده از پک در طی فرآیند انعقاد به‌گونه‌ای است که می‌توان نتیجه گرفت، فرآیند تمایل دارد pH پساب را به سمت محدوده خنثی تا کمی قلیایی (pH در محدوده ۷ تا ۸) پیش ببرد. در صورتی که در هنگام استفاده از آلوم در فرآیند انعقاد، pH پساب به سمت خنثی تا کمی اسیدی (pH در محدوده ۵/۵ تا ۷) هدایت می‌شود. این روند در بررسی دیگر محققین نیز گزارش شده است (پیرصاحب و همکاران، ۱۳۹۱، Domopoulou et al, 2015). کاهش pH پساب با استفاده از آلوم پس از فرآیند انعقاد، بدلیل واکنش آلوم با عامل‌های قلیایی مانند کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها بوده است. آلوم حاوی یون سولفات بوده و در فرآیند تصفیه پساب، اسیدسولفوریک تولید کرده و باعث پایین آمدن pH پساب می‌گردد (Theodoro et al, 2013). آلوم و پک هر دو به دلیل داشتن AL^{3+} می‌توانند مانند اسید لوئیس عمل کرده و pH پساب را کاهش دهند (Hashim et al, 2013, Napacho et al, 2010). در واقع تغییر pH در غلظت مشخص از منعقدکننده در صورت استفاده از آلوم بیشتر از پک است که این امر می‌تواند یکی از مزایای استفاده از پک نسبت به آلوم نیز محسوب گردد.

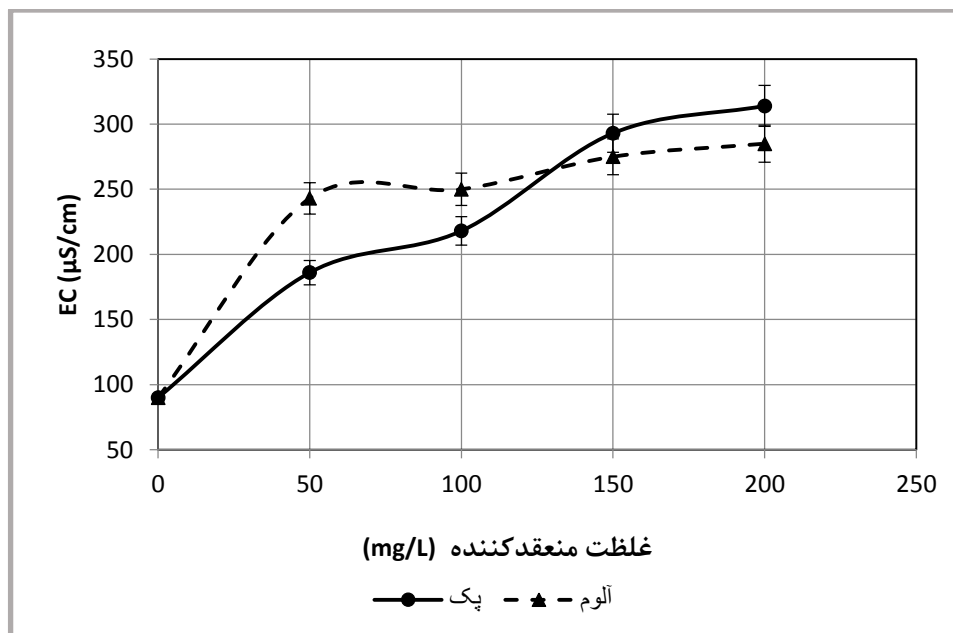


شکل ۴-۴: تأثیر غلظت منعقدکننده بر pH پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

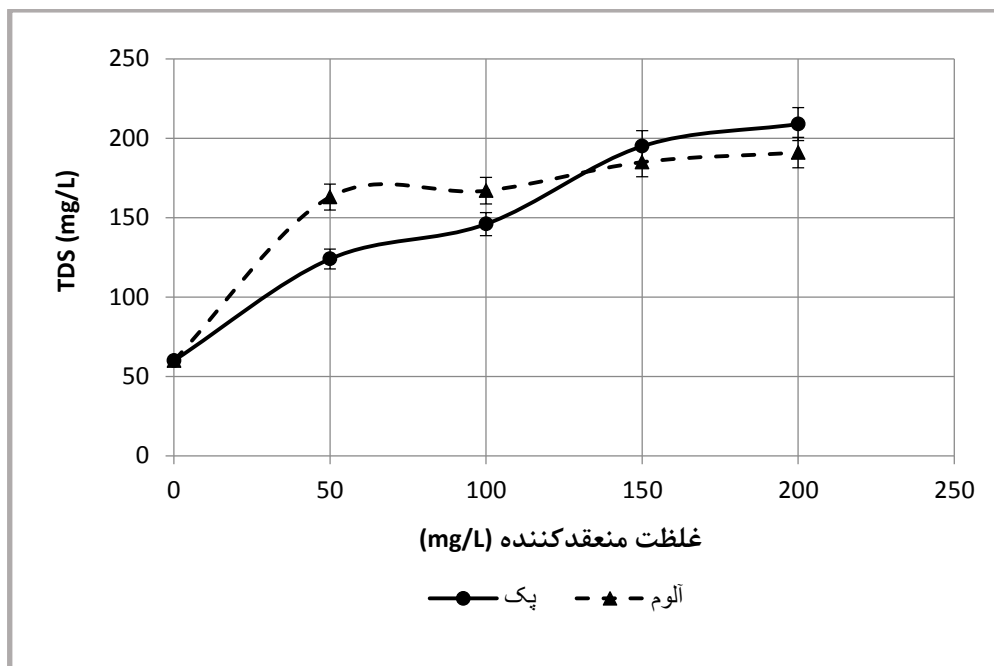
۳-۳-۴ EC و TDS پساب سنگ

نتایج تأثیر غلظت منعقدکننده برای EC (هدایت الکتریکی) و TDS پساب در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ نشان داده شده است. نتایج، افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان EC و TDS پساب با افزودن منعقدکننده و انجام فرآیند انعقاد را نشان می‌دهد. میزان EC پساب نهایی برای منعقدکننده‌های پک و آلوم به ترتیب در محدوده $186-314 \mu\text{S/cm}$ و $243-285 \mu\text{S/cm}$ به دست آمد. میزان TDS پساب نهایی برای منعقدکننده‌های پک و آلوم به ترتیب در محدوده $124-209 \text{ mg/L}$ و $191-163$ به دست آمد. افزایش EC و TDS پس از فرآیند انعقاد، می‌تواند محصول حل شدن منعقدکننده‌های آلوم (سولفات آلومینیوم) و پک (پلی آلومینیوم کلراید) باشد. این روند افزایش EC و TDS پساب نهایی پس از فرآیند انعقاد در پساب حاصل از سنگ مرمر نیز مشاهده گردید (پیرصاحب و همکاران، ۱۳۹۱، Domopoulou et al, 2015). مقدار EC و TDS پساب با افزایش دوز منعقدکننده‌های آلوم و پک افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند به دلیل تشکیل لجن منعقدکننده در

طول فرآیند انعقاد باشد (Choubey et al, 2012, Napacho et al, 2010). شایان ذکر است که در غلظت پایین (۵۰ mg/L) هر دو منعقدکننده بهترین عملکرد را در حذف کدورت داشتند (شکل ۴-۱ و ۴-۲)، اضافه کردن پک نسبت به آلوم به تغییر کمتری در EC و TDS پساب در غلظت مذکور ایجاد کرده است که این امر دیگر مزیت استفاده از پک نسبت به آلوم را روشن می‌سازد.



شکل ۴-۵: تأثیر غلظت منعقدکننده بر هدایت الکتریکی پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU و EC اولیه = ۹۰ μS/cm)

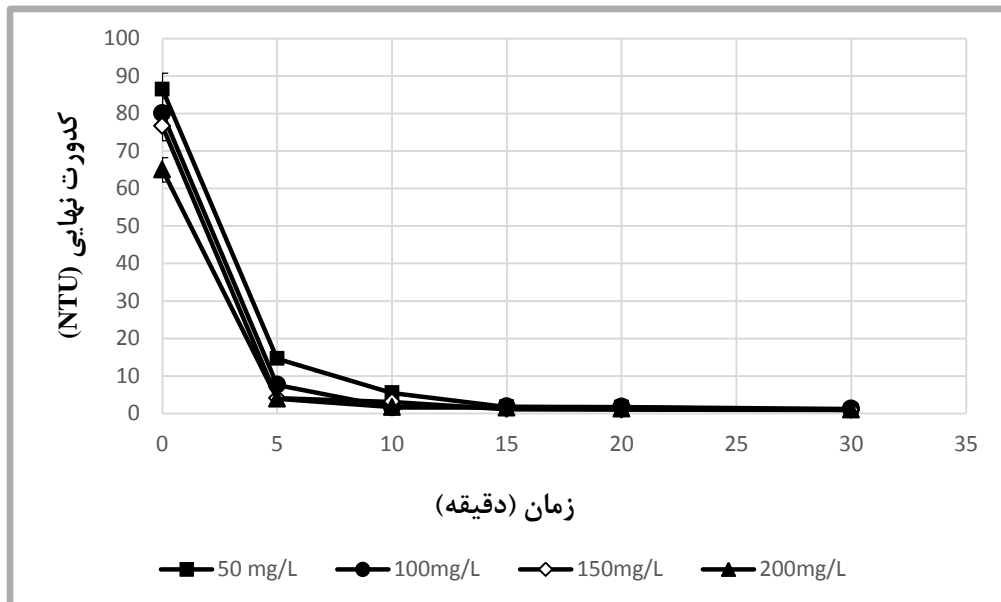


شکل ۴-۶: تأثیر غلظت منعقدکننده بر TDS پساب (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU و TDS اولیه = ۶۰ mg/L)

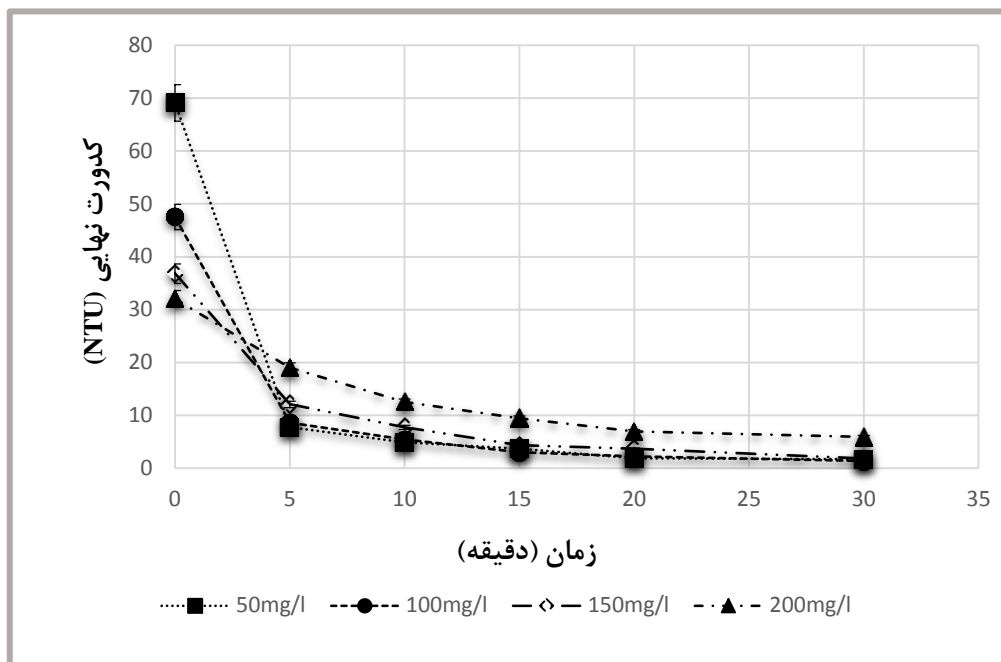
۴-۴ بررسی کینتیک ته‌نشینی فلاک‌ها در فرآیند انعقاد

سرعت حذف کدورت به صورت تابعی از زمان، در غلظت‌های مختلف منعقدکننده پک و آلوم ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ mg/L به ترتیب در شکل ۴-۷ و ۴-۸ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند روند حذف کدورت در ۵ دقیقه اول ته‌نشینی دارای سرعت بالایی بوده و پس از آن از میزان سرعت روند حذف کدورت کاسته می‌شود، به طوری که در بازه‌ی ۵ دقیقه اول میزان درصد حذف کدورت به ترتیب برای منعقدکننده پک و آلوم در غلظت ۱۰۰ mg/L برابر با ۹۳٪ و ۹۲٪ است. در ۲۵ دقیقه‌ی باقی‌مانده تا اتمام فرآیند ته‌نشینی فلاک‌ها (۳۰ دقیقه) به ترتیب برای منعقدکننده پک و آلوم، تنها ۷٪ و ۸٪ حذف کدورت صورت می‌پذیرد. علت سرعت بالای ته‌نشینی در دقایق اول را می‌توان با فرونشست لخته‌های سنگین‌تر مرتبط دانست، درحالی‌که لخته‌های سبک‌تر نیاز به زمان بیشتری جهت فرونشست دارند (Domopoulou et al, 2015).

در پژوهش حاضر با استفاده از اندازه‌گیری کدورت در زمان‌های متفاوت ته‌نشینی برای دو منعقدکننده آلوم و پک، تطابق فرآیند ته‌نشینی فلاک‌ها با دو مدل کینتیکی مرتبه اول و دوم با استفاده از روابط ارائه شده در قسمت ۲-۵ بررسی گردیده است.

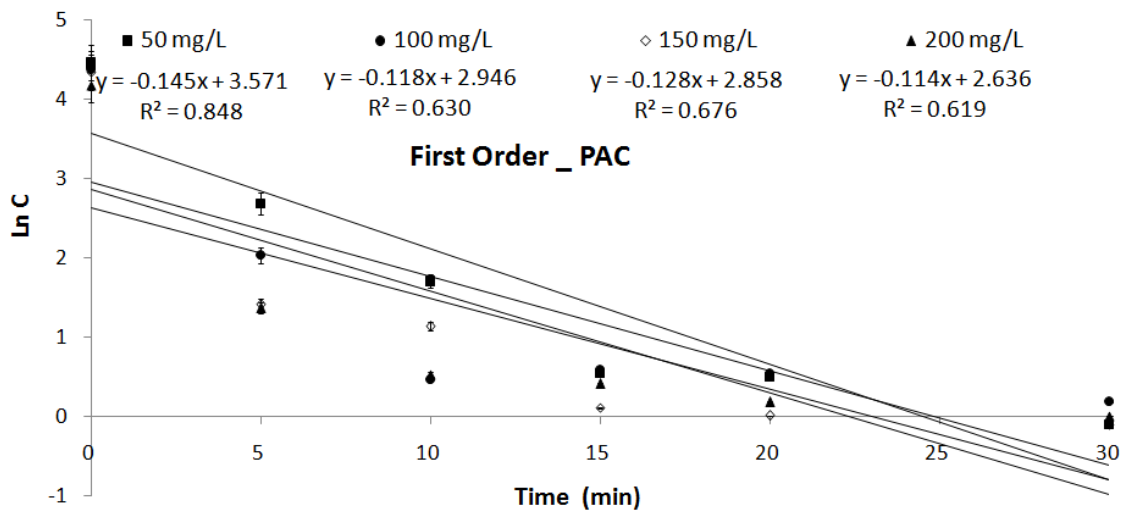


شکل ۴-۷: کینتیک حذف کدورت پساب در غلظت‌های مختلف از منعقدکننده پک (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

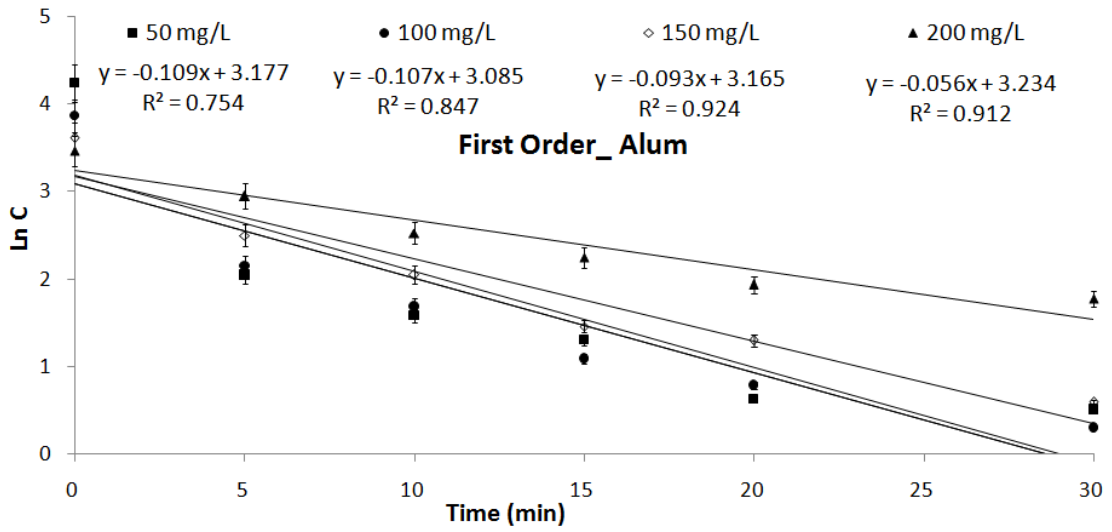


شکل ۴-۸: کینتیک حذف کدورت پساب در غلظت‌های مختلف از منعقدکننده آلوم (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه 110 NTU)

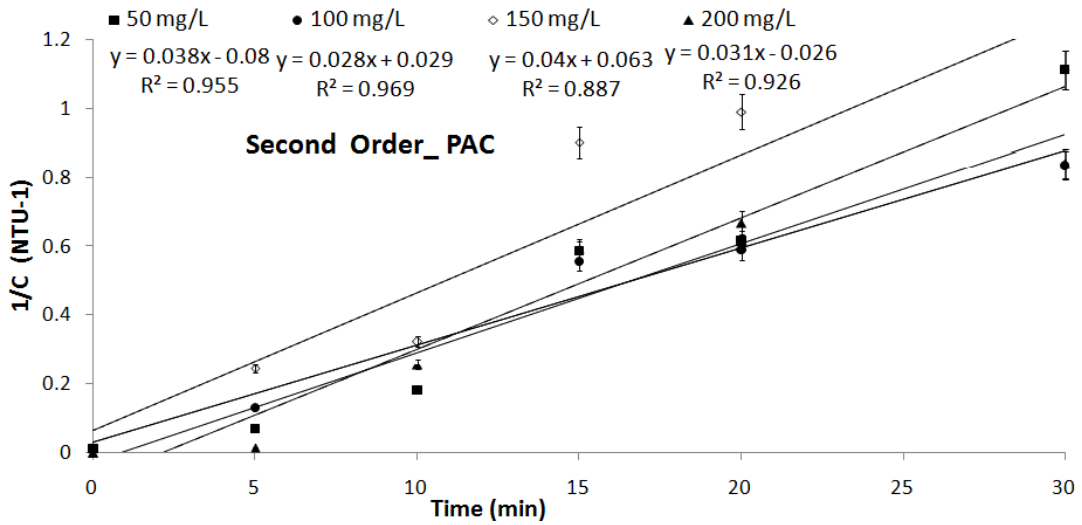
در این قسمت ابتدا نمودارهای ارائه شده برای هر کدام از مدل‌های کینتیک (شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۲) نشان داده شده است. سپس ثابت مدل‌های کینتیک و ضرایب همبستگی آن‌ها در جدول ۴-۳ آورده شده است. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که سرعت ته‌نشینی با توان دوم غلظت رابطه‌ی مستقیم دارد و در واقع ته‌نشینی فلاک‌ها در فرآیند انعقاد به‌وسیله دو منعقدکننده آلوم و پک بیشترین تطابق به ترتیب (۰/۹۵۵ و ۰/۹۴۰) را با مدل کینتیک مرتبه دوم نشان داد (Al-Sameraiy, 2017).



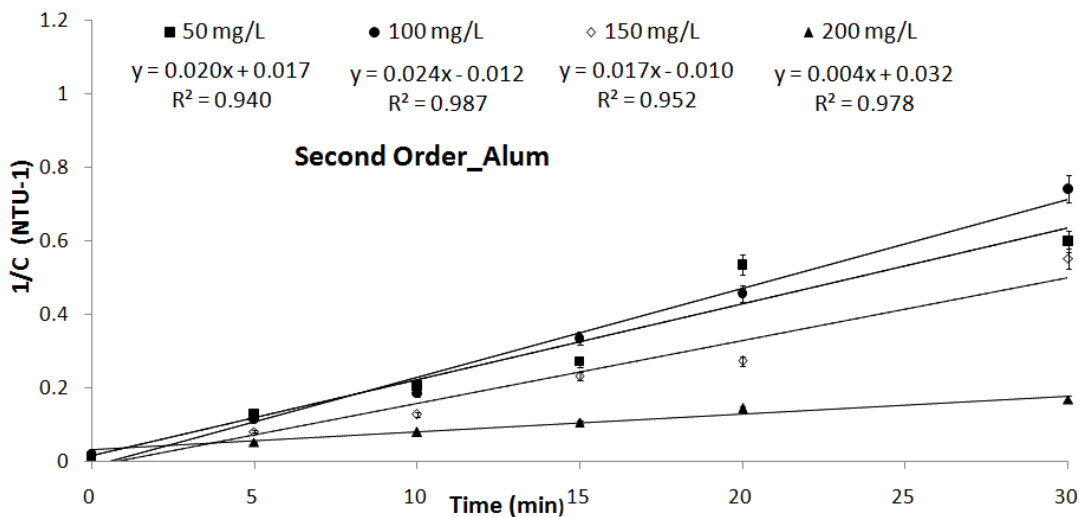
شکل ۴-۹: نمودار کینتیک مرتبه اول برای منعقدکننده پک در غلظت‌های مختلف



شکل ۴-۱۰: نمودار کینتیک مرتبه اول برای منعقدکننده آلوم در غلظت‌های مختلف



شکل ۴-۱۱: نمودار کینتیک مرتبه دوم برای منعقدکننده پک در غلظت‌های مختلف



شکل ۴-۱۲: نمودار کینتیک مرتبه دوم برای منعقدکننده آلوم در غلظت‌های مختلف

جدول ۴-۳: ثابت‌های کینتیک محاسبه‌شده برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در غلظت‌های مختلف

پک				آلوم				منعقدکننده
								غلظت
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	منعقدکننده (mg/L)
۰/۶۱۹	۰/۶۷۶	۰/۶۳۰	۰/۸۴۸	۰/۹۱۲	۰/۹۲۴	۰/۸۴۷	۰/۷۵۴	R^2
۰/۱۱۴	۰/۱۲۸	۰/۱۱۸	۰/۱۴۵	۰/۰۵۶	۰/۰۹۳	۰/۱۰۷	۰/۱۰۹	K (min^{-1})
۰/۹۲۵	۰/۸۸۷	۰/۹۶۹	۰/۹۵۵	۰/۹۷۸	۰/۹۵۲	۰/۹۸۷	۰/۹۴۰	R^2
۰/۰۳۲	۰/۰۴	۰/۰۲۸	۰/۰۳۸	۰/۰۰۴	۰/۰۱۷	۰/۰۲۴	۰/۰۲	K ($\text{NTU}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

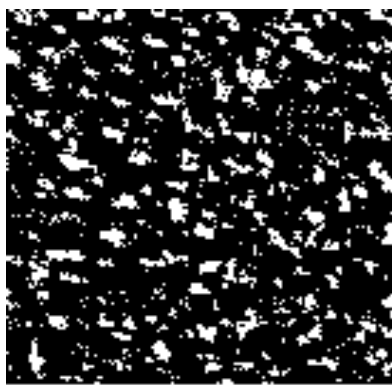
۴-۵ بررسی خصوصیت فلاک‌ها و پردازش تصویر

با افزودن منعقدکننده طی فرآیند انعقاد ماهیت ذرات معلق تغییر و تبدیل به ذره‌ی ناپایدار می‌گردند و در ادامه طی فرآیند لخته‌سازی این ذرات ناپایدار به یکدیگر متصل و فلاک‌ها با شکل بسیار نامنظم و متخلخل تشکیل می‌شوند (Jarvis et al, 2005). خواص فلاک‌ها مانند اندازه و ساختار تأثیر بسزایی بر کارایی فرآیند انعقاد دارد (Yu et al, 2009). ساختار فلاک‌ها به دلیل شکست و تشکیل مجدد اتصالات داخلی فلاک طی فرآیند انعقاد پیوسته تغییر می‌کند (Biggs and Lent, 2000). در فرآیند انعقاد تا حد امکان بایستی از شکست فلاک‌ها جلوگیری شود، ولی در عمل، شکست و رشد دوباره فلاک‌ها اتفاق می‌افتد (Rossini et al, 1999, McCurdy et al, 2004, Jarvis et al, 2005). طبق پژوهش بولر و همکاران در سال ۱۹۹۸، ذرات بزرگ‌تر نسبت به کوچک‌تر خواص ته‌نشینی بهتری داشته که به تأثیر اندازه و ساختار فلاک بر کارایی انعقاد اشاره می‌کند (Boler and Blaser, 1998). خصوصیات فلاک‌ها از طریق تصاویر آن‌ها، (شکل‌های ۴-۱۳ تا ۴-۱۶) در زمان ته‌نشینی پس از انجام فرآیند انعقاد توسط دو منعقدکننده آلوم و پک بررسی و مقایسه گردید. همچنین پس از انجام کامل فرآیند ته‌نشینی (۳۰ دقیقه)، دوباره فلاک‌های تولید شده به‌طور آهسته با سرعت ۶۰ rpm در زمان ۱۰ دقیقه به هم زده شدند که این امر باعث شکستن فلاک‌ها و چسبیدن دوباره آن‌ها و تغییر اندازه فلاک‌ها گردید. کلیه خصوصیات ذکرشده برای فلاک‌ها قبل و پس از شکست مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

۴-۵-۱ تصویر فلاک‌های ایجاد شده در فرآیند انعقاد در زمان ته‌نشینی

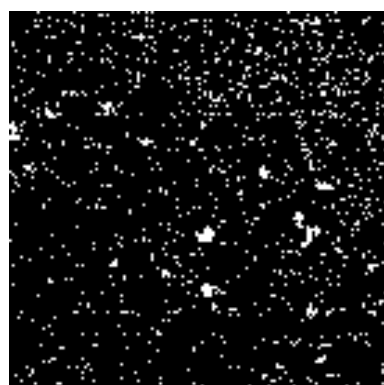
تصاویر فلاک‌ها در زمان ته‌نشینی پس از فرآیند انعقاد توسط دو منعقدکننده آلوم قبل و بعد از شکست فلاک‌ها (به ترتیب شکل‌های ۴-۱۵ و ۴-۱۶) و پک قبل و بعد از شکست فلاک‌ها (به ترتیب شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴) مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تصاویر نشان از ته‌نشینی سریع فلاک‌ها در ۱۰ دقیقه اول دارد. مقایسه تصاویر فلاک‌ها در شروع ته‌نشینی بین دو منعقدکننده پک و

آلوم (شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۵) بزرگتر بودن فلاک‌ها در هنگام استفاده از پک را آشکار می‌سازد که این امر می‌تواند باعث افزایش سرعت ته‌نشینی فلاک‌ها و کاهش زمان لازم جهت ته‌نشینی آن‌ها گردد که خود یکی از مزایای استفاده از پک به جای آلوم در فرآیند انعقاد و حذف کدورت از پساب سنگ را آشکار می‌سازد. همچنین مقایسه تصاویر فلاک‌ها قبل و پس از شکست برای هر منعقدکننده نشان می‌دهد که فلاک‌های تولیدشده پس از شکست کوچکتر بوده‌اند (Yu et al, 2010). فلاک‌های موجود در تصاویر برداشت‌شده از پساب در انتهای زمان ته‌نشینی و پس از گذشت ۳۰ دقیقه نشان می‌دهد که مقداری کدورت در انتهای زمان ته‌نشینی هنوز در پساب باقی مانده است. فلاک‌های باقی مانده به دلیل ریز و سبک بودن امکان ته‌نشست را نداشته و به صورت شناور در پساب باقی می‌مانند. اندازه‌ی فلاک‌های باقی‌مانده پس از ۳۰ دقیقه و کدورت ناشی از آن‌ها در ادامه بررسی گردیده است. شایان ذکر می‌باشد که وجود فلاک‌ها پس از پایان زمان ته‌نشینی در پژوهش‌های دیگر محققین نیز گزارش شده است (Nan et al, 2016, Xiao et al, 2011).



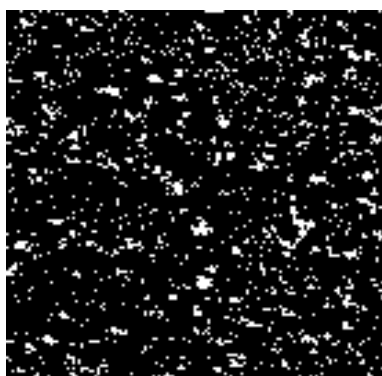
1mm

الف



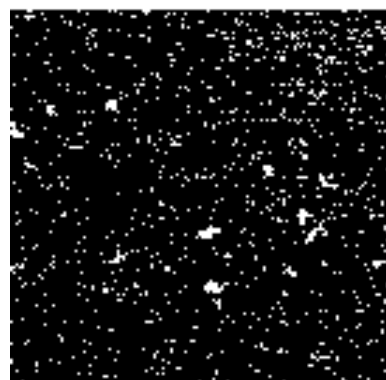
1mm

د



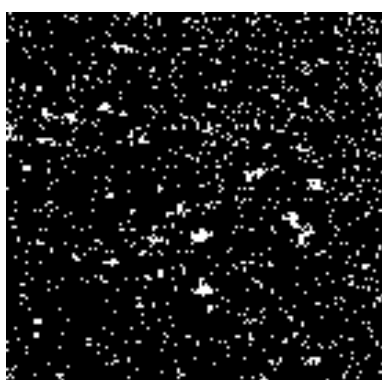
1mm

ب



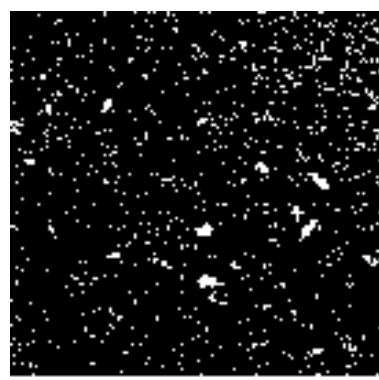
1mm

ذ



1mm

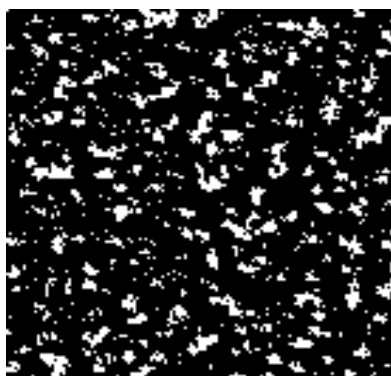
ج



1mm

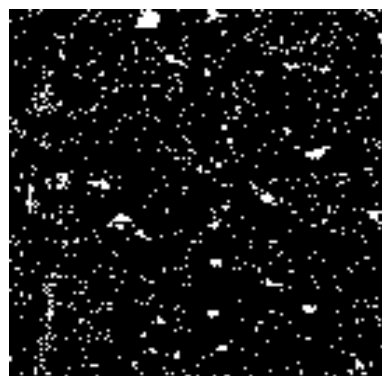
ر

شکل ۴-۱۳: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده قبل از شکست با استفاده از منعقدکننده پک در زمان‌های مختلف ته‌نشینی،
الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ذ: دقیقه‌ی ۲۰، ز: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹،
کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



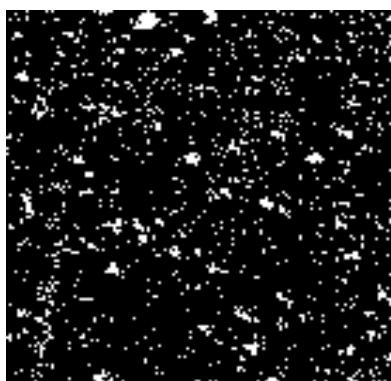
1mm

الف



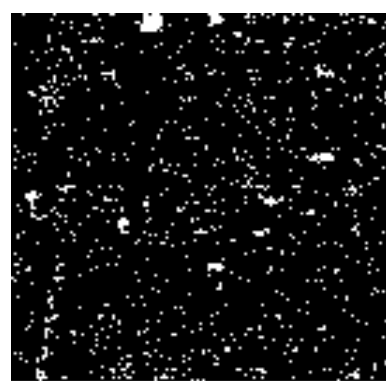
1mm

د



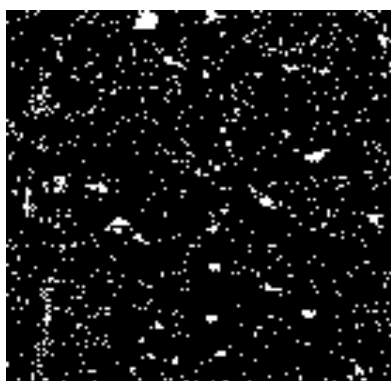
1mm

ب



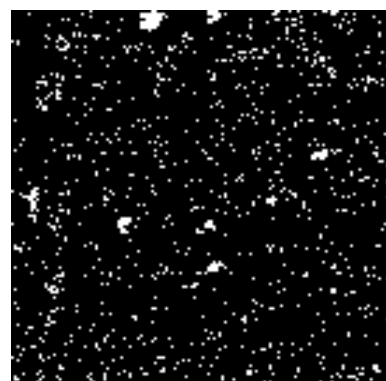
1mm

ز



1mm

ج



1mm

ر

شکل ۴-۱۴: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده بعد از شکست با استفاده از منعقدکننده پک در زمان‌های مختلف ته‌نشینی،

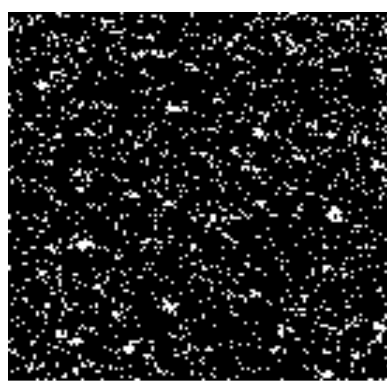
الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ز: دقیقه‌ی ۲۰، ر: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹،

کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



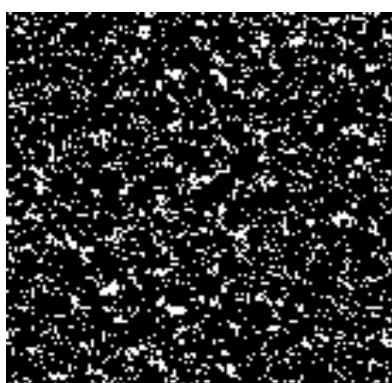
1mm

الف



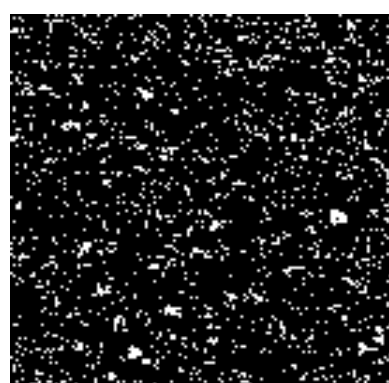
1mm

د



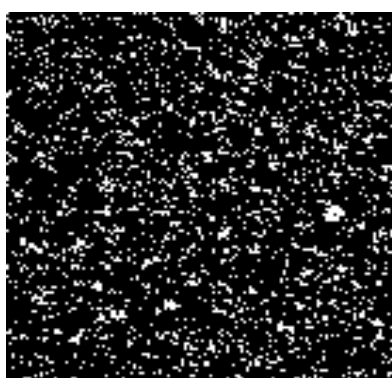
1mm

ب



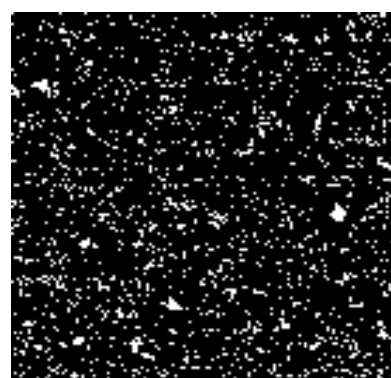
1mm

ذ



1mm

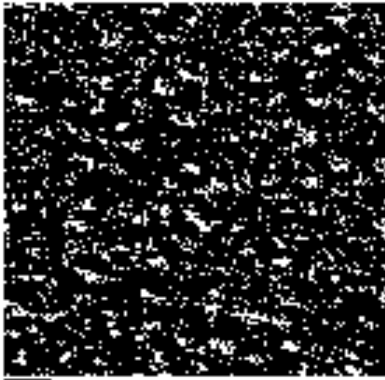
ج



1mm

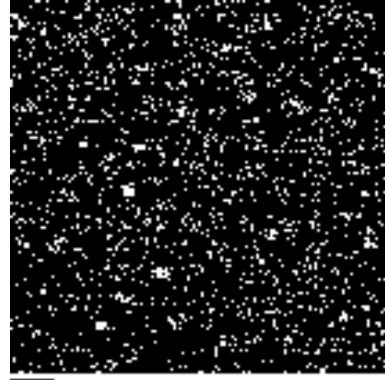
ر

شکل ۴-۱۵: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده قبل از شکست با استفاده از منعقدکننده آلوم در زمان‌های مختلف ته‌نشینی،
الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ذ: دقیقه‌ی ۲۰، ر: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹،
کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



1mm

الف



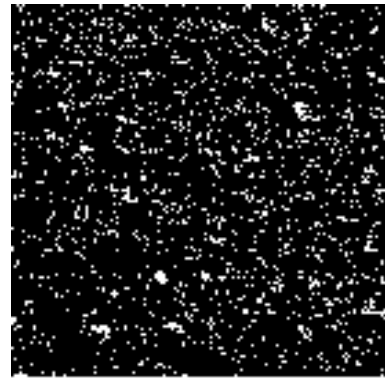
1mm

ب



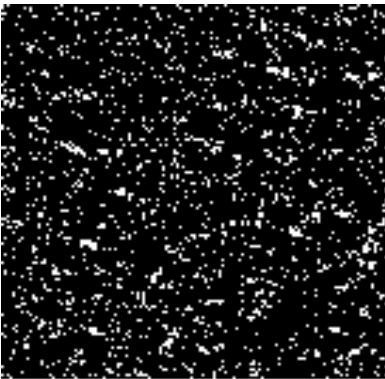
1mm

ج



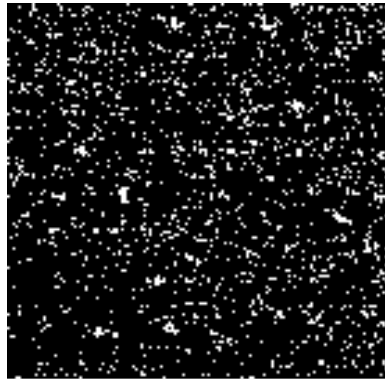
1mm

د



1mm

هـ



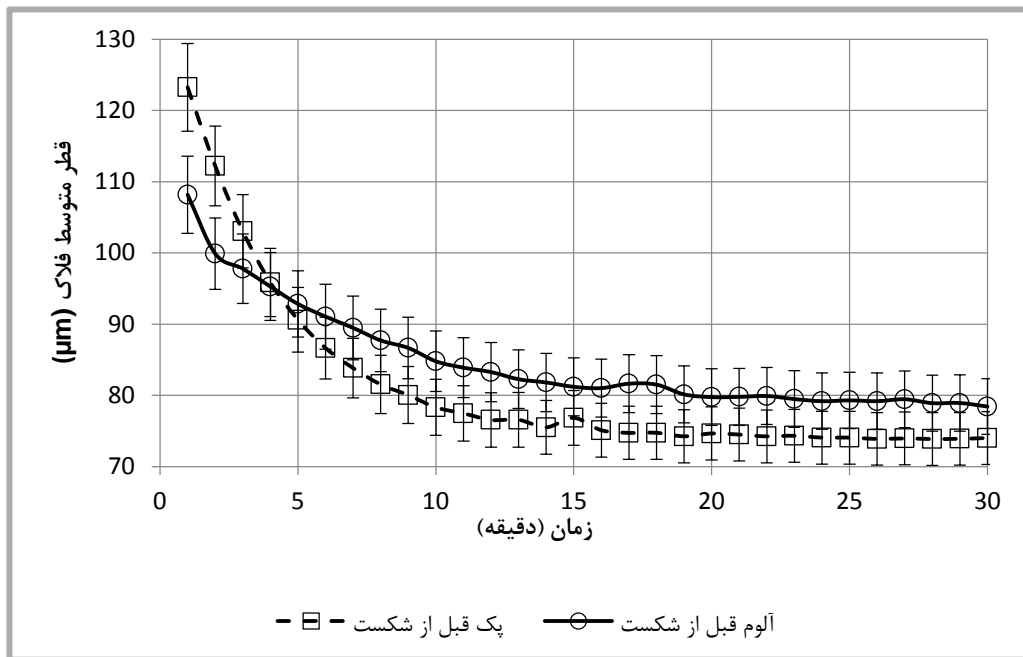
1mm

و

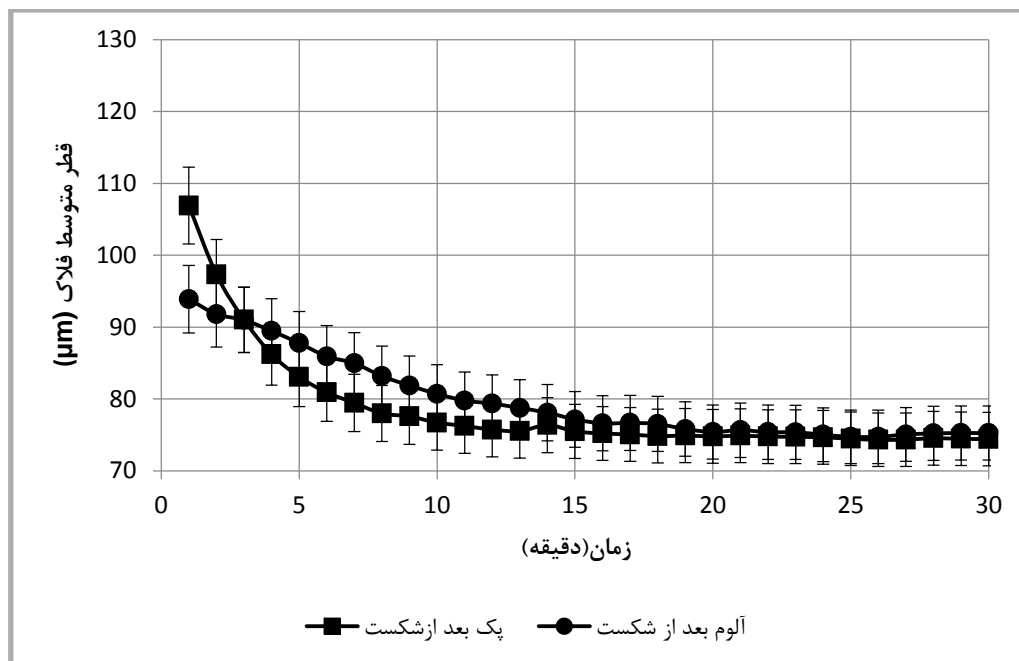
شکل ۴-۱۶: تصاویر فلاک‌های ایجاد شده بعد از شکست با استفاده از منعقدکننده آلوم در زمان‌های مختلف ته‌نشینی،
الف: دقیقه‌ی ۰، ب: دقیقه‌ی ۵، ج: دقیقه‌ی ۱۰، د: دقیقه‌ی ۱۵، ز: دقیقه‌ی ۲۰، ر: دقیقه‌ی ۳۰ (pH اولیه = ۹،
کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

۴-۵-۲ قطر متوسط فلاک‌ها

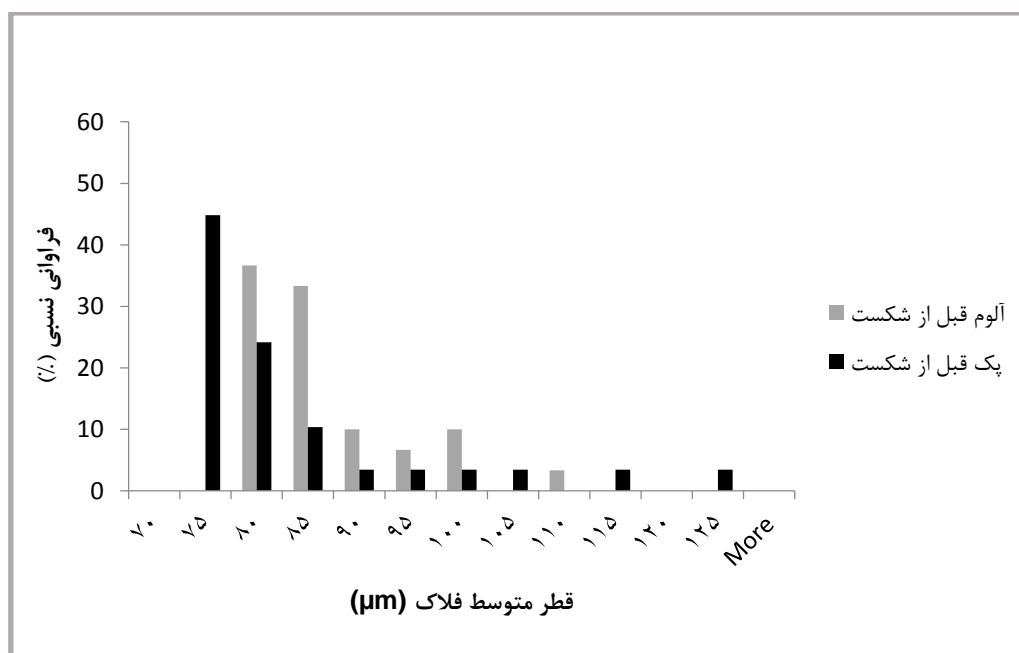
قطر متوسط فلاک‌ها که از پردازش تصویر به دست آمد، به صورت تابعی از زمان برای دو منعقدکننده-ی پک و آلوم، در تهنشینی قبل و پس از شکست به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ و نمودار فراوانی قطر متوسط فلاک‌ها نیز به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ ارائه شده است.



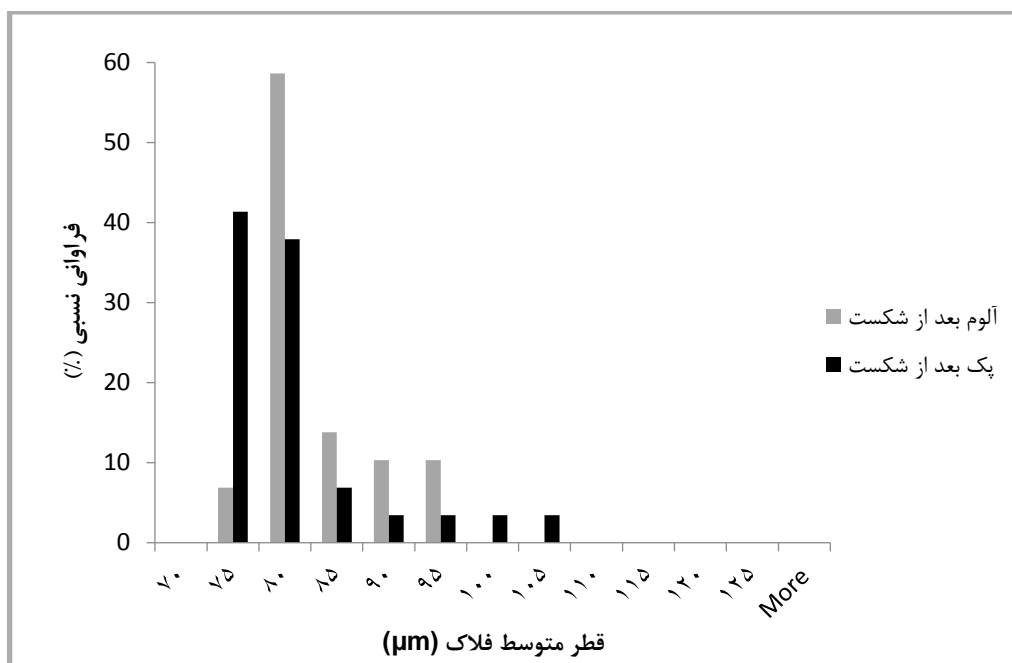
شکل ۴-۱۷: تغییرات قطر متوسط فلاک نسبت به زمان برای منعقدکننده‌ی آلوم و پک در تهنشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



شکل ۴-۱۸: تغییرات قطر متوسط فلاک نسبت به زمان برای منعقدکننده‌ی آلوم و پک در ته‌نشینی بعد از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



شکل ۴-۱۹: فراوانی قطر متوسط فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در تمام زمان ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



شکل ۴-۲۰: فراوانی قطر متوسط فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در تمام زمان ته‌نشینی بعد از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

در جدول ۴-۴ کدورت و قطر متوسط فلاک‌ها قبل از شکست برای منعقدکننده‌ی پک و آلوم در زمان‌های مختلف ته‌نشینی و در جدول ۵-۴ توزیع قطر متوسط فلاک‌های آلوم و پک، قبل و بعد از شکست نشان داده شده است.

جدول ۴-۴: کدورت و قطر متوسط فلاک‌های حاصل از استفاده از آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

زمان ته‌نشینی (دقیقه)	پک (۵۰ mg/L)		آلوم (۵۰ mg/L)	
	کدورت (NTU)	قطر متوسط فلاک (μm)	کدورت (NTU)	قطر متوسط فلاک (μm)
۰	۸۶/۴	۱۲۳/۲۴	۷۰	۱۰۸/۱۶
۵	۱۴/۶	۹۰/۶۱	۷/۷۴	۹۲/۸۳
۱۰	۵/۴۹	۷۸/۳۲	۴/۸۵	۸۴/۷۹
۱۵	۱/۷۱	۷۶/۸۴	۳/۶۸	۸۱/۲۰
۲۰	۱/۶۳	۷۴/۶۵	۱/۸۷	۷۹/۷۶
۳۰	۰/۹	۷۴/۰۱۵	۱/۶۷	۷۸/۴۳

جدول ۴-۵: توزیع قطر متوسط فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی قبل و پس از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

	پک		آلوم	
	قبل از شکست	پس از شکست	قبل از شکست	پس از شکست
میانگین (μm)	۸۱/۱	۷۸/۶	۸۴/۵	۷۹/۷
Stdev	۱۲/۳	۷/۶	۷/۴	۵/۸
Kurtosis	۴/۹	۶/۹	۲/۴	۰/۱۵
Skewness	۲/۳	۲/۶	۱/۷	۱/۲
حداقل (μm)	۷۳/۹	۷۴/۳	۷۸/۴	۷۴/۷
حداکثر (μm)	۱۲۳/۲	۱۰۶/۹	۱۰۸/۲	۹۳/۹

با توجه نتایج (جدول ۴-۴) قطر متوسط فلاک‌ها قبل از شکست، برای هر دو منعقدکننده‌ی پک و آلوم تا دقیقه‌ی ۱۵ کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و در این بازه‌ی زمانی قطر متوسط فلاک‌ها، به ترتیب در محدوده ۱۲۳/۲۴ - ۷۶/۸۴ و ۱۰۸/۱۶ - ۸۱/۲ میکرومتر بوده است. ولی از دقیقه‌ی ۱۵ تا انتهای آزمایش قطر متوسط فلاک‌ها کاهش ناچیزی داشته و برای منعقدکننده‌های آلوم و پک به ترتیب در محدوده ۷۶/۸۴ - ۷۴/۰۱۵ و ۸۱/۲ - ۷۸/۴۳ میکرومتر بوده است. تغییرات کدورت پساب نیز برای پک و آلوم در ته‌نشینی روند مشابهی را با تغییرات قطر متوسط فلاک‌ها نشان می‌دهد و در ۱۵ دقیقه‌ی ابتدایی به ترتیب در محدوده ۸۶/۴ NTU - ۱/۷۱ و ۷۰ - ۳/۶۸ NTU و از دقیقه‌ی ۱۵ تا انتهای آزمایش به ترتیب در محدوده ۱/۷۱ NTU - ۰/۹ و ۳/۶۸ NTU - ۱/۶۷ بوده است. عامل ایجاد کدورت پس از گذشت زمان ته‌نشینی (۳۰ دقیقه)، فلاک‌های باقی مانده در پساب بوده است که تصاویر ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ این امر را تایید می‌نمایند.

اندازه‌ی فلاک‌های تولید شده قبل و بعد از شکست به وسیله دو منعقدکننده‌ی آلوم و پک، از ابتدا تا دقیقه‌ی ۱۵ با یکدیگر متفاوت ولی در ادامه‌ی ته‌نشینی، تقریباً با یکدیگر یکسان می‌شود. دلیل این امر را می‌توان چنین توجیه کرد که در ۱۵ دقیقه‌ی اولیه ته‌نشینی اندازه فلاک‌ها بزرگ‌تر و کدورت پساب بیشتر است. لذا عملکرد متفاوت دو منعقدکننده در فرآیند انعقاد، باعث ایجاد فلاک با اندازه-

های متفاوت می‌شود، ولی در ادامه به دلیل باقی ماندن فلاک‌های با اندازه‌ی ریز، اندازه‌ی فلاک‌های تولیدشده توسط هر دو منعقدکننده شباهت بیشتری به هم دارند و تقریباً اندازه‌ی یکسانی با یکدیگر داشته‌اند.

همچنین نتایج (جدول ۴-۴) نشان می‌دهند در شروع ته‌نشینی اندازه‌ی فلاک‌های پک نسبت به آلوم بزرگ‌تر و با توجه به اندازه‌ی بزرگ‌تر فلاک‌ها، کدورت پساب در هنگام استفاده از پک نسبت به آلوم بیشتر است؛ بنابراین فلاک‌های پک نسبت به آلوم، به دلیل اندازه بزرگ‌تر در شروع ته‌نشینی، سریع‌تر ته‌نشین شده و پس از ۱۵ دقیقه ته‌نشینی کدورت پساب با استفاده از پک (۱/۷ NTU) نسبت به آلوم (۳/۶۸ NTU) کاهش یافته و اندازه فلاک‌های پک نسبت به آلوم کوچک‌تر می‌شود. با توجه به روند تغییرات کدورت و قطر متوسط می‌توان نتیجه گرفت، که استفاده از پک نسبت به آلوم برتری دارد، چون با استفاده از پک سرعت ته‌نشینی فلاک‌ها بالاتر، کدورت نهایی پساب پایین‌تر و اندازه‌ی نهایی فلاک‌های باقی‌مانده در پساب پس از پایان ته‌نشینی کوچک‌تر است. در شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ نیز روند تغییر قطر فلاک‌های ته‌نشینی قبل و پس از شکست برای هر دو منعقدکننده‌ی پک و آلوم تا دقیقه‌ی ۱۵ کاهش یافته و در ادامه ته‌نشینی تقریباً ثابت می‌گردد.

اندازه‌ی فلاک‌های هر دو منعقدکننده در ته‌نشینی بعد از شکست (شکل ۴-۱۸) نسبت به ته‌نشینی قبل از شکست (شکل ۴-۱۷) کاهش می‌یابد (Spicer and Pratsinis, 1996, Francois, 1987). روند تغییر اندازه فلاک‌ها، بعد از شکست اولیه آن‌ها خیلی آهسته‌تر می‌شود؛ بنابراین همان‌طور که توسط محققین دیگر نیز پیشنهاد شده است (Parker et al, 1976, Ayazi Shamlou et al, 1994, Biggs and Lant, 2000) شکست فلاک‌ها ممکن است به دو مرحله تقسیم گردد: در مرحله‌ی اول، شکست سریع فلاک‌ها غالب است. در مرحله‌ی بعدی شکست، تغییر آهسته‌تر (ملایم‌تر) اندازه فلاک‌ها احتمالاً به دلیل فرسایش فلاک‌ها است.

طی فرآیند انعقاد در صورتی که مکانیسم خنثی‌سازی بار غالب باشد، اندازه‌ی فلاک‌ها بعد از شکست تغییر نکرده و برابر با اندازه‌ی اولیه آن‌ها خواهد بود. در حالی که اگر مکانیسم انعقاد جاروگونه یا

جذب غالب باشد، اندازه‌ی فلاک‌ها بعد از شکست کاهش می‌یابد (Yu et al, 2010). مکانیسم غالب برای پک در دوز پایین مکانیسم انعقاد خنثی‌سازی بار و در دوز بالا مکانیسم انعقاد جاروگونه است (Lin et al, 2014)؛ لذا این استنباط که مکانیسم غالب طی فرآیند انعقاد جاروگونه است قابل قبول به نظر می‌رسد. منعقدکننده (پک) در مکانیسم انعقاد جاروگونه قادر به خنثی‌سازی کامل بار منفی ذرات نیست (Xu et al, 2010). به این معنی که فلاک‌ها قبل از شکست بار مشابهی داشتند و خنثی نبودند. برای فلاک‌های شکسته، بار سطحی فلاک‌ها احتمالاً باعث دافعه‌ی متقابل بین آن‌ها می‌شود (Lin et al, 2013)؛ بنابراین بار فلاک‌های شکسته، از رشد دوباره آن‌ها جلوگیری کرده و در نتیجه رشد کاملی از فلاک‌ها مشاهده نمی‌گردد. علاوه بر این اتصالات داخلی فلاک‌ها، تحت مکانیسم خنثی‌سازی بار به‌وسیله واکنش‌های فیزیکی شکل گرفته‌اند، در حالی که اتصالات شیمیایی، برای تشکیل فلاک‌ها تحت مکانیسم انعقاد جاروگونه نقش مهمی دارند. در مکانیسم انعقاد جاروگونه، با توجه به شکست و رشد دوباره فلاک‌ها مکان‌های واکنش‌پذیری احتمالی در فلاک‌ها کمتر می‌شود، که منجر به کاهش اتصالات شیمیایی در فلاک‌ها می‌گردد و دلیل دیگری برای رشد محدود فلاک‌ها پس از شکست است (Yukselen and Gregory, 2002).

با توجه به اشکال ۴-۱۷ و ۴-۱۸ در ته‌نشینی قبل و بعد از شکست برای هر دو منعقدکننده آلوم و پک، ظرفیت شکست فلاک‌ها تا اندازه حدودی ۷۶ میکرومتر بوده و کاهشی بیشتر از این مشاهده نمی‌شود. نتایج معلوم می‌سازند که فلاک‌های بزرگ‌تر در مقایسه با فلاک‌های کوچک‌تر دامنه شکست متفاوتی دارند. این امر می‌تواند این‌گونه تفسیر گردد که فلاک‌های کوچک‌تر به دلیل جذب درون جریان گردابی کمتر تحت تأثیر شکست قرار می‌گیرند و به دلیل تراکم بالا در مقابل شکست مقاوم هستند. در حالی که فلاک‌های بزرگ‌تر به دلیل مقیاس میکروسکوپی جریان گردابی به‌شدت تحت تأثیر شکست قرار می‌گیرند و به تعداد زیادی فلاک کوچک شکسته می‌شوند (Jarvis et al, 2005). با توجه به جدول ۴-۵ حداکثر اندازه‌ی فلاک‌ها در هنگام استفاده از پک نسبت به آلوم بیشتر است، ولی میانگین و حداقل اندازه فلاک‌های پک نسبت به آلوم کم‌تر است. در نتیجه در ته‌نشینی پک

فلاک‌ها با اندازه‌ی کمتر، فراوانی یا تعداد بیشتری (اشکال ۴-۱۹ و ۴-۲۰) دارند. همچنین در این جدول در ته‌نشینی قبل و پس از شکست انحراف معیار فلاک‌های پک نسبت به آلوم بیشتر است. کشیدگی (Kurtosis) همواره با توزیع نرمال مقیاس می‌شود و Skewness نشان‌دهنده‌ی چولگی (میزان کجی نمودار) است. با توجه به مثبت بودن چولگی در همه‌ی زمان‌های ته‌نشینی، می‌توان نتیجه گرفت نمودار توزیع قطر متوسط فلاک‌ها چوله به سمت چپ دارد، به این معنی که با افزایش زمان قطر متوسط کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به کشیدگی قطر متوسط فلاک‌های پک کشیده‌تر از نرمال و آلوم کوتاه‌تر از نرمال است.

۴-۵-۳ تغییرات بعد فراکتال

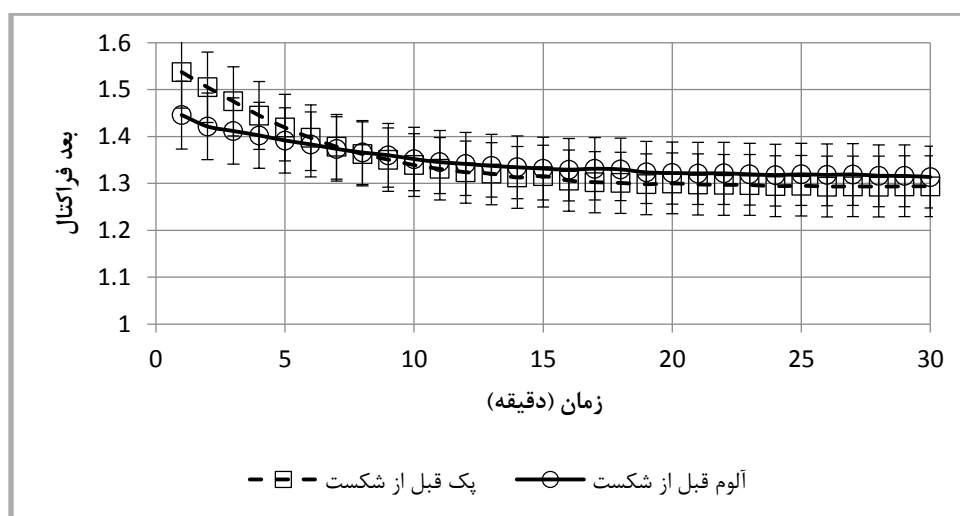
تئوری فراکتال به‌خوبی ساختار پیچیده‌ی فلاک را به‌عنوان یک روش جدید کمی توضیح می‌دهد، چون فلاک‌های شکل گرفته حین فرآیند انعقاد ساختار فراکتال دارند (Jiang and Logan, 1991; Zhu et al, 2009). ساختار فلاک بوسیله بعد فراکتال دوبعدی می‌تواند توصیف شود. بعد فراکتال دوبعدی (D_2) شیب نمودار لگاریتم مساحت در مقابل لگاریتم خواص طولی، طبق رابطه (۴-۱) است:

$$A \sim I^{D_2} \quad \text{رابطه (۴-۱)}$$

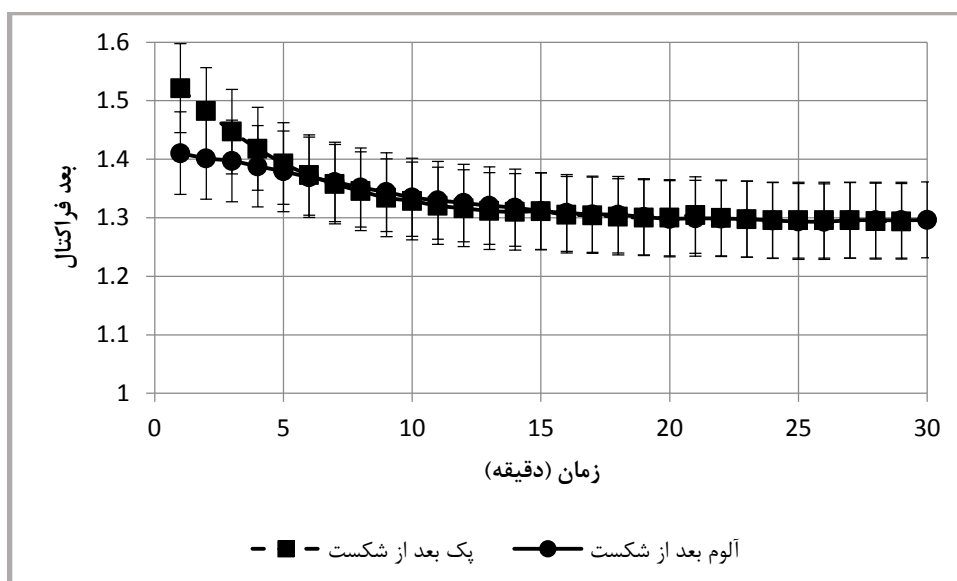
D_2 مورفولوژی فلاک را در عکس دوبعدی منعکس می‌کند، که می‌تواند مقداری بین ۱ و ۲ داشته باشد. مقدار بزرگ‌تر D_2 نشان می‌دهد که ساختار فلاک فشرده است. در حالی که فلاک با ساختار بسیار منشعب و متخلخل زمانی که D_2 کمتر است، شکل می‌گیرد. $D_2 = ۲$ اشاره به ساختار کروی و $D_2 = ۱$ اشاره به ساختار خطی دارد (Logan and Kilps 1995; Chakraborti et al, 2000; Yu et al, 2010).

بعد فراکتال فلاک‌ها در ته‌نشینی قبل و بعد از شکست، برای منعقدکننده‌های پک و آلوم به‌ترتیب در شکل ۴-۲۱ و ۴-۲۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، بعد فراکتال با گذشت زمان کاهش می‌یابد. بعد فراکتال برای منعقدکننده‌ی آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست به‌ترتیب در بازه ۱/۳-۱/۴۳ و ۱/۳-۱/۵۳ به‌دست‌آمد. همچنین بعد فراکتال برای منعقدکننده آلوم و

پک در ته‌نشینی پس از شکست به ترتیب در بازه $1/3-1/4$ و $1/3-1/5$ به دست آمد. با توجه به کاهش بعد فراکتال با زمان می‌توان پی برد، ابتدا ذرات با شکل نزدیک‌تر به کره (با بعد فراکتال بیشتر) ته‌نشینی می‌شوند و در ادامه ذرات با شکل نزدیک‌تر به خط (با بعد فراکتال کمتر) ته‌نشینی می‌شوند. بالا بودن بعد فراکتال نشانه فشردگی بیشتر فلاک‌ها و نزدیک بودن شکل فلاک به دایره را اثبات می‌سازد، ولی پایین بودن بعد فراکتال نشان‌دهنده‌ی ساختار بسیار منشعب و نزدیک بودن شکل فلاک به خط است (Logan and Kilps 1995; Chakraborti et al, 2000; Yu et al, 2010). در واقع می‌توان چنین تفسیر نمود که کمتر بودن بعد فراکتال فلاک‌ها در هنگام استفاده از آلوم نسبت به پک به‌عنوان منعقدکننده در فرآیند انعقاد، نشان‌دهنده‌ی این امر است که شکل فلاک‌های آلوم در مقایسه با پک به خط نزدیک‌تر است. از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد که بعد از حدود ۱۵ دقیقه بعد فراکتال فلاک‌ها در ته‌نشینی با کمک منعقدکننده‌های آلوم و پک چه قبل و چه بعد از شکست به هم نزدیک شده و در پایان ته‌نشینی (پس از ۳۰ دقیقه) هم به یک مقدار یکسان معادل $1/3$ می‌رسد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که فلاک‌هایی با بعد فراکتال حدود $1/3$ ، فلاک‌هایی هستند که قابلیت ته‌نشینی ندارند و در محلول باقی می‌مانند که همان کدورت باقی‌مانده پس از اتمام فرآیند انعقاد را ایجاد می‌کنند.



شکل ۴-۲۱: تغییرات بعد فراکتال فلاک‌ها نسبت به زمان برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

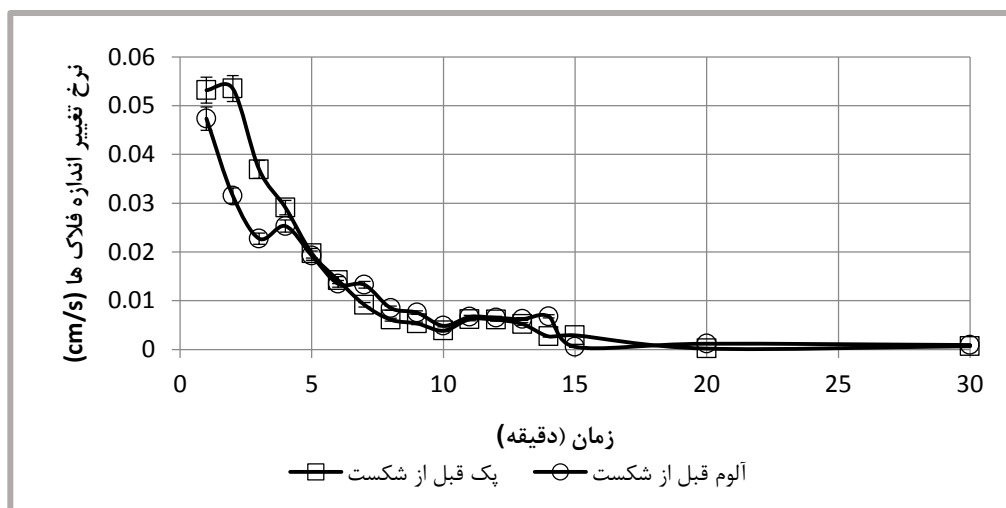


شکل ۴-۲۲: تغییرات بعد فراکتال فلاک‌ها نسبت به زمان برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی بعد از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

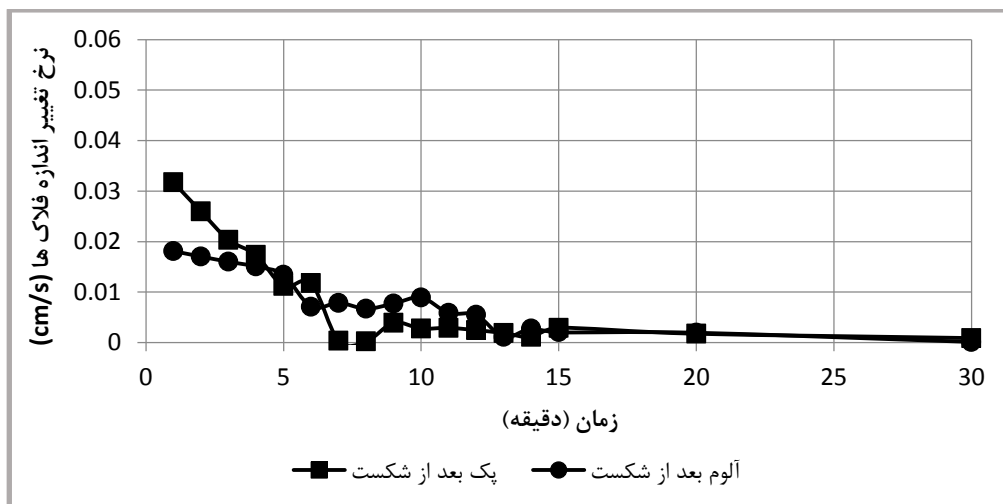
۴-۵-۴ نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها

نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها در ته‌نشینی قبل و بعد از شکست برای منعقدکننده‌های پک و آلوم به ترتیب در شکل ۴-۲۳ و ۴-۲۴ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴-۴ نشان داده شد، کدورت به ترتیب برای پک و آلوم در دقیقه ۱۵ برابر با ۳/۶۸ NTU و ۱/۷۱ NTU است و تا انتهای فرآیند تغییر جزئی دارد؛ بنابراین در ۱۵ دقیقه اول ته‌نشینی، نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها زیاد بوده است و در دقیقه‌ی ۱۵ نرخ ته‌نشینی به حداقل مقدار خود رسیده است و بعد از آن تغییری جزئی در نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها مشاهده می‌گردد. نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها برای پک و آلوم در ته‌نشینی قبل از شکست به ترتیب در محدوده $0.00067 - 0.0053$ cm/s و $0.00092 - 0.0047$ cm/s و در ته‌نشینی پس از شکست به ترتیب در محدوده $0.00089 - 0.0032$ cm/s و $0.00012 - 0.0018$ cm/s به دست آمد. با توجه به کمتر بودن قطر متوسط فلاک‌های پس از شکست نسبت به قبل از شکست در هنگام استفاده از هر دو منعقدکننده، کمتر بودن نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها بعد از شکست نسبت به قبل از شکست توجیه‌پذیر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که، اندازه فلاک‌ها با گذشت زمان کاهش می‌یابد (اشکال ۴-۴).

۱۷ و ۱۸-۴)؛ بنابراین با توجه به کاهش اندازه فلاک‌ها، نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها نیز روند کاهشی دارد. در ابتدا ذرات با اندازه بزرگ‌تر و در ادامه ذرات با اندازه کوچک‌تر ته‌نشین می‌شوند. نرخ تغییر اندازه فلاک‌های تولیدشده در استفاده از آلوم نسبت به پک در ابتدای ته‌نشینی کمتر است، که این به دلیل کوچک‌تر بودن فلاک‌های حاصل از استفاده از آلوم در مقایسه با پک در ابتدای ته‌نشینی می‌باشد. ولی در ادامه‌ی ته‌نشینی نرخ تغییر اندازه فلاک‌های آلوم نسبت به پک برابر یا بیشتر شده است، چون در ادامه‌ی ته‌نشینی فلاک‌های آلوم نسبت به پک اندازه متوسط بزرگ‌تری دارند.



شکل ۴-۲۳: نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی قبل از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)



شکل ۴-۲۴: نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها برای منعقدکننده‌های آلوم و پک در ته‌نشینی بعد از شکست (pH اولیه = ۹، کدورت اولیه = ۱۱۰ NTU)

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در این بخش به جمع‌بندی نتایج حاصل از تحقیق حاضر پرداخته و برای هر منعقدکننده شرایط بهینه به‌همراه کینتیک و پردازش تصویر فلاک‌ها بیان شده‌است. در پایان پیشنهادهای جهت مطالعات آتی بیان گردیده است.

۵-۲ جمع‌بندی نتایج حذف کدورت توسط فرآیند انعقاد

در تحقیق حاضر جهت حذف کدورت پساب حاصل از برش سنگ تراورتن از دو منعقدکننده آلوم و پک استفاده گردید. غلظت منعقدکننده به‌عنوان پارامتر مهم تاثیرگذار بر فرآیند انعقاد بررسی و حذف کدورت پساب سنگی برای پارامتر موردنظر بهینه‌سازی شد. تأثیر منعقدکننده‌ها بر پارامترهای فیزیکیوشیمیایی و کینتیک فرآیند انعقاد بررسی گردید (جدول ۵-۱).

۵-۲-۱ بهینه‌سازی غلظت منعقدکننده

دوز منعقدکننده، یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در فرآیند انعقاد می‌باشد. برای رسیدن کدورت نهایی به محدوده مجاز آب آشامیدنی (کمتر از ۵NTU)، غلظت بهینه برای منعقدکننده آلوم و پک ۵۰ mg/L به‌دست آمد.

۵-۲-۲ تأثیر منعقدکننده بر خواص فیزیکیوشیمیایی و کینتیک فرآیند انعقاد

در صورت استفاده از پک در مقایسه با آلوم، تغییرات کمتری در pH، EC و TDS پساب ایجاد می‌گردد.

با توجه به نتایج حاصل از محاسبات کینتیک ته‌نشینی فرآیند انعقاد برای منعقدکننده آلوم و پک معلوم گردید که هر دو منعقدکننده با ضریب همبستگی ۰/۹۳ از کینتیک شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند.

جدول ۵-۱: نتایج کلی آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق

منعقدکننده آلوم	منعقدکننده پک	
۵۰	۵۰	دوز بهینه (mg/L)
۹۸	۹۸	راندمان حذف کدورت پساب سنگی (%)
شبه مرتبه دوم	شبه مرتبه دوم	کینتیک
۰/۹۵۵	۰/۹۴۰	ضریب همبستگی

۵-۳ جمع‌بندی نتایج پردازش تصویر و فرآیند انعقاد

در این تحقیق در غلظت بهینه ۵۰ میلی‌گرم برلیتر برای دو منعقدکننده آلوم و پک از روند ته‌نشینی فلاک‌ها در ته‌نشینی قبل و پس از شکست تصاویر تهیه و با توجه به پردازش‌های صورت گرفته بر تصاویر با استفاده از نرم افزار MATLAB، خواص فلاک‌ها بررسی گردید.

۵-۳-۱ قطر متوسط فلاک‌ها

قطر متوسط فلاک‌ها در صورت استفاده از منعقدکننده‌های آلوم و پک با استفاده از پردازش تصویر بدست آمد. با توجه به نتایج، قطر متوسط فلاک‌های پک نسبت به آلوم در ابتدای ته‌نشینی بزرگتر و در انتهای ته‌نشینی کوچکتر می‌گردد که این امر مزیت استفاده از پک نسبت به آلوم را روشن می‌سازد. اندازه فلاک‌های آلوم و پک در ته‌نشینی پس از شکست نسبت به حالت قبل از شکست کاهش یافت.

۵-۳-۲ بعد فراکتال فلاک‌ها

بعد فراکتال فلاک‌ها که با استفاده از رگرسیون‌گیری نمودار مساحت در مقابل خواص طولی به‌دست آمد، ساختار فلاک را توصیف می‌کند. بازه‌ی تغییرات بعد فراکتال بین ۱ و ۲ است و هر چه به دو

نزدیکتر باشد، نشان دهنده‌ی نزدیکی شکل فلاک به دایره و فشردگی آن و هر چه به یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده‌ی نزدیکی شکل فلاک به خط و ساختار منشعب آن است. بعد فراکتال فلاک‌ها در هنگام استفاده از پک نسبت به آلوم مقدار بیشتری دارد و نشان دهنده‌ی فشردگی و نزدیکی شکل فلاک‌های پک به دایره است.

۵-۳-۳ نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها

از آنجایی که اندازه فلاک‌ها و کدورت پساب در طی ته‌نشینی با زمان روند کاهشی را نشان می‌دهد، نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها برای هر دو منعقدکننده آلوم و پک با گذشت زمان کاهش می‌یابد. نرخ تغییر اندازه فلاک‌ها برای هر دو منعقدکننده در ته‌نشینی بعد از شکست نسبت به ته‌نشینی قبل از شکست، بدلیل کاهش اندازه فلاک‌ها، کمتر می‌شود. از نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، می‌توان در طراحی حوضچه‌های ته‌نشینی در فرآیند انعقاد استفاده کرد.

۵-۴ پیشنهادها برای مطالعات آتی

- بررسی حذف کدورت پساب حاصل از برش سنگ تراورتن با منعقدکننده‌های دیگر و بررسی خصوصیات فلاک‌ها
- بررسی خصوصیات لجن تولیدی در فرآیند انعقاد
- بررسی حذف کدورت حاصل از برش سایر سنگ‌ها و بررسی خصوصیات فلاک‌ها

- Acar H. (2001) “Must be paid attention matters during the establishment and the running of a wastewater clarify unit for a marble processing plant (in Turkish)” in Proc. of the Third Marble Symp., Kozan Ofset, Ankara, pp 289 – 296.
- Al-Sameraiy M. (2017) “A new approach using coagulation rate constant for evaluation of turbidity removal” **Appl Water Sci.**, 7, 3, pp 1439-1448.
- Ammary B. Y. (2007) “Clean production in stone cutting industries” **Int. J. of Environment and Waste Management.**, 1, 2-3, pp 106-112.
- Ayazi Shamlou P. Stavriniades S. Titchener-hooker N. and Hoare M. (1994) “Growth independent breakage frequency of protein precipitates in turbulently agitated bioreactors” **Chem. Eng. Sci.**, 49, 16, pp 2647–2656.
- Biggs C. A. and Lant P. A. (2000) “Activated sludge flocculation: on-line determination of floc size and the effect of shear” **Water. Res.**, 34, 9, pp 2542–2550.
- Boller M. and Blaser S. (1998) “Particles under stress” **Water. Sci. Technol.**, 37, 10, pp 9– 29.
- Capitano C. Peri G. and Rizzo G. (2014) “Is the Eco-label EU Decision for hard coverings really capable of capturing the environmental performances of the marble productive chain? A field verification by means of a life cycle approach” **Int J Life Cycle Assess.**, 19, 5, pp 1022-1035.
- Chakraborti R. K. Atkinson J. F. and Van Benschoten J. E. (2000) “Characterization of Alum Flocc by Image Analysis” **Environ. Sci. Technol.**, 34, 18, pp 3969-3976.
- Chapra S. C. (1997), “**Surface Water-Quality Modeling**”, Waveland Press, pp 25-30.
- Choubey S. Rajput S. K. and Bapat K. N. (2012) “Comparison of efficiency of some natural coagulants-bioremediation” **IJETAE**, 2, 10, pp 429–434.
- Dargo Beyene H. Derbe Hailegebrial T. and Batu Dirersa W. (2016) “Investigation of Coagulation Activity of Cactus Powder in Water Treatment” **Journal of Applied Chemistry**, 2016, pp 1-9.
- Domopoulou A. E. Gudulas K. H. Papastergiadis E. S. and Karayannis V. G. (2015) “Coagulation / Flocculation / Sedimentation Applied to Marble Processing Wastewater Treatment” **Modern Applied Science.**, 9, 6, pp 137-143.
- Duzyol S. (2015) “Evaluation of flocculation behavior of marble powder suspensions” **Physicochem. Probl. Miner. Process.**, 51, 1, pp 5-14.
- Ehteshami M. Maghsoodi S. and Yaghoobnia E. (2016) “Optimum turbidity removal by coagulation/ flocculation methods from wastewaters of natural stone processing”

- Desalination and Water Treatment.**, 57, 44, pp 20749–20757.
- Ersoy B. Tosun I. Gunay A. and Dikmen S. (2009) “Turbidity removal from Wastewaters of natural stone processing by coagulation/flocculation methods” **Clean.**, 37, 3, pp 225–232.
- Essam J. W. (1980) “Percolation theory” **Rep. Prog. Phys.**, 43, 7, pp 833–912.
- Francois R. J. (1987) “Ageing of aluminum hydroxide flocs” **Water. Res.**, 21, 5, pp 523–531.
- Gonzales R. Woods R E. (2008), “**Digital Image Processing**”, Third Edition, Pearson Education Inc, pp 200-220.
- Hashim U. and Wesam Al-Mufti M. (2013) “Plant seeds-potential alternative as natural coagulant to treat water for turbidity” **J. Appl. Sci. Res.**, 9, 2, pp 1067–1073.
- <https://www.epa.gov>
- Jarvis P. Jefferson B. and Parsons S. A. (2005) “Breakage, regrowth, and fractal nature of natural organic matter flocs” **Environ. Sci. Technol.**, 39, 7, pp 2307–2314.
- Jiang Q. and Logan B. E. (1991) “Fractal dimension of aggregates determined from steady-state size distributions” **Environ. Sci. Technol.**, 25, 12, pp 2031-2038.
- Juntunen P. Liukkonen M. Lehtola M. Hiltunen Y. (2014) “Characterization of Alum Flocculation in Water treatment by Image Analysis” **Cogent Engineering.**, 1, 1.
- Lin J. Huang C. Dempsey B. and Hu Y. (2014) “Fate of hydrolyzed Al species in humic acid coagulation” **Water. Res.**, 56, pp 314–324.
- Lin Q. Peng H. Lin Q. and Yin G. (2013) “Formation, breakage and reformation of flocs formed by cationic starch” **Water. Sci. Technol.**, 68, 6, pp 1352–1358.
- Logan B. E. and Klips J. R. (1995) “Fractal dimension of aggregates formed in different fluid mechanical environments” **Water. Res.**, 29, 2, pp 443-453.
- Lopes R. and Betrouni N. (2009) “Fractal and multifractal analysis: A review” **Medical Image Analysis.**, 13, 4, pp 634–649.
- McCurdy K. Carlson K. and Gregory D. (2004) “Floc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants” **Water. Res.**, 38, 2, pp 486–494.
- Mimi Z. A. Ziara. M. and Nigim H. H. (2003) “Water conservation and its perception in Palestine: A case study” **Water and Environ Journal.**, 17, 3, pp 152-156.
- Nan J. Wang Z. Yao M. Yang Y. and Zhang X. (2016) “Characterization of re-grown floc size and structure: effect of mixing conditions during floc growth, breakage

- and re-growth process” **Environ. Sci. pollut. Rolls.**, 23, 23, pp 23750-23757.
- Napacho Z. A. and Manyele S. V. (2010) “Quality assessment of drinking water in Temeke District (part II): characterization of chemical parameters” **Afr. J. Environ. Sci. Technol.**, 4, 11, pp 775–789.
- Nasserdine K. Mimi Z. Bevan B. and Elian B. (2009) “Environmental management of the stone cutting industry” **Journal of Environmental Management.**, 90, 1, pp 466-470.
- Nourouzi M. M. Chuah A. L. Teong G. and Choong T. S. Y. (2010) “Optimization of flocculation process for cut-stone wastewater: effect of rapid mix parameters” **Desalination and Water Treatment.**, 22, 1-3, pp 127-132.
- Önenc D. (2001) “The Blocks Becoming Powder and The Hopes” **Marble.**, 7, pp 66–68.
- Parker D. Kaufman W. and Jenkins D. (1976) “Floc breakup in turbulent flocculation processes” **J. Sanit. Eng.**, 98, 1, pp 79–99.
- Palestinian Water Authority (Arabic Source), A report on “Water Consumption in Palestinian Industrial Sector, Current and Future” 1999.
- Reynolds T. D. Richards P. A. (1996) “**Unit Operation and Processes in Enviromental Engineering**”, International Thomson Publishing Europe, pp 170.
- Rossini M. Garrido J. G. and Galluzzo M. (1999) “Optimization of the coagulation-flocculation treatment: influence of rapid mix parameters” **Water. Res.**, 33, 8, pp 1817–1826.
- Saritha V. Srinivas N. and Srikanth Vuppala N. V. (2015) “Analysis and optimization of coagulation and flocculation process” **Appl Water Sci.**, 7, 1, pp 451-460.
- Scholz M. (2016), “**Wetlands for Water pollution Control**”, Second Edition, Elsevier, Amesterdam, pp 37-46.
- Spicer P. T. and Pratsinis S. E. (1996) “Coagulation and fragmentation: universal steady-state particle-size” **AIChE J.**, 42, 6, pp 1612–1620.
- Theodoro J. D. P. Lenz G. F. Zara R. F. and Bergamasco R. (2013) “Coagulants and natural polymers: perspectives for the treatment of water” **Plastic and Polymer Technology (PAPT)**, 3, pp 55–62.
- Wang K. L. Hung Y. Shammass N. K. (2005) “**Physicochemical Treatment Processes**”, Humana press Ins, pp 107.
- Xiao F. Lam K. M. Li X. Y. Zhong R. S. and Zhang X. H. (2011) “PIV Characterisation of Flocculation dynamics and floc structure in Water treatment” **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.**, 379, 1-3, pp 27-35.

- Xu W. Gao B. Yue Q. and Wang Y. (2010) "Effect of shear force and solution pH on flocs breakage and re-growth formed by nano-Al-13 polymer" **Water Res.**, 44, 6, pp 1893– 1899.
- Yu W. Georgy J. and Campos L. C. (2010) "Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and polyDADMAC" **Water. Res.**, 44, 13, pp 3959-3965.
- Yu W. Li G. Xu Y. and Yang X. (2009) "Breakage and re-growth of flocs formed by alum and PACl" **Powder. Technol.**, 189, 3, pp 439–443.
- Yukselen M. and Gregory J. (2002) "breakage and reformation of alum flocs" **Environ Eng Sci.**, 19, 4, pp 229-236.
- Zhu Z. Li T. Lu J. Wang D. and Yao C. (2009) "Characterization of kaolin flocs formed by polyacrylamide as flocculation aids" **Int. J. Miner. Process.**, 91, 3-4, pp 94-99.
- باغوند ا، رضازاده ن، صالحی پور باور مرصاد م و دریابیگی ع، (۱۳۹۰) "استفاده از فرآیند انعقاد و لخته سازی در فرآیند تصفیه آب آشامیدنی"، پنجمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران.
- باقری ح و بوداقپور س، (۱۳۹۰) "فناوری نانو و کاربردهای آن در صنعت آب"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- بنی هاشمی آ. علوی مقدم م. مکنون ر و نیک آذر م، (۱۳۸۷) "مطالعه آزمایشگاهی کاربرد پلیمر معدنی آلومینیومی در حذف کدورت از آب"، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۶۶، ص ۸۶-۸۲.
- پری زنگنه ع، عابدینی ی و قدیمی ی، (۱۳۸۳) "کمیت و کیفیت آب در برنامه های سوم و چهارم توسعه: بررسی کیفی آب رودخانه های مهم استان زنجان و تعیین اثرات توسعه بر آنان"، پنجمین همایش ملی دو سالانه انجمن متخصصان محیط زیست ایران، تهران.
- پوی ه، روو د و چبانوگوس ج، (۱۳۹۳) "مهندسی محیط زیست" جلد اول، ترجمه ابراهیمی س و کی نژاد م، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه صنعتی سهند، ص ۱۶۹-۱۶۷؛ ۲۰-۱۹.
- پیرصاحب م، زینتی زاده ع و درگاهی ع، (۱۳۹۱) "ارزیابی عملکرد فرآیند انعقاد برای حذف مقادیر کم

کدورت و رنگ آب با استفاده از منعقدکننده های مختلف"، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۱، ص ۱۱۸-۱۱۲.

ترابیان ع. صفایی فر م. و رشیدی مهر آبادی ع، (۱۳۸۶) "ارزیابی تاثیر نوع منعقدکننده بر شاخص های بهره برداری در فرآیند فیلتراسیون مستقیم"، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۶۲، ص ۲۸-۲۰.

چبانوگوس و ال. بورتن ف، (۱۳۷۴) "مهندسی فاضلاب" جلد اول، ترجمه ابریشم چی ا، افشار ع و جمشید ب، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی با همکاری شرکت مهندسی مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب، اصفهان، ص ۳۶۹-۳۶۷.

شاهسونی ع و بینا ب، (۱۳۸۵)، "مقایسه کارایی عصاره دانه مورینگا اولیفر با پلی آلومینیوم کلراید در حذف کدورت آب"، نهمین همایش ملی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی، اصفهان.
شریعت پناهی م، (۱۳۹۱)، "اصول کیفیت تصفیه آب و فاضلاب"، چاپ نهم، موسسه انتشارات دانشگاه تهران، ص ۳۱؛ ۹۲-۸۷.

عفری ا، عبدالهی ب و جعفری م، (۱۳۹۵) "شناسایی و جداسازی تومور در تصاویر ام.آر.آی با استفاده از هیستوگرام های تصویر"، کنفرانس بین المللی مهندسی برق، سازمان پژوهشی باقرالعلوم، تهران.

کردمصطفی پور ف، بذرافشان ا و کمانی ح، (۱۳۸۷) "بررسی مقایسه ای کارایی منعقدکننده های سولفات آلومینیوم، کلراید فریک و پلی آلومینیوم کلراید در حذف کدورت از آب آشامیدنی" یازدهمین همایش ملی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی زاهدان، زاهدان.

گونزالس سی. ر، وودز ای، ادینز ال. ا، (۱۳۹۱) "پردازش تصویر دیجیتال با زبان MATLAB" ترجمه جعفرنژاد قمی ع، چاپ دوم، موسسه انتشاراتی علوم رایانه، بابل، ص ۱۲-۱۰.

منزوی م. ت، (۱۳۸۴)، "فاضلاب شهری تصفیه‌ی فاضلاب"، جلد دوم، چاپ دهم، انتشارات

دانشگاه تهران، تهران، ص ۴۵.

Abstract

Very high turbidity is one of the major problems in the treatment of wastewater from stone processing units. This research aimed at removing the turbidity from wastewater of travertine processing industries using aluminum sulfate (Alum) and poly aluminum chloride (PAC) coagulants. In addition, properties of the formed flocs, including mean diameter, fractal dimension and rate of change in floc dimension, were assessed in this research by means of image processing. A series of pictures from sedimentation process of flocs were captured in 30-minute periods with three-second time interval, and were processed by MATLAB software. Moreover, the coagulation process for various concentrations of the applied coagulants was optimized, and the kinetics of the sedimentation process was assessed. Furthermore, changes in pH, EC, and TDS during the coagulation process were evaluated. The maximum percentage of removal of turbidity (99%) occurred at concentration of 50 mg/L for Alum and PAC coagulant. According to the results, the coagulation process decreased pH in the wastewater while it increased the levels of EC and TDS. On the other hand, the kinetic of reaction demonstrated that the turbidity reduction process started at a high rate (90-93% removal turbidity) during the first five minutes of sedimentation. In addition, the kinetic of floc sedimentation in the coagulation process was of the second order for both coagulants. Evaluation of the properties of flocs using image processing demonstrated that mean size of PAC flocs, compared to Alum, was larger at the start of sedimentation and smaller at the end of the process. Also, the fractal dimension and sedimentation rate of PAC flocs were higher than of Alum, which indicates that the shape of flocs of PAC are closer to a circle than of Alum. Furthermore, if the flocs are broken, their size, rate of change in their dimension and the fractal dimension decreased for both coagulants in re-sedimentation. In summary, the PAC coagulant had a more efficient usage in the remove of turbidity from travertine wastewater, compared to Alum.

Keywords: Stone processing Wastewater, Coagulation, Image Processing, Floc characterization



Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Environmental Engineering

**Investigation on the growth and structure of the flocs from chemical
coagulation by image processing technique**

by: Atefeh Heveji

Supervisor:

Dr. Behnaz Daharazma

Dr. Seyed Fazlolah Saghravani

Advisor:

Dr. Alireza Ahmadyfard

December 2017