

سنتز نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی سیلیکاتی کیت-۶ عامل دار شده با گروه آمین برای حذف رنگ راکتیو زرد از محلول‌های آبی

شهاب شریعتی^{۱*}، کامل بخشی پور^۱، سارا رهنما^۲، نگار هاشمی فرد^۲

^۱دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت، ایران

^۲باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۲۴ تاریخ تصحیح: ۹۷/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۸

چکیده

در این مطالعه، مزوپور سیلیکاتی کیت-۶ به صورت شیمیایی بر روی سطح هسته مگنتیت پوشش‌دار شده با سیلیکا سنتز شد و به روش شیمیایی سطح نانوکامپوزیت به‌وسیله گروه‌های آمین عامل‌دار شد تا نانوکامپوزیت مغناطیسی $Fe_3O_4@SiO_2@Kit-6-NH_2$ به‌دست آید. پس از تایید ساختار به‌وسیله روش‌های EDX ، $FT-IR$ ، XRD و SEM کارایی نانوکامپوزیت سنتزی به عنوان یک جاذب برای حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای آزمایشی مؤثر بر کارایی حذف رنگ، به‌وسیله طراحی آزمون تاگوچی بهینه شدند و در شرایط بهینه‌ی آزمایشگاهی (وزن جاذب ۰/۰۸ گرم)، قدرت یونی (بدون افزایش نمک)، pH (۴)، حجم نمونه (۱۰ میلی‌لیتر) و زمان تماس (۲۰ دقیقه) کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ بیش از ۹۷٪ به‌دست آمد. مدل‌های شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، نفوذ درون ذره‌ای و ایلوپیج برای تجزیه و تحلیل پارامترهای سرعت و بررسی سینتیک جذب مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های سینتیک به‌طور کامل با مدل شبه مرتبه دوم مطابقت داشت. همچنین معادلات جذبی با مدل‌های جذبی لانگمویر، فروندلیچ و تمکین مورد بررسی قرار گرفت. پردازش داده‌های جذب رنگ راکتیو زرد بر روی نانوکامپوزیت $Fe_3O_4@SiO_2@Kit-6-NH_2$ پیشنهاد می‌کند که مدل فروندلیچ مطابقت بهتری نسبت به مدل‌های لانگمویر و تمکین داشت. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت $Fe_3O_4@SiO_2@Kit-6$ اصلاح‌شده با گروه‌های آمین می‌تواند به عنوان جاذب کم‌هزینه برای حذف رنگ راکتیو زرد از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت مغناطیسی، حذف، مزوپور، کیت-۶ رنگ راکتیو زرد.

۱- مقدمه

آلودگی آب ناشی از آلاینده‌های محیط زیست یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین معضلاتی است که جهان امروز با آن مواجه است. در این میان نقش صنایع رنگ در آلوده‌سازی محیط زیست انکار ناپذیر است. رنگ‌ها یکی از مهم‌ترین منابع آلاینده آب به شمار می‌روند و در برابر فرآیندهای تصفیه فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی رایج فاضلاب‌ها مقاوم هستند. پساب‌های صنعتی ناشی از صنایع نساجی و عملیات رنگرزی، صنایع غذایی، تولید مواد شیمیایی و ... ممکن است در اثر ارتباط با نهرها و رودخانه‌های طبیعی در آب ایجاد رنگ نمایند.

رنگ‌زاهای راکتیو در بین رنگ‌زاهای مورد استفاده برای رنگ‌ریزی الیاف سلولزی به دلیل داشتن تنوع رنگی، شفافیت بالا، ثبات عالی و کاربرد آسان، جایگاه ویژه‌ای دارند و تحت شرایط قلیایی با الیاف پیوند کووالانسی برقرار می‌کنند. با توجه به مکانیزم عملکرد رنگ‌زاهای راکتیو روی کالاهای سلولزی، همیشه این امکان وجود دارد که درصدی از رنگ‌زای راکتیو مصرفی، به جای سلولز، با مولکول‌های آب موجود در حمام رنگ‌ریزی واکنش داده و هیدرولیز شوند. رنگ آنیونی راکتیو زرد ۱۶۰ (شکل ۱) دسته‌ای از رنگ‌های راکتیو است که در صنعت نساجی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۳].

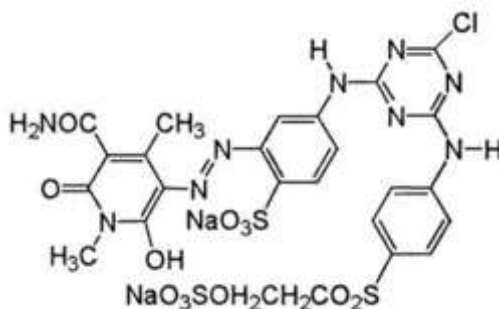
حذف ترکیبات آلاینده آلی مانند رنگ‌ها از فاضلاب‌های صنعتی به‌ویژه فاضلاب‌های نساجی از طریق روش‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و یا تلفیقی از آن‌ها امکان‌پذیر است. این روش‌ها عبارتند از: فیلتراسیون غشایی، انعقاد و لخته‌سازی، فرآیندهای الکتروشیمیایی، فرآیند فنتون، ازن زنی، تجزیه فتوشیمیایی و فتوکاتالیستی و جذب سطحی [۴-۶]. برخی روش‌های ذکر شده به دلیل کارایی اندک و هزینه بالا، برای تصفیه رنگ از پساب‌ها بطور گسترده و در مقیاس وسیع قابل استفاده نیستند [۷]. فرآیند جذب سطحی یک روش مقرون به صرفه و رایج جهت حذف رنگ از فاضلاب‌های صنعتی محسوب می‌شود که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۸ و ۹]. در فرآیند جذب سطحی از جاذب جامد متخلخل استفاده می‌شود که تخلخل با ایجاد منافذ، سطح بسیار زیادی را ایجاد می‌کند. در این شرایط علاوه بر سطح خارجی، تخلخل نیز وجود دارد و هرچقدر سطح جاذب افزایش یابد، مقدار ظرفیت جذب نیز افزایش می‌یابد. بنابراین یک جاذب مؤثر و کارآمد باید دارای نسبت سطح به حجم بالا و گروه‌های عاملی مناسب باشد [۷].

در سال‌های اخیر، مواد نانو ساختار و نانوذرات به علت ارائه رفتار و ویژگی‌های برجسته مورد توجه وسیع جامعه علمی و صنعتی جهان قرار گرفته‌اند. در مقایسه با جاذب‌های با اندازه میکرو، نانوذرات، به‌ویژه نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن Fe_3O_4 (MNPs)* با نسبت سطح به حجم بالایشان و خواص فوق پارامغناطیسی‌شان که باعث کارایی بالای فرآیند جذب و سرعت زیاد جداسازی از محلول با اعمال میدان مغناطیسی خارجی می‌شود، بسیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۰ و ۱۱]. در فرآیند جذب، ویژگی‌های سطح نانوذرات بسیار مهم است. نانوذرات مغناطیسی اصلاح نشده به دلیل جاذبه دوقطبی تمایل به تجمع دارند که منجر به تشکیل ذرات بزرگ‌تر شده که در این صورت حالت کلئیدی آن‌ها از بین رفته، ذرات در محلول ته‌نشین شده و خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. لذا پس از سنتز این ذرات، فرآیند پایداری و سازگاری آن‌ها در محیط آبی صورت می‌گیرد. هم‌چنین سطح نانوذرات می‌تواند به سادگی اصلاح شود و استخراج‌پذیری را امکان‌پذیر کند. سیلیکا پرکاربردترین ماده برای اصلاح سطح نانوذرات است، زیرا علاوه بر آن که از کلوخه‌شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند، باعث پایداری شیمیایی آن‌ها نیز می‌شود و امکان اتصال گروه‌های عاملی از طریق تشکیل پیوند کووالانسی با سیلیکا را میسر می‌سازد [۱۲ و ۱۳]. پس از فرآیند جداسازی،

* Magnetic Nano Particles

آلاینده‌ها را می‌توان با فرآیندهای واجذب به راحتی از نانوذرات مغناطیسی جدا کرد و نانوذرات بازیافت شده را مجدداً مورد استفاده قرار داد [۱۴].

در این تحقیق، حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ از محلول آبی به وسیله نانوذرات مغناطیسی مزوپور کیت-۶ عامل‌دار شده با آمین در روش هم‌رسوبی شیمیایی سنتز شد. جهت محافظت و افزایش پایداری هسته اکسید آهن در شرایط بسیار اسیدی، سطح نانوذرات مغناطیسی با لایه سیلیکا پوشش داده شد. به منظور افزایش مساحت سطح و افزایش کارایی نانوذرات سنتز شده، سطح MNPs به وسیله مزوپور کیت-۶ پوشش داده شد. در ادامه تأثیر متغیرهای مختلف در فرآیند جذب به روش طراحی آرایه اورتاگونال تاگوچی بررسی شد. هم‌چنین مدل‌های ایزوترم و سینتیکی جهت نشان دادن سرعت و ظرفیت فرآیند جذب مورد ارزیابی قرار گرفتند.



شکل ۱- ساختار شیمیایی رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و تجهیزات

رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ ($C_{25}H_{22}ClN_9Na_2O_{12}S_3$) با وزن مولکولی ۸۱۸/۳ گرم بر مول، کلرید آهن (III) ۶ آبه ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)، کلرید آهن (II) ۴ آبه ($FeCl_2 \cdot 4H_2O$)، هیدروکلریک اسید با خلوص ۳۷ درصد، تترا اتیل ارتوسیلیکات، آمونیاک، اتانول، سدیم هیدروکسید، n-بوتانول، تولوئن، پارا تولوئن سولفونیک اسید و ۳- آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان ($H_2NCH_2CH_2CH_2Si(OC_2H_5)_3$)، (APTES) و پلورونیک ۱۲۳ ($EO_{20}-PO_{70}-EO_{20}$) با وزن مولکولی ۵۸۰۰ گرم بر مول به عنوان سورفکتانت غیر یونی. مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت‌های مرک و سیگما - آلدریج خریداری شدند. کپسول گاز نیتروژن با درجه‌ی خلوص ۹۹٪ جهت اکسیژن‌زدایی محلول‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

جهت مطالعه ساختارهای بلوری ترکیبات سنتزی، ذرات به‌وسیله‌ی دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل PRO X'Per MPD PANalytical Company در 2θ بین ۸۰-۱۰ درجه با گام ۰/۰۲۶ و سرعت اسکن ۰/۵ درجه در هر ثانیه مورد بررسی

† Magnetic Mesoporous Nano Particles

قرار گرفتند. به منظور بررسی ساختار شیمیایی MMNPs-NH₂ از دستگاه طیف بینی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FT-IR) ساخت شرکت Shimadzu مدل ۸۹۰۰ استفاده شد. اندازه و ریخت شناسی نانوذرات به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3TESCAN-XMU مورد بررسی قرار گرفت. سنجش غلظت رنگ با استفاده از طیف سنج فرابنفش - مرئی (UV-Vis) دو شعاعی مدل UV-6300 pc ساخت شرکت MAPADA انجام شد. به منظور اندازه گیری pH محلول ها از دستگاه pH متر WTW مدل pH 7110 ساخت کشور انگلستان استفاده شد. به منظور جداسازی مغناطیسی، از یک آهنربای قوی (۱×۳×۵ cm) با قدرت ۱/۴ تسلا استفاده شد.

۲-۲- سنتز نانوذرات مغناطیسی با پوشش سیلیکا

در این تحقیق، نخست نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن (MNPs) به روش هم رسوبی شیمیایی سنتز شدند [۱۵]. بطور خلاصه، ۴ گرم نمک کلرید آهن (II) چهار آبه، ۱۰/۴ گرم نمک کلرید آهن (III) شش آبه و ۱/۷ میلی لیتر اسید کلریدریک (۳۷٪) در ۵۰ میلی لیتر آب یون زدایی شده به منظور تهیه محلول های آهن (II) و آهن (III) کلرید، حل شدند. این محلول با عبور گاز نیتروژن خالص (۹۹٪) به مدت ۱۰ دقیقه، اکسیژن زدایی شد. در ادامه، ۲۵۰ میلی لیتر محلول آمونیاک (۴/۵ مولار) ساخته شد و به مدت ۲۰ دقیقه طی افزایش دما تا ۸۰ درجه سانتی گراد با عبور گاز نیتروژن، اکسیژن زدایی شد. سپس محلول نمک های آهن به آهستگی (طی مدت ۳۰ دقیقه) به وسیله قیف دکانتور تحت گاز نیتروژن و با هم زدن شدید به محلول آمونیاک در دمای بالای ۸۰ درجه سانتی گراد اضافه شد. پس از اتمام واکنش، رسوب سیاه رنگ MNPs به وسیله آهنربای قوی (۱/۴ تسلا) از محلول جدا شد و ۳ بار با آب دو بار تقطیر شست شو داده شد. در نهایت، نانوذرات Fe₃O₄ سنتز شده برای مدت ۱۲۰ دقیقه در ۹۰ درجه سانتی گراد خشک شدند. به منظور افزایش پایداری نانوذرات مغناطیسی Fe₃O₄ در شرایط اسیدی، سطح نانوذرات توسط گروه سیلیکا (SiO₂) پوشش داده شد. به منظور سنتز MNPs Fe₃O₄@SiO₂، به ۲ گرم از نانوذرات اکسید آهن سنتزی، ۶۰۰ میلی لیتر اتانول حاوی آمونیاک (۲۵ میلی لیتر، ۲۵٪ وزنی) اضافه شد و سپس محلول اتانولی تترا اتیل اورتوسیلیکات (۱۰٪/۱۸ حجمی - حجمی) بصورت قطره قطره تحت دمای ۸۰ درجه سانتی گراد و هم زدن شدید به مخلوط اضافه شد. بعد از هم زدن محلول به مدت ۶ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد، نانوذرات Fe₃O₄@SiO₂ ایجاد و چندین بار با مخلوط آب - اتانول (۱:۱) شست شو داده شد. سپس نانوذرات سنتزی قهوه ای رنگ در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت در آون خشک شد.

۲-۳- سنتز نانو کامپوزیت مغناطیسی مزوپور سیلیکاتی کیت-۶ (Fe₃O₄@SiO₂@Kit-6 MMNPs)

پس از انحلال ۱/۲۵ گرم از سورفکتانت پلورونیک ۱۲۳ در ۴۵ میلی لیتر آب دو بار تقطیر، ۱/۳ میلی لیتر محلول هیدروکلریک اسید (۳۷٪ وزنی)، ۱/۵ میلی لیتر ۱ - بوتانول و ۱ گرم از نانوذرات Fe₃O₄@SiO₂ تحت هم زدن شدید به محلول اضافه شدند.

پس از ۱ ساعت، تترا اتیل اورتو سیلیکات (به عنوان منبع سیلیس) به مخلوط اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد با شدت زیاد هم‌زده شد و جهت تشکیل قالب سیلیسی مزوپور، مخلوط به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد اتوکلاو شد. نانوذرات تولیدی پس از فیلتر و شسته شدن، در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا نانومزوپور MMNPs به رنگ قهوه‌ای به دست آید. سپس، به مدت ۶ ساعت داخل کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به منظور کلسینه شدن و خارج شدن سورفکتانت قرار داده شدند [۱۶ و ۱۷].

۲-۴- عامل دار کردن نانوکامپوزیت مغناطیسی مزوپور کیت-۶ با گروه آمین (MMNPs-NH₂)

سنتز نانوکامپوزیت مغناطیسی مزوپور کیت-۶ عامل‌دار شده با گروه آمین طبق روش ذکر شده در مراجع انجام شد [۱۶-۱۸]. در این مرحله ۱/۱ گرم از MMNPs سنتز شده در ۷۵ میلی‌لیتر تولوئن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده شد. سپس ۳/۵ میلی‌گرم از پارا تولوئن سولفونیک اسید و ۵ میلی‌لیتر از اورگانوسیلان (APTES) به مخلوط اضافه شد و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت هم‌زده شد. نانوذرات حاصل فیلتر شدند و چندین بار با اتانول خالص شسته و سپس در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت خشک شدند تا محصول MMNPs-NH₂ به رنگ نارنجی به دست آید.

۲-۵- مطالعات جذب

ابتدا از محلول استوک اولیه رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ (۱۰۰۰ mg L⁻¹) محلولی از رنگ با غلظت ۵۰ mg L⁻¹ در آب دو بار تقطیر تهیه شد. جهت تنظیم pH از محلول‌های سدیم هیدروکسید و هیدروکلریک اسید ۰/۱ مولار استفاده شد و کلیه مراحل آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. مطالعات طیف‌سنجی محلول رنگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی-فرابنفش (UV-Vis) در طول موج بیشینه ۲۶۸ نانومتر انجام شد. کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ طبق رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\%R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه R کارایی حذف، C₀ و C_t به ترتیب غلظت اولیه و غلظت تعادلی رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ می‌باشند.

۲-۶- طراحی آزمون تاگوچی

به منظور تعیین شرایط تجربی بهینه جهت دستیابی به بیشترین کارایی حذف در کمترین زمان ممکن و صرفه جویی در هزینه، روش طراحی آرایه اورتوگونال (OAD) تاگوچی به عنوان طراحی آزمون مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق پنج متغیر مؤثر بر کارایی آزمایش شامل pH، وزن جاذب، قدرت یونی، حجم محلول و زمان تماس جاذب با محلول رنگ و هر یک در چهار سطح بررسی شدند (جدول ۱). در نهایت نتایج آزمایش‌ها با استفاده از تحلیل آماری (ANOVA) تعیین شد.

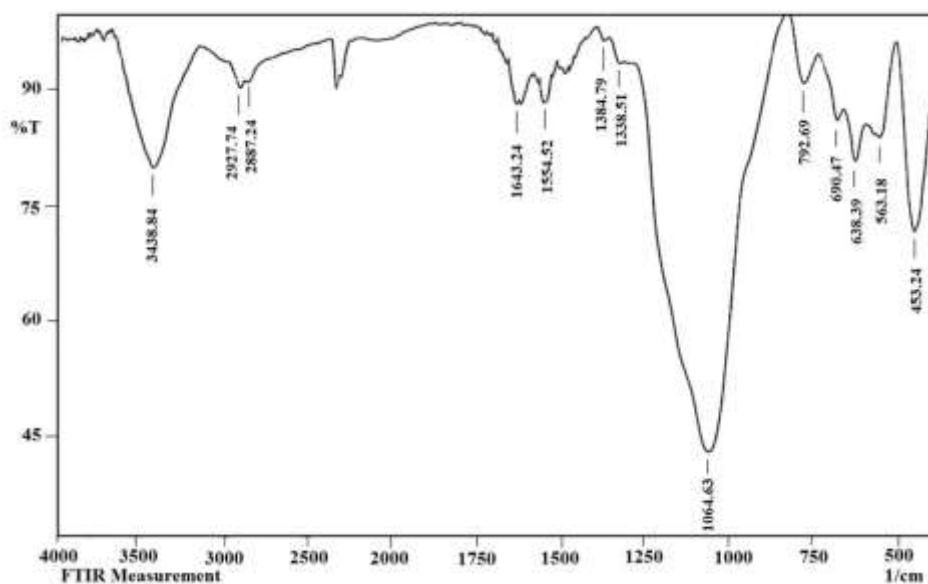
جدول ۱- برنامه ریزی آزمایش های تاگوچی

ترتیب	شماره آزمایش	pH	وزن جاذب (g)	قدرت یونی (M NaCl)	زمان تماس (min)	حجم محلول (mL)
۱	۱۲	۲	۰/۰۰۵	۰/۰۵	۵	۱۰
۲	۸	۲	۰/۰۱	۰/۰۵	۱۰	۲۵
۳	۵	۲	۰/۰۵	۰/۰۱	۱۵	۵۰
۴	۱۰	۲	۰/۰۸	۰/۰۰۵	۲۰	۱۰۰
۵	۴	۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۱۵	۱۰۰
۶	۹	۳	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰	۵۰
۷	۲	۳	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۵	۲۵
۸	۱۶	۳	۰/۰۸	۰/۰۰۵	۱۰	۱۰
۹	۱۱	۴	۰/۰۰۵	۰	۲۰	۲۵
۱۰	۱	۴	۰/۰۱	۰/۰۵	۱۵	۱۰
۱۱	۱۳	۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۱۰	۱۰۰
۱۲	۷	۴	۰/۰۸	۰	۵	۵۰
۱۳	۶	۵	۰/۰۰۵	۰	۱۰	۵۰
۱۴	۳	۵	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۵	۱۰۰
۱۵	۱۴	۵	۰/۰۵	۰	۲۰	۱۰
۱۶	۱۵	۵	۰/۰۸	۰/۰۱	۱۵	۲۵

۳- نتایج و بحث

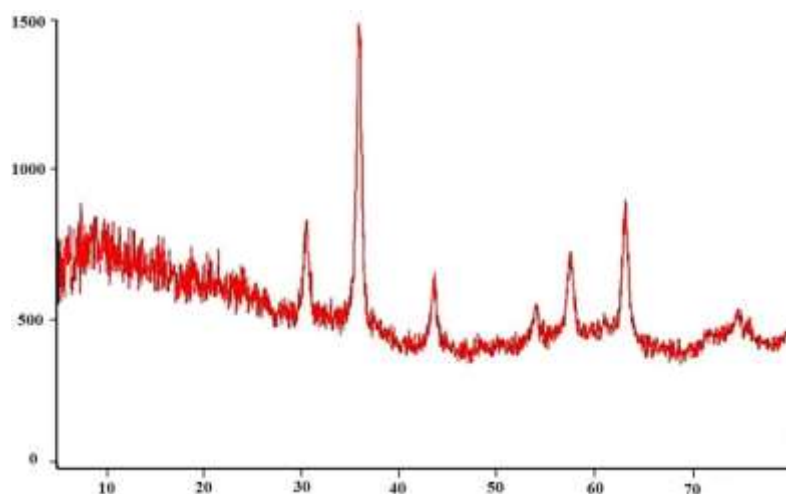
۳-۱- شناسایی و تعیین مشخصات نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی Fe₃O₄@SiO₂@Kit-6-NH₂

طیف FT-IR مربوط به نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی کیت-۶ عامل دار شده با گروه آمین در شکل ۲ نشان داده شده است. باند طیفی در ۵۶۳ و ۴۵۳ cm⁻¹ به ترتیب به پیوند ارتعاشی Fe-O در ساختار چهار وجهی و هشت وجهی در Fe₃O₄ تعلق دارد. همچنین پیک در ۱۰۶۴ cm⁻¹ مشخصه ارتعاش کششی نامتقارن Si-O-Si و نیز پیک ظاهر شده در ناحیه ی cm⁻¹ ۳۴۳۸^۱ مربوط به پیوند ارتعاشی N-H می باشد.



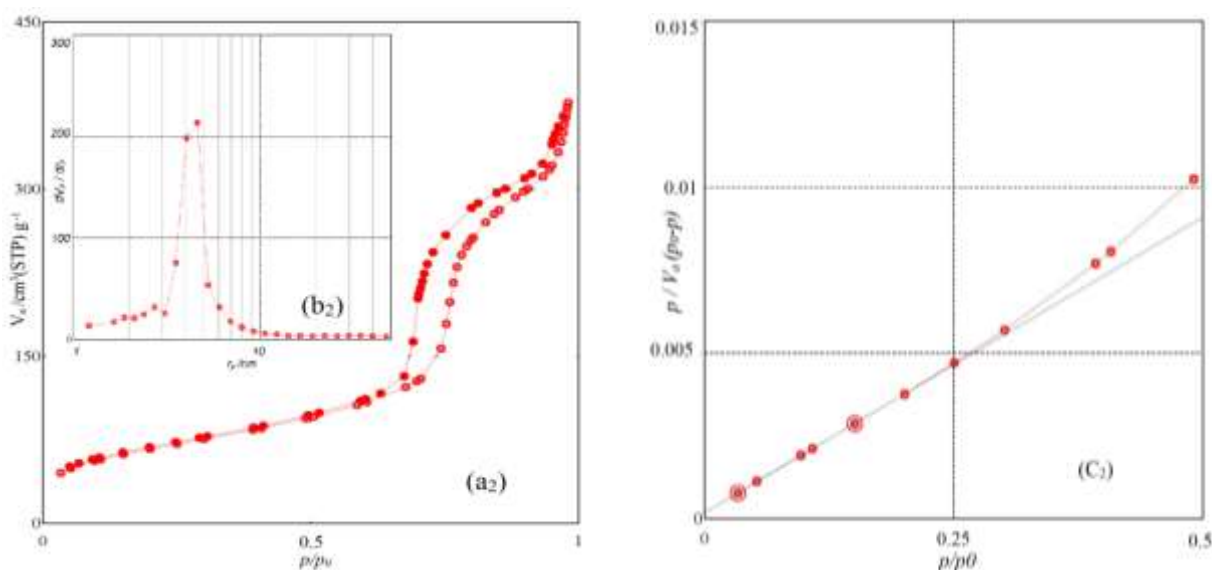
شکل ۲- طیف FT-IR نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی کیت-۶ عامل دار شده با گروه آمین

شکل ۳، طیف XRD نانوذرات سنتزی Fe_3O_4 را نشان می‌دهد. پیک‌های ظاهر شده در 2θ های $30/38$ ، $35/779$ ، $43/44$ ، $53/86$ ، $57/425$ ، $63/057$ ، $71/7$ ، $74/66$ با الگوی XRD مرجع مربوط به استانداردهای Fe_3O_4 (JCPDS ۶۲۹-۱۹) منطبق می‌باشد و این موضوع حاکی از آن است که نمونه سنتز شده دارای ساختار کریستالی مکعبی است. نتایج الگوی پراش XRD نانوذرات مغناطیسی سنتز شده بیانگر تأیید سنتز نانوذرات Fe_3O_4 در ساختار است.



شکل ۳- طیف XRD نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده

شکل ۴ نمودارها و جدول ۲ خلاصه نتایج به دست آمده از روش BET، BJH و جذب و واجذب نیتروژن که در تحقیقات قبلی همین گروه تحقیقاتی برای تعیین مساحت سطح مزوپور مغناطیسی سنتزی $Fe_3O_4@SiO_2@Kit-6$ انجام شده است را نشان می‌دهد [۱۸].



شکل ۴- نمودار (a₂) جذب- واجذب نیتروژن (b₂) و BET (C₂) از نانوکامپوزیت Fe₃O₄@SiO₂@Kit-6

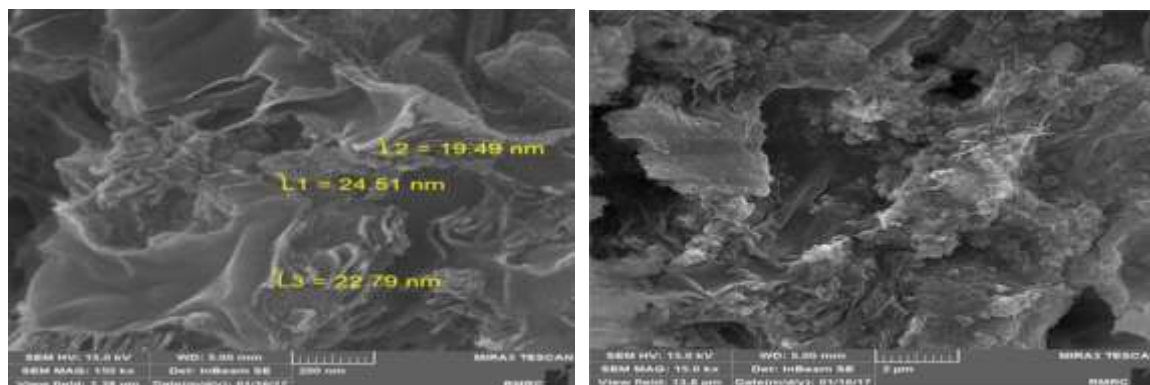
روش جذب و واجذب، روش بسیار ارزشمندی برای تعیین خواص فیزیکی مولکول‌های نانوپور است. این تکنیک به طور وسیعی برای تعیین سطح، حجم و قطر حفره مواد نانوپور به کار می‌رود. IUPAC قراردادهایی را برای طبقه‌بندی اندازه حفرات و ایزوترم‌های جذب ارائه کرده است. به روش BET مساحت سطح ویژه و همچنین حجم حفرات اندازه‌گیری شد. نمودارهای توزیع اندازه ذرات، توزیع باریک برای نانوکامپوزیت سنتزی را نشان می‌دهد که بیانگر یکنواخت بودن اندازه حفره‌ها می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، مزوپور سنتزی دارای توزیع اندازه ذرات مناسب، مساحت سطح ویژه بالا و قطر حفرات بزرگ و یکنواخت می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حفره‌های مزوپور سیلیکاتی به خوبی بر روی سطح نانوذرات اکسید آهن بارگذاری شده‌اند [۱۸].

جدول ۲- نتایج جذب و واجذب نیتروژن Fe₃O₄@SiO₂@Kit-6

Sample	¹ S _{BET} (m ² g ⁻¹)	² D _o (nm)	³ V _{tot} (cm ³ g ⁻¹)	⁴ V _p (cm ³ g ⁻¹)	⁵ a _p (m ² g ⁻¹)	⁶ d ₁₀₀ /d ₂₁₁ (Å)	⁷ a (nm)	⁸ W (nm)
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @Kit-6	۲۴۱/۶۸	۹/۲۶	۰/۵۸۳	۰/۵۶۶	۲۲۴/۸۴	۹۹/۲۰	۲۴/۲۹	۲/۸۴

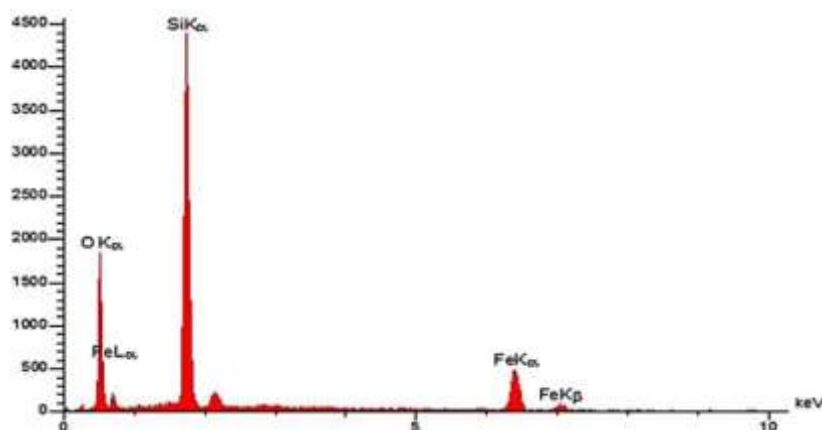
¹Wall Thickness, ² Unitcell Parameter, ³ D-spacing, ⁴ Surface Of Pores, ⁵ Mean Volume Of The Pores, ⁶ Total Pore Volumes Measured At (p/p₀) = 0.98, ⁷ Mean Pore Dimeter (BJH), ⁸ BET Surface Area Calculated In The Range Of Relative Pressure (p/p₀) = 0 - 0/5

شکل ۵ تصاویر FESEM نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی سنتزی Fe₃O₄@SiO₂@Kit-6 را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر متوسط اندازه ذرات کم‌تر از ۲۵ نانومتر می‌باشد.



شکل ۵- تصاویر FESEM نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{Kit-6}$

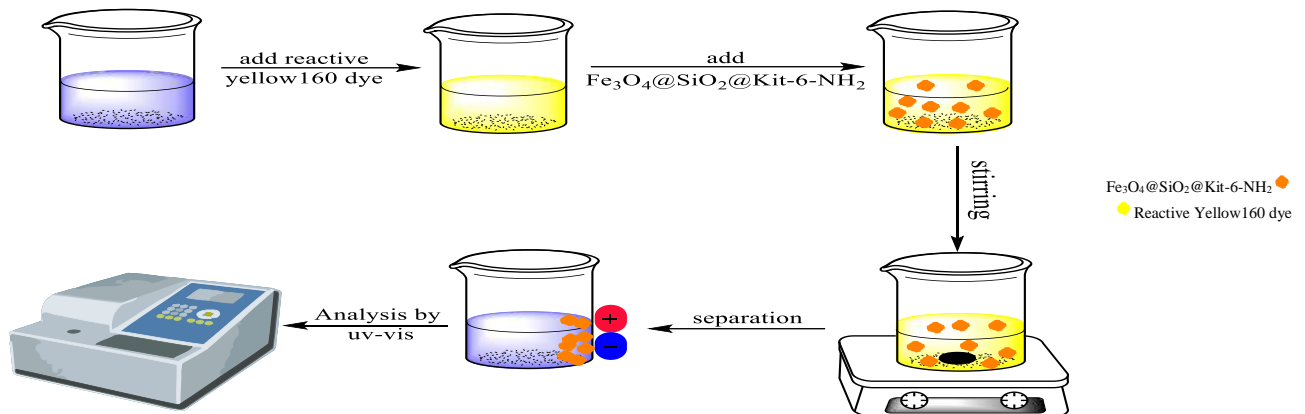
شکل ۶ طیف EDX مربوط به نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{Kit-6}$ را نشان می‌دهد. طیف حاصل تأییدی بر حضور عناصر Fe، O و Si در ساختار مزوپور مغناطیسی سیلیکاتی می‌باشد.



شکل ۶- طیف EDX نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{Kit-6}$

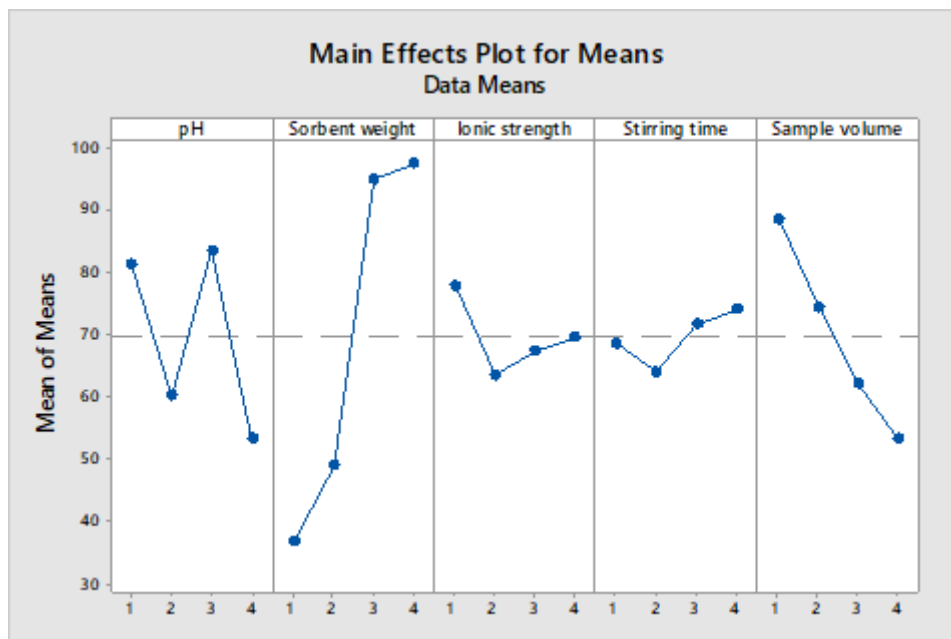
۳-۲- طراحی آزمون و تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور به دست آمدن شرایط بهینه و افزایش کارایی در حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ از طراحی آزمون تاگوجی استفاده شد. در این تحقیق متغیرهای قدرت یونی، pH محلول، زمان تماس، وزن جاذب و حجم نمونه به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر کارایی حذف در چهار سطح مختلف مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۷). در تمامی آزمایش‌های بهینه‌سازی غلظت اولیه رنگ ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد و pH محلول رنگ قبل از تنظیم در حد ۶ اندازه‌گیری شد.



شکل ۷- شمای کلی فرآیند حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ به وسیله‌ی نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی $Fe_3O_4@SiO_2@Kit-6-NH_2$

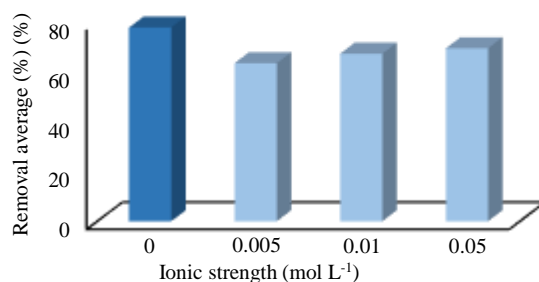
پس از انجام آزمایش‌های بهینه‌سازی طبق طراحی انجام شده، محاسبات آماری انجام و میانگین اثرات اصلی هر فاکتور در سطوح مختلف توسط نرم‌افزار مینی‌تب (نسخه ۱۸) به دست آمد (شکل ۸). طبق نتایج آزمایش‌ها و محاسبات تحلیل آماری ANOVA شرایط بهینه وزن جاذب (۰/۰۸ گرم)، قدرت یونی (بدون افزایش نمک)، $pH=4$ ، حجم نمونه (۱۰ میلی‌لیتر) و زمان تماس (۲۰ دقیقه) به دست آمد.



شکل ۸- منحنی‌های میانگین اثرات اصلی هر متغیر در سطوح مختلف بر میزان کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

۱-۲-۳- اثر قدرت یونی بر میزان حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

اثر قدرت یونی در جذب رنگ (غلظت: ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) با افزودن نمک NaCl در چهار سطح مختلف (۰، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ mol L⁻¹، ۰/۰۵) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش قدرت یونی ظرفیت جذبی جاذب و کارایی حذف کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج، قدرت یونی صفر به عنوان نقطه‌ی بهینه مطلوب تعیین گردید (شکل ۹).

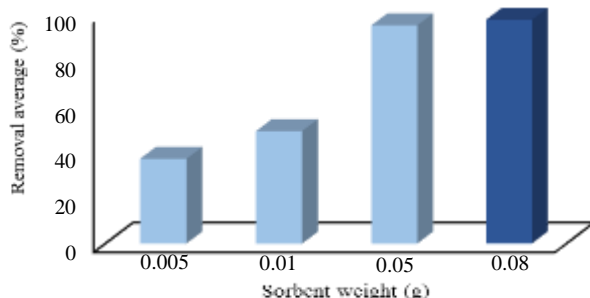
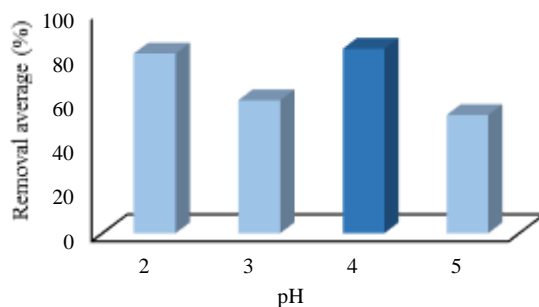


شکل ۹- تأثیر متغیر قدرت یونی محلول بر میزان کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

۲-۲-۳- اثر pH محلول و وزن جاذب بر میزان حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

pH محلول یکی از متغیرهای مهم و قابل توجه در جذب رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ به وسیله نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی MMNPs-NH₂ می باشد. pH محلول اولیه رنگ آنیونی راکتیو زرد در حالت عادی ۶ می باشد. بار سطحی جاذب و درجه یونش رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ به pH بستگی دارد. به دلیل خاصیت آنیونی رنگ راکتیو زرد ۱۶۰، جذب آن در pH های پایین تر مطلوب است. از سوی دیگر، در pH های اسیدی سطح نانوکامپوزیت مزوپور مغناطیسی MMNPs-NH₂ پروتونه شده و دارای بار مثبت می شود که این امر، به دلیل تبدیل گروه عاملی NH₂ به NH₃⁺ است. در pH های اسیدی بار مثبت نانوذرات توسط آنیون های رنگ احاطه شده و رنگ به وسیله نیروی جاذبه الکترواستاتیکی به سطح جاذب اتصال می یابد و به این طریق، عملیات حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ از محلول آبی صورت می گیرد. اگر pH افزایش یابد چگالی بار مثبت در سطح جاذب کاهش می یابد. بنابراین، جاذبه الکترواستاتیکی بین بار منفی رنگ و بار مثبت نانوذرات کاهش پیدا کرده که این امر باعث کاهش جذب رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ به وسیله نانوکامپوزیت می شود. طبق نتایج به دست آمده، pH برابر با ۴ که دارای حداکثر کارایی بود به عنوان pH بهینه انتخاب گردید (شکل ۱۰).

اثر وزن جاذب بر میزان حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقدار جاذب به دلیل نقش تعیین کننده بر ظرفیت جاذب، یکی از مهم ترین متغیرها در فرآیند جذب است. طبق نتایج، با افزایش وزن جاذب میانگین کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ افزایش یافته و در نتیجه وزن جاذب ۰/۰۸ گرم به عنوان وزن بهینه برای حذف ۱۰ میلی لیتر از رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ (۵۰ میلی گرم بر لیتر) در نظر گرفته شد.



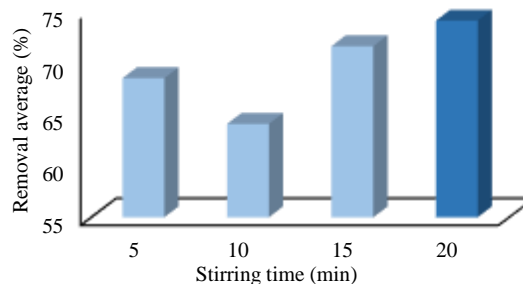
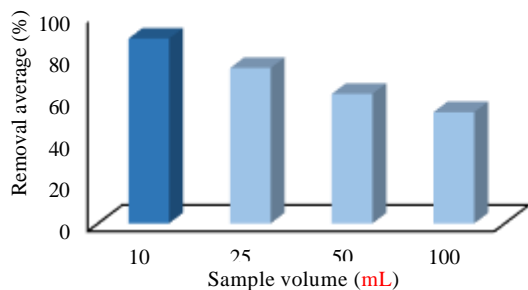
شکل ۱۰- تأثیر متغیر pH بر میزان کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰- شکل ۱۱- تأثیر متغیر وزن جاذب بر میزان کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

۳-۲-۳- اثر زمان تماس جاذب با محلول رنگی بر میزان حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است محلول رنگ در محدوده زمانی ۵ تا ۲۰ دقیقه در تماس با جاذب قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش زمان تماس، کارایی حذف افزایش می یابد. در نتیجه، زمان ۲۰ دقیقه به عنوان زمان بهینه برای حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ در نظر گرفته شد.

۳-۲-۴- اثر حجم محلول رنگ بر میزان حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

جهت بررسی اثر حجم محلول، محلول هایی از رنگ با غلظت 50 mg L^{-1} ، در حجم های ۱۰ تا ۱۰۰ میلی لیتر ساخته شد. همان طور که در شکل ۱۳ ملاحظه می شود بیشترین مقدار حذف رنگ در حجم ۱۰ میلی لیتر از نمونه اتفاق می افتد. پس از آن با افزایش حجم محلول، مقدار حذف رنگ کاهش می یابد.



شکل ۱۲- تأثیر زمان تماس جاذب بر میزان کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰- شکل ۱۳- تأثیر حجم محلول رنگ بر میزان کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

۵-۲-۳- آزمون تأیید شرایط بهینه به دست آمده حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ به وسیله نانوکامپوزیت سنتزی، در شرایط بهینه (غلظت اولیه 50 mg L^{-1} ، pH برابر با ۴، وزن جاذب $0/08$ گرم بر لیتر، حجم 10 میلی لیتر، زمان هم خوردن 20 دقیقه و بدون افزایش نمک) بررسی شد. برای این منظور ۴ آزمایش تحت شرایط یکسان انجام شد. نتایج نشان داد محلول باقی مانده رنگ پس از حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ کاملاً بی رنگ شد و میانگین درصد حذف رنگ راکتیو زرد برابر $97/0 \pm 0/6$ به دست آمد.

۳-۳- بررسی ایزوترم های جذبی رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

ایزوترم های جذبی داده های تعادلی هستند که به منظور تشریح چگونگی واکنش بین ماده جذب شونده و جاذب مورد استفاده قرار می گیرند و بیان کننده ظرفیت جذب یک جاذب هستند. شکل ایزوترم، اطلاعاتی راجع به تمایل مولکول های گونه جذب سطحی شونده به سطح جاذب و شیوه های محتمل جذب نشان می دهد. در این مطالعه به منظور تحلیل داده های تجربی و توصیف حالت تعادل در جذب بین فاز جامد و مایع در شرایط بهینه و در دمای ثابت ($25 \pm 1^\circ\text{C}$)، ایزوترم های جذبی لانگمویر، فروندلیچ و تمکین در غلظت های مختلف 10 ، 25 ، 50 ، 75 ، 100 ، 150 ، 200 و 250 mg L^{-1} از محلول رنگ مورد بررسی قرار گرفتند.

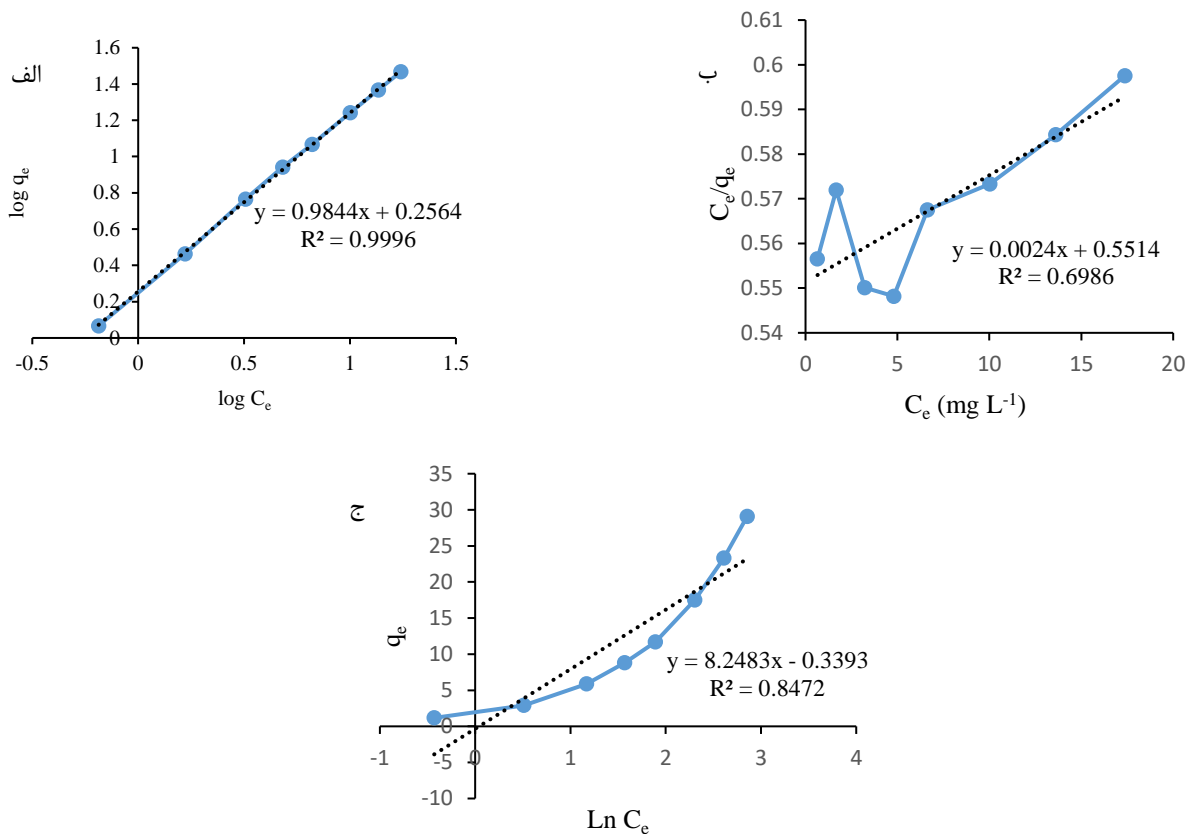
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \text{معادله لانگمویر}$$

$$\log q_e = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad \text{معادله فروندلیچ}$$

$$q_e = K_1 \ln(K_2) + K_1 \ln(C_e) \quad \text{معادله تمکین}$$

در این معادلات، q_e مقدار رنگ جذب شده به ازای گرم جاذب در زمان تعادل (mg g^{-1})، C_e غلظت تعادلی رنگ در محلول (mg L^{-1})، K_L ثابت لانگمویر (L mg^{-1}) و q_m ظرفیت اشباع نظری جذب تک لایه (mg g^{-1}) می باشد. مقادیر K_L و q_m از شکل خطی معادله لانگمویر با رسم نمودار C_e/q_e در مقابل C_e محاسبه می شوند [۱۹]. K_f و n ثابت های فروندلیچ هستند که با ظرفیت جذب و شدت جذب جاذب متناسب هستند و از نمودار لگاریتمی q_e در مقابل C_e به دست می آیند [۲۰]. در معادله خطی تمکین، K_1 و K_2 ثابت های ایزوترم تمکین به ترتیب برحسب $\text{mol}^{-1} \text{K}$ و L g^{-1} هستند [۲۱]. مدل ایزوترم لانگمویر، بیانگر جذب تک لایه ای و یکنواخت ماده جذب شونده با انرژی یکسان بر روی تمام سطوح جاذب بوده و هم چنین بیان می کند که تمامی مکان های جذب دارای پیوستگی یکسانی نسبت به مولکول های ماده جذب شونده بوده و هیچ گونه فرآیند انتقالی از مواد جذب شونده در سطح جاذب اتفاق نمی افتد. در حالی که معادله تجربی ایزوترم فروندلیچ بر مبنای جذب چند لایه ای، غیر یکنواخت و ناهمگن ماده جذب شونده روی جاذب استوار است. مدل ایزوترم تمکین بر همکنش بین نمونه های جاذب و جذب شونده را در نظر می گیرد. در این ایزوترم فرض می شود که گرمای جذب کلیه مولکول ها در لایه مرزی به دلیل برهمکنش جاذب

و جذب شونده به صورت خطی کاهش می‌یابد و جذب با توزیع یکنواختی از انرژی‌های پیوندی مشخص می‌شود. بر اساس ضرایب رگرسیونی منحنی‌های مربوط به این سه مدل، جذب رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ بر روی جاذب مغناطیسی MMNPs-NH₂ سنتزی، از ایزوترم فروندلیچ ($R^2 = 0.9996$) تبعیت بیشتری را نشان می‌دهد که مؤید جذب چند لایه بر سطح نانوکامپوزیت می‌باشد (شکل ۱۴-الف). مقادیر K_f و n در این تحقیق به ترتیب برابر ۱/۸۰۵ و ۱/۰۱۶ به دست آمد، که مقادیر n نشان‌دهنده‌ی شدت جذب متوسط است.

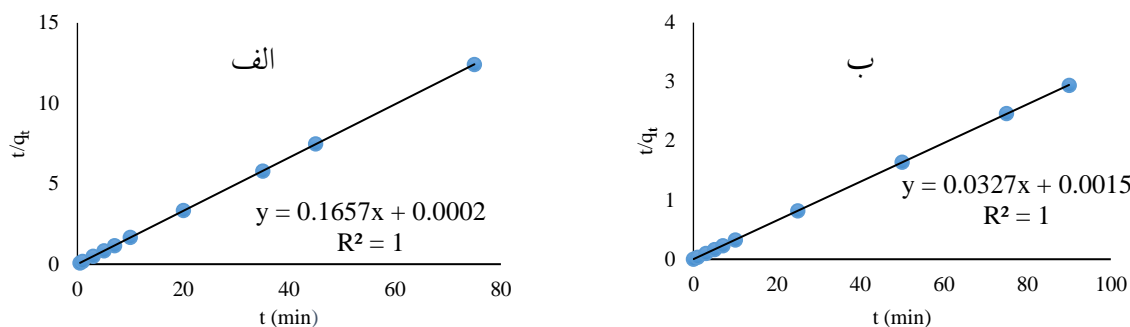


شکل ۱۴- منحنی ایزوترم‌های (الف) فروندلیچ، (ب) لانگمیر، (ج) تمکین، تحت شرایط (مقدار جاذب ۰/۰۸ گرم، pH برابر با ۴، زمان هم‌زدن ۲۰ دقیقه، حجم محلول ۱۰ میلی‌لیتر و قدرت یونی صفر)

۳-۴- سینتیک جذب رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

برای تعیین سینتیک جذب از معادلات سینتیک شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، ایلویچ و نفوذ درون ذره‌ای استفاده شد و مطالعات در دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ mg L⁻¹ صورت گرفت. فرم‌های خطی این مدل‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. در این معادلات، q_e برابر مقدار ماده رنگ‌زای جذب شده در حالت تعادل ($mg\ g^{-1}$)، q_t مقدار ماده رنگ‌زای جذب شده در زمان t ($mg\ g^{-1}$)، K_1 و K_2 ثابت‌های سرعت تعادلی سینتیک مرتبه اول و دوم می‌باشند [۲۲]. با توجه به نتایج به دست آمده، ضریب هم‌بستگی در مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم (شکل ۱۵) در غلظت‌های اولیه‌ی مطالعه شده در مقایسه با مدل شبه مرتبه اول، مدل نفوذ درون

ذره‌ای و مدل ایلوچ بیش‌تر و برابر ۱ بوده است. مقادیر به‌دست آمده از متغیرهای سینتیکی جذب رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ روی نانوکامپوزیت مغناطیسی، در جدول ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم برای جذب رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ در شرایط بهینه حذف در غلظت‌های الف) ۵۰ و ب) ۱۰۰ mg L⁻¹

جدول ۳- معادلات و نتایج حاصل از محاسبات سینتیکی در دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ mg L⁻¹

غلظت ۵۰ mg L ⁻¹		غلظت ۱۰۰ mg L ⁻¹		ثابت	معادله	سینتیک
R ²	ضرایب معادلات	R ²	ضرایب معادلات			
۰/۱۴۷	-۰/۰۱۳۳ ۰/۰۲۱۶۱	۰/۴۰۷۳	۰/۰۴۱۲۹ ۰/۸۶۷۴	K ₁ (1 min ⁻¹) q _e (mg g ⁻¹)	$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{K_1}{2.333} t$	شبه مرتبه اول
۱	۶/۰۳۵۷ ۱۳۷/۲۸۳	۱	۳۰/۵۸۱ ۰/۷۱۲۹	q _e (mg g ⁻¹) K ₂ (g min ⁻¹ mg ⁻¹)	$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{k_2 q_e^2}\right) + \left(\frac{1}{q_e}\right) t$	شبه مرتبه دوم
۰/۳۲۵۴	۶/۰۷۹۳ -۰/۰۰۷۴	۰/۲۳۹۱	۲۶/۲۷۸ ۰/۶۴۲۳	C (mg L ⁻¹) K	$q_t = K_p t^{1/2} + C$	نفوذ درون ذره‌ای
۰/۴۲۰۳	- -۷۴/۰۷۴	۰/۶۰۲۸	۱/۱۱۹۱×۱۰ ^{-۵۴} ۴/۲۴۲۷	a (mg g min ⁻¹) b (g mg ⁻¹)	$q_t = \frac{1}{b} \text{Ln}(ab) + \frac{1}{b} \text{Lnt}$	ایلوچ

۳-۹- نتایج نمونه‌های حقیقی

جهت بررسی میزان حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ به‌وسیله‌ی نانوکامپوزیت سنتزی در نمونه‌های آب با ماتریس‌های مختلف، نمونه‌هایی از آب شهر رشت، آب چاه، آب رودخانه سپیدرود و آب دریای خزر تهیه شد. سپس محلول‌هایی از رنگ با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ با استفاده از نمونه‌های حقیقی تهیه شد و آزمایش‌های حذف رنگ تحت شرایط بهینه (pH = ۴، بدون افزایش نمک، حجم محلول = ۱۰ میلی‌لیتر، وزن جاذب = ۰/۰۸ گرم و مدت زمان هم‌خوردن = ۲۰ دقیقه) انجام شد. غلظت رنگ قبل و بعد از فرآیند حذف به‌وسیله دستگاه UV-Vis اندازه‌گیری شد. نتایج کارایی حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ در چهار نمونه حقیقی به صورت آب شهر رشت: ۴/۳۲ ± ۹۹/۴۷، آب رودخانه سپیدرود: ۱/۲۷ ± ۹۸/۵۹، آب چاه: ۱/۹۲ ± ۹۵/۵۸، آب دریای خزر: ۰/۷۷ ± ۹۱/۱۹ به دست آمد که بیانگر قابلیت جاذب سنتزی در حذف مؤثر رنگ از نمونه‌های آب می‌باشد.

۱۰-۳- مقایسه کارایی جاذب سنتز شده با سایر جاذبها مورد استفاده برای حذف رنگ راکتیو زرد ۱۶۰

در جدول ۴ نتایج حاصل از مقایسه کارایی جاذب سنتز شده با سایر جاذبهای مغناطیسی مورد استفاده جهت حذف برخی از رنگهای راکتیو از لحاظ مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی مقایسه شده است. مشاهده می شود که جاذب پیشنهادی از ظرفیت جذبی قابل قبولی در قیاس با جاذبهای مورد استفاده برای سایر رنگهای زراکتیو برخوردار است.

جدول ۴- مقایسه مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی جاذب پیشنهادی با برخی از جاذبهای مغناطیسی مورد استفاده برای حذف رنگهای راکتیو

مرجع	Q_{max} ($mg\ g^{-1}$)	مدل ایزوترمی	مدل سینتیکی	رنگ	نوع جاذب
[23]	۱۶۴	لانگمویر	سینتیک شبه مرتبه دوم	راکتیو سیاه ۵	Magnetic graphene oxide (impregnation method)
[23]	۱۸۸	لانگمویر	سینتیک شبه مرتبه دوم	راکتیو سیاه ۵	Magnetic graphene oxide (co-precipitation method)
[24]	۱۶۳/۹	لانگمویر	سینتیک شبه مرتبه دوم	راکتیو قرمز ۱۹۸	CTAB@Fe ₃ O ₄
[25]	۱۲۶/۵۸	لانگمویر	سینتیک شبه مرتبه دوم	راکتیو آبی ۱۹	Magnetite NP loaded tea waste
[24]	۵۵۶/۲	لانگمویر	----	راکتیو آبی ۲۱	CTAB@Fe ₃ O ₄
[26]	۴۷/۶۲	لانگمویر	----	راکتیو زرد ۱۴۵	Chitosan@Fe ₃ O ₄
[27]	۱۶۱/۲۹	لانگمویر	---	راکتیو سیاه	IL@Fe ₃ O ₄
[28]	۲۰۰	لانگمویر	----	راکتیو قرمز ۲۳۹	2,2'-(butane-1,4-diylbis(oxy))dibenzaldehyde cross-linked magnetic chitosan nanoparticles (Fe ₃ O ₄ @CS-BAL)
[29]	۵۱/۵۴۶	فروندلیچ	سینتیک شبه مرتبه دوم	راکتیو نارنجی ۱۲۲	Ionic Liquid Coated Fe ₃ O ₄ magnetic Nanoparticles
[30]	۷۱/۴	لانگمویر	----	راکتیو قرمز ۱۴۱	1-Octyl-3-methylimidazolium bromide coated Fe ₃ O ₄
[30]	۶۲/۵	لانگمویر	----	راکتیو زرد ۸۱	1-Octyl-3-methylimidazolium bromide coated Fe ₃ O ₄
این تحقیق	۳۰/۵۸	فروندلیچ	سینتیک شبه مرتبه دوم	راکتیو زرد ۱۶۰	Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @Kit-6-NH ₂ MMNPs

۱۱-۳- بررسی قابلیت استفاده مجدد از جاذب

جهت بررسی کارایی جاذب طی چندین مرحله استفاده متوالی، بعد از هر مرحله انجام فرآیند جذب، واجذب رنگ از سطح جاذب انجام شد و سپس مجدداً فرآیند جذب صورت گرفت. طبق نتایج حاصل، پس از ۱۰ بار استفاده متوالی از جاذب در شرایط بهینه کارایی حذف بالاتر از ۹۴٪ به دست آمد که نشان دهنده قابلیت بالای جاذب در استفاده مجدد از آن جهت حذف رنگ می باشد.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، نانوکامپوزیت مزوپور MMNPs-NH₂ طی فرآیندی آسان سنتز شد. در این تحقیق، برای نخستین بار قابلیت این ذرات سنتزی جهت حذف رنگ آنیونی راکتیو زرد ۱۶۰ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به هزینه بر بودن سایر روشهای حذف رنگ و نظر به این که جاذب مغناطیسی MMNPs-NH₂ به راحتی تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی به وسیله آهنربا از

محلول جدا می‌شود و قابلیت ده بار استفاده مجدد را دارا می‌باشد، می‌توان از آن به عنوان جاذبی کارآمد و ارزان در محلول‌های آبی برای حذف یا پیش‌تغلیظ گونه‌های آنیونی استفاده کرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که ۰/۰۸ گرم از MMNPs- NH_2 در pH برابر ۴، قدرت یونی صفر و پس از ۲۰ دقیقه قرار گرفتن در مجاورت ۱۰ میلی‌لیتر از رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ قادر به حذف بیش از ۹۷ درصد رنگ از محلول آبی می‌باشد. نانوذرات سنتز شده پس از ۱۰ بار استفاده متوالی کارایی حذف بالای ۹۴ درصد دارد. ایزوترم جذب سطحی رنگ راکتیو زرد ۱۶۰ به وسیله‌ی نانوکامپوزیت سنتزی از مدل فروندلیچ پیروی کرد و سینتیک جذب از نوع شبه مرتبه دوم می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] P. A. Ramalho, Degradation of dyes with microorganisms studies with ascomycete yeasts, Universidade do Minho.ph.D thesis.
- [2] P. Niu, J. Hao, *Colloids Surf. A*, **431** (2013) 127.
- [3] P. Zhang, Q. An, J. Guo, C. C. Wang, *Colloid Interface Sci*, **389** (2013) 10.
- [4] B. Manoochehr, A. Laleh, F. Mohammad, *J. Of Applied Chemistry*, **26** (1392) 29, in Persian.
- [5] M. Kobya, O. T. Can, M. Bayramoglu, *J. Hazard. Mater*, **100** (2003) 163.
- [6] P. Caizares, F. Martínez, C. Jiménez, *Environ. Sci. Technol.*, **40** (2006) 6418.
- [7] D. Zareyee, H. A. Tayebi, and H. Javadi, *Iranian Journal of Organic Chemistry*, **4** (2012) 799.
- [8] G. Crini, P.M. Badot, *Prog. Polym. Sci.*, **33** (2008) 399.
- [9] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, P. Nigam, *Bioresour. Technol.*, **77** (2001) 247.
- [10] B. J. Pan, H. Qiu, B. C. Pan, G. Z. Nie, L. L. Xiao, L. Lv, *Water Res*, **44** (2010) 815.
- [11] E. Ali, D. Mohammad, N. Navid, J. Saied, *J. Of Applied Chemistry*, **42** (1396) 125, in Persian.
- [12] J. H. Jange, H. B. Lim, *Microchem J*, **94** (2010) 148.
- [13] X. Zhao, Y. Shi, T. Wang, Y. Cia, G. Jiang, *J. Chromatogr. A*, **1188** (2008) 140.
- [14] V. Janaki, K. Vijayaraghavan, B.-T. Oh, K.-J. Lee, K. Muthuchelian, A.K. Ramasamy, S. Kamala-Kannan, *Carbohydr. Polym.*, **90** (2012) 1437.
- [15] S. Rahnama, Sh. Shariati, F. Divsar, *Comb. Chem. High Throughput Screening.*, **21** (2018) 583-593.
- [16] S. Shariati, M. Khabazipour, F. Safa, *J. Porous Mat.*, **24** (2017) 129.
- [17] M. Sojoudi, S. Shariati, M. Khabazipour, *Anal. Bioanal. Chem. Res.*, **3** (2016) 287.
- [18] M. Khabazipour, Sh. Shariati, F. Safa, *Synth. React. Inorg. Met. Org. Chem.*, **46** (2016) 759.
- [19] I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.*, **40** (1918) 1361.
- [20] H. Freundlich, *Z. Phys. Chem.*, **57** (1907) 385.
- [21] M. Temkin, V. Pyzhev, *Acta Physicochim URS*, **12** (1940) 327.
- [22] V. Fierro, V. Torne-Fernandez, D. Montane, A. Celzard, *Microporous Mesoporous Mater.*, **111** (2008) 276.

- [23] G.Z. Kyzas, N.A. Travlou, O. Kalogirou, E.A. Deliyanni, *Materials*, **6(4)** (2013) 1360.
- [24] M. Faraji, Y. Yamini, M. Rezaee, *J. Iran. Chem. Soc.* **7** (2010) 1.
- [25] T. Madrakian, A. Afkhami, M. Ahmadi, H. Bagheri, *Turk. J. Biochem.* **37(2)** (2012) 200.
- [26] N. A. Kalkan, S. Aksoy, E.A. Aksoy, N. Hasirci, *J. Appl. Polym. Sci.* **124(1)** (2012) 576.
- [27] T. Poursaberi, M. Hassanisadi, *Clean – Soil, Air, Water*, **41** (2013) 1208.
- [28] A. Banaei, M. F. Yaychi, S. Karimi, H. Vojoudi, H. Namazi, A. Badiei, E. Pourbasheer, *Materials Chemistry and Physics*, **212** (2018) 1.
- [29] S.H. Ahmadi, P. Davar, A. Manbohi, *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, **35(1)** (2016) 63.
- [30] S. Kamran, H. Tavallali, A. Azad, *Iran. J. Anal. Chem.* **1** (2014) 78.