

تهیه منعقدکننده‌های شیمیایی پلی‌آلومینیم کلرید و پلی‌آلومینیم فریک کلرید برای تصفیه آب و مقایسه کارایی آن‌ها با نمونه تجاری

اکبر رستمی ورتونی^{۱*}، علیرضا مرادزاده آقبلاغ^۲ و علی شاکر^۳

۱. استادیار شیمی معدنی گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

۲. کارشناسی ارشد شیمی معدنی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

۳. دانشجوی دکتری مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: فروردین ۱۴۰۰ بازنگری: خرداد ۱۴۰۰ پذیرش: تیر ۱۴۰۰



10.30495/JACR.2022.688223



20.1001.1.17359937.1400.15.4.5.6

چکیده

در این پژوهش، با توجه به مزایای کاربردی و اقتصادی منعقدکننده‌های برپایه آلومینیم، نمونه‌های پلی‌آلومینیم کلرید و پلی‌آلومینیم فریک کلرید با روشی ساده و کم‌هزینه تهیه شدند. بسیاری از تهیه‌شده با روش‌های طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)، طیف‌سنجی فلوروسانس پرتو ایکس (XRF)، میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) و طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) شناسایی شدند. برپایه طیف‌سنجی فروسرخ مشخص می‌شود که ویژگی ساختاری بسیاری از تهیه‌شده با منعقدکننده تجاری مشابه است. پیک‌های مربوط به ارتعاش‌های کششی نامتقارن پیوندهای Fe-OH-Fe یا Al-OH-Al و ارتعاش خمشی Fe-OH می‌توانند به ترتیب در گستره ۱۰۸۰ تا ۱۱۳۰ cm^{-1} و ۷۷۰ cm^{-1} ظاهر شوند. حضور عناصر O، Cl، Al و Fe در نمونه‌های آهن‌دار قابل مشاهده است. در پایان، کارایی منعقدکننده‌های بسیاری در فرایند لخته‌سازی تصفیه آب با دستگاه جام‌آزمون مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده نشان دادند که نمونه پلی‌آلومینیم کلرید (PAC)، توانایی لخته‌سازی بهتری دارد و منعقدکننده‌های آهن‌دار نقش مناسب‌تری در کدورت‌های بالاتر ایفا می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: منعقدکننده‌های بسیاری، لخته‌شدن، تصفیه آب و فاضلاب، پلی‌آلومینیم کلرید، پلی‌آلومینیم فریک کلرید

مقدمه

انعقاد و لخته‌سازی است، یافتن مواد و روش‌هایی که حداقل هزینه را در برداشته باشند اهمیت بسزایی دارد. افزودن یک ماده منعقدکننده به آب موجب خنثی‌شدن بار ذره‌های کلوییدی می‌شود. این ذرها با نزدیک‌شدن به هم ذره‌های سنگین‌تری را ایجاد می‌کنند. برای کامل‌کردن این عمل و ایجاد لخته‌های بزرگتر از ترکیب‌هایی مانند سدیم‌آلومینات، بنتونیت، سدیم سیلیکات و انواع پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی، آنیونی و غیریونی به نام کمک منعقدکننده استفاده می‌شود. لخته‌های به‌دست آمده که ذره‌های معلق و کلوییدی را به‌همراه دارند، به‌اندازه کافی درشت هستند و به‌راحتی ته‌نشین و صاف می‌شوند [۱۰ و ۱۱]. عمل ناپایداری‌سازی ذره‌های کلوییدی به کمک نمک‌های فلزی معدنی، بیشتر از راه فشرده‌گی لایه مضاعف الکتریکی موجود در اطراف این ذرها صورت می‌پذیرد. حال آنکه منعقدکننده‌های بسیاری، ناپایداری‌سازی را از راه جذب بر سطح ذره‌های کلوییدی و ایجاد پل‌های پیوندی ذره-بسیار-ذره انجام می‌دهند. بنابراین، با نمک‌های بسیاری-فلزی مانند پلی‌آلومینیم کلرید می‌توان هر دو عملکرد ناپایداری‌سازی را به‌صورت هم‌زمان انجام داد که موجب بهبود و سرعت‌بخشی عملیات ناپایداری‌سازی ذره‌ها می‌شود. در نتیجه، رشد سریع‌تر لخته‌ها و در پایان بهبود جداسازی ذره‌های کلوییدی در فرایند تصفیه در پی دارد [۱۲ تا ۱۵].

به‌کارگیری برخی منعقدکننده‌های شیمیایی با اثرات زیان‌باری برای سلامتی انسان همراه است. برای مثال، کاربرد آلومینیم برای حذف کدورت در تصفیه‌خانه‌ها، موجب انحلال مقادیر زیادی یون آلومینیم در آب آشامیدنی می‌شود. در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها نشان دادند که مقادیر بالای آلومینیم آب آشامیدنی، عاملی مشکوک در تقویت ابتلا به آلزایمر شناخته شده است [۱۶]. مواد منعقدکننده باید ویژگی‌های متفاوتی مانند قیمت پایین، دستیابی آسان، راحتی کاربرد و پایداری شیمیایی هنگام ذخیره‌سازی داشته باشند. همچنین، این مواد باید ترکیب‌های نامحلولی تشکیل دهند، یا به‌شدت بر سطح ذره‌ها

زیاد شدن جمعیت و توسعه صنایع شیمیایی موجب افزایش مصرف آب، تولید فاضلاب و آلودگی محیط‌زیست می‌شوند. آبی که به‌صورت طبیعی و یا در اثر دخالت انسان آلوده شده باشد، باید برای تبدیل به آب مناسب برای مصارف آشامیدنی، کشاورزی یا صنعتی، فرایندهای متفاوت تصفیه را بگذراند [۱ تا ۵]. عوامل ایجادکننده کدورت در آب سطحی به‌طور عمده شامل موادی از قبیل ذره‌های خاک رس، ویروس‌ها، باکتری‌ها، کودهای آلی مانند هیومیک اسید و یا دیگر مواد معدنی مانند سیلیکات و آزبست هستند [۶]. کدورت ضمن ایجاد ظاهری نامناسب و عدم شفافیت در منابع آب، می‌تواند پناهگاهی برای ریزاندامگان‌ها در برابر فرایند گندزدایی باشد که موجب کاهش بازده این فرایند می‌شود [۷]. مهم‌ترین و اصلی‌ترین عامل ایجاد کدورت در آب‌های سطحی، ذره‌های ریز کلوییدی (با اندازه 0.1 تا $1 \mu\text{m}$) هستند که بیشتر به‌دلیل داشتن بار منفی در سطح خود، به‌سادگی قابل ته‌نشینی نبوده و در آب معلق می‌مانند [۸]. هر چه ذره‌های معلق در آب ریزتر باشند، برای حذف آن‌ها احتیاج به روش‌ها و دستگاه‌های پیچیده‌تری است. ته‌نشینی ذره‌ها به‌طور طبیعی ممکن است چندین ماه و حتی سال به‌طول بیانجامد. باید توجه داشت که از نظر زمان فرایند، صرف بیش از چند ساعت برای جداسازی قابل قبول نیست. بنابراین، فرایند تصفیه یا زلال‌سازی آب بدون استفاده از موادی که سرعت ته‌نشینی ذره‌های کلوییدی را افزایش دهند، غیرممکن به نظر می‌رسد [۹]. انعقاد فرایندی است که طی آن با افزودن ترکیب‌هایی مانند آلومینیم سولفات، فریک کلرید، پلی‌آلومینیم کلرید (PAC) و غیره، ذره‌های کلوییدی به یکدیگر چسبیده و اجزای درشت‌تر و قابل ته‌نشینی را تشکیل می‌دهند. از آنجایی که یکی از پرهزینه‌ترین بخش‌ها در عملیات تصفیه آب، بخش

AlO_4 احاطه شده با دوازده واحد AlO_6 هشت وجهی به شکل یک قفس^۲ باشند. نتیجه های به دست آمده نشان دادند که این نمونه تا حد مطلوبی قادر به حذف مواد آلی و معدنی رنگزا از آب آشامیدنی، فاضلاب های کشاورزی و نیز صنایع آبکاری هستند. همچنین، بررسی ها نشان دادند که این فرآورده، آلومینیم بسیاری بالا، قلیابیت بالا و نیز روش آماده سازی ساده و با هزینه پایین تری نسبت به نمونه تجاری دارد. با این حال، این روش به دلیل پیچیدگی های فرایندی در مقیاس بالاتر در حال حاضر امکان صنعتی شدن نداشته و در مقیاس آزمایشگاهی باقی مانده است. امروزه استفاده از منعقدکننده های بسیاری حاوی عنصر آهن به طور چشمگیری توسعه پیدا کرده است. حضور یون Fe^{3+} ، با انحلال نمک های اسیدی آهن دار مانند آهن (III) کلرید، هنگام فرایند بسپارش می تواند موجب جایگزینی آن با یون Al^{3+} در زنجیره بسیاری شود و ساختار جدیدی تشکیل یافته از هر دو عنصر را به وجود آورد که ناشی از داشتن ظرفیت مشابه یون Fe^{3+} و یون Al^{3+} است. در نتیجه، فرآورده نهایی به صورت چندسازه پلی آلومینیم کلرید و پلی فریک کلرید، با عنوان پلی آلومینیم فریک کلرید^۳ به دست می آید. از مزایای وارد کردن یون آهن در ساختار منعقدکننده های بسیاری برپایه آلومینیم، کاهش میزان آلومینیم مصرفی و در نتیجه کاهش قیمت تمام شده فرآورده نهایی است [۲۷]. منعقدکننده های بسیاری به ویژه پلی آلومینیم کلرید در تصفیه خانه های آب و فاضلاب و نیز صنایعی مانند کاغذسازی و صنایع سلولزی کاربرد فراوانی دارند [۲۸]، ولی تاکنون نسبت به تولید آزمایشگاهی و صنعتی انواع متفاوت آنها اقدامی اساسی صورت نگرفته است. بنابراین، در این پژوهش سعی شد تا مواد منعقدکننده پلی آلومینیم کلرید (PAC) و پلی آلومینیم فریک کلرید (PAFC) با کمترین هزینه و بیشترین بازده، در

جذب شوند تا غلظت ذره های باقی مانده را که ممکن است در طی مرحله تصفیه عبور کنند، به کمینه ممکن برساند. انتخاب نوع و مقدار مصرف ماده منعقدکننده به ویژگی های آن، نوع ذره های رسوبی و کیفیت آب بستگی دارد [۱۷]. در سال های اخیر، پژوهش های زیادی در مورد کاربرد منعقدکننده های طبیعی از جمله دانه های نیرمالی، کیتوسان، کاکتوس، مورینگا الیفر، بلوط، دانه انگور، بقولات، تانن، نشاسته و بامیه برای حذف ذره های کلوییدی صورت گرفته است [۱۸ تا ۲۲]. با توجه به اینکه استفاده از این منعقدکننده ها یا کمک منعقدکننده ها در مقیاس های بزرگ از لحاظ اقتصادی و عدم دسترسی امکان پذیر نیست، برای رفع مشکل های مربوط به منعقدکننده های طبیعی و بهبود کیفیت تصفیه، استفاده از مواد بسیاری پیشنهاد شده است [۲۳]. پلی آلومینیم کلرید، با ساختار $[\text{Al}_2(\text{OH})_x\text{Cl}_{6-x}\cdot\text{YH}_2\text{O}]_z$ ، ($Z < 15$, $X \approx 15$)، از مواد بسیاری منعقدکننده است که از واکنش شیمیایی آلومینیم هیدروکسید با هیدروکلریدریک اسید در دمای حدود 150°C تولید می شود. استفاده از این ترکیب به دلیل عملکرد بهتر در نتیجه درشت مولکول بودن و تشکیل زنجیره سنگین با قابلیت ته نشینی مناسب، ویژگی خوردگی پایین و تولید ضایع های ناچیز به صورت چشمگیری در دنیا در حال افزایش است. دامنه عملکردی در گستره وسیعی از pH، حساسیت کم نسبت به دما، کاهش باقی مانده آلومینیم نسبت به منعقدکننده های فلزی دیگر، کاهش لجن تولیدی و سهولت آب گیری لجن تولید شده در تصفیه از مزایای دیگر منعقدکننده های بسیاری است [۲۴ تا ۲۶]. در پژوهشی، ذکر یا و همکارانش [۱۰]، یک نمونه آزمایشگاهی از پلی آلومینیم کلرید (PAC) را با زنجیره هایی شامل سیزده اتم آلومینیم (Al_{13}) با روش تیترا کردن ناپیوسته محلول سدیم هیدروکسید با محلول آلومینیم کلرید تحت اختلاط شدید تهیه کردند. تجزیه و تحلیل ساختاری نشان می دهد که این زنجیره ها می توانند به صورت یک هسته مرکزی چهاروجهی

2. Keggin Al_{13} structure

3. Polyaluminum Ferric Chloride (PAFC)

آب و فاضلاب استان قم و بر آب تصفیه‌خانه شهر دلیجان، انجام شدند.

تهیه منعقدکننده پلی‌آلومینیم کلرید (PAC)

برای تهیه نمونه پلی‌آلومینیم کلرید (PAC) از روش زوبولیس^۷ و همکاران استفاده شد، با این تفاوت که در نوع و نیز نسبت برخی واکنش‌دهنده‌ها تغییر ایجاد شد [۲۶]. در ابتدا، ضایع‌های آلومینیمی چندین بار با حلال‌های آب و استون برای حذف ناخالصی‌ها شسته شدند. سپس، در یک بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری، ۱۵ گرم از ضایع‌های آلومینیمی در ۱۰۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید در دمای حدود ۷۰°C حل و سپس با کاغذ صافی صاف شد. در بشر دوم، محلولی از سدیم آلومینات با انحلال ۱۵ گرم از ضایع‌های آلومینیم در محلول ۵۰٪ سود سوزآور به‌دست آمد. این محلول به‌آرامی به محلول صاف‌شده مرحله پیش که به‌سرعت با همزن مغناطیسی می‌چرخید، افزوده شد. پس از گذشت ۳۰ دقیقه از انجام واکنش، رسوب پلی‌آلومینیم کلرید سفید رنگ به‌دست آمده صاف و به‌مدت یک ساعت در آون با دمای ۱۰۰°C خشک شد.

تهیه منعقدکننده‌های پلی‌آلومینیم فریک کلرید (PAFC1) و (PAFC2)

تهیه این ماده منعقدکننده بسیاری همانند روش تهیه پلی‌آلومینیم کلرید است، با این تفاوت که برای تهیه نمونه PAFC1، مقدار ۲ گرم از آهن (III) کلرید صنعتی به مخلوط ۱۳ گرم از آلومینیم ضایعاتی و ۱۰۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید و یا برای تهیه نمونه PAFC2، مقدار ۵ گرم از نمونه صنعتی آهن (III) کلرید به مخلوط ۱۰ گرم آلومینیم ضایعاتی و ۱۰۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید در دمای ۷۰°C افزوده شد و پس از حل‌شدن، هر دو محلول با استفاده از کاغذ صافی صاف شدند. سپس، محلول سدیم آلومینات (محلول ضایعات آلومینیم در محلول ۵۰٪ سود سوزآور) به آرامی به

فاز آزمایشگاهی تهیه و شرایط لازم برای تولید انبوه و اقتصادی آن‌ها فراهم شود. در پایان، کارایی مواد بسپاری تهیه‌شده در فرایند انعقاد تصفیه آب و فاضلاب با نمونه چینی (CS^۴) در این صنعت، مقایسه شدند.

بخش تجربی

مواد و دستگاه‌ها

مواد مورد نیاز در این پژوهش شامل هیدروکلریک اسید، سدیم هیدروکسید و آهن (III) کلرید با خلوص صنعتی خریداری شدند. همچنین، برای تولید منعقدکننده‌های بسپاری از ضایع‌های آلومینیم استفاده شد. نمونه منعقدکننده وارداتی چینی مورد استفاده در تصفیه‌خانه آب شهر دلیجان برای مقایسه کارایی نمونه‌های منعقدکننده تهیه‌شده در فرایند لخته‌سازی به‌کارگرفته‌شد. طیف‌های فروسرخ با طیف‌سنج فروسرخ تبدیل فوریه ساخت شرکت Agilent مدل Cary 630 گرفته شده‌اند. طیف‌سنج فلورئورسانس پرتو ایکس (XRF^۵) مدل PW1410 ساخت شرکت Philips برای تجزیه عنصری نمونه‌های تهیه‌شده مورد استفاده قرارگرفت. ریخت‌شناسی منعقدکننده‌های بسپاری و توزیع ذره‌ها با یک میکروسکوپ الکترونی پوشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MV2300 انجام شد. شناسایی عنصرهای موجود در نمونه‌ها با طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) و به‌کارگیری طیف‌سنج مدل EDS (S3700N) انجام شد. برای خشک‌کردن مواد نهایی، دستگاه آون ساخت ایران مدل DZF-6020 به‌کار گرفته شد. بررسی کارایی مواد منعقدکننده تهیه شده با دستگاه‌های کدورت‌سنج ساخت شرکت HACH و جام‌آزمون^۶ مدل C6F ساخت شرکت Scientifica VELP موجود در آزمایشگاه شرکت

4. Chinese Sample (CS)

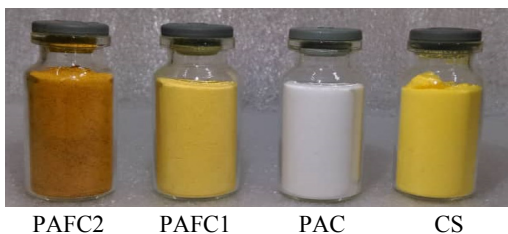
6. Jar test

5. X-Ray Fluorescence (XRF)

7. Zouboulis

تهیه منعقدکننده های شیمیایی پلی آلومینیم کلرید و پلی آلومینیم ...

تهیه شده PAFC1 تفاوت چندانی با منعقدکننده تجاری (CS) ندارد. از آنجایی که مواد منعقدکننده به عنوان یک افزودنی مستقیم در تصفیه آب استفاده می شوند، بنابراین، نباید دارای ناخالصی های مضر برای سلامت و کیفیت آب تصفیه شده باشند. بنابراین، به منظور مشخص یابی ترکیب شیمیایی نمونه تجاری منعقدکننده استفاده شده در تصفیه خانه آب و فاضلاب و مقایسه اجزای آن با منعقدکننده های تهیه شده بسیاری از روش XRF استفاده شد و نتیجه های مربوطه در جدول ۱ گردآوری شده است.



شکل ۱ تصاویر نمونه های منعقدکننده

هر یک از محلول های تهیه شده که در حال مخلوط شدن شدید بودند، افزوده شد. پس از گذشت ۳۰ دقیقه از انجام واکنش ها، رسوب های پلی آلومینیم فریک کلرید زرد یا زرد مایل به قهوه ای به دست آمدند.

ارزیابی منعقدکننده ها در فرایند لخته سازی (جام آزمون)

ابتدا محلول ۱۰۰۰ ppm منعقدکننده با حل کردن ۰/۱ گرم از منعقدکننده مورد نظر در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر تهیه شد. سپس، به ترتیب ۱ تا ۵ میلی لیتر از محلول منعقدکننده (۱ تا ۵ ppm) به بشرهای یک لیتری حاوی آب ورودی تصفیه خانه قم افزوده شد. بشرها در درون دستگاه جام آزمون قرار گرفتند و در ابتدا به مدت ۱ دقیقه با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه و در ادامه به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۳۰ دور در دقیقه هم زده شدند. پس از آن، دستگاه جام آزمون خاموش شد و ۳۰ دقیقه فرصت ته نشینی به بشرها داده شد. در پایان، کدورت محلول با دستگاه کدورت سنج اندازه گیری شد.

نتیجه ها و بحث

مشخصه یابی مواد تهیه شده

شکل ۱ تصاویر منعقدکننده های تهیه شده و نمونه پلی آلومینیم کلرید تجاری (CS) را نشان می دهد. رنگ نمونه

جدول ۱ نتیجه XRF نمونه چینی و منعقدکننده های بسیاری تهیه شده

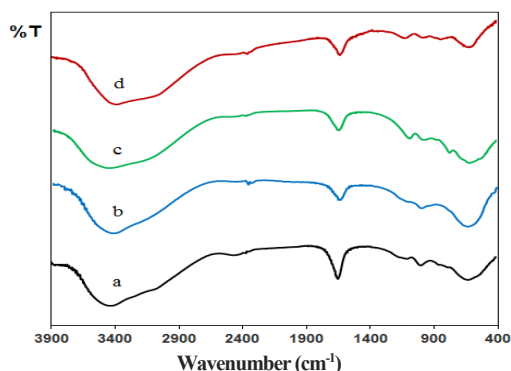
ترکیب (%)										عنصر (ppm)										نمونه	
LOI*	P ₂ O ₅	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Rb	Sr	Zn	Ba	S	Co	Pb	As	Cr	Cl		
۵۸٫۶	۰٫۱۱	۰٫۴۱	۰٫۱۹	۰٫۱۲	۰٫۱۷	۴٫۹۰	۱٫۹۰	۱۹٫۸۰	۱٫۸۰	۲۶	۸۸	-	۴۳۱	۴۳۹	۷۹	۵۳	-	۵۴	>۲٫۵%	CS	
۶۳٫۴	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۳٫۲۰	۰٫۰۱	-	۰٫۱۰	-	۳۰٫۹۰	-	-	-	۰٫۰۰۱	۰٫۰۱۰	۰٫۶۰	-	-	-	-	-	>۲%	PAC
۶۴٫۳	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۲٫۳۰	۰٫۰۲	-	۰٫۱۰	۱٫۵۰	۲۹٫۵۰	-	-	-	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۰٫۵۷	-	-	-	-	-	>۲%	PAFC1
۴۹٫۹	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	-	۱٫۰۸	۰٫۰۰۲	۷٫۶۰	۱۹٫۳۰	-	۲۱	۳۹	۶۴	۲۷	۱۵۳	۱۲	۲۱	۱۰	۷۷	>۳%	PAFC2	

*LOI: Loss On Ignition (950 °C, 1.5h)

تفسیر طیف ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به حضور گروه های عاملی یکسان در ساختار مواد منعقدکننده مورد بررسی

شکل ۲ طیف های FTIR برای نمونه منعقدکننده تجاری و نمونه های بسیاری تهیه شده را نشان می دهد. همچنین، خلاصه

مربوط به Fe-OH-Fe یا Al-OH-Al می‌توانند ظاهر شوند [۳۲].



شکل ۲ طیف‌های FTIR نمونه‌های (a) CS، (b) PAC، (c) PAFC1 و (d) PAFC2

در این کار پژوهشی، تفاوت قابل‌توجهی در طیف‌های FTIR آن‌ها دیده نمی‌شود. برای نمونه‌های آهن‌دار PAFC1 و PAFC2 (شکل‌های c-۲ و d-۲)، ارتعاش خمشی مربوط به Fe-OH را می‌توان در 770 cm^{-1} مشاهده کرد [۲۹]. نوارهای پهن در گستره 3300 cm^{-1} تا 3450 cm^{-1} به ارتعاش‌های کششی گروه‌های هیدروکسیل مربوط هستند. ارتعاش خمشی مولکول‌های آب موجود در ساختار منعقدکننده‌ها در گستره 1600 cm^{-1} تا 1650 cm^{-1} ظاهر می‌شوند [۳۰]. گروه‌های اکسو یا پل‌های اکسو، نوارهای جذبی مشخصی را به‌ترتیب در گستره 900 cm^{-1} تا 1100 cm^{-1} و 700 cm^{-1} تا 900 cm^{-1} نشان می‌دهند [۳۱]. همچنین، در گستره 1080 cm^{-1} تا 1130 cm^{-1} ارتعاش‌های کششی نامتقارن

جدول ۲ شیوه‌های ارتعاشی مربوط به طیف‌های FTIR منعقدکننده‌های تهیه شده و تجاری

نوع ارتعاش	عدد موجی (cm^{-1})			
	CS	PAC	PAFC1	PAFC2
ارتعاش کششی گروه‌های OH	۳۴۳۰	۳۴۳۵	۳۴۳۶	۳۳۸۸
ارتعاش خمشی مولکول‌های آب داخل ساختار بسپاری	۱۶۴۰	۱۶۲۹	۱۶۴۵	۱۶۳۹
ارتعاش کششی نامتقارن Al-OH-Al یا Fe-OH-Fe	۱۰۸۷	۱۰۹۱	۱۰۸۴	۱۱۲۶
ارتعاش خمشی Al-OH_2	۹۸۹	۱۰۰۰	۹۷۸	۹۸۹
ارتعاش کششی متقارن $\text{Al-O}(\text{AlO}_4)$	۶۲۲	۶۲۵	۶۱۷	۶۲۴

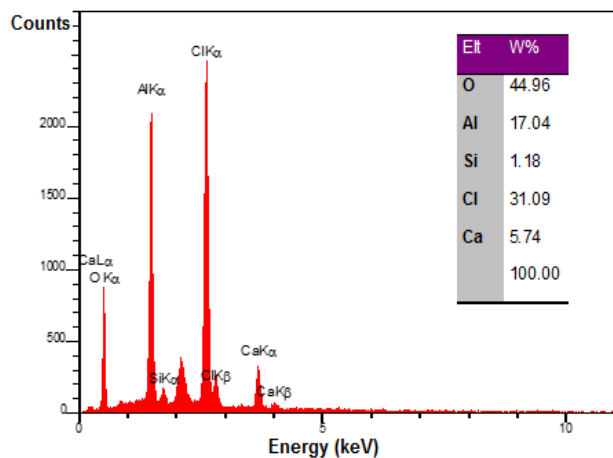
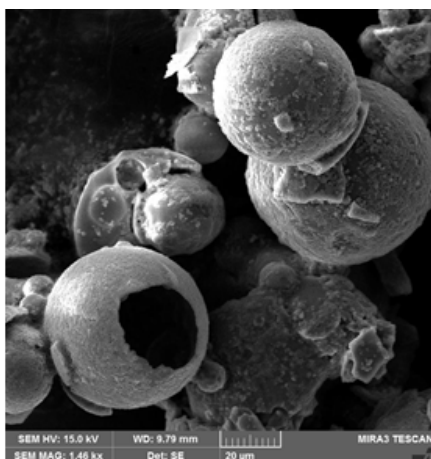
خشک‌کردن افشانه‌ای^۸ با گستره دمایی ثابت استفاده می‌شود. در صورتی که نمونه‌های تهیه‌شده در شرایط آزمایشگاه در آون تولید می‌شوند که امکان ایجاد ذره‌های آمورف را فراهم می‌کند [۳۳]. با این حال، این تغییر در ریخت تأثیر چندانی بر قدرت لخته‌گذاری ندارد و پس از تشکیل لخته‌ها، ته‌نشینی ذره‌های بسپاری به‌همراه مواد معلق در آب اتفاق می‌افتد و در پایان آبی شفاف و زلال باقی می‌ماند. طیف‌های EDS حضور سه عنصر اصلی Al، Cl و O در همه منعقدکننده‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهند. به‌دلیل کاربرد

شکل‌های ۳ تا ۶ تصاویر FESEM و داده‌های مربوط به طیف EDS برای نمونه تجاری چینی و منعقدکننده‌های تهیه شده را نشان می‌دهند. ریخت ذره‌های تشکیل‌دهنده منعقدکننده‌ها در تصاویر FESEM نشان داده شده است. تغییر ریخت در نمونه‌ها از حالت با ذره‌های کروی منظم در نمونه تجاری چینی (شکل ۳) به حالت نامنظم آمورف در نمونه‌های تهیه‌شده به‌دما و شرایط مورداستفاده هنگام خشک‌کردن فرآورده مربوط است. هنگام تهیه نمونه‌های تجاری در مرحله خشک‌کردن نهایی نمونه از روش

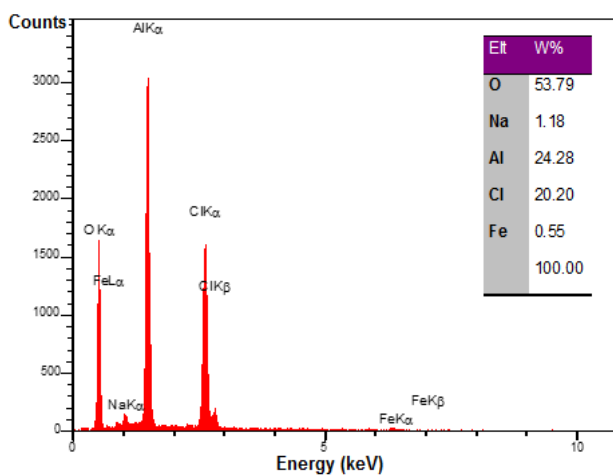
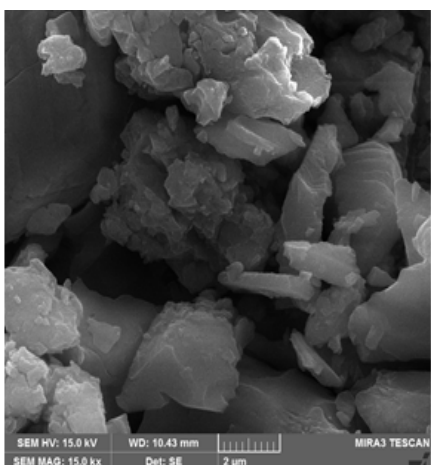
تهیه منعقدکننده های شیمیایی پلی آلومینیم کلرید و پلی آلومینیم ...

PAFC1 به وضوح از طیف EDS آن‌ها قابل تشخیص است. حضور آهن در طیف EDS نمونه PAC تهیه شده به ناخالصی آلومینیم ضایعاتی مربوط می‌شود.

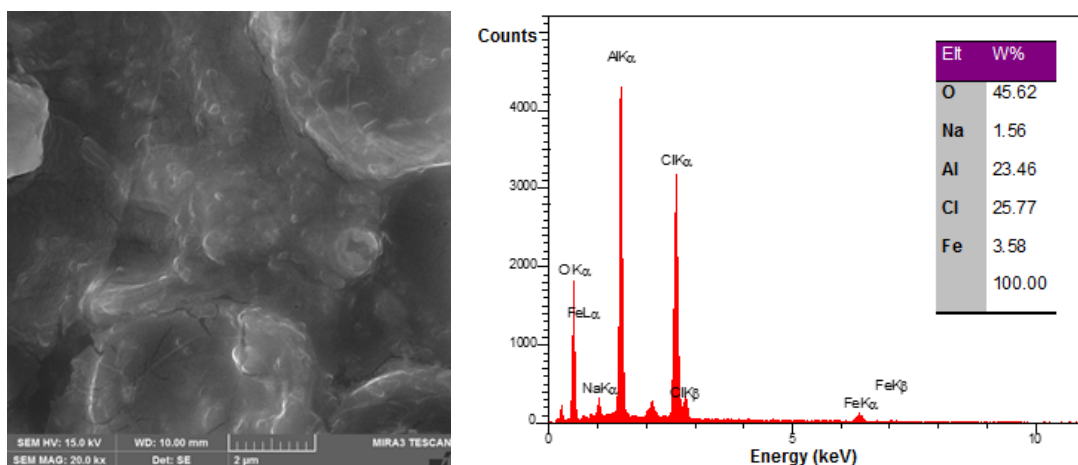
سدیم آلومینات در تهیه نمونه‌های منعقدکننده به جای کلسیم آلومینات مورد استفاده هنگام تولید نمونه تجاری چینی، عنصر Na به جای Ca در نمودارهای EDS مشاهده می‌شود. مقدار درصد بیشتر آهن موجود در نمونه PAFC2 نسبت به



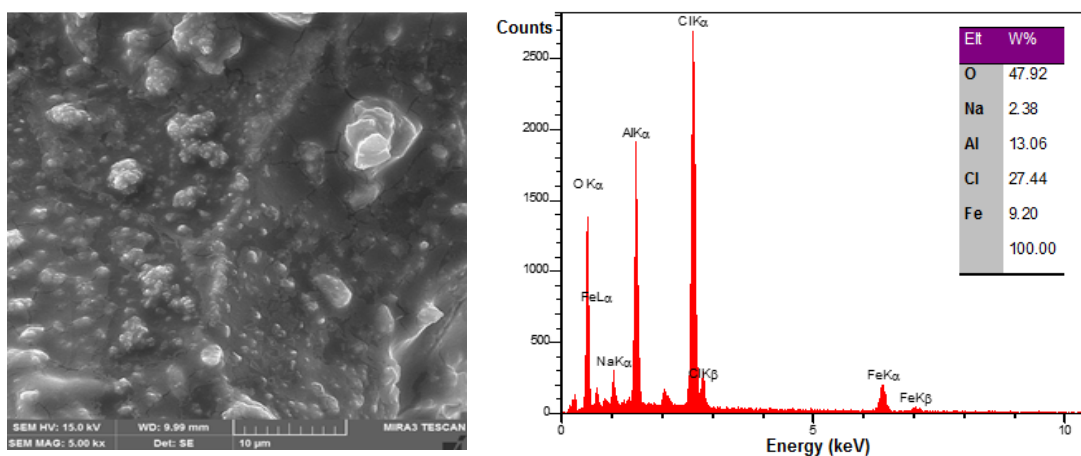
شکل ۳ تصویر FESEM و طیف EDS نمونه CS



شکل ۴ تصویر FESEM و طیف EDS نمونه PAC



شکل ۵ تصویر FESEM و طیف EDS نمونه PAFC1



شکل ۶ تصویر FESEM و طیف EDS نمونه PAFC2

کرد. حد مجاز کدورت برای آب آشامیدنی در گستره ۱ تا ۵ NTU است [۳۴]. پس از مرحله انعقاد و لخته‌سازی، آب وارد مرحله صافش می‌شود و کدورت آب در آنجا نیز تا حدی کاهش می‌یابد. بنابراین، اگر بتوان با کمینه مصرف از یک منعقدکننده (که این نکته بسیار حائز اهمیت است)، کدورت را تا حدود زیادی کاهش داد، آن منعقدکننده مناسب است [۳۵]. بنابراین، برای بررسی و مقایسه عملکرد نمونه‌های تهیه‌شده با نمونه تجاری، جام‌آزمون بر نمونه آب تصفیه‌خانه

نتیجه‌های جام‌آزمون نمونه‌ها

جام‌آزمون را می‌توان مدلی کوچک از واحدهای اختلاط سریع، انعقاد و ته‌نشینی در تصفیه‌خانه‌ها به حساب آورد. به عبارتی مقدار تزریق مواد منعقدکننده را با توجه به تغییرهای کدورت، رنگ و سایر عامل‌های شاخص کیفیت آب و فاضلاب، به صورت تقریبی به دست می‌آید و سپس با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از این آزمون می‌توان مقدار تزریق منعقدکننده‌ها را در مقیاس صنعتی (تصفیه‌خانه) تنظیم

دلیجان با کدورت های اولیه ۵/۹۸ و ۹/۱۸ NTU انجام شد و نتیجه های به دست آمده در جدول های ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳ مقدار کدورت نهایی آب در حضور غلظت های متفاوت منعقدکننده ها (کدورت اولیه: ۵/۹۸ NTU)

غلظت منعقدکننده (ppm)	CS	PAC	PAFC1	PAFC2
۱	۴/۱۸	۴/۲۵	۴/۶۸	۴/۶۳
۲	۳/۷۷	۳/۶۵	۴/۰۷	۳/۷۴
۳	۳/۲۴	۳/۲۱	۳/۵۷	۳/۳۲
۴	۳/۰۹	۲/۹۸	۳/۱۱	۳/۲۰
۵	۲/۹۲	۲/۶۳	۲/۴۲	۳/۰۱

جدول ۴ مقدار کدورت نهایی آب در حضور غلظت های متفاوت منعقدکننده ها (کدورت اولیه: ۹/۱۸ NTU)

غلظت منعقدکننده (ppm)	CS	PAC	PAFC1	PAFC2
۱	۴/۱۲	۳/۳۸	۴/۱۶	۳/۹۵
۲	۲/۳۵	۲/۸۳	۳/۱۱	۲/۹۶
۳	۲/۰۱	۲/۱۱	۲/۵۰	۲/۳۴
۴	۱/۸۴	۲/۲۸	۲/۲۱	۲/۰۷
۵	۱/۷۰	۰/۹۵	۱/۸۰	۱/۰۰

نتیجه های به دست آمده نشان می دهد که با تزریق ۱ تا ۵ ppm از هر منعقدکننده، کدورت اولیه آب تا چه مقدار کاهش یافته است. از مقایسه کدورت های نهایی آب در حضور غلظت های متفاوت انواع منعقدکننده ها مشخص می شود که نمونه های تهیه شده، عملکردی نزدیک به هم و حتی گاهی بهتر از نمونه تجاری دارند و بنابراین، می توان نسبت به تولید انبوه صنعتی آن ها شرایط لازم را فراهم کرد. منعقدکننده های PAFC1 و PAFC2 که به دلیل جایگزینی تعدادی یون Fe^{3+} به جای یون Al^{3+} در زنجیره بسیاری هزینه تولید کمتری دارند، نقش لخته کنندگی بهتر خود را در کدورت های

بالتر نشان می دهند. به طور کلی در بین منعقدکننده های تهیه شده، نمونه PAC که عملکرد بهتری در مرحله لخته سازی دارد، می تواند به عنوان جایگزین مناسب در تصفیه خانه های آب به کار گرفته شود.

نتیجه گیری

در این پژوهش، پلی آلومینیم کلرید (PAC) و نیز پلی آلومینیم فریک کلرید (PAFC) با مقادیر متفاوت از عنصر آهن به عنوان مواد منعقدکننده برای تصفیه آب و فاضلاب تهیه شدند. ویژگی های ساختاری بسپارهای تهیه شده با نمونه چینی مورد استفاده در تصفیه خانه آب دلیجان با روش های XRF، FTIR، FESEM و EDS مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه های XRF و EDS نشان دادند که ترکیب درصد عناصر موجود در نمونه تجاری با برخی موارد تهیه شده همخوانی خیلی خوبی دارند. به دلیل حضور گروه های عاملی یکسان در منعقدکننده های مورد بررسی، طیف های FTIR آن ها شباهت زیادی دارند. نوار مربوط به ارتعاش Fe-OH منعقدکننده های آهن دار در 770 cm^{-1} مشاهده می شود. از مشاهده تصاویر FESEM منعقدکننده ها مشخص می شود که مرحله خشک کردن فرآورده ها می تواند در ایجاد ذره های بلوری با ریخت منظم و یکنواخت تأثیرگذار باشد. در پایان، مقایسه کارایی بسپارهای تهیه شده و نمونه تجاری در فرایند لخته سازی تصفیه آب به کمک دستگاه جام آزمون نشان داد که نوع منعقدکننده و به عبارتی مقدار آلومینیم در رشته های بسپاری در فرایند انعقاد از اهمیت بیشتری برخوردار است. از میان منعقدکننده های تهیه شده، نمونه PAC کیفیت انعقاد مناسب تری حتی نسبت به نمونه وارداتی چینی داشت و منعقدکننده های آهن دار با هزینه تولید پایین تر، توانایی لخته سازی بهتری را در کدورت های بالاتر آب از خود نشان دادند.

مسئولان محترم شرکت آب و فاضلاب استان قم که برای بررسی کیفیت نمونه‌های تهیه شده در فرایند لخته‌سازی نهایت همکاری را داشتند، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه قم و همچنین، از مدیریت محترم و

مراجع

- [1] Shokri, A.; Desalination and Water Treatment 111, 173-182, 2018.
- [2] Shokri, A.; Abdolkarimi, M.; Journal of Applied Research in Chemistry 14(4), 96-107, 2021.
- [3] Shokri, A.; Journal of Applied Research in Chemistry 14(3), 96-105, 2020.
- [4] Rostami-Vartooni, A.; Moradi-Saadatmand, A.; Bagherzadeh, M.; Mahdavi, M.; Iranian Journal of Catalysis 9(1), 27-35, 2019.
- [5] Shokri, A.; Iran. J. Chem. Chem. Eng. 38, 113-119, 2019.
- [6] Saxena, K.; Brighu, U.; Choudhary, A.; Environ. Technol. Rev. 7(1), 156-176, 2018.
- [7] Vajihinejad, V.; Gumfekar, S.P.; Bazoubandi, B.; Rostami Najafabadi, Z.; Soares, J.B.; Macromol. Mate. and Eng. 304(2), 1800526, 2019.
- [8] Zhang, P.; Hahn, H.H.; Hoffmann, E.; Zeng, G.; Chemosphere 57(10), 1489-1494, 2004.
- [9] Yang, Z.; Gao, B.; Yue, Q.; Chemical Engineering Journal 165(1), 122-132, 2010.
- [10] Zakaria, Z.A.; Ahmad, W.A.; Water, Air, & Soil Pollution. 231(6), 1-10, 2020.
- [11] Cheng, W.P.; Hsieh, Y.J.; Yu, R.F.; Huang, Y.W.; Wu, S.Y.; Chen, S.M.; Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 41(5), 547-552, 2010.
- [12] Hendricks, D.; "Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, Chemical, and Biological", CRC Press, USA, 2010.
- [13] Lal, K.; Garg, A.; Journal of Environmental Chemical Engineering 7(5), 103204, 2019.
- [14] Wei, N.; Zhang, Z.; Liu, D.; Wu, Y.; Wang, J.; Wang, Q.; Chinese Journal of Chemical Engineering 23(6), 1041-1046, 2015.
- [15] Liu, B.; An, P.; Chen, J.; Xu, X.; Liu, L.; Yang, F.; Process Safety and Environmental Protection 140, 380-391, 2020.
- [16] Gao, B.Y.; Chu, Y.B.; Yue, Q.Y.; Wang, B.J.; Wang, S.G.; Journal of environmental management 76(2), 143-147, 2005.
- [17] Wei, H.; Gao, B.; Ren, J.; Li, A.; Yang, H.; Water Research 143, 608-631, 2018.
- [18] Shen, Y.H.; Dempsey, B.A.; Environment International. 24(8), 899-910, 1998.
- [19] Rizzo, L.; Lofrano, G.; Grassi, M.; Belgiorno, V.; Separation and Purification Technology. 63(3), 648-653, 2008.
- [20] Vijayaraghavan, G.; Sivakumar, T.; Kumar, A.V.; International Journal of Advanced Engineering Research and Studies 1(1), 88-92, 2011.
- [21] Mbogo, S.A.; Journal of Environmental Health 70(7), 46-50, 2008.
- [22] Saranya, P.; Ramesh, S.T.; Gandhimathi, R.; Desalination and Water Treatment 52(31-33), 6030-6039, 2014.
- [23] Sadeghi, F.; Vissers, A.J.; SPE Production & Operations 35, 384-392, 2020.
- [24] Aguilar, M.I.; Sáez, J.; Lloréns, M.; Soler, A.; Ortuno, J.F.; Meseguer, V.; Fuentes, A.; Chemosphere 58(1), 47-56, 2005.
- [25] Shi, B.; Li, G.; Wang, D.; Feng, C.; Tang, H.; J. Hazard. Mater. 143(1-2), 567-574, 2007.
- [26] Zouboulis, A.I.; Tzoupanos, N.; Desalination 250(1), 339-344, 2010.
- [27] Ma, D.; Guo, M.; Zhang, M.; Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy 49(2), 225-231, 2013.
- [28] Jawad, A.S.; Al-Alawy, A.F.; AIP Conference Proceedings 2213, 020174, 2020.
- [29] Zhang, Y.; Li, S.; Wang, X.; Ma, X.; Wang, W.; Li, X.; Separation and Purification

- Technology 146, 311-316, 2015.
- [30] Li, F.; Jiang, J.Q.; Wu, S.; Zhang, B.; Chem. Eng. J. 156(1), 64-69, 2010.
- [31] Tzoupanos, N.D.; Zouboulis, A.I.; Tsoleridis, C.A.; Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects 342(1-3), 30-39, 2009.
- [32] Liao, Y.; Tang, X.; Yang, Q.; Chen, W.; Liu, B.; Zhao, C.; Zhai, J.; Zheng, H; RSC Adv. 7(32), 19856-19862, 2017.
- [33] Leetmaa, K.; Gomez, M.A.; Becze, L.; Guo, F.; Demopoulos, G.P.; Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 89(2), 206-213, 2014.
- [34] Kumar, M.; Puri, A.; Indian J. Occup. Environ. Med. 16(1), 40-44, 2012.
- [35] Maćczak, P.; Kaczmarek, H.; Ziegler-Borowska, M.; Materials 13, 3951-3992, 2020.