



Removal of Dye Pollution from Aqueous Solutions by Biocompatible Adsorbents with a Sustainable Water Resources Management Approach

Hanieh Mirbolooki¹ | Shahriar Mahdavi^{2✉} | Eisa Solgi³ | Babak Razdar⁴ |
Mahboubeh Zarabi⁵ | Davoud Akhzari⁶

1. Department of Environmental Science, Research Institute for Grape and Raisin (RIGR), Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: hanieh.mirbolooki@stu.malayeru.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: sh.mahdavi@malayeru.ac.ir
3. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: e.solgi@malayeru.ac.ir
4. Department of REgional Models and geo-Hydrological Impacts Division (REMHI), Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC), Caserta, Italy. E-mail: babak.razdar@cmcc.it
5. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: zarabi@malayeru.ac.ir
6. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: akhzari@malayeru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 29 December 2024 Received in revised form 10 January 2025 Accepted 9 February 2025 Published online 17 May 2025 Keywords: <i>Industrial dyes</i> <i>Textile industry</i> <i>Unmodified waste of grape tree</i> <i>Water purification</i>	Using a systematic method to remove industrial dye contamination from water resources during water crisis conditions plays an important role in reducing the costs of purification and drinking water supply. The aim of the present study is to use virgin and unmodified waste of grape tree as an adsorbent to remove red textile polyazo dye from aqueous media. In this study, experimental planning was carried out through the Design Expert software using the response surface methodology (RSM) and statistical data analysis was carried out through ANOVA analysis. The interaction effect of five independent variables on each other and on the dependent variable (response) was studied. And based on the results, the highest color removal rate was obtained in 30 minutes, at a temperature of 25 degrees, pH equal to 4, and with an adsorbent amount of 10 g/L. The studying method is one of the appropriate methods for removing pollutants due to its simple and cost-effective operation and the absence of secondary pollution and applying the prepared adsorbent can be a good option for removing textile dyes from industrial wastewater, both in terms of efficiency and economy.

Cite this article: Mirbolooki, H., Mahdavi, Sh., Solgi, E., Razdar, B., Zarabi, M., & Akhzari, D. (2025). Removal of Dye Pollution from Aqueous Solutions by Biocompatible Adsorbents with a Sustainable Water Resources Management Approach. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 165-180.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387650.1198>





حذف آلودگی رنگی از محلول‌های آبی توسط جاذب‌های زیست‌سازگار با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب

هانیه میربلوکی^۱ | شهریار مهدوی^۲ | عیسی سلگی^۳ | بابک رازدار^۴ | محبوبه خضری^۵ | داود اخضری^۶

۱. گروه علوم محیطی، پژوهشکده انگور و کشمش، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: hanieh.mirbolooki@stu.malayeru.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: sh.mahdavi@malayeru.ac.ir

۳. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: e.solgi@malayeru.ac.ir

۴. گروه مدل‌های منطقه‌ای و تأثیرات ژئو هیدرولوژیکی (REMHI)، بنیاد اروپایی مدیریت‌های تغییرات آب‌وهوایی (CMCC)، ایتالیا. رایانامه: babak.razdar@cmcc.it

۵. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: zarrabi@malayeru.ac.ir

۶. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: akhzari@malayeru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

استفاده از روش اصولی جهت حذف آلودگی‌های ناشی از رنگ‌زاهای صنعتی از منابع آبی در شرایط بحران آب، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های تصفیه و تأمین آب شرب ایفا می‌کند. هدف از مطالعه حاضر، به‌کارگیری ضایعات بکر و اصلاح‌نشده درخت انگور به‌عنوان جاذب جهت حذف رنگ پلی‌آزوی قرمز نساجی از محیط آبی می‌باشد. در این پژوهش، برنامه‌ریزی آزمایش‌ها از طریق نرم‌افزار طراحی آزمایش (Design Expert) با روش سطح پاسخ (RSM) و تحلیل آماری داده‌ها از طریق آنالیز ANOVA انجام شد. اثر متقابل پنج متغیر مستقل بر یکدیگر و بر متغیر وابسته (پاسخ) موردبررسی قرار گرفت و براساس نتایج به‌دست‌آمده، بالاترین میزان حذف رنگ، در زمان ۳۰ دقیقه، دمای ۲۵ درجه، pH برابر با ۴ و با مقدار جاذب ۱۰ g/L به‌دست آمد. روش موردبررسی، به‌دلیل عملیات ساده و مقرون‌به‌صرفه و نیز عدم ایجاد آلودگی ثانویه یکی از روش‌های مناسب جهت حذف آلاینده‌هاست و استفاده از جاذب تهیه‌شده هم به لحاظ کارایی و هم به لحاظ اقتصادی می‌تواند گزینه مناسبی برای حذف رنگ‌های نساجی از پساب‌های صنعتی باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

کلیدواژه‌ها:

تصفیه آب

رنگ‌زاهای صنعتی

صنعت نساجی

ضایعات اصلاح‌نشده درخت انگور

استناد: میربلوکی، هانیه؛ مهدوی، شهریار؛ سلگی، عیسی؛ رازدار، بابک؛ خضری، محبوبه و اخضری، داود (۱۴۰۴). حذف آلودگی رنگی از محلول‌های آبی

توسط جاذب‌های زیست‌سازگار با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۱)، ۱۶۵-۱۸۰.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387650.1198>



۱. مقدمه

رشد سریع جمعیت و صنعتی‌شدن، مشکل آلودگی آب را در سطح جهانی تشدید کرده است. برای مقابله با چالش‌های ناشی از صنعتی‌شدن، استفاده از رنگ‌های سنتزی در صنایع مختلف از جمله صنعت نساجی، صنایع رنگرزی و چاپ، دباغی و صنایع رنگ‌آمیزی، صنایع کاغذ و خمیر کاغذ، صنایع آرایشی و غذایی، صنایع تولید رنگ و صنایع داروسازی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. در میان این صنایع، صنعت نساجی به‌دلیل مصرف قابل‌توجه آب و تخلیه مواد رنگی در پساب، به‌طور ویژه‌ای در آلودگی آب برجسته است (Islam et al., 2023).

تخلیه این پساب به منابع آبی، شاخص‌هایی نظیر نیاز بیولوژیکی اکسیژن (BOD)، نیاز شیمیایی اکسیژن (COD)، مواد جامد محلول (TDS)، مواد جامد معلق (TSS) و pH را تحت تأثیر قرار می‌دهد. رهاسازی این پساب‌ها بدون هیچ‌گونه تصفیه یا اقدام اصلاحی، خطرات عظیمی برای اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان به همراه خواهد داشت (Jiang et al., 2022).

اغلب رنگ‌های مورد استفاده در صنایع مختلف نساجی از نوع رنگ‌های سنتزی و دارای ساختار مولکولی آروماتیکی پیچیده‌ای می‌باشند که به‌دلیل سمی‌بودن و دیرتجزیه‌شدن، چنانچه بدون تصفیه وارد محیط شوند می‌توانند خطرات جدی به محیط زیست و انسان وارد کنند. به‌عنوان مثال، برخی از رنگ‌ها می‌توانند طی فرایند تجزیه احیایی، آمین‌های آروماتیک سرطانزا تولید کنند و می‌توانند به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم در آب، خاک و زنجیره غذایی نفوذ کنند. یکی از گروه‌های مهم رنگ‌ها در این صنعت، رنگ‌های پلی‌آزو است. این رنگ‌ها به‌دلیل خواص ویژه‌ای که دارند، در تولید پارچه‌های مختلف کاربرد زیادی دارند. ساختار شیمیایی رنگ‌های پلی‌آزو حاوی دو یا چند پیوند آزو ($-N=N-$) است که گروه‌های عاملی مختلف مانند هیدروکسیل ($-OH$) یا آمینو ($-NH_2$) می‌توانند به‌عنوان گروه‌های جانبی متصل شوند؛ این گروه‌ها مسئول ایجاد طیف گسترده‌ای از رنگ‌ها در محدوده زرد تا قرمز و آبی هستند. این رنگ‌ها معمولاً از ثبات بالایی در برابر نور و شست‌وشو برخوردارند و معمولاً در آب یا حلال‌های آلی محلول هستند (Habibzadeh et al., 2018). ورود مواد رنگی سمی به اکوسیستم‌های آبی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی فرایند فتوسنتز را مختل کند. این مواد با کاهش نفوذ نور خورشید به لایه‌های زیرین آب، فعالیت فتوسنتزی گیاهان آبی و فیتوپلانکتون‌ها را محدود می‌کنند. علاوه بر این، رسوب مواد رنگی در بستر اکوسیستم‌های آبی می‌تواند شرایط بی‌هوازی ایجاد کرده و انتشار گازهای سمی مانند متان و سولفید هیدروژن را افزایش دهد. این وضعیت نه‌تنها کیفیت آب‌های سطحی را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق تراوش مواد شیمیایی به منابع آب زیرزمینی نیز اثرات مخربی برجای می‌گذارد. آلودگی منابع آب زیرزمینی با این مواد می‌تواند کیفیت آب آشامیدنی را تحت تأثیر قرار داده و سلامت انسان و محیط زیست را به خطر اندازد (Slama et al., 2021). با وجود معضلات زیادی، رنگ‌ها به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف استفاده می‌شوند، حذف رنگ از پساب‌های صنعتی یک چالش بزرگ زیست‌محیطی است و روش‌های مختلفی برای این کار توسعه یافته است. این روش‌ها براساس اصول شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی عمل می‌کنند (Sen et al., 2011).

حذف آلودگی از منابع آبی در شرایط بحران کم‌آبی، نقش حیاتی در حفاظت و مدیریت پایدار منابع آب ایفا می‌کند. بهسازی و استفاده مجدد از پساب‌ها، نه‌تنها در مناطق خشک بلکه در مناطق مرطوب جهان به‌سرعت به‌صورت یک ابزار مهم در برنامه‌ریزی منابع آب در حال پیگیری و اجراء است. این فرایندها به بهبود کیفیت آب، حفظ سلامت اکوسیستم‌ها و افزایش قابلیت دسترسی به منابع آبی کمک می‌کنند. مدیریت صحیح آلودگی نقش مهمی در کاهش هزینه‌های تصفیه و تأمین آب شرب ایفا نموده، با جلوگیری از تخریب منابع طبیعی به پایدارسازی دسترسی به آب در آینده کمک می‌نماید. در این راستا، استفاده از روش‌های نوین حذف آلودگی می‌تواند تأثیرات مثبتی بر حفظ و بهینه‌سازی منابع آبی داشته باشد (Davarnejad et al., 2020).

متداول‌ترین روش‌های شیمیایی مورد استفاده برای حذف رنگ شامل انعقاد و لخته‌سازی، اکسیداسیون پیشرفته، کلرزنی و استفاده از کاتالیست‌های شیمیایی برای تخریب رنگ‌هاست که معایبی مانند هزینه بالای مواد و تجهیزات، مصرف زیاد مواد شیمیایی و تولید محصولات جانبی (لجن) مضر و سمی دارند. روش‌های بیولوژیکی اغلب شامل فرایندهای هوازی و بی‌هوازی هستند که نیاز به کنترل دقیق شرایط (pH، دما و اکسیژن) داشته و از نظر زمانی فرایند حذف رنگ کند یا در برخی موارد، غیرقابل انجام توسط میکروارگانیسم‌هاست. روش‌های فیزیکی شامل فیلتراسیون غشایی و روش‌های جذب سطحی است که روش‌های فیزیکی در مجموع روش‌های مطلوب‌تری جهت حذف رنگ و دیگر آلاینده‌های پساب‌های صنعتی محسوب می‌شوند، اما مشکلاتی مانند هزینه بالای ساخت و نگهداری و گرفتگی غشا و در برخی فرایندها، مصرف زیاد انرژی، روش فیلتراسیون را به روشی پرهزینه تبدیل کرده است. اما براساس نتایج پژوهش‌های Varsha et al. (2022) و همچنین Akhtar & Zaman (2024)، استفاده از جاذب‌ها به‌ویژه جاذب‌های طبیعی (مانند کربن فعال، زغال زیستی، یا مواد معدنی) برای جذب رنگ از محلول، به‌دلیل زیست‌سازگار بودن، عدم تولید محصولات جانبی مضر و راندمان بالا در حذف رنگ‌های مقاوم مورد استقبال زیاد محققان و دست‌اندرکاران حفاظت و احیای منابع آبی آلوده قرار گرفته است.

پژوهش‌های قابل‌توجهی در زمینه حذف آلودگی‌های رنگی از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب‌های سلولزی انجام شده است. از جمله، Moattari & Mohammadi (2021)، پس از انجام پژوهشی بر جاذب‌های زیست‌سازگار مانند نانوکریستال‌های سلولزی که ظرفیت جذب بالایی (تا ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم) برای رنگ‌های نساجی مانند رنگ پلی‌آزو داشتند، به این نتیجه رسیدند که جاذب‌های سلولزی به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر دسترسی بالا به سطح و خصوصیات ساختاری مناسب، از توانایی بالایی در جذب آلاینده‌های سخت تجزیه‌پذیر برخوردارند.

جاذب‌های سلولزی به‌دلیل ساختار شیمیایی منحصر به فرد خود، پتانسیل بالایی برای حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها از محلول‌های آبی دارند. ساختار سلولز شامل زنجیره‌های بلند پلیمری از β -1,4-D-گلوکوپیرانوز است که دارای گروه‌های هیدروکسیل (OH-) در موقعیت‌های مختلف است. این گروه‌های عاملی، سایت‌های فعالی برای تعامل با آلاینده‌ها از طریق مکانیسم‌هایی نظیر پیوند هیدروژنی، جذب سطحی، تبادل یونی و کمپلکس‌سازی فراهم می‌کنند. علاوه بر رنگ‌ها، جاذب‌های سلولزی می‌توانند برای حذف آلاینده‌های دیگری نظیر فلزات سنگین (مانند کادمیوم، سرب، کروم و جیوه) مورد استفاده قرار گیرند. گروه‌های هیدروکسیل موجود در ساختار سلولز می‌توانند با یون‌های فلزی از طریق تبادل یونی یا تشکیل کمپلکس واکنش دهند و این فلزات را به‌طور مؤثر از محلول حذف کنند (Darmenbayeva et al., 2024).

همچنین، جاذب‌های سلولزی پتانسیل حذف آلاینده‌های آلی مانند فنول‌ها، مواد دارویی، و ترکیبات نفتی را دارند. به‌ویژه، اصلاح شیمیایی سلولز (مانند اکسیداسیون برای ایجاد گروه‌های کربوکسیلیک یا آمین‌دار کردن برای افزایش واکنش‌پذیری) می‌تواند ظرفیت جذب این جاذب‌ها را برای آلاینده‌های آلی به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. از دیگر کاربردهای بالقوه می‌توان به حذف نیتروژن و فسفر از پساب اشاره کرد. جاذب‌های سلولزی اصلاح‌شده با عامل‌های خاص می‌توانند به‌عنوان جاذب مؤثر برای حذف این مواد مغذی عمل کنند و در مدیریت آلودگی‌های ناشی از فرایندهای کشاورزی و صنعتی مؤثر باشند (Shi et al., 2021).

نتایج نشان می‌دهند که جاذب‌های سلولزی با توجه به ویژگی‌های خاص خود، گزینه‌های امیدبخشی برای حذف آلودگی‌های رنگی از محلول‌های آبی هستند. با توجه به این‌که این مواد از منابع تجدیدپذیر به‌دست آمده‌اند، استفاده از آن‌ها در تصفیه آب نه تنها مؤثر، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون به‌صرفه است. بهینه‌سازی فرایندهای جذب می‌تواند به دستیابی به نتیجه‌های بهتر در حذف آلودگی‌ها کمک کند. با توجه به بررسی‌هایی که در این زمینه توسط پژوهش‌گران

دیگر (Affat, 2021) انجام شده، روش‌های زیست‌سازگار به دلیل هزینه کم، سازگاری با محیط زیست و کاهش پسماندهای خطرناک، گزینه‌ای مناسب برای مدیریت پایدار منابع آبی محسوب می‌شوند. درحالی که روش‌های شیمیایی در برخی موارد کارایی بیشتری دارند، اما تأثیرات منفی محیط زیستی و هزینه‌های بلندمدت آن‌ها قابل توجه است. با توجه به پژوهش‌های مشابهی که توسط Aghebat Bekhair *et al.* (2022) و Zare Mirakabad (2017) در زمینه مدیریت پایدار منابع آب و ارتباط مستقیم آن با کنترل و کاهش آلودگی از منابع آبی به انجام رسیده است، استفاده از فناوری‌های نوین و اتخاذ رویکردهای جامع می‌تواند به کاهش آلودگی و حفظ منابع آب از طریق تولید آب‌های بازیافتی و بهینه‌سازی استفاده از منابع آبی کمک کند. اقدامات مناسب در این زمینه می‌تواند نقش مهمی در برقراری تعادل میان تأمین آب سالم و پایدار و استفاده از آن در صنایع مختلف ایفا نماید.

اهمیت این موضوع به خصوص در مناطق صنعتی و کشاورزی دارای اهمیت بیشتری است، جایی که آب به عنوان منبع اساسی برای زندگی و تولید به شمار می‌آید (Kasma *et al.*, 2021; Siddique, 2021). حذف رنگ از منابع آبی به عنوان یک روش مؤثر برای کاهش بار آلودگی‌های شیمیایی، نه تنها به بهبود کیفیت آب و اکوسیستم‌های آبی کمک می‌کند، بلکه نقش به سزایی در مدیریت پایدار منابع آب دارد (Affat, 2021)؛ در این راستا، روش‌های نوآورانه مانند استفاده از جاذب‌های زیست‌سازگار و تکنیک‌های ترکیبی تصفیه در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بر این اساس در مطالعه حاضر، به بررسی حذف آلودگی رنگ پلی‌آزو قرمز با استفاده از جاذب‌های زیست‌سازگار سلولزی پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. مواد مورداستفاده در این پژوهش شامل ضایعات بکر و اصلاح نشده درخت انگور به عنوان جاذب، رنگ پلی‌آزوی قرمز نساجی و آب دو بار تقطیر برای ساخت محلول رنگی سنتزی؛ تجهیزات مورداستفاده نیز شامل اسپکتروفوتومتر مدل ۷۳۱۵، شرکت سازنده JENWAY انگلستان (جهت محاسبه میزان جذب محلول رنگی قبل و بعد از عملیات حذف رنگ)، ترازوی الکتریکی مدل A&D HR 120i، ساخت کشور ژاپن (جهت توزین جاذب و ماده جذب شونده)، دستگاه سانتریفیوژ یونیورسال، ساخت شرکت پارس آزما ایران (جهت جداسازی جاذب از محلول بعد از عملیات) و آون مدل ۸۰۰-۱۰۰، ساخت شرکت Memmert آلمان (جهت خشک کردن جاذب) بودند.

۲.۱. تهیه جاذب

جهت انجام آزمایش‌های جذب ماده آلاینده از محلول آبی، از جاذب به دست آمده از ضایعات بکر و اصلاح نشده درخت انگور استفاده شد. در ابتدا، پس از تهیه ضایعات چوبی از تاکستان و شست و شو با آب دو بار تقطیر و خشک کردن در آون در دمای حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد، ضایعات خرد شد و به شکل پودر درآمد (Lam *et al.*, 2018).

۲.۲. تهیه محلول رنگی

جهت بررسی نوع آلاینده حذف شونده طی عملیات جذب، ترجیح این است که از محلول سنتزی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شود تا به این ترتیب میزان کمیت آلاینده اولیه و ثانویه در محیط آبی به صورت دقیق محاسبه گردد. در پژوهش حاضر، از رنگ متداول نساجی که در بررسی‌های آزمایشگاهی حذف رنگ در مطالعات پیشین کمتر به آن‌ها پرداخته شده، استفاده شد؛ مشخصات رنگ مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است.

Table 1. Specifications of red dye (Goscianska *et al.*, 2017)

Dye Type	Color mode	Application	Chemical formula
Anionic- Direct- Polyazo	Powder	Textile industry	C ₄₅ H ₂₆ N ₁₀ Na ₆ O ₂₁ S ₆

۳.۲. برنامه‌ریزی آزمایش‌ها

در این پژوهش، برنامه‌ریزی آزمایش‌ها از طریق نرم‌افزار طراحی آزمایش (Design Expert) با روش سطح پاسخ (RSM) و با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. مزیت اصلی RSM کاهش تعداد تکرار آزمایش‌ها برای ارزیابی پارامترهای چندگانه و روابط متقابل آن‌هاست. حدود کمینه و بیشینه (دامنه تجربی) متغیرهای مستقل (پایین (۱-) و بالا (۱+)) جهت ورودی اولیه به نرم‌افزار، براساس مقاله‌ها و آزمایش‌های اولیه در آزمایشگاه تعیین شد. تحلیل آماری داده‌ها برای هر جاذب و تأثیر مجموعه متغیرهای آزمایش از طریق آنالیز ANOVA خروجی از نرم‌افزار صورت گرفت که براساس داده‌های به‌دست‌آمده، معنی‌دار بودن مدل موردبررسی و تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی را به‌خوبی تفسیر می‌کند (Fekri *et al.*, 2023).

۴.۲. متغیرهای آزمایش

متغیرهای اصلی آزمایش شامل pH، زمان تماس، غلظت اولیه رنگ موجود در محلول آبی، مقدار جاذب و دما می‌باشد. دامنه متغیرها براساس آزمایش‌های مشابه پژوهش‌های معتبر پیشین تعیین شدند. به این ترتیب که pH در سه دامنه اسیدی، خنثی و قلیایی غلظت‌های مختلف رنگ جهت ساخت محلول سنتزی و مقدار مختلف جاذب، جهت مقایسه آزمایش می‌شود (Davarnejad *et al.*, 2020; Sohaimi *et al.*, 2017).

۵.۲. بررسی راندمان تصفیه پساب سنتزی

بررسی میزان حذف ماده آلاینده توسط جاذب‌های موردبررسی، از طریق دستگاه اسپکتروفتومتر برای میزان حذف رنگ محاسبه می‌شود. درصد حذف رنگ از رابطه زیر به‌دست می‌آید که C_0 و C_t به‌ترتیب میزان جذب محلول رنگی قبل از تصفیه و میزان جذب محلول رنگی بعد از تصفیه می‌باشد.

$$\text{رابطه ۱)} \quad \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

۳. نتایج و بحث

۳.۱. اثر پارامترهای مختلف بر میزان حذف رنگ

در نمودار (۱)، تأثیر متقابل غلظت‌های مختلف رنگ و مقادیر مختلف جاذب بر یکدیگر و بر میزان حذف رنگ نشان داده شده است. برای بررسی این تأثیر، مقدار pH برابر با ۷، زمان برابر با ۱۰۵ دقیقه و دما در ۳۷/۵ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شدند. به‌منظور تعیین ورودی‌های اولیه به نرم‌افزار، غلظت رنگ، در محدوده ۲۰-۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و مقادیر جاذب، در محدوده ۱-۱۰ گرم بر لیتر تعیین گردید. با توجه به نمودار، با افزایش غلظت رنگ، در صورتی که مقدار جاذب ۱ گرم بر لیتر باشد، میزان حذف رنگ از سیستم حداکثر ۳۰ درصد است. براساس طیف رنگی، نواحی آبی‌رنگ از تیره به روشن میزان حذف رنگ کم به زیاد را به‌ترتیب نشان می‌دهد که این حالت در غلظت‌های بالای رنگ و مقدار کم منعکس‌کننده مشاهده می‌شود. اما با افزایش مقدار جاذب، حتی در حداکثر غلظت رنگ (۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) هم حدود ۵۰ درصد از میزان رنگ از محیط آبی توسط جاذب موردبررسی حذف

شده است (طیف رنگی سبز تا زرد که بیانگر میزان متوسط حذف رنگ است. این محدوده نشان می‌دهد که مقدار مناسب ماده منعقدکننده می‌تواند حذف رنگ را تا حدی بهبود بخشد، حتی در غلظت‌های بالاتر رنگ)؛ حذف ۶۵ درصد از رنگ در شرایطی که مقدار جاذب ۱۰ گرم بر لیتر و غلظت رنگ ۲۰ گرم بر لیتر بوده، رخ داده است که طیف قرمز/نارنجی روی نمودار نشان‌دهنده همین شرایط است که در غلظت‌های پایین رنگ و مقادیر کافی منعقدکننده اتفاق می‌افتد. این نتایج با یک مطالعه مروری که توسط Aragaw & Bogale (2021) بر جاذب رنگ با استفاده از جاذب‌های کم‌هزینه مختلف با تأکید بر عواملی مانند غلظت اولیه رنگ و دوز جاذب در محیط آبی پرداخته، مطابقت دارد. در این مقاله نیز به تأثیر مستقیم مقادیر بالای جاذب‌ها در کارایی حذف رنگ حتی در شرایطی که غلظت رنگ پایین بوده اشاره داشته که این عامل حتی توانسته به‌تنهایی شرایط را برای جذب بهینه فراهم کند (Aragaw & Bogale, 2023). مطالعه دیگری که در سال ۲۰۲۴ در زمینه حذف رنگ از فاضلاب با استفاده از جاذب‌های کم‌هزینه انجام شده نیز، مقدار جاذب را لازمه عملکرد مناسب سیستم حذف رنگ برای تمام غلظت‌های رنگ موردبررسی دانسته است (Singh & Kumar, 2024). پژوهشی که توسط Song et al. (2015) انجام شده و بر حذف رنگ آبی متیلن از محلول‌های آبی با استفاده از اکسید گرافن تمرکز دارد، به نرخ حذف ۹۵ درصدی رنگ در غلظت‌های کم پرداخته و نتیجه‌گیری کرده که با افزایش غلظت رنگ و افزایش میزان جاذب، سیستم در حالت تعادل کارایی خود را حفظ می‌کند، اما با افزایش غلظت رنگ و ثابت ماندن مقدار جاذب، حذف رنگ اتفاق می‌افتد و با گذشت زمان ثابت می‌شود (Fekri et al., 2023). هم‌چنین، در این نمودار، منحنی‌بودن خطوط کانتور روی صفحه افقی بیانگر تعامل و اثر متقابل این دو پارامتر است؛ به این معنا که تأثیر غلظت رنگ به مقدار ماده منعقدکننده وابسته است (Djeghader et al., 2020; Matos Barbosa, 2017).

Factor Coding: Actual

Dye Removal (Percentage (%))

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

10 65

X1 = A: Adsorbent Dosage

X2 = B: Dye Concentration

Actual Factors

C: pH = 7

D: Time = 105

E: Temperature = 37.5

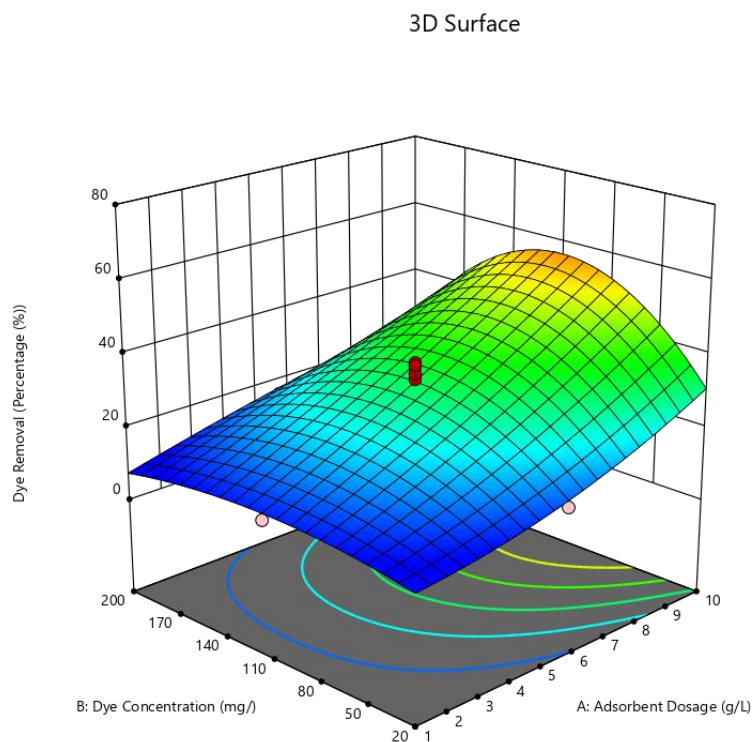


Figure 1. The interaction of dye concentration and adsorbent dosage on dye removal rate

Factor Coding: Actual

3D Surface

Dye Removal (Percentage (%))

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

10 65

X1 = B: Dye Concentration

X2 = C: pH

Actual Factors

A: Adsorbent Dosage = 5.5

D: Time = 105

E: Temperature = 37.5

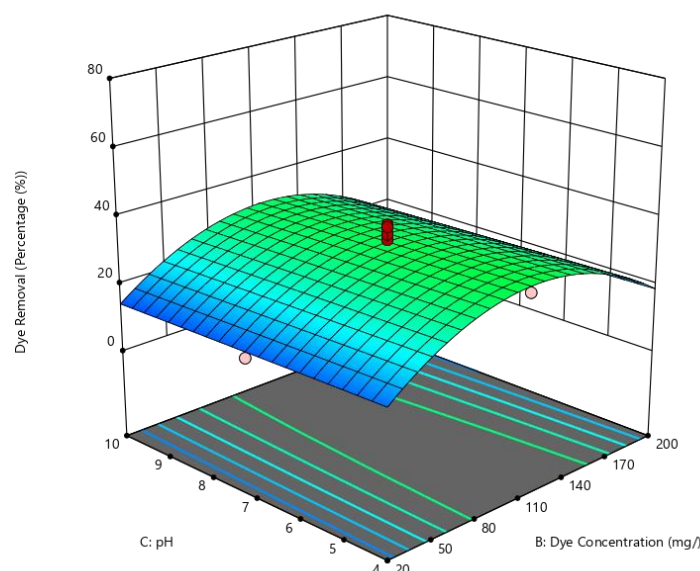


Figure 2. The interaction of pH and dye concentration on dye removal rate

در نمودار (۲)، تأثیر متقابل pH و غلظت‌های مختلف رنگ بر یکدیگر و بر میزان حذف رنگ نشان داده شده است. برای بررسی این تأثیر، مقدار منعقدکننده برابر با ۵/۵، زمان برابر با ۱۰۵ دقیقه و دما در ۳۷/۵ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شدند. ورودی‌های اولیه به نرم‌افزار برای غلظت رنگ، محدوده ۲۰-۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و برای pH، محدوده ۴-۱۰ در نظر گرفته شد. تغییرات pH می‌تواند بر واکنش‌های شیمیایی و سطحی جاذب تأثیرگذار باشد. به‌طور کلی، در فرایندهای جذب، pH بر شارژ سطح جاذب و انحلال‌پذیری رنگ اثر دارد. این یافته علمی از طریق پژوهش‌های پیشین که در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۴ انجام شده، تأیید می‌گردد. براساس نتایج منتشرشده، تأثیر pH بر جذب رنگ توسط جاذب‌ها در محلول‌های حاوی رنگ، قابل‌توجه است زیرا، از طریق تأثیر بر خواص جاذب، بر میزان حلالیت رنگ‌ها اثر می‌گذارد. تغییرات pH می‌تواند تعامل‌های الکترواستاتیک و خواص شیمیایی جاذب را تغییر دهد و در نتیجه بر بازده جذب تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال، جاذب کیتوزان کربوکسیله‌شده دارای حداکثر پتانسیل جذب برای رنگ‌های آنیونی در pH پایین و برای رنگ‌های کاتیونی در pH بالا است که نشان‌دهنده تغییر عملکرد آن در پاسخگویی به pH است (Wang et al., 2024). در پژوهشی جدید نیز، کیتین حاصل از ضایعات میگو جاذب بهینه رنگ را در pH برابر با ۳ نشان داد و بر نقش pH در به حداکثر رساندن عملکرد جذب تأکید کرده است (Manik et al., 2024). جاذب ساخته‌شده از ذرات پلیمری توخالی در پژوهشی دیگر، کاهش چشم‌گیری در ظرفیت جذب آبی متیلن را با کاهش pH از ۱۲ به ۳ گزارش داده، که اهمیت pH در حفظ حلالیت رنگ و در دسترس بودن برای جذب را برجسته می‌کند (Chen et al., 2017). به‌طور مشابه، کربن فعال پودری جاذب بهینه رنگ راکتیو بلک را در هر دو شرایط اسیدی (pH برابر با ۲) و قلیایی (pH برابر با ۱۰) نشان داد که به افزایش تعامل‌های الکترواستاتیک جاذب نسبت داده می‌شود (Vojnović et al., 2022).

محدوده pH در نمودار نشان‌دهنده بررسی گسترده شرایط اسیدی تا قلیایی است. براساس نتایج آزمایش، بالاترین میزان جذب رنگ توسط جاذب، در pH اسیدی (برابر با ۴) اتفاق افتاد و همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با

افزایش غلظت رنگ، میزان حذف رنگ به دلیل اشباع شدن سایت‌های جاذب کم می‌شود. مشابه این رویداد در یافته‌های پژوهشی که بر روی جاذب پودر پوست انار انجام شد، گزارش شده است. به این صورت که درصد حذف رنگ با افزایش غلظت اولیه رنگ به دلیل اشباع نقاط فعال بر روی جاذب، کاهش یافت و ظرفیت آن را برای جذب مولکول‌های رنگ اضافی به‌طور مؤثر محدود شد (Ahmad & Ansari, 2020). در این نمودار، صاف و موازی بودن خطوط کانتور روی صفحه افقی بیانگر عدم تأثیر متقابل این دو پارامتر بر یکدیگر است (Djehader *et al.*, 2020; Matos Barbosa, 2017). به این معنا که هرکدام از پارامترهای غلظت رنگ و pH، به‌صورت مستقل از دیگری بر جاذب تأثیر گذارند و تعامل معناداری میان این دو مشاهده نشده است.

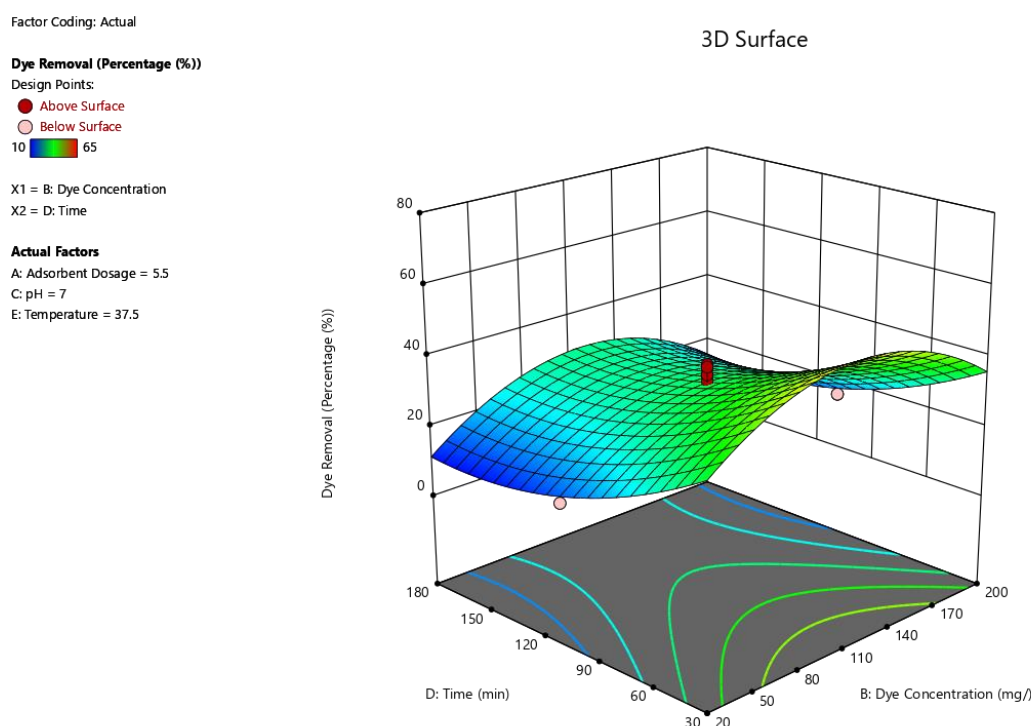


Figure 3. The interaction of Time and dye concentration on dye removal rate

در نمودار (۳)، تأثیر متقابل زمان انجام واکنش و غلظت‌های مختلف رنگ بر یکدیگر و بر میزان حذف رنگ نشان داده شده است. برای بررسی این تأثیر، مقدار منعقدکننده برابر با ۵/۵، pH برابر با ۷ و دما در ۳۷/۵ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شدند. ورودی‌های اولیه غلظت رنگ به نرم‌افزار، محدوده ۲۰-۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و ورودی‌های زمان، محدوده ۳۰-۱۸۰ دقیقه تعیین شد. براساس نمودار، در ۳۰ دقیقه اول بالاترین میزان حذف رنگ رخ داد (در نمودار، رنگ‌های طیف سبز که متمایل به زرد و نارنجی می‌شود) و بعد از آن، با گذشت زمان، میزان حذف رنگ به دلیل پر شدن سایت‌های موجود در سطح جاذب، ثابت می‌شود (Ahmad & Ansari, 2020). مطالعه‌ای که در آن جذب رنگ قرمز اسیدی توسط کربن اکتیو بررسی شده است، اعلام کرده که بیش‌ترین میزان حذف رنگ در ۳۰ دقیقه اول رخ داده و پس از آن با پر شدن مکان‌های سطحی جاذب، سرعت تثبیت می‌شود و جذب بیش‌تر رنگ را محدود می‌کند (Valderrama *et al.*, 2008). هم‌چنین، رنگ‌های مختلفی که جذب آن‌ها توسط Torğut & Demirelli (2018) بر روی

پلیمر سنتزی انجام شد، نشان داد که در ۹۰ دقیقه اول، بیش از ۹۰ درصد ظرفیت‌های جذب برای تمام رنگ‌ها رخ داد که نشان‌دهنده حذف سریع رنگ است. پس از این دوره، به دلیل پرشدن نقاط فعال روی سطح پلیمر، مقدار جذب تثبیت شد. منحنی‌بودن خطوط کانتور روی صفحه افقی نیز، نشان‌دهنده اثرگذاری متقابل این دو پارامتر بر یکدیگر است (Djaghader, 2020; Matos Barbosa *et al.*, 2017). به این صورت که گذشت زمان عامل تعیین‌کننده میزان حذف رنگ در سیستم موردبررسی است.

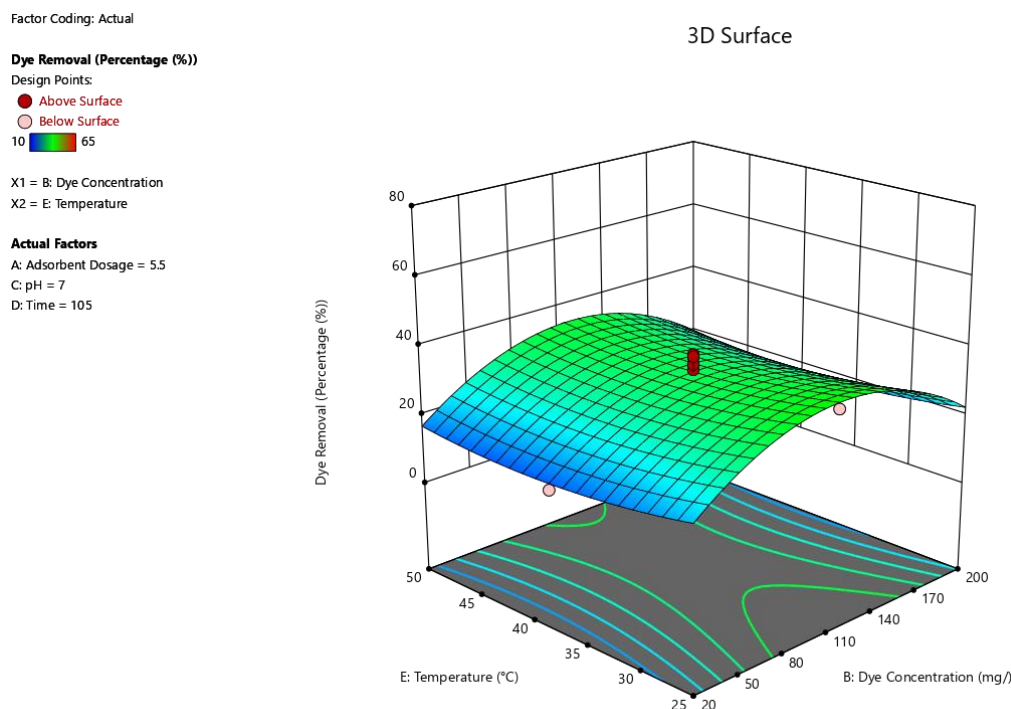


Figure 4. The interaction of temperature and dye concentration on dye removal rate

در نمودار (۳)، تأثیر متقابل زمان درجه حرارت و واکنش و غلظت‌های مختلف رنگ بر یکدیگر و بر میزان حذف رنگ نشان داده شده است. برای بررسی این تأثیر، مقدار ماده منعقدکننده برابر با ۵/۵، pH برابر با ۷، و زمان برابر با ۱۰۵ دقیقه ثابت نگه داشته شدند. برای ورودی غلظت رنگ به نرم‌افزار، محدوده ۲۰-۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و برای ورودی درجه حرارت، محدوده ۲۵-۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج، با افزایش درجه حرارت از ۲۵ درجه به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات زیادی در میزان حذف رنگ مشاهده نشده است. در پژوهشی که توسط Silva *et al.* (2020) در زمینه حذف رنگ‌های پایه نساجی بر جاذب به انجام رسید، یکی از پارامترهای موردبررسی، مطالعه سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد در فرایند حذف رنگ بوده که نتایج نشان داد، افزایش دما بر جذب رنگ تأثیر منفی گذاشته و فرایند جذب گرمازا بوده است و در نهایت به این نتیجه رسیدند که کاهش جذب با افزایش دما می‌تواند به دلیل نیروهای جذب ضعیف بین مکان‌های فعال جاذب و مولکول‌های جذب‌شونده باشد. بنابراین، عدم تغییر فرایند جذب با تغییر دما در مطالعه حاضر، نشان از وجود پیوندهای قوی بین رنگ و جاذب است. در پژوهشی که توسط Budnyak *et al.* (2020) به بررسی تأثیر دما بر جذب رنگ نارنجی اسیدی توسط جاذب هیبریدی ساخته‌شده از کیتوزان پرداخته، اذعان داشته که برای انجام فرایند جذب، مدت زمان ۲۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۱۰ دقیقه در دمای ۴۵ درجه

سانتی‌گراد برای دستیابی به ۵۰ درصد حذف رنگ و زمان ۶ ساعت برای رسیدن به تعادل جذب در آن دماها کافی بوده است، یعنی بیش‌ترین مقدار حذف رنگ در دمایی نزدیک به دمای محیط اتفاق افتاده است. در این نمودار، موازی‌بودن اکثر خطوط کانتور روی صفحه افقی نشان‌دهنده این است که این دو پارامتر بر یکدیگر اثر متقابل ندارند و به نوعی تأییدکننده عدم تأثیرپذیری دما بر حذف رنگ موردبررسی توسط جاذب سلولزی موردبررسی است (Djeghader et al., 2020; Matos Barbosa, 2017).

۲.۳. سنجش میزان مطابقت داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده (ارزیابی شایستگی مدل)

نمودار مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل در مقابل مقادیر واقعی حاصل از آزمایش‌ها در نمودار (۵) آورده شده است. استفاده از نمودار احتمال نرمال، جهت ارزیابی شایستگی مدل توسعه یافته به کار گرفته می‌شود. از طریق این ابزار، توزیع نرمال خطاها بررسی می‌شود؛ هرچه انحراف از خط نیمساز کم‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر پاسخ‌های پیش‌بینی‌شده از مدل با پاسخ‌های واقعی است. در حالت ایده‌آل مقادیر پیش‌بینی‌شده پاسخ‌ها با مقادیر واقعی آن‌ها بسیار به هم نزدیک هستند.

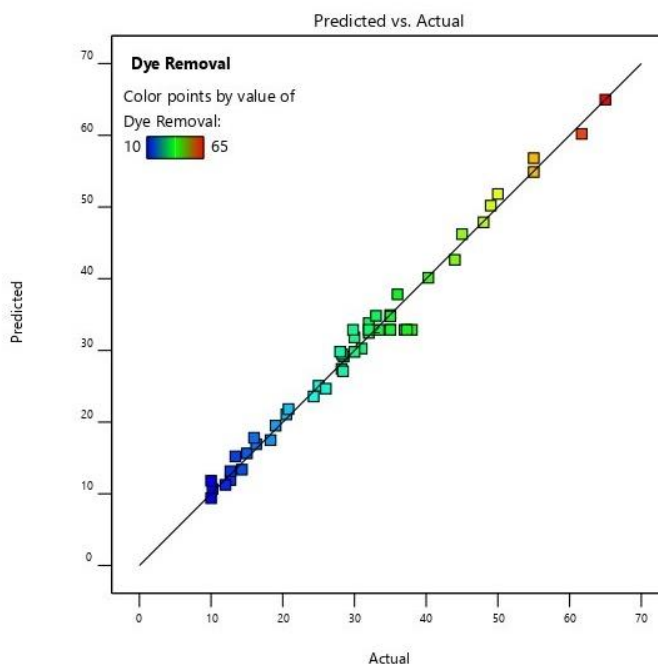


Figure 5. Experimental response value versus predicted responses in the removal process of red polyazo dye using cellulose adsorbent

۳.۳. ارزیابی شایستگی مدل

نمودار (۵)، مقدار تجربی پاسخ در مقابل پاسخ‌های پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل حاصل از نرم‌افزار طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. در نمودار رسم‌شده، نزدیکی نقاط به خط شیب‌دار با زاویه‌ی ۴۵ درجه، بیانگر کیفیت مناسب مدل اجراشده می‌باشد و می‌توان به نتایج حاصل از طراحی آزمایش اعتماد نمود. در حقیقت، با استفاده از جاذب سلولزی موردبررسی، مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار به نتایج به‌دست‌آمده از طریق روش تجربی و واقعی نزدیک بوده و مطابقت خوبی بین نتایج وجود دارد.

۴.۳. نتایج آنالیز واریانس

آنالیز واریانس مربوط به ANOVA در جدول (۱) آورده شده است.

Table 1. Output data of ANOVA analysis

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	9048.69	35	258.53	26.67	0.0001<	significant
A-Adsorbent Dosage	1012.50	1	1012.50	104.44	0.0001<	
B-Dye Concentration	3.38	1	3.38	0.3487	0.5643	
C-pH	2.00	1	2.00	0.2063	0.6566	
D-Time	242.00	1	242.00	24.96	0.0002	
E-Temperature	4.50	1	4.50	0.4642	0.5068	
AB	44.89	1	44.89	4.63	0.0493	
BC	0.3403	1	0.3403	0.0351	0.8541	
BD	21.95	1	21.95	2.26	0.1547	
BE	2.70	1	2.70	0.2788	0.6058	
A ²	5.18	1	5.18	0.5347	0.4767	
B ²	661.37	1	661.37	68.22	0.0001<	
C ²	0.0068	1	0.0068	0.0007	0.9793	
D ²	156.23	1	156.23	16.12	0.0013	
E ²	29.40	1	29.40	3.03	0.1035	
ABC	3.58	1	3.58	0.3691	0.5532	
ABD	8.10	1	8.10	0.8356	0.3761	
ABE	0.0703	1	0.0703	0.0073	0.9333	
BCD	23.98	1	23.98	2.47	0.1381	
BCE	8.30	1	8.30	0.8565	0.3704	
BDE	2.59	1	2.59	0.2669	0.6135	
Residual	135.72	14	9.69			
Pure Error	56.11	7	8.02			
Cor Total	9184.40	49				

۴.۳. تفسیر ANOVA

براساس جدول مربوط به ANOVA، مقدار ۲۶/۶۷ در مدل F-value نشان‌دهنده معنی‌دار بودن مدل است و به این معنی است که این مدل با نتایج آزمایشگاهی، مطابقت خوبی دارد. در این مدل، تنها ۰/۰۱ درصد احتمال رخ دادن خطا در فراوانی‌ها به علت نویز وجود دارد. مقادیر "P-value" کم‌تر از ۰/۰۵۰۰ بر معنی‌دار بودن شرایط مدل تأکید دارد. همچنین، مدل در مقادیر بیش از ۰/۱۰۰۰ معنی‌دار نیست. اگر تعدادی شرایط بی‌معنی در مدل وجود داشته باشد (غیر از شرایط موردنیاز برای تأیید مراحل آزمایش)، کاهش تعداد مراحل مدل ممکن است مدل را بهبود بخشد.

۵.۳. شاخص‌های رگرسیونی

جدول (۲) بررسی‌های آماری آنالیز ANOVA را نشان می‌دهد.

Table 2. ANOVA statistical analysis for cubic response surface model

Std. Dev.	3.11	R- Squared	0.9852
Mean	30.45	Adj R- Squared	0.9483
C.V. %	10.23	Pred R- Squared	-0.2543
Adeq Precision			21.0381

با توجه به جدول (۲)، مقدار منفی "Pred R-Squared" بیانگر این است که میانگین کلی مدل، نتایج را بهتر پیش‌بینی می‌کند. Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند. نسبت بیش از ۴ مطلوب است که نسبت ۲۱/۰۳۸۱ در مدل ارائه‌شده برای واکنش‌های جذبی ارائه‌شده بیانگر سیگنال مناسب و کافی می‌باشد و در نتیجه این مدل می‌تواند برای انجام فضای طراحی استفاده شود. همچنین، نزدیکی مقادیر "R-Squared" و "Adj R-Squared" قابل انتظار بوده که این مورد نیز برای مقادیر ۰/۹۸۵۲ و ۰/۹۴۸۳ در جدول مشاهده می‌شود.

۳.۵. مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار برای حذف رنگ مورد بررسی توسط جاذب بکر ضایعات انگور

مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش در ادامه آورده شده است که در آن A، B، C، D و E نشان‌دهنده اثر اصلی متغیرهای مستقل به ترتیب شامل مقدار جاذب، غلظت رنگ، pH، زمان واکنش و درجه حرارت می‌باشد.

$$\text{Dye Removal} = +32.87 + 22.50 * A + 1.30 * B - 1.00 * C - 11.00 * D - 1.50 * E - 1.18 * AB - 0.1031 * BC + 0.8281 * BD + 0.2906 * BE + 1.45 * A^2 - 16.35 * B^2 - 0.0523 * C^2 + 7.95 * D^2 + 3.45 * E^2 + 0.3344 * ABC + 0.5031 * ABD - 0.0469 * ABE - 0.8656 * BCD + 0.5094 * BCE - 0.2844 * BDE$$

در این مدل، متغیر A*B نشان‌دهنده اثر متقابل مقدار جاذب و غلظت رنگ؛ متغیر B*C نشان‌دهنده اثر متقابل pH و غلظت رنگ؛ متغیر B*D نشان‌دهنده اثر متقابل زمان واکنش و غلظت رنگ، متغیر B *E نشان‌دهنده اثر متقابل درجه حرارت و غلظت رنگ و متغیرهای A²، B²، C² و D² و E² نشان‌دهنده اثر مربعی فاکتورهای A، B، C، D و E بر روی پاسخ مورد نظر می‌باشد.

شرایط بهینه انتخاب‌شده براساس نتایج تجربی (آزمایشگاهی) در جدول (۳) آورده شده است. همچنین، نتایجی از حذف طیفی از رنگ‌های نساجی توسط جاذب‌های طبیعی مختلف جهت مقایسه در جدول (۴) آورده شده است.

Table 3. Optimal conditions for dye removal based on experimental results

Variables	Adsorbent Dosage (g/L)	Dye Concentration (mg/L)	pH	Time (min)	Temperature (°C)	Dye Removal (percent)
	10	20	4	30	25	65

Table 4. The results of dye removal efficiency by various biomass-based adsorbents from wastewater (Aragaw *et al.* (2022))

Adsorbent	Source Biomass	Target Dye	Removal Efficiency (%)
Orange Peel	Orange Peel	Rhodamine B	85
Rice Husk	Rice Husk	Crystal Violet	80
Sugarcane Bagasse	Sugarcane Bagasse	Direct Red 80	75
Peanut Shell	Peanut Shell	Acid Blue 25	70
Corn cob	Corn cob	Reactive Black 5	65
Palm Kernel Shell	Palm Kernel Shell	Basic Red 18	60
Tea Waste	Tea Waste	Methyl Orange	55

۴. نتیجه‌گیری

کارایی جاذب‌های سلولزی: نتایج این مطالعه نشان داد که جاذب‌های زیست‌سازگار سلولزی تهیه‌شده از ضایعات بکر درخت انگور به دلیل ساختار منحصربه‌فرد، سطح ویژه بالا و وجود گروه‌های عاملی فعال، توانایی بالایی در حذف آلودگی‌های رنگی از محلول‌های آبی دارند. این جاذب‌ها در شرایط آزمایشگاهی مختلف، راندمان بالایی در جذب رنگ‌های مختلف نشان دادند که تأثیر قابل‌توجهی در بهبود کیفیت آب دارد.

زیست‌سازگاری و پایداری و کمک به مدیریت منابع آب: استفاده از جاذب‌های سلولزی نه تنها به حذف آلاینده‌ها کمک می‌کند بلکه این مواد به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، محیط زیست را کمتر آلوده می‌کنند و مشکل لجن‌های آلوده باقیمانده پس از فرایند تصفیه نخواهند داشت. این امر به کاهش اثرات زیست‌محیطی و ترویج مدیریت پایدار منابع آب کمک شایانی می‌کند و می‌تواند به عنوان بخشی از استراتژی‌های حفاظت و مدیریت پایدار منابع آب به کار گرفته شود. اجرای این فناوری در مقیاس صنعتی می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش آلودگی منابع آب و حمایت از اکوسیستم‌های آبی داشته باشد.

شرایط بهینه و پارامترهای تأثیرگذار: پارامترهایی مانند pH، غلظت اولیه رنگ، زمان تماس و مقدار جاذب نقش

مهمی در کارایی این روش دارند. بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند راندمان حذف رنگ را بهبود ببخشد.

مقایسه با روش‌های سنتی: در مقایسه با روش‌های سنتی مانند ترسیب شیمیایی یا استفاده از کربن فعال، جاذب‌های سلولزی مزایایی مانند کم‌هزینه‌بودن، عدم نیاز به مواد شیمیایی اضافی و کاهش تولید پسماندهای خطرناک را دارا هستند.

محدودیت‌های پژوهش: در این پژوهش، برای بررسی دقیق شرایط عملیاتی حذف رنگ، محلول رنگی به صورت سنتزی ساخته شد. مزیت این روش، محاسبه دقیق میزان آلاینده، قبل و بعد از عملیات حذف رنگ بود اما وضعیت پساب رنگی واقعی که شامل مجموعه‌ای از یون‌ها و ناخالصی‌های موجود در محیط و اثر رقابتی این عوامل بر یکدیگر است، لحاظ نشده است. بنابراین، برای کاربرد عملی در مقیاس صنعتی، انجام پژوهش‌های گسترده‌تر در زمینه مقیاس‌پذیری، ارزیابی تأثیر یون‌های رقابتی و تحلیل رفتار فناوری در شرایط متنوع پساب‌های واقعی باید به انجام برسد.

بررسی اقتصادی: جاذب‌های مورد مطالعه، به این دلیل که از ضایعات کشاورزی تهیه شده است و هزینه‌ای در بر نداشته، نه تنها به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده بلکه در بحث مدیریت این ضایعات و به‌ویژه در مقیاس بزرگ می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد.

پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده: با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مطالعات بیش‌تری برای بهبود ویژگی‌های جاذب‌های سلولزی مانند ظرفیت جذب، سرعت جذب و امکان بازیافت و استفاده مجدد از جاذب‌ها پیشنهاد می‌شود. به‌علاوه، بررسی اصلاحات شیمیایی و فیزیکی سطح جاذب‌ها، افزایش پایداری مکانیکی و حرارتی و کاهش هزینه‌های تولید از دیگر حوزه‌هایی است که می‌تواند به ارتقای کارایی این مواد کمک کند. برای مطالعات تکمیلی، نویسندگان مقاله حاضر، ضایعات سلولزی درخت انگور را در دو شکل اصلاح‌شده با اسید و باز نیز در مقاله دیگری مورد بررسی قرار دادند تا در ادامه مطالعه حاضر و با بررسی مکانیسم جذب، بتوانند به دیدگاه جامعی در ارتباط با پتانسیل جاذب مورد بررسی در حذف رنگ‌های نساجی دست یابند. از منظر زیست‌محیطی و اقتصادی نیز، ارزیابی چرخه عمر جاذب‌های سلولزی و بررسی امکان استفاده از منابع تجدیدپذیر و مواد زائد برای تولید این جاذب‌ها، می‌تواند تأثیرات مثبتی بر توسعه فناوری‌های پایدار داشته باشد. همچنین، ارزیابی کارایی جاذب‌ها در سیستم‌های پیچیده‌تر (مانند پساب‌های صنعتی) برای اعتبارسنجی این روش در محیط واقعی ضروری است.

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. منابع

- Affat, S. S. (2021). Classifications, advantages, disadvantages, toxicity effects of natural and synthetic dyes: a review. *University of Thi-Qar Journal of Science*, 8(1), 130-135.
- Aghebat Bekhair, H., Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., & Kardan Moghaddam, H. (2023). Evaluating the effect of the wastewater treatment process in water treatment plants (Case study: Tehran's seventh drinking water treatment plant). *Water and Irrigation Management*, 12(4), 891-905. (In Persian).
- Ahmad, R., & Ansari, K. (2020). Polyacrylamide-Grafted Actinidia deliciosa peels powder (PGADP) for the sequestration of crystal violet dye: isotherms, kinetics and thermodynamic studies. *Applied Water Science*, 10(8), 1-15.
- Akhtar, M. S., Ali, S., & Zaman, W. (2024). Innovative adsorbents for pollutant removal: exploring the latest research and applications. *Molecules*, 29(18), 4317.
- Aragaw, T. A., & Bogale, F. M. (2021). Biomass-based adsorbents for removal of dyes from wastewater: a review. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 764958.

- Budnyak, T. M., Blachnio, M., Slabon, A., Jaworski, A., Tertykh, V. A., Deryło-Marczewska, A., & Marczewski, A. W. (2020). Chitosan deposited onto fumed silica surface as sustainable hybrid biosorbent for Acid Orange 8 dye capture: Effect of temperature in adsorption equilibrium and kinetics. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(28), 15312-15323.
- Chen, D., Liu, Y., Qin, Y., Wang, L., Ma, Y., & Yang, W. (2017). Dual-Functionalized Hollow Polymer Particle as a pH-Responsive Adsorbent for Selective Removal of Basic Dye. *Chinese Journal of Chemistry*, 35(5), 596-604.
- Darmenbayeva, A., Rajasekharan, R., Massalimova, B., Bektenov, N., Taubayeva, R., Bazarbaeva, K., ..., & Ungarbayeva, A. (2024). Cellulose-Based Sorbents: A Comprehensive Review of Current Advances in Water Remediation and Future Prospects. *Molecules*, 29(24), 5969.
- Davarnejad, R., Afshar, S., & Etehadfar, P. (2020). Activated carbon blended with grape stalks powder: properties modification and its application in a dye adsorption. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(5), 5463-5473.
- de Farias Silva, C. E., da Gama, B. M. V., da Silva Gonçalves, A. H., Medeiros, J. A., & de Souza Abud, A. K. (2020). Basic-dye adsorption in albedo residue: Effect of pH, contact time, temperature, dye concentration, biomass dosage, rotation and ionic strength. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(6), 351-359.
- de Matos Barbosa, M. J. (1990). The use of Contour Plots for Interpretation of Multi-Drug Combination. In *Medical Informatics Europe '90: Proceedings*, Glasgow, Scotland, August 20-23, 1990 (pp. 45-47). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Djehader, I., Bendebane, F., & Ismail, F. (2023). Interaction Effect of Operating Parameters during Oxidation of different dyes via the Fenton Process. *Application of The Plackett-Burmann Design*.
- Fekri, M. H., Soleymani, S., Razavi Mehr, M., & Saki, F. (2023). Removal of methyl orange dye from aqueous solutions by SBA-16 nano mesopore and optimization of effective parameters using response surface method. *Iranian Journal of Health and Environment*, 16(2), 339-356.
- Goscianska, J., Fathy, N. A., & Aboelenin, R. M. (2017). Adsorption of solophenyl red 3BL polyazo dye onto amine-functionalized mesoporous carbons. *Journal of colloid and interface science*, 505, 593-604.
- Habibzadeh, M., Chaibakhsh, N., & Naeemi, A. S. (2018). Optimized treatment of wastewater containing cytotoxic drugs by living and dead biomass of the freshwater microalga, *Chlorella vulgaris*. *Ecological engineering*, 111, 85-93.
- Islam, T., Repon, M. R., Islam, T., Sarwar, Z., & Rahman, M. M. (2023). Impact of textile dyes on health and ecosystem: A review of structure, causes, and potential solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 9207-9242.
- Jiang, Y., Qin, S., & Xu, Y. (2022). Impact of green credit policy on sustainability performance of high-pollution enterprises. *Environ Sci Pollut Res*, 79199-79213.
- Kasma, A. Y., Ridjal, A. T. M., & Febriany, I. A. (2023, November). Assessment and Mapping of Water Quality in Urban Communities: Insights for Sustainable Development. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1275, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- Lam, S. S., Liew, R. K., Cheng, C. K., Rasit, N., Ooi, C. K., Ma, N. L., ..., & Chase, H. A. (2018). Pyrolysis production of fruit peel biochar for potential use in treatment of palm oil mill effluent. *Journal of environmental management*, 213, 400-408.
- Manik, M. I. S., Satyantini, W. H., & Mubarak, A. S. (2024). Temperature and pH Optimization of Chitin from Shrimp Skin as Adsorbent for Textile Dye Waste. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(1), 141-152.
- Moattari, R. M., & Mohammadi, T. (2021). Hybrid adsorbents for dye removal from wastewater. *Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water*, 405-451.
- Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2011). Equilibrium, kinetics and mechanism of removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pine cone biomass of *Pinus radiata*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218, 499-515.
- Shi, R. J., Wang, T., Lang, J. Q., Zhou, N., & Ma, M. G. (2022). Multifunctional cellulose and cellulose-based (nano) composite adsorbents. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 891034.
- Siddique, I. (2021). Sustainable Water Management in Urban Areas: Integrating Innovative Technologies and Practices to Address Water Scarcity and Pollution. *The Pharmaceutical and Chemical Journal*, 8(1), 172-178.

- Singh, S., & Kumar, N. (2024, October). Removal of Dyes from Waste Water Using Low-Cost Adsorbents. In *Macromolecular Symposia*, 413(5), 2400156.
- Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., ..., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255.
- Sohaimi, K. S. A., Ngadi, N., Mat, H., Inuwa, I. M., & Wong, S. (2017). Synthesis, characterization and application of textile sludge biochars for oil removal. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(2), 1415-1422.
- Song, S., Ma, Y., Shen, H., Zhang, M., & Zhang, Z. (2015). Removal and recycling of ppm levels of methylene blue from an aqueous solution with graphene oxide. *RSC advances*, 5(35), 27922-27932.
- Torğut, G., & Demirelli, K. (2018). Comparative adsorption of different dyes from aqueous solutions onto polymer prepared by ROP: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43, 3503-3514.
- Valderrama, C., Cortina, J. L., Farran, A., Gamisans, X., & de Las Heras, F. X. (2008). Kinetic study of acid red "dye" removal by activated carbon and hyper-cross-linked polymeric sorbents Macronet Hypersol MN200 and MN300. *Reactive and Functional Polymers*, 68(3), 718-731.
- Varsha, M., Kumar, P. S., & Rathi, B. S. (2022). A review on recent trends in the removal of emerging contaminants from aquatic environment using low-cost adsorbents. *Chemosphere*, 287, 132270.
- Vojnović, B., Cetina, M., Franjković, P., & Sutlović, A. (2022). Influence of initial pH value on the adsorption of reactive black 5 dye on powdered activated carbon: kinetics, mechanisms, and thermodynamics. *Molecules*, 27(4), 1349.
- Wang, H., Dai, K., Xiang, H., Kou, J., Guo, H., Ying, H., & Wu, J. (2024). High adsorption capacities for dyes by a pH-responsive sodium alginate/sodium lignosulfonate/carboxylated chitosan/polyethyleneimine adsorbent. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278, 135005.
- Zare Mirakabad, R. (2017). Effect of treated wastewater irrigation on some physiological characteristics and nutrition of pinto bean. *Water and Irrigation Management*, 7(1), 43-58. (In Persian).