



سنتز و مشخصه‌یابی کربن فعال از ضایعات MDF به منظور حذف آلاینده- های رنگی کاتیونی و آنیونی

معصومه باصفت^۱، محمدرضا بیاتی^{۲*}، علی احمدپور^{۳*}، محمدرضا حق‌بین^۴

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم- دانشکده کشاورزی- دانشگاه فردوسی مشهد- masoumehbasefat@mail.um.ac.ir

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم - دانشکده کشاورزی- دانشگاه فردوسی مشهد- bayati@um.ac.ir

۳- گروه مهندسی شیمی- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- ahmadpour@um.ac.ir

۴- گروه مهندسی شیمی- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- mohammadreza.haghbini@mail.um.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، کربن فعال از ضایعات تخته فیبرهای با دانسیته متوسط با استفاده از روش فعال‌سازی شیمیایی توسط پتاسیم هیدروکسید سنتز گردید و جهت حذف آلاینده‌های رنگی متیلن آبی و متیل نارنجی مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه حاضر، کربن فعال توسط آنالیزهای مختلفی نظیر FT-IR، BET و FE-SEM مشخصه‌یابی شد. این آنالیزها نشان دادند که کربن فعال به دست آمده، دارای ساختاری متخلخل با سطح ویژه ۱۲۵۲ مترمربع بر گرم می‌باشد که حاوی انواع گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن و نیتروژن است. همچنین، به منظور کارایی کربن فعال بدست آمده، تأثیر پارامترهایی نظیر زمان تماس و غلظت آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سینتیک جذب رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی از مدل شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند که نشان دهنده ماهیت شیمیایی فرایند جذب است. علاوه بر این، ایزوترم جذب با مدل لانگمویر به خوبی مطابقت داشت که جذب تک لایه را بر روی سطح همگن جاذب تأیید می‌کند. ظرفیت جذب این جاذب برای رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی به ترتیب ۲۷۵/۲ و ۱۷۸/۰ میلی‌گرم بر گرم بدست آمد که پتانسیل بالای این جاذب را در تصفیه پساب‌های آلوده به آلاینده‌های رنگی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کربن فعال، تخته فیبر، فعال‌سازی شیمیایی، متیلن آبی، متیل نارنجی، جذب سطحی

۱- مقدمه

با افزایش سریع صنعتی شدن و شهرنشینی در چند دهه اخیر، آلودگی آب افزایش یافته و توجه زیادی را در سطح جهانی به خود جلب کرده است. رنگ‌ها یکی از آلاینده‌های اصلی در محیط آبی هستند [۱]. این آلاینده‌ها از صنایع مختلفی مانند نساجی، رنگرزی، چرم، کاغذ، مواد غذایی و بسیاری از صنایع دیگر نشأت می‌گیرند. پساب‌های این صنایع، غلظت بالایی از آلاینده‌های رنگی را وارد محیط زیست می‌کنند که برای سلامتی انسان و موجودات آبی خطرناک است. این آلاینده‌ها باعث ایجاد بیماری‌های مختلفی مانند تحریک پوست، آلرژی، تومور، سردرد و مشکلات تنفسی می‌شوند. همچنین، با کاهش نفوذ نور به آب، به اکوسیستم آبی آسیب می‌رسانند [۲]. به طور کلی، آلاینده‌های رنگی را می‌توان براساس منشأ تولید به دو دسته‌ی رنگ‌های طبیعی و مصنوعی طبقه‌بندی کرد. رنگ‌های مصنوعی در مقایسه با رنگ‌های طبیعی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و به سه دسته‌ی آنیونی، کاتیونی و غیر یونی تقسیم می‌شوند. یکی از کاربردی‌ترین رنگ‌های کاتیونی، متیلن آبی می‌باشد که



به دلیل سرطان‌زایی و جهش‌زایی آن، یک تهدید مهم برای انسان و موجودات زنده به شمار می‌رود. از معروف‌ترین رنگ‌های آنیونی نیز می‌توان به متیل نارنجی اشاره کرد که به طور گسترده برای تخمین قلیایی بودن آب و به عنوان شاخصی برای تیتراسیون اسیدها و بازهای قوی استفاده می‌شود. به دلیل ماهیت یونی متیل نارنجی، این رنگ غیرفرار است و کمتر در معرض تجزیه بیولوژیکی هوازی در خاک و آب قرار می‌گیرد. بنابراین، تصفیه پساب حاوی این آلاینده‌ها قبل از تخلیه آن‌ها به محیط زیست ضروری می‌باشد [۳، ۴].

روش‌های مختلف تصفیه آب شامل جذب سطحی، انعقاد و لخته‌سازی، فیلتراسیون غشایی، اکسیداسیون شیمیایی و تبادل یونی و غیره می‌باشند [۵]. با این حال، اغلب این فرایندها پرهزینه و زمان‌بر بوده و مشکلات اضافی نظیر دفع زباله را ایجاد می‌کنند. از میان روش‌های ذکر شده، جذب سطحی به دلیل هزینه عملیاتی پایین، سهولت در اجرا، راندمان بالا، تولید حداقل میزان لجن و امکان بازیابی جاذب‌ها یک تکنیک امیدوارکننده می‌باشد [۶].

از جاذب‌های متداول در زمینه تصفیه رنگ‌ها از محیط آبی می‌توان به کربن فعال، زئولیت، سیلیکاژل، آلومینای فعال، نانولوله‌های کربنی و چارچوب‌های فلز-آلی اشاره کرد. از میان جاذب‌های ذکر شده، کربن فعال به دلیل ظرفیت جذب قوی و ساختار زیاد تخلخل به طور گسترده در تصفیه پساب مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، کربن‌های فعال را می‌توان از پیش‌سازهای نظیر چوب، زغال سنگ و ضایعات زیست توده، مواد معدنی و بقایای حیوانات تولید کرد. قابل ذکر است که پیش‌ساز باید ترجیحاً در دسترس و ارزان باشد. علاوه بر آن، نوع پیش‌ساز تأثیر زیادی بر کیفیت، ویژگی‌ها و خواص ساختاری کربن‌های فعال حاصله دارد. تخته فیبر با دانسیته متوسط^۱ (MDF)، یک محصول چوبی است که از الیاف لیگنوسلولزی ساخته شده است. با توجه به افزایش تقاضا، حجم تولید MDF در سراسر جهان به طور مداوم در حال افزایش می‌باشد که این میزان از حدود ۸ میلیون متر مکعب در سال ۱۹۹۵ به تقریباً ۱۰۰ میلیون متر مکعب در سال ۲۰۱۸ رسیده است و منجر به تولید حجم زیادی از ضایعات این محصول شده است [۷]. از این رو، استفاده از ضایعات MDF به عنوان پیش‌ساز ارزان و در دسترس به منظور تولید کربن فعال منجر به کاهش اثرات زیست محیطی خواهد شد.

در مطالعه حاضر، کربن فعال از ضایعات MDF جهت حذف آلاینده‌های رنگی متیلن آبی و متیل نارنجی سنتز گردید. کربن فعال تولید شده با استفاده از آنالیزهای مختلفی مانند BET، FT-IR و FE-SEM مشخصه‌یابی شد و تأثیر پارامترهای زمان تماس و غلظت بر میزان درصد حذف هر دو رنگ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، مدل‌های مختلف سینتیک و ایزوترم جذب بر روی داده‌های تجربی برازش شدند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

ضایعات MDF از کارگاه‌های چوب جمع آوری شدند. برای سنتز کربن فعال از مواد شیمیایی شامل هیدروکلریک اسید^۲ ۳۷ درصد و پتاسیم هیدروکسید^۳ با خلوص ۹۹ درصد و از گاز نیتروژن (از شرکت خوراکیان مشهد، با درصد خلوص

^۱ Medium-density fiberboard

^۲ HCl

^۳ KOH



۹۹/۹۹۹۹) استفاده گردید. به منظور مطالعه حذف آلاینده‌های رنگی از محیط آبی، از رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی استفاده شد. تمامی مواد شیمیایی از شرکت مرک بوده و بدون خالص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲-۲- روش سنتز کربن فعال

برای تهیه و سنتز جاذب کربن فعال، ابتدا ضایعات MDF آسیاب گردیده و مش بندی شدند. سپس، ذرات الک شده‌ی MDF به مدت ۱۲ ساعت تحت دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در داخل آن قرار گرفته و به طور کامل خشک شدند. مراحل تهیه هر نمونه کربن فعال شامل سه بخش اصلی کربنیزاسیون، فعال سازی و شستشو می‌باشد. فرایند کربنیزاسیون در کوره لوله‌ای، در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، تحت جریان گاز نیتروژن و به مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام گردید. در طی عملیات کربنیزاسیون، مواد آلی فرار تبخیر شده و ماده کربنی با خلوص بالا حاصل شد. سپس در مرحله فعال‌سازی، ماده کربنی حاصل از MDF با نسبت وزنی ۱:۱ با عامل فعال‌ساز (پتاسیم هیدروکسید) مخلوط گردید. جهت انجام عملیات فعال‌سازی، مخلوط حاصل در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، تحت جریان گاز نیتروژن با دبی ۱۰۰ ml/min به مدت ۶۰ دقیقه با نرخ حرارتی ۵ °C/min در کوره لوله‌ای قرار گرفت. در نهایت، نمونه با اسید کلریدریک ۰/۱ مولار و آب مقطر شستشو داده شد تا زمانی که pH به محدوده خنثی رسید. پس از آن، نمونه به مدت ۱۲ ساعت درون آن قرار گرفته و در دمای ۱۱۰ °C خشک گردید.

۲-۳- آنالیزهای مشخصه‌یابی

جهت شناسایی گروه‌های عاملی کربن فعال سنتز شده، از دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز^۱ (FT-IR) با مدل Thermo Nicolet Avatar 370 در محدوده عدد موجی ۴۰۰-۴۰۰۰ cm⁻¹ استفاده گردید. به منظور بررسی مورفولوژی و ساختار نمونه، تصویربرداری توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۲ (FE-SEM) با مدل LMU Tescan Mira 3 انجام شد. همچنین، برای تعیین سطح ویژه و حجم کل حفرات کربن فعال از ایزوترم جذب-واجذب نیتروژن در دمای ۷۷ کلوین از دستگاه BELSORPMINI II استفاده گردید. جهت محاسبه توزیع اندازه حفرات نمونه، روش BJH^۳ به کار گرفته شد. علاوه بر این، اندازه‌گیری غلظت محلول‌های رنگی با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش^۴ با مدل Analytic Jena Spekol 1300 انجام شد.

۲-۴- روش انجام آزمایشات

به منظور مطالعه جذب رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی بر روی سطح جاذب کربن فعال، اثر پارامترهای زمان تماس (۶۰-۱۰ دقیقه) و غلظت (۵۰-۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، آزمایشات جذب در حالت ناپیوسته انجام شد و در تمامی آزمایشات مقدار دوز جاذب ۰/۲ گرم بر لیتر و مقدار pH برای رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی به ترتیب ۹ و ۴ ثابت نگه داشته شد. در مطالعه حاضر جهت انجام فرایند جذب، ابتدا مقدار ۰/۲ گرم بر لیتر از کربن فعال سنتز شده به ۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اضافه گردیده و بر روی یک همزن مغناطیسی

¹ Fourier-transform infrared spectroscopy

² Field Emission Scanning Electron Microscopes

³ Barrett-Joyner-Halenda

⁴ Ultraviolet-visible spectroscopy



قرار می‌گیرد تا زمانی که سیستم به حالت تعادل برسد. پس از مدت زمان مشخصی، جاذب توسط سانتریفیوژ از محلول جدا شده و غلظت محلول باقی‌مانده با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش ارزیابی می‌گردد. قابل ذکر است که، حداکثر طول موج^۱ (λ_{max}) برای رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی به ترتیب ۶۴۶ و ۴۶۴ نانومتر می‌باشد. در این مطالعه، درصد حذف رنگ (R) برحسب درصد و ظرفیت جذب جاذب در حالت تعادل (q_e) برحسب میلی‌گرم بر گرم با استفاده از معادلات ۱ و ۲ محاسبه شدند:

$$R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (2)$$

در این روابط C_0 و C_e به ترتیب غلظت اولیه و غلظت تعادلی رنگ برحسب میلی‌گرم بر لیتر هستند. همچنین، V حجم محلول رنگی برحسب لیتر و M نیز جرم جاذب برحسب گرم می‌باشد.

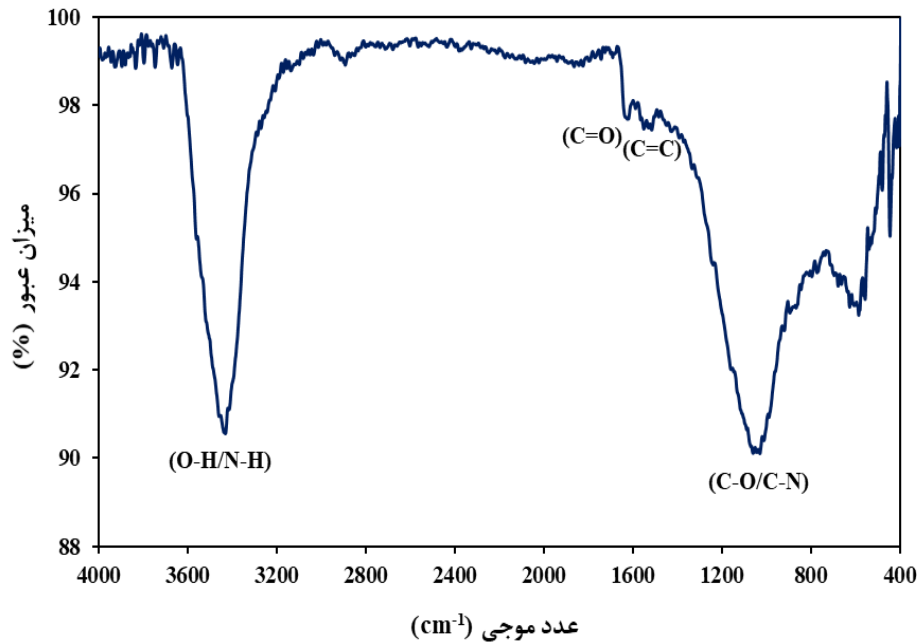
۳- بحث و نتایج

۳-۱- آنالیزهای مشخصه یابی جاذب کربن فعال

۳-۱-۱- آنالیز FT-IR

آنالیز FT-IR ابزار مهمی برای شناسایی گروه‌های عاملی موجود در سطح مواد می‌باشد. شکل ۱ طیف FT-IR را برای کربن فعال سنتز شده نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱، پیوند قوی در 3432 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاشات کششی گروه‌های O-H و N-H نسبت داد [۸]. پیوند مشاهده شده در 1620 cm^{-1} نشان دهنده ارتعاشات کششی C=O در گروه کربوکسیل می‌باشد [۹]. همچنین، پیوند با شدت ضعیف واقع در 1500 cm^{-1} مربوط به حضور گروه‌های C=C است [۱۰]. علاوه بر این، پیوندهای حدود 1050 به ارتعاشات کششی C-O و C-N اختصاص داده می‌شوند [۱۱]. با توجه به نتایج بدست آمده، وجود گروه‌های عاملی حاوی نیتروژن و اکسیژن در کربن فعال سنتز شده سبب افزایش عملکرد جاذب در جذب رنگ‌ها می‌شود.

¹ Maximum wavelength



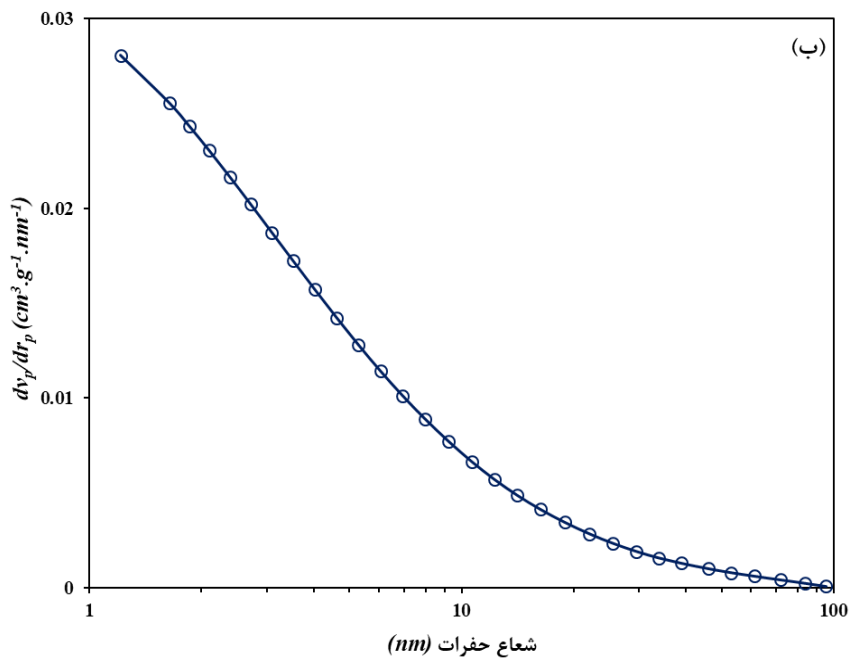
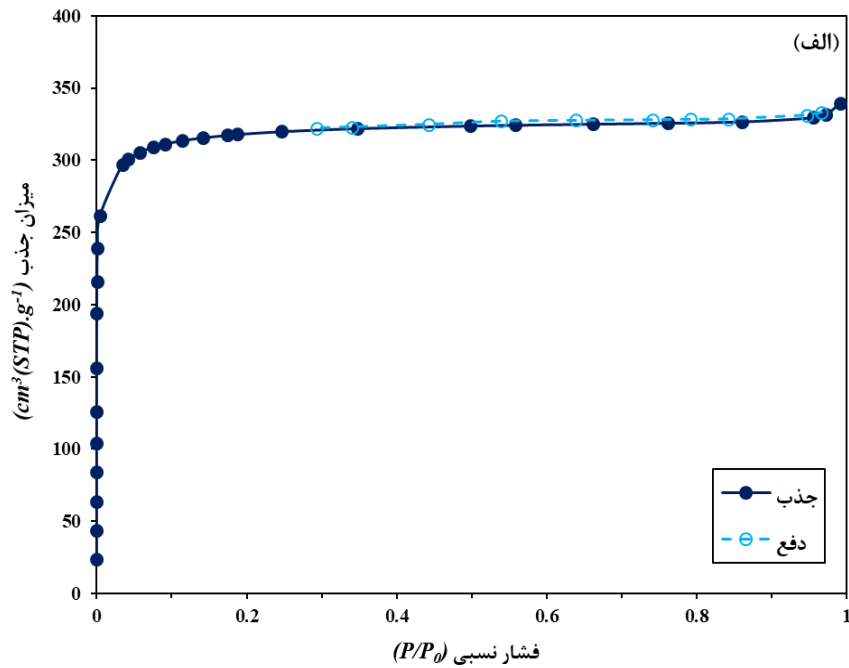
شکل ۱: طیف FT-IR کربن فعال بدست آمده

۳-۱-۲- آنالیز جذب-واجذب نیتروژن

خواص جذبی کربن فعال تحت تأثیر تخلخل و سطح ویژه آن است. مواد کربنی با سطح ویژه بزرگتر، فضای بیشتری برای تماس جاذب-جذب شونده در دسترس قرار می‌دهند [۱۲]. شکل ۲ (الف) نمودار ایزوترم جذب-واجذب نیتروژن را برای جاذب کربن فعال سنتز شده نشان می‌دهد. با توجه به طبقه بندی آیوپاک^۱، ایزوترم از نوع I بوده که نشان دهنده وجود میکروحفرات در سطح کربن فعال است [۱۳]. به عبارتی دیگر در شکل ۲ (الف)، هیچ حلقه‌ی هیستریزیسی^۲ برای کربن فعال سنتز شده مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده عدم وجود مزوحفرات در این جاذب است. علاوه بر این، سطح ویژه و سایر خواص سطحی کربن فعال در جدول ۱ خلاصه شده است. با توجه به جدول ۱، سطح ویژه و حجم کل حفرات جاذب تولید شده به ترتیب ۱۲۵۲ مترمربع بر گرم و ۰/۵۲ سانتی‌متر معکب بر گرم می‌باشد که این مقدار برای دستیابی به حذف بالای آلاینده‌های رنگی مورد مطالعه کافی است. همچنین، توزیع اندازه‌ی حفرات کربن فعال سنتز شده بر اساس روش BJH در شکل ۲ (ب) ارائه شده است. همان طور که در شکل ۲ (ب) مشاهده می‌شود، حفراتی با اندازه‌ی میکرو (۲-۰ نانومتر) دارای بیشترین فراوانی می‌باشند که نشان دهنده میکروحفره بودن کربن فعال سنتز شده است.

¹ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)

² Hysteresis



شکل ۲: الف) ایزوترم جذب-وا جذب نیتروژن و ب) توزیع اندازه حفرات کربن فعال بدست آمده

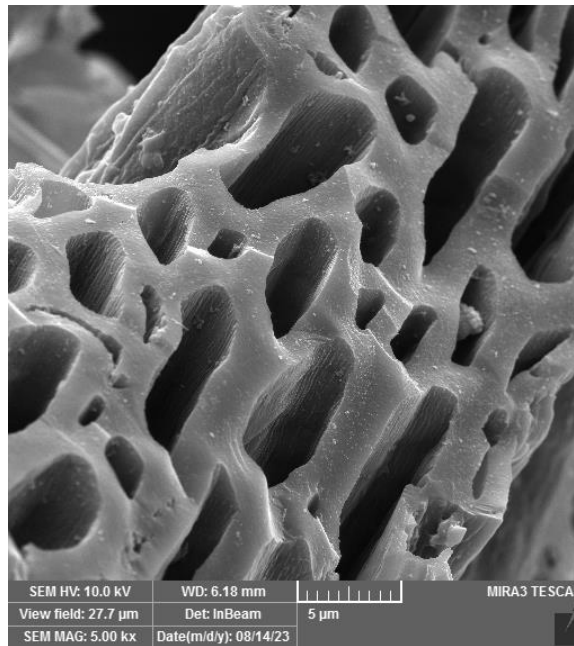
جدول ۱: خواص سطحی کربن فعال سنتز شده

متوسط اندازه حفرات (nm)	حجم کل حفرات ($cm^3.g^{-1}$)	سطح ویژه BET ($m^2.g^{-1}$)
۱/۶۷	۰/۵۲	۱۲۵۲



۳-۱-۳- آنالیز FE-SEM

آنالیز FE-SEM برای مشاهده‌ی مورفولوژی کربن فعال مورد استفاده قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سطح کربن فعال سنتز شده با استفاده از فعال‌سازی شیمیایی با پتاسیم هیدروکسید، ناهموار و متخلخل بوده و حاوی تعداد زیادی حفرات نامنظم با اندازه و شکل‌های متنوع است که به صورت تصادفی روی سطح آن توزیع شده‌اند. به طور کلی، پتاسیم هیدروکسید با تشکیل حفرات جدید و یا گسترش حفرات موجود در ماده پیش‌ساز منجر به ایجاد تخلخل در کربن فعال بدست آمده می‌شود [۹]. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، این آنالیز نشان می‌دهد که کربن فعال بدست آمده دارای یک مورفولوژی متخلخل است که می‌تواند جاذب مفیدی برای کاربردهای جذب سطحی باشد.



شکل ۳: تصویر FE-SEM کربن فعال حاصله

۳-۲- آزمون‌های عملکردی

۳-۲-۱- تأثیر زمان تماس و بررسی سینتیک جذب

تأثیر زمان تماس بر جذب رنگ‌های متیل نارنجی و متیلن آبی توسط کربن فعال سنتز شده در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود سرعت جذب در ابتدای فرایند سریع بوده و به تدریج با گذشت زمان سرعت جذب کاهش می‌یابد. در نهایت، پس از رسیدن به حالت تعادل تقریباً ثابت می‌گردد. دلیل این مشاهدات، کاهش تعداد مکان‌های فعال جاذب با گذشت زمان است. تا جایی که، جاذب غالباً اشباع شده و در میزان جذب تغییرات ناچیزی مشاهده می‌شود.

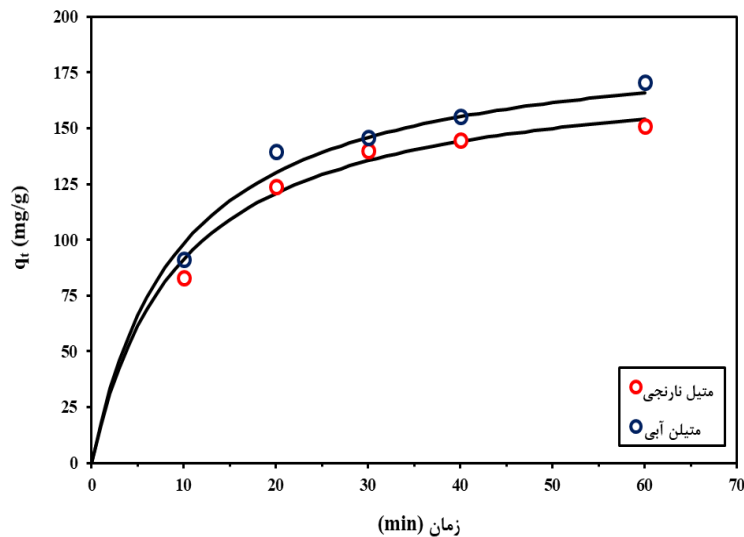


به منظور بررسی سرعت و مکانیزم حاکم بر فرایند جذب رنگ‌های مورد مطالعه بر روی سطح جاذب کربن فعال سنتز شده، یک مطالعه سینتیکی با استفاده از دو مدل شبه مرتبه اول^۱ و شبه مرتبه دوم^۲ انجام شد که شکل خطی آن‌ها به ترتیب در معادلات ۳ و ۴ نشان داده شده است.

$$\ln(q_{e,\text{exp}} - q_t) = \ln q_{e,\text{cal}} - K_1 t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_{e,\text{cal}}^2} - \frac{t}{q_{e,\text{cal}}} \quad (4)$$

در این روابط، پارامتر t نشان دهنده زمان تماس برحسب دقیقه است. K_1 و K_2 به ترتیب ثابت سرعت جذب شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم است. q_t و $q_{e,\text{exp}}$ به ترتیب نشان دهنده مقدار تجربی ظرفیت جذب در حالت تعادل و در زمان t برحسب میلی گرم بر گرم می‌باشد. $q_{e,\text{cal}}$ نیز مقدار تئوری ظرفیت جذب تعادلی را نشان می‌دهد که از معادلات ۳ و ۴ بدست می‌آید. در جدول ۲ مقادیر تجربی و تمامی پارامترهای سینتیکی محاسبه شده از برازش خطی معادله‌های شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم ارائه شده است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود در بین مدل‌های مورد بررسی مدل شبه مرتبه دوم دارای بالاترین مقادیر ضریب رگرسیون (R^2) برای رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی می‌باشد. همچنین، مقادیر تئوری ظرفیت جذب تعادلی محاسبه شده از مدل شبه مرتبه دوم ($q_{e,\text{cal}}$) است. بنابراین، این نتایج بیانگر آن است که داده‌های سینتیکی با مدل شبه مرتبه دوم تطابق خوبی دارند که نشان می‌دهد، سرعت کلی فرایند جذب رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی بر روی کربن فعال سنتز شده توسط جذب شیمیایی کنترل می‌گردد. [۱۲]



شکل ۴: تأثیر زمان تماس بر جذب رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی توسط کربن فعال سنتز شده

¹ Pseudo-first order

² Pseudo-second order



جدول ۲: پارامترهای سینتیکی جذب رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی بر روی کربن فعال سنتز شده

شبه مرتبه دوم			شبه مرتبه اول			$q_{e,exp}$ ($mg.g^{-1}$)	رنگ‌ها
R^2	K_2	$q_{e,cal}$ ($mg.g^{-1}$)	R^2	K_1	$q_{e,cal}$ ($mg.g^{-1}$)		
۰/۹۹	۰/۰۰۰۵	۱۹۲/۳	۰/۸۵	۰/۰۶	۱۲۹/۱	۱۷۰/۷	متیلن آبی
۰/۹۹	۰/۰۰۰۶	۱۷۸/۶	۰/۹۰	۰/۰۴	۸۳/۲	۱۵۹/۰	متیل نارنجی

۲-۲-۳- تأثیر غلظت و بررسی ایزوترم جذب

در این مطالعه، جهت دستیابی به ایزوترم‌های جذب تعادلی تأثیر غلظت اولیه رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی در دمای محیط بررسی گردید. شکل ۵ نشان دهنده ایزوترم‌های جذب تعادلی هر دو رنگ بر روی کربن فعال سنتز شده می‌باشد. با توجه به شکل ۵، رفتار سیستم جذب مورد مطالعه شامل دو مرحله مجزا بود. بدین صورت که ابتدا با افزایش غلظت تعادلی رنگ‌ها در محلول، ظرفیت جذب جاذب افزایش می‌یابد. سپس، با افزایش بیشتر غلظت رنگ‌ها تغییر محسوسی در ظرفیت جذب جاذب مشاهده نمی‌شود که نشان دهنده دستیابی به شرایط تعادل است.

در مطالعه حاضر، از مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ به عنوان دو معادله معروف و پرکاربرد برای تحلیل داده‌های تعادلی جذب استفاده شد که فرم خطی آن‌ها در معادلات ۵ و ۶ نشان داده شده است.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{m,cal}} + \frac{C_e}{q_{m,cal}} \quad (5)$$

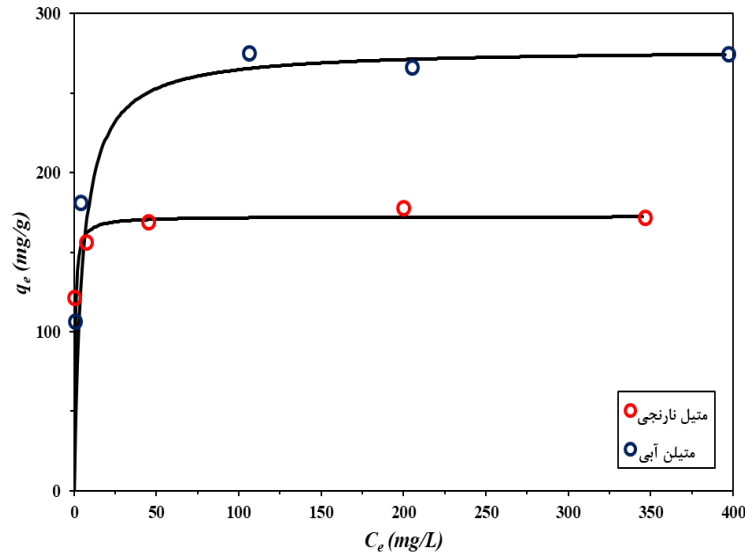
$$\ln(q_e) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (6)$$

در این روابط، C_e و q_e به ترتیب نشان دهنده‌ی غلظت تعادلی رنگ در محلول و مقدار رنگ جذب شده بر روی جاذب (بر حسب میلی گرم بر گرم) در حالت تعادل می‌باشد. q_m حداکثر ظرفیت جذب جهت تشکیل یک تک لایه از مولکول‌های جذب شونده بر روی سطح جاذب است. K_L ثابت تعادل لانگمویر است که نشان دهنده انرژی آزاد جذب است. K_F و n ثابت‌های تعادل جذب فروندلیچ هستند که به ترتیب قدرت پیوند جذب و شدت جذب را نشان می‌دهند.

در جدول ۵ تمام پارامترهای تعادلی محاسبه شده از برازش خطی داده‌های تجربی با مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ فهرست شده است. در بین دو مدل مورد بررسی، ایزوترم لانگمویر بهترین مدل برای برازش داده‌های تعادلی تجربی با ضریب رگرسیون (R^2) بالاتر از ۰/۹۹ است. همچنین، مقادیر تئوری حداکثر ظرفیت جذب تعادلی محاسبه شده از مدل لانگمویر ($q_{m,cal}$) بسیار نزدیک به مقادیر حداکثر ظرفیت جذب تعادلی تجربی ($q_{m,exp}$) است که مطابقت این مدل را تأیید می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که جذب رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی بر روی سطح کربن فعال سنتز شده از ایزوترم لانگمویر پیروی می‌کند. به این ترتیب، به نظر می‌رسد جذب تک لایه‌ای از مولکول‌های رنگ بر روی سطح همگن جاذب مورد مطالعه رخ می‌دهد [۱۴]. مقادیر q_m نشان دهنده حداکثر مقدار جذب هر دو رنگ بر روی کربن فعال بدست آمده



است. در این مطالعه، q_m برای رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی به ترتیب ۲۷۵/۲ و ۱۷۸/۰ میلی‌گرم بر گرم حاصل شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کربن فعال سنتز شده دارای ظرفیت جذب بالایی برای حذف رنگ‌های مورد مطالعه است.



شکل ۵: ایزوترم‌های جذب رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی بر روی کربن فعال بدست آمده

جدول ۳: ثابت‌های تعادلی ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیچ

فروندلیچ			لانگمویر				$q_{m,exp}$ ($mg \cdot g^{-1}$)	رنگ‌ها
R^2	$1/n$	K_F	R^2	R_L	$q_{m,cal}$ ($mg \cdot g^{-1}$)	K_L		
۰/۹۲	۰/۱۳	۱۲۹/۸	۰/۹۹	۰/۱۸	۲۷۷/۸	۰/۲	متیلن آبی	
۰/۹۵	۰/۰۴	۱۴۰/۹	۰/۹۹	۰/۰۲	۱۷۲/۴	۲	متیل نارنجی	

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه استفاده از ضایعات MDF به عنوان یکی از ارزان‌ترین و فراوان‌ترین ضایعات چوبی برای سنتز کربن فعال مورد بررسی قرار گرفت. کربن فعال مورد مطالعه، با استفاده از فرایند تجزیه حرارتی و فعال‌سازی شیمیایی با عامل فعال‌ساز پتاسیم هیدروکسید تهیه گردید. با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز FT-IR، کربن فعال حاصل دارای طیف وسیعی از گروه‌های عاملی از جمله گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمینو می‌باشد که این گروه‌ها نقش به‌سزایی در حذف آلاینده‌های رنگی دارند. نتایج آنالیز BET نشان داد که کربن فعال بدست آمده دارای سطح ویژه بالا (۱۲۵۲ مترمربع بر گرم) می‌باشد که نشان دهنده کیفیت بسیار بالای این جاذب جهت حذف آلاینده‌های رنگی است. همچنین، تصویر بدست آمده از آنالیز FE-SEM، ساختار متخلخل کربن فعال سنتز شده را تأیید کرد. در این پژوهش از رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی به عنوان نماینده‌ای از گروه رنگ‌های آنیونی و کاتیونی به منظور کارایی کربن فعال بدست آمده استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان



حداکثر ظرفیت جذب در کرین فعال سنتز شده از ضایعات MDF برای رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی به ترتیب ۲۷۵/۲ و ۱۷۸/۰ میلی گرم بر گرم است که نشان دهنده قابلیت بالای این جاذب در حذف آلاینده‌های رنگی آنیونی و کاتیونی می‌باشد.

مراجع

- [1] H. K. Sharma, I. R. Sofi, and K. A. Wani, "Low Cost Absorbents, Techniques, and Heavy Metal Removal Efficiency," in *Biostimulation Remediation Technologies for Groundwater Contaminants*, A. K. Rathoure Ed. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2018, pp. 50-79.
- [2] C. W. Lai, J. C. Juan, W. B. Ko, and S. Bee Abd Hamid, "An overview: recent development of titanium oxide nanotubes as photocatalyst for dye degradation," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, pp. 1-14, 2014.
- [3] Ç. Sarici-Özdemir, "Removal of methylene blue by activated carbon prepared from waste in a fixed-bed column," *Particulate Science and Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 311-318, 2014.
- [4] A. Mittal, A. Malviya, D. Kaur, J. Mittal, and L. Kurup, "Studies on the adsorption kinetics and isotherms for the removal and recovery of Methyl Orange from wastewaters using waste materials," *Journal of hazardous materials*, vol. 148, no. 1-2, pp. 229-240, 2007.
- [5] C. Yu *et al.*, "Selective enhancement of photo-piezocatalytic performance in BaTiO₃ via heterovalent ion doping," *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 52, p. 2209365, 2022.
- [6] B. Li, Y. Zhang, D. Ma, Z. Shi, and S. Ma, "Mercury nano-trap for effective and efficient removal of mercury(II) from aqueous solution," *Nature Communications*, vol. 5, no. 1, p. 5537, 2014/11/20 2014, doi: 10.1038/ncomms6537.
- [7] S. Hagel, J. Joy, G. Cicala, and B. Saake, "Recycling of waste MDF by steam refining: Evaluation of fiber and paper strength properties," *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1-13, 2021.
- [8] J. Shu *et al.*, "Copper loaded on activated carbon as an efficient adsorbent for removal of methylene blue," *RSC advances*, vol. 7, no. 24, pp. 14395-14405, 2017.
- [9] Q.-Q. Zhuang *et al.*, "Heteroatom nitrogen and oxygen co-doped three-dimensional honeycomb porous carbons for methylene blue efficient removal," *Applied Surface Science*, vol. 546, p. 149139, 2021.
- [10] I. Mechnou, S. Meskini, I. Mourtah, L. Lebrun, and M. Hlaibi, "Use of phosphorus-doped microporous carbon from olive mill wastewater for effective removal of crystal violet and methylene blue," *Journal of Cleaner Production*, vol. 393, p. 136333, 2023.
- [11] P. Ma, S. Yao, Z. Wang, F. Qi, and X. Liu, "Preparation of nitrogen-doped hierarchical porous carbon aerogels from agricultural wastes for efficient pollution adsorption," *Separation and Purification Technology*, vol. 311, p. 123250, 2023.
- [12] F. Marrakchi, M. Auta, W. Khanday, and B. Hameed, "High-surface-area and nitrogen-rich mesoporous carbon material from fishery waste for effective adsorption of methylene blue," *Powder Technology*, vol. 321, pp. 428-434, 2017.
- [13] A. Rehman and S.-J. Park, "Environmental remediation by microporous carbon: An efficient contender for CO₂ and methylene blue adsorption," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 34, pp. 656-667, 2019.
- [14] H. Sheng, M. Wei, A. D'Aloia, and G. Wu, "Heteroatom polymer-derived 3D high-surface-area and mesoporous graphene sheet-like carbon for supercapacitors," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 8, no. 44, pp. 30212-30224, 2016.