

مقاله پژوهشی

تهیه نانو کامپوزیت کیتوسان/SBA-15 با روش الکترورسی جهت حذف رنگزای قرمز درخشان (Brilliant Red E-4BA) از پساب‌های رنگی

فرهاد بهلکه، محمد حبیبی جویباری*، رامین ظفر مهربان و مهدی عبادی

گروه شیمی، دانشکده علوم، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۵/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۰۸/۱۹

چکیده

در این تحقیق، حذف رنگزای قرمز درخشان (Brilliant Red E-4BA) با استفاده از نانوالیاف کامپوزیت کیتوسان/SBA-15 مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا، سورفاکتانت P123، هیدروکلریک اسید، TEOS و اتانول تحت کنترل دمایی با یکدیگر مخلوط شدند، که نتیجه آن سنتز پودر نرم و سفید رنگ SBA-15 بود. سپس با حل کردن این پودر در آب مقطر دیونیزه، محلول آن تهیه و با محلول پودر کیتوسان در استیک اسید، مخلوط شده و پس از هم زدن با دستگاه التراسونیک پراپی، مخلوط فوق برای سنتز نانوالیاف کامپوزیتی کیتوسان/SBA-15 به داخل دستگاه الکترورسی منتقل گردید. نانوالیاف کامپوزیت کیتوسان/SBA-15 با روش الکترورسی سنتز شد. تشکیل نانوالیاف مورد نظر و ساختار ترکیبات سنتز شده به کمک تکنیک‌های XRD، TEM و FTIR تایید شد. در ادامه، اثر پارامترهای مختلف از جمله، pH، زمان تماس و مقدار نانوجاذب در جداسازی رنگ مورد نظر، مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شد. بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر بهینه pH، مقدار نانوجاذب و زمان تماس به ترتیب ۷، ۰/۰۳ g و ۴۰ min بود. مطالعات سینتیکی و ترمودینامیکی فرآیند حذف رنگ نیز بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد، ایزوترم جذب این رنگزای بر روی نانوالیاف کامپوزیت کیتوسان/SBA-15، از معادله لانگمیر تبعیت می‌کند. همچنین مطالعات سینتیکی انجام شده در مورد جذب رنگ مورد نظر، نشان داد که سینتیک جذب آن از یک معادله شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند. نتایج بدست آمده نشان داد که نانوالیاف کامپوزیت کیتوسان/SBA-15، می‌تواند به عنوان یک جاذب ارزان و کارآمد برای حذف رنگزای قرمز درخشان (Brilliant Red E-4BA) استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: الکترورسی، نانوالیاف، کیتوسان، SBA-15، رنگزای قرمز درخشان، ایزوترم جذب.

۱- مقدمه

جمله نساجی [۳]، آبرکاری [۴]، چاپ [۵]، واحدهای دارویی [۶] و جداسازی غشاها [۷] نشات می‌گیرند. بنابراین، یکی از مهمترین مسائل و چالش‌های پیشروی بشریت، آلودگی محیط زیست بوده و تحقیقات در مورد حذف آلاینده‌ها از

امروزه بیشترین آلودگی‌های آب، ناشی از یون‌های فلزی [۱] و رنگ‌های ارگانیک [۲] می‌باشد، که از بعضی صنایع از

* عهده‌دار مکاتبات: محمد حبیبی جویباری

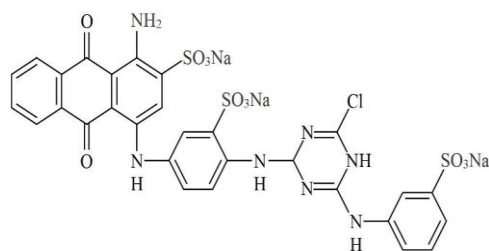
نشانی: گرگان، بلوار شهید کلاتری، خیابان دانشجو، مجتمع دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان

تلفن: ۰۱۷-۳۲۱۵۳۰۰، دورنگار: ۰۱۷-۳۲۱۵۳۰۰، پست الکترونیکی: m.habibi@gorganiau.ac.ir

راندمان پایین، عدم ثبات حرارتی، حساسیت به اسید، ظرفیت جذب پایین، دوام پایین و کوچک بودن قطر منافذ رنج می‌برند [۳۲].

در سال‌های اخیر، جاذب‌های مزوپروس سیلیسی به دلیل مساحت زیاد و قطر زیاد منافذ آن‌ها، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۳۳]. در بین این دسته از مواد، SBA-15 به دلیل ضخیم‌تر بودن دیواره حفره‌ها در مقایسه با سایر جاذب‌های مزوپروس سیلیسی دارای پایداری بالاتری در محلول‌های آبی است [۳۴]. با این حال، گائو و همکاران [۳۳] نشان دادند که ظرفیت جذب SBA-15 خالص بسیار ناچیز است. آن‌ها همچنین نشان دادند که عملکرد کامپوزیت مبتنی بر SBA-15 توسط پلیمر کیتوزان طبیعی (۲۰٪ وزنی) می‌تواند ظرفیت جذب نانو کامپوزیت را تا 232 mg/g افزایش دهد که این مقدار ظرفیت جذب، بیش از بسیاری از جاذب‌های معمولی مانند نانولوله‌های کربنی و کامپوزیت‌های مبتنی بر بنتونیت می‌باشد. کیتوزان یک پلیمر طبیعی مقرون به صرفه، سازگار با محیط زیست و فراوان است که از ظرفیت جذب بالایی برخوردار است و دلیل آن وجود چندین گروه آمینی در ساختار مولکولی آن است [۳۵]. سیلوا و همکاران [۳۶] دریافتند که گروه‌های آمینی موجود در ساختار شیمیایی کیتوزان می‌توانند با استفاده از یک فرآیند هیدرولیز/تراکم، با ساختارهای ارگانوسیلان، پیوند کووالانسی تشکیل دهند. بنابراین، در این پژوهش، نانوالیاف کیتوزان طبیعی توسط SBA-15 اصلاح شده و برای از بین بردن رنگ قرمز درخشان از محلول آبی استفاده شد. نوآوری این تحقیق، سنتز نانوالیاف کیتوزان/SBA-15 به نسبت ۸۰ به ۲۰، با استفاده از روش الکتروریسی برای اولین بار انجام شد و با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)، طیف‌سنج اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) تشکیل کامپوزیت فوق تائید شد. علاوه بر این، پارامترهای سینتیکی و ترمودینامیکی فرآیند جذب، توسط مدل‌های مرتبط مورد بررسی قرار گرفت.

فاضلاب‌های صنعتی توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [۸]. رنگ قرمز درخشان (Brilliant Red E-4BA) یک رنگ کاتیونی از خانواده تری فنیل متان است که در آب و الکل محلول می‌باشد. ساختار پیچیده، پایدار و آروماتیک رنگ قرمز درخشان (شکل ۱)، تجزیه بیولوژیکی آن را دشوار می‌کند. این ماده دارای خواص ضد میکروبی، ضد انگلی و ضد قارچ نیز می‌باشد [۹].



شکل ۱: ساختار شیمیایی رنگ قرمز درخشان (Brilliant Red E-4BA).

روش‌های شیمیایی مختلفی مانند روش‌های الکتروشیمیایی [۱۰]، کلرزنی [۱۱]، ازن‌دهی [۱۲]، تبادل یونی [۱۳]، اکسیداسیون [۱۴] و لخته‌سازی [۱۵] برای فرآیندهای تصفیه آب معرفی شده‌اند. همچنین برخی روش‌های بیولوژیکی نیز برای از بین بردن آلاینده‌ها از فاضلاب استفاده شده است، از جمله استفاده از میکروارگانیسم‌ها [۱۶]، قارچ‌ها [۱۷]، جلبک‌ها [۱۸] و آنزیم‌ها [۱۹]. علاوه بر این، چندین روش فیزیکی برای تصفیه آب مانند غشاء [۲۰]، تهویه هوا [۲۱]، تشعشع [۲۲] و جذب [۲۳] نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بین انواع مختلف فن آوری که برای از بین بردن ترکیبات رنگی از فاضلاب‌های صنعتی استفاده شده است، فرآیند جذب دارای یک سری مزایای قابل توجهی می‌باشد، از جمله قیمت پایین، طراحی آسان‌تر و در دسترس بودن [۲۴-۲۶]. تعداد زیادی جاذب برای این منظور پیشنهاد شده است، مانند سیلیس [۲۷]، آلومینا [۲۸]، مواد کربن حاصل از منابع زیستی [۲۹]، اکسیدهای فلزی، [۳۰] و رزین‌های پلیمری [۳۱]. برخی از جاذب‌ها از یکسری از معایب مانند هزینه بالا،

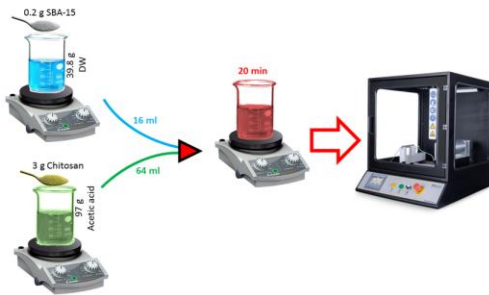
۲- فعالیت‌های تجربی

پودر کیتوزان (Chitosan Low) و رنگ قرمز درخشان به ترتیب از شرکت مرک آلمان و شرکت دایستار سنگاپور تهیه و بدون هیچ گونه خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. اسید استیک (۹۶٪)، اسید هیدروکلریک، اتانول و تترا اتیل اورتیل سیلیکات (TEOS, 98%) و سورفکتانت P123 از شرکت مرک خریداری شدند.

نانوجاذب SBA-15 همانند روش گزارش شده توسط Zhao و همکارانش سنتز شد [۳۵،۳۶]. برای این منظور ابتدا، ۲ g سورفکتانت P123 و ۶/۲۵ g هیدروکلریک ۱/۹ M به یک بشر اضافه شد. محتویات بشر برای ۴۵ min در دمای ۴۵ °C مخلوط شد، سپس ۳/۴ g TEOS به محلول اضافه شد و به مدت ۲۴ h ساعت در دمای ۴۵ °C مخلوط شد و پس از آن، دمای مخلوط به ۱۰۰ °C افزایش یافت، و پس از ۲۴ ساعت، ۵۰ ml اتانول به مخلوط اضافه شد تا یک رسوب سفید در ته بشر باقی بماند. ریفلاکس به مدت ۲۴ h ساعت در دمای ۷۸ تا ۸۵ °C بر روی همزن مغناطیسی انجام شد. پس از زمان مورد نظر، رسوب در یک آون خشک شد تا یک پودر نرم و سفید SBA-15 بدست آید [۳۷،۳۸].

برای تهیه مخلوط ۳٪ کیتوزان و ۵/۰٪ SBA-15، ۰/۲ g از پودر SBA-15 سنتز شده به ۳۹/۸ g آب دیونیزه شده اضافه شد و توسط یک دستگاه اولتراسونیک (مدل TOPSONIC) همگن شد. همچنین ۳ g پودر کیتوزان به ۹۷ g اسید استیک (۹۶٪) اضافه شد و پس از ۲ min هم زدن با همزن شیشه‌ای، مخلوط به مدت ۱۵ min توسط اولتراسونیک پراپی یکنواخت شد. سرانجام، ۱۶ ml از محلول حاوی SBA-15 و ۶۴ ml محلول حاوی کیتوزان به مدت ۲۰ min توسط دستگاه پروب اولتراسونیک مخلوط و همگن شدند. سپس محلول آماده شده به دستگاه الکترورسی (ساخت شرکت فن‌آوران نانومقیاس ایران) منتقل شد. الکترورسی در ولتاژ اعمال شده ۲۰ kV، فاصله نوک سرسوزن تا کلکتور (جمع کننده لیاف) ۶ cm و سرعت جریان ۰/۵ ml/h در دمای اتاق

انجام شد. پس از گذشت ۱۸ h، لایه نانوفیبری از سطح جمع کننده جدا و به مدت ۱۲ h در دمای محیط خشک شدند. روش سنتز به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است [۳۹].



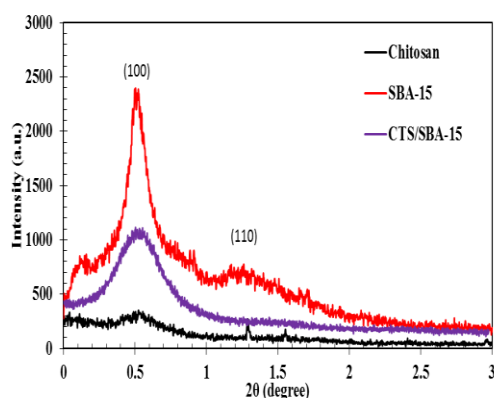
شکل ۲: شکل شماتیک روش سنتز SBA-15/CTS.

۲۰ ml محلول آبی رنگ قرمز (۲۰ ppm، pH = ۷) تهیه شد و شدت جذب اولیه آن به کمک دستگاه UV-Vis در طول موج ۵۱۹ nm (به عنوان بالاترین طول موج) خوانده شد. ۰/۰۳ g از نانوجاذب سنتز شده، به محلول رنگ اضافه شد و حذف رنگ با اندازه‌گیری شدت جذب در طول موج ماکزیمم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مخلوط به مدت ۴۰ min با همزن مغناطیسی مخلوط و سپس در ۳۵۰۰ rpm/min به مدت ۱۵ min سانتریفیوژ شد. با مقایسه شدت جذب اولیه و نهایی در طول موج ماکزیمم، درصد حذف رنگ مشخص شد. تمام مراحل فوق با کیتوزان خالص (به عنوان جاذب) تکرار شد و درصد حذف رنگ با هر دو جاذب (نانوکامپوزیت و کیتوزان خالص) مقایسه شد.

تجزیه و تحلیل FT-IR و XRD با استفاده از اسپکتروفتومتر دمایی مدل AVATAR و Philips، PW1800 (با زوایای ۳°-0.6=2θ) انجام شد. تعیین شدت جذب محلول رنگ قرمز درخشان (E-4BA) در فاز آبی توسط دستگاه UV-Vis (Perkin Elmer Com., Lambda 25, USA) در طول موج ۵۱۹ nm به عنوان λ_{Max} انجام شد. مورفولوژی سطح نانوالیاف سنتز شده توسط میکروسکوپ الکترونی TEM (مدل Philips EM208S 100kV) مشخص شد.

۳- نتایج و بحث

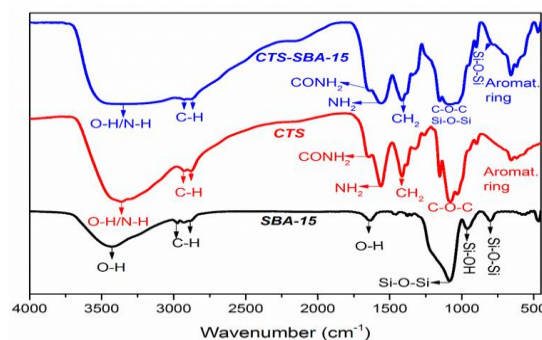
در این نمونه، حضور Si-O-Si ، C-O-C ، NH_2 ، CONH_2 و ارتعاشات حلقه آروماتیک در طیف مرتبط نشان داد که ترکیب CTS/SBA-15 با موفقیت سنتز شد. لذا می توان اظهار نمود گروه های عاملی آلی مورد نظر با موفقیت روی سطح نانو حفرات مزوپور سیلیسی قرار گرفتند. شکل ۴ الگوهای XRD با زاویه پایین SBA-15، کیتوزان خالص و نانو کامپوزیت CTS/SBA-15 را نشان می دهد.



شکل ۴: الگوهای XRD با زاویه پایین SBA-15، کیتوزان خالص و نانو کامپوزیت CTS/SBA-15.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، پیک های پراش که در $2\theta = 0.5^\circ$ ، 1.2° درجه ظاهر می شوند، که به مکان های (۱۰۰) و (۱۱۰) نسبت داده می شوند که با ترکیب SBA-15 گزارش شده توسط گائو و همکاران مطابقت دارند [۳۳]. حضور پیک گسترده و کم شدت در $2\theta = 0.5^\circ$ درجه ثابت کرد که نانوالیاف کیتوزان با موفقیت توسط لایه ای از ترکیب SBA-15 پوشانده شده اند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی TEM مربوط به نانوالیاف کیتوزان و CTS/SBA-15 سنتز شده با فرآیند الکتروسی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵a نشان داده شده است، سطح نانوالیاف کیتوزان خالص صاف و تمیز بوده و قطر متوسط آن حدود ۲۵ nm است. پس از اصلاح سطح نانوالیاف کیتوزان توسط SBA-15، میزان زبری و همچنین قطر متوسط نانوالیاف اصلاح شده بطور معنی داری افزایش یافت.

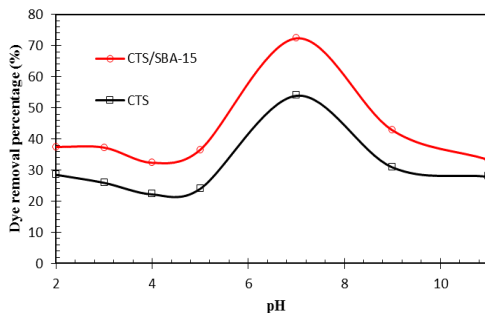
نتایج ارتعاشات طیف FT-IR مربوط به کیتوزان خالص، SBA-15 خالص و نانو کامپوزیت CTS/SBA-15 در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طیف FTIR، CTS، SBA-15 و CTS-SBA-15.

در تحلیل طیف FTIR، مربوط به SBA-15، پیک ارتعاشی کششی گروه های سیلانولی و سایر هیدروکسیل ها در 3425 cm^{-1} ظاهر شد [۴۰]. علاوه بر این، پیک های واقع در 1083 cm^{-1} و 803 cm^{-1} به ارتعاش های کششی متقارن و نامتقارن باند Si-O-Si اختصاص می یابد [۴۱]. همچنین، پیک در ناحیه 961 cm^{-1} به ارتعاش خمشی پیوند Si-OH نسبت داده می شود [۴۲]. در طیف FT-IR کیتوزان، باند پهن در حدود 3364 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای O-H و N-H است [۴۳]. پیک ارتعاشی کشش متقارن و نامتقارن باند C-H به ترتیب در 2877 cm^{-1} و 2927 cm^{-1} ظاهر شد [۴۴]. پیک های واقع در 1561 cm^{-1} و 1641 cm^{-1} به ترتیب به ارتعاش CONH_2 و NH_2 در گروه های آمین نسبت داده می شود [۴۵، ۴۶]. پیک های اپوکسید (C-O-C) و حلقه های آروماتیک به ترتیب در 1090 cm^{-1} و 656 cm^{-1} ظاهر شدند [۴۷]. همانطور که در طیف CTS/SBA-15 مشاهده می شود، پیک O-H/N-H در حدود 3347 cm^{-1} به دلیل تشکیل پیوند هیدروژن بین گروه های هیدروکسیل و آمین در ترکیبات کیتوزان و SBA-15 وسیع تر بود.

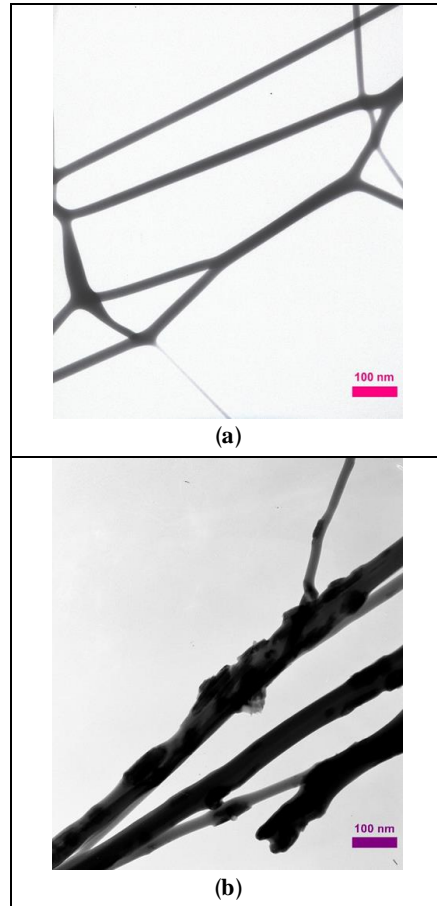
شد. برای تعیین غلظت نهایی رنگ، قبل و بعد از فرآیند جذب، شدت جذب محلول در طول موج ماکزیمم (۵۱۹ nm) در طیف UV-Vis مربوط به هر محلول خوانده شد. همانطور که در بخش تجربی توضیح داده شد. مقایسه درصد حذف رنگ توسط نانوجاذب بکار رفته در این تحقیق و جاذب کیتوسان تنها در مقابل pH پس از فرآیند جذب در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶: تغییر درصد حذف رنگ در مقابل pH پس از فرآیند جذب.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود pH=7 مقدار بهینه برای بدست آوردن بالاترین درصد حذف رنگ از محلول رنگی بود. در این pH به ترتیب با استفاده از نانوالیاف کیتوسان اصلاح نشده و اصلاح شده به ترتیب حدود ۵۴ و ۷۲٪ رنگ از محلول خارج شدند. به منظور بررسی تاثیر مقادیر نانوجاذب بر روی فرآیند جذب، ۵ محلول حاوی ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷ g نانوالیاف کیتوسان و CS/SBA-15 تهیه و در pH بهینه، به مخلوط رنگ قرمز درخشان با غلظت ۲۰ ppm اضافه شد. تغییرات درصد حذف رنگ در مقابل مقدار جاذب و همچنین مقایسه رفتار نانوجاذب بکار رفته در این تحقیق و جاذب کیتوسان تنها در مقادیر مختلف از جاذب در شکل ۷ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۷، در هر دو مخلوط حاوی جاذب های اصلاح شده و اصلاح نشده، با افزایش مقدار جاذب تا ۰/۰۳ g، درصد حذف رنگ افزایش یافته است. اما با افزایش بیشتر مقدار جاذب در هر دو مخلوط، درصد حذف رنگ تقریباً ثابت مانده است. این ممکن است به دلیل تجمع نانوالیاف در مقدار جاذب بیشتر باشد.



شکل ۵: تصاویر الکترونی TEM نانوالیاف، (a) کیتوسان و (b) CTS/SBA-15 سنتز شده با فرآیند الکتروسی.

مطابق شکل ۵b (آنالیز TEM)، قطر متوسط نانوالیاف CTS/SBA-15 برابر با ۶۰/۸ نانومتر است که حدود ۲/۴ برابر بیشتر از قطر متوسط نانوالیاف کیتوسان خالص است. این تغییرات در اندازه قطر و مورفولوژی سطح ممکن است نشانگر این باشد که لایه ای از ترکیبات سیلیس بر روی سطح نانوالیاف پوشانده شده است.

در این تحقیق، از فاضلاب های صنعتی تهیه شده به کمک رنگ قرمز درخشان (Brilliant Red E-4BA) با غلظت ۲۰ ppm به عنوان محلول اولیه استفاده شد و سپس برخی پارامترها از جمله مقدار جاذب، pH محلول و زمان جذب بهینه شدند. برای بررسی تاثیر pH بر فرآیند جذب، ۷ محلول حاوی رنگ قرمز درخشان با غلظت ۲۰ ppm به ۱۰۰ میلی لیتر از مخلوط حاوی ۰/۰۲ g نانوجاذب تزریق شد. با استفاده از pHسنج، این محلول ها در ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ تنظیم

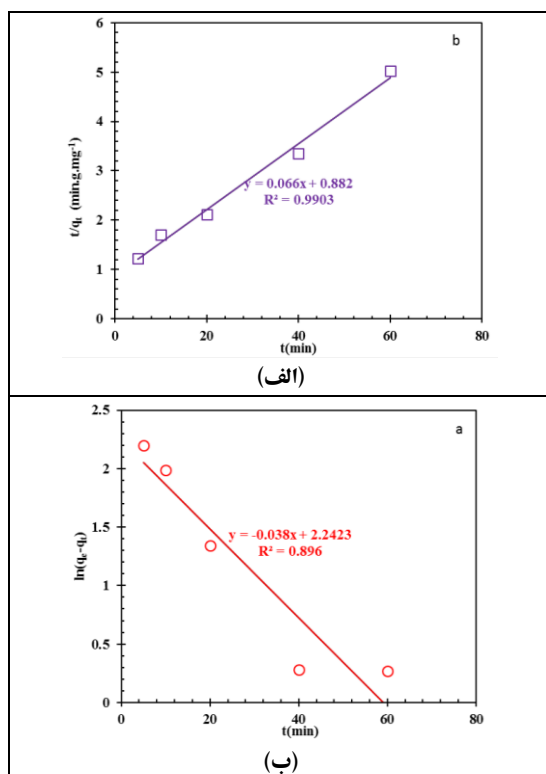
جذب در سطح جاذب اصلاح شده بکار رفته در این تحقیق بطور قابل توجهی بیشتر از میزان جذب در نانوالیاف اصلاح نشده است. مطالعات سینتیکی و ترمودینامیکی فرآیند جذب در بخش‌های بعدی بررسی شده است.

داده‌های سینتیکی جذب برای یافتن سرعت واکنش جذب رنگ و معادلات ترمودینامیکی مربوطه تجزیه و تحلیل شد. سینتیک فرآیند جذب رنگ روی جاذب‌های اصلاح شده و اصلاح نشده را می‌توان با مدل شبه مرتبه اول (معادله ۱) و شبه مرتبه دوم (معادله ۲) مورد مطالعه قرار داد [۴۸].

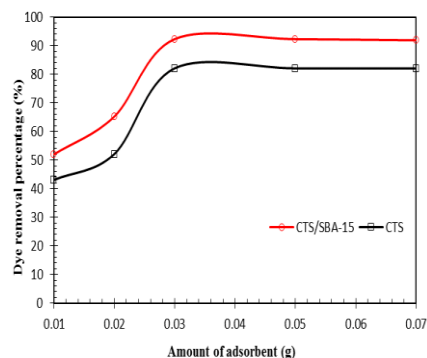
$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (1)$$

$$t/q_t = 1/K_2 q_e + 1/q_e \cdot t \quad (2)$$

q_e برحسب (mg/g) و q_m برحسب (mg/g) ظرفیت جذبی جاذب‌ها در تعادل و زمان (t) است. K_1 و K_2 به ترتیب ثابت معادله شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم هستند.

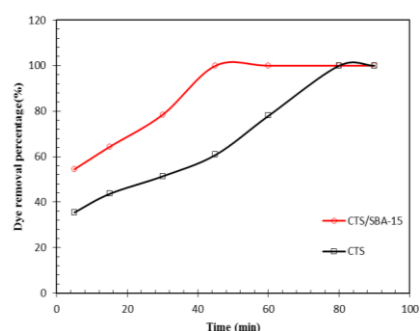


شکل ۹: مدل‌های سینتیکی جذب مربوط به، الف) شبه مرتبه اول و ب) شبه مرتبه دوم برای جذب رنگ در سطح جاذب CTS/SBA-15.



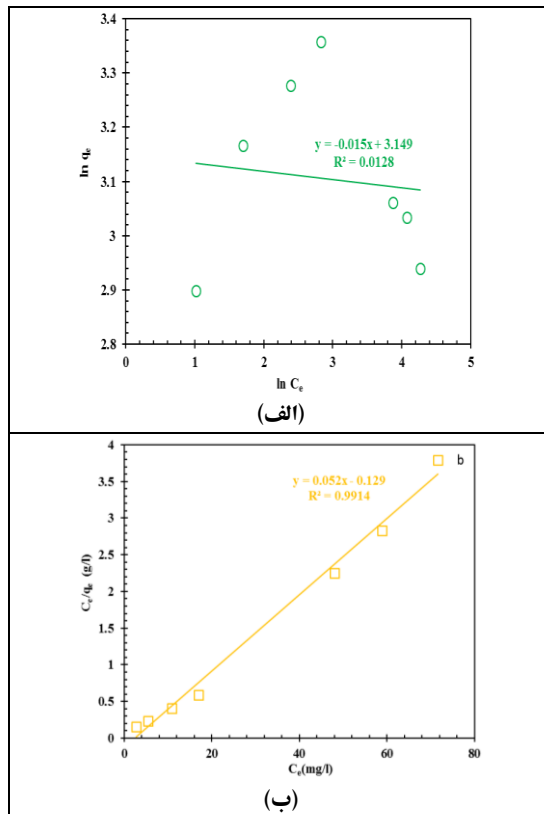
شکل ۷: تغییرات درصد حذف رنگ در مقابل مقدار جاذب.

علاوه بر این با مقایسه عملکرد جاذب‌های مختلف مشخص شد، در کلیه مقادیر جاذب، درصد حذف رنگ مخلوط‌های حاوی نانوالیاف اصلاح شده بکار رفته در این تحقیق بیشتر از درصد حذف رنگ مخلوط‌های حاوی نانوالیاف کیتوسان خالص بود. به منظور بررسی زمان فرآیند جذب بر روی درصد حذف رنگ، ۷ محلول از رنگ قرمز درخشان با pH بهینه و با غلظت ۲۰ ppm تهیه شده و به ترتیب ۰/۰۳ g از نانوالیاف کیتوسان و CTS/SBA-15 به محلول‌ها اضافه شده و به مدت ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ min هم زده شد. تغییرات درصد حذف رنگ در مقابل زمان تماس و همچنین مقایسه نانوجاذب بکار رفته در این تحقیق و جاذب کیتوسان تنها نسبت به زمان تماس در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: تغییرات درصد حذف رنگ در مقابل زمان فرآیند جذب.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با مقایسه مخلوط‌های حاوی جاذب‌های اصلاح شده و اصلاح نشده، درصد حذف رنگ به ترتیب پس از ۴۵ min و ۸۰ min به ۱۰۰٪ رسیده است. این بدان معنی است که میزان فرآیند



شکل ۱۰: الف) ایزوترم‌های لانگمویر و ب) ایزوترم‌های فروندلیچ برای فرآیند جذب رنگ روی سطح نانوالیاف CTS/SBA-15.

ایزوترم فروندلیچ یک رابطه کاملاً تجربی مبتنی بر جذب بر روی سطح ناهمگن است. فرم خطی مدل فروندلیچ می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

$$\log q_e = 1/n \log C_e + \log KF \quad (۴)$$

KF ثابت فروندلیچ و $1/n$ مشخصه سیستم مورد مطالعه است، که بستگی به نوع جاذب دارد. در نمودار $\log q_e$ نسبت به $\log KF$ ، $\log C_e$ و $1/n$ به ترتیب عرض از مبدا و شیب نمودار را نشان می‌دهد. روابط خطی مدل‌های ایزوترم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲، مدل ایزوترم لانگمویر با $R^2=0.99$ بهتر از مدل ایزوترم فروندلیچ با داده‌های تجربی مطابقت دارد. این نشان می‌دهد که یک لایه از ترکیب رنگ در نانوالیاف CTS/SBA-15 تشکیل شده است.

خطی بودن نمودار $\ln(q_e - q_i)$ بر حسب t این موضوع را بیان می‌کند که واکنش جذب ماده جذب شونده، یک واکنش شبه مرتبه دوم می‌باشد. روابط خطی مدل‌های شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم با استفاده از داده‌ها در شکل ۹ ترسیم شده است. پارامترهای سینتیکی این دو مدل در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: پارامترهای سینتیکی معادله شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای جذب رنگ قرمز درخشان توسط نانوجاذب CTS/SBA-15.

مدل‌های سینتیکی	R^2	K	q_e (mg/g)
شبه مرتبه اول	۰/۸۹	-۰/۰۳۸	۹/۳۹
شبه مرتبه دوم	۰/۹۹	۰/۰۴۹	۱۵/۱۵

طبق نتایج بدست آمده، از جدول ۱، مدل شبه مرتبه دوم ($R^2=0.99$) سینتیک جذب را بهتر از مدل شبه مرتبه اول نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند جذب فرآیندی شیمیایی است که شامل تبادل یا اشتراک الکترون بین رنگ‌ها و گروه‌های عاملی نانوالیاف CTS/SBA-15 است.

ایزوترم‌های جذب می‌توانند ابزارهای کمی مفید برای نشان دادن ظرفیت و رفتار جاذب سنتز شده باشند [۲۳]. در این روش از مدل‌های ایزوترمی لانگمویر و فروندلیچ برای بدست آوردن پارامترهای جذب استفاده شد. معادله ۳ شکل اصلی ایزوترم جذب لانگمویر را نشان می‌دهد.

$$1/KLq_m + C_e/q_m = C_e/q_e \quad (۳)$$

ثابت لانگمویر می‌باشد که مربوط به انرژی جذب است. q_e (mg/g) و q_m (mg/g) به ترتیب حداکثر ظرفیت جذب جاذب در تعادل و حداکثر ظرفیت جذب نشان می‌دهند. C_e (mg/L) غلظت تعادل رنگ مورد استفاده در محلول آبی است.

مراجع

- [1] G. Abdi, A. Alizadeh, S. Zinadini, G. Moradi, *Journal of Membrane Science*, **552**, 2018, 326.
- [2] L. Fan, C. Luo, M. Sun, H. Qiu, X. Li, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **103**, 2013, 601.
- [3] W. Konicki, M. Aleksandrak, D. Moszynski, E. Mijowska, *Journal of Colloid and Interface Science*, **496**, 2017, 188.
- [4] M.A.H. Badsha, I.M.C. Lo, *Journal of Hazardous Materials*, **381**, 2020, 121.
- [5] T.M. Valentin, A.K. Landauer, L.C. Morales, E.M. DuBois, S. Shukla, M. Liu, L. H.S. Valentin, C. Franck, P.Y. Chen, I.Y. Wong, *Carbon*, **143**, 2019, 447.
- [6] C.S. Patil, D.B. Gunjal, V.M. Naik, N.S. Harale, S.D. Jagadale, A.N. Kadam, P.S. Patil, G.B. Kolekar, A.H. Gore, *Journal of Cleaner Production*, **206**, 2019, 407.
- [7] L. Huang, M. Zhang, C. Li, G. Shi, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **6**, 2015, 2806.
- [8] N. Abdullah, N. Yusof, W.J. Lau, J. Jaafar, A.F. Ismail, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **76**, 2019, 17.
- [9] M.I. El-Barghouthi, A.H. El-Sheikh, Y.S. Al-Degs, *Separation Science and Technology*, **42**, 2007, 2195.
- [10] X. Yu, *Environmental Science & Technology*, **39**, 2005, 8071.
- [11] K. Kosaka, K. Ohkubo, M. Akiba, *Water Research*, **106**, 2016, 470.
- [12] G. Joseph, US Patent 09, 351, 771, 2020.
- [13] M.S. Mohy Eldin, M.A. Abu-Saied, T.M. Tamer, M.E. Youssef, A.I. Hashem, M.M. Sabet, *Desalination and Water Treatment*, **57**, 2016, 14810.
- [14] C. Wang, J. Kim, V. Malgras, J. Na, J. Lin, J. You, M. Zhang, J. Li, Y. Yamauchi, *Small*, **15**, 2019, 190.
- [15] J. Ma, K. Fu, X. Fu, Q. Guan, L. Ding, J. Shi, G. Zhu, X. Zhang, S. Zhang, L. Jiang, *Separation and Purification Technology*, **182**, 2017, 134.
- [16] M.O.M. Fufa, R.C. Popescu, A.M. Holban, *Water Purification*, 2017, 263.
- [17] Y. Park, S. Liu, T. Gardner, D. Johnson, A. Keeler, N. Ortiz, G. Rabah, E. Ford, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, **15**, 2020, 155.
- [18] J. Zhan, Q. Zhang, M. Qin, Y. Hong, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, **10**, 2016, 548.
- [19] M. Wang, S.K. Mohanty, S. Mahendra, *Accounts of Chemical Research*, **52**, 2019, 876.
- [20] A. Lee, J.W. Elam, S.B. Darling, *Water Research & Technology*, **2**, 2016, 17.
- [21] D.B. Boman, S. Garimella, *Applied Thermal Engineering*, **167**, 2020, 114.
- [22] M. Coto, S.C. Troughton, J. Duan, R.V. Kumar, T.W. Clyne, *Applied Surface Science*, **433**, 2018, 101.
- [23] A.A. Javidparvar, R. Naderi, B. Ramezanzadeh, *Journal of Hazardous Materials*, **389**, 2020, 122.
- [24] A.A. Javidparvar, R. Naderi, B. Ramezanzadeh, *Corrosion Science*, **15**, 2019, 108.
- [25] Ihsanullah, A. Abbas, A.M. Al-Amer, T. Laoui, M.J. Al-Marri, M.S. Nasser, M. Khraisheh, M.A. Atieh, *Separation and Purification Technology*, **157**, 2016, 141.
- [26] N.B. Singh, G. Nagpal, S. Agrawal, *Environmental Technology & Innovation*, **11**, 2018, 187.
- [27] F. Javaheri, Z. Kheshti, S. Ghasemi, A. Altaee, *Separation and Purification Technology*, **224**, 2019, 199.
- [28] F. Lu, D. Astruc, *Coordination Chemistry Reviews*, **356**, 2018, 147.
- [29] M.A. Yahya, Z. Al-Qodah, C.W.Z. Ngah, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **46**, 2015, 218.
- [30] Y. Zou, X. Wang, A. Khan, P. Wang, Y. Liu, A. Alsaedi, *Environmental Science & Technology*, **50**, 2016, 7290.
- [31] A. Azimi, A. Azari, M. Rezakazemi, *ChemBioEng Reviews*, **4**, 2017, 37.

جدول ۲: مقایسه داده‌های دونوع ایزوترم برای فرآیند جذب رنگ روی سطح نانوالیاف CTS/SBA-15.

ایزوترم	پارامترها	مقادیر
لانگمویر	K_L	-۰/۴
	q_m (mg/g)	۱۹/۲۳
	R^2	۰/۹۹
فروندلیچ	K_F	۲۲/۶۴
	$1/n$	-۹۰
	R^2	۰/۰۱۲

۴- نتیجه گیری

نتایج مطالعه نشان داد که کامپوزیت نانوالیاف CTS/SBA-15 یک جاذب مؤثر برای از بین بردن رنگ قرمز درخشان از محلول‌های آبی است. این مطلب را می‌توان به علت ابعاد بالای مزوپورهای سیلیسی (SBA-15) نسبت داد. نتایج FTIR، XRD و TEM نشان دادند که سطح نانوالیاف کیتوزان با موفقیت توسط SBA-15 اصلاح شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر بهینه pH، مقدار جاذب و زمان تماس به ترتیب ۷، ۰/۰۳ g و ۴۰ min بود. علاوه بر این، مشخص شد که فرآیندهای جذب رنگ، از مدل ایزوترم لانگمویر و سینتیک فرآیند جذب از مدل شبه دوم پیروی می‌کنند. جاذب‌های پیشنهاد شده در گزارشات مشابه، در مقایسه با جاذب بکار گرفته شده در این پژوهش، نه تنها هزینه تولید آن‌ها بالا بوده بلکه از ظرفیت جذب نسبتاً کم نیز برخوردار بوده‌اند. بنابراین با توجه به ویژگی‌های ساختاری نانوالیاف کامپوزیت CTS/SBA-15 و قدرت جذب مناسب آن، این ترکیب می‌تواند به عنوان یک نانوجاذب کامپوزیت فعال جهت حذف رنگ قرمز درخشان (Brilliant Red E-4BA) باشد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری شیمی کاربردی مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان است. بدینوسیله از حمایت‌های معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان تشکر می‌شود.

- [41] A.A. Javidparvar, B. Ramezanzadeh, E. Ghasemi, *Corrosion*, **72**, 2016, 761.
- [42] A.A. Javidparvar, B. Ramezanzadeh, E. Ghasemi, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **61**, 2015, 356.
- [43] A.A. Javidparvar, B. Ramezanzadeh, E. Ghasemi, *Progress in Organic Coatings*, **90**, 2016, 10.
- [44] A.R. Shahmoradi, N. Talebibahmanbigloo, A.A. Javidparvar, G. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, *Journal of Molecular Liquids*, **304**, 2020, 1127.
- [45] A.A. Javidparvar, B. Ramezanzadeh, E. Ghasemi, "The effect of oleic acid/silane treatments of Fe₃O₄ nanoparticles on the mechanical properties of an epoxy coating", *The 6th International Color & Coating Congress, Institute for Color Science and Technology*, Tehran, November 2015.
- [46] P. Nie, C. Min, H.J. Song, X. Chen, Z. Zhang, K. Zhao, *Tribology Letters*, **58**, 2015, 1.
- [47] A.A. Javidparvar, R. Naderi, B. Ramezanzadeh, G. Bahlakeh, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **72**, 2018, 196.
- [48] Z. Geng, Y. Lin, X. Yu, Q. Shen, L. Ma, Z. Li, N. Pan, X. Wang, *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 2012, 3527.
- [32] I. Duru, D. Ege, A.R. Kamali, *Journal of Materials Science*, **51**, 2016, 6097.
- [33] Q. Gao, H. Zhu, W. Luo, S. Wang, C. Zhou, *Microporous and Mesoporous Materials*, **193**, 2014, 15.
- [34] H. Aghayan, A.R. Mahjoub, A.R. Khanchi, *Chemical Engineering Journal*, **225**, 2013, 509.
- [35] S.F. Hosseini, M. Rezaei, M. Zandi, F. Farahmandghavi, *Industrial Crops and Products*, **67**, 2015, 403.
- [36] S.S. Silva, R.A.S. Ferreira, L. Fu, L.D. Carlos, J.F. Mano, R.L. Reis, J. Rocha, *Journal of Materials Chemistry*, **15**, 2005, 3952.
- [37] D. Zhao, J. Feng, Q. Huo, N. Melosh, G.H. Fredrickson, B.F. Chmelka, G.D. Stucky, *Science*, **279**, 1998, 548.
- [38] D. Zhao, Q. Huo, J. Feng, B.F. Chmelka, G.D. Stucky, *Journal of the American Chemical Society*, **120**, 1998, 6024.
- [39] S. Zupancic, T. Potrc, S. Baumgartner, P. Kocbek, J. Kristl, *European Journal of Pharmaceutical Science*, **95**, 2016, 152.
- [40] L.W.O. Soares, R.M. Braga, J.C.O. Freitas, R.A. Ventura, D.S.S. Pereira, D.M.A. Melo, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **131**, 2015, 80.