

Effective Removal of Acid Blue 113 and Acid Orange 10 from Industrial Wastewater Using a Magnetic Composite Prepared from the Hard Shell of the Native Bane Fruit

Bahram Ebrahimi*, Sirwan Mohammadiazar

Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Islamic Azad University, Sanandaj Branch, P.O. Box: 6616935391, Sanandaj, Iran,

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27-11-2023

Accepted: 20-01-2024

Available online: 06-03-2024

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.4.4.9

Keywords:

Baneh nut

Acid blue 113

Acid orange 10

Magnetic absorbent

Activated carbon

Magnetic composite

ABSTRACT

This study used thermochemical and Fe particle co-precipitation methods to prepare a magnetic-activated carbon composite. The hard nutshell of Baneh from the Oraman region of Kurdistan province was used as raw material. The structural properties of the prepared adsorbent were investigated using SEM, FT-IR, EDAX, BET, and VSM analysis methods. The SEM images clearly showed the formation of a porous adsorbent with porosity in the range of micro- and mesopores. The results of the FT-IR and EDAX analyses proved the presence of Fe in the absorbent structure. The specific surface area of the adsorbent before and after the deposition of iron particles was determined to be 229.6 and 179.37 m²/g, respectively. Under the optimized conditions, the removal amount of the investigated dyes from the model solutions was 91.2 and 98.6 % for acid blue 113 and acid orange 10, respectively. The kinetic study revealed that the pseudo-second-order model best fits the obtained adsorption data. In addition, the Freundlich model was the best model to describe the adsorption process.

*Corresponding author: [*b_brahim@iausdj.ac.ir](mailto:b_brahim@iausdj.ac.ir)



حذف موثر اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ از پساب‌های صنعتی با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده از پوست سخت میوه بنه بومی

بهرام ابراهیمی*، سیروان محمدی آذر

استادیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج، ایران، صندوق پستی: ۶۶۱۶۹۳۵۳۹۱

چکیده

در این مطالعه یک کامپوزیت مغناطیسی کربن فعال (Activated carbon (AC)) با استفاده از روش ترموشیمیایی و هم‌رسوبی ذرات آهن تهیه گردید (AC/Fe₃O₄). از پوست سخت میوه بنه بومی منطقه اورامان استان کردستان به عنوان ماده خام استفاده شد. خصوصیات ساختمانی جاذب تهیه شده با استفاده از آنالیزهای SEM، FT-IR، EDAX، BET و VSM مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر SEM به وضوح شکل گیری یک جاذب متخلخل با تخلخل در گستره میکرو و مزو حفرات را نشان داد. نتایج آنالیزهای FT-IR و EDAX حضور آهن در ساختمان جاذب را اثبات نمود. با استفاده از تخلخل‌سنجی BET، سطح ویژه جاذب تولید شده قبل و بعد از ترسیب ذرات آهن به ترتیب ۲۲۹،۶ و ۱۷۹،۳۷ متر مربع بر گرم تعیین گردید. در شرایط بهینه میزان حذف رنگ‌های مورد مطالعه از محلول‌های مدل ۹۱،۲ و ۹۸،۶ درصد به ترتیب برای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ حاصل شد. داده‌های سینتیکی پیروی فرایند حذف را از مدل شبه درجه دوم نشان داد. همچنین مدل فروندلیچ بهترین مدل برای توصیف فرایند جذب سطحی بود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.4.4.9

واژه‌های کلیدی:

بنه

اسید بلو ۱۱۳

اسید اورانژ ۱۰

جاذب مغناطیسی

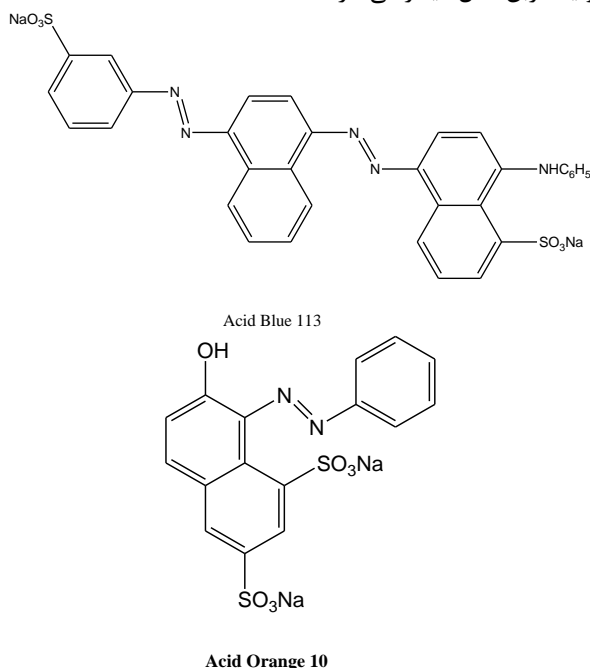
کربن فعال

کامپوزیت مغناطیسی

۱- مقدمه

پساب‌های رنگی با استفاده از انواع جاذب‌های در دسترس است. این روش دارای تاریخچه طولانی بوده و از زمان‌های دور در فرایندهای تصفیه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع با عبور سیال حاوی آلاینده از میان ذرات جاذب، پدیده جذب سطحی موجب جذب آلاینده بر روی سطح متخلخل جاذب و تصفیه سیال می‌شود (۱۴). جاذب‌های مرسوم قدیمی مانند خاک رس، سیلیکا و آلومینا و جاذب‌های سنتزی جدید در روش جذب سطحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

کربن فعال به عنوان یک جاذب قدیمی در فرایند جذب سطحی انواع آلاینده‌ها مورد توجه و استفاده بوده است. این جاذب از مواد خام حاوی مقادیر بالای ذخیره کربنی قابل تهیه است. ماده خام طی فرایندهای کربنی شدن و فعال‌سازی به جاذب کربن فعال تبدیل می‌شود (۱۵). بنابراین از مواد خام طبیعی مانند هسته و پوسته میوه‌های مختلف و ضایعات و باقی‌مانده‌های محصولات کشاورزی و نیز گیاهان خود رو به عنوان پیش ماده^۳ برای تولید جاذب کربن فعال استفاده شده است (۲۰-۱۶). درخت بنه (پسته کوهی) یکی از درختان خود رو منطقه زاگرس در ایران است. این درخت در دامنه گسترده‌ای از غرب و جنوب غرب ایران در امتداد جنگل‌های رشته کوه زاگرس گسترده شده است. پوست میوه بنه به اندازه کافی سخت است. این سختی نشانه وجود پلیمر طبیعی لیگنین با درصد بالا در ساختار آن است که نشان‌دهنده غنای کربنی می‌باشد و امکان استفاده از آن را به عنوان یک پیش ماده خام طبیعی و فراوان برای تولید کربن فعال میسر می‌سازد.



شکل ۱: ساختمان شیمیایی اسید اورنژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳.

Figure 1: The chemical structure of acid blue 113 and acid orange 10.

امروزه استفاده از رنگزاهای سنتزی بخش جدایی‌ناپذیری از مراحل تولید صنایعی مانند چاپ، چرم، کاغذ، پلاستیک، آرایشی و بهداشتی است. سالانه مقادیر عظیمی از ترکیبات رنگی از طریق پساب صنایع مذکور به آب‌های جاری و در نهایت آب‌های زیر زمینی ورود پیدا می‌کنند (۱). این ترکیبات با ساختمان آلی پیچیده و با حلقه‌های آروماتیکی متعدد در مقابل تصفیه زیستی مقاوم هستند. همچنین، پساب‌های رنگی دارای پتانسیل جهش‌زایی، سرطان‌زایی و سمیت هستند که با جلوگیری از نفوذ نور آفتاب، زندگی موجودات زنده مختلف را تحت تاثیر قرار می‌دهند. مقدار سالانه تولید رنگزاهای سنتزی عددی بالغ بر 7×10^7 تن را شامل می‌شود که در این میان صنایعی مانند نساجی حدود ۱۵ درصد از رنگزاهای مصرفی خود را به صورت پساب در محیط زیست وارد می‌کنند (۳، ۲). این رقم با وجود فناوری‌های قدیمی می‌تواند تا ۵۰ درصد افزایش یابد. این داده‌ها وضعیت شکننده منابع آب در مواجهه با آلاینده‌های رنگی را به خوبی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت اکنون محیط زیست با معضل بزرگی به نام آلاینده‌های رنگی و اثرات آن مواجه است (۵، ۴). تعداد ترکیبات رنگی در دسته‌بندی‌های مختلف به بیش از ۳۰۰۰ نوع می‌رسد که تقریباً نیمی از آنها ترکیبات رنگی آزو هستند. این ترکیبات با گروه‌های آزو ($N=N$) در ساختمان مولکولی خود شناخته می‌شوند که بخش‌های مختلف مولکول حاوی حلقه‌های آروماتیکی را به هم اتصال می‌دهند. مواد رنگزای آزو به علت پایداری فوتوکاتالیزی، شیمیایی و بیولوژیکی در صنایع مختلف بسیار مورد توجه هستند و بخش بزرگی از آلاینده‌های رنگی مربوط به این گروه از مواد رنگزای سنتزی هستند (۷، ۶).

دو رنگزای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورنژ ۱۰ از رنگزاهای آنیونی آزو با خاصیت اسیدی هستند که در صنایع نساجی و صنایع چوب و چرم به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. تجزیه پذیری این دو رنگزا، به ویژه اسید بلو ۱۱۳ بسیار سخت است (۸). شکل ۱ ساختمان مولکولی رنگزاهای مذکور را نشان می‌دهد.

روش‌های مختلفی برای حذف رنگزا از پساب‌های رنگی به کار گرفته شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به تجمع الکتریکی^۱ (۹)، تخریب نوری^۲ (۱۰)، ازندهی (۱۱)، استفاده از غشاهای (۱۲) و اکسایش الکتروشیمیایی (۱۳) اشاره کرد. انتخاب روش تصفیه به نوع پساب، نوع آلاینده‌ها، هدف نهایی از تصفیه و میزان هزینه در نظر گرفته شده بستگی دارد. روش‌های با کارایی بالا، ایمن، آسان و ارزان‌قیمت در بیشتر فرایندهای تصفیه‌ای مورد توجه هستند.

روش جذب سطحی یکی از روش‌های مورد توجه برای تصفیه

داده‌های جذبی حاصل برای رنگزاهای مطالعه شده توسط ایزوترم لانگمویر و مدل سینیتیکی شبه درجه دوم به خوبی توصیف شدند. نانو الیاف کربن مغناطیسی با درجه تخلخل بالا از ماده اولیه کود حیوانی اسب تحت تیمار هیدروترمال و سپس کربنی‌شدن در دمای بالا با استفاده از نسبت‌های مختلف آهن (III) نیترات و اکسید آهن برای مغناطیس‌سازی توسط ناپات و همکارانش (۲۴) گزارش گردید. سطح ویژه ۴۳۵,۳۱ متر مربع بر گرم برای این جاذب محاسبه شد. از جاذب مغناطیسی تهیه شده برای حذف رنگزای متیلن بلو با بازده ۹۲-۹۹ درصد استفاده گردید. رن و همکارانش در یک مطالعه از روش کلسینه کردن و تلقیح فلزی (Impregnation) یک جاذب کربن فعال مغناطیسی بر پایه فلزات آهن و روی تهیه کردند. خصوصیات ساختمانی جاذب تهیه شده با استفاده از تکنیک‌های طیفی مرتبط بررسی و عوامل موثر بر حذف رنگزاهای اسید بلو ۸۰ و متیلن بلو بهینه شدند. جاذب حاصل ظرفیت جذبی ۱۶۹,۷۷ و ۴۱,۱۲ میلی‌گرم بر گرم را به ترتیب برای متیلن بلو و اسید بلو ۸۰ نشان داد (۲۵). حذف رنگزاهای کاتیونی مالاشیت گرین، بلور بنفش و متیلن بلو با استفاده از جاذب کربن فعال مغناطیسی که زانتیت^۱ (نمک زانتیک اسید) در ساختمان آن گرافت شده بود توسط ژائو و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جاذب مغناطیسی تهیه شده مورد بررسی قرار گرفت و بیشینه مقادیر جذب ۵۹۵,۲۴، ۳۱۴,۳ و ۳۹۴,۱۴ میلی‌گرم بر گرم به ترتیب برای مالاشیت گرین، متیلن بلو و بلور بنفش گزارش شد (۲۶). در یک مطالعه مروری توسط باراساراتهی و همکارانش (۲۷) ارزش و کارایی کامپوزیت‌های مغناطیسی کربن فعال را به عنوان یک جاذب موثر که می‌توان از ضایعات غنی از کربن محصولات کشاورزی آنها را تهیه کرد برای حذف ترکیبات آلی مختلف از جمله رنگزاهای سنتزی نشان دادند. این مطالعه به صورت جامع استفاده از کامپوزیت‌های مغناطیسی کربن فعال را مورد بررسی قرار داده است.

در مطالعه حاضر حذف دو رنگزای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۷ از محیط‌های آبی و پساب کارخانجات صنعتی توسط کامپوزیت کربن فعال مغناطیسی تولید شده از پوسته سخت میوه درخت بنه بومی منطقه اورامان استان کردستان مورد بررسی قرار گرفته است. از یک فرایند ترموشیمیایی برای تهیه جاذب کربن فعال مطابق یک برنامه دمایی مشخص استفاده شد و جاذب تولیدی تحت یک فرایند هیدروترمال و روش هم‌رسوبی مغناطیس‌سازی گردید. متغیرهای موثر بر کارایی فرایند حذف رنگزاهای مورد مطالعه بررسی و بهینه شدند. مدل‌های سینیتیکی و تعادلی فرایند جذب توسط کامپوزیت مغناطیسی پیشنهادی مشخص شدند.

سنتز کامپوزیت‌های مغناطیسی کربن فعال امکان اجرای فرایند جذب سطحی را بدون نیاز به مرحله صاف کردن بعد از تصفیه محلول آلاینده امکان‌پذیر می‌کند. در واقع بعد از تکمیل فرایند تصفیه می‌توان به کمک یک میدان مغناطیسی خارجی جاذب را به سهولت از سیال جدا نمود. این عملیات کاهش زمان و افزایش کیفیت فرایند تصفیه را به دنبال دارد. شکل ۲ مزیت استفاده از جاذب مغناطیسی را در کاهش زمان و ساده‌سازی فرایند جذب سطحی نشان می‌دهد. این نوع از جاذب‌ها در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

سیبونی و همکارانش حذف رنگزاهای اسید بلو ۱۱۳ و ری اکتیو بلاک را با استفاده از کربن فعال تهیه شده از گل قرمز مورد بررسی قرار دادند. گل قرمز فعال شده دارای ظرفیت جذبی بالاتری برای اسید بلو ۱۱۳ در مقایسه با ری اکتیو بلک بود. این مشاهده به اثر اندازه مولکولی بزرگ‌تر ری اکتیو بلاک نسبت به اسید بلو ۱۱۳ نسبت داده شد. ایزوترم جذبی از مدل فروندلیچ و سینیتیک فرایند از رابطه شبه درجه دوم پیروی کرد. در pH ۳ بیشینه جذب اسید بلو ۱۱۳ میزان ۸۳,۳۳ میلی‌گرم به گرم گزارش شد (۲۱). یک نانوکامپوزیت مغناطیسی کربن فعال با استفاده از برگ اکالیپتوس و مغناطیس‌سازی هم‌زمان در حضور FeCl_3 و K_2CO_3 توسط لی و همکارانش برای حذف رنگزاهای متیلن بلو و متیل اورنج از نمونه‌های آبی پیشنهاد گردید. متغیرهای موثر بر میزان جذب رنگزاهای مذکور از جمله pH نمونه‌ها، مقدار جاذب، دما و غلظت حل شونده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در یک فرایند غیر پیوسته بدون نیاز به مراحل صاف کردن ظرفیت جذبی جاذب مغناطیسی برای متیل اورنج و متیلن بلو به ترتیب ۲۰۵ و ۲۸۹ میلی‌گرم به گرم است. سینیتیک فرایند پیشنهادی از مدل شبه درجه دوم پیروی کرد (۲۲). کیتاوا و همکارانش (۲۳) یک جاذب کربن فعال مغناطیسی را از طریق روش هیدروترمال تولید و توسط منیزیم و سیلیکا اصلاح سطح نمودند. ظرفیت جذبی بالایی برای رنگزاهای متیلن بلو (۳۶۹,۵۴)، متیل اورانژ (۵۲۸,۹۸) و کنگو قرمز (۲۵۷,۲۵) بر حسب میلی‌گرم به گرم توسط جاذب تولیدی گزارش شد.



شکل ۲: جداسازی جاذب مغناطیسی از محلول حل شونده رنگی با استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی.

Figure 2: Separation of magnetic adsorbent from dye solution using external magnetic field.

۲- بخش تجربی

۱-۲- مواد و تجهیزات

پوست سخت میوه بنه، پودر و مش‌بندی شده به عنوان ماده خام از درخت بنه بومی استان کردستان تهیه شد. اسید فسفریک (H_3PO_4) به‌عنوان عامل فعال‌ساز شیمیایی ماده خام، کلرید آهن (II) و (III) ($FeCl_2 \cdot 2H_2O$, $FeCl_3 \cdot 4H_2O$) برای تولید ذرات آهن فلزی در ساختمان جاذب کربن فعال، سدیم هیدروکسید به عنوان عامل رسوب دهنده در روش هم‌رسوبی، اسید کلریدریک برای تنظیم pH همگی مواد شیمیایی مذکور از شرکت مرک تهیه شدند. پودر جامد رنگزاهای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورنژ ۱۰ از شرکت الوان ثابت همدان تهیه شدند.

۲-۲- دستگاه‌ها

کوره الکتریکی با قابلیت ایجاد اتمسفر بی‌اثر ساخت شرکت آذرکوره (کرج، ایران) با قابلیت برنامه ریزی دمایی تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، دستگاه طیف‌سنج مدل PC ۲۱۰۰ تک شعاعی ساخت آمریکا برای اندازه‌گیری جذب محلول‌های رنگی قبل و بعد از تماس با جاذب، ترازو دیجیتال Sartorius مدل TE 214 S ساخت آلمان برای توزین مواد مختلف، دستگاه هم‌زن مغناطیسی مدل AGIMTIC-S ساخت اسپانیا برای تسهیل فرایند انتقال جرم مولکول‌های رنگزا به سطح جاذب، آهن‌ربا با قدرت میدان ۱ تسلا برای جداسازی ذرات جاذب از محلول‌ها، دستگاه pH متر مدل Metrohm ساخت کشور سوئد برای تنظیم pH محلول‌های رنگ، کپسول حاوی گاز نیتروژن با خلوص ۹۹ درصد جهت خنثی‌سازی اتمسفر تولید جاذب کربن فعال و واکنش مغناطیسی‌سازی این جاذب به کار گرفته شدند.

۳-۲- روش‌ها

۱-۳-۲- تولید جاذب کربن فعال

پوست میوه بنه به‌عنوان ماده خام آسیاب و پودر شد. با استفاده از سرند مش‌بندی و با مش ۳۰ تا ۵۰، پودر حاصل با اندازه ذرات در گستره ۸۵۰-۳۰۰ میکرومتر انتخاب گردید. در یک بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری، ۱۰۰ گرم پودر ماده خام با ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۸۵ درصد وزنی/ وزنی مخلوط شد. مخلوط حاصل به مدت زمان ۳ ساعت تحت دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد هم زده شد. این مخلوط به مدت یک ساعت بدون حرکت نگهداری و مازاد اسید فسفریک جدا شد. ماده خام آغشته شده با اسید فسفریک (تقریباً ویسکوز و قیری مانند) در ظرف مخصوص سرامیکی نمونه قرار داده شد. ظرف نمونه به کوره الکتریکی منتقل و تحت اتمسفر گاز نیتروژن برای کربنی‌شدن و فعال‌سازی حرارتی مطابق برنامه‌ریزی دمایی مشخص قرار گرفت. به این منظور دمای کوره از دمای آزمایشگاه (۲۸ درجه سانتی‌گراد) با نرخ ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر

دقیقه به ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد رسید. نمونه به مدت یک ساعت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد باقی‌ماند و دما با نرخ ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه به ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد رسید. نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد متوقف گردید. پس از اتمام برنامه دمایی، کوره به تدریج به دمای آزمایشگاه رسیده و نمونه خارج و وزن شد. وزن جاذب حاصل در هر اجرای فرایند تعیین گردید (۷۲٫۵ گرم به‌طور متوسط). جاذب کربن فعال تولیدی با مقادیر کافی آب مقطر تا خنثی‌سازی شسته شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تا خشک شدن کامل نگهداری گردید.

۲-۳-۲- سنتز کامپوزیت مغناطیسی

از روش هم‌رسوبی به منظور سنتز کامپوزیت مغناطیسی استفاده شد. مقدار ۰٫۲۵ گرم نمک $FeCl_2$ و ۰٫۷۵ گرم $FeCl_3$ به یک بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری منتقل و در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شدند. مقدار ۲ گرم از جاذب کربن فعال تولید شده (بخش ۲-۳-۱) تحت شرایط افزایش دما و هم‌زدن در محلول تهیه شده از نمک‌های آهن پخش گردید. با رسیدن دما به ۷۰ درجه سانتی‌گراد تحت اتمسفر گاز نیتروژن به تدریج محلول سود ۵ مولار اضافه شد. به سیستم زمان کافی داده شد که ذرات آهن به صورت Fe_3O_4 با خاصیت مغناطیسی در ساختمان جاذب قرار گیرد. کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده به کمک یک میدان مغناطیسی خارجی (آهن‌ربا) از محلول جدا و محلول رویی دکانته گردید. جاذب تهیه شده تا خنثی‌شدن محلول شسته شد. در نهایت کامپوزیت تهیه شده در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت برای به‌کارگیری در فرایند حذف رنگ‌های مورد مطالعه خشک گردید.

۲-۳-۳- روش انجام آزمایش‌های جذب

در یک سیستم غیرپیوسته، جاذب تهیه شده برای جذب و حذف رنگزاهای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورنژ ۱۰ مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور در ۲۰ میلی‌لیتر محلول آبی رنگزاهای مورد مطالعه، اثر متغیرهای غلظت رنگ، زمان تماس، pH محلول و مقدار جاذب بر میزان حذف رنگزا مورد بررسی قرار گرفت. از رابطه ۱ مقدار رنگزای جذب شده در زمان t محاسبه شد.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{W} V \quad (1)$$

که در این رابطه q_t مقدار رنگزای جذب شده در ساختمان جاذب در زمان t برحسب C_0 (mg/g) غلظت اولیه رنگزا در محلول برحسب C_t (mg/l) غلظت رنگزا در زمان t درون محلول بر حسب (mg/l) W مقدار جاذب برحسب گرم (g) و V حجم محلول برحسب لیتر (l)

شدن بخشی از سطح متخلخل جاذب توسط ذرات مغناطیسی مرتبط دانست. کاهش سطح ویژه جاذب مغناطیسی نسبت به جاذب اولیه در مطالعه‌ای که چیندم^۱ و همکارانش انجام داده اند، تکرار شده است (۲۸). لذا، اگرچه مغناطیس‌سازی اجرای فرایند جذب سطحی را می‌تواند تسهیل و تسریع سازد، امکان کاهش سطح ویژه جاذب وجود دارد. سایر خصوصیات تخلخلی جاذب‌ها از جمله اندازه متوسط قطر حفرات (Dp nm) نشان داد کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده اندازه حفرات آن مطابق تعریف آیوپاک در گستره مزو تخلخل (۵۰-۲ نانومتر) قرار می‌گیرد. این مقدار برای جاذب کربن فعال قبل از مغناطیس‌سازی بسیار نزدیک تر به ناحیه میکرو تخلخل‌ها (تا ۲ نانومتر) است. این نتیجه را می‌توان به امکان کاهش میکرو تخلخل‌ها در اثر فرایند مغناطیس‌سازی نسبت داد. همچنین اندازه کل حجم حفرات (V_{total} cm³/g) برای کامپوزیت مغناطیسی مقدار ۰,۳۰۶ را نشان می‌دهد که در مقایسه با جاذب کربن فعال قبل از مغناطیس‌سازی (۰,۳۸۱) مقدار کمتری است که این نتایج نیز در توافق با مطالعات قبلی می‌باشد (۲۸).

شکل ۳ نمودارهای ایزوترم‌های جذب و واجذب گاز نیتروژن در ساختمان جاذب کربن فعال قبل و بعد از مغناطیس‌سازی را نشان می‌دهد. این نمودارها اطلاعات با ارزشی را در خصوص ساختمان تخلخل‌های موجود در جاذب‌های تهیه شده در اختیار می‌گذارند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، منحنی جذب و واجذب نیتروژن برای جاذب غیرمغناطیسی در فشارهای نسی مختلف نسبت به کامپوزیت مغناطیسی بالاتر است. این نتیجه نشان از ظرفیت جذب بالاتر جاذب اولیه برای جذب گاز نیتروژن در شرایط آزمایش دارد که با سایر خصوصیات جاذب غیرمغناطیسی از جمله سطح ویژه آن تطابق دارد. همچنین ظاهر شدن یک زانویی در نمودارهای حاصل و تشکیل حلقه هیستریسیس^۲ در فشارهای نسی گاز نیتروژن بیشتر از ۰,۴ نشان از تشکیل و توسعه مناسب میکرو و مزو حفره‌ها در ساختمان جاذب‌ها دارد (۲۹).

در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده به همراه طیف EDAX آن (شکل ۵) مشاهده می‌گردد. آنالیزهای SEM حاصل به وضوح ساختار متخلخل کامپوزیت را نشان می‌دهند. وجود تخلخل‌های با اندازه حفرات بیشتر از ۲ نانومتر تاییدی بر ساختار متخلخل جاذب در گستره مزو حفرات است. همچنین وجود زمینه روشن در تصاویر SEM نشان دهنده وجود اتم‌های سنگین آهن در مقایسه با سایر عناصر موجود در ساختمان جاذب است. طیف EDAX جاذب نیز وجود عنصر آهن در ساختمان جاذب کامپوزیتی حاصل را تایید می‌کند.

است. همچنین برای محاسبه مقدار رنگزای جذب شده در شرایط تعادلی از رابطه ۲ استفاده شد.

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

در این رابطه q_e مقدار رنگزای جذب شده در زمان تعادل و C_e غلظت تعادلی رنگزا در محلول بر حسب mg/l است.

مطالعات سینتیکی جذب رنگزاهای مورد مطالعه با استفاده از ۲۰ میلی‌لیتر محلول رنگزا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و pH ۷ در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم به لیتر در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۶۰ دقیقه با مقدار مشخص جاذب (۰,۰۷ و ۰,۱۴ گرم به ترتیب برای اسید اورانژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳) انجام گرفت. مطالعات ترمودینامیکی و ایزوترم‌های جذبی در دمای ثابت (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و مقادیر pH بهینه شده (۷) برای غلظت‌های مشخصی از محلول‌های رنگزا با استفاده از مقادیر بهینه جاذب مغناطیسی (۰,۰۷ و ۰,۱۴ گرم به ترتیب برای اسید اورانژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳) در زمان‌های تعادل (۶۰ دقیقه) انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین ویژگی‌های ساختمانی کامپوزیت مغناطیسی

در جدول ۱ نتایج حاصل از آنالیز عنصری ماده خام مورد استفاده برای تولید جاذب کربن فعال مشاهده می‌شود. این بررسی برای نشان دادن میزان ذخیره کربنی پوست میوه بنه و جاذب‌های تولیدی انجام گرفت. نتایج نشان داد میزان کربن موجود در ماده خام انتخاب شده (۷۶,۵۶ درصد) از غنای بالایی برخوردار بوده و امکان تولید یک جاذب کربن فعال با سطح ویژه مناسب و میزان کمتری تولید خاکستر را فراهم می‌سازد. این نتیجه در تطابق با سایر ویژگی‌های تعیین شده جاذب است. تغییر ترکیب درصد عناصر در ماده خام و جاذب‌های تهیه شده نشان از اثر فرایندهای اجرا شده بر ساختمان شیمیایی ماده خام پس از تبدیل به جاذب کربنی دارد. کاهش محسوس میزان کربن در جاذب‌های تهیه شده نسبت به ماده خام، خروج کربن از ساختمان ماده خام به ویژه به صورت گازهای CO₂ و CO را (در راستای فرایند تخلخل‌زایی) نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایش‌های جذب و واجذب نیتروژن به روش BET برای مشخص کردن خواص فیزیکی تخلخل‌های جاذب‌ها و سطح ویژه آنها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سطح ویژه جاذب (S_{BET}) ۱۷۹,۳۷ m²/g که یکی از شاخص‌های اصلی کارایی جذبی جاذب است مقدار ۲۲۹,۶ m²/g را برای کربن فعال تهیه شده قبل از مغناطیس‌سازی نشان می‌دهد. این مقدار پس از فرایند مغناطیس‌سازی به ۱۷۹,۳۷ m²/g کاهش یافته است. این مشاهده را می‌توان به قرارگیری ذرات اکسید آهن Fe₃O₄ در ساختار متخلخل جاذب کربن فعال یا پوشیده

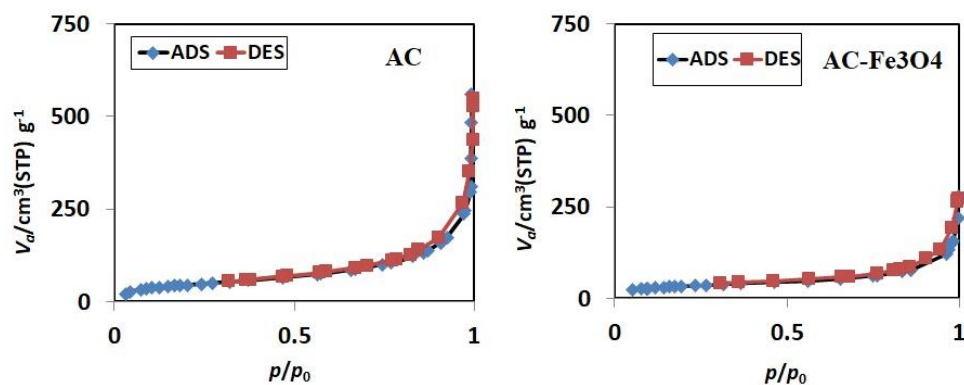
1- Chinedum

2- Hysteresis loop

جدول ۱: نتایج حاصل از آنالیز عنصری و تخلخل‌سنجی BET.

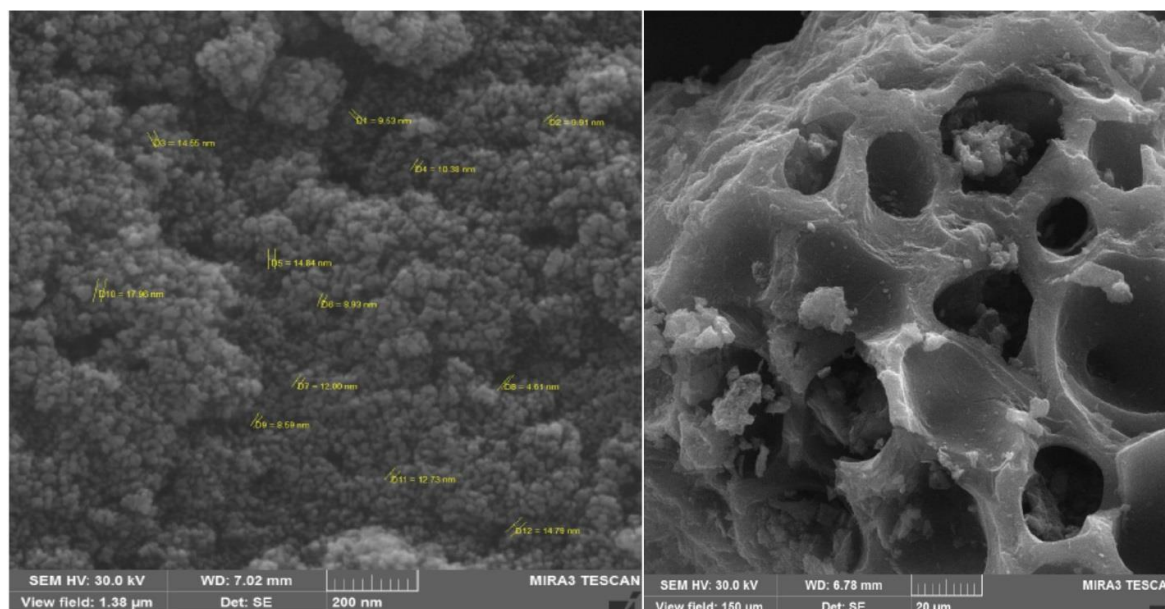
Table 1: The obtained results from elemental analysis and porosity analyses.

Adsorbent	S_{BET} (mg/g)	Dp (nm)	V_{total} (cm ³ /g)	C %	N %	O %
AC	229.60	1.95	0.381	63.26	3.12	23.86
AC/Fe ₃ O ₄	179.37	14.91	0.306	62.53	3.55	24.12
Raw material	-	-	-	74.81	2.18	18325



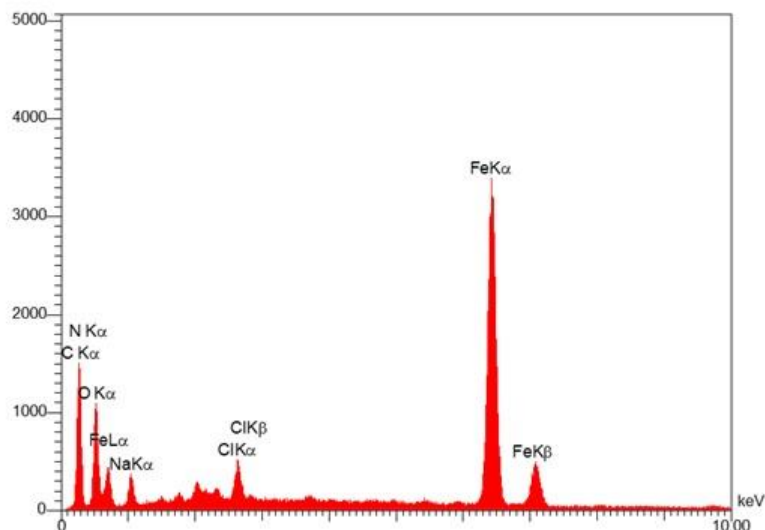
شکل ۳: نمودارهای جذب و واجذب نیتروژن جاذب AC و کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe₃O₄.

Figure 3: N₂ Sorption-desorption graphs of AC adsorbent and AC/Fe₃O₄ magnetic composite.



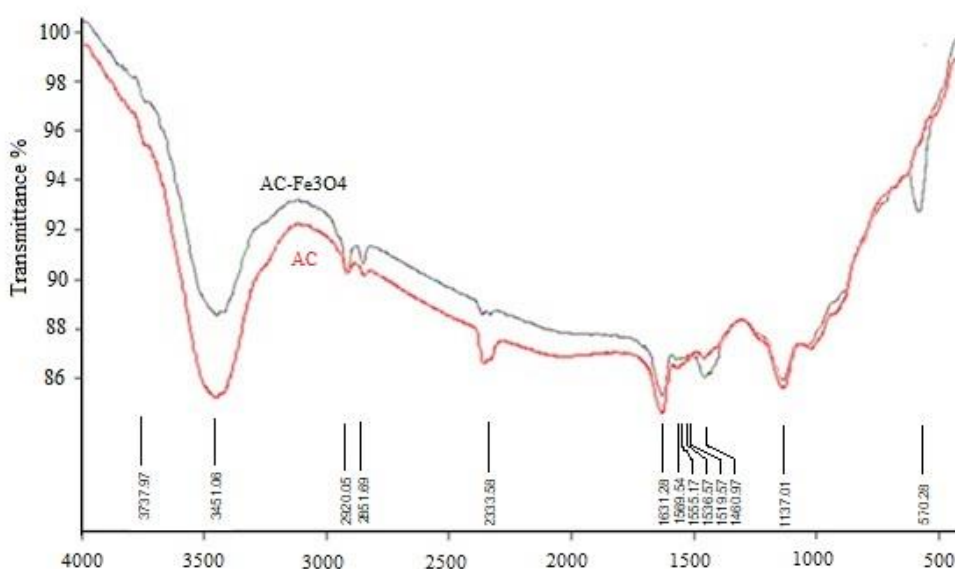
شکل ۴: تصاویر SEM جاذب مغناطیسی تهیه شده و ساختار متخلخل حاصل.

Figure 4: The SEM images of the prepared magnetic adsorbent and its porous structure.



شکل ۵: طیف EDAX کامپوزیت مغناطیسی و حضور پیک آهن در ساختمان آن.

Figure 5: The EDAX spectrum of the magnetic composite and the presence of Fe peak in its structure.



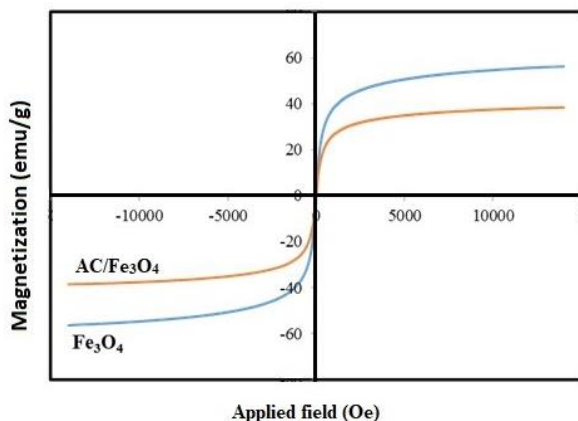
شکل ۶: طیف IR جاذب کربن فعال و کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe₃O₄.

Figure 6: The FT-IR spectrum of the activated carbon (AC) adsorbent and the magnetic composite (AC/Fe₃O₄).

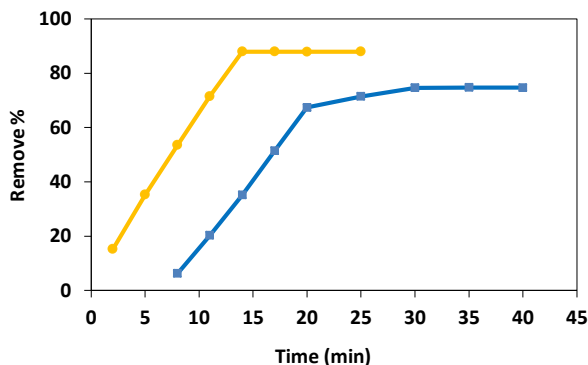
مذکور اتفاق افتاده است همچنین از شدت آنها احتمالاً به دلیل حضور ذرات Fe₃O₄ کاسته شده است. وجود باند جذب ۵۷۰ cm⁻¹ در ساختمان کامپوزیت مغناطیسی ناشی از ارتعاشات کششی Fe-O بوده و تایید می‌کند نانو ذرات Fe₃O₄ در ساختمان کامپوزیت وجود دارد. این مشاهده در مطابقت با سایر روش‌های مشخصه‌یابی ساختمانی در قسمت‌های قبل است. همچنین اسما و همکارانش در طیف FT-IR کربن فعال مغناطیسی تهیه شده از پوست خشک پرتقال این باند جذب مربوط به ارتعاشات کششی Fe-O را گزارش نمودند (۳۰). برای بررسی خواص مغناطیسی نانو ذرات Fe₃O₄ و کامپوزیت

در شکل ۶ طیف FT-IR جاذب‌های کربن فعال و کامپوزیت مغناطیسی در مقایسه با یکدیگر مشاهده می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد شیمی سطح کامپوزیت تهیه شده نسبت به جاذب اولیه AC دارای اشتراک زیادی است. وجود باندهای جذب در نواحی ۳۴۵۱، ۱۶۳۱، ۱۴۶۰ و ۱۱۳۷ cm⁻¹ به ترتیب ناشی از وجود پیوندهای OH آزاد، C=C آلکن مزدوج، پیوندهای C-H در گروه‌های متیلن آلکانی و C-O اتری نشان دهنده وجود اتم‌های اکسیژن در ساختمان جاذب کربن فعال است. در ساختمان جاذب اصلاح شده مغناطیسی، کامپوزیت AC/Fe₃O₄ جایجایی‌هایی در باندهای جذب

اورانژ ۱۰ افزایش یافته و بعد از این مقدار افزایش بیشتر مقدار جذب تأثیری بر میزان حذف این رنگزا ندارد. این مقدار برای اسید بلو ۱۱۳، ۷ g/l بود. این نتایج نشان می‌دهد امکان اشباع‌شدگی مکان‌های جذب سطحی در مقادیر پایین جذب توسط مولکول‌های اسید بلو ۱۱۳ و عدم جذب کامل این مولکول‌ها در ساختار جذب وجود دارد. لذا به مقادیر بیشتری از جذب برای رسیدن به ناحیه تعادلی نمودار نیاز است. این مشاهده در سایر مطالعات مرتبط با فرایند جذب سطحی تکرار گردیده است (۳۲). بنابراین در غلظت‌های برابر از دو رنگزای مورد مطالعه، اسید اورانژ ۱۰ در مقادیر پایین‌تری از جذب تهیه شده به تعادل جذب می‌رسد. این مشاهده با توجه به ساختمان مولکولی اسید بلو ۱۱۳ و جرم مولکولی آن قابل انتظار است (شکل ۹).



شکل ۷: منحنی مغناطیسی VSM برای Fe_3O_4 و کامپوزیت AC/Fe_3O_4 .
Figure 7: Magnetic VSM curve of Fe_3O_4 and AC/Fe_3O_4 composite.



شکل ۸: اثر زمان بر کارایی حذف اسید اورانژ ۱۰ (●) و اسید بلو ۱۱۳ (■) با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی. (pH=7، غلظت رنگزا ۵۰ mg/l، مقدار جذب ۵ g/l و دمای ۲۵ °C).

Figure 8: Effect of time on the removal efficiency of acid orange 10 (●) and acid blue 113 (■) by the magnetic composite. (pH=7, dye concentration 50 mg/l, adsorbent dosage 5 g/l, temperature 25 °C).

مغناطیسی AC/Fe_3O_4 از آنالیز VSM استفاده شد (شکل ۷). تقارن نمودارها و عبور آنها از مبدا مختصات نشان از صفر بودن بازماندگی و وادارندگی نمودارها دارد. این نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت تهیه شده یک ماده پارامغناطیس است و قابلیت جداسازی مغناطیسی از محلول‌های آبی را دارد. همان‌طور که انتظار می‌رود مقدار اشباع مغناطیسی نانو ذرات Fe_3O_4 از کامپوزیت AC/Fe_3O_4 بیشتر است که این مشاهده را می‌توان به پوشش‌دهی بالای ساختمان Fe_3O_4 با ماتریس غیرمغناطیسی کربن فعال نسبت داد (۱).

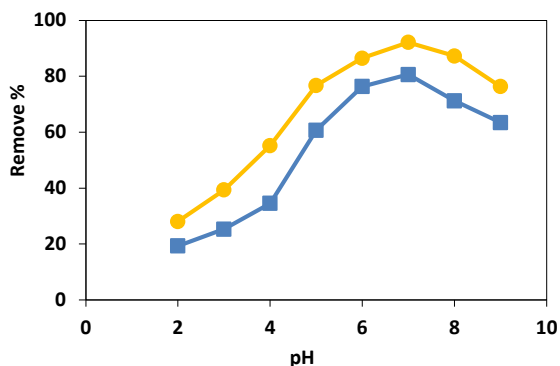
۲-۳- بررسی عوامل موثر بر میزان جذب رنگزاهای مورد مطالعه توسط کامپوزیت AC/Fe_3O_4

۲-۳-۱- اثر زمان تماس

با توجه به وجود اثرات انتقال جرم، فرایند جذب سطحی وابسته به زمان است. لذا زمان تماس کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe_3O_4 با محلول رنگزاهای مورد آزمایش بهینه گردید. به این منظور متغیرهای تأثیر گذار دیگر از جمله مقدار جذب، غلظت رنگزا، pH محلول در مقادیر معین، ثابت نگه داشته شدند. نتایج حاصل نشان داد با افزایش زمان، بازدهی فرایند جذب افزایش می‌یابد. این مشاهده در تطابق با نتایج سایر مطالعاتی است که افزایش بازدهی فرایند جذب سطحی آلاینده‌های رنگی را با افزایش زمان گزارش نموده‌اند (۳۱). دو تفاوت مشخص در نمودارهای حاصل برای رنگزاهای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ مشاهده شد. در خصوص اسید اورانژ ۱۰، در زمان ۱۴ دقیقه منحنی به حالت پایدار رسیده و افزایش بیشتر زمان تأثیر معناداری بر میزان حذف رنگ ندارد. همچنین شیب نمودار در ناحیه افزایشی ثابت است که نشان از امکان دسترسی به تمام مکان‌های جذبی جذب با سرعتی برابر برای تمام مولکول‌های رنگزا دارد. در مورد اسید بلو ۱۱۳، زمان رسیدن به تعادل جذب ۳۰ دقیقه است و در ناحیه افزایشی نمودار به وضوح دو شیب متفاوت دیده می‌شود. این مشاهده نشان از کند شدن سینتیک فرایند جذب مولکول‌های اسید بلو ۱۱۳ بعد از اشباع مکان‌های جذبی در دسترس سطحی جذب است. بعد از اشباع این مکان‌ها، به نظر می‌رسد با توجه به ساختمان حجیم‌تر و وزن مولکولی بالاتر، سینتیک فرایند جذب مولکول‌های اسید بلو ۱۱۳ نسبت به اسید اورانژ ۱۰ برای جذب در مکان‌های جذبی درونی جذب کاهش می‌یابد. شکل ۸ اثر زمان تماس بر بازده فرایند جذب را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲- اثر مقدار جذب

اثر مقدار جذب به عنوان یکی از متغیرهای موثر بر بازدهی فرایند جذب سطحی پیشنهادی بررسی گردید. به این منظور در مدت زمان بهینه شده مقادیر سایر متغیرها ثابت نگه داشته شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار جذب تا ۳٫۵ g/l مقدار جذب اسید

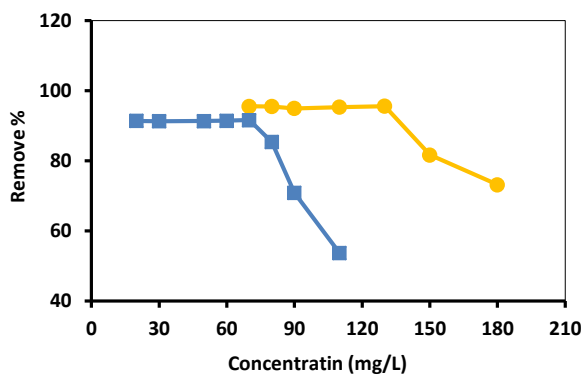


شکل ۱۰: اثر pH محلول رنگزا بر کارایی حذف اسید اورنژ ۱۰ (●) و اسید بلو ۱۱۳ (■) با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی. (مقدار جاذب ۳٫۵ و ۷ گرم به لیتر به ترتیب برای اسید اورنژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳، غلظت رنگزا ۵۰ mg/l، زمان ۱۴ و ۳۵ دقیقه به ترتیب برای اسید اورنژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳ و دمای ۲۵ °C).

Figure 10: Effect of dye solution pH on the removal efficiency of acid orange 10 (●) and acid blue 113 (■) by the magnetic composite. (adsorbent dosage 3.5 and 7 g/l for acid orange 10 and acid blue 113 respectively, dye concentration 50 mg/l, contact time 14 and 35 min for acid orange 10 and acid blue 113 respectively, temperature 25 °C).

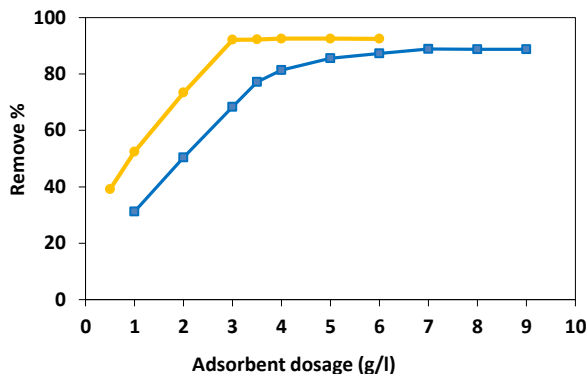
۳-۲-۴- تاثیر غلظت اولیه رنگزاهای

اثر غلظت اولیه رنگزا بر میزان بازده فرایند جذب سطحی پیشنهادی بررسی شد. نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در غلظت‌های بیشتر از ۱۳۰ mg/l میزان جذب و حذف اسید اورنژ ۱۰ کاهش می‌یابد این اتفاق برای اسید بلو ۱۱۳ بعد از غلظت ۷۰ mg/l رخ می‌دهد. این مشاهده نشان می‌دهد با افزایش غلظت رنگزاهای مورد مطالعه به دلیل اشباع شدن مکان‌های جذبی، به تدریج از بازده فرایند کاسته می‌شود.



شکل ۱۱: اثر غلظت اولیه محلول رنگزا بر کارایی حذف اسید اورنژ ۱۰ (●) و اسید بلو ۱۱۳ (■) با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی. (مقدار جاذب ۳٫۵ و ۷ گرم به لیتر به ترتیب برای اسید اورنژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳، pH=7، زمان ۱۴ و ۳۵ دقیقه به ترتیب برای اسید اورنژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳ و دمای ۲۵ °C).

Figure 11: Effect of initial concentration of dye solution on the removal efficiency of acid orange 10 (●) and acid blue 113 (■) by the magnetic composite. (adsorbent dosage 3.5 and 7 g/L for acid orange 10 and acid blue 113 respectively, pH=7, contact time 14 and 35 min for acid orange 10 and acid blue 113 respectively, temperature 25 °C).



شکل ۹: اثر مقدار جاذب بر کارایی حذف اسید اورنژ ۱۰ (●) و اسید بلو ۱۱۳ (■) با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی. (غلظت رنگزا ۵۰ mg/l، زمان ۱۴ و ۳۵ دقیقه به ترتیب برای اسید اورنژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳ و دمای ۲۵ °C).

Figure 9: Effect of adsorbent dosage on the removal efficiency of acid orange 10 (●) and acid blue 113 (■) by the magnetic composite. (pH=7, dye concentration 50 mg/l, contact time 14 and 35 min for acid orange 10 and acid blue 113 respectively, temperature 25 °C).

۳-۲-۳- اثر pH

تغییر pH محلول می‌تواند بر ساختمان مولکول رنگزاهای مورد مطالعه و نیز شیمی سطح جاذب تاثیر بگذارد. بنابراین میزان اسیدی بودن محیط یکی از متغیرهای اساسی و تاثیر گذار بر میزان بازده فرایندهای جذب سطحی است. لذا در گستره pH های ۲ تا ۹ میزان جذب محلول‌های رنگ بررسی گردید. شکل ۱۰ تغییرات میزان بازده حذف رنگ با تغییر pH محلول را نشان می‌دهد.

در ناحیه pH های خنثی بیشترین بازدهی فرایند جذب سطحی مشاهده می‌شود. در ناحیه pH های اسیدی به نظر می‌رسد به علت پروتونه شدن گروه‌های سولفونیک اسیدی در ساختمان اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورنژ ۱۰، مولکول‌های رنگزا شکل کاتیونی داشته و پروتونه شدن گروه‌های عاملی سطح جاذب نیز موجب کاهش جذب سطحی به علت دافعه‌های الکترواستاتیکی شده است. این نتیجه در ناحیه pH های بازی نیز مشاهده می‌گردد. در ناحیه بازی امکان وجود مولکول‌های رنگزا به شکل آنیونی افزایش چشمگیری می‌یابد که می‌تواند همراه با پروتون‌زدایی گروه‌های عاملی سطح جاذب باشد و نیروهای دافعه الکترواستاتیکی مجدداً ایفای نقش کنند. در مطالعات مختلف حذف رنگزاهای توسط فرایند جذب سطحی و استفاده از جاذب‌های بر پایه کربن گزارش‌های مختلفی از اثر pH بر بازده فرایند در منابع ذکر شده است (۳۳، ۳۴). به نظر می‌رسد اثر این متغیر بر میزان حذف رنگ می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله pH نقطه ایزوالکتریک جاذب، تمایل جاذب به معاوضه یون‌های H⁺ و OH⁻ با مولکول‌های رنگزا در گستره pH های بسیار اسیدی و بازی و غیره بستگی دارد.

۳-۳- مطالعات ایزوترمی فرایند جذب

ایزوترم‌های جذبی اطلاعات مفیدی را در خصوص مدل جذب و برهم‌کنش حل شونده با ساختمان جاذب در اختیار می‌گذارند. در چنین مدل‌های ایزوترمی می‌توان به انواع جذب‌های اتفاق افتاده از جمله جذب‌های تک‌لایه، چندلایه، امکان جذب‌های شیمیایی در کنار جذب‌های فیزیکی و انحراف از مدل‌های جذبی ایده‌ال پی برد. در این مطالعه ایزوترم‌های جذبی در شرایط بهینه حاصل برای رنگزاهای مورد مطالعه و زمان تماس ۶۰ دقیقه (برای اطمینان کامل از حصول شرایط تعادلی) با تغییر غلظت رنگ از ۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام شد. جدول ۲ نتایج حاصل از برازش داده‌های تجربی حاصل به مدل‌های ایزوترمی لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوبنین-رادشکوچ را نشان می‌دهد. مقادیر متغیر R_L محاسبه شده در مدل ایزوترمی لانگمویر برای هر دو رنگزای مورد مطالعه بین صفر و یک است. این مقادیر نشان از مطلوب بودن فرایند جذب توسط جاذب مغناطیسی تهیه شده دارد. همچنین برازش داده‌ها به مدل ایزوترمی فروندلیچ مقادیر n به عنوان متغیر مهمی در آشکار نمودن کیفیت

فرایند جذب را بالاتر از عدد یک نشان می‌دهد که این مقادیر نیز مطلوب بودن فرایند جذب را تایید می‌کنند. به علاوه مقدار متغیر E در مدل ایزوترمی دوبنین-رادشکوچ کمتر از 8 KJ/mol است که نشان از انرژی فرایند جذب سطحی در محدوده جذب‌های فیزیکی دارد. با مقایسه تمامی چهار ایزوترم بررسی شده و نتایج حاصل از محاسبات ایزوترمی مرتبط در جدول ۲، مدل فروندلیچ با بالاترین ضریب همبستگی R^2 و کمترین ریشه میانگین خطا (RSME) بهترین مدل برای توصیف فرایند جذب سطحی با کامپوزیت مغناطیسی پیشنهاد شده در این مطالعه است. این نتیجه در مطابقت با مطالعه سیبونی و همکارانش (۲۱) است که حذف اسید بلو ۱۱۳ را توسط جاذب کربن فعال مورد مطالعه قرار داده‌اند. ایزوترم جذبی فروندلیچ مکان‌های جذبی هتروژن (با انرژی‌های متفاوت) را توصیف می‌کند. بنابراین کامپوزیت AC/Fe_3O_4 تهیه شده مکان‌های جذبی با انرژی‌های متفاوت را در اختیار مولکول‌های رنگزاهای مورد بررسی می‌گذارد.

جدول ۲: ثابت‌های ایزوترم‌های جذبی برای جذب اسید اورانژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳ با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده.

Table 2: Adsorption isotherm constants for acid orange 10 and acid blue 113 adsorption using the prepared magnetic composite.

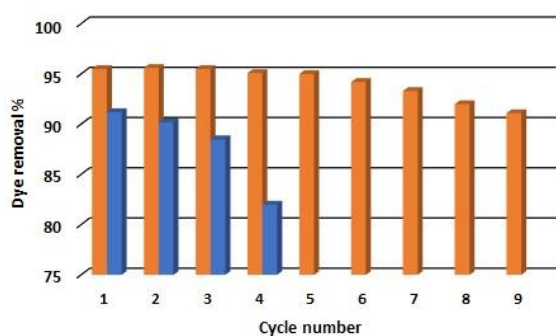
Isotherm Model	Equation	Variables	Acid blue 113	Acid orange 10
Langmuir	$qe = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$ $R_L = \frac{1}{1 + K_L C_e}$	q_m (mg/g)	78.74	294.11
		K_L (L/g)	0.0013	0.001
		R_L	1.15	0.889
		R^2	0.8946	0.2861
		RSME	1.23	2.56
Ferundlich	$q_e = K_f C_e^{1/n}$	n	0.957	1.01
		K_f ((mg/g) (L/mg) ^{1/n})	0.095	0.3683
		R^2	0.9998	0.9977
		RMSE	0.782	0.821
dubinin-radushkevich	$\ln q_e = \ln q_m - K_{D-R} E^2$ $E = \frac{1}{\sqrt{2K_{D-R}}}$	E (KJ/mol)	2.89	0.2236
		q_m (mg/g)	4.97	12.7
		$K_{D-R} \times 10^{-8}$ (mol ² J ²)	6.01	100
		R^2	0.7751	0.8767
		RMSE	4.21	4.36
Temkin	$qe = B \ln(A_T C_e)$	B	2.57	7.04
		A_T (L/g)	0.303	0.1902
		R^2	0.9325	0.9421
		RMSE	3.25	3.15

جدول ۳: ثابت‌های مدل‌های سینتیکی برای جذب اسید اورنژ ۱۰ و اسید بلو ۱۱۳ با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده.

Table 2: Kinetic model constants for acid orange 10 and acid blue 113 adsorption using the prepared magnetic composite.

Kinetic model	Parameters	Acid Blue 113	Acid Orange 10
Pseudo-First-order	$k_1 \text{ min}^{-1}$	0.13	0.05
	$q_e \text{ mg g}^{-1}$	38.9	46.2
$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log} q_e - \left(\frac{K_1 t}{2.303}\right)$	R^2	0.784	0.0521
	RMSE	2.36	2.89
Pseudo-Second-Order	$k_2 \text{ g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$	0.106	0.11
	$q_e \text{ mg g}^{-1}$	4.55	8.8
$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	R^2	0.9999	0.9983
	RMSE	0.821	0.926

شده و جاذب پس از خشک شدن مجدداً در شرایط مشابه آزمایش اولیه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان داد جاذب تهیه شده تا ۷ چرخه جذب و واجذب برای رنگ اورانژ ۱۰ بدون کاهش قابل توجه در ظرفیت جذبی (کمتر از ۵ درصد) قابل استفاده مجدد است. این مقدار برای اسید بلو ۱۱۳، ۳ چرخه بود. این تفاوت را می‌توان به اثر حافظه پایدارتر اسید بلو ۱۱۳ و دشواری واجذب آن از ساختمان جاذب نسبت به اسید اورانژ ۱۰ نسبت داد.



شکل ۱۲: کارایی جذبی کامپوزیت مغناطیسی پیشنهادی در حذف اسید بلو ۱۱۳ (آبی) و اسید اورنژ ۱۰ (نارنجی) بعد از سیکل‌های متعدد جذب و واجذب.

Figure 12: Adsorption efficiency of the proposed magnetic composite in removing Acid Blue 113 (blue) and Acid Orange 10 (orange) after several cycles of adsorption and desorption.

۳-۴- سینتیک فرایند جذب

سینتیک یک فرایند جذب سطحی توسط پدیده‌های مختلفی مانند انتقال جرم، نفوذ و واکنش‌های شیمیایی کنترل می‌شود. بررسی داده‌های سینتیکی این فرایند از جنبه اندازه‌گیری سرعت آن و تعیین متغیرهای کنترل کننده دارای اهمیت است. به طور ویژه اطلاعات سینتیکی کمک شایانی به توسعه روش غیریپوسته^۱ جذب سطحی به فرایند های پیوسته^۲ و مقیاس صنعتی می‌کنند. در این مطالعه نیز در شرایط بهینه و در زمان‌های متفاوت داده‌های سینتیکی حاصل به دو مدل سینتیکی شبه درجه اول^۳ و دوم^۴ برازش شدند. رابطه‌های مدل‌های مورد استفاده و داده‌های مرتبط در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل شبه درجه دوم بالاترین ضریب همبستگی و کمترین ریشه مربعات خطا (RMSE) را نشان داده است.

۳-۵- مطالعه واجذبی

پتانسیل استفاده مجدد از جاذب مغناطیسی سنتز شده طی چندین سیکل فرایند های جذب و واجذب رنگ‌زاهای مورد مطالعه بررسی شد. به این منظور در شرایط بهینه فرایند جذب انجام و به کمک محلول اسیدی با pH برابر ۲ و طی زمان ۳۰ دقیقه با هم‌زدن محلول با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه رنگزای جذب شده از ساختمان جاذب به صورت کمی واجذب گردید. سپس محلول از کاغذ صافی عبور داده

- 1- Batch
- 2- Fixed-bed
- 3- Pseudo-First kinetic model
- 4- Pseudo-Second Kinetic model

تولید جاذب از نظر میزان مصرف معرف‌ها و مواد شیمیایی و انرژی باید مورد توجه قرار گیرد. جاذب مغناطیسی معرفی شده در این مطالعه از ماده خام پوست میوه بنه تهیه می‌گردد. این ماده به فراوانی در جنگل‌های منطقه زاگرس و مناطق مختلف استان کردستان موجود بوده و درختان بنه عمدتاً خود رو هستند. همچنین فرایند تولید جاذب به معرف‌ها و مواد شیمیایی گران قیمتی نیاز ندارد. اگرچه اجرای فرایند نیاز به صرف انرژی و تامین دماهای بالا دارد اما کامپوزیت مغناطیسی حاصل قابلیت آن را دارد که به کمک یک آهن‌ربا از ظرف یا راکتور واکنش جدا گردد. چنین امکانی نیاز به صرف هزینه و زمان جهت جدا نمودن جاذب از سیال تصفیه شده را بسیار کاهش می‌دهد و اجرای فرایند مغناطیس‌سازی را قابل توجه می‌سازد. ضمن آنکه تا حد بسیار زیادی از ایجاد یک آلودگی ثانویه جلوگیری می‌کند. بنابراین می‌توان از نقطه نظر دسترسی و رایگان بودن ماده خام اولیه و عدم نیاز به فرایندهای زمان‌بر جداسازی جاذب از محلول تصفیه شده، جاذب پیشنهادی را مقرون به صرفه دانست.

۸-۳- مقایسه با مطالعات دیگر

اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ به عنوان دو رنگزای رایج مورد استفاده در صنایع مختلف مورد توجه هستند. لذا مطالعات گوناگونی در زمینه حذف رنگزاهای مذکور از نمونه‌های آبی به روش‌های مختلف گزارش شده است. جدول ۵ تعدادی از مطالعات انجام گرفته به روش جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های متفاوت را در مقایسه با مطالعه حاضر نشان می‌دهد. همانطور که از اطلاعات آورده شده در جدول مذکور مشخص است، روش پیشنهادی قابلیت رقابت با سایر روش‌های پیشنهادی برای حذف رنگزاهای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ را دارد و در تعدادی از عوامل ذکر شده برتری محسوس دارد.

۶-۳- کارایی روش پیشنهادی در نمونه‌های آبی و پساب

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، پساب کارخانه رنگ نساجی شرکت الوان ثابت همدان با دو رنگزای مورد مطالعه اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ در غلظت‌های مختلف اسپایک شد. نمونه پساب مورد نظر پس از انتقال به آزمایشگاه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. به منظور حذف رسوبات و مواد معلق، نمونه به آرامی توسط کاغذ صافی، صاف گردید. جدول ۴ نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در شرایط بهینه برای حذف غلظت‌های اضافه شده را به نمونه‌های آبی و پساب صاف شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های پساب کارایی جذبی کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده برای اسید اورنج ۱۰ بیش از ۸۹,۳ درصد می‌باشد. این مقدار برای اسید بلو ۱۱۳ بیش از ۸۱,۲ درصد است.

با توجه به نتایج حاصل در نمونه‌های آبی، اثر بافت نمونه‌های حقیقی بر کارایی جاذب مغناطیسی در این مطالعه مشخص است. اگرچه میزان این تاثیر نسبت به نتایج حاصل از اعمال روش در نمونه‌های مدل زیاد نیست.

۷-۳- مزایای اقتصادی جاذب پیشنهادی

اگرچه کارایی جاذب‌ها یکی از معیارهای اصلی استفاده از این مواد در صنایع مختلف است، قیمت تمام شده و میزان هزینه نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در فرایند تولید یک جاذب، سهولت دسترسی به ماده خام اولیه و ارزان بودن آن بسیار دارای اهمیت است. به همین دلیل استفاده از مواد خام طبیعی غنی از کربن برای تولید جاذب‌های کربنی بسیار مورد توجه بوده است. در این میان مواد خامی که از فراوانی بالاتری برخوردار بوده و برای تهیه آنها هزینه خاصی پرداخت نمی‌گردد از اولویت برخوردارند. همچنین فرایند

جدول ۴: نتایج میزان حذف رنگ‌های مورد مطالعه در نمونه‌های آب و پساب در شرایط بهینه با استفاده از جاذب مغناطیسی تهیه شده.

Table 4: The results of the removal quantities of the studied dyes in water and wastewater samples in optimal conditions using the prepared magnetic adsorbent.

Sample	Dye	Spiked level (mg/l)	Remove* %
Waste water	Acid blue 113	50.0, 25.0	80.6, 81.2
Wastewater	Acid orange 10	50.0, 100.0	88.1, 89.3
Water	Acid Blue 113	50.0, 25.0	91.2, 90.3
Water	Acid Orange 10	50.0, 100.0	98.6, 98.3

* n=3

جدول ۵: مقایسه روش پیشنهادی با مطالعات مشابه.

Table 5: Comparison of the proposed method with similar studies.

Dye molecule	Raw material/Adsorbent	Time (min)	Adsorption capacity mg/g	Adsorbent dosage (g/L)	Refrence
Acid blue113	Magnetically Activated carbon fiber	90.0	112.2	0.8	(35)
	Leaves of Prunus Dulcis/Activated carbon	60.0	97.09	4.0	(36)
	Peltophorum pterocarpum pod extract/hydroxyapatite nanoadsorbents	120.0	153.8	0.5	(37)
	Activated carbon-ZnO composite	15.0	333.32	0.5	(38)
	Pistacia Atlantica Kurdica nuts/Activated carbon	35.0	173.74	7.0	(This study)
Acid Orange10	Melamine/ Cross-linked porous polyimide	200.0	599.0	-	(39)
	TiO ₂ /Na-Y zeolite	7.0	138.3	2.0	(40)
	Cerium Dioxide Nanoparticles	50	33.3	2.0	(41)
	Modified wheat husk/Activated carbon	30.0	31.25	10	(42)
	Pistacia Atlantica Kurdica nuts/Activated carbon	14.0	294.11	3.0	(This study)

مزایای قابل ذکر است. این مطالعه امکان تبدیل یک ماده خام طبیعی و فراوان در جنگل‌های استان کردستان به یک جاذب کربن فعال مغناطیسی با کارایی جذبی بالا را نشان داد که از جنبه‌های محیط‌زیستی، فرایندی و ایجاد ارزش افزوده اقتصادی قابل توجه است. همچنین دامنه کاربرد این جاذب می‌تواند به جذب و حذف سایر انواع آلاینده‌های آلی از جمله هیدروکربن‌های سبک و سنگین، آفت‌کش‌ها و سموم کشاورزی، ترکیبات آلی فرار و غیره توسعه یابد.

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی و آزمایشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، در انجام این پژوهش کمال قدردانی را داریم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از ماده خام و طبیعی پوست میوه درخت بنه بومی استان کردستان جهت تهیه جاذب کربن فعال مغناطیسی (کامپوزیت AC/Fe₃O₄) به منظور حذف رنگ‌زاهای اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ استفاده شد. ماده خام انتخاب شده در جغرافیای کوه‌های زاگرس و به ویژه استان کردستان به وفور یافت می‌شود. بنابراین نیاز به صرف هزینه خاصی برای تهیه ماده خام نیست. روش اجرای فرایند تولید و مغناطیس‌سازی جاذب ساده است و پیچیدگی خاصی ندارد. میزان خاصیت مغناطیسی جاذب تولیدی در حد قابل قبولی بوده و جمع‌آوری آن از محلول‌های تصفیه شده را به کمک یک آهن ربای معمولی میسر می‌سازد. اجرای فرایند حذف رنگ‌زاهای مورد مطالعه ساده است و در مدت زمان تقریباً کوتاهی بیشینه جذب اسید بلو ۱۱۳ و اسید اورانژ ۱۰ به ترتیب در ۳۰ و ۱۴ دقیقه اتفاق می‌افتد. امکان استفاده مجدد از کامپوزیت مغناطیسی تهیه شده جهت حذف رنگ‌های مورد مطالعه (۳ و ۷ تکرار به ترتیب برای اسید بلو ۱۱۳ اسید اورانژ ۱۰) پس از فعال‌سازی مجدد جاذب، از دیگر

۵- مراجع

1. Srivastava AK, Kumar D, Singh D, Singh RK. Xenobiotics in Chemical Carcinogenesis. 1th ed. Mysore: Elsevier; 2022.
2. Chandanshive V, Kadam S, Rane N, Jeon BH, Jadhav J, Govindwar S. In situ textile wastewater treatment in high rate transpiration system furrows planted with aquatic macrophytes and floating phytobeds. Chemosphere. 2020;252: 126513. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126513>.
3. Bhatia D, Sharma NR, Singh J, Kanwar RS. Biological Methods for Textile Dye Removal from Wastewater: A Review. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2017; 47: 1836–1876. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1393263>.
4. Al-Tohamy R, Ali SS, Li F, Okasha KM, Mahmoud YAG, et al.
5. Rania A. T, Sameh S. A, Fanghua L, Kamal M. O, Yehia A. G. M, Tamer E, et al. A critical review on the treatment of

- dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxic. Environ. Saf.* 2022; 231:113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
6. Garg A, Chopra L. Dye Waste: A significant environmental hazard. *Mater. Today: Proc.* 2022; 48(5):1310-1315. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.003>.
 7. Gürses A, Açıkıldız M, Güneş K, Gürses MS. 2d ed. Springer; 2016. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-33892-7>.
 8. Rathi BS, Kumar PS. Sustainable approach on the biodegradation of azo dyes: A short review. *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.* 2022; 33:100578. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100578>.
 9. Sunkar S, Prakash P, Dhandapani B, Baigenzhenov O, Kumar JA, Nachiyaar V. Adsorptive removal of acid blue dye 113 using three agricultural waste biomasses: The possibility of valorization by activation and carbonization – A comparative analysis. *Environ. Res.* 2023;233(15):116486. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116486>.
 10. Negash A, Tibebe D, Mulugeta M, Kassa Y. A study of basic and reactive dyes removal from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation process, *S. Afr. J. Chem. Eng.* 2023;46:122-131. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.07.015>.
 11. Tsai CY, Liu CW, Chan YH., Chang TY, Chen BC, Hsi HC. Development of HCl-treated titania nanotube photocatalysts for dye photodegradation and low-concentration elemental mercury removal, *Catal. Today.* 2017;297(15):113-123. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.04.061>.
 12. Cui T, Wang X, Chen Y, Chen Y, Fu B, Tu, Y. Reverse Osmosis coupling Multi-Catalytic Ozonation (RO-MCO) in treating printing and dyeing wastewater and membrane concentrate: Removal performance and mechanism. *Water Resour. Ind.* 2023; 30:100217. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100217>.
 13. Kamali M, Qotbi A, Haghani M, Vatanpour V. Novel sulfur-containing 2,6-diamino pyridine-based polymer as an additive in polyethersulfone: An effective membrane for removal of mercury (II) ion and dye pollutants. *React. Funct. Polym.* 2023; 193:105758. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105758>.
 14. Mais L, Vacca A, Mascia M, Usai EM, Tronci S, Palmas S. Experimental study on the optimisation of azo-dyes removal by photo-electrochemical oxidation with TiO₂ nanotubes. *Chemosphere.* 2020; 248:125938. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125938>.
 15. Tien C, Introduction to Adsorption Basics, Analysis, and Applications. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019.
 16. Marsh H, Reinoso FR, Activated Carbon. 1st ed. Elsevier; 2006.
 17. Thomaz KTC, Queiroz LS, Faial KDCF, Zamian JR, do Nascimento LAS, Rocha Filho GN, Removal of Fe and Mn ions from groundwater using activated carbon obtained from waste products of Brazil nut and andiroba cultivation in the Amazon region. *Sustain. Mater. Technol.* 2023;38: e00737. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00737>.
 18. Pinheiro RF, Grimm A, Boit Martinello K, Khan MR., Ahmad, N, Silva LFO, Vine pruning waste-based activated carbon for cerium and lanthanum adsorption from water and real leachate. *J. Rare Earths.* 2023, In press. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.10.020>.
 19. Pullas Navarrete J, Torre, E. Preparation of activated carbon fibers (ACF) impregnated with metallic silver particles from cotton-woven wastes and its performance as an antibacterial agent. *Mater. Today Commun.* 2022; 33:104598. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104598>.
 20. Bazan-Wozniak A, Pietrzak R. Adsorption of organic and inorganic pollutants on activated bio-carbons prepared by chemical activation of residues of supercritical extraction of raw plants. *J. Chem. Eng.* 2020; 393:124785. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124785>.
 21. Sutthasupa S, Koo-amornpattana W, Worasuwanarak N, Prachakittikul P, Teachawachirasiri P, Wanthong W, Sugarcane bagasse-derived granular activated carbon hybridized with ash in bio-based alginate/gelatin polymer matrix for methylene blue adsorption. *Int. J. Biol. Macromol.* 2023; 253(7):127464. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127464>.
 22. Shirzad-Siboni M, Jafari SJ, Giah O, Kim I, Lee S-M, Yang J-K. Removal of acid blue 113 and reactive black 5 dye from aqueous solutions by activated red mud. *J. Ind. Eng. Chem.* 2014; 20:1432–7. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.028>.
 23. Li R., Chen J, Zhang H, Rehman F, Siddique J, Shahab A, et al. Facile synthesis of magnetic-activated nanocomposites for effective removal of cationic and anionic dyes in an aqueous environment: An equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamic studies. *Chem. Eng. Res. Des.* 2023; 189:319-332. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.11.017>.
 24. Kittappa S, Jais FM, Ramalingam M, Mohd NS, Ibrahim S. Functionalized magnetic mesoporous palm shell activated carbon for enhanced removal of azo dyes. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020;8(5):104081. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104081>.
 25. Kaewtrakulchai N, Chanpee S, Pasee W, Putta A, Chutipajit S, Kaewpanha M, et al. Valorization of horse manure conversion to magnetic carbon nanofiber for dye adsorption by hydrothermal treatment coupled with carbonization. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2024; 9:100563. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100563>.
 26. Ren Z, Yang X, Zhang W, Zhao Z. Preparation, characterization and performance of a novel magnetic Fe-Zn activated carbon for efficient removal of dyes from wastewater. *J. Mol. Struc.* 2023; 1274:134407. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134407>.
 27. Yang Z, Zhao Z, Yang X, Ren Z. Xanthate modified magnetic activated carbon for efficient removal of cationic dyes and tetracycline hydrochloride from aqueous solutions. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2021; 615:126273. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126273>.
 28. Barasarathi J, Abdullah PS, Uche EC. Application of magnetic carbon nanocomposite from agro-waste for the removal of pollutants from water and wastewater. *Chemosphere* 2022; 305:135384. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135384>.
 29. Anyika C, Asri NAM, Majid ZA, Yahya A, Jaafar J. Synthesis and characterization of magnetic activated carbon developed from palm kernel shells. *Nanotech. Environ Eng.* 2017;2. <https://doi.org/10.1007/s41204-017-0027-6>
 30. Murphy OP, Vashishtha M, Palanisamy P, Kumar KV. A Review on the adsorption isotherms and design calculations for the optimization of adsorbent mass and contact time. *ACS Omega* 2023; 8:17407–30. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>.
 31. Khalil A, Salem M, Ragab S, Sillanpää M, El Nemr A. Orange peels magnetic activate carbon (MG-OPAC) composite formation for toxic chromium absorption from wastewater. *Sci Rep* 2023; 13:3402. <https://doi.org/>

- 10.1038/s41598-023-30161-6.
32. Wang J, Ma J, Sun Y. Adsorption of methylene blue by coal-based activated carbon in high-salt wastewater. *Water* 2022; 14:3576. <https://doi.org/10.3390/w14213576>.
33. Shirzad F, Ebrahimi B, Roostaie A, Mohammadiazar S. Acid modified activated carbon derived from chestnut oak shells for adsorption and removal of methylene blue from aqueous solution. *Prog. Color. Colorants Coat.* 2023;16. <https://doi.org/10.30509/pccc.2022.166980.1170>.
34. Geçgel Ü, Özcan G, Gürpınar GÇ. Removal of methylene blue from aqueous solution by activated carbon prepared from pea shells (*Pisum sativum*). *J. Chem.* 2013; 2013:1-9. <https://doi.org/10.1155/2013/614083>.
35. Malarvizhi R, Ho Y-S. The influence of pH and the structure of the dye molecules on adsorption isotherm modeling using activated carbon. *Desalination* 2010; 264:97-101. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.010>.
36. Kurd Mostafapour F, Zolghadr R, Khodadadi Saloot M, Mahvi AH, Balarak D, Safari E. Removal of Acid blue 113 from aqueous medium using a novel magnetic adsorbent derived from activated carbon fiber. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2022; In press, <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2130061>.
37. Jain SN, Gogate PR. Acid Blue 113 removal from aqueous solution using novel biosorbent based on NaOH treated and surfactant modified fallen leaves of *Prunus Dulcis*. *J. Environ. Chem. Eng.* 2017;5(4):3384-3394. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.06.047>.
38. Sodhani H, Hedao S, Murugesan G, Pai S, Vinayagam R, Varadavenkatesan T, et al. Adsorptive removal of Acid Blue 113 using hydroxyapatite nanoadsorbents synthesized using *Peltophorum pterocarpum* pod extract. *Chemosphere.* 2022; 299:134752. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134752>.
39. Pourali P, Behzad M, Arfaenia H, Ahmadfazeli A, Afshin S, Poureshgh Y, et al. Removal of acid blue 113 from aqueous solutions using low-cost adsorbent: adsorption isotherms, thermodynamics, kinetics and regeneration studies. *Sep. Sci. Technol.* 202;56(18):3079-3091. <https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1867583>.
40. Pan Z, Zhang X, Wang X. Adsorption of acid orange 10 on cross-linked porous polyimide. *SN Appl. Sci.* 2019; 239:1. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0243-8>.
41. Rahimi B, Rezaie-Rahimi N, Jafari N, Abdolahnejad A, Ebrahimi A. Experimental data on the removal of acid orange 10 dye from aqueous solutions using TiO₂/Na-Y zeolite and BiVO₄/Na-Y zeolite nanostructures: A comparison study. *Data in Brief.* 2021; 35: 106869. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106869>.
42. Budiman H, Zuas O. Adsorption isotherm studies on acid orange-10 dye removal using cerium dioxide nanoparticles. *Indones. J. Chem.* 201;14(3):226-232. <https://doi.org/10.22146/ijc.21232>.
43. Banerjee S, Gautam RK, Jaiswal A, Gautam PK, Chattopadhyaya MC. Study on adsorption behavior of Acid Orange 10 onto modified wheat husk. *Desalin. Water Treat.* 2016;57(26):12302-12315. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1046151>.

How to cite this article:

Ebrahimi B, Mohammadiazar S. Effective Removal of Acid Blue 113 and Acid Orange 10 from Industrial Wastewater Using a Magnetic Composite Prepared from the Hard Shell of the Native Bane Fruit. *J Color Sci Tech.* 2024;17(4):325-340. <https://dori.net/dor/20.1001.1.17358779.1402.17.4.4.9> [In Persian]