


تهیه نانوچندسازه‌های سه جزئی آهن صفر ظرفیتی-هگزافریت استرانسیم-گرافن برای حذف پادزیست سفتریاکسون از محلول آبی و بهینه‌سازی شرایط با طراحی باکس بنکن

شادان امیری^۱، محمودرضا سهرابی^{۲*} و فرشته مطیعی^۳

۱. دانشجوی دکتری شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.
۲. استاد تمام شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.
۳. استادیار شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

دریافت: تیر ۹۹ بازنگری: شهریور ۹۹ پذیرش: مهر ۹۹

 20.1001.1.17359937.1400.15.3.4.3

چکیده

در این مطالعه، برای نخستین بار، نانوچندسازه آهن صفر ظرفیتی-هگزافریت استرانسیم-گرافن تهیه شد و به عنوان جاذبی برای حذف دارو سفتریاکسون از محیط آبی بررسی شد. جاذب‌های تهیه‌شده با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)، طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) و پراش پرتو ایکس (XRD) شناسایی شدند. روش سطح پاسخ (RSM) مبتنی بر طراحی باکس بنکن (BBD) برای به‌دست آوردن شرایط بهینه آزمایشگاهی به‌کار گرفته شد. بر این پایه، تاثیر عامل‌هایی مانند مقدار جاذب (۰/۰۵ تا ۰/۱۵ گرم بر لیتر)، pH (۵ تا ۹) و غلظت اولیه سفتریاکسون (۵ تا ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر) بر بازده حذف دارو از آب بررسی شد. یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد حذف دارو مورد مطالعه قرار گرفت. اهمیت و کفایت مدل با تحلیل وردایی (ANOVA) بررسی شد. نتیجه‌ها نشان داد که مدل چند جمله‌ای درجه دوم یک مدل مناسب و کارآمد برای حذف آلاینده موردنظر از محیط آبی است. سرانجام، طراحی باکس بنکن پیش‌بینی کرد که مقدار جاذب ۰/۱۵ گرم بر لیتر، pH برابر با ۵، غلظت اولیه دارو ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر با بازده ۹۹٪، بهترین شرایط برای حذف داروی سفتریاکسون از محلول آبی است.

واژه‌های کلیدی: سفتریاکسون، طراحی باکس بنکن، آهن صفر ظرفیتی، هگزافریت استرانسیم، گرافن

مقدمه

دارند و به‌عنوان ترکیب‌های اولیه به فاضلاب‌ها تخلیه می‌شوند. در میان مواد دارویی، پادزیست‌ها به‌طور گسترده و برای پیشگیری و درمان عفونت‌های میکروبی در بدن انسان‌ها، حیوان‌ها و گیاهان به‌کار گرفته می‌شوند [۱]. پادزیست‌های سفالوسپورین به دلیل درمان عفونت‌های

امروزه، یکی از آلودگی‌های سامانه‌های آبی، آلاینده‌های دارویی هستند که مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. بسیاری از ترکیب‌های دارویی دگرگشت^۱ دشواری

1. Metabolism

شوند. هگزا فریت استرانسیم با ساختار شش ضلعی یکی از موادی است که برای حذف داروی سفتریاکسون از آب با آهن صفر ظرفیتی ترکیب شد. هگزا فریت استرانسیم به دلیل مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت مکانیکی و پایداری شیمیایی بالا، حساسیت و نفوذپذیری بالا، داشتن سطح وسیع و مغناطیس چشمگیر در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۹]. این جاذب در ذخیره‌سازی داده‌ها، وسایل الکترونیکی، ساخت آهن ربا دائمی و طراحی دستگاه میکروویو استفاده می‌شود [۲۰]. همچنین، برای گسترش سطح جاذب و افزایش مقدار حذف داروی سفتریاکسون از محلول آبی افزون بر هگزا فریت استرانسیم از گرافن نیز می‌توان استفاده کرد. گرافن می‌تواند به عنوان یک ماده پشتیبان خوب مورد استفاده قرار گیرد زیرا بسیار پایدار است و سطح ویژه بزرگی دارد [۲۱]. گرافن در مقایسه با پشتیبان‌های دیگر، پراکندگی و تثبیت آهن را به خوبی انجام می‌دهد. با تشکیل این نانوجندساز سه جزئی (آهن صفر ظرفیتی - هگزا فریت استرانسیم - گرافن) میزان حذف داروی مورد نظر از آب می‌تواند افزایش یابد. از مزایای این نانوجندسازها افزایش مکان‌های در دسترس، جلوگیری از تجمع و کلوخه‌شدن ذره‌های آهن و سازگاری با محیط‌زیست است، زیرا می‌توان نانوجندساز مورد نظر را با یک آهنربای ساده از آب جدا کرد. افزون‌براین، برای بهینه‌سازی عامل‌های آزمایشگاهی، طراحی آزمایش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این روش تعداد آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد، بنابراین، می‌توان در مصرف انرژی، زمان و استفاده از مواد صرفه جویی کرد [۲۲]. یکی از مدل‌های آماری مورد استفاده در طراحی آزمایش‌ها، روش سطح پاسخ (RSM^۱) یا روش رویه پاسخ است. این روش اثرات متقابل چندین عامل در گستره متفاوت را ارزیابی می‌کند و ناحیه‌ای که نتیجه‌ها در آن گستره قرار دارند را به شکل یک سطح سه بعدی نشان

متوسط تا سخت، در جهان بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. سفتریاکسون نسل سوم از خانواده سفالوسپورین است که از تهیه باکتری جلوگیری می‌کند و طیف گسترده‌ای از فعالیت پادباکتریایی را در برابر عوامل بیماری‌زا گرم مثبت و به ویژه گرم منفی نشان می‌دهد [۲]. از این دارو برای درمان عفونت مجاری صفراوی، عفونت‌های تنفسی، ادراری، درمان بیماری‌های عفونی در بیمارانی که سامانه ایمنی آن‌ها تضعیف شده است، مننژیت، عفونت‌های پوستی و پیشگیری از عفونت پس از اعمال جراحی استفاده می‌شود [۳]. دارو سفتریاکسون از راه‌های گوناگون، مانند دفع، فاضلاب صنعتی کارخانه‌ها و بیمارستان‌ها وارد محیط‌زیست می‌شوند و سلامتی انسان و دیگر جانداران را به خطر می‌اندازند [۴]. بنابراین، حذف پادزیست‌ها از محیط آبی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. چندین روش پیشرفته مانند فرایندهای اکسایش پیشرفته [۵]، فوتوکاتالیستی [۶]، غشایی [۷]، نورکافت [۸]، انعقاد، کلرزنی [۹]، اوزوناسیون [۱۰] و جذب [۱۱] برای حذف آلاینده‌های دارویی از آب گزارش شده است. از بین روش‌های یادشده، روش جذب ساده، سریع و کم هزینه است [۱۲]. کربن فعال [۱۳]، ژئولیت‌های پودری [۱۴]، کیتوسان [۱۵] و نانوغرافن‌ها [۱۶]، جاذب‌هایی هستند که می‌توان در این روش از آن‌ها استفاده کرد. آهن صفر ظرفیتی در مقیاس نانو، به عنوان یک جاذب جدید و ایده‌آل برای تصفیه آب مورد استفاده قرار گرفته است. نانوذره‌های آهن صفر ظرفیتی این قابلیت را دارند که در مدت کوتاهی، غلظت‌های زیادی از آلودگی را از بین ببرند. همچنین، این نانوجاذب بسیار ارزان قیمت و در دسترس، سطح ویژه و اندازه ذره‌های مناسب و تخریب کاهشی بالایی دارد [۱۷]. با این حال، ذره‌های آهن صفر به سرعت با هوا واکنش می‌دهند و اکسید می‌شوند. همچنین، این نانوذره‌ها گرایش بسیار زیادی به کلوخه‌شدن دارند [۱۸]. بنابراین، لازم است که نانوذره‌های آهن صفر ظرفیتی با جاذب‌های دیگری ترکیب

الگوهای نمونه‌ها به کار گرفته شد. همچنین، برای تنظیم pH محلول‌ها، از دستگاه pH متر (JENWAY, Germany) و برای جداسازی مواد از دستگاه گریزانه مدل ROTINA-380 R استفاده شد. طراحی آزمایش با نرم افزار دیزاین اکسپرت ۱۲ انجام شد.

تهیه هگزافریت استرانسیم

برای تهیه هگزافریت استرانسیم، ۱۹/۴۳۷ گرم سیتریک اسید در ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل شد. سپس، ۱/۲۵۶ گرم استرانسیم نترات و ۲۸/۷۴۵ گرم آهن نترات (با نسبت استوکیومتری ۱ به ۱۲ مول) در آن حل شد. محلول به دست آمده به مدت ۲ ساعت در دمای 60°C با همزن مکانیکی همزده شد. پس از این مدت، گرماساز خاموش و به محلول قطره قطره آمونیاک افزوده شد. به طور همزمان pH محلول نیز واپایش می شد تا جایی که pH آن به ۷ برسد. در این هنگام، ریختن آمونیاک متوقف و هیتر دوباره روشن شد و محلول حدود ۲ ساعت در دمای 70°C تا 80°C همزده شد. سپس، همزن مکانیکی خاموش شد تا عمل احتراق انجام شود. پودر به دست آمده از احتراق را داخل هاون ریخته و آسیاب شد تا پودر خیلی نرمی به دست آمد (مانند پودر کاکائو). سپس، پودر داخل یک بوته چینی از جنس کوارتز ریخته و به مدت ۱/۵ ساعت در داخل کوره قرار داده شد تا دمای آن به 450°C برسد. پس از این مدت، نمونه به مدت ۲ ساعت داخل کوره گرمادهی شد. در پایان، ماده به دست آمده برای دومین بار در کوره در دمای 900°C به مدت ۳ ساعت با سرعت افزایش دمای ۵ درجه بر دقیقه قرار داده شد تا فرآورده تشکیل شود [۲۵].

تهیه آهن صفر ظرفیتی / هگزافریت استرانسیم

برای تهیه نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی-هگزافریت استرانسیم، ۱ گرم سدیم بور هیدرید داخل آب مقطر ریخته و به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد. سپس، داخل یک بشر ۴۰۰ میلی لیتری، ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر ریخته و همزن

می دهد [۲۳]. روش سطح پاسخ انواع گوناگونی دارد و به شکل‌های متفاوت از این روش آماری می توان استفاده کرد. یکی از انواع آن، روش باکس بنکن (BBD) است که می تواند مقدار عامل‌ها را در یک مدل درجه دوم تخمین بزند و یک روش بسیار کارآمد نسبت به سایر طراحی‌های سطح پاسخ است [۲۴]. در این مطالعه، برای نخستین بار، چندسازه جدید آهن صفر ظرفیتی- هگزافریت استرانسیم- گرافن برای حذف سفتریاسکون از محیط آبی تهیه و با طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)، پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) شناسایی شد. شرایط بهینه آزمایش، از جمله مقدار جاذب، pH و غلظت اولیه سفتریاسکون با روش RSM برپایه روش BBD مورد بررسی قرار گرفت و یک معادله ریاضی برای پیش‌بینی مقدار حذف پادزیست پیشنهاد و کفایت مدل بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی مورد نیاز

آهن (III) کلرید، سدیم بور هیدرید، سیتریک اسید، استرانسیم نترات، نترات آهن ۹ آب، آمونیاک و استون از شرکت مرک آلمان، گاز نیتروژن از گروه صنعتی سهیل‌گاز و داروی سفتریاسکون از شرکت داروسازی جابربن حیان خریداری شدند.

دستگاه‌ها و نرم افزارها

جذب نمونه‌ها با طیف‌نورسنج UV-Vis مدل Bio-TEK mode No.992, USA ثبت شد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل Philips XL, Netherlands انجام شد. طیف‌سنج فروسرخ تبدیل فوریه مدل Nicolet 8700, Japan برای ثبت طیف‌ها و دستگاه پراش پرتو ایکس شرکت Panalytical برای ثبت

جمع‌آوری شد. نمونه به دست آمده در 60°C خشک شد. ۱ گرم سدیم بور هیدرید داخل آب مقطر ریخته و حل شد، به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده و محلول به دست آمده، داخل یک بورت ریخته شد. سپس، داخل یک بشر ۴۰۰ میلی‌لیتری، ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته و همزن مکانیکی و میله شیشه‌ای داخل بشر قرار داده شد تا محلول همزده شود. این مراحل از ابتدا تحت گاز نیتروژن بود. پس از ۳ الی ۴ دقیقه هم‌زدن، ۲ گرم آهن (III) کلرید به محلول افزوده و با هم‌زدن به‌طور کامل حل و رنگ محلول مسی شد. در ادامه ۰/۶۵ گرم گرافن اکسید مغناطیسی‌شده به محلول افزوده و همزده شد. در پایان، در حالتی که همزن مکانیکی کار می‌کرد، محلول سدیم بور هیدرید از یک بورت با سرعت یک قطره در ثانیه به محتویات بشر افزوده شد تا سدیم بور هیدرید داخل بورت تمام شود. سپس، محتویات داخل بشر به مدت ۲ تا ۳ دقیقه همزده شد و در پایان شیر گاز نیتروژن بسته شد. رسوب سیاه رنگ تشکیل شده با یک پمپ خلأ و یک قیف بوخنر صاف شد که این رسوب سیاه رنگ همان نانوجندسازه موردنظر بود.

تهیه محلول دارو

برای تهیه محلول موردنظر، ۰/۳۵ گرم از داروی سفتریاکسون با آب مقطر در یک بشر حل و در یک بالن ۲۵۰ میلی‌لیتری به حجم رسانده شد. محلول تهیه شده درون سل کوارتز ریخته و میزان جذب آن با طیف‌نورسنج خوانده شد.

λ_{\max} دارو سفتریاکسون

به منظور تعیین λ_{\max} محلول ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر از داروی سفتریاکسون تهیه و طیف جذبی آن با دستگاه UV-Vis ثبت شد. نتیجه‌ها نشان داد که λ_{\max} این دارو در ۲۴۱ نانومتر است. همچنین، بازده حذف نانوجندسازه با معادله ۱ محاسبه شد.

مکانیکی و میله شیشه‌ای را داخل بشر قرار داده تا محلول همزده شود. لازم به ذکر است که این مراحل از ابتدا تحت گاز نیتروژن بود. پس از اینکه محلول موردنظر به مدت ۳ الی ۴ دقیقه همزده شد، ۲ گرم آهن (III) کلرید به محلول افزوده و آنقدر همزده شد تا به‌طور کامل حل و محلول مسی رنگ شود. در ادامه ۰/۶۵ گرم استرانسیم هگزافریت به محلول افزوده و همزمان با کارکردن همزن مکانیکی، محلول سدیم بور هیدرید از داخل یک بورت با سرعت یک قطره در ثانیه به محتویات بشر افزوده می‌شد تا سدیم بور هیدرید داخل بورت تمام شود. سپس، محتویات داخل بشر به مدت ۲ تا ۳ دقیقه همزده شد و در آخر شیر گاز نیتروژن بسته شد. رسوب سیاه رنگی که تشکیل شده بود، با یک پمپ خلأ و یک قیف بوخنر صاف شد.

تهیه گرافن اکسید

برای تهیه گرافن اکسید، ۰/۱ گرم گرافن در حمام آب یخ به ارلنی شامل ۰/۹ میلی‌لیتر نیتریک اسید و ۱/۸ میلی‌لیتر سولفوریک اسید، افزوده شد. سپس، ارلن بر همزن مغناطیسی گذاشته شد و به مدت ۱ ساعت در دمای صفر درجه سلسیوس در حمام آب یخ به‌طور کامل همزده شد. نمونه بر همزن مغناطیسی به مدت ۱ روز در دمای اتاق به‌طور کامل مخلوط شد. سپس، محلول صاف و با آب ۲ بار تقطیر شسته شد تا pH نمونه خنثی شود. ماده به دست آمده در 60°C خشک شد. به این ترتیب گرافن اکسید تهیه شد [۲۶].

تهیه نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی / هگزافریت استرانسیم / گرافن

به منظور تهیه نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی-هگزافریت استرانسیم-گرافن، ۰/۱ گرم گرافن اکسید و ۰/۱۸ گرم هگزافریت استرانسیم در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر حل و به مدت ۴ ساعت بر همزن مغناطیسی قرار داده شد. با گریزانه، گرافن اکسید مغناطیسی به دست آمده

که در آن، Y ، β^0 ، β_i ، β_{ii} و β_{ij} به ترتیب متغیر پاسخ، ضریب ثابت، ضریب خطی، ضریب مرتبه دوم و ضریب تعامل هستند. افزون‌براین، X_i و X_j متغیرهای مستقل را نشان می‌دهند و ε خطای باقی‌مانده است [۲۹].

جدول ۱ سطح‌های کدگذاری شده برای عامل‌های موردبررسی

| سطوح کدگذاری شده | | | متغیرها |
|------------------|------|------|--|
| -۱ | ۰ | +۱ | |
| ۰٫۰۵ | ۰٫۱۰ | ۰٫۱۵ | مقدار جاذب (A) (گرم بر لیتر) |
| ۵ | ۷ | ۹ | pH (B) |
| ۵ | ۱۰ | ۱۵ | غلظت آلاینده (C) (گرم بر میلی‌لیتر) |

نتیجه‌ها و بحث

شناسایی و تعیین ساختار

شکل ۱-الف طیف FTIR نمونه هگزافریت استرانسیم را نشان می‌دهد. در این شکل دو نوار جذبی در ۴۳۷ و ۵۵۱ تا 596 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های خمشی و کششی پیوند Fe-O است. آهن در حفره‌های هشت‌وجهی و چهاروجهی بین یون‌های اکسید در شبکه $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ قرار گرفته است. تفاوت این دو به دلیل تفاوت طول پیوند Fe-O در این جایگاه است. (هرچه طول پیوند کمتر شود فرکانس نوارجذبی ارتعاشی افزایش می‌یابد). همچنین، پیک مشاهده شده در 3419 cm^{-1} مربوط به H_2O است [۳۰]. در شکل ۱-ب، پس از افزودن آهن صفر به هگزافریت استرانسیم، پیک‌ها در ۵۵۱ تا 596 ، 437 و 3419 cm^{-1} دوباره تکرار شده با این تفاوت که شدت آن کاهش پیدا کرده است. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد که پیوند شیمیایی جدیدی رخ نداده است زیرا پیک جدیدی ظاهر نشده و تنها شدت پیک‌ها تغییر یافته است. طیف FTIR استاندارد گرافن اکسید در شکل ۱-ج نمایش داده شده است [۳۱]. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که شدت و عرض پیک پهن در cm^{-1}

$$(1) \quad \text{درصد بازده حذف} = ((C_0 - C_e) / C_0) \times 100$$

که در آن، C_0 و C_e به ترتیب غلظت اولیه و غلظت در حالت تعادل سفتریاکسون بر حسب میلی‌گرم بر لیتر در محلول را نشان می‌دهند [۲۷].

طراحی آزمایش

روش سطح پاسخ، روشی کارآمد برای بهینه‌سازی عامل‌های چند متغیره است که مقدار بهینه متغیرهای مستقل را که بیشینه یا کمینه پاسخ را دارد، تعیین می‌کند و به دنبال آن یک مدل ریاضی که بهترین برازش را با اطلاعات به‌دست آمده از طراحی تجربی دارد، به‌دست می‌آید. در این مطالعه همبستگی بین سه عامل مستقل شامل مقدار جاذب (A)، pH (B)، غلظت اولیه دارو (C) و برهم‌کنش آن‌ها در حذف داروی سفتریاکسون از آب با روش باکس بنکن بررسی شد. بر همین پایه هر عامل کدگذاری و گستره بالا و پایین آن نیز مشخص شد. نتیجه‌ها در جدول ۱ گزارش شده است. همچنین، تعداد آزمایش‌ها با روش باکس بنکن برپایه معادله ۲ به‌دست آمد.

$$(2) \quad N = 2K(K-1) + C_0$$

که در آن، K و C_0 به ترتیب تعداد آزمایش‌ها و تعداد تکرارها را در نقطه مرکز نشان می‌دهند [۲۸]. لازم به ذکر است که مقدار K و C_0 در معادله، ۳ در نظر گرفته شد. افزون‌براین، مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم به‌عنوان بهترین مدل با تحلیل واریانس، از راه معادله ۳ انتخاب شد.

$$(3) \quad Y = \beta^0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} X_j + \varepsilon$$

نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی (JARC)

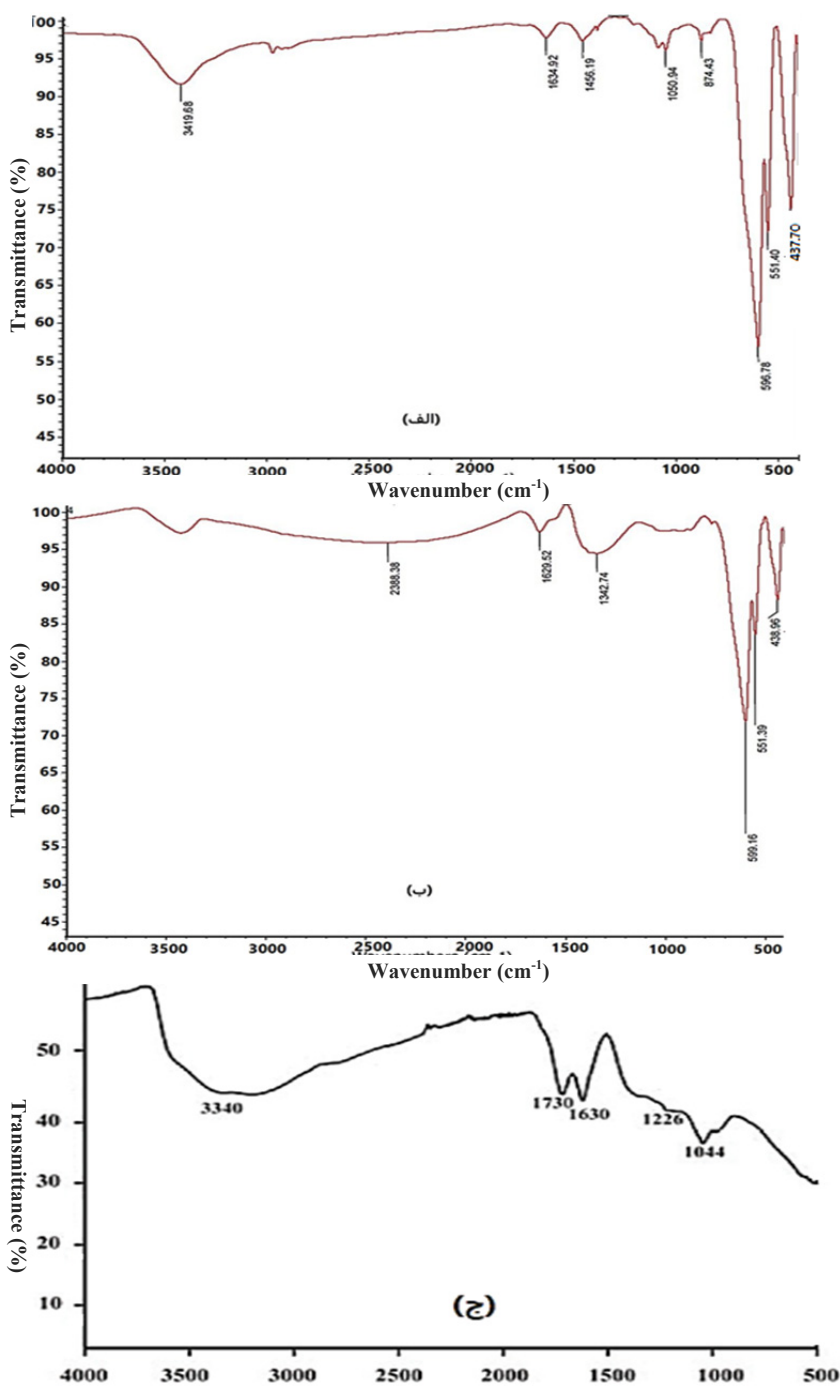
ساختار هگزافریت استرانسیم نوع ۸۸ به فرمول $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ همخوانی دارد. لازم به ذکر است که پیک‌های ظاهر شده در 2θ مربوط به 30.40 ، 32.38 ، 34.24 ، 37.19 و 56.49° است [۳۳]. ویژگی‌های بلورشناسی شامل عامل‌های a و c برپایه معادله ۴ به ترتیب برابر با $5/85$ و $23/03$ آنگستروم است. در این معادله، d فاصله بین صفحه‌ای و h ، k و l مربوط به شاخص‌های میلر هستند [۳۴].

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \left(\frac{l^2}{c^2} \right) \quad (4)$$

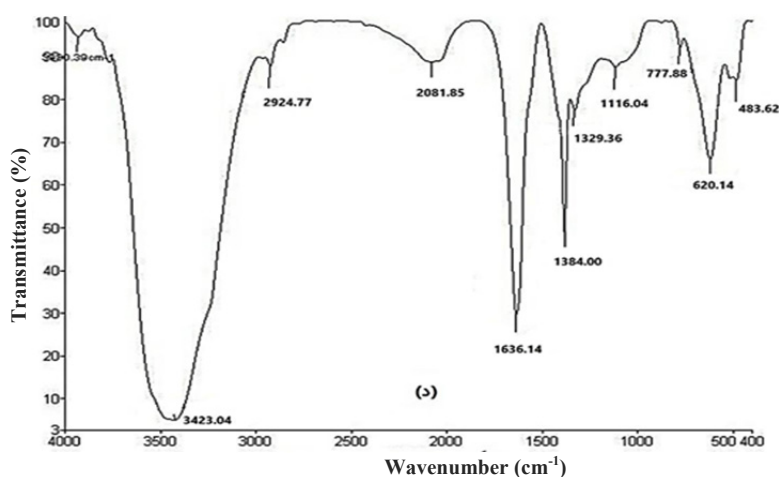
همچنین، برپایه معادله دبای شرر، مقدار D (اندازه ذره) برابر با $60/6460$ به دست آمد. در شکل ۲-ب پراش پرتو ایکس نانوجندسازه آهن صفر-هگزافریت استرانسیم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اثر نشان دادن آهن صفر بر هگزافریت استرانسیم، محل پیک‌های اصلی تغییر نکرده و تنها شدت پیک‌ها تغییر پیدا کرده است. شکل ۲-ج، الگوی XRD برای گرافن اکسید را نشان می‌دهد. برپایه این الگو، یک پیک بلند در زاویه $11/87$ درجه تنها پیک موجود و مشخص برای اکسید گرافن است [۳۶]. با محاسبه پهنای پیک در این زاویه و با به کارگیری معادله شرر، اندازه بلورها، $7/1$ نانومتر به دست آمد. شکل ۲-د، الگوی XRD مربوط به نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی-هگزافریت استرانسیم-گرافن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این الگو مشخص است، پیک‌های $30/35$ ، $32/42$ ، $34/36$ ، $37/36$ و $56/29^\circ$ مربوط به هگزافریت استرانسیم است که دوباره پدیدار شده است. از مقایسه شکل ۲-ج با شکل ۲-د می‌توان به این نتیجه رسید که گرافن به خوبی در نانوجندسازه مورد نظر قرار گرفته است.

3400 1 مربوط به گروه OH آب است. همچنین، پیک‌های مشاهده شده در 1044 ، 1226 ، 1730 و 1630 cm^{-1} به ترتیب مربوط به پیوند C-O، پیوند C-OH، ارتعاش‌های کششی C=O و پیوند C=C است که جزء ساختار اصلی و هگزگونال گرافن به حساب می‌آیند. این پیک‌ها در مجموع، ساختار گرافن اکسید را تایید می‌کنند [۳۲]. شکل ۱-د، طیف FTIR مربوط به نانوجندسازه آهن صفر-هگزافریت استرانسیم-گرافن را نشان می‌دهد. از مقایسه طیف FTIR گرافن اکسید و نانوجندسازه سه جزئی می‌توان به این نتیجه دست یافت که گرافن اکسید به خوبی بر نانوجندسازه آهن صفر/هگزافریت استرانسیم قرا گرفته است، زیرا پیک‌هایی که در طیف FTIR استاندارد گرافن اکسید وجود داشته است، در نانوجندسازه سه جزئی نیز به خوبی ظاهر شده است و تنها به دلیل پیوند گرافن اکسید با عوامل دیگر، گرافن اکسید کاهش یافته و تبدیل به گرافن می‌شود. بنابراین، پیک‌ها در نانوجندسازه سه جزئی کمی جابه‌جا شده‌اند. بنابراین، پیک‌های 3423 ، $1116/04$ ، $1329/26$ ، 1636 و 1384 cm^{-1} به ترتیب مربوط به گروه OH آب، پیوند C-O، پیوند C-OH، ارتعاش‌های کششی C=O و پیوند C=C است. همچنین، پیک‌های ظاهر شده در $485/62$ و $620/14 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به حضور هگزافریت استرانسیم است.

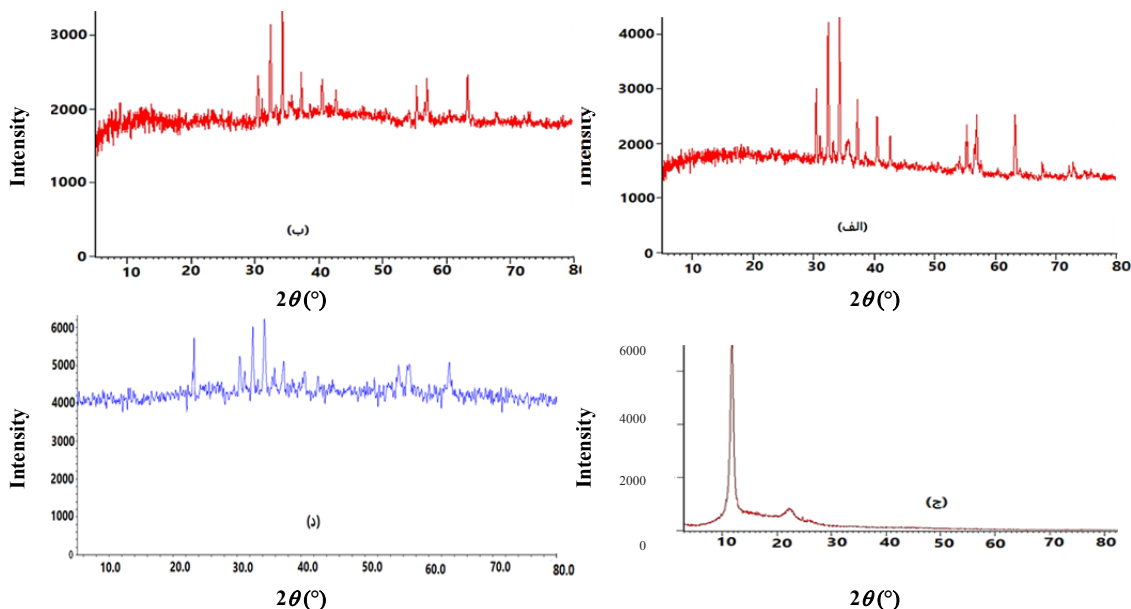
شکل ۲-الف پراش پرتو ایکس مربوط به هگزافریت استرانسیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، هر ماده بلوری الگوی پراش پرتو ایکس مخصوص خودش را دارد که در این ماده الگوی پراش آن با الگوی پراش هگزافریت استرانسیم با فرمول $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ همخوانی دارد. یعنی هگزافریت استرانسیم به خوبی تهیه شده است. بنابراین، در گستره 2θ ، ۵ تا ۸۰ درجه محل پیک‌ها با کارت استاندارد (ICCD card No-01-084-1543) مربوط به



شکل ۱ طیف‌های FTIR هگزا فريت استرانسیم (الف)، آهن صفر-هگزا فريت استرانسیم (ب)، گرافن اکسید (ج) و نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی- هگزا فريت استرانسیم-گرافن (د)



ادامه شکل ۱ طیف‌های FTIR هگزافریت استرانسیم (الف)، آهن صفر-هگزافریت استرانسیم (ب)، گرافن اکسید (ج) و نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی- هگزافریت استرانسیم-گرافن (د)



شکل ۲ الگوهای پراش پرتو ایکس هگزافریت استرانسیم (الف)، آهن صفر-هگزافریت استرانسیم (ب)، گرافن اکسید (ج) و نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی- هگزافریت استرانسیم-گرافن (د)

جذب شده‌اند. شکل ۳-ب تصویر SEM مربوط به نانوجندسازه آهن صفر- هگزافریت استرانسیم را نشان داده است.

شکل ۳-الف تصویرهای SEM مربوط به هگزافریت استرانسیم را نشان داده است. در این شکل‌ها ذره‌های هگزافریت استرانسیم به صورت بلورهای هگزاگونال (شش گوشه) دیده می‌شود که به دلیل ماهیت مغناطیسی به هم

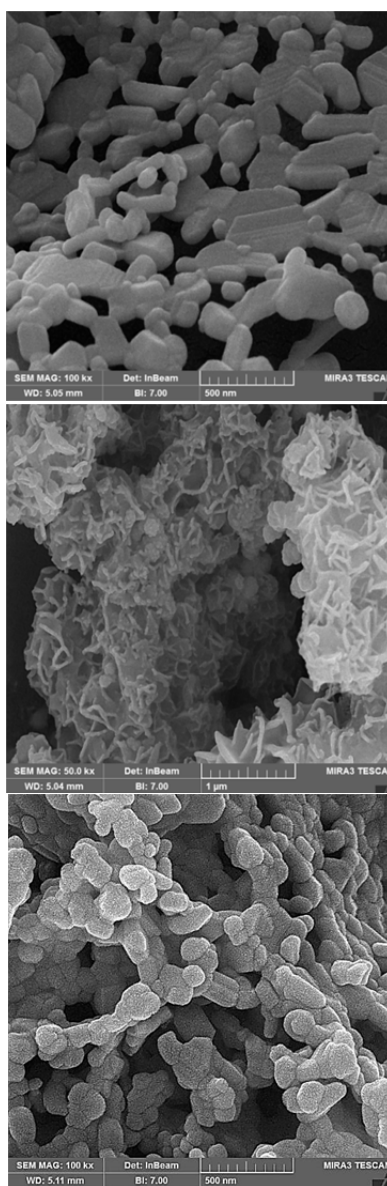
تصویر SEM مربوط به نانوجندسازه آهن صفر- هگزافریت استرانسیم- گرافن را نشان می‌دهد. در این شکل بلورهای هگزائگونال هگزافریت استرانسیم به خوبی دیده می‌شود. همچنین، ذره‌های آهن صفر ظرفیتی، هگزافریت استرانسیم را احاطه و بر روی گوشه‌های این شش ضلعی قرار گرفته‌اند. افزون بر آن، گرافن به شکل لانه زنبوری (شش ضلعی) و لایه لایه در کنار هگزافریت استرانسیم و آهن صفر ظرفیتی قرار گرفته است. این موضوع حاکی از آن است که نانوجندسازه سه جزئی آهن صفر- هگزافریت استرانسیم- گرافن به خوبی تهیه شده است.

نتیجه طراحی آزمایش باکس بنکن

با روش باکس بنکن، ۱۵ آزمایش طراحی شد. از بین این ۱۵ آزمایش سه آزمایش به منظور بالا بردن بازده کار تکراری بود. در جدول ۲، ۱۵ آزمایش که با نرم افزار طراحی شده، نشان داده شده است. برپایه این جدول، هریک از آزمایش‌ها تحت شرایط مشخص انجام و بازده حذف مربوط به هریک از آزمایش‌ها محاسبه شد. همچنین، مقدار بازده حذف نیز با نرم افزار دیزاین اکسپرت پیش‌بینی شد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که گستره حذف دارو سفتریاکسون از ۱۹٪ تا ۹۹٪ است و بیشترین بازده حذف در مقدار جاذب ۰/۱۵ گرم بر لیتر، pH برابر با ۵ و غلظت آلاینده ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر است.

تجزیه و تحلیل آماری

با تجزیه و تحلیل وردایی (آنوا) تاثیر هریک از عامل‌ها و برهم‌کنش آن‌ها از راه مقادیرهای P و F بررسی شد. همچنین، درجه آزادی، مجموع مربع‌ها و میانگین مربع‌ها برای هریک از عامل‌ها محاسبه شد. بر این پایه عامل‌هایی که مقدار P کمتر از ۰/۰۵ و مقدار F بالاتر از ۰/۰۵ دارند، معنادار و چنانچه مقدار P بزرگتر از ۰/۰۵ داشته باشند، معنادار نیستند. در جدول ۳ نتیجه‌های به دست آمده از تجزیه و تحلیل وردایی آورده شده است. نتیجه‌ها حاکی از آن است



(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۳ تصویرهای SEM هگزافریت استرانسیم (الف)، آهن صفر ظرفیتی- هگزافریت استرانسیم (ب) و نانوجندسازه آهن صفر ظرفیتی- هگزافریت استرانسیم-گرافن (ج)

در این شکل، نانوذره‌های آهن تولیدشده به خوبی با جاذبه‌های مغناطیسی به سطح بلور ذره‌های هگزافریت استرانسیم چسبیده و روی آن را پوشش داده‌اند. شکل ۳-ج

کمتر از ۰/۰۵ است معنادار بوده و مستقل عمل کرده است. افزون بر این، به کمک تجزیه و تحلیل وردایی $R^2=۰.۹۹۰۹$ و $R_{adj}=۰.۹۷۳۲$ به دست آمد. باتوجه به ضرایب به دست آمده و جایگذاری آن در معادله ۳، معادله ۶ به دست آمد.

که مدل دارای مقدارهای P و F به ترتیب برابر صفر و ۵۷/۵۵ است که نشان‌دهنده معنادار بودن مدل است. بر همین پایه غلظت جاذب، pH، غلظت آلاینده، برهم‌کنش غلظت جاذب (A^2) و برهم‌کنش pH (B^2) به دلیل اینکه مقدار P

جدول ۲ نتیجه‌های به‌دست آمده از روش BBD و برهم‌کنش بین عواملها

| آزمایش | مقدار جاذب (A)، گرم بر لیتر | | pH (B) | غلظت آلاینده (C)، گرم بر میلی‌لیتر | |
|--------|--------------------------------|------------|-----------|---------------------------------------|------------|
| | پیش‌بینی | آزمایشگاهی | | پیش‌بینی | آزمایشگاهی |
| ۱ | +۱ | -۱ | ۰ | ۹۶/۲۵ | ۹۹/۰۰ |
| ۲ | +۱ | ۰ | -۱ | ۹۱/۲۵ | ۹۳/۰۰ |
| ۳ | ۰ | -۱ | +۱ | ۶۸/۰۰ | ۶۶/۰۰ |
| ۴ | -۱ | ۰ | -۱ | ۸۰/۲۵ | ۸۱/۰۰ |
| ۵ | +۱ | +۱ | ۰ | ۲۵/۷۵ | ۲۲/۰۰ |
| ۶ | ۰ | ۰ | ۰ | ۶۷/۰۰ | ۶۷/۰۰ |
| ۷ | -۱ | ۰ | +۱ | ۵۷/۷۵ | ۵۶/۰۰ |
| ۸ | ۰ | +۱ | +۱ | ۱۵/۵۰ | ۲۰/۰۰ |
| ۹ | ۰ | +۱ | -۱ | ۲۷/۰۰ | ۲۹/۰۰ |
| ۱۰ | -۱ | -۱ | ۰ | ۷۹/۲۵ | ۸۳/۰۰ |
| ۱۱ | -۱ | +۱ | ۰ | ۲۱/۷۵ | ۱۹/۰۰ |
| ۱۲ | +۱ | ۰ | +۱ | ۶۷/۷۵ | ۶۷/۰۰ |
| ۱۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۶۷/۰۰ | ۶۹/۰۰ |
| ۱۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۶۷/۰۰ | ۶۷/۰۰ |
| ۱۵ | ۰ | -۱ | -۱ | ۱۰۰/۰۰ | ۹۸/۰۰ |

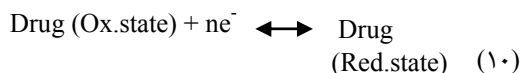
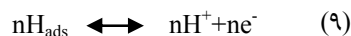
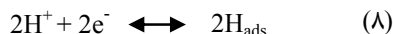
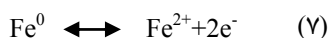
$$Y = 67 + 5.25 X_1 - 32 X_2 - 11.50 X_3 + 4.88 X_1^2 - 16.12 X_2^2 + 2.37 X_3^2 - 3.25 X_1 X_2 - 0.250 X_1 X_3 + 5.75 X_2 X_3 \quad (۶)$$

از روند خاصی پیروی کند. پراکندگی باقی‌مانده‌ها از روند خاصی پیروی نکردند و این موضوع ثابت‌بودن وردایی‌ها را اثبات کرد. ارتباط بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده نیز رسم شد. نتیجه نشان داد که بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده (با $R^2=۰.۹۹۰۹$)، نزدیکی زیادی وجود داشت.

تحلیل و ارزیابی باقی‌مانده مدل

برای بررسی کیفیت مدل، نمودار باقی‌مانده‌ها رسم شد. این بررسی نشان داد که باقی‌مانده‌ها به‌صورت تصادفی حول محور تعیین شدند. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که پخش‌شدن باقی‌مانده‌ها به‌تقریب نرمال است. برای بررسی فرض دوم، کفایت مدل رسم شد. این نمودار برای بررسی ثابت‌بودن وردایی‌ها به کار می‌رود. تغییرهای باقی‌مانده‌ها نباید

هیدروژن‌های رادیکالی برپایه سازوکارهای ۷ تا ۱۰، واکنش‌پذیری افزایش یافته و در نتیجه بازده حذف داروی سفتریاکسون از آب نیز افزایش پیدا می‌کند [۳۷].



در شکل ۴-ب، مقدار pH در ۷ ثابت نگه داشته شده است و تاثیرها مقدار جاذب و غلظت آلاینده به ترتیب در گستره‌های ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ گرم بر لیتر و ۵ تا ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر بر بازده حذف بررسی شد. همان‌طور که مشخص است با افزایش مقدار جاذب، تعداد مکان‌های فعال برای جذب افزایش می‌یابد و منجر به افزایش عملکرد حذف سفتریاکسون می‌شود. همچنین، با کاهش مقدار آلاینده مقدار پاسخ افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۴-ج غلظت آلاینده در ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر ثابت نگه‌داشته شده و تاثیر مقدار جاذب و pH به ترتیب در گستره‌های ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ گرم بر لیتر و ۵ تا ۹ بر بازده حذف مطالعه شد. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار جاذب و کاهش pH مقدار پاسخ افزایش پیدا کرده است.

مقایسه جاذب تهیه‌شده با سایر جاذب‌ها

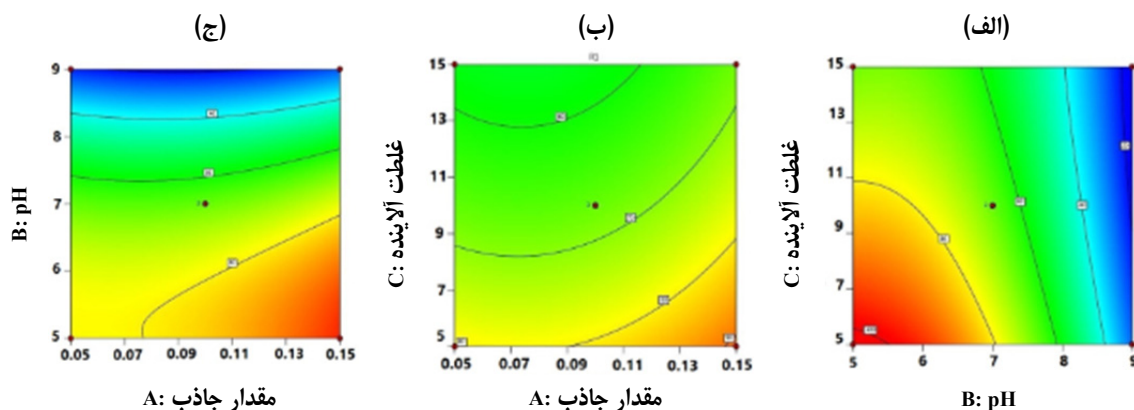
جدول ۴ مقایسه جاذب سه جزئی تهیه‌شده در این مطالعه با سایر جاذب‌ها که برای حذف انواع پادزیست‌ها از محیط آبی استفاده شده است را نشان می‌دهد. این مقایسه بیانگر آن است که چندسازه سه جزئی با توانایی ۹۹٪ حذف سفتریاکسون از محیط آبی بیشترین درصد حذف را نسبت به سایر جاذب‌ها داشته است. این مقدار حذف را می‌توان به واکنش تخریب کاهشی که با این جاذب رخ می‌دهد، نسبت داد. نتیجه‌ها نشان‌دهنده توانایی بالای این جاذب برای حذف آلاینده‌ها است.

جدول ۳ نتیجه‌های به‌دست آمده از تجزیه و تحلیل وردایی (آنوا) مربوط به داده‌های تجربی

| مدل | DF | مجموع مربع‌ها | میانگین مربع | مقدار F | مقدار P |
|------------------|----|---------------|--------------|---------|---|
| | ۹ | ۱۰۶۴۳/۹۸ | ۱۱۸۱/۶۶ | ۵۷/۵۰ | ۰/۰۰۰۲ |
| مقدار جاذب (A) | ۱ | ۲۱۰/۱۳ | ۲۱۰/۱۳ | ۱۰/۲۳ | ۰/۰۲۴۱ |
| pH (B) | ۱ | ۸۰۶۴/۵۰ | ۸۰۶۴/۵۰ | ۳۹۲/۴۳ | ۰/۰۰۰۱ |
| غلظت آلاینده (C) | ۱ | ۱۰۳۵/۱۳ | ۱۰۳۵/۱۳ | ۵۰/۳۷ | ۰/۰۰۰۹ |
| AB | ۱ | ۳۶ | ۳۶ | ۱/۷۵ | ۰/۲۴۲۹ |
| AC | ۱ | ۰/۲۵۰۰ | ۰/۲۵۰۰ | ۰/۰۱۲۲ | ۰/۹۱۶۵ |
| BC | ۱ | ۱۲۱ | ۱۲۱ | ۵/۸۹ | ۰/۰۵۹۶ |
| A ² | ۱ | ۸۷/۷۵ | ۸۷/۷۵ | ۴/۲۷ | ۰/۰۹۳۷ |
| B ² | ۱ | ۹۹۰/۰۶ | ۹۹۰/۰۶ | ۴۸/۱۸ | ۰/۰۰۱۰ |
| C ² | ۱ | ۲۰/۸۳ | ۲۰/۸۳ | ۱/۰۱ | ۰/۳۶۰۳ |
| باقی‌مانده | ۵ | ۱۰۲/۷۵ | ۲۰/۵۵ | | |
| عدم برازش | ۳ | ۱۰۲/۷۵ | ۳۴/۲۵ | ۱/۶۶ | ۰/۲۸۹۰۷ |
| خطای خالص | ۲ | ۰/۰ | ۰/۰ | | |
| مجموع | ۱۴ | ۱۰۷۳۷/۷۳ | | | |
| | | | | | R ² = ۰/۹۹۰۹ R ² _{adj} = ۰/۹۷۳۲ R ² (پیش‌بینی) = ۰/۸۴۶۹ |

نمودارهای دوعبدهی سطح پاسخ

برای بررسی نقاط بهینه، تاثیرگذاری هر یک از عواملها و برهم‌کنش آن‌ها در حذف داروی سفتریاکسون، نمودارهای ۲ بعدی رسم شد. در شکل ۴-الف غلظت جاذب در ۰/۱ گرم بر لیتر ثابت نگه‌داشته‌شده و تاثیرات pH در گستره ۵ تا ۹ و غلظت آلاینده در گستره ۵ تا ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر بر بازده حذف بررسی شد. همان‌طور که مشخص است با کاهش pH و کاهش مقدار آلاینده مقدار پاسخ افزایش پیدا کرده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در pH اسیدی به دلیل تولید



شکل ۴ نمودارهای پاسخ سطح مربوط به برهم‌کنش غلظت آلاینده و pH (الف)، غلظت آلاینده و مقدار جاذب (ب) و pH و مقدار جاذب (ج)

جدول ۴ مقایسه جاذب پیشنهادی با سایر جاذب‌ها

| مرجع | ظرفیت جذب (میلی‌گرم بر گرم) | درصد حذف | آلاینده | جاذب |
|-------------|-----------------------------|----------|--------------------------|--|
| [۳۸] | --- | >۸۵ | سفتربیاکسون و سفادروکسیل | نانوذره‌ها آهن صفر- مس* |
| [۳۹] | ۲۰۶,۰۰۲ | ۹۲,۳۱ | آمپی‌سیلین | ماده کربنی اصلاح شده با نیتروژن مایع** |
| [۴۰] | ۱۲,۷ | ۷۳,۰۰ | آمپی‌سیلین | کربن فعال*** |
| [۴۱] | ۶,۲۷ | ۹۲,۰۰ | آموکسی‌سیلین | ساکارومایسس سرویزیه**** |
| مطالعه حاضر | ۸,۰۸۴ | ۹۸,۰۰ | سفتربیاکسون | آهن صفر ظرفیتی- هگزافریت استرانسیم-گرافن |

* zero-valent copper nanoparticle (nZVC)

** Liquid Nitrogen-Treated Carbon Material

*** Activated carbon

**** Saccharomyces cerevisiae

نتیجه‌گیری

حذف سفتربیاکسون با نانوجندسازه تهیه‌شده با روش سطح پاسخ برپایه باکس بنکن در نظر گرفته شد. سپس، کفایت مدل با تجزیه و تحلیل وردایی مطالعه شد. تخریب کاهشی و جذب آلاینده به‌طور هم‌زمان با نانوجندسازه انجام شد. به همین علت بازده بالایی را در حذف دارو از محلول آبی نشان داد که کارایی بالا این جاذب را تایید می‌کند.

نتیجه‌های به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که نانوجاذب آهن صفر ظرفیتی-هگزافریت استرانسیم-گرافن با موفقیت تهیه شد و به عنوان یک جاذب کارآمد، کم هزینه و دوست‌دار محیط‌زیست برای حذف دارو سفتربیاکسون از محیط آبی استفاده شد. تمام عامل‌ها شامل دوز جاذب، pH، غلظت اولیه سفتربیاکسون برای بررسی نقش این عوامل در

مراجع

[1] Scold, O.; “Antibiotics and Antibiotics Resistance”, Wiley, New Jersey, 2011.

[2] Sayiner, H.S.; Bakir, T.; Kandemirli, F.; Bulgarian Chemical Communications 50, 398 – 404, 2018.

- [3] Zhao, Y.; Liang, X.; Wang, Y.; Shi, H.; Liu, E.; Fan, J.; Hu, X.; Journal of Colloid and Interface Science 523, 7-17, 2018.
- [4] Pinto, S.; Lanza, G.D.; Ardisson, J.D.; Lago, R.M.; Journal of the Brazilian Chemical Society 30, 1-8, 2018.
- [5] Homem, V.; Santos, L.; Journal of Management 92, 2304-2347, 2011.
- [6] Khorsandi, H.; Teymori, M.; Aghapour, A.A.; Jafari, S.J.; Taghipour, S.; Bargeshadi, R.; Applied Water Science 9, 81, 2019.
- [7] Luiz Tambosi, J.; Felix de Sena, R.; Favier, M.; Desalination 261, 148-156, 2010.
- [8] Fatta-Kassinos, D.; Meric, S.; Nikolaou, A.; Analytical and Bioanalytical Chemistry 399, 251-275, 2011.
- [9] Simazaki, D.; Fujiwara, J.; Manabe, S.; Matsuda, M.; Asami, M.; Kunikane, S.; Water Science and Technology 58, 1129-1135, 2008.
- [10] Nasuhoglu, D.; Rodayan A.; Berk, D.; Yargeau, V.; Chemical Engineering Journal 189-190, 41-48, 2012.
- [11] Davila-Estrada, M.; Ramirez-Garcia, J.J.; Solache-Rios, M.J.; Gallegos-Perez, J.L.; Water, Air, & Soil Pollution 229, 123, 2018.
- [12] Arya, V.; Philip, L.; Microporous and Mesoporous Materials 232, 273-280, 2016.
- [13] Teixeira, S.; Delerue-Matos, C.; Santos, L.; Science of the Total Environment. 646, 168-176, 2019.
- [14] Ribeiro de Sousa, D.N.; Insa, S.; Aparecido Mozeto, A.; Petrovic, M.; Faheina Chaves, T.; Sergio Fadini, P.; Chemosphere 205, 137-146, 2018.
- [15] Zhang, S.; Dong, Y.; Yang, Z.; Yang, W.; Wu, J.; Dong, C.; Chemical Engineering Journal 304, 325-334, 2016.
- [16] Al-Khateeb, L.A.; Almotiry, S.; Abdel Salam, M.; Chemical Engineering 248, 191-199, 2014.
- [17] Li, J.; Dou, X.; Qin, H.; Sun, Y.; Yin, D.; Guan, X.; Water Research 148, 70-85, 2019.
- [18] Xiaoshu, L.V.; Yunjun, H.; Jie, T.; Tiantian, S.; Guangming, J.; Xinhua, X.; Chemical Engineering Journal 218, 55-64, 2013.
- [19] Tang, X.; Wang, Y.M.; Luo, Z.; Wang, L.S.; Hong, R.Y.; Feng, W.G.; Progress in Organic Coatings 75, 124-130, 2012.
- [20] Ashiq, M.N.; Qureshi, R.B.; Malana, M.A.; Ehsan, M.F.; Journal of Alloys and Compounds 651, 266-272, 2015.
- [21] Shi, L.; Yang, J.; Huang, Z.; Li, J.; Tang, Z.; Li, Y.; Applied Surface Science 276, 437-246, 2013.
- [22] Bezerra, M.A.; Santelli, R.E.; Oliveira, E.P.; Villar, L.S.; Escalera, L.A.; Talanta 76, 965-977, 2008.
- [23] Hasani, K.; Peyghami, A.; Moharrami, A.; Vosoughi, M.; Dargahi, A.; Arabian Journal of Chemistry 13, 6122-6139, 2020.
- [24] Ferreira, S.L.C.; Bruns, R.E.; Ferreira, H.S.; Matos, G.D.; Analytica Chimica Acta 597, 179-186, 2007.
- [25] Kumar Sahoo, J.; Konar, M.; Rath, J.; Kumar, D.; Sahoo, H.; Separation Science and Technology 55, 2-17, 2019.
- [26] Acik, M.; Lee, G.; Mattevi, C.; Pirkle, A.; Wallace, R.M.; Chhowalla, M.; The journal of Physical Chemistry 115, 19761-19781, 2011.
- [27] Kumari, S.; Mankotia, D.; Chauhan, G.S.; Journal of Environmental Chemical Engineering 4, 1126-1136, 2016.
- [28] Gong, W.; Zhang, Y.; Zhang, Y.J.; Xu, G.; Wei, X.; Lee, K.; Journal of Central South University 14, 196-201, 2007.
- [29] Sohrabi, M.R.; Amiri, S.; Fard Masoumi, H.R.; Moghri, M.; Journal of Industrial and Engineering Chemistry 20, 2535-2542, 2014.
- [30] Kong, S.; Zhang, P.; Wen, X.; Particuology 6, 185-190, 2008.
- [31] Rattana, T.; Chaiyakun, S.; Witit-anun, N.; Nuntawong, N.; Chindaudom, P.; Oaew, S.; Kedkeaw, C.; Limsuwan, P.; Procedia Engineering 32, 759 - 764, 2012.
- [32] Lurf, A.; He, H.; Forster, M.; Klinowski, J.; The Journal of Physical Chemistry B. 102, 4477-4482, 1998.
- [33] Hessien, M.M.; Rashad, M.M.; El-Barawy, K.; Journal of Magnetism and Magnetic Material 320, 336-343, 2008.

- [34] Nikzad, A.; Ghasemi, A; Kavosh Tehrani, M.; Gordani, G.R.; Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 28, 3579–3586, 2015.
- [35] Monshi, A.; Foroughi, M.R.; Monshi, M.R.; World journal of Nano Science and Engineering 2, 154-160, 2012.
- [36] Su, C.Y.; Xu, Y.; Zhang, W.; Zhao, J.; Tang, X.; Tsai, C.H; Chemistry of Material 21, 5674-80, 2009.
- [37] Sabouri, M.R.; Sohrabi, M.R.; Zeraatkar Moghaddam, A.; cChemistry Select 5, 369-378, 2020.
- [38] Oliveira, L.M.; Nascimento, M.A.; Guimaraes, Y.; Oliveira, A.F.; Silva, A.A.; Lopes, R.P.; Journal of the Brazilian Chemical Society 29, 1630-1637, 2018.
- [39] Wu, Y.; Liu, W.; Wang, Y.; Hu, X.; He, Z.; Chen, X.; Zhao, Y.; International Journal of Environmental Research and Public Health 15, 2652, 2018.
- [40] Vecchio, P.; Haro, N.; Souza, F.; Marcilio, N.; Féris, L.A.; Water Science & Technology 79, 2013–2021, 2019.
- [41] Samarghandi, M.R.; Asgari, G.H.; Shokoohi, R.; Dargahi, A.; Arabkouhsar, A.; Desalination and Water Treatment 152, 306–315, 2019.

Synthesis of three-component nanocomposite of zero-valent iron-strontium hexaferrite-graphene for the removal of ceftriaxone antibiotic from aqueous solution and optimization of conditions using Box Behnken design

Shadan Amiri¹, Mahmoud Reza Sohrabi^{2,*}, Fereshteh Motiee³

1. Ph.D student in Analytical Chemistry, Faculty of chemistry, Tehran North branch Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Professor of Analytical Chemistry, Faculty of chemistry, Tehran North branch Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Assistant Prof. of Applied Chemistry, Faculty of chemistry, Tehran North branch Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract: In this study, for the first time, zero-valent iron-strontium hexaferrite-graphene nanocomposite was synthesized and it was investigated as an adsorbent for removing ceftriaxone drug from aqueous solution. Synthesized adsorbents were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD) method. Response Surface Methodology (RSM) based on Box–Behnken Design (BBD) were used to achieve the optimal experimental conditions. Accordingly, the effects of parameters such as adsorbent dosage (0.05-0.15 g L⁻¹), pH (5-9), and initial concentration of ceftriaxone (5-15 mg L⁻¹) on removal efficiency were investigated. A mathematical model was surveyed to predict the performance of drug removal. The results indicated that the second-order polynomial model is an efficient model for the removal of the intended drug. Finally, the Box–Behnken Design predicted that the adsorbent dosage of 0.15 g L⁻¹, pH =5, and the initial drug concentration of 10 mg L⁻¹ with 99% efficiency was the best condition for the removal of ceftriaxone from the aqueous solution.

Keywords: Zero-valent iron, Strontium hexaferrite, Graphene, Ceftriaxone, Box–Behnken design