



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

حذف رنگ متیل اورانژ از محلول‌های آبی توسط نانومزوپور SBA-16 و بهینه‌سازی پارامترهای موثر با استفاده از روش سطح پاسخ

محمدحسین فکری*، سمانه سلیمانی، مریم رضوی‌مهر، فاطمه ساکی

گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

اطلاعات مقاله: چکیده

زمینه و هدف: با توجه به حضور آلاینده‌های صنعتی در منابع آبی، تصفیه فاضلاب‌ها، به ویژه پساب‌های رنگی یک امر ضروری است. هدف از این مطالعه تصفیه فاضلاب حاوی رنگ متیل اورانژ با استفاده از نانومزوپور SBA-16 است.

روش بررسی: در مطالعه حاضر، اثر پارامترهای مختلف (pH، غلظت متیل اورانژ، مقدار جاذب، دما و زمان تماس) در جذب متیل‌اورانژ توسط نانوکامپوزیت تهیه شده به کمک نرم‌افزار طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) بررسی شد.

یافته‌ها: بیشترین مقدار حذف آلاینده توسط جاذب در شرایط بهینه $\text{pH}=4.07$ ، دمای 50°C ، زمان تماس ۳۵ min، غلظت اولیه جذب شونده ۱۰ ppm و مقدار جاذب ۰/۰۴ g به دست آمد. همچنین یافته‌ها نشان داد که رفتار جذبی بیشترین مطابقت را با ایزوترم لانگمویر دارد و فرایند جذب از نوع گرمازا و در دماهای پایین خود به خودی است.

نتیجه‌گیری: در شرایط بهینه، ۹۸/۶۰ درصد متیل اورانژ از محیط آبی توسط جاذب SBA-16 حذف گردید و حداکثر ظرفیت جاذب (q_{max}) برای حذف آلاینده متیل اورانژ ۳۷/۷۳ mg/g به دست آمد. با توجه به پتانسیل بالای نانومزوپور SBA-16 در حذف رنگدانه متیل اورانژ، می‌تواند گزینه مناسبی در حذف آلاینده‌های رنگی و تصفیه فاضلاب‌های کارخانجات نساجی محسوب شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

واژگان کلیدی: جذب سطحی، نانو مزوپور SBA-16، رنگ متیل اورانژ، روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
m.h.fekri@abru.ac.ir

Please cite this article as: Fekri MH, Soleymani S, Razavi Mehr M, Saki F. Removal of methyl orange dye from aqueous solutions by SBA-16 nano mesopore and optimization of effective parameters using response surface method. Iranian Journal of Health and Environment. 2023;16(2):339-56.

مقدمه

امروزه در بسیاری از صنایع از جمله نساجی و رنگرزی، حجم قابل توجهی پساب شامل گستره وسیعی از آلاینده‌ها مانند میکروارگانسیم‌ها، فلزات سنگین، مواد آلی فلزی، رنگدانه‌های آلی و ... در حین فرآیندهای مختلف تولید می‌شوند. بهره‌وری پایین روش‌های معمول تصفیه پساب و هزینه‌های بالای ناشی از آن باعث شده است که قسمتی از آب‌های آلوده به طور کامل تصفیه نشده و با برخی از آلاینده‌ها وارد چرخه مصرف شوند. یک دسته از آلاینده‌ها در صنایع شیمیایی و نساجی رنگدانه‌ها هستند. بیشتر رنگ‌ها خاصیت سرطان‌زایی دارند که این امر بیانگر اهمیت تصفیه موثر فاضلاب‌های رنگی در کارخانه‌های تولید رنگ است (۱). در میان انواع رنگدانه‌ها متیل اورانژ یکی از آلاینده‌های مهم است که به عنوان شناساگر نیز در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود. با توجه به اینکه متیل اورانژ یک موتاژن به حساب می‌آید، تماس مستقیم با این پودر سرطان‌زا است.

بهره‌وری پایین روش‌های معمول تصفیه پساب و هزینه‌های بالای ناشی از آن باعث شده است که قسمتی از پساب‌ها به طور کامل تصفیه نشده و با برخی از آلاینده‌ها وارد چرخه مصرف شوند (۲). لذا به کارگیری روش‌های کارآمد و مقرون به صرفه جهت تصفیه و بازیابی فاضلاب‌های صنعتی به منظور استفاده مجدد آنها در چرخه مصرف امری اجتناب‌ناپذیر است (۳). استفاده از تصفیه خانه‌ها، جهت حذف آلاینده‌های قطبی با غلظت بالا مناسب نیست. به همین دلیل پژوهشگران به دنبال راه‌حل‌های اقتصادی و اجرایی مناسب جهت حذف آلاینده‌ها از محیط زیست هستند (۴). از جمله روش‌های امروزی که برای حذف آلاینده‌ها استفاده می‌شوند عبارتند از: پرتو فرابنفش (۵)، استفاده از نانو ذرات آهن (۶)، جذب سطحی (۷)، کوآگولاسیون و سایر روش‌های اکسیداسیون پیشرفته (۸، ۹)، استفاده از فتوکاتالیست‌ها (۱۰، ۱۱)، نانو فیلتراسیون (۱۲) و غیره.

فرایند جذب سطحی به دلیل کارایی بسیار بالا، طراحی و اجرای آسان سیستم، عدم تولید محصولات جانبی و صرفه اقتصادی، مناسب‌ترین گزینه برای حذف آلاینده‌های رنگی از

پساب‌ها به حساب می‌آید (۱۳-۱۷). فرایند جذب سطحی در مقایسه با تکنیک‌های دیگر تصفیه از نظر هزینه اولیه، استفاده مجدد از پساب، سادگی و انعطاف‌پذیری در طراحی، بهره‌برداری آسان و غیرحساس بودن به آلاینده‌ها و ترکیبات سمی، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. تولید پساب با کیفیت بالا و عدم تشکیل رادیکال‌های آزاد و مواد خطرناک از مزایای دیگر این روش به حساب می‌آید (۱۸، ۱۹). امروزه استفاده از مواد جذب ارزان‌قیمت با ظرفیت جذبی بالا جهت کاهش غلظت آلاینده‌های آلی موجود در پساب و به حداقل رساندن مشکلات مربوط به ضایعات، نظر محققان را به خود جلب کرده است. از جمله مواد جذب مورد استفاده می‌توان به کربن فعال، زیست‌پلیمرهای کیتین و کیتوسان، رزین‌های تبادل یونی، خاک رس، سیلیکات‌ها و اکسید فلزات معدنی کم‌خطر اشاره کرد. در میان جذب‌های مورد استفاده در این فرآیند، ترکیبات مزومتخلخل SBA به دلیل سطح و حجم بالای منافذ و ظرفیت بالای جذب متداول تر هستند. این ترکیبات در سال ۱۹۹۸ توسط ژائو و همکاران، در دانشگاه سانتا باربارا کالیفرنیا سنتز شدند و نام آنها نیز به دلیل آمورف بودن از مخفف عبارت سانتا باربارا آمورف (Santa Barbara Amorphous) گرفته شده است. از اعضای این خانواده می‌توان SBA-1، SBA-2، SBA-8، SBA-11، SBA-15 و SBA-16 را نام برد که از میان آنها SBA-15 و SBA-16 بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند. این ترکیبات دارای دیواره سیلیکاتی و اندازه حفرات آنها بین ۵-۴۰ nm متغیر است. همچنین مساحت سطح حدود $600-1000 \text{ m}^2/\text{g}$ دارند. SBA-15 و SBA-16 در محیط اسیدی با استفاده از کوپلیمر سه قسمتی غیریونی EO-PO-EO (پلی اتیلن اکسید-پلی پروپیلن اکسید) سنتز می‌شوند (۲۰، ۲۱). مواد فعال به کار رفته در سنتز این ترکیبات ارزان، به آسانی جدا شده، غیرسمی، زیست‌تخریب‌پذیر می‌باشند. SBA-16 دارای ساختار سه بعدی مکعبی با گروه فضایی Im3m است. SBA-16 به

دلیل بالا بودن سطح موثر بالا و کانال‌های سه بعدی متصل به هم سبب انتقال جرم بالاتری می‌شود (۲۲). در یک پژوهش که توسط Tsai و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام دادند موفق شدن با عامل‌داری‌سازی سیلیس مزوپور مکعبی SBA-16 توسط گروه‌های کربوکسیلیک اسید برای حذف موثر دو رنگ کاتیونی متیلن‌بلو و فنوسافرانین استفاده کنند. نتایج حداکثر ظرفیت جذب برای دو رنگ کاتیونی متیلن‌بلو و فنوسافرانین به ترتیب ۵۶۱ و ۵۱۹ mg/g در pH=۹ را نشان داد. همچنین، بازده حذف تا ۹۸/۶ درصد به دست آمد (۲۳). در پژوهشی دیگر Fekri و همکاران در سال ۲۰۲۳ با تهیه SBA-16 به روش سبز از ساقه گیاه نی، از آن برای حذف آلاینده رنگی فنل‌فالتین استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در شرایط بهینه (pH=۴/۰۱، دمای ۴۴ °C، زمان تماس ۲۰ min، غلظت اولیه جذب شونده ۱۳ ppm و مقدار جاذب ۰/۰۵ g) جاذب قادر است تا حدود ۹۹/۵ درصد از آلاینده را حذف نماید (۲۴).

در این پژوهش از مزوساختار SBA-16 به عنوان جاذب آلاینده رنگی متیل‌اورانژ استفاده شده است. نانوجاذب پس از شناسایی توسط تکنیک‌های مختلف (TEM، SEM، XRD...)، جهت بررسی مطالعات بارگذاری و حذف آلاینده مورد استفاده قرار گرفت. سپس به کمک نرم‌افزار طراحی آزمایش، شرایط بهینه بارگذاری دارو بر روی نانوحامل به دست آمد. ۵ متغیر موثر در بارگذاری دارو شامل pH، زمان تماس، دما، غلظت اولیه آلاینده و مقدار جاذب بررسی گردید. همچنین ایزوترم و ترمودینامیک حذف آلاینده رنگی متیل‌اورانژ توسط جاذب SBA-16 مطالعه گردید.

مواد و روش‌ها

سنتز SBA-16

ابتدا ۱/۵ g پلورونیک f127 در یک ارلن ۲۵۰ mL ریخته و در ۷۲ mL آب مقطر حل شد. سپس به محلول حاصل ۷/۲ mL HCl غلیظ اضافه شد. محلول به مدت ۳۰ min در دمای

۶۰ °C هم زده شد. بعد از آن به محلول ۷/۷ mL تترا اتیل اورتو سیلیکات و ۵/۵ mL ۱-بوتانول اضافه و مجدداً در دمای ۵۵ °C به مدت ۲۴ h بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت، سپس محلول برای خشک شدن درون آون با دمای ۱۰۰ °C به مدت ۲۴ h قرار گرفت. بر روی رسوب حاصل فرآیند شستشو و فیلتراسیون انجام گرفت. مجدداً رسوب سفید رنگ حاصل برای ۲۴ h دیگر با دمای ۶۰۰ °C درون کوره قرار گرفت تا فرآیند کلسیناسیون انجام شود. در نهایت پودر سفید رنگ SBA-16 به دست آمد.

تهیه محلول مادر متیل‌اورانژ و رسم منحنی کالیبراسیون محلول‌هایی با غلظت‌های مشخص (۱۰۰ - ۱۰ ppm) از محلول مادر با غلظت ۱۰۰۰ ppm متیل‌اورانژ تهیه شد و جذب محلول‌های تهیه شده توسط دستگاه UV-Vis در طول موج ماکزیمم جذب متیل‌اورانژ (۴۶۵ nm) قرائت شد. با رسم نمودار جذب-غلظت، بهترین معادله خط برای به دست آوردن غلظت‌های مجهول به دست آمد.

طراحی آزمایش

برای مطالعه پارامترهای تاثیرگذار بر حذف آلاینده رنگی متیل‌اورانژ، شامل pH، مقدار جاذب، غلظت اولیه آلاینده، دما و زمان تماس از نرم‌افزار طراحی آزمایش مدل مرکب مرکزی، روش سطح پاسخ استفاده شد (۲۵). برای هر ۵ پارامتر اشاره شده و ۵ سطح نیز توسط نرم‌افزار انتخاب شد و مقادیر α (تعیین کننده فاصله بین سطوح) مقدار ۲ در نظر گرفته شد. سطوح پایین و سطوح بالا برای هر پارامتر به ترتیب -۲ و +۲ تعیین شد.

براساس سطوح ارائه شده ۵۰ آزمایش به وسیله نرم‌افزار طراحی آزمایش و به کمک روش سطح پاسخ (RSM) برای به دست آوردن پارامترهای بهینه (pH، مقدار جاذب، غلظت اولیه جذب شونده، دما و زمان تماس) جذب متیل‌اورانژ توسط نانومزوپور SBA-16 طراحی شد (جدول ۱). آزمایش‌ها در حجم ۱۰۰ mL از محلول متیل‌اورانژ با غلظت مشخص انجام شد. در هر آزمایش، تنظیم pH مورد نظر با افزودن اسید کلریدریک و

نانوکامپوزیت، مقداری از محلول روی نانوکامپوزیت را برداشته و سانتریفیوژ شد. جذب محلول شفاف حاصل با استفاده از دستگاه UV-Vis در طول موج ۴۶۵ nm قرائت گردید.

سود ۰/۰۱ M صورت گرفت. با در نظر گرفتن مقادیر متغیرها در هر آزمایش محلول مورد نظر توسط همزن مغناطیسی هم زده شد. پس از گذشت مدت زمان مشخص و تهنشینی

جدول ۱- آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار DOE

| Run | زمان تماس (min) | دما (°C) | غلظت اولیه متیل اورانژ (ppm) | مقدار جاذب (g) | pH | درصد حذف |
|-----|-----------------|----------|------------------------------|----------------|----|----------|
| ۱ | ۵۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۵۰/۵۰ |
| ۲ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۱۰ | ۴۹/۷۵ |
| ۳ | ۳۵ | ۳۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۵/۲۵ |
| ۴ | ۵۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۸۹/۵۰ |
| ۵ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۱ | ۷ | ۵۰/۰۰ |
| ۶ | ۳۵ | ۷۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۵/۵۰ |
| ۷ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۸/۷۵ |
| ۸ | ۵۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۹۰/۵۰ |
| ۹ | ۵۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۹۹/۵۰ |
| ۱۰ | ۲۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۸۶/۰۰ |
| ۱۱ | ۵۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۸۸/۷۵ |
| ۱۲ | ۵۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۵۲/۳۰ |
| ۱۳ | ۵۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۹۹/۷۵ |
| ۱۴ | ۵۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۷۸/۵۰ |
| ۱۵ | ۳۵ | ۷۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۹/۰۰ |
| ۱۶ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۴ | ۸۸/۲۵ |
| ۱۷ | ۲۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۹۷/۵۰ |
| ۱۸ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۸/۷۵ |
| ۱۹ | ۲۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۸۴/۷۵ |
| ۲۰ | ۵۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۸۷/۵۰ |
| ۲۱ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۹/۵۰ |
| ۲۲ | ۳۵ | ۵۰ | ۱۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۶۹/۷۵ |
| ۲۳ | ۲۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۳۹/۵۰ |
| ۲۴ | ۵۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۴۴/۲۵ |
| ۲۵ | ۳۵ | ۵۰ | ۵۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۹/۲۵ |
| ۲۶ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۶۰/۱۰ |
| ۲۷ | ۵۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۵۶/۵۰ |
| ۲۸ | ۲۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۷۲/۵۰ |
| ۲۹ | ۲۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۷۵/۰۰ |
| ۳۰ | ۲۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۴۸/۷۵ |
| ۳۱ | ۵۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۴۸/۶۰ |
| ۳۲ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۵ | ۷ | ۵۹/۸۰ |

ادامه جدول ۱- آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار DOE

| Run | زمان تماس (min) | دما (°C) | غلظت اولیه متیل اورانژ (ppm) | مقدار جاذب (g) | pH | درصد حذف |
|-----|-----------------|----------|------------------------------|----------------|----|----------|
| ۳۳ | ۲۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۴۵/۲۵ |
| ۳۴ | ۲۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۸۲/۵۰ |
| ۳۵ | ۵۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۴۲/۲۵ |
| ۳۶ | ۵۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۴ | ۸۰/۰۰ |
| ۳۷ | ۲۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۹۸/۰۰ |
| ۳۸ | ۵۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۴۳/۵۰ |
| ۳۹ | ۲۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۱ | ۱۰ | ۳۸/۰۰ |
| ۴۰ | ۲۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۴ | ۸۵/۵۰ |
| ۴۱ | ۲۰ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۹/۰۰ |
| ۴۲ | ۲۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۵۵/۵۰ |
| ۴۳ | ۵۰ | ۷۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۵۷/۷۵ |
| ۴۴ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۹/۵ |
| ۴۵ | ۲۰ | ۷۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۴۷/۰۰ |
| ۴۶ | ۲۰ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۵۶/۵۰ |
| ۴۷ | ۲۰ | ۳۰ | ۵۰ | ۰/۰۵ | ۱۰ | ۴۸/۱۰ |
| ۴۸ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۸/۷۵ |
| ۴۹ | ۳۵ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۵۹/۵۰ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷ | ۶۱/۲۵ |

یافته‌ها

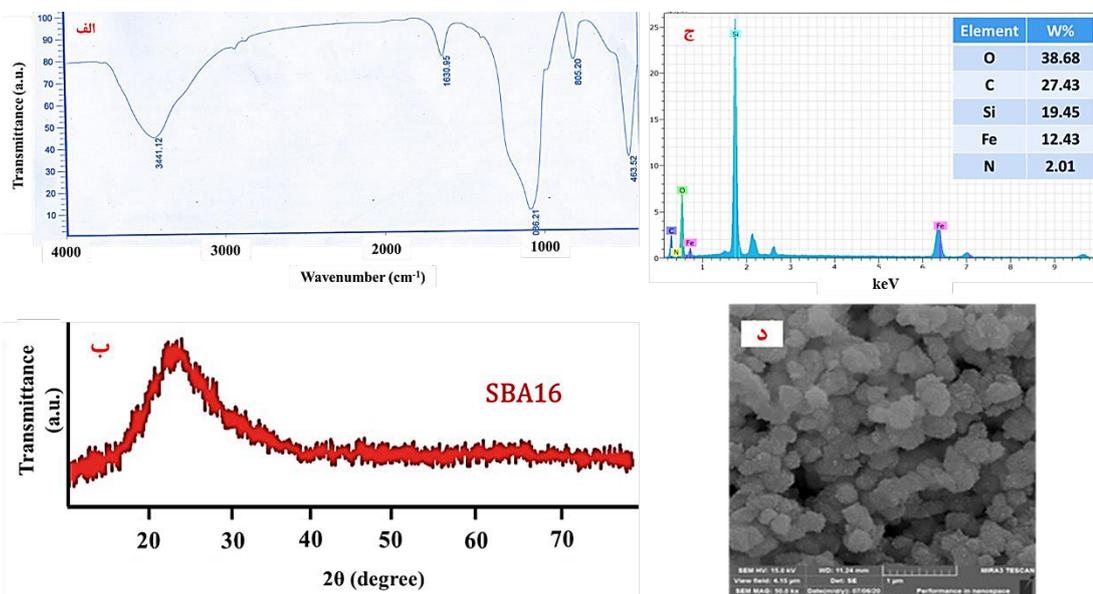
– شناسایی و مشخصه‌یابی نانوسیلیکات SBA-16

شکل ۱-الف طیف FTIR مربوط به نانومزوپور SBA-16 را نشان می‌دهد. یک پیک گسترده در محدوده $3441/12\text{ cm}^{-1}$ مرتبط با ارتعاش کششی متقارن باند O-H مربوط به گروه‌های سیلانول Si-OH مشاهده می‌شود. همچنین پیک مشاهده شده در ناحیه $1630/95\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی و خمشی مولکول‌های آب جذب شده در سطح SBA-16 هست. پیک‌های $463/52\text{ cm}^{-1}$ ، $805/2\text{ cm}^{-1}$ و $1086/21\text{ cm}^{-1}$ به ترتیب مربوط به ارتعاشات خمشی، کششی متقارن و نامتقارن Si-O-Si می‌باشند. اطلاعات بالا تایید می‌کند که ماده سنتز شده یک مزوپور سیلیکاتی است (۲۶-۲۸). الگوی پراش اشعه

ایکس برای SBA-16 در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود. در طیف XRD یک پیک قوی در حدود $2\theta = 24^\circ$ برای SBA-16 خالص مشاهده شد که مربوط به بازتاب صفحه کریستالی d_{100} بوده و بیانگر ساختار مکعب با گروه فضایی Im3m است. این پیک شاخص اصلی برای شناسایی SBA-16 است. همچنین دو پیک ضعیف‌تر در زاویه پراش بالاتر مربوط به بازتاب صفحات d_{200} و d_{211} حضور دارد که نشان می‌دهد SBA-16 از نظم ساختاری بالایی برخوردار است (۲۹، ۳۰). در شکل ۱-ج آنالیز EDAX مربوط به SBA-16 مشاهده می‌شود. از این آنالیز برای شناسایی عناصر تشکیل دهنده مواد استفاده می‌شود. همانطور که مشخص است سیلیس نسبت به سایر عناصر تشکیل دهنده دارای بلندترین پیک است که تایید

نمونه سنتز شده SBA-16 دارای مورفولوژی کروی و همگن است. همچنین اندازه حفرات در محدوده ۲-۵۰ nm است که اثبات می‌کند ماده سنتز شده یک مزوحفره است (۳۱).

می‌کند SBA-16 یک ماده سیلیکاتی است. شکل ۱-د تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح نمونه سنتز شده SBA-16 را نشان می‌دهد که می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۱- الف) طیف FTIR، ب) طیف XRD، ج) آنالیز EDAX و د) تصویر SEM مربوط به نانومزوپور SBA-16

موثر بر حذف آلاینده متیل اورانژ (pH)، مقدار جاذب، غلظت اولیه جذب شونده، دما و زمان تماس) و تاثیر متقابل آنها بر اساس آنالیز واریانس (ANOVA) پرداخته شد. براساس نتایج به دست آمده (جدول ۲) همه متغیرها در حالت خطی معنادار بوده و مقادیر احتمال p کمتر از ۰/۰۵ می‌باشند. ضرایب مربوط به هر پارامتر بیانگر میزان تاثیر آن پارامتر در حذف متیل اورانژ است. طبق نتایج بیشترین ضریب مربوط به pH (۱۵۲۹۲/۲۷) و کمترین ضریب مربوط به دما (۲/۲۵) است. همچنین ضرایب مربوط به اثر متقابل پارامترها نشان می‌دهد که دو عامل pH و مقدار جاذب (۲۹/۲۶) بیشترین تاثیر متقابل را با هم دارند و دو عامل pH و دما (۱/۳۲) کمترین تاثیر را بر روی هم دارند.

آنالیز آماری نتایج آزمایش‌ها

آنالیز آماری برای تعیین مناسب‌ترین مدل که تطابق بیشتری با پاسخ‌های به دست آمده داشته باشد مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور ۴ مدل خطی، برهمکنشی، درجه دوم و درجه سوم توسط نرم‌افزار به کار گرفته شد. مناسب‌ترین مدل بر مبنای مقادیر p و ضرایب رگرسیونی انتخاب می‌گردد. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل درجه دوم که دارای مقدار p کمتر از ۰/۰۰۰۱) و بیشترین مقدار رگرسیون (۰/۹۹۷۸) است به عنوان مناسب‌ترین مدل پیشنهاد شده است که بر اساس مقادیر آن صحت مدل پیشنهادی مورد تایید است. در ادامه بر اساس مدل پیشنهادی نرم‌افزار، به بررسی ۵ پارامتر

جدول ۲- نتایج مربوط به آنالیز واریانس (ANOVA) حذف رنگدانه متیل اورانژ توسط جاذب SBA-16

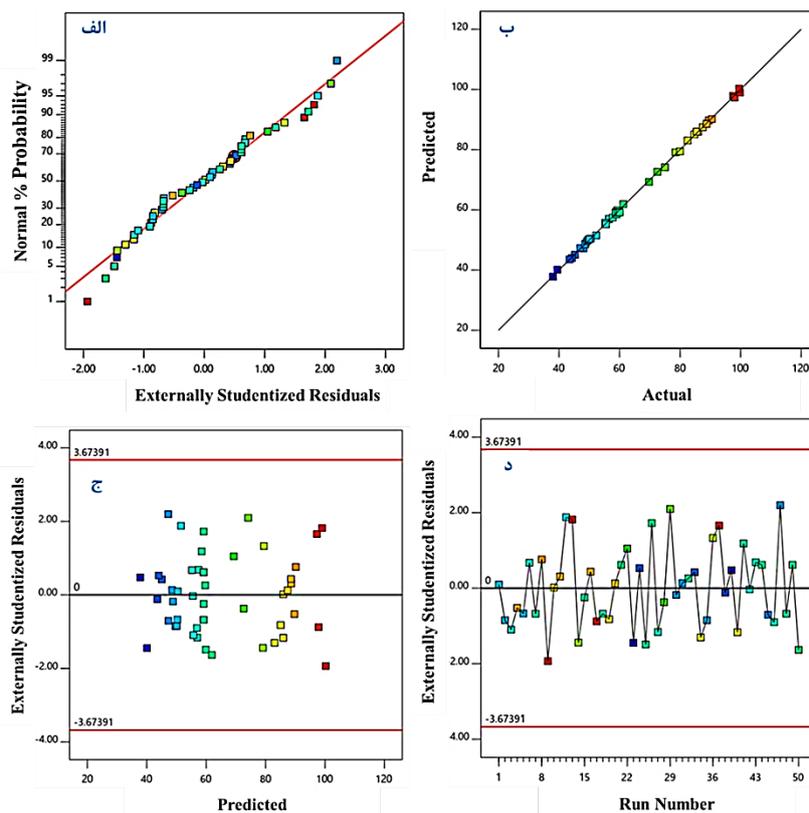
| Source | Sum of Square | df | Mean Square | f | p Prob>f | |
|----------------------|---------------|----|-------------|----------|----------|-----------------|
| Model | ۱۵۲۹۲/۲۷ | ۲۰ | ۷۶۴/۶۱ | ۲۱۵۷/۱۳ | <۰/۰۰۰۱ | significant |
| A-pH | ۱۲۵۶۰/۶۵ | ۱ | ۱۲۵۶۰/۶۵ | ۳۵۴۳۶/۲۲ | <۰/۰۰۰۱ | |
| B-abs. dose | ۷۵۰/۱۲ | ۱ | ۷۵۰/۱۲ | ۲۱۱۶/۲۵ | <۰/۰۰۰۱ | |
| C-ini. cons. absorb. | ۷۵۳/۸۸ | ۱ | ۷۵۳/۸۸ | ۲۱۲۶/۸۶ | <۰/۰۰۰۱ | |
| D-temp. | ۲/۲۵ | ۱ | ۲/۲۵ | ۶/۳۵ | ۰/۰۱۷۵ | |
| E-cont. time | ۱۰۰/۸۳ | ۱ | ۱۰۰/۸۳ | ۲۸۴/۴۵ | <۰/۰۰۰۱ | |
| AB | ۲۹/۲۶ | ۱ | ۲۹/۲۶ | ۸۲/۵۵ | <۰/۰۰۰۱ | |
| AC | ۱۹/۳۸ | ۱ | ۱۹/۳۸ | ۵۴/۶۶ | <۰/۰۰۰۱ | |
| AD | ۱/۳۲ | ۱ | ۱/۳۲ | ۳/۷۲ | ۰/۰۶۳۴ | |
| AE | ۲/۱۰ | ۱ | ۲/۱۰ | ۵/۹۳ | ۰/۰۲۱۳ | |
| BC | ۱/۷۶ | ۱ | ۱/۷۶ | ۴/۹۶ | ۰/۰۳۳۹ | |
| BD | ۱۱/۴۰ | ۱ | ۱۱/۴۰ | ۳۲/۱۶ | <۰/۰۰۰۱ | |
| BE | ۱۳/۵۲ | ۱ | ۱۳/۵۲ | ۳۸/۱۴ | <۰/۰۰۰۱ | |
| CD | ۴/۲۰ | ۱ | ۴/۲۰ | ۱۱/۸۶ | ۰/۰۰۱۸ | |
| CE | ۲/۹۴ | ۱ | ۲/۹۴ | ۸/۳۰ | ۰/۰۰۷۴ | |
| DE | ۶/۷۵ | ۱ | ۶/۷۵ | ۱۹/۰۵ | ۰/۰۰۰۱ | |
| A ² | ۲۵۷/۱۶ | ۱ | ۲۵۷/۱۶ | ۷۲۵/۵۰ | <۰/۰۰۰۱ | |
| B ² | ۴۲/۶۷ | ۱ | ۴۲/۶۷ | ۱۲۰/۳۷ | <۰/۰۰۰۱ | |
| C ² | ۷۳/۳۸ | ۱ | ۷۳/۳۸ | ۲۰۷/۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | |
| D ² | ۳۳/۴۶ | ۱ | ۳۳/۴۶ | ۹۴/۴۱ | <۰/۰۰۰۱ | |
| E ² | ۲/۸۴ | ۱ | ۲/۸۴ | ۸/۰۱ | ۰/۰۰۸۳ | |
| Residual | ۱۰/۲۸ | ۲۹ | ۰/۳۵۴۵ | | | |
| Lack of Fit | ۸/۵۶ | ۲۲ | ۰/۳۸۹۱ | ۱/۵۸ | ۰/۲۷۵۰ | not significant |
| Pure Error | ۱/۷۲ | ۷ | ۰/۲۴۵۷ | | | |
| Cor Total | ۱۵۳۰۲/۵۵ | ۴۹ | | | | |

که توسط مدل پیش‌بینی نشده است، استفاده می‌شود. با توجه به نمودار به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده از تناسب خوبی برخوردار هستند و مقادیر نزدیک به یکدیگر می‌باشند که بر روی خط مستقیمی متمرکز شده‌اند. از نمودار به دست آمده نیز می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهاد شده برای پیش‌بینی پاسخ‌ها مناسب است. در نمودار ۱-ج، مقدار مانده‌ها در برابر مقدار پیش‌بینی شده مدل آورده شده است. این

نمودار احتمال نرمال نشان می‌دهد که مقادیر مانده چگونه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. نمودار نرمال در ۱-الف نشان می‌دهد که همه پاسخ‌ها روی خط برازش متمرکز شده‌اند که می‌توان نتیجه گرفت که داده‌ها از توزیع نرمالی برخوردار هستند و با مدل در نظر گرفته شده تطابق بالایی دارند. نمودار ۱-ب، مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. از این نمودار برای کمک به تشخیص مقادیر یا گروهی از مقادیر

که مبین مقدار انحراف معیار مقدار واقعی از مقدار پیش‌بینی شده، پس از حذف یک نقطه است. در این نمودار توزیع مربوط به پاسخ‌های ۵۰ آزمایش انجام شده قابل مشاهده است. با توجه به اینکه تمامی پاسخ‌ها در محدوده اطمینان تعریف شده (۴- تا ۴+) قرار گرفته اند، همبستگی مدل با پاسخ‌های به دست آمده قابل تایید است.

نمودار مقدار مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه محدوده اطمینان ۳- تا ۳+ تعریف شده است که تمامی پاسخ‌ها در این محدوده قرار گرفته‌اند. همچنین پراکندگی تصادفی پاسخ‌ها قابل مشاهده است. می‌توان نتیجه گرفت که مدل قابلیت پیش‌بینی مقادیر پاسخ‌ها را دارد. نمودار ۱-۵، مقادیر باقی‌مانده استاندارد در مقابل مقادیر واقعی مدل را نشان می‌دهد



نمودار ۱- نمودارهای آماری بررسی صحت داده‌ها (الف) نمودار نرمال باقیمانده‌ها، (ب) نمودار مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده، (ج) نمودار مقادیر مانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی شده و (د) نمودار مقادیر مانده استاندارد در مقابل پاسخ‌ها

بالتر تاثیر بیشتری بر میزان حذف دارد و ضرایب با علامت مثبت و منفی به ترتیب تاثیر مستقیم و عکس یک پارامتر را بر روی میزان کمی پاسخ مدل دارند. معادله ۱ مربوط به تاثیر عوامل مختلف را بر میزان حذف متیل‌اورانژ توسط SBA-16 را نشان می‌دهد.

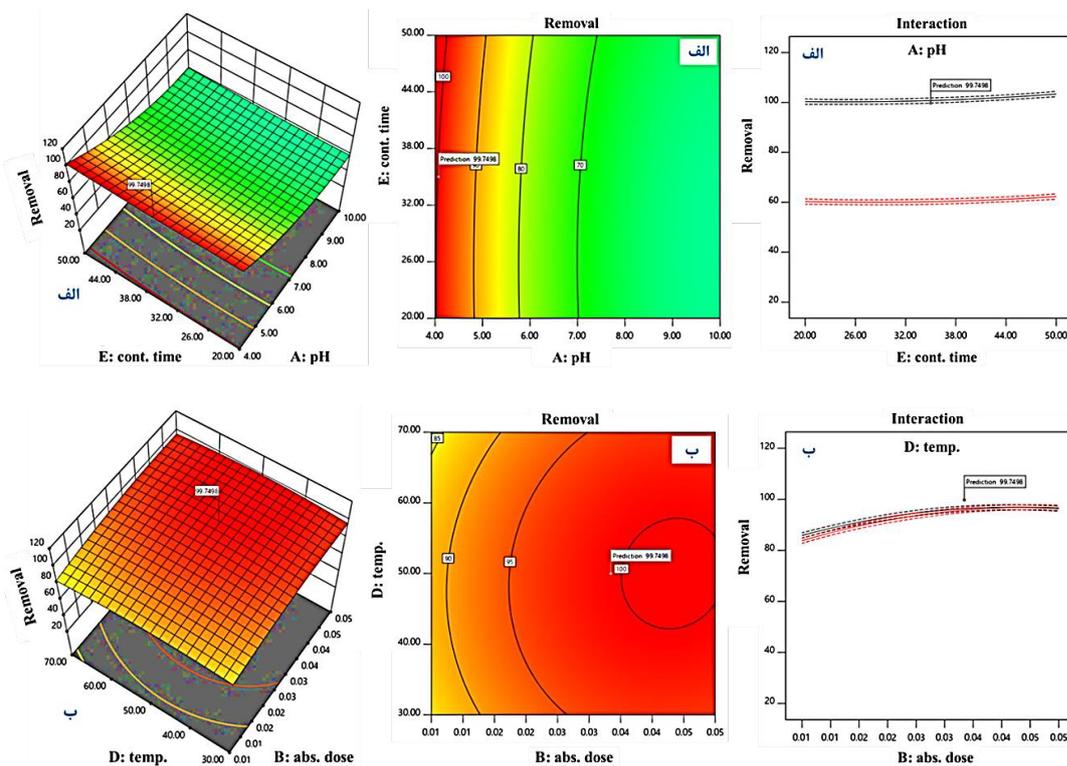
پس از مشخص شدن بهترین مدل پیشنهاد شده و تایید صحت مدل و کفایت آماری آن، نرم افزار معادله‌ای را پیشنهاد می‌دهد که از این معادله می‌توان برای پیش‌بینی پاسخ در مورد سطوح معین از هر عامل استفاده کرد. ضرایب مربوط به هر عامل میزان اثر آن عامل را در حذف آلاینده مشخص می‌کند. عامل با ضریب

۴/۷۱ و D (دما) با سهم مشارکت ۰/۲۶ با پاسخ نسبت عکس دارند.

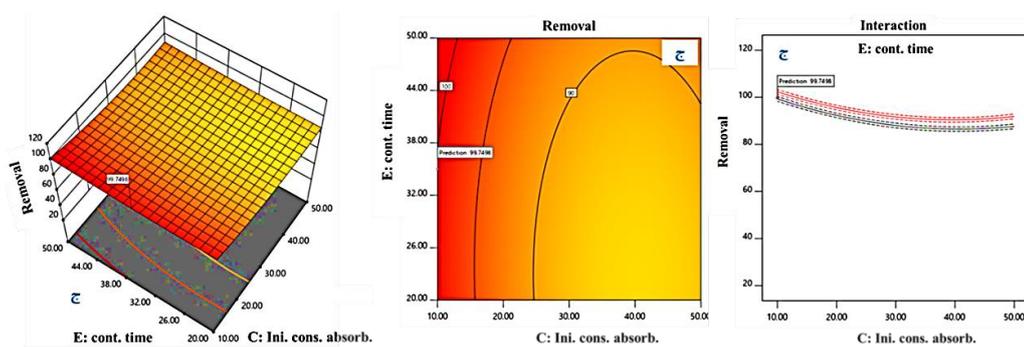
نمودار ۲ سطوح پاسخ و نمودارهای سه بعدی اثرات متقابل مربوط به برخی از عوامل موثر (نمودار ۲-الف اثر متقابل pH و زمان تماس، نمودار ۲-ب اثر متقابل مقدار جاذب و دما و نمودار ۲-ج اثر متقابل غلظت اولیه جذب شونده و زمان تماس) بر جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط جاذب SBA-16 را نشان می‌دهد. در هر یک از این نمودارها اثر متقابل دو عامل بر روی جذب بررسی شده است. خطوط غیرموازی نشان می‌دهد که بین دو جزء تعامل وجود دارد (۳۲). به عنوان مثال نمودار مربوط به زمان تماس و مقدار جاذب و یا زمان تماس با دما موازی نیستند و به عبارتی تعامل مثبت در حذف آلاینده دارند.

$$\begin{aligned} \text{Adsorption} = & +59.14 -19.22A +4.70B \\ & -4.71C -0.26D +1.72E -0.96AB +0.78AC \\ & -0.20AD -0.26AE -0.23BC +0.60BD \quad (1) \\ & -0.65BE +0.36CD +0.30CE +0.46DE \\ & +10.20A^2 -4.15B^2 +5.45C^2 -3.68D^2 \\ & +1.07E^2 \end{aligned}$$

معادله ۱ نشان می‌دهد پارامترهای B (مقدار جاذب) با سهم مشارکت ۴/۷۰ و E (زمان تماس) با سهم مشارکت ۱/۷۲ با پاسخ نسبت مستقیم دارند و پارامترهای A (pH) با سهم مشارکت ۱۹/۲۲، C (غلظت اولیه جذب شونده) با سهم مشارکت



نمودار ۲- نمودار سه بعدی الف) اثر متقابل pH و زمان تماس، ب) اثر متقابل مقدار جاذب و دما و ج) اثر متقابل غلظت اولیه جذب شونده و زمان تماس بر جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط جاذب SBA-16



ادامه نمودار ۲- نمودار سه بعدی الف) اثر متقابل pH و زمان تماس، ب) اثر متقابل مقدار جاذب و دما و ج) اثر متقابل غلظت اولیه جاذب شونده و زمان تماس بر جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط جاذب SBA-16

به هر سه ایزوترم و ضریب رگرسیون (R^2) در دمای بهینه (50°C) محاسبه شدند. نتایج جدول ۳ و نمودار ۳ نشان می‌دهد که مدل لانگمویر مناسب‌تر از مدل‌های فروندلیچ و تمکین است که تایید جذب فیزیکی متیل اورانژ بر روی جاذب SBA-16 است (۳۴).

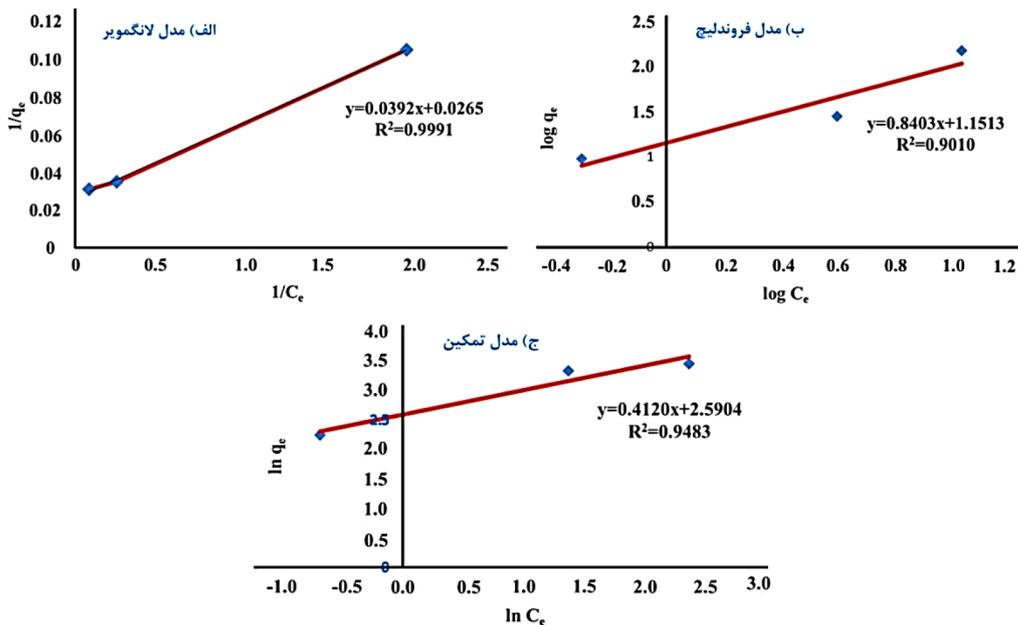
ایزوترم جذب ایزوترم جذب یک رابطه ریاضی است که مقدار تعادل ماده جذب شده فیزیکی یا شیمیایی روی سطح یک جامد را بیان می‌کند. در این تحقیق سه ایزوترم لانگمویر، فروندلیچ و تمکین در شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفت (۳۳). ثابت‌های مربوط

جدول ۳- پارامترهای لانگمویر، فروندلیچ و تمکین مربوط به جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط نانومزوپور SBA-16

| ۵۰ ppm | ۳۰ ppm | ۱۰ ppm | پارامترهای مدل | مدل ایزوترم |
|-----------------|--------|--|----------------|--------------|
| ۱۱/۰ | ۴/۰ | ۰/۵ | C_e (ppm) | لانگمویر |
| ۳۲/۰ | ۲۸/۰ | ۹/۵ | q_e | |
| ۰/۰۳۱ | ۰/۰۳۵ | ۰/۱۰۵ | $1/q_e$ | |
| ۰/۰۸۵ | ۰/۲۵۰ | ۲/۰۰۰ | $1/C_e$ | |
| $q_{max}=37/73$ | | $K(L/mg)=0/77$ | $R^2=0/9991$ | |
| ۱۱/۰ | ۴/۰ | ۰/۵ | C_e (ppm) | فروندلیچ |
| ۳۲/۰ | ۲۸/۰ | ۹/۵ | q_e | |
| ۲/۱۷ | ۱/۴۴ | ۰/۹۷ | $\log q_e$ | |
| ۱/۰۴ | ۰/۶۰ | -۰/۳۰ | $\log C_e$ | |
| $n=1/19$ | | $k_F(mg^{-1(1/n)}L^{1/ng^{-1}})=14/16$ | | $R^2=0/9010$ |

ادامه جدول ۳- پارامترهای لانگمویر، فروندلیچ و تمکین مربوط به جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط نانومزوپور SBA-16

| ۵۰ ppm | ۳۰ ppm | ۱۰ ppm | پارامترهای مدل | مدل ایزوترم |
|-----------|--------|------------|----------------|-------------|
| ۱۱/۰ | ۴/۰ | ۰/۵ | C_e (ppm) | |
| ۳۲/۰ | ۲۸/۰ | ۹/۵ | q_e | |
| ۳/۴۶ | ۳/۳۳ | ۲/۲۵ | $\ln q_e$ | تمکین |
| ۲/۳۹ | ۱/۳۸ | -۰/۶۹ | $\ln C_e$ | |
| $B=۰/۴۱۲$ | | $K_T=۱/۸۳$ | $R^2=۰/۹۴۸۳$ | |



نمودار ۳- نمودارهای الف) لانگمویر، ب) فروندلیچ و ج) تمکین در شرایط بهینه (pH=۴/۰۷، دمای ۵۰ °C، زمان تماس ۳۵ min، غلظت اولیه جذب شونده ۱۰ ppm و مقدار جاذب ۰/۰۴ g) مربوط به جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط نانومزوپور SBA-16

ترمودینامیک جذب

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (۳)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ \quad (۴)$$

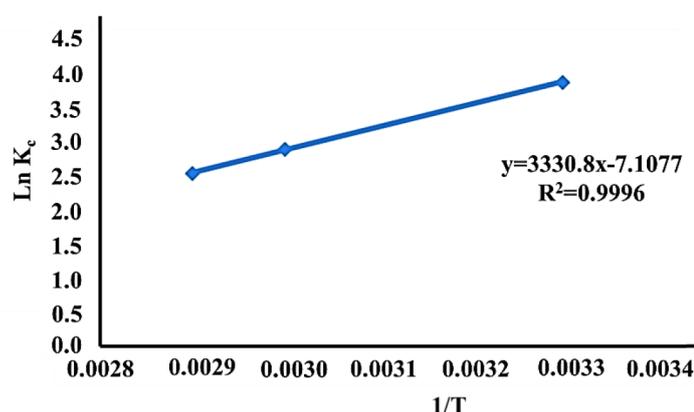
ΔH° ، ΔS° ، ΔG° و K_c به ترتیب آنتالپی استاندارد، آنتروپی استاندارد، انرژی آزاد گیبس استاندارد و ثابت تعادل جذب می‌باشند.

با استفاده از مقادیر q_e و C_e توابع ترمودینامیکی مربوط به جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط جاذب SBA-16 در دماهای ۳۰۳، ۳۲۳ و ۳۴۳ K تحت شرایط بهینه محاسبه شدند (نمودار ۴ و جدول ۴). از معادلات ۲ تا ۴ برای انجام محاسبات استفاده شد.

$$\ln K_c = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (۲)$$

جدول ۴- پارامترهای ترمودینامیکی برای جذب رنگدانه متیل اورانژ توسط نانومزوپور SBA-16

| Temp. (K) | ln K _c | ΔH° (Kj. mol ⁻¹) | ΔS° (Kj. mol ⁻¹) | ΔG° (Kj. mol ⁻¹) | R ² |
|-----------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| ۳۰۳ | ۳/۸۸ | | | -۹/۸۱ | |
| ۳۲۳ | ۲/۹۰ | -۲۷/۶۹ | -۰/۰۵۹ | -۸/۶۳ | ۰/۹۹۹۶ |
| ۳۴۳ | ۲/۵۴ | | | -۷/۴۵ | |



نمودار ۴- نمودار ln K_c نسبت $\frac{1}{T}$ به برای جذب رنگدانه متیل اورانژ در شرایط بهینه (pH=۴/۰۷، زمان تماس ۳۵ min، غلظت اولیه جذب شونده ۱۰ ppm و مقدار جاذب ۰/۰۴ g) توسط نانومزوپور SBA-16

بحث

یکی دیگر از عوامل موثر بر حذف رنگدانه متیل اورانژ توسط جاذب، اثر مقدار جاذب در محلول‌های آبی است که در این تحقیق در محدوده ۰/۰۲-۰/۰۵ g مورد بررسی قرار گرفت تا مقدار جاذب بهینه آن به دست آید زیرا اضافه کردن بیش از حد جاذب نه تنها از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست بلکه زمان اختلاط محلول و جاذب را نیز طولانی‌تر می‌کند. نتایج به دست آمده، نقطه بهینه مقدار جاذب را ۰/۰۴ g نشان می‌دهد. افزایش مقدار جاذب تاثیر مثبتی بر عملکرد جاذب دارد و افزایش آن تا حدی باعث افزایش مقدار جذب می‌شود و پس از آن به مقدار ثابتی می‌رسد که علت آن را می‌توان به جذب شدن تمام مولکول‌های جذب شونده (رنگدانه متیل اورانژ) موجود در محلول یا اشباع شدن حفرات سطح

به منظور بررسی اثر pH در این فرایند، مقادیر pH در بازه ۲-۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش pH جذب کاهش می‌یابد. بیشینه جذب در pH برابر ۴/۰۷ اتفاق افتاده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش pH منجر به کاهش راندمان حذف آلاینده می‌شود. در pH پایین به دلیل وجود نیروهای جاذبه الکترواستاتیک، برهمکنش متیل اورانژ و جاذب SBA-16 زیاد است، بنابراین بازده حذف آلاینده در pH پایین، زیاد است. در pH‌های پایین، یون‌های H⁺ بر روی مکان‌های جاذب غلبه کرده و سطح جاذب مثبت‌تر می‌شود و با توجه به سطح منفی‌تر آلاینده، میزان جذب آن توسط SBA-16 افزایش می‌یابد (۳۵).

جاذب نسبت داد (۳۶).

سنتز شد. مشخصات نانوکامپوزیت تهیه شده با استفاده از آنالیزهای مختلف بررسی شد و نتایج حاصل از آنالیزهای به کار رفته نشان داد که تهیه نانوسیلیکات SBA-16 موفقیت‌آمیز بوده است. از جاذب تهیه شده جهت حذف رنگدانه متیل‌اورانژ از محلول‌های آبی استفاده شد. برای تعیین شرایط بهینه فرایند و دستیابی به حداکثر بازده، اثر عوامل دما، زمان تماس، غلظت جاذب شونده، مقدار جاذب و pH با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و مدل طراحی مرکب مرکزی (CCD) توسط نرم‌افزار (DOE) بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که $pH=4/07$ ، دمای $50^{\circ}C$ ، زمان تماس 35 min ، غلظت اولیه جاذب 10 ppm و مقدار جاذب $0/04\text{ g}$ بهترین شرایط برای حذف متیل‌اورانژ از محیط آبی بوده است. در این شرایط بهینه، نرم‌افزار طراحی آزمایش درصد حذف آلاینده متیل‌اورانژ را توسط جاذب SBA-16 برابر $99/75$ درصد پیش‌بینی نمود که مقدار تجربی به دست آمده $98/60$ درصد است که تطابق خوبی با مقدار پیش‌بینی دارد. همچنین ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین بررسی شدند و نتایج حاصل نشان داد که رفتار جذبی بیشتری مطابقت را با ایزوترم لانگمویر دارد. نتایج آزمایش‌های ترمودینامیکی نیز نشان داد که فرایند جاذب از نوع گرمازا و در دماهای پایین خود به خودی است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره) به خاطر حمایت در انجام این پژوهش، اعلام نمایند.

جهت بررسی اثر غلظت اولیه متیل‌اورانژ در فرایند جاذب سطحی توسط جاذب SBA-16 و به دست آوردن نقطه بهینه آن، غلظت‌های مختلفی از متیل‌اورانژ در بازه $10-50\text{ mg/L}$ مورد بررسی قرار گرفت. مقدار بهینه جاذب مربوط به غلظت 10 mg/L است. علت افزایش جاذب در غلظت‌های پایین‌تر می‌تواند این باشد که در غلظت‌های کم نسبت جاذب شونده (متیل‌اورانژ) با جاذب (SBA-16) افزایش یافته و مکان‌های فعال بیشتری در اختیار جاذب شونده قرار می‌گیرد و عملکرد فرایند جاذب افزایش می‌یابد (۳۷).

به منظور بررسی اثر دما بر فرایند حذف متیل‌اورانژ از محلول‌های آبی توسط جاذب SBA-16 و بهینه‌سازی آن، بازه $30-70^{\circ}C$ در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که در دمای $50^{\circ}C$ ، بیشینه جاذب رخ داده است. با کاهش دما سرعت نفوذ ذرات متیل‌اورانژ بر سطح جاذب SBA-16 کاهش یافته که علت آن را می‌توان به کاهش انرژی جنبشی یون‌های متیل‌اورانژ نسبت داد.

در نهایت عامل دیگری که می‌تواند بر درصد جاذب موثر باشد، زمان تماس است. اثر زمان تماس در بازه $20-50\text{ min}$ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج زمان تماس مطلوب برای جاذب 35 min بوده و افزایش درصد جاذب با زمان تماس، احتمالاً به خاطر فراهم شدن فرصت بیشتر برای انجام جاذب سطحی است.

با توجه به مقدار آنتالپی استاندارد (ΔH°) جاذب متیل‌اورانژ توسط جاذب SBA-16 فرایند جاذب گرمازا و جاذب از نوع جاذب سطحی فیزیکی است. همچنین، با توجه به مقادیر انرژی آزاد گیبس (ΔG°) می‌توان نتیجه گرفت که در دماهای پایین جاذب خود به خودی است و با افزایش دما به دلیل انرژی جنبشی مولکول‌های جاذب، عمل واجذب صورت می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوسیلیکات SBA-16 به روش غوطه‌وری

References

1. Matloubi Aghdam S, Haghghi M, Allahyari S, Yosefi L. Precipitation dispersion of various ratios of BiOI/BiOCl nanocomposite over g-C3N4 for promoted visible light nanophotocatalyst used in removal of acid orange from water. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2017;338(4):201-12.
2. Subramonian W, Wu TY, Chai SP. Synthesis, characterization, and antitumor activity of binuclear curcumin–metal (II) hydroxo complexes. *Medicinal Chemistry Research* 2017;23(4):1683-9.
3. Emad SE, Chaudhuri M. Comparison of different advanced oxidation processes for treatment of antibiotic aqueous solution. *Journal of Desalination*. 2010;256:43-7.
4. Riera-Torres M, Gutierrez MC. Colour removal of three reactive dyes by UV light exposure after electrochemical treatment. *Chemical Engineering Journal*. 2010;156(1):114-20.
5. Fang Z, Chen J, Qiu X, Cheng W, Zhu L. Effective removal of antibiotic metronidazole from water by nanoscale zerovalent iron particles. *Journal of Desalination*. 2011;268(13):60-7.
6. Fekri MH, Razavi Mehr M, Akbari-adergani B, Isanejad Mohamareh S, Hosseini M. Green synthesis of activated carbon/Fe3O4 nanocomposite from flaxseed, its application as adsorbent and antibacterial. *Chemical Papers*. 2022;76:6767-82.
7. Oliver AH, Voulvoulis N, John NL. Potential impact of pharmaceuticals on environmental health. *Bulletin of the World Health Organization*. 2003;81(10):768-9.
8. Sheikhi S, Aslani H, Dehghanzadeh R, Maryamabadi A. Efficiency of ferrate/peroxymonosulfate advanced oxidation process in removing chlorpyrifos pesticide from aqueous solution after pretreatment with ferric chloride coagulant. *Iranian Journal of Health & Environment*. 2022;15(1):87-102.(in Persian)
9. Fekri MH, Shahverdi V, Chegeni M, Razavi Mehr M, Abbastabar Ahangar H, Saffar A. Simultaneous photocatalytic degradation of cefixime and cefuroxime antibiotics using g-C3N4/NaBiO3 nanocomposite and optimization of effective parameters by response surface methodology. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2022;135: 1059-75
10. Rashtchi N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Goodarzi A, Lorestani B. Photocatalytic removal of amoxicillin from aqueous solution using magnetic graphene oxide functionalized with cerium dioxide nanocomposite. *Iranian Journal of Health & Environment*. 2022;15(2):307-20.(in Persian)
11. Jianming XZCZL. Comparison of metronidazole degradation by different advanced oxidation processes in low concentration aqueous solutions. *Chinese Journal of Environmental Engineering*. 2009;3:109-19.
12. Razavi Mehr M, Fekri MH, Omidali F, Eftekhari

- N, Akbari-adergani B. Removal of Chromium (VI) from Wastewater by Palm Kernel Shell-based a Green Method. *Journal of Chemical Health Risks*. 2019;9(1):75-86.
13. Fekri MH, Banimahd Keivani M, Razavi Mehr M, Akbari-adergani B. Effective Parameters on Removal of Rhodamine B from Colored Wastewater by Nano polyaniline/Sawdust Composite. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 2019;29 (177):166-79. (in Persian)
14. Chegeni M, Etemadpour S, Fekri MH. The perlite-calcium alginate-activated carbon composite as an efficient adsorbent for the removal of dyes from aqueous solution. *Physical Chemistry Research* 2021;9(1):1-16.
15. Dashti Khavidaki H, Fekri MH. Removing Thallium (I) Ion from Aqueous Solutions Using Modified ZnO Nanopowder. *Journal of Advances in Chemistry* 2015;11:3777-88.
16. Dashti Khavidaki H, Sarlak F, Fekri MH. Adsorption Characteristics of Amoxicillin on Activated Carbon from Eucalyptus Leave and Wheat Straw. *Journal of Applied Chemistry*. 2023.
17. Han R, Ding H, Xu Y, Zou W, Wang Y, Li Y, et al. Use of rice husk for the adsorption of Congo red from aqueous solution in column mode. *BioSource Technology*. 2008;99:2938-46.
18. Razavi Mehr M, Fekri MH, Mohammadi Shad F. Synthesis of activated carbon/zinc oxide nanocomposite from rapeseed plant waste by green chemistry method, evaluation of its performance in Methylene Blue pigment removal and optimization of influencing parameters using design expert. *Iranian Journal of Health & Environment*. 2021;14(2):191-204.(in Persian)
19. Manzano M, Vallet-Regí M. Mesoporous silica nanoparticles for drug delivery. *Advanced functional materials*. 2020;30(2):1902634.
20. Fekri MH, Soleymani S, Razavi Mehr M, Akbari-adergani B. Synthesis and characterization of mesoporous ZnO/SBA-16 nanocomposite: its efficiency as drug delivery system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022;591.
21. Seljak KB, Kocbek P, Gašperlin M. Mesoporous silica nanoparticles as delivery carriers: An overview of drug loading techniques. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2020;59.
22. Tsai CH, Chang WC, Saikia D, Wu CE, Kao HM. Functionalization of cubic mesoporous silica SBA-16 with carboxylic acid via one-pot synthesis route for effective removal of cationic dyes. *Journal of Hazardous Materials*. 2016;309:236-48.
23. Fekri MH, Saki F, Razavi Mehr M, Soleymani S. Preparation of SBA-16 Silicate Nanoabsorbent by Green Method from Reed Plant Stem, Using it to Remove Phenolphthalein Pollutant and Investigating Effective Factors by RSM Method. *Journal of Applied Chemistry*. 2023.
24. Zoqi MJ. Application of response surface methodology to optimize the ultraviolet/hydrogen peroxide process for the removal of Reactive Red 195 dye from aqueous solution. *Iranian Journal of Health & Environment*. 2021;14(3):427-46.(in Persian)

25. Sayadi K, Rahdar A, Hajinezhad MR, Nikazar S, Susan MA. Atorvastatin-loaded SBA-16 nanostructures: Synthesis, physical characterization, and biochemical alterations in hyperlipidemic rate. *Journal of Molecular Structure*. 2020;1202-127296.
26. Vatanpour V, Rabiee H, Farahani MHD, Masteri-Farahani M, Nikakan M. Preparation and characterization of novel nanoporous SBA-16-COOH embedded polysulfone ultrafiltration membrane for protein separation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020;156:240-50.
27. Palos-Barba V, Moreno-Martell A, Hernández-Morales V, Peza-Ledesma C, Rivera-Muñoz EM, Nava R, et al. SBA-16 Cage-Like Porous Material Modified with APTES as an Adsorbent for Pb²⁺ Ions Removal from Aqueous Solution. *Materials* 2020;13(4).
28. Gupta R, Gupta SK, Pathak DD. Selective adsorption of toxic heavy metal ions using guanine- functionalized mesoporous silica [SBA-16-g] from aqueous solution. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2019;288.
29. Madadi S, Charbonneau L, Bergeron JY, Ksliaguine S. Aerobic epoxidation of limonene using cobalt substituted mesoporous SBA-16 Part 1: Optimization via Response Surface Methodology (RSM). *Applied Catalysis B: Environmental*. 2020;260.
30. Bhuyan D, Saikia M, Saikia L. Magnetically recoverable Fe₃O₄@SBA-15: An improved catalyst for three component coupling reaction of aldehyde, amine and alkyne. *Catalysis Communications*. 2015;58:158-63.
31. Calignano F, Manfredi D, Ambrosio EP, Iuliano L, Fino P. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;67(9):2743-51.
32. Albayati TM, Salih IK, Alazzawi HF. Synthesis and characterization of a modified surface of SBA-15 mesoporous silica for a chloramphenicol drug delivery system. *Heliyon*. 2019;5(10):e02539.
33. Aregawi BH, Mengistie AA. Removal of Ni (II) from aqueous solution using leaf, bark and seed of *Moringa stenopetala* adsorbents. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*. 2013;27(1):35-47.
34. Muntean SG, Paska O, Coseri S, Simu GM, Grad ME, Iliu G. Evaluation of a functionalized copolymer as adsorbent on direct dyes removal process: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013;127(6):4409–21.
35. Abkenar S. Application of magnetic-modified Fe₃O₄ nanoparticles for removal of crystal violet from aqueous solution: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Applied Chemical Research*. 2016;10(1):65–74.
36. Muntean SG, Rădulescu Grad ME, Sfârloagă P. Dye adsorbed on copolymer, possible specific sorbent for metal ions removal. *RSC Advances*. 2014;4(52):27354–62.
37. Robati D, Mirza B, Rajabi M. Removal of

hazardous dyes-BR 12 and methyl orange using
graphene oxide as an adsorbent from aqueous phase
Chemical Engineering Journal. 2016;284:687–97.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Removal of methyl orange dye from aqueous solutions by SBA-16 nano mesopore and optimization of effective parameters using response surface method

Mohammad Hossein Fekri*, Samaneh Soleymani, Maryam Razavi Mehr, Fatemeh Saki

Department of Chemistry, Faculty of Basic Sciences, Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 20 April 2023
Revised: 12 July 2023
Accepted: 18 July 2023
Published: 17 September 2023

Keywords: Adsorption, Nano mesoporous SBA-16, Methyl orange color, Response surface method, Optimization

ABSTRACT

Background and Objective: Due to the presence of industrial pollutants in water sources, it is necessary to treat wastewater, especially colored wastewater. This study aims to treat wastewater containing methyl orange dye using nano mesopore SBA-16.

Materials and Methods: In this study, the effect of different parameters (pH, concentration of methyl orange, amount of adsorbent, temperature, and contact time) on the absorption of methyl orange by nanocomposite prepared with the help of Design of Experiment 7 software and Response Surface Method (RSM) was investigated.

Results: The maximum amount of pollutant removal by the adsorbent was obtained under optimal conditions of pH = 4.07, temperature 50 °C, contact time 35 minutes, initial concentration of adsorbent 10 mg/L, and amount of adsorbent 0.04 g. Also, the findings showed that the absorption behavior is most consistent with the Langmuir isotherm and the absorption process is exothermic and spontaneous at low temperatures.

Conclusion: In optimal conditions, the SBA-16 adsorbent was able to remove 98.60 % of methyl orange from the aqueous solution and the maximum adsorption capacity (q_{max}) for the removal of methyl orange pollutant was 37.73 mg/g. Considering the high potential of nano mesopore SBA-16 in removing methyl orange pigment, it can be considered a suitable candidate for removing colored pollutants and treating wastewater from textile factories.

*Corresponding Author:

m.h.fekri@abru.ac.ir

Please cite this article as: Fekri MH, Soleymani S, Razavi Mehr M, Saki F. Removal of methyl orange dye from aqueous solutions by SBA-16 nano mesopore and optimization of effective parameters using response surface method. Iranian Journal of Health and Environment. 2023;16(2):339-56.

