

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

چکیده

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، بکارگیری ضایعات بکر و اصلاح نشده درخت انگور بعنوان جاذب جهت حذف رنگ پلی آزوی قرمز نساجی از محیط آبی می‌باشد. در این پژوهش، برنامه ریزی آزمایش‌ها از طریق نرم افزار 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) مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس نتایج بدست آمده، بالاترین میزان حذف رنگ، در زمان ۳۰ دقیقه، دمای ۲۵ درجه، pH برابر با ۴ و با مقدار جاذب ۱۰ g/L بدست آمد. روش مورد بررسی، به دلیل عملیات ساده و مقرون به صرفه و نیز عدم ایجاد آلودگی ثانویه یکی از روش‌های مناسب جهت حذف آلاینده‌هاست و استفاده از جاذب تهیه شده هم به لحاظ کارایی و هم به لحاظ اقتصادی می‌تواند گزینه مناسبی برای حذف رنگ‌های نساجی از پساب‌های صنعتی باشد.

واژگان کلیدی: تصفیه آب، رنگزاهای صنعتی، صنعت نساجی، ضایعات اصلاح نشده درخت انگور

مقدمه

رشد سریع جمعیت و صنعتی شدن، مشکل آلودگی آب را در سطح جهانی تشدید کرده است. برای مقابله با چالش‌های ناشی از صنعتی شدن، استفاده از رنگ‌های سنتزی در صنایع مختلف از جمله صنعت نساجی، صنایع رنگرزی و چاپ، دباغی و صنایع رنگ‌آمیزی، صنایع کاغذ و خمیرکاغذ، صنایع آرایشی و غذایی، صنایع تولید رنگ و صنایع داروسازی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در میان این صنایع، صنعت نساجی به دلیل مصرف قابل توجه آب و تخلیه مواد رنگی در پساب، به‌طور ویژه‌ای در آلودگی آب برجسته است ((Islam et al. ۲۰۲۳)).

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. ۲۰۲۲)).

اغلب رنگ‌های مورد استفاده در صنایع مختلف نساجی از نوع رنگ‌های سنتزی و دارای ساختار مولکولی آروماتیکی پیچیده‌ای می‌باشند که به دلیل سمی بودن و دیر تجزیه شدن، چنانچه بدون تصفیه وارد محیط شوند می‌توانند خطرات جدی به محیط زیست و انسان وارد کنند. بعنوان مثال برخی از رنگزاهای می‌توانند طی فرآیند تجزیه احیایی، آمین‌های آروماتیک سرطانزا تولید کنند و می‌توانند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در آب، خاک و زنجیره غذایی نفوذ کنند. یکی از گروه‌های مهم رنگ‌ها در این صنعت، رنگ‌های پلی‌آزو است. این رنگ‌ها به دلیل 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 به عنوان 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 شستشو برخوردارند و معمولاً در آب یا حلال‌های آلی محلول هستند ((Habibzadeh et al. ۲۰۱۸)). ورود مواد رنگی سمی به اکوسیستم‌های آبی می‌تواند به‌طور قابل توجهی فرآیند 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 نه تنها 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 ۲۰۲۱). با وجود معضلات زیادی، رنگ‌ها به طور 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 بر اساس اصول شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی عمل می‌کنند. (Sen et al. ۲۰۱۱).

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، نه فقط در مناطق خشک بلکه در مناطق مرطوب جهان به سرعت بصورت یک ابزار مهم در برنامه‌ریزی منابع آب در حال پیگیری و اجرا 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 ۲۰۲۰).

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 فرآیند حذف رنگ کند یا در برخی موارد، غیرقابل انجام توسط میکروارگانیسم‌ها است. 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، بر اساس نتایج پژوهش‌های Varsha et al. (۲۰۲۲) و همچنین، Akhtar and Zaman (۲۰۲۴)، استفاده از جاذب‌ها بخصوص جاذب‌های طبیعی (مانند کربن فعال، زغال زیستی، یا مواد معدنی) برای جذب رنگ از محلول، به دلیل زیست‌سازگار بودن، عدم تولید محصولات جانبی مضر و راندمان بالا در حذف رنگ‌های مقاوم مورد استقبال زیاد محققان و دست‌اندرکاران حفاظت و احیاء منابع آبی آلوده قرار گرفته است.

پژوهش‌های قابل توجهی در زمینه حذف آلودگی‌های رنگی از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب‌های سلولزی انجام شده است. از جمله، Moattari and Mohammadi (۲۰۲۱)، پس از انجام پژوهشی بر جاذب‌های زیست‌سازگار مانند نانوکریستال‌های سلولزی که ظرفیت جذب بالایی (تا ۱۲۰۰ mg/g) برای رنگ‌های نساجی مانند رنگ پلی آزو داشتند، به این نتیجه رسیدند که جاذب‌های سلولزی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر دسترسی بالا به سطح و خصوصیات ساختاری مناسب، از توانایی بالایی در جذب آلاینده‌های سخت تجزیه‌پذیر برخوردارند.

جاذب‌های سلولزی به دلیل ساختار شیمیایی منحصر به فرد خود، پتانسیل بالایی برای حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها از محلول‌های آبی دارند. ساختار سلولزی 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 (et al. (۲۰۲۴). (Darmenbayeva).

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 قابل توجهی 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 فرآیندهای کشاورزی و صنعتی مؤثر باشند (Shi et al. (۲۰۲۱).

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 مقرون‌به‌صرفه است. بهینه‌سازی فرآیندهای جذب می‌تواند به دستیابی به نتیجه‌های بهتر در حذف آلودگی‌ها کمک کند. با توجه به بررسی‌هایی که در این زمینه توسط محققان مختلف (Affat (۲۰۲۱) 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. در حالی که روش‌های شیمیایی در برخی موارد کارایی بیشتری دارند، اما تأثیرات منفی محیط زیستی و هزینه‌های بلندمدت آن‌ها قابل توجه است.

با توجه به تحقیقات مشابهی که توسط (Aghebat Bekhair et al. (۲۰۲۲; Zare Mirakabad (۲۰۱۷) 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 حائز اهمیت بیشتری است، جایی که آب به عنوان منبع اساسی برای زندگی و تولید به شمار می‌آید (Kasma et al. (۲۰۲۱; Siddique (۲۰۲۱). 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 بسزایی در مدیریت پایدار منابع آب دارد (Affat (۲۰۲۱)؛ 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 پلی آزو قرمز با استفاده از جاذب‌های زیست‌سازگار سلولزی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل: ضایعات بکر و اصلاح نشده درخت انگور بعنوان جاذب، رنگ پلی آزوی قرمز نساجی و آب ۲ بار تقطیر برای ساخت محلول رنگی سنتزی؛ تجهیزات مورد استفاده نیز شامل: اسپکتروفتومتر 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 ۱۰۰-۸۰، ساخت شرکت Memmert آلمان (جهت خشک کردن جاذب) بودند.

تهیه جاذب:

جهت انجام آزمایش‌های جاذب ماده آلاینده از محلول آبی، از جاذب بدست آمده از ضایعات بکر و اصلاح نشده درخت انگور استفاده شد. در ابتدا، پس از تهیه ضایعات چوبی از تاکستان و شستشو 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. (۲۰۱۸)).
تهیه محلول رنگی:

جهت بررسی نوع آلاینده حذف شونده طی عملیات جاذب، 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 بصورت دقیق محاسبه گردد. در تحقیق 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. (۲۰۱۷))

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

برنامه ریزی آزمایش‌ها:

در این پژوهش، برنامه ریزی آزمایش‌ها از طریق نرم افزار 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 نرم افزار، بر اساس مقالات و آزمایش‌های اولیه در آزمایشگاه تعیین شد.

تحلیل آماری داده‌ها برای هر جاذب و تاثیر مجموعه متغیرهای آزمایش از طریق آنالیز ANOVA خروجی از نرم افزار صورت گرفت که بر اساس داده‌های بدست آمده، معنی دار بودن مدل مورد بررسی و تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی را به خوبی تفسیر می‌کند (Fekri et al. (۲۰۲۳)).

متغیرهای آزمایش:

متغیرهای اصلی آزمایش شامل pH، زمان تماس، غلظت اولیه رنگ موجود در محلول آبی، مقدار جاذب و دما می‌باشد. دامنه متغیرها بر اساس آزمایش‌های مشابه تحقیقات معتبر پیشین تعیین شدند؛ به این ترتیب که pH در ۳ دامنه اسیدی، خنثی و بازی؛ غلظت‌های مختلف رنگ جهت ساخت محلول سنتزی و مقدار مختلف جاذب، جهت مقایسه آزمایش می‌شود (Davarnejad (۲۰۲۰); Sohaimi et al. (۲۰۱۷)).

بررسی راندمان تصفیه پساب سنتزی:

بررسی میزان حذف ماده آلاینده توسط جاذب‌های مورد بررسی، از طریق دستگاه اسپکتروفتومتر برای میزان حذف رنگ محاسبه می‌شود. درصد حذف رنگ از رابطه زیر به دست می‌آید که C_0 و C_t به ترتیب میزان جاذب محلول رنگی قبل از تصفیه و میزان جاذب محلول رنگی بعد از تصفیه می‌باشد.

$$\frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

نتایج و بحث

اثر پارامترهای مختلف بر میزان حذف رنگ:

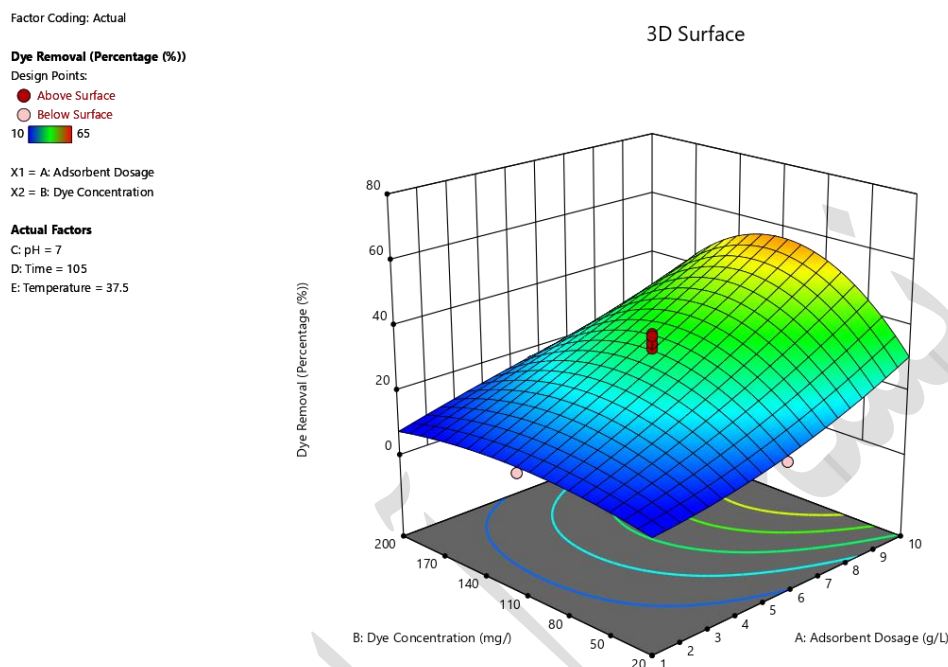


Figure 1. The interaction of dye concentration and adsorbent dosage on dye removal rate

در نمودار ۱، تاثیر متقابل غلظت‌های مختلف رنگ و مقادیر مختلف جاذب بر یکدیگر و بر میزان حذف رنگ نشان داده شده است. برای بررسی این تاثیر، مقدار pH برابر با ۷، زمان برابر با ۱۰۵ min و دما در ۳۷/۵ °C درجه سانتیگراد ثابت نگه داشته شدند. به منظور تعیین ورودی‌های اولیه به نرم افزار، غلظت رنگ، در محدوده ۲۰-۲۰۰ mg/L و مقادیر جاذب، در محدوده ۱-۱۰ g/L تعیین گردید. با توجه به نمودار، با افزایش غلظت رنگ، در صورتی که مقدار جاذب ۱ g/L باشد، میزان حذف رنگ از سیستم حداکثر ۳۰ درصد است؛ بر اساس طیف رنگی، نواحی آبی رنگ از تیره به روشن میزان حذف رنگ کم به زیاد را به ترتیب نشان می‌دهد که این حالت در غلظت‌های بالای رنگ و مقدار کم منعقدکننده مشاهده می‌شود. نیز اما با افزایش مقدار جاذب، حتی در حداکثر غلظت رنگ (۲۰۰ mg/L) هم حدود ۵۰ درصد از میزان رنگ از محیط آبی توسط جاذب مورد بررسی 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 g/L و غلظت رنگ ۲۰ mg/L بوده، رخ داده است که طیف قرمز/نارنجی روی نمودار نشان دهنده همین شرایط است که در غلظت‌های پایین رنگ و مقادیر کافی منعقدکننده اتفاق می‌افتد. این نتایج با یک مطالعه مروری که در سال ۲۰۲۱ توسط Aragaw and Bogale بر جاذب رنگ با استفاده از جاذب‌های کم هزینه مختلف با تأکید بر عواملی مانند غلظت اولیه رنگ و دوز جاذب در محیط آبی پرداخته، مطابقت دارد؛ در این مقاله نیز به تاثیر مستقیم مقادیر بالای جاذب‌ها در کارایی حذف رنگ حتی در شرایطی که غلظت رنگ پایین بوده اشاره داشته که این عامل حتی توانسته به تنهایی شرایط را برای جذب بهینه فراهم کند (Aragaw and Bogale (۲۰۲۳)). مطالعه دیگری که در سال ۲۰۲۴ در زمینه حذف رنگ از فاضلاب با استفاده از جاذب‌های کم هزینه انجام شده نیز، مقدار جاذب را لازمه عملکرد مناسب سیستم حذف رنگ برای تمام غلظت‌های رنگ مورد بررسی دانسته است (Singh and Kumar (۲۰۲۴)). پژوهشی که در سال ۲۰۱۵ توسط Song و همکاران 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 نتیجه گیری 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. (۲۰۲۳)). همچنین، در این نمودار، منحنی بودن 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 (Matos Barbosa (۲۰۱۷); Djeghader et al. (۲۰۲۰)).

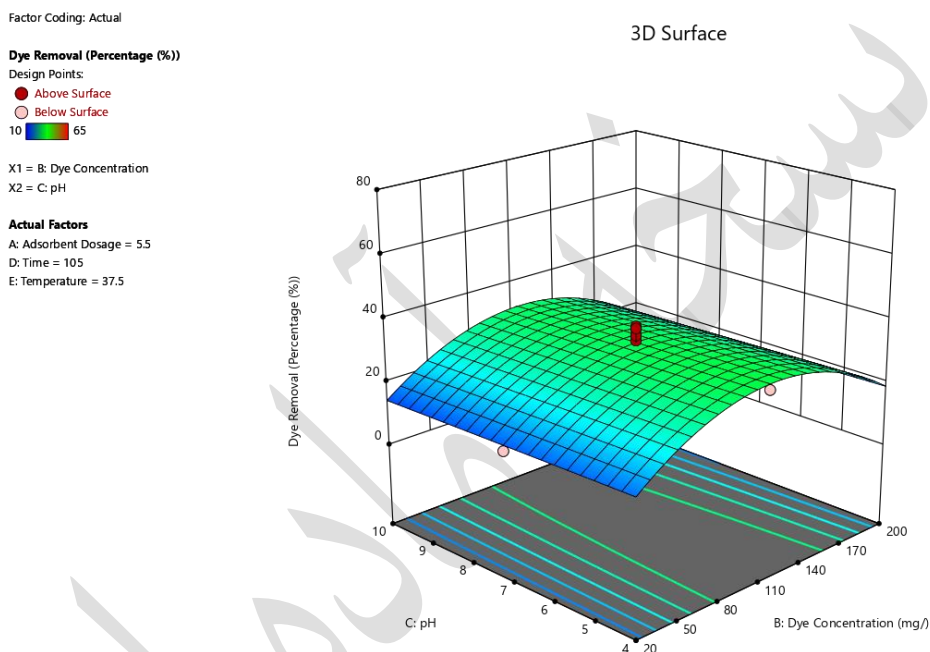


Figure 2. The interaction of pH and dye concentration on dye removal rate

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 منعقد کننده برابر با ۵/۵، زمان برابر با ۱۰۵ min و دما در ۳۷/۵ °C ثابت نگه داشته شدند. ورودی‌های اولیه به نرم افزار برای غلظت رنگ، محدوده ۲۰-۲۰۰ mg/L و برای pH، محدوده ۴-۱۰ در نظر گرفته شد. تغییرات pH می‌تواند بر واکنش‌های شیمیایی و سطحی جاذب تأثیرگذار باشد؛ بطور کلی، در فرآیندهای جذب، pH بر شارژ سطح جاذب و انحلال‌پذیری رنگ اثر دارد؛ این یافته علمی از طریق تحقیقات پیشین که در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۴ انجام شده، تأیید می‌گردد: بر اساس نتایج منتشر شده، تأثیر pH بر جذب رنگ توسط جاذب‌ها در محلول‌های حاوی رنگ، قابل توجه 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. به عنوان مثال، جاذب کیتوزان کربوکسیله شده دارای حداکثر پتانسیل جذب برای رنگ‌های آنیونی در pH پایین و برای رنگ‌های کاتیونی در pH بالا است که نشان دهنده تغییر عملکرد آن در پاسخگویی به pH است (Wang et al. (۲۰۲۴)). 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 حداکثر رساندن عملکرد جذب تأکید کرده است (Manik et al. (۲۰۲۴)). جاذب ساخته شده 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 (et al. (۲۰۱۷)).

Chen al. به طور مشابه، کربن فعال پودری جذب 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 جذب نسبت داده می‌شود (Vojnović et al. (۲۰۲۲)).

محدوده pH در نمودار نشان‌دهنده بررسی گسترده شرایط اسیدی تا بازی است. بر اساس 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 تحقیقی 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 به طور موثر محدود شد (Ahmad and Ansari (۲۰۲۰)). در این نمودار، صاف و موازی بودن خطوط کانتور روی صفحه افقی بیانگر عدم تاثیر متقابل این دو پارامتر بر یکدیگر است (Matos (۲۰۱۷); Djeghader et al. (۲۰۲۰)). به این معنا که هر کدام از پارامترهای غلظت رنگ و pH، بصورت مستقل از دیگری بر جاذب تاثیرگذارند و تعامل معناداری میان این دو مشاهده نشده است.

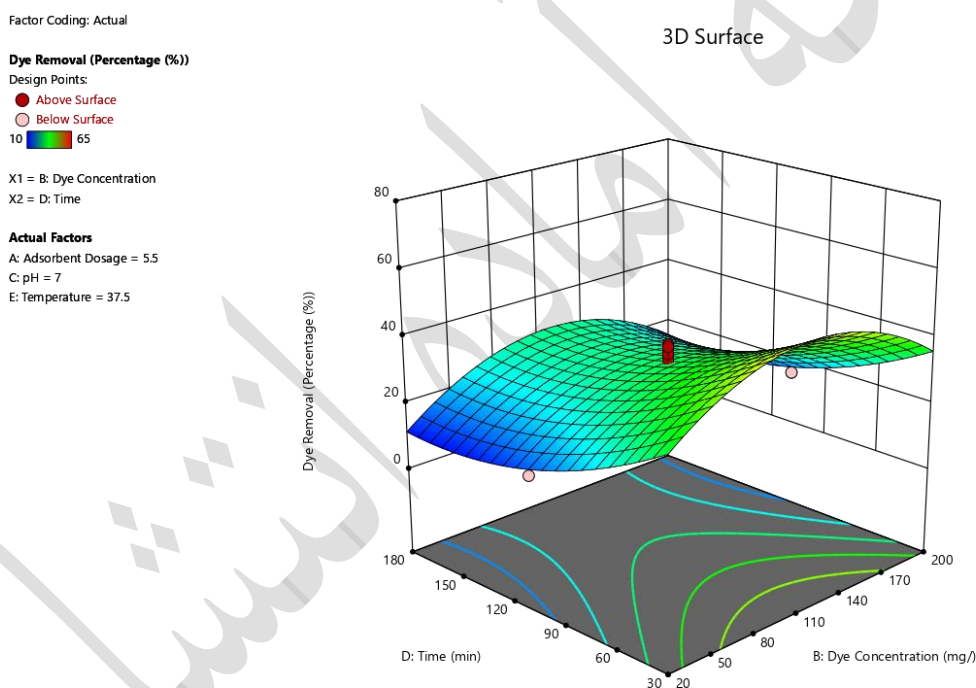


Figure 3. The interaction of Time and dye concentration on dye removal rate

در نمودار ۳، تاثیر متقابل زمان انجام واکنش و غلظت‌های مختلف رنگ بر یکدیگر و بر میزان حذف رنگ نشان داده شده است. برای بررسی این تاثیر، مقدار منعقد کننده برابر با ۵/۵، pH برابر با ۷، و دما در ۳۷/۵ °C ثابت نگه داشته شدند. ورودی‌های اولیه غلظت رنگ به نرم افزار، محدوده ۲۰-۲۰۰ mg/L و ورودی‌های زمان، محدوده ۳۰-۱۸۰ min تعیین شد. بر اساس 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 and Ansari (۲۰۲۰)). مطالعاتی 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 مکان های سطحی جاذب، سرعت تثبیت می شود و جذب بیشتر رنگ را محدود می کند (Valderrama et al. (۲۰۰۸)). همچنین، رنگ های مختلفی که جذب آن ها توسط تورگت و دمیرلی در سال ۲۰۱۸ بر روی پلیمر سنتزی انجام شد، نشان داد که در ۹۰ دقیقه اول، بیش از ۹۰ درصد ظرفیت های جذب برای تمام رنگ ها رخ داد که نشان دهنده حذف سریع رنگ است. پس از این دوره، به دلیل پر شدن نقاط فعال روی سطح پلیمر، مقدار جذب تثبیت شد (Torğut and Demirelli (۲۰۲۰)). منحنی بودن خطوط کانطور روی صفحه افقی نیز، نشان دهنده اثرگذاری متقابل این دو پارامتر بر یکدیگر است (Djeghader et al. (۲۰۲۰); Matos Barbosa (۲۰۱۷)); به این صورت که گذشت زمان عامل تعیین کننده میزان حذف رنگ در سیستم مورد بررسی است.

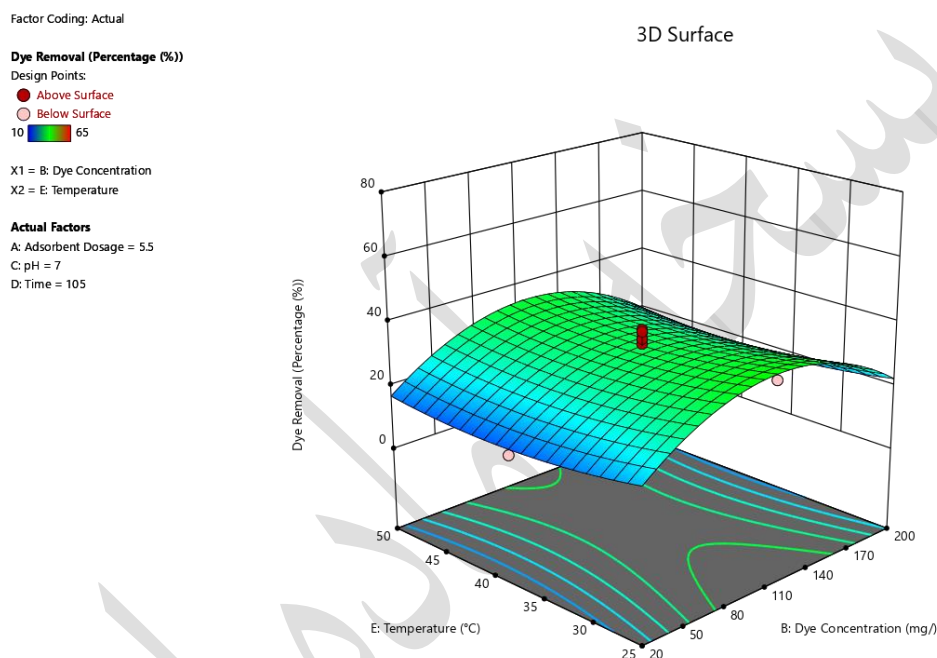


Figure 4. The interaction of temperature and dye concentration on dye removal rate

در نمودار ۳، تاثیر متقابل زمان درجه حرارت واکنش و غلظت های مختلف رنگ بر یکدیگر و بر میزان حذف رنگ نشان داده شده است. برای بررسی این تاثیر، مقدار ماده منعقد کننده برابر با ۵/۵، pH برابر با ۷، و زمان برابر با ۱۰۵ min ثابت نگه داشته شدند. برای ورودی غلظت رنگ به نرم افزار، محدوده ۲۰-۲۰۰ mg/L و برای ورودی درجه حرارت، محدوده ۲۵-۵۰ °C در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج، با افزایش درجه حرارت از ۲۵ درجه به ۵۰ °C، تغییرات زیادی در میزان حذف رنگ مشاهده نشده است؛ در تحقیقی که در سال ۲۰۲۰ توسط سیلوا و همکاران در زمینه حذف رنگ های پایه نساجی بر جاذب به انجام رسید، یکی از پارامترهای مورد بررسی، مطالعه سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد در فرآیند حذف رنگ بوده که نتایج نشان داد، افزایش دما بر جذب رنگ تاثیر منفی گذاشته و فرآیند جذب گرمازا بوده است و در نهایت به این نتیجه رسیدند که کاهش جذب با افزایش دما می تواند به دلیل نیروهای جذب ضعیف بین مکان های فعال جاذب و مولکول های جذب شونده باشد (Farias Silva et al. (۲۰۲۰)); بنابراین، عدم تغییر فرآیند جذب با تغییر دما در مطالعه حاضر، نشان از وجود پیوندهای قوی بین رنگ و جاذب است. در پژوهشی که در سال ۲۰۲۰ به بررسی تاثیر دما بر جذب رنگ نارنجی اسیدی توسط جاذب هیبریدی ساخته شده از کیتوزان پرداخته، اذعان داشته که برای انجام فرآیند 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 (Budnyak et al. (۲۰۲۰)). در این نمودار، موازی بودن اکثر خطوط کانتور روی صفحه افقی نشان دهنده این است که این دو پارامتر بر یکدیگر اثر متقابل ندارند و به نوعی تایید کننده عدم تاثیر پذیری دما بر حذف رنگ مورد بررسی توسط جاذب سلولزی مورد بررسی است (Matos Barbosa (۲۰۱۷); Djeghader et al. (۲۰۲۰)).

سنجش میزان مطابقت داده‌های تجربی و پیش بینی شده (ارزیابی شایستگی مدل):

نمودار مقادیر پیش‌بینی شده 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 بکار گرفته می‌شود. از طریق این ابزار، توزیع نرمال خطاها بررسی می‌شود؛ هر چه انحراف از خط نیمساز کمتر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر پاسخ‌های پیش‌بینی شده از مدل با پاسخ‌های واقعی است. در حالت ایده‌آل مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ‌ها با مقادیر واقعی آن‌ها بسیار به هم نزدیک‌اند.

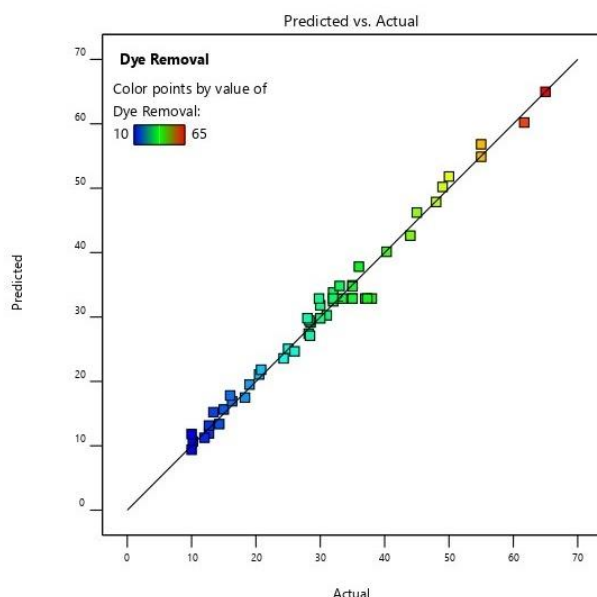


Figure 5. Experimental response value versus predicted responses in the removal process of red polyazo dye using cellulose adsorbent

ارزیابی شایستگی مدل:

نمودار ۵، مقدار تجربی پاسخ در مقابل پاسخ‌های پیش‌بینی شده به‌وسیله‌ی مدل حاصل از نرم افزار طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. در نمودار رسم شده، نزدیکی نقاط به خط شیب‌دار با زاویه‌ی ۴۵ درجه، بیانگر کیفیت مناسب مدل اجرا شده می‌باشد و می‌توان به نتایج حاصل از طراحی آزمایش اعتماد نمود. در حقیقت، با استفاده از جاذب سلولزی مورد بررسی، مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط نرم افزار به نتایج بدست آمده از طریق روش تجربی و واقعی نزدیک بوده و مطابقت خوبی بین نتایج وجود دارد.

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			

تفسیر ANOVA:

بر اساس جدول مربوط به ANOVA، مقدار $F_{26/27}$ در مدل F-value نشان دهنده معنی دار 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 بعلت نویز وجود دارد. مقادیر "P-value" کمتر از ۰/۰۵۰۰ بر معنی دار بودن شرایط مدل تاکید دارد. همچنین، مدل در مقادیر بیش از ۰/۱۰۰۰ معنی دار نیست. اگر تعدادی شرایط بی معنی در مدل وجود داشته باشد (غیر از شرایط مورد نیاز برای تایید مراحل آزمایش)، کاهش تعداد مراحل مدل، ممکن است مدل را بهبود بخشد.

شاخص‌های رگرسیونی:

جدول ۲ بررسی‌های آماری آنالیز ANOVA را نشان می‌دهد.

Table 2. ANOVA statistical analysis for cubic response surface model

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

با توجه به جدول ۲، مقدار منفی "Pred R- Squared" بیانگر این است که میانگین کلی مدل، نتایج را بهتر پیش بینی می‌کند. Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند. نسبت بیش از ۴ مطلوب است که نسبت ۲۱/۰۳۸۱ در مدل ارائه شده برای واکنش‌های جذبی ارائه شده 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.

مدل ارائه شده توسط نرم افزار برای حذف رنگ مورد بررسی توسط جاذب بکر ضایعات انگور:

مدل ارائه شده توسط نرم افزار طراحی آزمایش در ادامه آورده شده است که در آن A، B، C، D و E نشان دهنده اثر اصلی متغیرهای مستقل به ترتیب شامل مقدار جاذب، غلظت رنگ، pH، زمان واکنش و درجه حرارت می باشد. متغیر A*B نشان دهنده اثر متقابل مقدار جاذب و غلظت رنگ؛ متغیر B*C نشان دهنده اثر متقابل pH و غلظت رنگ؛ متغیر B*D نشان دهنده اثر متقابل زمان واکنش و غلظت رنگ، متغیر B *E نشان دهنده اثر متقابل درجه حرارت و غلظت رنگ و متغیرهای A²، B²، C² و D² و E² نشان دهنده اثر مربعی فاکتورهای A، B، C، D و E بر روی پاسخ مورد نظر می باشد.

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

شرایط بهینه انتخاب شده بر اساس نتایج تجربی (آزمایشگاهی) در جدول ۳ آورده شده است. همچنین، نتایجی از حذف طیفی از رنگ های نساجی توسط جاذب های 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

نتیجه گیری

کارایی جاذب های سلولزی: نتایج این مطالعه نشان داد که جاذب های زیست سازگار سلولزی تهیه شده از ضایعات بکر درخت انگور به دلیل ساختار منحصر به فرد، سطح ویژه بالا و وجود گروه های عاملی فعال، توانایی بالایی در حذف آلودگی های رنگی از محلول های آبی دارند. این جاذب ها در شرایط آزمایشگاهی مختلف، راندمان بالایی در جذب رنگ های مختلف نشان دادند که تأثیر قابل توجهی در بهبود کیفیت آب دارد.

زیست سازگاری و پایداری و کمک به مدیریت منابع آب: استفاده از جاذب های سلولزی نه تنها به حذف آلاینده ها کمک می کند بلکه این مواد به دلیل زیست تخریب پذیری، محیط زیست را کمتر آلوده می کنند و مشکل لجن های آلوده باقیمانده پس از فرآیند تصفیه نخواهند داشت؛ این امر به کاهش اثرات زیست محیطی و ترویج مدیریت پایدار منابع آب کمک شایانی می کند و می تواند 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 تاثیرگذار: 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 کم‌هزینه بودن، عدم نیاز به مواد شیمیایی اضافی و کاهش تولید پسماندهای خطرناک را دارا هستند.

محدودیت‌های تحقیق: در این تحقیق، برای بررسی دقیق شرایط عملیاتی حذف رنگ، محلول رنگی بصورت 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 تحقیقات 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 بخصوص در مقیاس بزرگ می‌تواند بسیار راهگشا باشد.

پیشنهاد برای تحقیقات آینده: با توجه به نتایج به دست آمده، مطالعات بیشتری برای بهبود ویژگی‌های جاذب‌های سلولزی مانند ظرفیت جذب، سرعت جذب و امکان بازیافت و استفاده مجدد از جاذب‌ها پیشنهاد می‌شود. به علاوه، 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 ۲ شکل اصلاح شده با اسید و باز نیز در مقاله دیگری مورد بررسی قرار دادند تا در ادامه مطالعه حاضر و با بررسی مکانیزم 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 زاید 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.

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., Błachnio, 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* (Vol. 413, No. 5, p. 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).

Removal of dye pollution from aqueous solutions by biocompatible adsorbents with a sustainable water resources management approach

Abstract:

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.

Keywords: Industrial dyes, Textile industry, Unmodified waste of grape tree, Water purification