



Semnan University

Journal of Applied Chemistry

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>



Research Article

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

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

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

PAPER INFO

Article history:

Received: 13/Jan/2023

Revised: 01/Mar/2023

Accepted: 19/Mar/2023

Keywords:

Nano mesoporous SBA-16, Phenolphthalein pigment, reed stem, green method, experimental design

ABSTRACT

In this work, nanomesopore SBA-16 was prepared from reed plant stem by green method and used to remove Phenolphthalein pollutant. The effect of different parameters (pH, initial concentration of phenolphthalein, amount of SBA-16 adsorbent, temperature and contact time) on the amount of phenolphthalein absorption by the prepared adsorbent was investigated with the help of experiment design software. The results of the predicted experiments showed that the highest absorption of phenolphthalein was in the conditions of pH=4.01, temperature 44°C, contact time 20 min, initial concentration of adsorbent 13 mg/L and amount of adsorbent 0.05 g. can be seen. In optimal conditions, the prediction of the software was 100% removal of phenolphthalein from the water environment, which actually achieved a removal of 99.46%. Considering the high potential of nanomesopore SBA-16 in removing phenolphthalein pigment, it can be considered as a suitable candidate for removing colored pollutants and treating wastewater from textile factories.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2023.29594.2141>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

^{*}.Corresponding author: Assistant Professor of Physical Chemistry. E-mail address: m.h.fekri@abru.ac.ir

How to cite this article: Fekri, M. H., Saki, F., Razavi Mehr, M. & Soleymani, S. (2023). 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. *Applied Chemistry*, 18(68), 271-288. (in Persian)

تهیه نانوجاذب سیلیکاتی SBA-16 به روش سبز از ساقه گیاه نی، استفاده از آن

جهت حذف آلاینده فنل-فتالئین و بررسی عوامل موثر به روش RSM

محمدحسین فکری*، فاطمه ساکی، مریم رضوی مهر، سمانه سلیمانی

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

تاریخ دریافت: ۰۱/۱۰/۲۳

تاریخ تصحیح: ۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۰۱/۱۲/۲۸

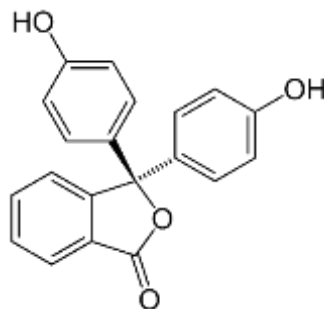
چکیده

در این کار، نانومزوپور SBA-16 از ساقه گیاه نی به روش سبز تهیه شد و برای حذف آلاینده فنل فتالئین استفاده گردید. اثر پارامترهای مختلف (pH) غلظت اولیه فنل فتالئین، مقدار جاذب SBA-16، دما و زمان تماس) در میزان جذب فنل فتالئین توسط جاذب تهیه شده، به کمک نرم‌افزار طراحی آزمایش بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های پیش‌بینی شده نشان داد که بالاترین جذب فنل فتالئین در شرایط $pH=4/01$ دمای $44^{\circ}C$ ، زمان تماس 20 min ، غلظت اولیه جذب شونده 13 mg/L و مقدار جاذب $0/05\text{ g}$ دیده می‌شود. در شرایط بهینه، پیش‌بینی نرم‌افزار حذف ۱۰۰ درصدی فنل فتالئین از محیط آبی بوده است که عملاً میزان حذف $99/46\%$ درصد به دست آمد. با توجه به پتانسیل بالای نانومزوپور SBA-16 در حذف رنگدانه فنل فتالئین، می‌تواند کاندیدای مناسبی در حذف آلاینده‌های رنگی و تصفیه فاضلاب‌های کارخانجات نساجی محسوب شود.

کلمات کلیدی: نانو مزوپور SBA-16، رنگدانه فنل فتالئین، ساقه نی، روش سبز، طراحی آزمایش.

۱- مقدمه

آلاینده‌های آلی پایدار، مانند داروها، محصولات مراقبت شخصی، آفت کش‌ها، متابولیت‌ها و رنگدانه‌ها اغلب در محیط‌های فاضلاب و آبریان به صورت گسترده وجود دارند. عمدتاً با توجه به این که این ترکیبات به سختی قابل تخریب هستند، بنابراین در تصفیه خانه‌های معمولی نمی‌توان آنها را کاملاً تصفیه و حذف کرد. این آلاینده‌ها می‌توانند اثرات منفی شدید بر انسان و محیط زیست ایجاد کنند و از این رو حذف آنها از نظر مدیریت زیست محیطی و سلامت بسیار مهم است [۱]. لذا به کارگیری روش‌های کارآمد و مقرون به صرفه جهت تصفیه و بازیابی فاضلاب‌های صنعتی بالاخص آلاینده‌های رنگی به منظور استفاده مجدد آنها در چرخه مصرف امری اجتناب‌ناپذیر است. 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. در میان انواع رنگدانه‌ها فنل فتالئین یکی از آلاینده‌های مهم است. فنل فتالئین در گذشته به عنوان ملین و ضد یبوست نیز استفاده می‌شد، اما به خاطر خواص کارسینوژن و سرطان‌زایی به‌طور کامل از فهرست تجویز حذف گردیده است [۲]. فنل فتالئین به‌طور عمده در شناسایی اسیدها و بازها کاربرد دارد. از ترکیبات آن با الکل و استفاده از آب اکسیژنه (پراکسید هیدروژن) در آزمایشگاه‌های تشخیص طبی و در بیمارستان برای تشخیص خون مخفی در مدفوع استفاده می‌گردد.

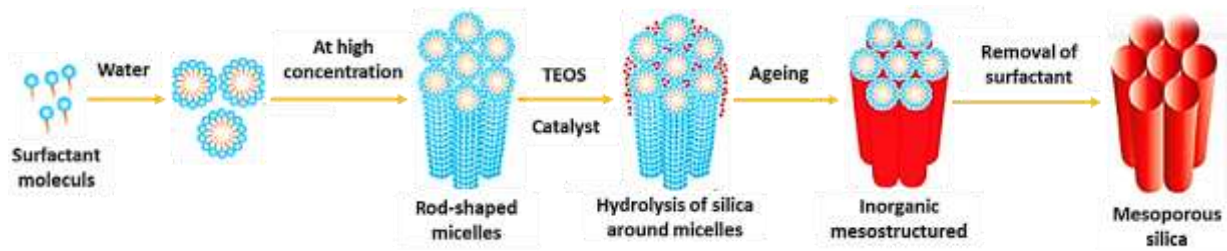


شماتیک ۱- ساختار شیمیایی فنل فتالتین

امروزه از روش‌های متنوعی مانند استفاده از پرتو فرابنفش [۳]، روش جذب سطحی [۴-۶]، روش کواگولاسیون و سایر روش‌های اکسیداسیون پیشرفته [۷ و ۸]، استفاده از فتوکاتالیست‌ها [۹]، استفاده از نانو فیلتراسیون [۱۰] و غیره برای حذف آلاینده‌ها استفاده می‌شود. دو روش عمده برای حذف آلاینده‌های آلی می‌توان به روش‌های اکسیداسیون شیمیایی و زیستی اشاره کرد. این دو روش به دلیل معایبی که دارند امروزه کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. روش اکسیداسیون شیمیایی هرچند باعث شکستن آلاینده‌ها می‌شود ولی روشی گران و پیچیده است و روش‌های زیستی هم دارای بازده کمی هستند. امروزه یکی از روش‌هایی که مورد توجه پژوهشگران برای حذف آلاینده‌ها قرار گرفته است روش جذب سطحی به کمک نانوجاذب‌ها می‌باشد [۱۱-۱۵]. این روش به دلایل مختلف از جمله طراحی آسان، ارزان بودن، غیرحساس بودن به آلاینده‌ها و ترکیبات سمی، عدم تولید محصولات جانبی و کارایی بسیار خوبی مناسب می‌باشد.

در فرآیند جذب سطحی انتخاب جاذب مناسب موضوع با اهمیتی است. یک دسته از جاذب‌های مهم که دارای ساختار مزوپور هستند خانواده SBA می‌باشند. از اعضای این خانواده می‌توان به SBA-1، SBA-2، SBA-8، SBA-11، SBA-15 و SBA-16 اشاره کرد، که از میان آنها SBA-15 و SBA-16 بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند [۱۶-۱۹]. این ترکیبات دارای دیواره سیلیکاتی و اندازه حفرات آنها بین ۴۰-۵۰ نانومتر متغیر است. همچنین مساحت سطح حدود ۶۰۰-۱۰۰۰ مترمربع بر گرم دارند. SBA-15 و SBA-16 در محیط اسیدی با استفاده از کوپلیمر سه قسمتی غیر یونی EO-PO-EO (پلی اتیلن اکسید-پلی پروپیلن اکسید) سنتز می‌شوند [۲۰]. مواد فعال به کار رفته در سنتز ترکیبات SBA ارزان، به آسانی جدا شده، غیرسمی، زیست

تخریب پذیر می باشند (شکل ۱). SBA-16 دارای ساختار سه بعدی مکعبی با گروه فضایی Im3m می باشد. SBA-16 به دلیل بالا بودن سطح موثر بالا و کانال های سه بعدی متصل به هم سبب انتقال جرم بالاتری می شود [۲۱].



شکل ۱- شماتیک کلی سنتز ترکیبات SBA

در این پژوهش، از نانوسیلیکات SBA-16 حاصل از ساقه گیاه نی در حذف آلاینده رنگی فنل فتالئین استفاده شد. پس از مشخصه یابی ساختار جاذب به کمک روش های FTIR، XRD، XRF، SEM و ... اثر ۵ فاکتور موثر در جذب فنل فتالئین (مقدار جاذب، غلظت اولیه آلاینده، زمان تماس، دما و pH) و شرایط بهینه جذب، توسط نرم افزار طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ بررسی شد. ایزوترم های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین بررسی شد. همچنین، توابع ترمودینامیکی و سینتیکی مربوط به جذب آلاینده فنل فتالئین توسط جاذب SBA-16 مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و معرف های مورد استفاده

ساقه گیاه نی، کوپلیمر پلورونیک f127 از شرکت سیگما آلدریج تهیه شد. HCl غلیظ، ۱-بوتانول و دی اکسید تیتانیوم از شرکت مرک تهیه شدند. رنگدانه فنل فتالئین، آب دو بار تقطیر شده.

۲-۲- دستگاه های مورد استفاده

ترازوی دیجیتالی (EJ 303)، دستگاه pH متر (ST 2100)، آون (Mettler)، همزن مغناطیسی (Hotplate Stirrer 81)، کوره الکتریکی (Shimadzu)، دستگاه پراش اشعه ایکس (STADIP)، دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (MIRA3-LMU)، دستگاه (Uv-Vis (DB20-UV Spectrophotometer) و دستگاه تراسونیک (D-78224)، دستگاه XRF.

۲-۳- استخراج سیلیس از ساقه گیاه نی

برای استخراج سیلیس از ساقه گیاه نی، پس از جمع آوری آنها را شست و شو داده تا به خوبی تمیز شود. سپس در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در آون خشک گردید. پس از خشک شدن، ساقه ها در هوای آزاد سوزانده شدند و به خاکستر تبدیل شدند. برای دستیابی به محصول با خلوص بالاتر، خاکستر تهیه شده را به مدت ۳ ساعت در اسید کلریدریک یک مولار خیسانده و صاف گردید. و سپس برای خنثی سازی pH چندین بار با آب فراوان شست و شو گردید. پس از فرایند خنثی سازی، خاکستر تهیه شده

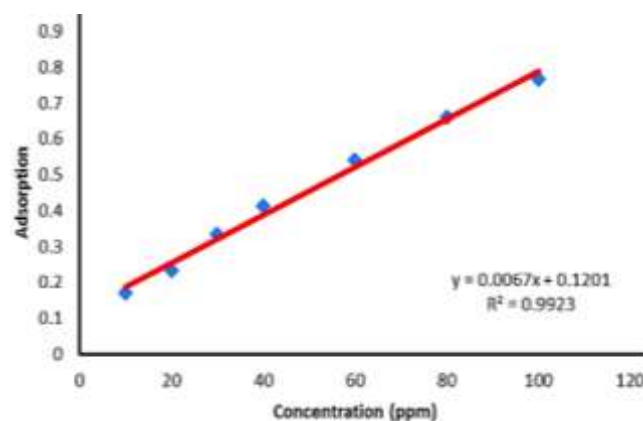
به مدت ۲۴ ساعت در یک آون با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. پس از آن برای عمل کلسیناسیون درون کوره با دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ ساعت قرار گرفت. برای استخراج سیلیس، ۵ گرم خاکستر کلسینه شده با ۱۰۰ میلی‌لیتر سود ۲ مولار به مدت ۲ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلسیوس رفلاکس گردید و مخلوط به دست آمده صاف شد. پسماند نیز با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۲ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلسیوس رفلاکس گردید و نمونه صاف گردید. محلول‌های زیر صافی به دست آمده از دو رفلاکس با هم مخلوط شدند و بعد از اینکه کاملاً خنک شد توسط اسید کلریدریک ۱ مولار خنثی شد تا نمونه ژل مانند به دست آید. شکل‌گیری ژل به مدت ۲۴ ساعت کامل شد. ژل به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس درون آون قرار گرفت.

۲-۴- سنتز SBA-16 به روش سبز از منبع سیلیس طبیعی

برای تهیه SBA-16 به روش سبز، ابتدا ۰/۶۹۷ گرم کوپلیمر پلورنیک F127 به عنوان قالب در ۳۳/۴۸ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲/۷۹ میلی‌لیتر اسید کلریدریک و ۲/۷۹ میلی‌لیتر بوتانول کاملاً حل شد. سپس ۱ گرم از سیلیس تهیه شده از ساقه گیاه نی در ظرفی جداگانه در ۱۱/۶ میلی‌لیتر سود ۲/۶۵ مولار حل شد و محلول به دست آمده تحت همزدن آرام به صورت قطره قطره به محلول اول افزوده شد. محلول حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در آون قرار گرفت تا خشک شود. رسوب حاصل چندین مرتبه با آب مقطر دوبار یونیزه شده شست و شو داده شد و مجدداً برای خشک شدن در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در آون قرار گرفت. در نهایت، برای فرایند کلسیناسیون و حذف قالب به مدت ۶ ساعت در درون کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفت.

۲-۵- تهیه محلول استوک فنل فتالین و رسم منحنی کالیبراسیون

محلول‌های با غلظت‌های مشخص (۱۰۰ - ۱۰ ppm) از محلول مادر با غلظت ۱۰۰۰ ppm فنل فتالین تهیه شد و جذب محلول‌های مورد نظر توسط دستگاه UV-Vis در طول موج ماکزیمم ۴۶۵ نانومتر قرائت شد. با رسم نمودار جذب-غلظت، بهترین معادله خط برای به دست آوردن غلظت‌های مجهول به دست آمد (شکل ۲).



شکل ۲- منحنی کالیبراسیون فنل فتالین

۲-۶- طراحی آزمایش

براساس سطوح ارائه شده ۵۰ آزمایش به وسیله نرم افزار طراحی آزمایش، 7 Design Experiment و به کمک روش سطح پاسخ، Response Surface Method (RSM) برای به دست آوردن پارامترهای بهینه (pH، مقدار جاذب، غلظت اولیه جذب شونده، دما و زمان تماس) جذب فنل فتالئین توسط نانومزوپور SBA-16 طراحی شد (جدول ۱). آزمایشها در حجم ۱۰۰ میلی لیتری از محلول فنل فتالئین با غلظت مشخص انجام شد. در هر آزمایش، تنظیم pH مورد نظر با افزودن HCl و NaOH ۰/۰۱ مولار صورت گرفت. جذب نمونهها با استفاده از دستگاه UV-Vis در طول موج ۴۶۵ نانومتر قرائت گردید.

جدول ۱- آزمایشهای طراحی شده توسط نرم افزار DOE

| Run | pH | مقدار جاذب (g) | غلظت اولیه فنل فتالئین (ppm) | دما (°C) | زمان تماس (min) | درصد حذف |
|-----|-------|----------------|------------------------------|----------|-----------------|----------|
| ۱ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۵۱/۵۰ |
| ۲ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۵۲/۷۵ |
| ۳ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۵۶/۲۵ |
| ۴ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۳۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۹۱/۵۰ |
| ۵ | ۷/۰۰ | ۰/۰۱ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۵۷/۰۰ |
| ۶ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۵۵/۵۰ |
| ۷ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۰/۷۵ |
| ۸ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۹۱/۵۰ |
| ۹ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۱۰۰ |
| ۱۰ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۱۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۸۸/۰۰ |
| ۱۱ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۹۰/۷۵ |
| ۱۲ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۱۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۵۴/۰۰ |
| ۱۳ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۹۹/۷۵ |
| ۱۴ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۸۱/۵۰ |
| ۱۵ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۱/۰۰ |
| ۱۶ | ۴/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۹۰/۷۵ |
| ۱۷ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۹۷/۵۰ |
| ۱۸ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۰/۷۵ |
| ۱۹ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۸۶/۷۵ |
| ۲۰ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۸۹/۵۰ |
| ۲۱ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۱/۵۰ |
| ۲۲ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۱۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۷۰/۷۵ |
| ۲۳ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۴۱/۵۰ |
| ۲۴ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۴۶/۲۵ |
| ۲۵ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۵۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۱/۲۵ |
| ۲۶ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۱/۰۰ |
| ۲۷ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۵۸/۵۰ |
| ۲۸ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۷۴/۵۰ |

| | | | | | | |
|----|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| ۲۹ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۷۷/۰۰ |
| ۳۰ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۱۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۵۰/۷۵ |
| ۳۱ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۵۰/۶۰ |
| ۳۲ | ۷/۰۰ | ۰/۰۵ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۵/۸۰ |
| ۳۳ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۴۷/۲۵ |
| ۳۴ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۸۴/۵۰ |
| ۳۵ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۵۱/۲۵ |
| ۳۶ | ۴/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۸۲/۰۰ |
| ۳۷ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۹۸/۰۰ |
| ۳۸ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۴۵/۵۰ |
| ۳۹ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۴۰/۰۰ |
| ۴۰ | ۴/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۸۷/۵۰ |
| ۴۱ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۵۹/۰۰ |
| ۴۲ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۵۷/۵۰ |
| ۴۳ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۵۸/۷۵ |
| ۴۴ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۱/۵۰ |
| ۴۵ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۷۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۴۹/۰۰ |
| ۴۶ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۱۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۵۸/۵۰ |
| ۴۷ | ۱۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۵۰/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ |
| ۴۸ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۰/۷۵ |
| ۴۹ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۳۵/۰۰ | ۶۱/۵۰ |
| ۵۰ | ۷/۰۰ | ۰/۰۳ | ۳۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۵۰/۰۰ | ۶۲/۲۵ |

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- شناسایی و مشخصه یابی نانوسیلیکات SBA-16

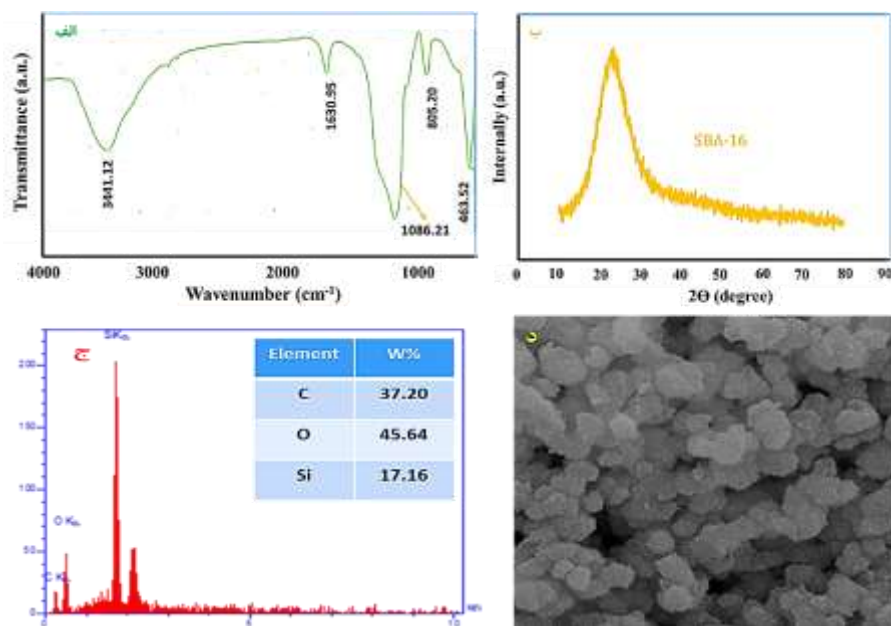
برای اطمینان از میزان سیلیس موجود در ساقه گیاه نی، نمونه تهیه شده از آن برای تعیین عناصر موجود توسط آنالیز XRF مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد (جدول ۲) که در ساقه گیاه نی بیش از ۹۶ درصد SiO_2 موجود است که بیانگر آن است که ساقه این گیاه غنی از سیلیس می‌باشد.

جدول ۲- آنالیز XRF مربوط به ساقه گیاه نی

| نمونه | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | Na_2O | K_2O | TiO_2 | MnO | P_2O_5 | another |
|-------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|----------------|--------------|------------------------|---------|
| درصد | ۹۶/۰۲۵ | ۰/۶۳۵ | ۰/۵۶۸ | ۰/۶۱۶ | ۰/۴۶۸ | ۰/۸۴۰ | ۰/۴۱۸ | ۰/۰۷۳ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۵۵ | ۰/۶۹۳ |

شکل ۳- الف طیف FTIR مربوط به نانومزوپور SBA-16 را نشان می‌دهد. یک پیک گسترده در cm^{-1} ۳۴۴۱/۱۲ مرتبط با ارتعاش کششی متقارن باند O-H مربوط به گروه‌های سیلانول Si-OH مشاهده می‌شود. همچنین پیک مشاهده شده در ناحیه cm^{-1} ۱۶۳۰/۹۵ مربوط به ارتعاشات کششی و خمشی مولکول‌های آب جذب شده در سطح SBA-16 می‌باشد. پیک‌های cm^{-1} ۴۶۳/۵۲، cm^{-1} ۸۰۵/۲۰ و cm^{-1} ۱۰۸۶/۲۱ 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 می‌باشد [۲۲-۲۴]. الگوی پراش اشعه ایکس برای SBA-16 در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود. در طیف XRD یک پیک قوی در حدود 20° - 30° برای SBA-16 خالص مشاهده شد که نشان دهنده آمورف بودن آن است که شاخص اصلی برای شناسایی SBA-16 می‌باشد. همچنین دو پیک ضعیف‌تر در زوایه پراش بالاتر مربوط به بازتاب صفحات d_{211} و d_{200} حضور دارد که نشان می‌دهد SBA-16 از نظم ساختاری بالایی برخوردار است [۲۵]. در شکل ۳-ج آنالیز EDX مربوط به SBA-16 مشاهده می‌شود. از این آنالیز برای شناسایی عناصر تشکیل دهنده مواد استفاده می‌شود. شکل ۳-د تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح نمونه سنتز شده SBA-16 را نشان می‌دهد. با توجه شکل ۴-د می‌توان نتیجه گرفت که نمونه سنتز شده SBA-16 دارای مورفولوژی کروی و همگن می‌باشد.



شکل ۴-الف) طیف FTIR، ب) XRD (ج) آنالیز EDX و د) تصویر SEM مربوط به نانومزوپور SBA-16

۲-۳- آنالیز آماری نتایج آزمایش‌ها

در جدول ۳ مدل‌های مناسب (خطی، برهمکنشی، درجه دوم و درجه سوم) برای طراحی آزمایش برای بررسی حذف رنگدانه فنل فتالئین توسط جاذب SBA-16 نشان داده شده است. از بین این مدل‌ها، مدلی انتخاب می‌شود که دارای مقدار بالاتر و مناسب‌تر R-Squared، مقدار کمتر Std.Dev و PRESS نسبت به بقیه مدل‌ها باشد. با توجه به این نکات مدل درجه دوم (Quadratic) که توسط نرم‌افزار به صورت پیش فرض تعیین کرده است، انتخاب شد.

جدول ۳. تعیین مدل برای طراحی آزمایش حذف رنگدانه فنل فتالئین توسط جاذب SBA-16

| Source مدل | Sequential p-value | Lack of Fit p-value | Adjusted R ² | Predicted R ² |
|------------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| خطی | <0/0001 | <0/0001 | 0/9226 | 0/9174 |

| | | | | | |
|----------|---------|---------|--------|--------|-------------|
| برهمکنشی | ۰/۹۸۹۴ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۹۰۶۴ | ۰/۸۸۸۰ | |
| درجه دوم | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۳۰۹۵ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۹۹۸۹ | پیشنهاد شده |
| درجه سوم | ۰/۹۰۵۸ | ۰/۱۰۷۲ | ۰/۹۹۹۲ | ۰/۹۸۹۹ | |

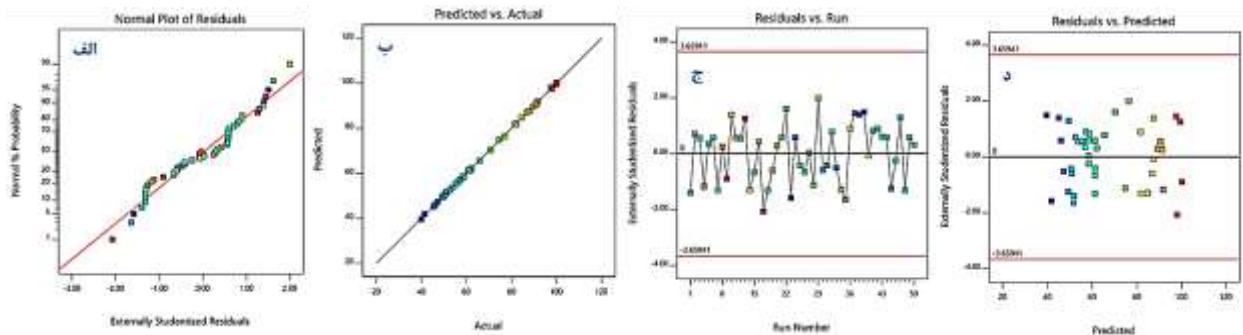
جدول آنالیز واریانس از منابع مهم روش طراحی آزمایش محسوب می‌شود، که پارامتر p-value جهت مشخص نمودن درجه اهمیت هر کدام از متغیرها به کار برده می‌شود، به این صورت که اگر کمتر از عدد ۰/۰۵ را نشان دهد داده‌های پراهمیتی هستند و اگر این عدد بزرگتر از ۰/۱ باشند از اهمیت زیادی برخوردار نیستند. جدول ۴ نتایج مربوط به آنالیز واریانس را برای حذف رنگدانه فنل فتالین توسط جاذب SBA-16 نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج مربوط به آنالیز واریانس (ANOVA) حذف رنگدانه فنل فتالین توسط جاذب SBA-16

| Source | Sum of Square | df | Mean Square | F Value | p-value Prob>F | |
|----------------------|---------------|----|-------------|-----------|----------------|-----------------|
| Model | ۱۴۷۶۵/۸۶ | ۱۹ | ۷۷۷/۱۵ | ۴۵۸۹/۶۴ | <۰/۰۰۰۱ | significant |
| A-pH | ۱۲۳۲۷/۲۶ | ۱ | ۱۲۳۲۷/۲۶ | ۷۲۸۰/۱/۴۹ | <۰/۰۰۰۱ | |
| B-abs. dose | ۶۳۹/۰۲ | ۱ | ۶۳۹/۰۲ | ۳۷۷۳/۹۰ | <۰/۰۰۰۱ | |
| C-ini. cons. absorb. | ۶۷۴/۱۸ | ۱ | ۶۷۴/۱۸ | ۳۹۸۱/۵۰ | <۰/۰۰۰۱ | |
| D-temp. | ۴/۸۶ | ۱ | ۴/۸۶ | ۲۸/۶۸ | <۰/۰۰۰۱ | |
| E-cont. time | ۹۸/۴۳ | ۱ | ۹۸/۴۳ | ۵۸۱/۳۰ | <۰/۰۰۰۱ | |
| AB | ۱۶/۳۹ | ۱ | ۱۶/۳۹ | ۹۶/۷۸ | <۰/۰۰۰۱ | |
| AC | ۹/۶۸ | ۱ | ۹/۶۸ | ۵۷/۱۷ | <۰/۰۰۰۱ | |
| AD | ۱/۳۶ | ۱ | ۱/۳۶ | ۸/۰۴ | ۰/۰۰۸۱ | |
| AE | ۳/۷۱ | ۱ | ۳/۷۱ | ۲۱/۹۳ | <۰/۰۰۰۱ | |
| BD | ۹/۴۶ | ۱ | ۹/۴۶ | ۵۵/۸۸ | <۰/۰۰۰۱ | |
| BE | ۱۷/۸۵ | ۱ | ۱۷/۸۵ | ۱۰۵/۴۲ | <۰/۰۰۰۱ | |
| CD | ۲/۴۸ | ۱ | ۲/۴۸ | ۱۴/۶۲ | ۰/۰۰۰۶ | |
| CE | ۲/۸۸ | ۱ | ۲/۸۸ | ۱۷/۰۱ | ۰/۰۰۰۳ | |
| DE | ۴/۰۶ | ۱ | ۴/۰۶ | ۲۳/۹۸ | <۰/۰۰۰۱ | |
| A ² | ۲۶۳/۰۹ | ۱ | ۲۶۳/۰۹ | ۱۵۵۳/۷۱ | <۰/۰۰۰۱ | |
| B ² | ۰/۰۰۳۳ | ۱ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۰۱۹۵ | ۰/۸۹۰۰ | |
| C ² | ۵۱/۵۱ | ۱ | ۵۱/۵۱ | ۳۰۴/۲۰ | <۰/۰۰۰۱ | |
| D ² | ۷۶/۵۰ | ۱ | ۷۶/۵۰ | ۴۵۱/۸۰ | <۰/۰۰۰۱ | |
| E ² | ۱/۶۳ | ۱ | ۱/۶۳ | ۹/۶۲ | ۰/۰۰۴۲ | |
| Residual | ۵/۰۸ | ۳۰ | ۰/۱۶۹۳ | | | |
| Lack of Fit | ۴/۲۱ | ۲۳ | ۰/۱۸۳۲ | ۱/۴۸ | ۰/۳۰۹۸ | not significant |
| Pure Error | ۰/۸۶۷۲ | ۷ | ۰/۱۲۳۹ | | | |
| Cor Total | ۱۴۷۷۰/۹۴ | ۴۹ | | | | |

در شکل ۵ برخی نمودارهای آماری جهت تایید نتایج نشان داده شده است. شکل ۵-الف نمودار احتمال نرمال بر حسب باقی مانده را نشان می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود نقاط در امتداد یک خط راست هستند که نشان دهنده توزیع نرمال مقادیر باقی مانده می‌باشد. در شکل ۵-ب مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی دیده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود

مقادیر تجربی به دست آمده بسیار به مقادیر پیش‌بینی شده نزدیک است و این نشان دهنده صحت کار می‌باشد. در شکل ۵-ج، نمودار مقدار مانده‌ها در برابر مقدار پیش‌بینی شده مدل آورده شده است. این نمودار مقدار مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی نشان داده و فرض واریانس ثابت را آزمون می‌کند. نمودار باید دارای پراکندگی تصادفی، که نشان‌دهنده طیف ثابت مقدار مانده در سراسر نمودار است، باشد. با توجه به اینکه محدوده اطمینان ۳- تا ۳+ تعریف شده است، 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. شکل ۵-د، مقادیر باقی‌مانده استاندارد در مقابل مقادیر واقعی مدل آورده را نشان می‌دهد. 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 گرفته‌اند، همبستگی مدل با پاسخ‌های به دست آمده قابل تایید است.



شکل ۵- نمودارهای آماری بررسی صحت داده‌ها (الف) نمودار نرمال باقیمانده‌ها (ب) نمودار مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده (ج) نمودار مقدار مانده‌ها در برابر مقدار پیش‌بینی شده و (د) نمودار مقادیر مانده استاندارد در مقابل پاسخ‌ها

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 بالاتر 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 فنل فتالئین توسط SBA-16 را نشان می‌دهد.

$$\text{Removal} = +61.27 - 19.04 A + 4.34 B - 4.45 C - 0.38 D + 1.70 E - 0.72 AB + 0.55 AC - 0.21 AD - 0.34 AE + 0.54 \quad (1)$$

$$BD - 0.75 BE + 0.28 CD + 0.30 CE + 10.31 A^2 - 0.04 B^2 + 4.56 C^2 - 5.56 D^2 - 0.81 E^2$$

معادله ۱ نشان می‌دهد پارامترهای B (مقدار جاذب) با سهم مشارکت ۴/۳۴ و E (زمان تماس) با سهم مشارکت ۱/۷۰ با پاسخ نسبت مستقیم دارند و پارامترهای A (pH) با سهم مشارکت ۱۹/۰۴، C (غلظت اولیه جذب شونده) با سهم مشارکت ۴/۴۵ و D (دما) با سهم مشارکت ۰/۳۸ با پاسخ نسبت عکس دارند.

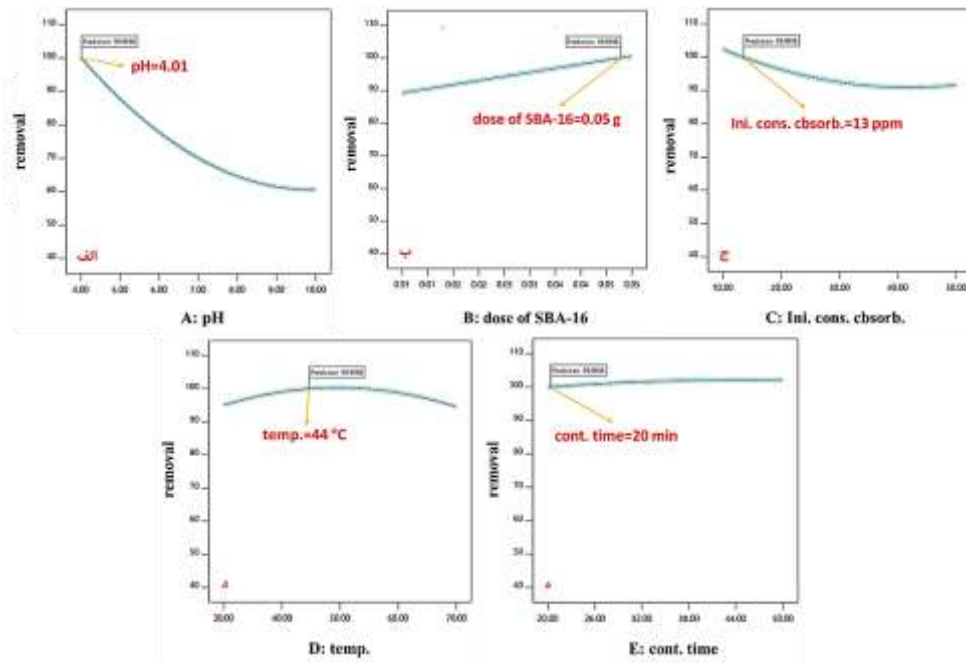
اثر پارامترهای موثر بر جذب فنل فتالئین توسط نانوجاذب تهیه شده در شکل ۷ نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر pH در این فرایند، مقادیر pH در بازه ۴-۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش pH جذب کاهش می‌یابد (شکل ۶-الف). بیشینه جذب در pH برابر ۴/۰۱ اتفاق افتاده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش pH منجر به کاهش راندمان حذف آلاینده می‌شود. در pH پایین به دلیل وجود نیروهای جاذبه الکترواستاتیک، برهمکنش فنل فتالئین و جاذب SBA-16 زیاد است، بنابراین بازده حذف آلاینده در pH پایین، زیاد است.

یکی دیگر از عوامل موثر بر حذف رنگدانه فنل فتالئین توسط جاذب، اثر مقدار جاذب در محلول‌های آبی است که در این تحقیق در محدوده ۰/۰۵-۰/۱ گرم 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 ۰/۰۵ گرم نشان می‌دهد. افزایش مقدار جاذب تاثیر مثبتی بر عملکرد جاذب دارد (شکل ۶-ب) 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 فنل فتالئین) موجود در محلول یا اشباع شدن حفرات سطح جاذب نسبت داد.

جهت بررسی اثر غلظت اولیه فنل فتالئین در فرایند جذب سطحی توسط جاذب SBA-16 و به دست آوردن نقطه بهینه آن، غلظت‌های مختلفی از فنل فتالئین در بازه ۱۰-۵۰ mg/L مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶-ج). مقدار بهینه جذب مربوط به غلظت ۱۳ mg/L است. علت افزایش جذب در غلظت‌های پایین‌تر می‌تواند این باشد که، در غلظت‌های کم نسبت جذب شونده (فنل فتالئین) با جاذب (SBA-16) افزایش یافته و مکان‌های فعال بیشتری در اختیار جذب شونده قرار می‌گیرد و عملکرد فرایند جذب افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی اثر دما بر فرایند حذف فنل فتالئین از محلول‌های آبی توسط جاذب SBA-16 و بهینه‌سازی آن، بازه ۷۰-۳۰ در نظر گرفته شده است (شکل ۶-د). با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که در دمای ۴۴ °C، بیشینه جذب رخ داده است. با کاهش دما سرعت نفوذ ذرات فنل فتالئین بر سطح جاذب SBA-16 کاهش یافته که علت آن را می‌توان به کاهش انرژی جنبشی یون‌های فنل فتالئین نسبت داد.

و در نهایت عامل دیگری که می‌تواند بر درصد جذب موثر باشد، زمان تماس است. اثر زمان تماس در بازه ۲۰-۵۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج (شکل ۶-ه) زمان تماس مطلوب برای جذب ۲۰ دقیقه بوده و افزایش درصد جذب با زمان تماس، احتمالاً به خاطر فراهم شدن فرصت بیشتر برای انجام جذب سطحی است.



شکل ۶- تاثیر عوامل موثر بر درصد جذب رنگدانه فنل فتالئین توسط جاذب SBA-16

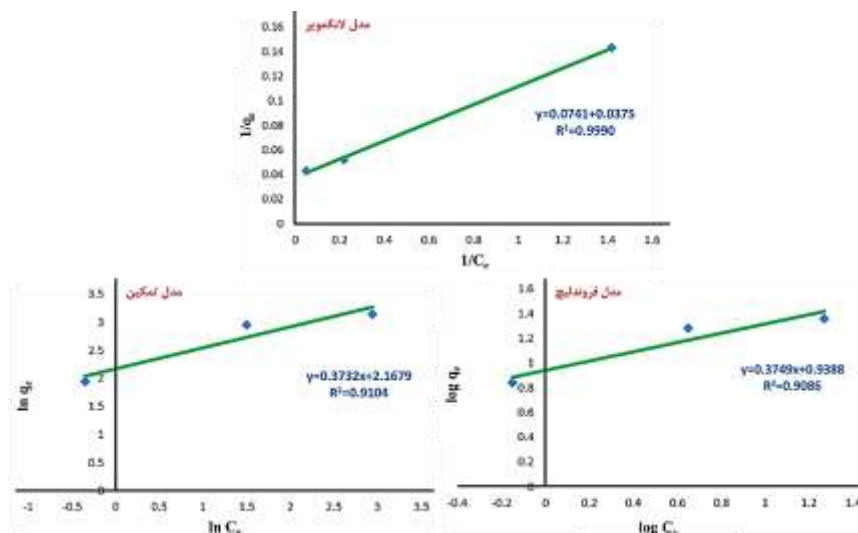
۳-۳- ایزوترم جذب

ایزوترم جذب یک رابطه ریاضی است که مقدار تعادل ماده جذب شده فیزیکی یا شیمیایی روی سطح یک جامد را بیان می کند. در این تحقیق سه ایزوترم لانگمویر، فروندلیچ و تمکین در شرایط بهینه $pH=4/01$ ، مقدار جاذب $0/05$ گرم، غلظت اولیه فنل فتالئین $13/00$ میلی گرم بر لیتر، زمان تماس 20 دقیقه و دمای 44 درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت [۲۶]. ثابت‌های مربوط به هر سه ایزوترم و ضریب رگرسیون (R^2) در دمای بهینه (44 درجه سلسیوس) محاسبه شدند. نتایج جدول ۵ و شکل ۷ نشان می‌دهد که مدل لانگمویر مناسب‌تر از مدل‌های فروندلیچ و تمکین است که تایید جذب فیزیکی فنل فتالئین بر روی جاذب SBA-16 می‌باشد [۲۷].

جدول ۵- پارامترهای لانگمویر، فروندلیچ و تمکین مربوط به جذب رنگدانه فنل فتالئین توسط نانومزوپور SBA-16

| ۵۰ ppm | ۳۰ ppm | ۱۰ ppm | پارامترهای مدل | مدل ایزوترم |
|-----------------|---------------------------------------|--------------|----------------|-------------|
| ۱۹/۰ | ۴/۵ | ۰/۷ | C_e (ppm) | لانگمویر |
| ۲۳/۲۵ | ۱۹/۱۲ | ۶/۹۷ | q_e | |
| ۰/۰۴۲ | ۰/۰۵۲ | ۰/۱۴۳ | $1/q_e$ | |
| ۰/۰۵ | ۰/۲۲ | ۱/۴۲ | $1/C_e$ | |
| $q_{max}=26/67$ | | $K(L/mg)=50$ | $R^2=0/9990$ | |
| ۱۹/۰ | ۴/۵ | ۰/۷ | C_e (ppm) | فروندلیچ |
| ۲۳/۲۵ | ۱۹/۱۲ | ۶/۹۷ | q_e | |
| ۱/۳۶ | ۱/۲۸ | ۰/۸۴ | $\log q_e$ | |
| ۱/۳۶ | ۰/۶۵ | -۰/۵۱ | $\log C_e$ | |
| $n=2/60$ | $k_F(mg^{-1(1/n)}L^{1/ng^{-1}})=8/68$ | | $R^2=0/9036$ | |

| ۱۹/۰ | ۴/۵ | ۰/۷ | C_e (ppm) | |
|-----------|-------|------------|--------------|-------|
| ۲۳/۲۵ | ۱۹/۱۲ | ۶/۹۷ | q_e | تمکین |
| ۳/۱۴ | ۲/۹۵ | ۱/۹۴ | $\ln q_e$ | |
| ۲/۹۴ | ۱/۵۰ | -۰/۳۵ | $\ln C_e$ | |
| $B=۰/۳۷۳$ | | $K_T=۵/۸۰$ | $R^2=۰/۹۱۰۴$ | |



شکل ۷- نمودارهای الف) لانگمویر، ب) فروندلیچ و ج) تمکین مربوط به جذب رنگدانه فنل فتالتین توسط نانومزوپور SBA-16

۳-۴- ترمودینامیک جذب

به منظور محاسبه مقادیر ترمودینامیکی جذب سطحی، مقادیر تعادلی C_e و q_e برای جذب سطحی رنگدانه فنل فتالتین در دماهای ۳۰۳، ۳۲۳ و ۳۴۳ درجه کلوین تحت شرایط بهینه (pH=۴/۰۱، مقدار جاذب برابر ۰/۰۵، غلظت جذب شونده ۱۳ میلی گرم بر لیتر، دمای ۴۴ درجه سلسیوس و زمان تماس برابر ۲۰ دقیقه)، اندازه گیری شد. با استفاده از روابط ۲ تا ۵ ثابت تعادل جذب (K) و توابع ترمودینامیکی محاسبه شد (جدول ۶). با توجه به مقدار آنتالپی استاندارد (ΔH°) جذب فنل فتالتین توسط جاذب SBA-16 فرایند جذب گرمازا و جذب از نوع جذب سطحی فیزیکی می باشد. همچنین، با توجه به مقادیر انرژی آزاد گیبس (ΔG°) می توان نتیجه گرفت که در دماهای پایین جذب خود به خودی است و با افزایش دما به دلیل انرژی جنبشی مولکول های جاذب عمل واجذب صورت می گیرد.

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

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

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

در محلول‌های رقیق ثابت ترمودینامیکی، برای واکنش‌های جذب سطحی به صورت زیر تعریف می‌شود:

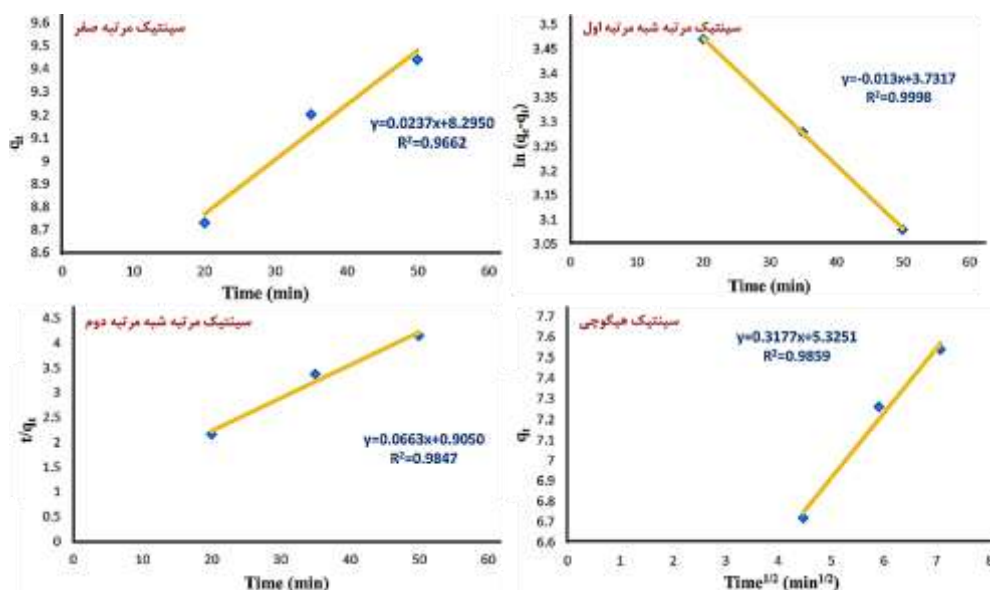
$$K_c = \frac{q_e}{c_e} \quad (۵)$$

جدول ۶- پارامترهای ترمودینامیکی برای جذب رنگدانه فنل فتالئین توسط نانومزوپور SBA-16

| Temp. (K) | ln K _c | ΔH° (Kj. mol ⁻¹) | ΔS° (Kj. mol ⁻¹) | ΔG° (Kj. mol ⁻¹) | R ² |
|-----------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| ۳۰۳ | ۳/۹۵ | | | -۱۰/۲۰ | |
| ۳۲۳ | ۲/۸۴ | -۳۰/۲۳ | -۰/۰۶۶ | -۸/۹۰ | ۰/۹۹۹۶ |
| ۳۴۳ | ۲/۵۴ | | | -۷/۵۰ | |

۵-۳- سینتیک جذب

در این کار، چهار مدل سینتیکی مرتبه صفر، شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و هیگوجی برای حذف رنگدانه فنل فتالئین توسط جاذب SBA-16 مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد که جذب فنل فتالئین توسط جاذب SBA-16 از سینتیک شبه مرتبه اول ($R^2=0/9998$) پیروی می‌کند.



شکل ۸- نمودارهای مربوط به مدل‌های سینتیکی جذب فنل فتالئین بر روی SBA-16

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، نانوسیلیکات SBA-16 به روش سبز از ساقه گیاه نی تهیه شد. مشخصات نانوکامپوزیت تهیه شده با استفاده از آنالیزهای مختلف بررسی شد و نتایج حاصل از آنالیزهای به کار رفته نشان داد که تهیه نانو سیلیکات SBA-16 موفقیت آمیز

بوده است. از جاذب تهیه شده جهت حذف رنگدانه فنل فتالئین از محلول‌های آبی استفاده شد. برای تعیین شرایط بهینه فرایند و دستیابی به حداکثر راندمان، اثر فاکتورهای دما، زمان تماس، غلظت جذب 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=4/01، دمای 44 درجه سلسیوس، زمان تماس 20 دقیقه، غلظت اولیه جذب شونده 13 میلی‌گرم بر لیتر و مقدار جاذب 0/05 گرم بهترین شرایط برای حذف فنل فتالئین از محیط آبی بوده است. در این شرایط بهینه، نرم‌افزار طراحی آزمایش درصد حذف آلاینده فنل فتالئین را توسط جاذب SBA-16 برابر 100 درصد پیش‌بینی نمود که مقدار تجربی به دست آمده 99/46 درصد می‌باشد که تطابق خوبی با مقدار پیش‌بینی دارد. همچنین ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین بررسی شدند و نتایج حاصل نشان داد که رفتار جذبی بیشترین مطابقت را با ایزوترم لانگمویر دارد. نتایج آزمایش‌های ترمودینامیکی نیز نشان داد که فرایند جذب از نوع گرمازا و در دماهای پایین خود به خودی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که فرایند جذب فنل فتالئین توسط جاذب مورد استفاده از سینتیک شبه مرتبه اول پیروی می‌کند.

۵- سپاسگزاری

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.

۶- مراجع

- [1] Dehua, X., Irene, M. C. (2016). Synthesis of magnetically separable $\text{Bi}_2\text{O}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$ hybrid nanocomposites with enhanced photocatalytic removal of ibuprofen under visible light irradiation. *Water Research*. 100, 1.
- [2] Dunnick, J. K., Hailey, J. R. (1996). Phenolphthalein exposure causes multiple carcinogenic effects in experimental model systems *Cancer Res*. 56, 4922-4926.
- [3] Sayadi Anari, A. R., Asadpour, M., Shabani, Z., Sayadi Anari, M. H. (2013). Pharmaceutical Pollution of the eco-system and Its Detrimental Effects on Public Health. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*. 11, 11-18.
- [4] Fekri, M. H., Isanejad Mohamareh, S., Hosseini, M., Razavi Mehr, M. (2022). Green synthesis of activated carbon/ Fe_3O_4 nanocomposite from flaxseed, its application as adsorbent and antibacterial. *Chem. Pap*. 76, 6767.
- [5] Dashti Khavidaki, H., Fekri, M. H. (2015). Removing Thallium (I) Ion from Aqueous Solutions Using Modified ZnO Nanopowder. *J. Adv. Chem*. 11, 3777.
- [6] Dashti Khavidaki, H., Sarlal, F., Fekri, M. H. (2023). Adsorption Characteristics of Amoxicillin on Activated Carbon from Eucalyptus Leave and Wheat Straw. *Journal of Applied Chemistry*. DOI: 10.22075/chem.2023.26959.2066.

- [7] Oliver, A. H., Voulvoulis, N., John, N. L. (2003). Potential impact of pharmaceuticals on environmental health. *Bull. W. H. O.* 81, 768-769.
- [8] Steinnes, E., Anderson, E. (1991). Atmospheric deposition of mercury in Norway: temporal and spatial trends. *Water, Air, Soil Pollut.* 56, 391-404.
- [9] Fekr, M. H., Shahverdi, V., Chegeni, M., Razavi Mehr, M., Abbastabar Ahangar, H., Saffar, A. (2022). Simultaneous photocatalytic degradation of cefixime and cefuroxime antibiotics using g-C₃N₄/NaBiO₃ nanocomposite and optimization of effective parameters by response surface methodology. *Reac. Kinet. Mech. Catal.* 135, 1059.
- [10] Jianming, X. (2009). Comparison of metronidazole degradation by different advanced oxidation processes in low concentration aqueous solutions. *Chin. J. Environ. Eng.* 3, 109-119.
- [11] Iram, M., Guan, Y., Ishfaq, A., Liu, H. (2010). Adsorption and magnetic removal of neutral red dye from aqueous solution using Fe₃O₄ hollow nanospheres. *J. Hazard. Mater.* 181, 1039-1050.
- [12] Razavi Mehr, M., Fekri, M. H., Omidali, F., Eftekhari, N., Akbari-adergani, B. (2019). Removal of Chromium (VI) from Wastewater by Palm Kernel Shell-based a Green Method. *J. Chem. Health Risks.* 9, 75.
- [13] Fekri, M. H., Banimahd Keivani, M., Razavi Mehr, M., Akbari-adergani, B. (2019). Effective Parameters on Removal of Rhodamine B from Colored Wastewater by Nano polyaniline/Sawdust Composite. *J. Mazandaran Univ. Med. Sci.* 29, 166.
- [14] Chegeni, M., Etemadpour, S., Fekri, M. H. (2021). The perlite-calcium alginate-activated carbon composite as an efficient adsorbent for the removal of dyes from aqueous solution. *Phys. Chem. Res.* 9, 1.
- [15] Zare, M., Adibiyani, M., Ghasemi, E., Ashouri, F. (2022). Adsorption of Congo red dye by magnetic nanoparticles of ferrite cobalt and ferrite zinc coated with polyaniline. *Journal of Applied Chemistry.* 17(64), 55-70.
- [16] Ali, A., Shoeb, M., Li, Y., Li, B., Khan, M. A. (2021). Enhanced photocatalytic degradation of antibiotic drug and dye pollutants by graphene-ordered mesoporous silica (SBA-15)/TiO₂ nanocomposite under visible-light irradiation. *J. Mol Liq.* 324, 114696.
- [17] Pandey, P., Shankar, A., Biney, M., Saini, V. K. (2021). Enhancement in amoxicillin adsorption and regeneration properties of SBA-15 after surface modification with polyaniline. *Colloid and Interface Science Communications.* 43, 100432.
- [18] Bui, T. X., Kang, S. Y., Lee, S. H., Choi, H. (2011). Organically functionalized mesoporous SBA-15 as sorbents for removal of selected pharmaceuticals from water. *J. hazard. Mater.* 193, 156-163.
- [19] Khanmohammadi, F., Razavi Zadeh, B. M., Azizi, S. N. (2023). Nanoparticles of SBA-15 synthesized from corn silica as an effective delivery system for valproic acid. *Journal of Applied Chemistry.* 17(65), 65-80.

- [20] Manzano, M., Vallet-Regi, M. (2020). Mesoporous silica nanoparticles for drug delivery. *Advanced functional materials. Adv. Funct. Mater.* 30, 190634.
- [21] Fekri, M. H., Soleymani, S., Razavi Mehr, M., Akbari-adergani, B. (2022). Synthesis and characterization of mesoporous ZnO/SBA-16 nanocomposite: Its efficiency as drug delivery system. *J. Non-Cryst. Solids.* 591, 121512.
- [22] Sayadi, K., Rahdar, A., Hajinezhad, M. R., Nikazar, S., Susan, M. A. (2020). Atorvastatin-loaded SBA-16 nanostructures: Synthesis, physical characterization, and biochemical alterations in hyperlipidemic rats. *J. Mol. Struct.* 1202, 127296.
- [23] Vatanpour, V., Rabiee, H., Farahani, M. H. D., Masteri-Farahani, M., Nikakan, M. (2020). Preparation and characterization of novel nanoporous SBA-16-COOH embedded polysulfone ultrafiltration membrane for protein separation. *Chemical Engineering Research and Design.* 156, 240-250.
- [24] Palos-Barba, V., Moreno-Martell, A., Hernández-Morales, V., Peza-Ledesma, C. L., Rivera-Muñoz, E. M., Nava, R., Pawelec, B. (2020). SBA-16 Cage-Like Porous Material Modified with APTES as an Adsorbent for Pb²⁺ Ions Removal from Aqueous Solution. *Materials.* 13, 927.
- [25] Madadi, S., Charbonneau, L., Bergeron, J. Y., Kaliaguine, S. (2020). Aerobic epoxidation of limonene using cobalt substituted mesoporous SBA-16 Part 1: Optimization via Response Surface Methodology (RSM). *Appl. Catal. B.* 260, 118049.
- [26] Albayati, T. M., Salih, I. K., Alazzawi, H. F. (2019). Synthesis and characterization of a modified surface of SBA-15 mesoporous silica for a chloramphenicol drug delivery system. *Heliyon.* 5, e02539.
- [27] Areawi, B. H., Mengistie, A. A. (2013). Removal of Ni (II) from aqueous solution using leaf, bark and seed of *Moringa stenopetala* adsorbents. *Bull. Chem. Soc. Ethiop.* 27, 35.

