

سنتز نانوفایبرهای اصلاح شده با نانوجاذب‌های هیبریدی به روش الکتروریسی جهت حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ از محیط‌های آبی

سعید مسعودنیا، محمد حبیبی جویباری*، رامین ظفرمهراییان، مهدی عبادی، فریبرز کاوه
گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۱۰ تاریخ تصحیح: ۹۸/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۰۱

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی و مقایسه قابلیت استفاده از نانوالیاف‌های کیتوسان اصلاح شده با مزوپروس سیلیسی عامل‌دار شده به روش الکتروریسی برای حذف رنگ زرد مستقیم از محلول‌های آبی است. روش الکتروریسی یک روش نوین برای تهیه نانوالیاف می‌باشد. نانوالیاف‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه‌های *FT-IR*، *TEM*، *Fe-SEM*، *XRD* و تست کشش مورد پایش و شناسایی قرار گرفت. سپس تاثیر پارامترهای عملیاتی مختلف با هدف به دست آوردن شرایط مطلوب برای انجام فرآیند جذب از جمله نوع و مقدار نانوجاذب، *pH*، غلظت اولیه رنگ و زمان تماس مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت یافتن ایزوترم‌های مناسب جذب رنگ زرد مستقیم انجام شد. شرایط مطلوب برای حذف توسط نانوالیاف‌های کیتوسان مزوپروس‌های سیلیسی با جاذب *SBA-15-NH₂* در ۴۰ دقیقه تماس، *pH=2*، مقدار جاذب ۰٫۰۵ گرم با غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد حذف رنگ زرد مستقیم از مدل ایزوترم لانگمویر و فرندلیچ تبعیت می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که نانوالیاف‌های *CTS/SBA-15-NH₂* به طور موثری رنگ زرد مستقیم را جذب می‌نماید و دارای پتانسیل خوبی برای تصفیه پساب‌های آلوده به رنگزها می‌باشد.

کلمات کلیدی: نانوفایبرهای اصلاح شده، مزوپروس‌های عامل‌دار شده، الکتروریسی، رنگ، حذف.

۱- مقدمه

محیط‌زیست با طیف وسیعی از آلودگی‌های شیمیایی که در هوا، آب، خاک و رسوبات وجود دارد، تهدید می‌شود. امروزه فاضلاب صنایع حجم بسیاری از آلاینده‌های آلی و غیر آلی را تولید می‌کنند [۱]. رنگ‌ها طیف مهمی از آلودگی‌ها هستند که در بسیاری از صنایع مانند نساجی، کاغذ، چاپ، مواد غذایی، لوازم آرایشی و... استفاده می‌شوند. اکثر رنگ‌های صنعتی دارای خواص نامطلوب مانند سمیت و جهش‌زایی هستند [۲] که متأسفانه اکثر آن‌ها پایدار و مقاوم در برابر تجزیه فوتونی، تجزیه زیستی و اکسید کننده هستند [۳]. آلودگی ناشی از فاضلاب صنعتی برای بسیاری از کشورها مشکلی رایج است [۴].

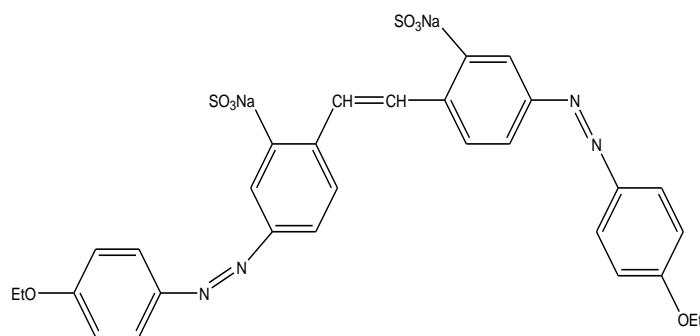
حذف رنگ از آب بسیار حائز اهمیت می‌باشد، زیرا کیفیت آب به شدت تحت تاثیر رنگدانه‌ها است. حضور غلظت‌های بسیار پائینی از رنگ (کمتر از ۱ میلی‌گرم در لیتر) در آب قابل رویت می‌باشد. علاوه بر این، بسیاری از رنگ‌ها باعث مشکلات بهداشتی مانند درماتیت آلرژیک، سوزش پوست، سرطان و جهش در انسان می‌شود [۵].

از آنجاییکه رنگ‌ها، ترکیبات آلی آروماتیکی هستند که نور را در ناحیه مرئی جذب می‌کنند و یکی از بحرانی‌ترین آلاینده‌ها برای اکوسیستم‌های طبیعی به شمار می‌روند، بنابراین تصفیه پساب‌های رنگی قبل از تخلیه آن‌ها به محیط‌زیست کاملاً ضروری است [۶]. طیف گسترده‌ای از روش‌ها از جمله جذب [۷]، اکسیداسیون شیمیایی [۸]، اکسیداسیون الکتروشیمیایی [۹] و اکسایش فوتوکاتالیتی [۱۰] برای حذف رنگ از پساب و فاضلاب استفاده می‌شود. جذب فیزیکی روشی موثرتر برای حذف رنگ از پساب‌های خروجی است، این روش به علت مزیت‌هایی همچون اثربخشی و کارایی بالا، بهره‌برداری و کاربرد آسان، قابلیت دسترسی آسان به میزان وسیعی از جاذب‌ها و عدم تولید لجن، بسیار مورد توجه قرار گرفت [۱۱].

کربن فعال جاذبی است که به طور گسترده در جذب سطحی استفاده می‌شود. با این حال، کربن فعال از سینتیک جذب آهسته و ظرفیت جذب پایین، به علت دارا بودن مولکول‌های بزرگ در ساختار مزوپروس خود برخوردار است [۱۲]. جاذب ایده‌آل باید ساختاری با منافذ پایدار با توزیع یکنواخت و همچنین سطح تماس بالا داشته باشد. نانوذرات مزوپروس سیلیکا نظیر MCM-41 [۱۳] و SBA-15 [۱۴] و کربن‌های مزوپور [۱۵]، با سطح بسیار بالا، منافذ بسیار ریز، توزیع اندازه یکنواخت دارای پتانسیل بالایی برای کاربرد در بسیاری از زمینه‌ها مانند کاتالیزورها [۱۶] پیش کنترل فلزات [۱۷]، دارورسانی [۱۸]، الکترودهای کربنی اصلاح شده [۱۹] و حذف رنگ [۲۰] هستند. در سال ۱۹۹۸، Zhao و همکارانش [۱۵] در دانشگاه کالیفرنیا و منطقه سانتا باربارا (Santa Barbara) نوع جدیدی از مواد نانوپروس را که ساختاری شش وجهی با اندازه حفره‌های بزرگ‌تر از ۶ نانومتر دارد را با نام سانتا باربارای بی‌شکل یا SBA-15 معرفی کردند [۱۵]. SBA-15 یکی از محبوب‌ترین مزوپروس‌های سیلیکاتی است زیرا دارای ویژگی‌های منحصر به فرد بسیاری از قبیل سطح تماس بالا، تخلخل بالا، اندازه منافذ قابل کنترل و ریز، توزیع مرتب و یکنواخت می‌باشد. علاوه بر این، SBA-15 دارای اندازه ۳۰-۵ نانومتر است که اجازه دسترسی نامحدود به سطح داخلی مواد که منجر به سینتیک سریع فرآیندهای فیزیکی و یا شیمیایی می‌شود، را می‌دهد [۲۱]. به تازگی، طراحی جاذب‌هایی مبتنی بر ساختار مزو برای حذف رنگ از محلول‌های آبی، موضوعی است که به شدت مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲]. برای فرآیندهای جذب، انواع گروه‌های عاملی روی سطح کانال‌های مزوپروس، پراکنده یا متصل می‌شود و جاذب‌های متنوع و کاربردی را ایجاد می‌نماید [۲۳]. ترکیبات نانو ساختار می‌توانند کارایی‌های مختلفی را بر حسب اندازه حفرات و همچنین مورفولوژی از خود نشان دهند از این رو تلاش‌های زیادی در جهت اصلاح ساختار و اندازه حفرات انجام شد [۲۴].

در سال‌های اخیر نانوالیاف‌ها توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کردند، این مواد به خاطر دارا بودن ابعاد نانومتری نسبت به مقیاس معمولی تاثیر و بهبود قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌بخشند. نانوالیاف‌ها به عنوان الیافی که قطر آن‌ها در محدوده ۱۰۰-۱ نانومتر و نسبت طول به قطر آن‌ها بزرگ‌تر از ۵۰ است، شناخته می‌شود. علت پژوهش‌های اخیر دانشمندان در این زمینه به این دلیل می‌باشد که ساختار نانو الیاف هنگامی که قطر نانوالیاف پلیمری از مقیاس میکرومتر به زیر میکرون یا نانومتر کاهش می‌یابد، خواص جالبی از قبیل سطح مخصوص بسیار بزرگ، انعطاف‌پذیری و کارایی مکانیکی بسیار بالا در مقایسه با بسیاری از مواد شناخته شده را دارد. [۲۵،۲۶]. برای سنتز و تولید نانوالیاف‌ها تاکنون روش‌های گوناگونی معرفی شده، که از میان آن‌ها روش الکترورسی موفق‌ترین روش برای تولید نانو ساختارهای الیافی می‌باشد. الکترورسی یک روش ساده برای تولید الیاف نازک از مواد مختلف پلیمری است که تحت تاثیر یک میدان الکترواستاتیک قرار می‌گیرد [۲۷] قطر نانوالیاف تولید شده به روش الکترورسی می‌تواند به راحتی در محدوده کمتر از ۱۰ نانومتر کنترل شود که هنوز هم این محدوده یک چالش بزرگ برای سایر روش‌ها است. امروزه زمینه‌های کاربردی بسیار زیادی برای این نانوالیاف‌ها شناخته شده که از جمله آن‌ها می‌توان به ذخیره‌سازی هیدروژن، پیل سوختی، مهندسی محیط‌زیست، بیوتکنولوژی، بیوپزشکی (مهندسی بافت، رهایش دارو، باند زخم و...) صنایع دفاعی (لباس‌های ضدگلوله، انواع حسگرها)، نانوکامپوزیت‌ها، کاتالیست‌ها، الکترونیک، فتونیک و فیلتراسیون اشاره نمود [۲۸،۳۰].

رنگ زرد مستقیم (Direct Yellow 12) (شکل ۱)، به عنوان رنگ آنیونی که متعلق به دسته آزو است به طور گسترده‌ای در فرآیندهای مختلف مانند رنگ‌آمیزی ابریشم، پشم، چرم، پنبه، چاپ نساجی، چاپ کاغذ و داروهای دامپزشکی به دلیل ثبات در محلول‌های اسیدی و قلیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رنگ‌های آزو دارای گروه‌های فعال قابل اتصال به انواع گروه‌های واکنش‌پذیر از طریق پیوندهای کووالانسی را دارا می‌باشند. برخی از عوارض جانبی مضر استفاده از رنگ زرد مستقیم ۱۲ مانند آسیب‌های چشم در انسان و حیوانات گزارش شد. [۳۱]. بررسی‌ها نشان داد که فاضلاب‌های حاوی این گروه رنگی (رنگ‌هایی با ساختار آزو) برای محیط‌زیست بسیار سمی و خطرناک می‌باشند، از این‌رو حذف این نوع ترکیبات آلاینده، بسیار حائز اهمیت است [۳۲].



شکل ۱- ساختار شیمیایی رنگ زرد مستقیم ۱۲

با توجه به این واقعیت که آب‌های آلوده به آلاینده‌های رنگی می‌تواند عواقب مخرب در سلامت انسان و اکوسیستم داشته باشد، مطالعات متعددی برای حذف این نوع آلاینده‌های خطرناک صورت گرفت. در سال ۲۰۰۹، مطالعات سینتیک برای تخریب فتوکاتالیتی رنگ زرد مستقیم ۱۲ در حضور کاتالیزور ZnO توسط A. Nageswara Rao و همکارانش انجام شد. در این پروژه تخریب فتوکاتالستی رنگ زرد مستقیم ۱۲ با استفاده از یک فرآیند دسته‌ای با استفاده از ZnO به عنوان کاتالیزور و تابش نور UV مورد مطالعه قرار گرفت [۳۳]. در سال ۲۰۱۳، حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ با استفاده از نانولوله‌های اکسید کادمیوم بارگذاری شده بر روی کربن فعال توسط مهراورنگ قاندى و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، نانولوله‌های اکسید کادمیوم که بر روی کربن فعال بارگزاری شده بود، به روش ساده و با تکنیک‌های مختلفی مانند XRD، SEM و UV-Vis شناسایی شد. این جاذب جدید برای حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ از فاضلاب استفاده شد [۳۴]. در سال ۲۰۱۷، حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ از محلول‌های آبی توسط جذب بر روی جلبک اسپرینولین به عنوان یک جاذب با کارایی بالا و سازگار با محیط زیست توسط مجتبی هدایتی مرزبالی و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت [۱]. در سال ۲۰۱۹، حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ از آب با استفاده از نانوذرات مغناطیسی CTAB پوشش داده شده توسط Alex Fabiano Cortez Campos و همکارانش بررسی شد. این مطالعه به منظور استفاده از نانوذرات مغناطیسی پوشش داده شده با (MnFe₂O₄ Fe₂O₃ CTAB) به عنوان جاذب حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ از آب بود [۳۵]. در سال ۲۰۱۸، سنتز سبز نانوساختار Dy₂Ce₂O₇ با کمک عصاره برگ زیتون توسط سحر زینت‌لو عجب‌شیر انجام شد که در این پژوهش عملکرد فوتوکاتالیزوری این نانوساختار در تخریب رنگ‌های آزو در محیط آبی بررسی شد. مقدار تخریب آلاینده مورد بررسی در این تحقیق با کمک این نانوساختار در مدت ۳۰ دقیقه ۹۸/۵٪ بدست آمد [۳۲]. در سال ۱۳۹۷، نانوکامپوزیت مغناطیسی کیتوسان-گرافن اکساید-منگنز فریت به عنوان یک جاذب زیستی مغناطیسی توسط زهرا ملایی و همکارانش سنتز و کاربرد آن برای حذف رنگ نفتول بلو بلک بررسی شد. کامپوزیت حاصل، ظرفیت جذب خوبی برای خارج کردن نفتول بلو بلک به عنوان مدلی برای رنگ‌های اسیدی، از آب نشان داد [۳۶]. در سال ۱۳۹۸، به منظور حذف رنگ راکتیو زرد از محلول‌های آبی، نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی سیلیکاتی کیت-۶ عامل‌دار شده با گروه آمین توسط شهاب شریعتی و همکارانش سنتز شد. نتایج این بررسی نشان داد که جاذب فوق می‌تواند به عنوان جاذبی مناسب برای حذف رنگ راکتیو زرد مورد استفاده قرار گیرد [۳۷]. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده، جاذب‌های پیشنهاد شده نه تنها هزینه تولید بالا بلکه از ظرفیت جذب نسبتاً کم نیز برخوردار بودند.

هدف از این مطالعه بررسی روشی به صرفه و اقتصادی برای حذف رنگ زرد مستقیم از محیط آبی توسط جذب سطحی با نانوالیاف CST/SBA-15 به عنوان جاذبی جدید و با ظرفیت بالا است [۳۸]. در این پژوهش حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ از محلول آبی از طریق نانوالیاف‌های اصلاح شده با نانوجاذب‌های هیبریدی به روش الکترورسی مورد بررسی قرار گرفت. در این

پژوهش عملکرد جذب رنگ مورد نظر بر روی جاذب‌های سنتز شده با بررسی پارامترهای تجربی مانند: نوع و مقدار جاذب، pH، غلظت اولیه، زمان تماس و همچنین برای درک کامل و بهتر روند جذب، مطالعات ایزوترمی صورت گرفت. قابل ذکر است، استفاده از نانوالیاف‌های اصلاح شده با نانوجاذب‌های هیبریدیبه روش الکتروریسی برای حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ جنبه نوآوری و جدید بودن این پروژه می‌باشد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و معرف‌های مورد استفاده

در این پژوهش، کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده دارای درجه آزمایشگاهی بوده که از شرکت مرک آلمان و سیگما آلدریچ آمریکا خریداری شدند. رنگ زرد مستقیم ۱۲ از شرکت هفت رنگ (ایران) خریداری شد. غلظت‌های مختلف از این رنگ از مقادیر محلول ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تهیه و سپس محلول‌هایی با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از رنگ مورد نظر تهیه شد.

۲-۲- دستگاه‌های مورد استفاده

به منظور شناسایی گروه‌های عاملی قرار گرفته بر روی سطح مزوپور سیلیسی SBA-15، از دستگاه طیف سنج مادون قرمز تبدیل فوریه مدل VERTEX 70 از کمپانی بروکر (Bruker) آلمان استفاده شد. شکل ظاهری و مورفولوژی سطح نانوالیاف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FE-SEM با مدل MIRA3TESCAN-XMU مشخص شد. برای مشاهده ساختار هگزاگونالی نیز از تصویر TEM دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری Technai G5 مدل Leo1455VP تحت ولتاژ 300 kV استفاده شد. برای تهیه طیف‌های XRD از دستگاه Philips Xpert با منبع تابش Cu-K α استفاده گردید و طیف‌گیری بر حسب 2θ (2-Theta(degree)) انجام گرفته است. آزمون تست کشش به منظور تعیین مقاومت کششی نانوالیاف توسط دستگاه کشش به مدل Tinif-olsen H 10 KT ساخت کشور انگلستان و به کمک نرم افزار Q-Mat انجام شد. برای تعیین غلظت باقیمانده رنگ در هر لحظه از اسپکتروفتومتری UV-Visible مدل DR500 شرکت HACH آمریکا استفاده شد.

۲-۳- سنتز نانوجاذب‌های SBA-15

۱-۳-۲- سنتز نانوجاذب SBA-15 ساده

آماده‌سازی نانوجاذب SBA-15 مشابه روش گزارش شده توسط Zhao و همکارانش بود [۱۵]. به منظور سنتز SBA-15، ابتدا ۲ گرم سورفکتانت P-123 در ۶۲/۵ گرم هیدروکلریک اسید ۱/۹ مولار تحت دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به کمک همزن مغناطیسی به مدت ۴۵ دقیقه حل شد. پس از مدت زمان گفته شده زمانی که مخلوط کاملاً یک دست شد، ۳/۸۴ گرم تترا اتیل ارتو سیلان (TEOS) به آهستگی به مخلوط واکنش اضافه شد و به مدت ۲۰ ساعت تحت دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد توسط هم زن مغناطیسی هم زده شد. سپس با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط واکنش در شرایط سکون قرار

گرفت تا منبع سیلیسی بتواند روی قالب شش وجهی ایجاد شده توسط سورفکتانت قرار بگیرد. پس از گذشت ۲۴ ساعت ماده جامد سفید رنگ حاصل شد که به منظور خروج قالب سورفکتانتی ۵۰ میلی لیتر اتانول به رسوب مورد نظر اضافه شد و مخلوط واکنش به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۸ درجه سانتی گراد تحت شرایط رفلاکس قرار گرفت. پس از گذشت ۲۴ ساعت مخلوط واکنش صاف و با مقدار کمی آب مقطر شست و شو داده شد. رسوب حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در داخل آون با درجه حرارت ۴۵-۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا پودری نرم و سفید رنگ حاصل شد.

۲-۳-۲- سنتز نانوجاذب SBA-15 عامل دار شده آمینی

نانوجاذب SBA-15 آمینی بر اساس روش توصیف شده در مقالات تهیه شد [۳۹]. برای این منظور ۲ گرم P-123 در ۶۲/۵ گرم HCl ۱/۹ مولار حل شد. سپس به محلول واکنش تا ۴۵ درجه سانتی گراد گرما داده شد و ۳/۸۴ گرم TEOS قطره قطره به آن اضافه شد. مخلوط واکنش به مدت ۴۵ دقیقه توسط همزن مغناطیسی هم زده شد و سپس مقدار ۱/۰۱۸۱ گرم APTES (به منظور ایجاد گروه -NH₂) به آن اضافه شد. مخلوط واکنش به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد هم زده شد سپس با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد مخلوط واکنش در حالت سکون قرار گرفت. P-123 توسط اتانول تحت شرایط رفلاکس به مدت ۲۴ ساعت خارج شد. محصول جامد با کاغذ صافی جدا شد و چندین بار با آب مقطر شست و شو داده شد. این ماده با عنوان SBA-15-NH₂ نامگذاری شد.

۲-۳-۲- سنتز نانوجاذب SBA-15 عامل دار شده گوگردی

بدین منظور، ۲ گرم P-123 در ۶۲/۵ گرم HCl ۱/۹ مولار در دمای اتاق حل شد. بعد از آنکه به محلول واکنش تا ۴۰ درجه سانتی گراد گرما داده شد، ۳/۸۴ گرم TEOS قطره قطره به آن اضافه شد. سپس مخلوط حاصل به مدت ۴۵ دقیقه هم زده شد و مقدار ۰,۱۳۱ گرم MPTES (به منظور ایجاد گروه -SH) به آن اضافه شد. مخلوط واکنش به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد هم زده شد. سپس با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد مخلوط واکنش در شرایط سکون قرار گرفت. P-123 توسط اتانول تحت شرایط رفلاکس به مدت ۲۴ ساعت خارج شد. محصول جامد با کاغذ صافی جدا شد و چندین بار با آب مقطر شست و شو داده شد. این ماده با عنوان SBA-15-SH نامگذاری شد.

۲-۳-۲- سنتز نانوجاذب SBA-15 عامل دار شده سولفونیلی

بدین منظور ابتدا ۴ گرم سورفکتانت P-123 در ۹۷/۵۸ گرم آب به مدت ۲ ساعت به کمک همزن مغناطیسی تحت دمای ۴۵ درجه سانتی گراد حل شد، سپس ۱/۹۷ گرم هیدروکلریک اسید ۳۷٪ به آن اضافه و به مدت ۴۵ دقیقه هم زده شد. پس از گذشت مدت زمان مذکور هنگامی که که مخلوط کاملاً یک دست شد، ۷/۶۹ گرم تترا اتیل ارتو سیلان (TEOS) به آهستگی به مخلوط واکنش اضافه گردید و به مدت ۲ ساعت تحت دمای ۴۵ درجه سانتی گراد توسط هم زن مغناطیسی هم زده شد. سپس ۰/۸۱ گرم ۳-مرکاپتوپروپیل تری متوکسی سیلان به همراه ۸/۳۷ گرم هیدروژن پراکسید به مخلوط واکنش اضافه شد و

به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای ۴۵ درجه سانتی گراد توسط همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد مخلوط واکنش در شرایط سکون قرار گرفت تا منبع سیلیسی بتواند روی قالب شش وجهی ایجاد شده توسط سورفکتانت قرار بگیرد. پس از گذشت ۲۴ ساعت ماده جامد سفید رنگ حاصل شد که به منظور خروج قالب سورفکتانتی ۵۰ میلی لیتر اتانول به رسوب مورد نظر اضافه شد و مخلوط واکنش به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۸ درجه سانتی گراد تحت شرایط رفلاکس قرار گرفت. پس از گذشت ۲۴ ساعت مخلوط واکنش صاف و با مقدار کمی آب مقطر شست و شو داده شد. رسوب حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در داخل آون با درجه حرارت ۵۰-۴۵ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا پودری نرم و سفید رنگ حاصل شد [۴۰].

۲-۳-۵- سنتز نانوجاذب SBA-15 عامل دار شده کربوکسیلیک اسیدی

نخست ۱ گرم از SBA-15 آمین دار شده در ۲۵ میلی لیتر دی متیل فرمامید خشک (DMF) ریخته شد. سپس ۰/۲ گرم سوکسینیک انیدرید به همراه ۰/۰۲ گرم N,N-دی سایکلو هگزیل کاربامید (DCC) درون ظرف حاوی ۲۵ میلی لیتر DMF ریخته شد. محلول حاوی SBA-15 را قطره قطره به درون محلول حاوی سوکسینیک انیدرید که به شدت هم زده می شد، افزوده و سپس محلول به مدت ۲۴ ساعت هم زده شد. نمونه به دست آمده با DMF و اتانول شست و شو داده شد و در اتانول سوکسله خشک شد [۴۱].

۲-۴-۴- آماده سازی محلول ها به منظور الکتروریسی

۲-۴-۱- تهیه محلول ۰/۵٪ جرمی نانوجاذب های SBA-15

بدین منظور مقدار ۰/۲ گرم از نانوجاذب های SBA-15 (ساده و عامل دار شده) سنتز شده (به طور جداگانه) به ۳۹/۸ گرم آب دیونیزه اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه توسط دستگاه تراسونیک هم زده شد تا محلول کاملا یکنواخت تشکیل شد.

۲-۴-۲- تهیه محلول ۰/۳٪ جرمی کیتوسان

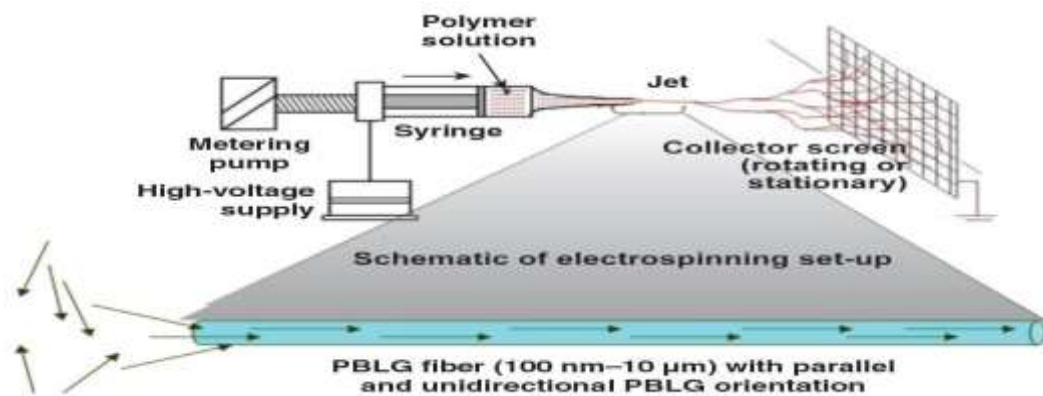
مقدار ۳ گرم پودر کیتوسان به ۹۷ گرم استیک اسید اضافه و پس از ۲ دقیقه هم زدن با همزن شیشه ای، مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه توسط دستگاه تراسونیک هم زده شد تا مخلوط کاملا یکنواخت بدست آمد.

۲-۴-۳- تهیه نانوالیاف کامپوزیتی CTS/SBA-15 (ساده و عامل دار شده)

به منظور تهیه نانوالیاف، مقدار ۱۶ میلی لیتر از محلول SBA-15 (ساده و عامل دار شده) و ۶۴ میلی لیتر محلول کیتوسان با یکدیگر مخلوط و پس از ۲ دقیقه هم زدن با همزن شیشه ای، به مدت ۲۰ دقیقه توسط دستگاه تراسونیک هم زده شد تا محلول ژله ای یکنواخت بدست آمد. محلول حاصل جهت سنتز نانوالیاف به دستگاه الکتروریسی منتقل شد. پس از مدت زمان ۱۸ ساعت نانوکامپوزیت های مورد نظر به شکل فیلم های نازک متخلخل از دستگاه خارج شدند.

۲-۵- شرایط دستگاه الکترورسی

نانوالیاف سنتز شده توسط محلول SBA-15 (ساده و عامل دار شده) با استفاده از یک دستگاه الکترورسی سنتز شد. ساختار و روش کار این دستگاه بر اساس تنظیم طرح ریزی افقی از محلول پلیمری است که در آن این ماده به یک سرنگ با استفاده از یک پمپ که در خارج از کابین الکترورسی واقع شده، تغذیه می شود. فرآیند الکترورسی بین نوک سوزن انجام می شود که به خروجی مثبت یک منبع ولتاژ بالا متصل است و یک ورق مس با یک فویل آلومینیومی یا یک ورق تفلون با گرافیت پوشیده شده است. تمام مراحل تحت شرایط مشابه با استفاده از الکتروریسند با نگه داشتن فاصله بین نوک سوزن و جمع کننده در ۲۰ سانتیمتر و میزان خوراک در ۰/۲۱۲ میلی لیتر ساعت در ساعت و تغییر ولتاژ اعمال شده (۱۱/۵، ۱۳ و ۱۴/۵ کیلو ولت) بود [۴۲].



شکل ۲- نمونه‌ای از دستگاه الکترورسی

۲-۶- آزمایش جذب سطحی

آزمایش جذب سطحی با نانوالیاف‌های SBA-15 (ساده و عامل دار شده) به روش ناپیوسته انجام گرفت. تغییرات غلظت رنگ زرد مستقیم در مدت زمان آزمایش نسبت به پارامترهای مختلف نظیر نوع و مقدار نانوجاذب، pH، غلظت اولیه و زمان تماس مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه بهتر تاثیر عوامل مورد بررسی، عوامل دیگر در شرایط پایه، ثابت نگه داشته شدند. همه آزمایش‌ها در ارلن ۲۵۰ میلی لیتری حاوی ۵۰ میلی لیتر از محلول رنگ با غلظت ۲۰ میلی گرم بر لیتر با مقدار معینی نانوجاذب بر روی همزن مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه انجام شد که در فواصل زمانی معین (۵ دقیقه) نمونه برداری از محلول انجام می گرفت. برای صاف کردن محلول نانوجاذب از میکروفیلتر عبور داده شد و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis مقدار جذب محلول صاف شده، تعیین شد. برای تعیین درصد غلظت رنگ حذف شده از معادله ۱ استفاده شد.

$$Removal(\%) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

که در این معادله A_0 و A_t به ترتیب جذب در لحظات صفر و t است. همچنین مقدار رنگ جذب شده (q_t) بر روی سطح جاذب بر حسب میلی گرم جذب شونده بر گرم جاذب در لحظات مختلف از معادله ۲ محاسبه شد.

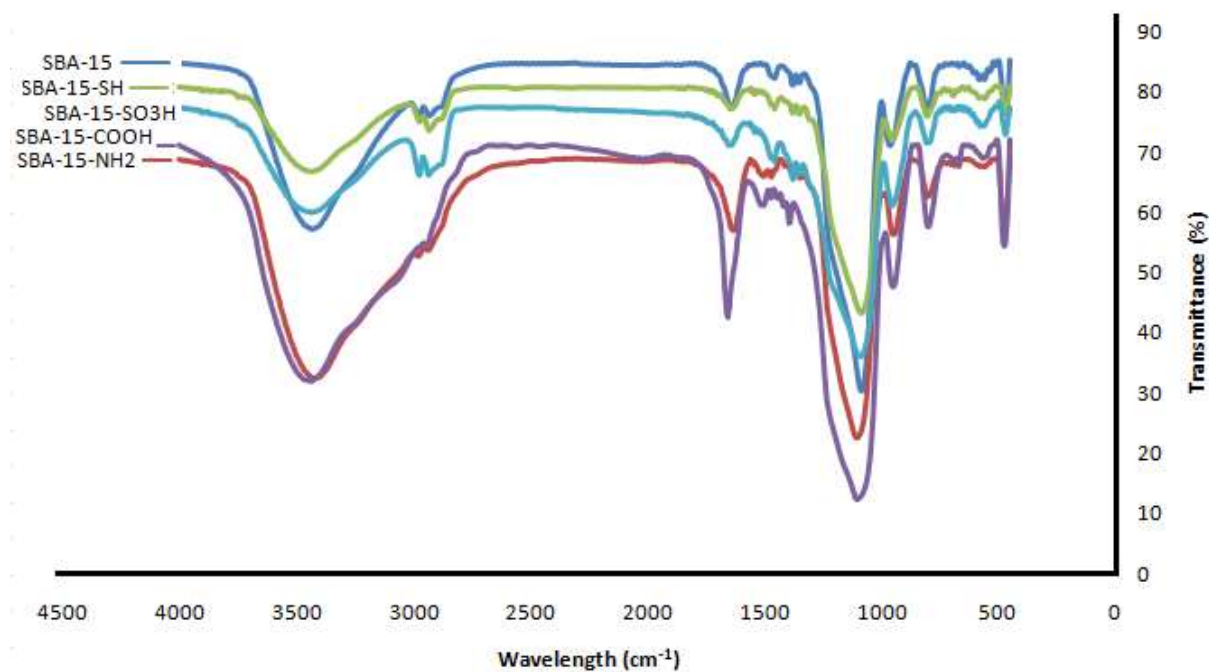
$$q_t = \left(\frac{C_0 - C_t}{m} \right) \times V \quad (2)$$

که در آن C_0 غلظت رنگ در لحظه صفر، C_t غلظت رنگ در لحظه t ، m جرم جاذب و V حجم محلول است.

۳- نتایج و بحث:

۳-۱- نتایج FT-IR

نتایج ارتعاشات FT-IR برای نانوجاذب‌های CTS/SBA-15 (ساده و عامل دار شده) در شکل ۳ و همچنین جدول ۱ نشان داده شده است. در تمام نمونه‌ها پیک مشاهده شده در 811 cm^{-1} و 1068 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن پیوند Si-O-Si در شبکه بهم پیوسته فشرده سیلیکاتی است. پیک تیز در ناحیه 3745 cm^{-1} مربوط به گروه‌های سیلانولی Si-OH است. پیوند جذب شده در 1570 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی گروه آمین، پیک مشاهده شده در حدود 2570 cm^{-1} مربوط به حالت ارتعاشی گروه S-H و پیک‌های ظاهر شده در گستره $1600-1800 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات خمشی پیوندهای C=O می‌باشد. ارتعاشات کششی OH بالای 3000 cm^{-1} ظاهر شد. با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز FT-IR می‌توان اظهار نمود گروه‌های عاملی آلی مورد نظر با موفقیت روی سطح نانو حفرات مزوپور سیلیسی قرار گرفتند.



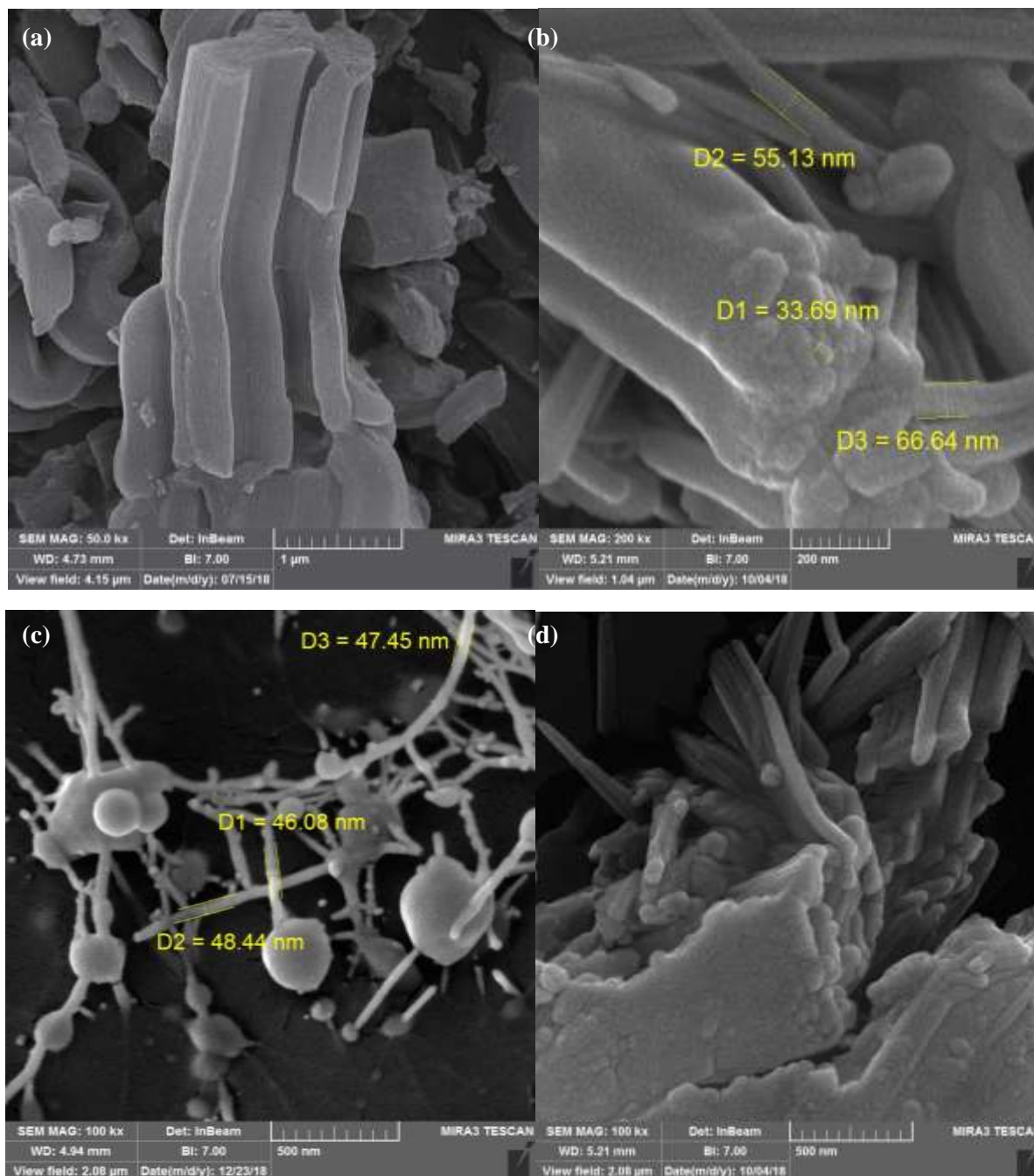
شکل ۳- مقایسه FT-IRهای SBA-15، SBA-15-NH₂، SBA-15-SH، SBA-15-SO₃H و SBA-15-COOH

جدول ۱. جدول ارتعاشات FT-IR گروه‌های عاملی موجود برای نانوجاذب‌های CTS/SBA-15 ساده و عامل‌دار شده

فرکانس (cm^{-1})	پیوند
۸۱۱	Si-O-Si
۱۰۶۸	Si-O-Si
۱۵۷۰	N-H
۱۸۰۰-۱۶۰۰	C=O
۲۵۷۰	S-H
۳۰۰۰<	O-H
۳۷۴۵	Si-OH

۲-۳- نتایج FE-SEM

تصویر FE-SEM نانوالیاف‌های سنتز شده در بزرگنمایی‌هایی با اندازه‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است. یک ساختار منظم و مرتب با اندازه نسبتاً یکنواخت در تصاویر FE-SEM مشاهده می‌شود. تصاویر FE-SEM همچنین نشان می‌دهد نانوکامپوزیت SBA-15 یک ساختار شش ضلعی با اندازه نسبتاً یکنواخت است که علاوه بر این آگلومره‌های پلیمریزاسیون شده نیز نشان‌دهنده تقارن شش ضلعی در ساختار مزوپور سیلیکات است [۴۳]. از نظر ریخت شناسی و مورفولوژی، نمونه از تعداد زیادی واحدهای خوشه‌ای (طنابی) شکل با اندازه‌های نسبتاً یکسان و تجمعات ریزمانی شکل زیادی تشکیل شده است که از نظر شکل ظاهری کاملاً مطابق با نتایج مطالعات معتبر پیشین است [۴۴]. تغییر کوچک در زوایای پراش در این مطالعه نسبت به پژوهش‌های قبلی ممکن است به تفاوت تکنیک‌های سنتز و درجه حرارت کلسینه کردن مربوط باشد [۴۵].

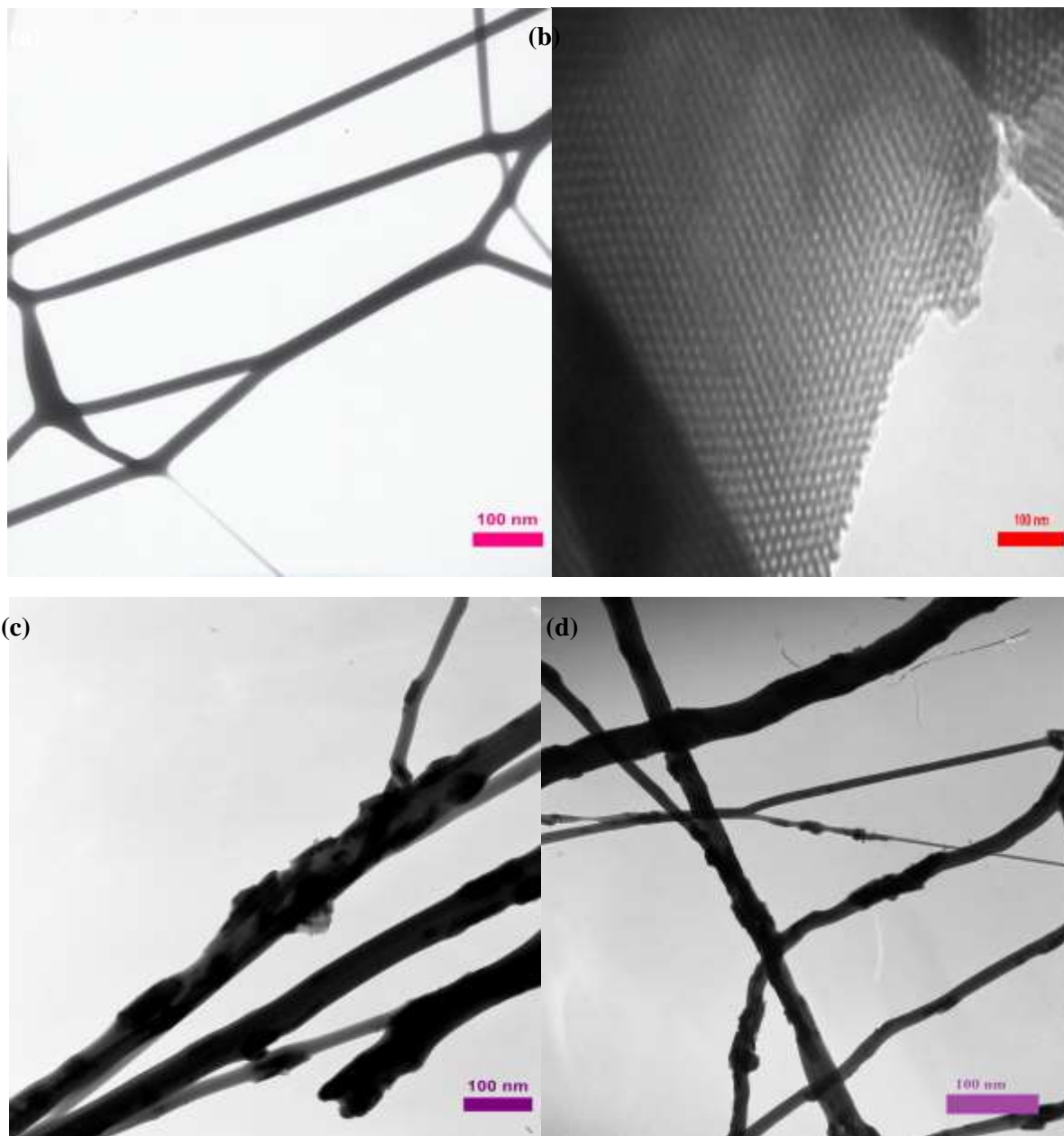


شکل ۴- تصویر FE-SEM مربوط به a,b,c: SBA-15, d: CTS/SBA-15

۳-۳- نتایج TEM

تجزیه و تحلیل مورفولوژی سنتز نانوالیافهای CTS/SBA-15 توسط TEM در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در تصاویر TEM کانال‌های تو خالی استوانه‌ای و آرایش شش ضلعی بسیار منظم با یکنواختی بالا و اندازه حفرات که به صورت دیواره‌های لوله‌ای شکل و موازی است را می‌توان به وضوح مشاهده نمود که از ویژگی‌های مشترک برای ترکیبات SBA-15 به حساب می‌آید. همچنین ساختار ترکیبات سنتز شده به صورت شش وجهی لانه زنبوری قابل مشاهده

است. نتایج TEM تایید کرد که اصلاح، داخل منافذ رخ داده و پس از تشکیل نانوکامپوزیت‌ها تغییر شکل ساختاری در ساختار SBA-15 مشاهده نشده است [۴۶،۴۷].

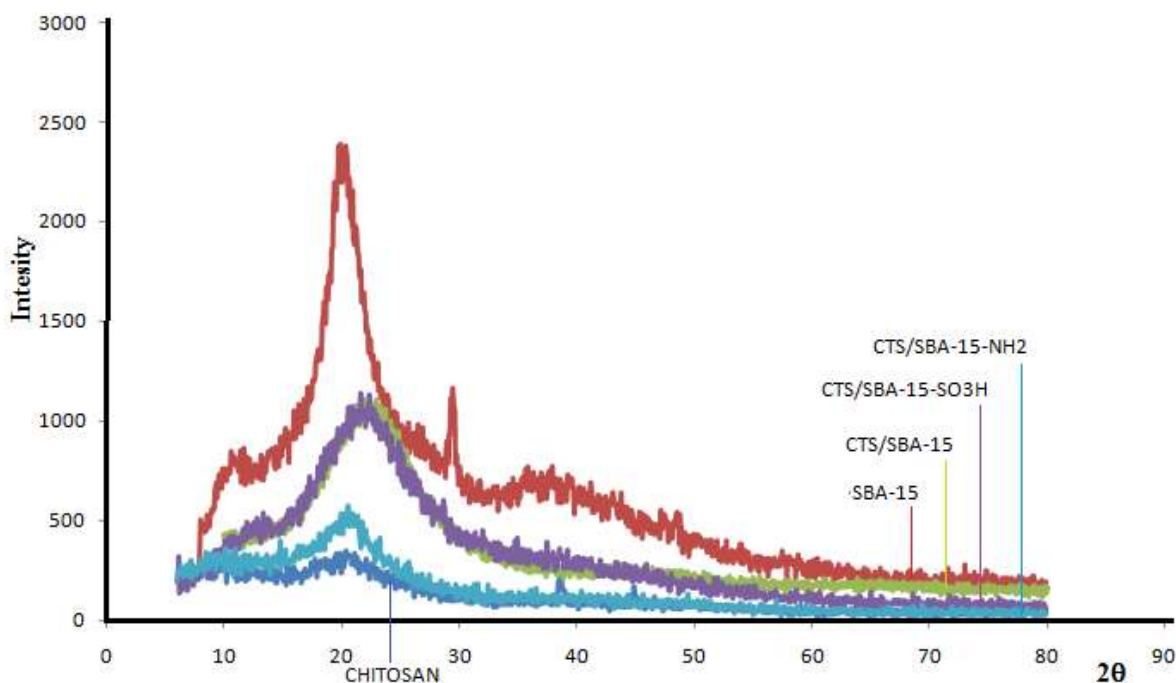


شکل ۵- تصویر TEM مربوط به a: SBA-15، b: CTS، c: CTS/SBA-15-NH₂

۳-۴- نتایج XRD

شکل ۶ نشان دهنده الگوی XRD ترکیبات سنتز شده می‌باشد. الگوی XRD برای SBA-15 دارای چهار پیک قابل ملاحظه می‌باشد. پیک‌ها می‌توانند به صورت (۱۰۰)، (۱۱۰)، (۲۰۰) و (۲۱۰) نمایه شوند و با تقارن شش ضلعی مرتبط باشند [۴۸]. الگوی XRD نشان می‌دهد که SBA-15 دارای آرایه‌های منفرد شش ضلعی می‌باشد. پیک‌های مربوط به صفحات بلوری ۱۰۰،

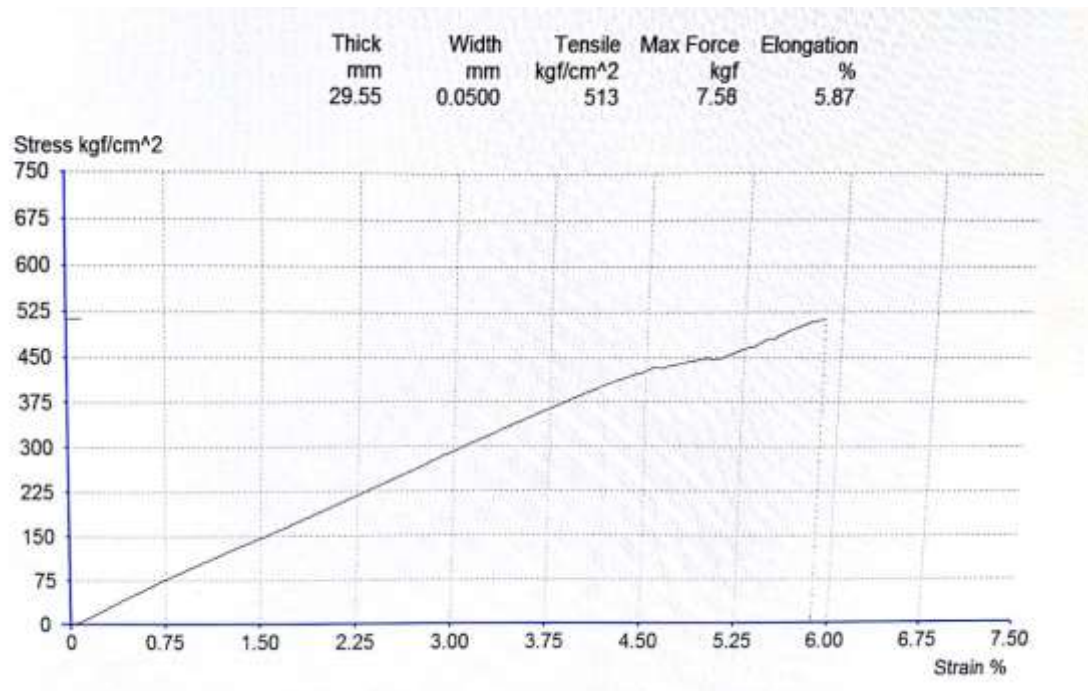
۱۱۰ و ۲۱۰ بیانگر تشکیل ساختار شش وجهی با نظم بالا در نمونه و پیک ۱۰۰ بیانگر وجود نظم حفره در ساختار نانوالیافها است [۴۹].



شکل ۶- مقایسه الگوی XRD کیتوسان، SBA-15، CTS/SBA-15، CTS/SBA-15-SO₃H، CTS/SBA-15-NH₂

۵-۳- نتایج تست کشش

تست کشش یا Tensile یکی از مهمترین تست‌های خواص مکانیکی می‌باشد. برای انجام این تست، ابتدا باید از ماده نمونه‌ای به شکل دمبل با ابعاد استاندارد تهیه شود سپس نمونه مورد نظر بین دو فک دستگاه قرار داده می‌شود و دستگاه با سرعت استاندارد شروع به کشیدن نمونه می‌نماید و همزمان میزان نیرو و مقدار مقاومت توسط کامپیوتر ثبت می‌شود. با توجه به اینکه ابعاد نمونه به صورت دقیق با کولیس اندازه گرفته می‌شود در نتیجه با تقسیم کردن نیرو بر سطح، تنش و با تقسیم کردن جابه‌جایی به طول اولیه، کرنش به دست می‌آید. و می‌توان منحنی تنش-کرنش را رسم کرد. با توجه به منحنی تنش-کرنش رفتار ماده مشخص می‌شود که آیا شکننده است یا چقرم.

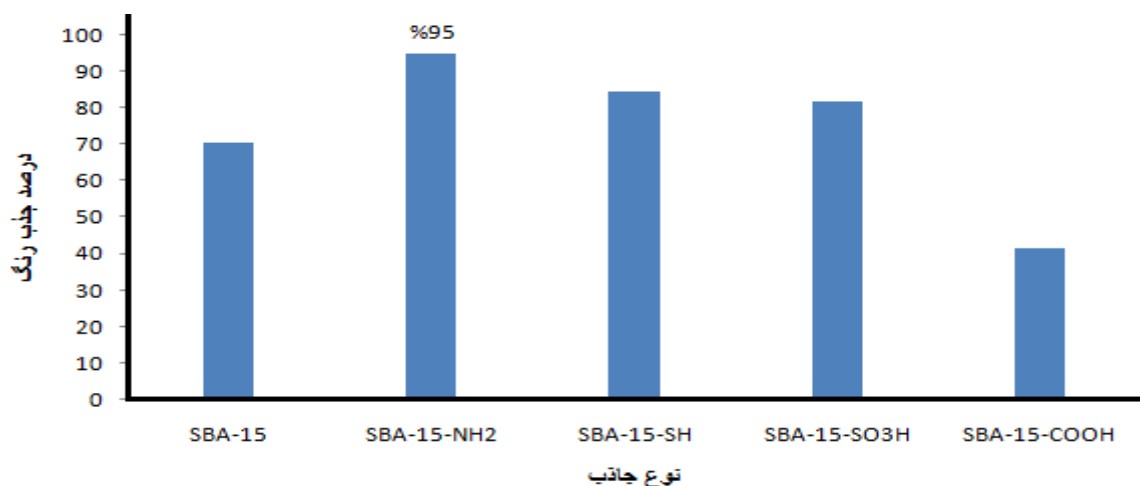


شکل ۷- نمودار تست کشش تنش بر حسب کرنش

نانوالیاف‌های سنتز شده آنقدر قوی هستند که می‌توانند تنش زیادی را بدون تغییر شکل تحمل کنند، با توجه به نمودار فوق، نتایج نشان می‌دهد ماده مذکور می‌تواند تنش و کرنش زیادی را تحمل کند و با توجه به عامل دار شدن ترکیبات سنتز شده این میزان بهبود یافته و افزایش می‌یابد.

۳-۶- بررسی اثر نوع جاذب

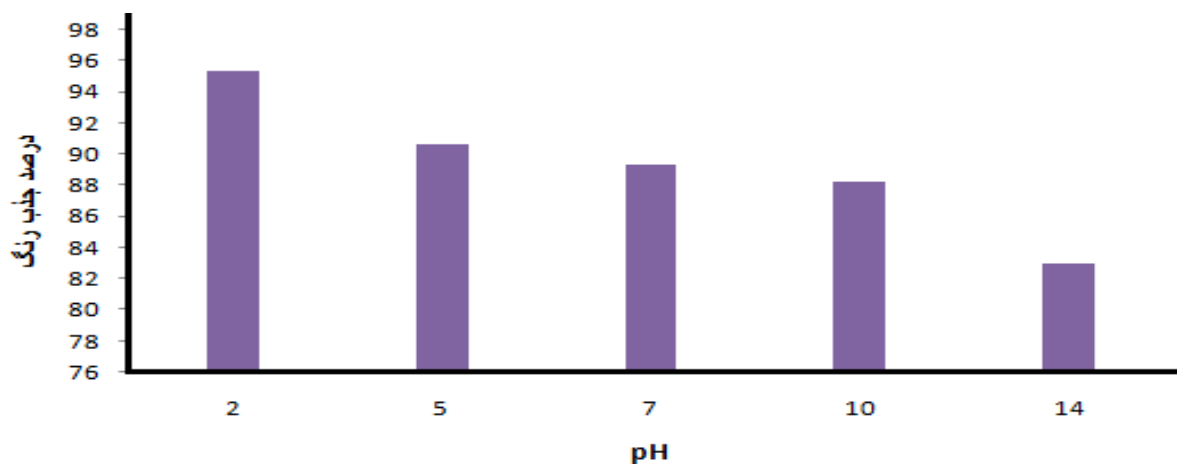
در این مرحله تاثیر نوع نانوالیاف سنتز شده بوسیله فرآیند الکتروریسی در کاهش میزان رنگ زرد مستقیم بررسی شد. برای این منظور مقدار ۰/۰۳ گرم از نمونه‌های SBA-15 ساده، آمینی، گوگردی، اسیدی و سولفونیلی برای محلول رنگ زرد مستقیم با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد. در هر آزمایش نمونه جاذب با ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه رنگ به مدت ۳۰ دقیقه تماس داده شد. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج مشخص می‌شود نانوالیاف SBA-15-NH₂ به دلیل وجود سایت‌های جذب بیشتر و ویژگی‌های جذبی بهتر نسبت به سایر نانوالیاف‌ها، به عنوان جاذب برتر انتخاب گردید.



شکل ۸- تاثیر نوع جاذب بر میزان جذب رنگ زرد مستقیم ۱۲ (۰/۰۳ گرم جاذب، pH=7، غلظت اولیه: 20 mg/L، ۳۰ دقیقه تماس)

۳-۷- بررسی اثر pH

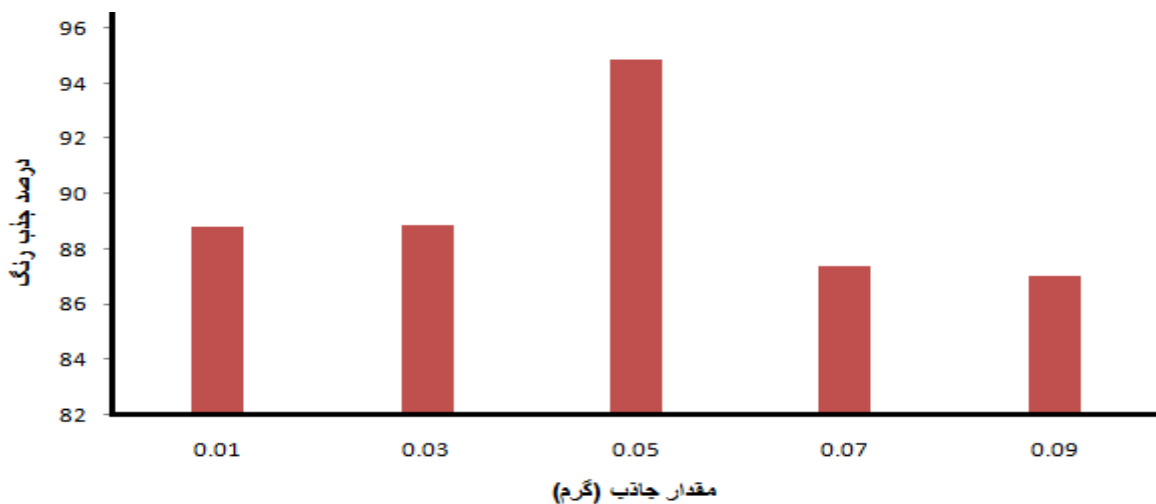
pH یکی از فاکتورهای بسیار مهمی است که از طریق تاثیر بر ساختار رنگ و بار سطحی جاذب بر فرآیند جذب و ظرفیت جذب تاثیر می‌گذارد [۵۰]. به منظور بررسی اثر pH، محلول‌هایی در محدوده ۲ تا ۱۴ با هیدروکلریک اسید، سدیم هیدروکسید و به کمک دستگاه pH متر آماده‌سازی شد. در این مرحله pH به عنوان تنها متغیر آزمایش بوده و آزمایش‌ها با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها به صورت غلظت رنگ ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۰/۰۳ گرم از جاذب در مدت زمان ۳۰ دقیقه انجام شد. نتایج آزمایش برای حذف رنگ‌های زرد مستقیم در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج، در pH‌های پایین، پروتون‌های بیشتری در دسترس هستند بنابراین بار منفی رنگ و بارهای مثبت سطح جاذب، جاذبه زیادی داشته و باعث افزایش درصد حذف رنگ می‌شوند در نتیجه در pH اسیدی ۲ به عنوان محیط بهینه انتخاب شد. در pH‌های بالاتر ممکن است بارهای منفی و یون‌های OH⁻ در سطح جاذب در دسترس بوده و با بارهای منفی رنگ برهمکنش داشته باشند که دافعه زیادی ایجاد کرده و در نتیجه درصد حذف رنگ کاهش می‌یابد [۵۱].



شکل ۹- تاثیر pH بر میزان جذب رنگ زرد مستقیم ۱۲ توسط SBA-15-NH₂ (۰/۰۳ گرم جاذب، غلظت اولیه: 20 mg/L، ۳۰ دقیقه تماس)

۸-۳- بررسی اثر مقدار جاذب

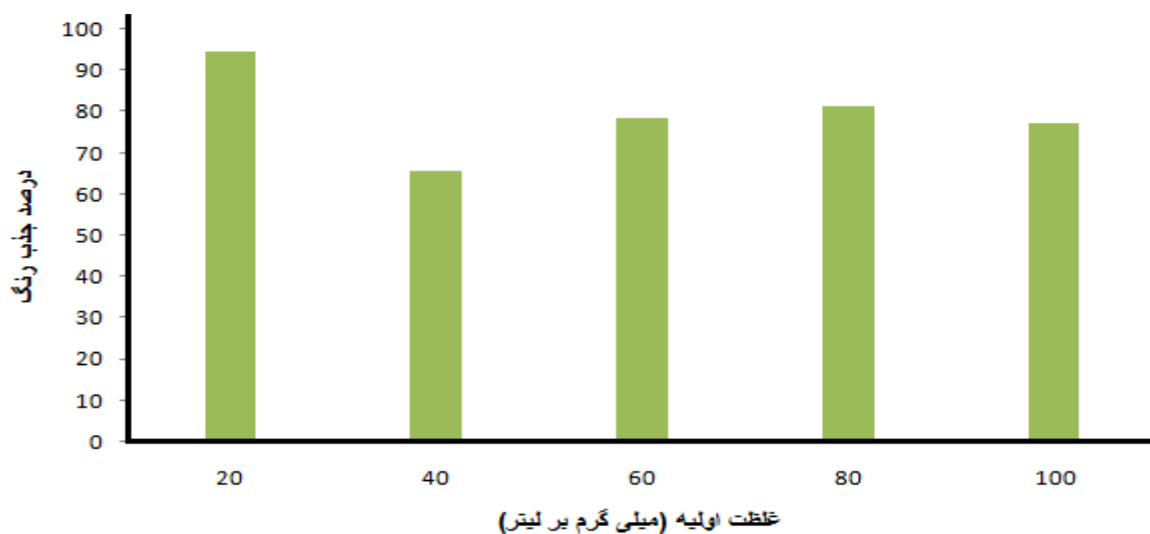
اندازه و مقدار جاذب به طور قابل توجهی بر مقدار جذب رنگ زرد مستقیم تاثیر می‌گذارد. به منظور بررسی اثر مقدار نانوالیاف در حذف رنگ، محلولی با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از رنگ زرد مستقیم تهیه شد و مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۹ گرم از نانوجاذب به آن اضافه گردید و پس از ۳۰ دقیقه هم زدن بر روی همزن مغناطیسی، میزان جذب محلول‌های صاف شده اندازه‌گیری شد که نتایج حاصل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به درصد حذف، دوز ۰/۰۵ گرم جاذب به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.



شکل ۱۰- تاثیر مقدار جاذب بر جذب رنگ زرد مستقیم توسط SBA-15-NH₂ (pH=2، غلظت اولیه: 20 mg/L، ۳۰ دقیقه تماس)

۹-۳- بررسی اثر غلظت اولیه

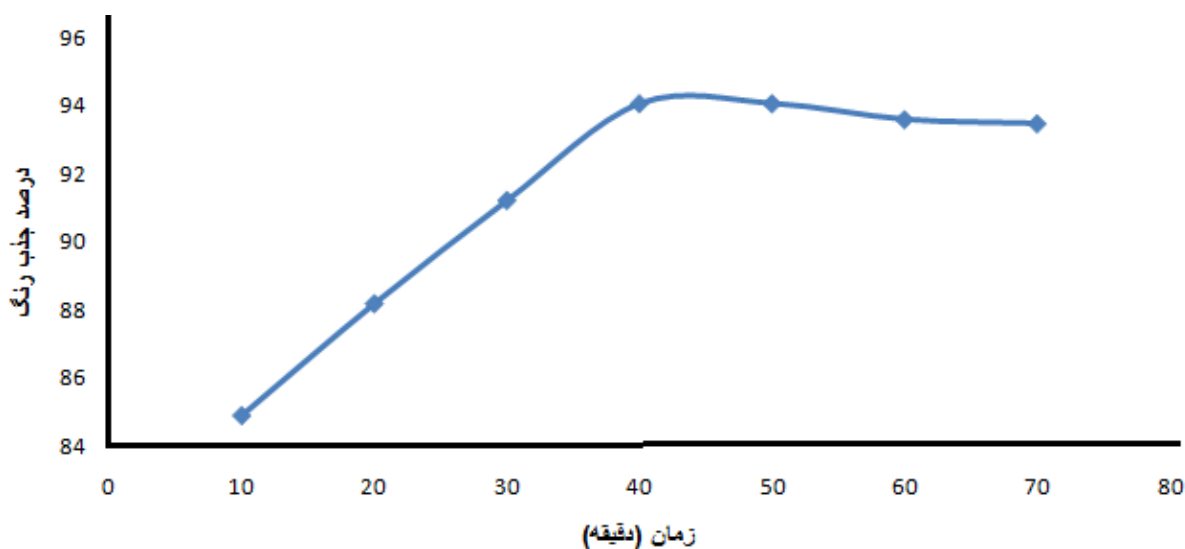
تاثیر غلظت اولیه رنگ زرد مستقیم در محدوده ۱۰۰-۲۰ میلی‌گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بدین منظور محلول‌هایی با غلظت‌های متفاوت ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از رنگ مورد نظر تهیه و مقدار ۰/۰۵ گرم از نانوجاذب SBA-15-NH₂ به آن‌ها اضافه شد و پس از ۳۰ دقیقه هم زدن توسط همزن مغناطیسی، میزان جذب محلول‌های صاف شده اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج می‌توان گفت در محدوده غلظتی مورد نظر حذف با درصد قابل توجهی اتفاق افتاده است.



شکل ۱۱- تاثیر غلظت اولیه رنگ بر جذب رنگ زرد مستقیم توسط SBA-15-NH₂ (۰/۰۵ گرم جاذب، pH=2، ۳۰ دقیقه تماس)

۳-۱۰- بررسی اثر زمان

زمان تماس واکنش به عنوان یکی دیگر از متغیرهای موثر در واکنش جذب، با دامنه ۱۰ تا ۷۰ دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی زمان تماس نانوالیاف برای حذف رنگ، محلولی با غلظت ۲۰ میلی گرم بر لیتر از رنگ زرد مستقیم تهیه شد و پس از اضافه کردن ۰/۰۵ گرم از نانوالیاف SBA-15-NH₂ به آن، مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ دقیقه بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد و پس از صاف کردن میزان جذب محلول اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۱۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد زمان بهینه برای این فرآیند ۴۰ دقیقه می‌باشد.



شکل ۱۲- تاثیر زمان تماس بر جذب رنگ زرد مستقیم توسط SBA-15-NH₂ (۰/۰۵ گرم جاذب، pH=2، غلظت اولیه: 20 mg/L)

۱۱-۳- بررسی ایزوترم جذب

ایزوترم‌های جذب، خواص جذبی و داده‌های تعادلی هستند که به توصیف چگونگی واکنش آلاینده‌ها با مواد جاذب می‌پردازند و در بهینه‌سازی مصرف جاذب نقش اساسی دارند. یک توصیف ریاضی دقیق از ظرفیت تعادلی جذب، برای یک پیش‌بینی قابل اعتماد از عوامل موثر در جذب و یک مقایسه کمی از رفتار جذبی سیستم‌های جذب متفاوت برای هر سامانه ضروری است. معادلات مختلفی برای بیان ارتباط جذب گونه‌ها بر جاذب‌های مختلف وجود دارد. برای هر سامانه مشخص، با انجام آزمایشاتی می‌توان تعیین نمود که کدام معادله می‌تواند به عنوان ایزوترم جذب مورد استفاده قرارگیرد. دو معادله که بیش از سایر معادلات در توصیف ایزوترم‌های جذب سامانه‌های جامد-مایع کاربرد دارند، معادلات لانگمویر و فرندلیچ هستند [۵۲].

در مدل لانگمویر فرض می‌شود که جریان جذب سطحی شیمیایی سرانجام به تشکیل یک لایه تک مولکولی بر روی سطح جاذب منجر شود و منحنی هم‌دمای جذب سطحی از بررسی تعادلی به دست می‌آید که میان آنالیت و تک لایه‌ای که به شکل ناتمام تشکیل یافته، برقرار شده است. معادله لانگمویر می‌تواند به صورت معادله ۳ تعریف شود:

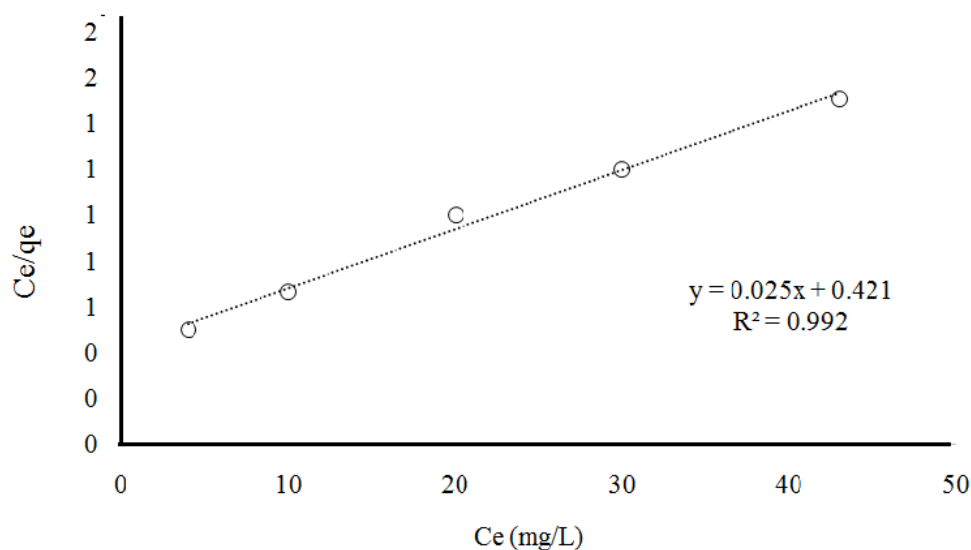
$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

که در این معادله، q_m حداکثر فضای موجود برای جذب یا ظرفیت جذب، C_e غلظت تعادلی، K_L ثابت تعادل و q_e مقدار رنگ جذب شده بر واحد وزن جاذب است. فرم خطی معادله ۳ به صورت معادله ۴ خواهد بود:

$$C_e/q_e = 1/K_L q_m + C_e/q_m \quad (4)$$

طبق معادله ۴، اگر تغییرات C_e/q_e نسبت به C_e رسم شود، نتیجه بدست آمده یک خط خواهد بود که از شیب آن q_m و از عرض از مبدا آن K_L را می‌توان بدست آورد.

ایزوترم جذب که در شکل ۱۳ ارائه شده است و وضعیت خطی آن ($R^2=0.992$) بیانگر تبعیت پدیده جذب سطحی از الگوی لانگمویر است. با توجه به مقدار q_m که نشان‌دهنده ظرفیت جذب جاذب می‌باشد، مشخص می‌گردد که این جاذب ظرفیت نسبتاً مناسبی برای جذب رنگ زرد مستقیم دارد.



شکل ۱۳- ایزوترم جذب لانگمویر برای جذب رنگ زرد مستقیم توسط SBA-15-NH₂

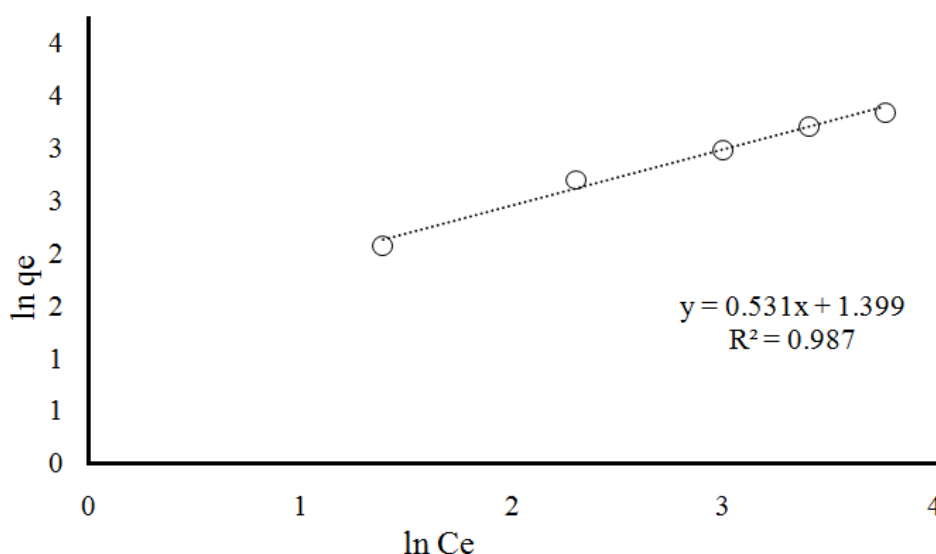
جدول ۲. پارامترهای ایزوترم جذب لانگمویر برای جذب رنگ زرد مستقیم توسط SBA-15-NH₂

R ²	q _{max}	K _k
0.992	40.000	0.059

طبق مدل فرندلیچ، مقدار ماده جذب شده، تابع مشخصات ماده جذب شونده، غلظت آن در محلول و همچنین دما است. این مدل با فرض جذب روی سطوح غیریکنواخت همراه با برهمکنش بین مولکول‌های حل شونده و توزیع غیریکنواخت گرمای جذب بر سطح مشتق شده است. ایزوترم فرندلیچ در حالت لگاریتمی به صورت خطی بر اساس معادله 5 در نظر گرفته می‌شود:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n_f} \ln C_e \quad (5)$$

برای رسم ایزوترم جذب فرندلیچ باید $\ln C_e$ در برابر $\ln q_e$ رسم شود. نمودار این ایزوترم برای رنگ زرد مستقیم در شکل ۱۴ آورده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، مقدار ($R^2=0.987$) نشان می‌دهد که جذب رنگ زرد مستقیم بر روی جاذب SBA-15-NH₂ از مدل جذب فرندلیچ نیز پیروی می‌کند.



شکل ۱۴- ایزوترم جذب فرندلیچ برای جذب رنگ زرد مستقیم توسط SBA-15-NH₂

جدول ۳. پارامترهای ایزوترم جذب فرندلیچ برای جذب رنگ زرد مستقیم توسط SBA-15-NH₂

R ²	K _f	n
0.987	4.051	1.883

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش از نانوالیاف‌های CTS/SBA-15 در حذف رنگ زرد مستقیم ۱۲ از محلول‌های آبی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که حذف این رنگ از محلول‌های آبی توسط نانوالیاف عامل‌دار شده SBA-15-NH₂ تحت شرایط اسیدی با مقدار بهینه جاذب ۰/۰۵ گرم، زمان تماس ۴۰ دقیقه با غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر بهتر صورت می‌گیرد، به طوری که راندمان حذف ۹۵٪ را نشان می‌دهد. همچنین حذف رنگ زرد مستقیم از محلول آبی توسط این نانوالیاف از مدل لانگمویر و فرندلیچ تبعیت می‌کند. با توجه به اثرات سوء بهداشتی رنگ در محیط‌زیست و نتایج حاصل در مقایسه با کارایی سایر روش‌ها، استفاده از نانوالیاف‌های SBA-15-NH₂ را می‌توان به عنوان یک روش مناسب در حذف رنگ زرد مستقیم از پساب‌ها، استفاده مجدد از پساب‌ها و کاهش اثرات سوء غیرقابل جبران زیستی آن‌ها مطرح نمود و نتایج حاصل در مقیاس تجاری و صنعتی نیز قابل دستیابی می‌باشد. (امکان تهیه نانوالیاف عامل‌دار شده به روش الکتروریسی در مقیاس صنعتی وجود و می‌توان به عنوان یک غشا برای حذف رنگ در مقیاس صنعتی نیز از آن استفاده کرد).

۵- تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از رساله دکتری شیمی کاربردی مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان می‌باشد که نویسندگان از حمایت‌های معنوی آنان تشکر می‌نمایند.

۶-مراجع

- [1] H. M. Mojtaba, A. M. Ali, P. Maryam, P. Reza, T. Mahla, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5** (2017), 1946.
- [2] S. Qadri, A.Y.Haik, *J. Haz. Mater.*, **169** (2009) 318.
- [3] S. Qu, F. Huang, S. Yu, G. Chen, J. Kong, *J. Haz. Mater.*, **160** (2008) 643.
- [4] N. Pugazhenthiran, S. Ramkumar, P.S Kumar, S. Anandan, *Microp. Mesop. Mater.*, **131** (2010) 170.
- [5] A.A. Jalil, S. Triwahyono, S.H. Adama, N.D. Rahima, M.A.A. Aziz, N.H.H. Hairomc, N.A.M. Razali, M.A.Z Abidin, M. Khairul, A. Mohamadiah, *J. Hazard. Mater.*, **181** (2010) 755.
- [6] J. Mousavi, M. Parvini, *J. of Applied Chemistry*, **36** (1394) 79, in persian
- [7] S. Mohammad Reza, Z. Mansur, N. Sepehr, M.P. Reza, F. Maryam, *J.Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **31**(1393) 19, in Persian
- [8] S.H Chang, K.S. Wang, H.C Li, M.Y. We, J.D. Chou, *J. Hazard. Mater.*, **172** (2009) 1131.
- [9] K. Zhao, G. Zhao, P. Li, J. Gao, B. Lv, D.A Li, *Chemosphere*, **80** (2010) 410.
- [10] J. Rajeev, M. Megha, S. Shalini, M. Alok, *J. Environ. Manage.*, **85** (2007) 956.
- [11] K.M Mousa, A.H. Taha, *J. Chem. Eng. Process Technol*, **6** (2015), 260.
- [12] C.H. Huang, K.P. Chang, H.D Ou, Y.C. Chiang, C.F. Wang, *Microp. Mesop. Mater.*, **141** (2011) 102.
- [13] Q.Tang, H. Xu, Y. Zheng, J. Wang, H. Li, and J. Zhang, *Appl. Catal. Gen.*, **413** (2012), 36.
- [14] Y.J. Han, J.M. Kim and G.D. Stucky, *Chem. Mat.*, **12** (2000), 2068.
- [15] J. Goscianska, M. Marciniak, R. Pietrzak, *Separation, and Purification Technology*, **154** (2015) 236.
- [16] D. Trong On, D. Desplantier-Giscard, C. Danumah, S. Kaliaguine, *Appl. Catal. A: Gen.*, **359** (2001) 299.
- [17] G. Mohammad Reza, D. Azadeh, H.B. Leila, B. Alireza, S. Kamal, M. Z. Ghodsi, M. Abolghasem, *Water, Air, and Soil Pollution*, **173** (1385) 71, in Persian.
- [18] S. Zhu, Z. Zhou, D. Zhang, C. Jin, Z. Li, *Microp.Mesop. Mater.*, **106** (2007).
- [19] B. Alireza, N. Peyman, T. Fatemeh, *Europ. J. Scien.Res.*, **12** (1384) 39, in persian.
- [20] J. Goscianska, A. Olejnik, R. Pietrzak, *Materials Chemistry and Physics*, **142** (2013) 586.
- [21] E. Da' n a, A. Sayari, *Chem. Eng. J.*, **166** (2011) 445.
- [22] M.C. Burleigh, S. Dai, E.W. Hagaman, L.S. Lin, *Chem Mater*, **13** (2001), 2537.
- [23] B. Alireza, B. Laurent, C. Nicolas, M.Z. Ghodsi, *J. Organomet. Chem.*, **691** (1385) 5923, in Persian.
- [24] Z.A. Sahar, S. Zahra, S.N. Masoud, *Ceramics International*, **44** (2018), 3873.

- [25] K. Nasouri, H. Bahrambeygi, A. Rabbi, A.M. Shoushtari and A. Kafrou, *Applied Polymer Science*, **126** (2012), 127.
- [26] H. Bahrambeygi, N. Sabetzadeh, A. Rabbi, K. Nasouri, A.M. Shoushtari and M.R. Babaei, *Journal of Polymer Research*, **20** (2013), 74.
- [27] Zh. Liu, D. D. Sun, P. Guo, J. O. Leckie, *NANO LETTERS*, **7(4)** (2007), 1081.
- [28] K. Nasouri, A.M. Shoushtari, A. Kafrou, H. Bahrambeygi and A. Rabbi, *Polymer Composites*, **33** (2012), 1951.
- [29] A. Rabbi, K. Nasouri, H. Bahrambeygi, A.M. Shoushtari and M.R. Babaei, *Fibers and Polymers*, **13** (2012), 1007.
- [30] S.M. Saeed, M. Zandi, H. Mirzadeh, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, **25** (2012), 3.
- [31] P.A. Janssen, B.L. Selwood, S.R. Dobson, D. Peacock, P.N. Thiessen, *Pediatrics.*, **111** (2003) 15.
- [32] S. Zinatloo Ajabshir, *J. of Applied Chemistry*, 54 (1399), DOI: 10.22075/chem.2019.16508.1561, in Persian.
- [33] A. Nageswara Rao, B. Sivasankar, V. Sadasivam, *Journal of molecular catalysis A: Chemical*, **306** (2009), 77.
- [34] M. Ghaedi, B. Sadeghian, S. Nasiri Kokhdan, A. Amiri Pebdani, R. Sahraei, A. Daneshfar, A. Mihandoost, *Materials Science and Engineering C*, **33** (1392), 2258, In persian.
- [35] A.F. Cortez Campos, P.H. Michels-Brito, F.G. da Silva, R.C. Gomes, G. Gomide, J. Depeyrot, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103031>
- [36] Z. Molaei, M. Hamzehloueian, K. Ghasemi, F. Soleimanian, *J. of Applied Chemistry*, **14** (1398), 105, in persian
- [37] Sh. Shariati, K. Bakhshipour, S. Rahnema, N. Hashemi fard, *J. of Applied Chemistry*, **14** (1398), 355, in persian
- [38] Gh. Mehrorang, N.B. Mehdi, N.K Syamak, Sh. Shahdokht, S. Reza, D. Ali, Sh. Simin, *Materials Science and Engineering: C*, **32** (1391) 725, in persian.
- [39] B.A. Farshad, B. Mehdi, *Journal of Applied Chemistry*, **37** (1395) 101, in persian.
- [40] B. Erdem, S. Erdem, A. Çıtak, C. Yavru and R.M. Öksüzoglu, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, **132** (2017) 1041.
- [41] B. Alireza, H. Bahman and R. Reza, *Journal of Applied Research in Chemistry*, **3** (1393) 15, in Persian.
- [42] S. Almuhammed, N. Khenoussi, M. Bonne, L. Schacher, B. Lebeau, D. Adolphe, J. Brendle, *European Polymer Journal* (2014).
- [43] R. Ullah, M. Atilham, S. Aparicio, A. Canlier, C.T. Yavuz, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **43** (2015), 22.

- [44] D. Zhao, J. Feng, Q. Huo, N. Melosh, G.H. Fredrickson, B.F. Chmelka, G.D. Stucky, *J. of Science*, **279** (1998), 548.
- [45] T. Bui, H. Choi, *Journal of Hazardous Materials*, **168** (2009), 602.
- [46] S. Devaraju, M.R. Vengatesan, K. Dinakaram, M. Alagar, *J. Mater Chem.*, **22** (2012), 7559.
- [47] S. Devaraju, M.R. Vengatesan, M. Selvi, A. Ashok Kumar, I. Hamerton, J.S. Go, M. Alagar, *RSC Adv*, **3** (2013), 12915.
- [48] I.F. Alexa, M. Ignat, R.F. Popovic, *Int. J. Pharm*, **436** (2012), 111.
- [49] Q. Lu, F. Gao, S. Komameni, T.E. Mallouk, *Am Chem. Soc.*, **126** (2004), 1.
- [50] Gh. Mehrorang, S. Batuol, N.Kh. Syamak, A.P. Arezou, S. Reza, D. Ali, M. Asma, *Mater. Sci. Eng. C.*, **33** (1392) 2258, in Persian.
- [51] Y.S. Ho, G.M., *Process Biochem*, 38 (2003) 1047.
- [52] K.Y.F. Foo, B.H. Hameed, *Chem. Eng. J.*, 156 (2010) 2.

