

Evaluation of the Ability of Sasola Plant to Remove Malachite Green Dye from Wastewater

Mahdi Tazeh*, Saeideh Kalantari

Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, P.O. Box: 184, Ardakan, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10-06-2025

Accepted: 24-09-2025

Available online: 09-11-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167597.1265

Keywords:

Malachite green

Salsola spp

Adsorption

Langmuir isotherm

Kinetics

Endothermic process

ABSTRACT

In the present study, the ability of the desert plant Sasola to remove malachite green (MG) dye without any pretreatment was investigated, because this condition can be considered a suitable economic and environmental option for removing colored pollution. Adsorption experiments were performed under conditions of initial MG dye concentration (110 to 170 mg L⁻¹), adsorbent concentration (10 to 200 mg L⁻¹), contact time (2 to 20 min), and pH (4 to 10). The highest MG removal occurred at an initial dye concentration of 50 mg/L, an adsorbent concentration of 60 mg/L, a contact time of 6 min, and a pH of 7, in which about 92.11 % of the dye was removed. The optimum adsorption capacity of the adsorbent under these conditions was about 1.64 mg g⁻¹. The Langmuir isotherm model as well as the pseudo-second-order kinetic model were able to describe the equilibrium data well due to the high correlation coefficients (R²). The thermodynamic parameters were evaluated and showed that the adsorption process mechanism is an endothermic process. According to the experimental results, salt grass is an environmentally friendly adsorbent for removing MG from aqueous solutions, which is also cost-effective and can be useful in meeting the increasing demand for adsorbents used in environmental protection processes.

*Corresponding author: * mtazeh@ardakan.ac.ir



ارزیابی قابلیت گیاه بیابانی علف‌شور در حذف رنگزای مالاشریت‌گرین از پساب

مهدی تازه*، سعیده کلانتری

دانشیار، گروه طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران، صندوق پستی: ۱۸۴

چکیده

در پژوهش حاضر، قابلیت گیاه بیابانی علف‌شور بدون هیچگونه پیش‌پردازش، در حذف رنگزای مالاشریت‌گرین (MG) به بررسی گذاشته شد، زیرا که این حالت می‌تواند به‌عنوان یک گزینه اقتصادی و زیست‌محیطی مناسب در حذف آلودگی رنگی، مطرح شود. آزمایش‌های جذب در شرایط غلظت اولیه رنگزای MG، از 10 mg l^{-1} تا 70 mg l^{-1} ، غلظت جاذب، 10 mg l^{-1} تا 20 mg l^{-1} ، زمان تماس ۲ تا ۲۰ دقیقه و pH (۴ تا ۱۰) انجام شد. بیشترین حذف رنگزای MG در غلظت اولیه رنگزای 50 mg l^{-1} ، غلظت جاذب 60 mg l^{-1} ، زمان تماس ۶ دقیقه و $\text{pH}=7$ رخ داد، که در این شرایط حدود ۹۲/۱۱ درصد رنگ حذف گردید. ظرفیت جذب بهینه جاذب در این شرایط حدود $64/10 \text{ mg g}^{-1}$ به دست آمد. مدل ایزوترم لانگمویر و همچنین مدل سینتیک شبه مرتبه دوم، به دلیل ضرایب همبستگی بالا، توانستند داده‌های تعادلی را به خوبی توصیف کند. ارزیابی‌های پارامترهای ترمودینامیکی نشان داد که مکانیسم فرایند جذب توسط یک فرایند گرماگیر است. طبق نتایج آزمایش‌ها، علف شور یک جاذب سازگار با محیط زیست برای حذف MG از محلول آبی است، که از نظر هزینه نیز مقرون به صرفه است و می‌تواند در رفع تقاضای رو به افزایش برای جاذب‌های مورد استفاده در فرایندهای حفاظت از محیط زیست، مفید باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167597.1265

واژه‌های کلیدی:

مالاشریت‌گرین

علف‌شور

جذب سطحی

ایزوترم لانگمویر

سینتیک

فرایند گرماگیر

۱- مقدمه

آلودگی ناشی از مواد رنگی در پساب‌های صنعتی، یکی از مسائل محیط‌زیستی حیاتی است که تأثیرات گسترده‌ای بر بومسازگان و سلامت عمومی جوامع بشری دارد. در سال‌های اخیر، پساب‌های حاوی رنگ‌ها به‌ویژه کاتیونی مانند مالاخیت‌گرین (MG)، به‌طور فزاینده‌ای در صنایع مختلف از جمله صنایع نساجی، آبریز-پروری، چرم‌سازی و تولید کاغذ و مقوا تولید شده‌اند. MG، که به‌عنوان رنگزایی پرکاربرد در صنعت آبریز-پروری، به‌ویژه برای ضدعفونی و درمان بیماری‌های ماهیان استفاده می‌شود، علاوه بر اثرات سمی که بر موجودات آبریز دارد، برای انسان‌ها نیز تهدیدی جدی به شمار می‌آید. این رنگ‌زا به راحتی در محیط‌زیست تجمع می‌یابد و با اثرات ماندگار خود، به یک تهدید عمده برای سلامت بومسازگان آبی و انسان‌ها تبدیل می‌شود (۱) که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. از این رو، یافتن روش‌های کارآمد و پایدار برای حذف این آلاینده از پساب‌ها یکی از چالش‌های عمده به شمار می‌آید. برای از بین بردن رنگ‌ها از پساب‌ها، روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۲-۷). روش‌هایی مانند استفاده از کربن فعال، صافش غشایی و واکنش‌های شیمیایی، اغلب با مشکلاتی نظیر هزینه بالا، تولید ضایعات و نیاز به انرژی زیاد مواجه هستند. یکی از روش‌های مؤثر و اقتصادی برای حذف رنگ‌ها از آب، جذب سطحی است. همچنین روش‌های زیستی مبتنی بر استفاده از مواد طبیعی و زیستی، به‌ویژه گیاهان، به‌عنوان گزینه‌های نوین، مقرون به‌صرفه و پایدار در زمینه تصفیه پساب‌ها می‌باشند. این روش‌ها به دلیل استفاده از مواد تجدیدپذیر، کم‌هزینه و غیرسمی، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین واقع شدند و بسیاری از جاذب‌ها از جمله خاک رس (۸)، زئولیت (۹)، خاکستر (۱۰)، ژل سیلیکا (۱۱)، کیتوزان (۱۲) و جلبک، در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۱۳). یکی از این جاذب‌های زیستی مناسب برای حذف رنگ‌های کاتیونی، گیاه بیابانی علف‌شور است که گیاهی چندساله و علفی از خانواده Chenopodiaceae است. علف‌شور دارای ساقه‌هایی

منشعب و برگ‌هایی باریک، کوچک و گاهی کرک‌دار است. ارتفاع این گیاه بین ۲۰ تا ۵۰ cm متغیر است. این گیاه به‌دلیل سازگاری بالا با شرایط سخت، مانند کم‌آبی و شوری، بیشتر در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی دیده می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این گیاه، باعث می‌شود که به‌عنوان یک جاذب طبیعی و مؤثر برای حذف رنگ‌های آلی و کاتیونی از محیط‌های آبی مورد توجه قرار گیرد. علف‌شور، به‌دلیل قابلیت رشد سریع، عدم نیاز به شرایط خاص کشت و هزینه پایین، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار برای تصفیه پساب‌های صنعتی در نظر گرفته شود. استفاده از علف‌شور بدون هیچ پیش‌پردازشی در تصفیه پساب‌ها، به‌ویژه در مناطق کم‌آب و خشک، می‌تواند هم راه‌حلی پایدار برای مدیریت آلودگی‌های محیط‌زیست باشد و هم استفاده از آب‌های نامتعارف در این مناطق را فراهم آورد. به نظر می‌رسد این گیاه، که معمولاً در شرایط شوری بالا رشد می‌کند، می‌تواند رنگ‌های کاتیونی همچون MG، را از محیط‌های آبی جذب کرده و به‌عنوان یک جاذب زیستی مؤثر در فرایندهای تصفیه پساب‌های آلوده به رنگ‌زا مورد استفاده قرار گیرد. ساقه‌ها و برگ‌های علف‌شور به دلیل داشتن گروه‌های عاملی سطحی مانند $-OH$ ، $-COOH$ و $-NH_2$ ، احتمالاً قابلیت جذب آلاینده‌های آلی و کاتیونی از محیط‌های آبی را دارند. با توجه به ماهیت کاتیونی رنگزای MG و دانش موجود از جاذب‌های زیستی مشابه، پیش‌بینی می‌شود که فرایند جذب توسط علف‌شور عمدتاً شامل برهم‌کنش‌های الکتروستاتیک بین گروه‌های عاملی سطح جاذب و یون‌های مثبت رنگ‌زا، همچنین جذب فیزیکی و پیوند هیدروژنی باشد. این حدس علمی، پایه‌ای برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل دقیق سازوکار جذب با استفاده از مدل‌های ایزوترم، سینتیک و ترمودینامیک فراهم می‌کند و نتایج تجربی پس از انجام آزمایش‌ها می‌تواند این پیش‌بینی را تأیید یا اصلاح نماید.

1. Malachite Green

جدول ۱: مشخصات مالاخیت‌گرین.

Table 1: characteristics of malachite green.

Characteristics	Value
Molecular weight	364.911 g.mol ⁻¹
Chemical formula	C ₂₃ H ₂₅ ClN ₂
Color	Light green to very dark green
Chemical structure	
Wavelength	617 nm

در طول موج ۶۱۷ نانومتر استفاده شد. محلول‌ها با همزن در دمای ثابت هم‌زده شدند و سپس با گریزان‌ه جداسازی شدند. خشک‌کن، آسیاب و الک برای آماده‌سازی پودر علف‌شور به کار رفت.

۳-۲- آزمایش‌های جذب

محلول ذخیره‌ای با غلظت 1000 mg l^{-1} از MG (تهیه‌شده توسط شرکت مرک) با حل کردن مقادیر مناسبی از رنگزا در آب مقطر دوبار تقطیر تهیه شد. سپس این محلول ذخیره، برای دستیابی به غلظت‌های مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و 70 mg l^{-1} رقیق گردید. آزمایش‌های جذب ناپیوسته، برای بررسی تأثیر عوامل مختلف مانند pH، غلظت جاذب، غلظت اولیه رنگ و زمان تماس بر فرایند جذب MG بر روی علف‌شور انجام شد. در این آزمایش‌ها، مقدار مشخصی از جاذب که از قبل وزن شده بود، به ۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ اضافه گردید و pH با استفاده از 0.1 NaOH مولار یا 0.1 HCl مولار تنظیم شد. محلول به‌دست‌آمده، با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه روی هم‌زن در دمای ثابت هم‌زده و سپس با گریزان‌ه جداسازی شد. تمام آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام و نتایج به‌صورت میانگین استفاده شدند. غلظت رنگ در طول موج مشخص ۶۱۷ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. در نهایت، درصد حذف رنگزا و میزان رنگزای جذب‌شده (ظرفیت جذب) توسط جاذب علف‌شور طبق روابط (۱ و ۲) محاسبه شدند.

$$\text{Re (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

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

که در آن Re درصد حذف رنگ، q_e مقدار رنگزای جذب شده روی جاذب در زمان تعادل (mg/g)، C_0 و C_e غلظت‌های اولیه و تعادلی (mg/g) رنگزا در محلول هستند، V حجم محلول (li) و M جرم جاذب (g) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز FTIR

به‌منظور شناسایی گروه‌های عاملی موجود بر سطح علف‌شور، طیف FTIR آن در محدوده $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ثبت گردید. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نوار پهن و نسبتاً قوی در حوالی 3394 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوندهای O-H گروه‌های هیدروکسیل و همچنین ارتعاش کششی N-H گروه‌های آمینی نسبت داده می‌شود. دو باند مشخص در 2920 و 2850 cm^{-1} بیانگر ارتعاش کششی پیوندهای C-H در گروه‌های متیل و متیلن ترکیبات آلی گیاه است. قله مشخص در 1724 cm^{-1} به ارتعاش کششی گروه‌های کربونیل (C=O) در اسیدهای کربوکسیلیک یا استرها

با وجود مطالعات گسترده روی جاذب‌های زیستی مختلف برای حذف رنگزاهای کاتیونی، این تحقیق برای نخستین بار قابلیت گیاه بومی بیابانی علف‌شور را بدون هیچ پیش‌پردازش شیمیایی برای حذف MG را بررسی می‌کند و به تحلیل جامع تأثیر عوامل محیطی و سازوکار جذب با استفاده از مدل‌های ایزوترم می‌پردازد. همچنین سینتیک و ترمودینامیک جذب بررسی می‌شود. استفاده از این جاذب پایدار و کم‌هزینه، به ویژه در مناطق با منابع آبی محدود، یکی از جنبه‌های نوآورانه این مطالعه به شمار می‌آید.

هدف از این تحقیق، ارزیابی قابلیت گیاه علف‌شور، به‌عنوان یک جاذب زیستی برای حذف رنگزای MG از پساب‌های آلوده است. این مطالعه به تحلیل پتانسیل جذب رنگزای MG، توسط این گیاه و بررسی تأثیرات مختلف عوامل محیطی بر فرایند جذب می‌پردازد و ارزیابی پایداری و کارایی استفاده از علف‌شور، به‌عنوان یک راهکار مؤثر و کم‌هزینه برای مدیریت آلودگی‌های رنگی در پساب‌های صنعتی را انجام خواهد داد. نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه و بهبود روش‌های تصفیه پساب‌های آلوده به رنگزا کمک کند. بنابراین، پژوهش حاضر به‌عنوان یک رویکرد نوین و پایدار در زمینه مدیریت آلودگی محیط‌زیست و تصفیه پساب‌های صنعتی مطرح است و می‌تواند به عنوان الگویی برای استفاده از گیاهان بومی در فرایندهای محیط زیستی معرفی شود.

۲- بخش تجربی

در پژوهش حاضر، عوامل مختلفی نظیر pH، غلظت اولیه رنگزا، زمان تماس و مقدار جاذب مورد بررسی قرار گرفت، سپس تحلیل دقیق فرایند جذب و ارائه مدل‌های مختلف ایزوترم جذب، سینتیک و ترمودینامیک صورت گرفت تا سازوکار جذب رنگزای MG توسط علف‌شور مشخص شود، مراحل پژوهش به شرح زیر است.

۲-۱- آماده‌سازی جاذب‌ها

ابتدا ساقه‌های گیاه علف‌شور، با استفاده از آب مقطر دوبار تقطیر شده، به‌طور کامل شستشو داده شد تا گرد و غبار و سایر آلاینده‌ها پاک شود. سپس، ساقه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در خشک‌کن خشک شد. پس از خشک شدن، ساقه‌ها در یک آسیاب خرد شده و ذراتی با اندازه ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرومتر با استفاده از الک، جداسازی شدند. در نهایت، از پودر حاصل برای استفاده در آزمایش‌های جذب استفاده گردید.

۲-۲- مواد و دستگاه‌ها

تمام مواد شیمیایی از نوع خلوص بالا و تجاری تهیه شدند. رنگزای MG از شرکت مرک، NaOH با غلظت ۰/۱ مولار و HCl با غلظت ۰/۱ مولار در آزمایش‌ها استفاده شد. آب مقطر دوبار تقطیر شده، برای تهیه محلول‌ها استفاده شد. برای آزمون غلظت رنگ، از طیف‌سنج UV-Vis

مثبت برای مکان‌های جذب خالی رقابت می‌کنند و باعث کاهش جذب رنگزا می‌شوند. بنابراین، جذب MG روی علف‌شور در pH بالاتر از pH_{PZC} مطلوب است. مشخص شد که درصد حذف رنگ در pH پایین کمتر و حدوداً در pH=۷ حداکثر است. بنابراین، تمام آزمایش‌ها در pH=۷ انجام شد.

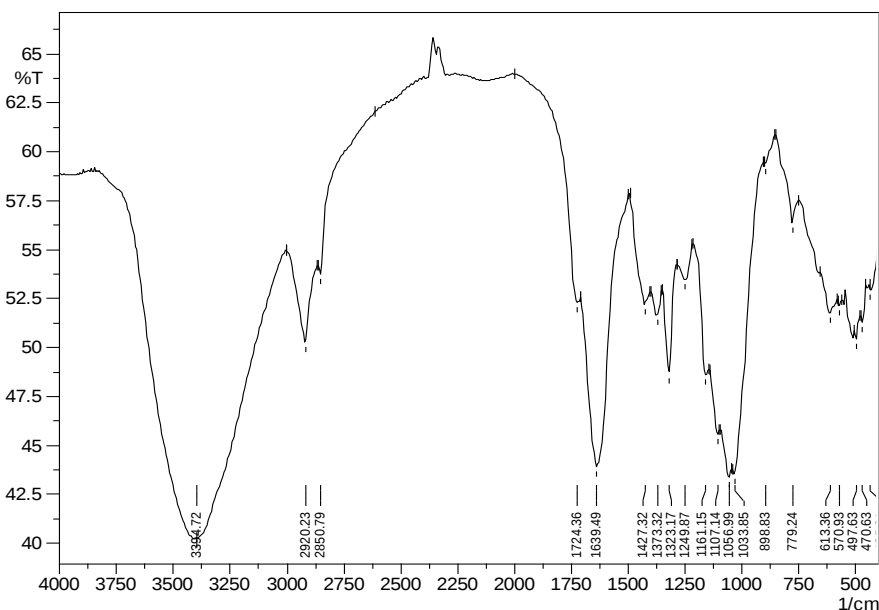
۳-۳- اثر pH

عوامل مختلفی، بر ظرفیت جذب جاذب‌های زیستی تأثیر می‌گذارند که pH یکی از مهم‌ترین آن‌هاست، زیرا یونیزه شدن سطح، گروه‌های عاملی روی سطح جاذب و بار سطحی جاذب به شدت مؤثر از pH محلول قرار می‌گیرد (۱۴). در این مطالعه، حداکثر درصد حذف رنگزا حدود ۸۹/۸۸ درصد در pH=۷ ثبت شد، در حالی که کمترین حذف رنگزا در pH=۴ مشاهده شد. در محیط‌های اسیدی، رقابت بین یون H⁺ و مولکول‌های رنگزا برای مکان‌های فعال سطحی و همچنین دافعه الکترواستاتیکی ناشی از بار مشابه، سبب کاهش جذب می‌شود. با افزایش pH، سطح جاذب بار منفی بیشتری پیدا می‌کند و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی جذب کاتیونی به سطح جاذب تقویت می‌شوند. این رفتار، نشان‌دهنده اهمیت کنترل pH برای بهینه‌سازی جذب است و با یافته‌های مشابه در سایر جاذب‌های زیستی هم‌خوانی دارد (۱۵). با توجه به این نتایج، pH=۷ برای آزمایش‌های بعدی انتخاب شد، زیرا در این شرایط کارایی جذب به حداکثر مقدار خود رسیده است. شکل ۳ تأثیر تغییرات pH بر حذف MG توسط گیاه علف‌شور را نشان می‌دهد.

مربوط بوده و نوار 1639 cm^{-1} نیز می‌تواند ناشی از ارتعاش خمشی N-H یا کششی C=C در ساختارهای آروماتیک باشد. نوارهای 1427 cm^{-1} تا 1248 cm^{-1} به ارتعاش خمشی C-H و کششی C-O در الکل‌ها، فنل‌ها و استرها تعلق دارند و قله‌های قوی در حوالی 1056 cm^{-1} تا 1033 cm^{-1} نیز ناشی از ارتعاش کششی C-O در ترکیبات پلی‌ساکاریدی نظیر سلولز و همی‌سلولز است. ناحیه پایین‌تر از 700 cm^{-1} به ارتعاشات خمشی گروه‌های C-H و نیز حضور احتمالی ترکیبات معدنی (Si-O) مربوط می‌شود. وجود این گروه‌های عاملی متنوع بر سطح علف‌شور، نشان می‌دهد که جاذب دارای مکان‌های فعال متعدد (هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین و کربونیل) است که می‌توانند از طریق پیوند هیدروژنی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و نیروهای واندروالس با مولکول‌های رنگزای MG تعامل نموده و در فرایند جذب نقش اساسی ایفا کنند.

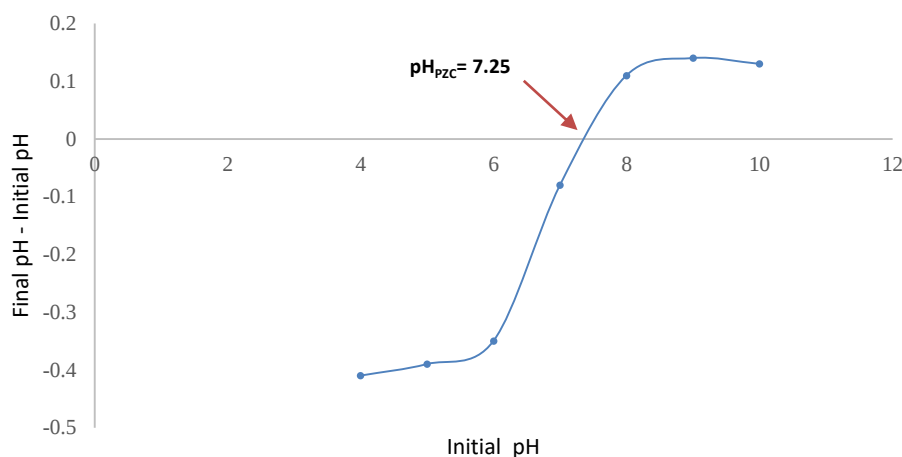
۲-۳- تعیین نقطه بار صفر (pH_{PZC})

pH_{PZC} یک جاذب، ویژگی مهمی است که میزان خنثی بودن الکتریکی سطح جاذب را تعیین می‌کند. برای یافتن pH_{PZC}، آزمایش‌ها در محدوده‌های مختلف pH از ۴ تا ۱۰، با اضافه کردن ۰/۱ g جاذب به ۵۰ ml محلول انجام شد. pH محلول پس از ۲۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، pH_{PZC} علف‌شور، ۷/۲۵ تعیین شد. در محلول pH > pH_{PZC}، سطح جاذب به دلیل افزایش نیروی جاذبه الکترواستاتیکی، دارای بار منفی است و جذب رنگ‌های یونی کاتیونی را تسهیل می‌کند. در pH < pH_{PZC}، سطح دارای بار مثبت می‌شود، غلظت H⁺ بالا بوده و آنها با کاتیون MG با بار



شکل ۱: FTIR مالاخیت‌گرین.

Figure 1: FTIR of Malachite Green.



شکل ۲: نمودار تعیین pH_{PZC}

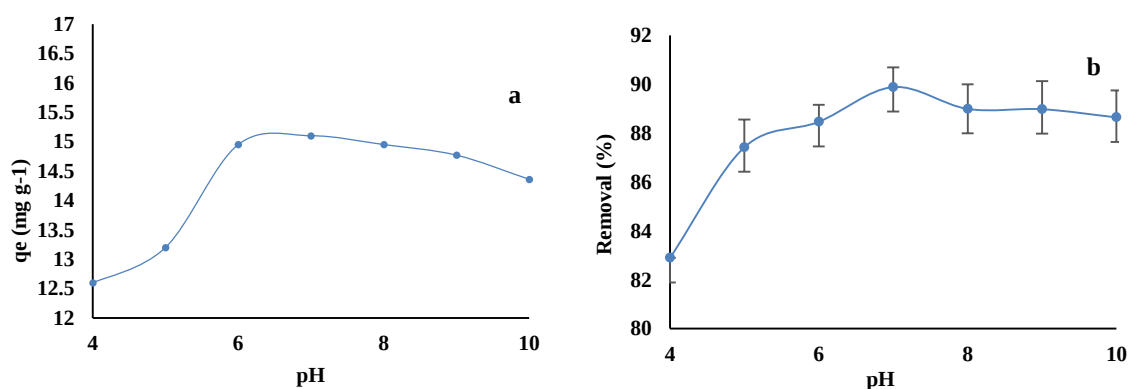
Figure 2: pH_{PZC} determination curve.

تدریج با مولکول‌های رنگزا اشباع می‌شوند و سرعت جذب کاهش می‌یابد، تا زمانی که تعادل بین جذب و دفع مولکول‌های رنگزا برقرار شود.

نتایج این بخش، با یافته‌های گزارش‌شده در سایر پژوهش‌ها در زمینه جذب رنگزا توسط جاذب‌های زیستی مشابه قابل مقایسه است (۱۶)، اگرچه مقدار زمان تعادل و نرخ جذب ممکن است بسته به نوع جاذب و شرایط آزمایش متفاوت باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که جاذب مورد استفاده در پژوهش حاضر، توانایی جذب مؤثر رنگزا را دارد.

۴-۳- اثر زمان تماس

برای بررسی تأثیر زمان تماس بر فرایند جذب، آزمایش‌ها با هم زدن محلول رنگ MG با غلظت 10 mg l^{-1} و جاذب با مقدار 1 mg در بازه زمانی ۲ تا ۲۰ دقیقه انجام شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، سرعت جذب در مراحل اولیه بسیار بالا بود و با گذشت زمان کاهش یافت، تا نهایتاً به تعادل رسید. در این مطالعه، زمان تعادل حدود ۶ دقیقه به دست آمد. افزایش سریع اولیه ظرفیت جذب (q_e) به فراوانی مکان‌های فعال روی سطح جاذب علف‌شور و در دسترس بودن آن‌ها در ابتدای فرایند مربوط می‌شود. با گذشت زمان، این مکان‌ها به



شکل ۳: تأثیر pH های مختلف بر (a) میزان جذب و (b) درصد حذف مالاشریت‌گرین با استفاده از علف شور.

Figure 3: the effect of different pH on (a) the Adsorption capacity, and (b) removal rate of malachite green using Salsola.

تحقیق نیز مشاهده شد (۱۷).

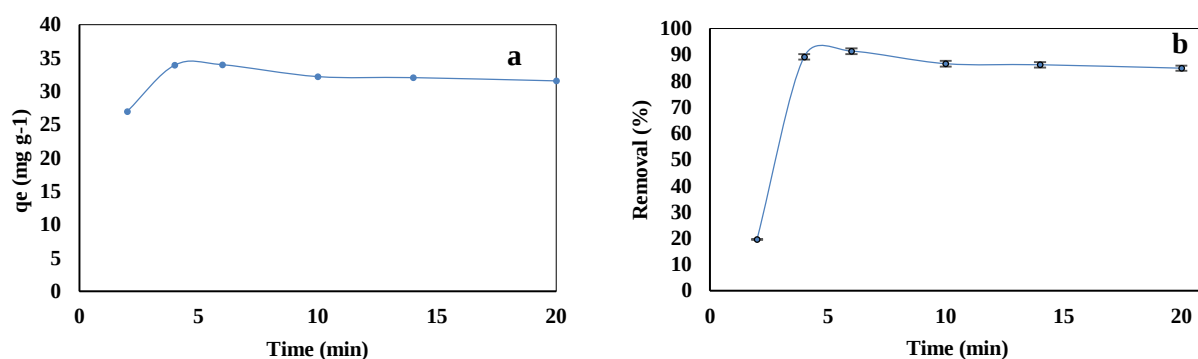
۳-۶ اثر مقدار جاذب

برای بررسی تأثیر غلظت جاذب بر کارایی حذف رنگزا، از مقادیر ۲۰ تا ۲۰۰ mg l^{-1} علف شور استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزایش غلظت جاذب از ۲۰ به ۶۰ mg l^{-1} باعث افزایش چشمگیر درصد حذف رنگ شد. این افزایش اولیه را می‌توان با افزایش تعداد مکان‌های فعال جاذب و بزرگ‌تر شدن مساحت سطح جاذب توضیح داد که امکان تعامل بیشتر بین مولکول‌های رنگزا و سطح جاذب را فراهم می‌کند. با افزایش بیشتر غلظت جاذب فراتر از ۶۰ mg l^{-1} ، افزایش قابل توجهی در درصد حذف رنگزا مشاهده نشد. این رفتار نشان می‌دهد که سیستم به تعادل بین فاز جامد و محلول رسیده است و مکان‌های فعال اضافی دیگر تأثیری بر جذب نخواهند داشت. بنابراین، ۶۰ mg l^{-1} به عنوان غلظت بهینه برای آزمایش‌های بعدی انتخاب شد.

۳-۵ اثر غلظت رنگزا

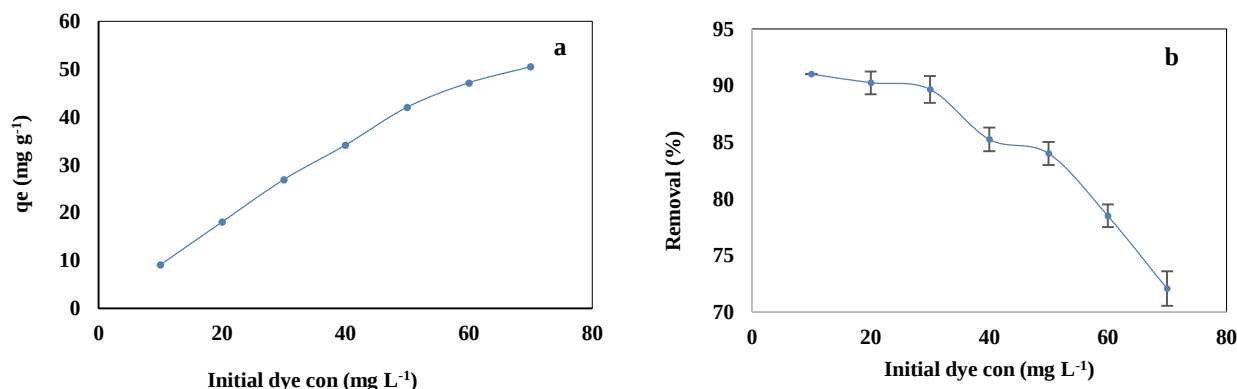
تأثیر غلظت اولیه رنگزا، بر فرایند جذب با تغییر غلظت از ۱۰ mg l^{-1} تا ۷۰، در دمای اتاق (۲۹۸ K)، با سرعت هم‌زدن ۱۲۰ دور در دقیقه و مقدار جاذب ۱۰ mg l^{-1} و $\text{pH} = 7$ بررسی شد. مطابق شکل ۵، بالاترین بازده حذف رنگ در غلظت ۱۰ mg l^{-1} مشاهده شد، در حالی که با افزایش غلظت اولیه رنگزا، درصد حذف کاهش یافت. این رفتار به نسبت کم مولکول‌های رنگزا به تعداد مکان‌های فعال موجود روی سطح علف‌شور در غلظت‌های پایین مرتبط است که باعث بازده بالای حذف رنگ می‌شود. با افزایش غلظت رنگ، تعداد مولکول‌ها نسبت به مکان‌های فعال، بیشتر شده و رقابت برای جذب افزایش می‌یابد، بنابراین درصد حذف کاهش می‌یابد. مشاهدات نشان داد که غلظت حدود ۳۰ mg l^{-1} ، به عنوان غلظت بهینه برای حذف مؤثر رنگزای MG از محلول آبی تعیین شد.

مطالعات مشابه، نشان داد که افزایش غلظت اولیه رنگزا منجر به رقابت مولکول‌ها برای مکان‌های فعال می‌شود، روندی که در این



شکل ۴: تأثیر زمان تماس بر (a) میزان جذب و (b) درصد حذف مالاخیت‌گرین با استفاده از علف شور.

Figure 4: Effect of contact time on (a) the Adsorption capacity, and (b) removal rate of malachite green using Salsola.



شکل ۵: تأثیر غلظت اولیه بر (a) میزان جذب و (b) درصد حذف مالاخیت‌گرین با استفاده از علف‌شور.

Figure 5: Effect of initial concentration on (a) the Adsorption capacity, and (b) removal rate of malachite green using Salsola.

زمان مورد بررسی قرار گرفت.

سینتیک شبه مرتبه اول را می‌توان به صورت رابطه ۳ ارائه داد (۱۹).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - (K_1)t \quad (3)$$

که در آن q_e و q_t به ترتیب، مقدار رنگ جذب شده (mg/g) در زمان تعادل و t ، و k_1 نرخ جذب ثابت است. مقادیر k_1 و q_e به ترتیب از شیب‌های (k_1) و عرض از مبدا ($\ln q_e$)، نمودارهای $\ln(q_e - q_t)$ در مقابل t (شکل ۷) محاسبه شده و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. از طرفی سینتیک جذب را می‌توان با مدل شبه مرتبه دوم توصیف کرد که به صورت معادله ۴ بیان می‌شود (۲۰).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

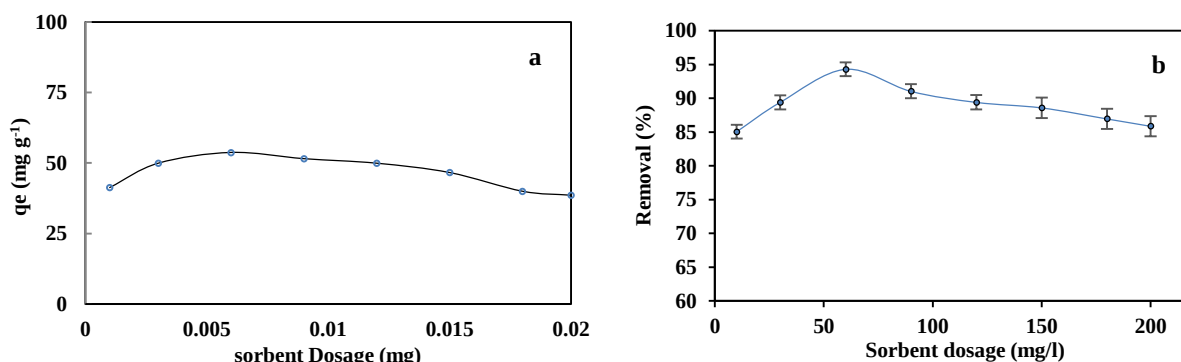
که در آن k_2 ثابت جذب سطحی (g/mgmin)، q_e و q_t به ترتیب مقدار رنگ جذب شده (mg/g) در حالت تعادل و زمان t (min) هستند. مقادیر k_2 و q_e^2 به ترتیب از، عرض از مبدا و شیب نمودارهای t/q_t و t (شکل ۸) محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

این الگوی رفتار با نتایج گزارش شده در سایر پژوهش‌ها در زمینه جذب رنگزا توسط جاذب‌های زیستی هم‌راستا است (۱۸)، جایی که افزایش اولیه غلظت جاذب باعث افزایش کارایی جذب شد و پس از رسیدن به غلظت بهینه، تأثیر اضافی کاهش یافت. این رفتار نشان می‌دهد که انتخاب غلظت مناسب جاذب نقش کلیدی در بهینه‌سازی فرایند جذب و صرفه‌جویی در مواد اولیه دارد.

براساس این آزمایشات، شرایط بهینه برای جذب مالاشیت سبز توسط علف‌شور شامل غلظت اولیه رنگزا 30 mg l^{-1} ، غلظت جاذب 60 mg l^{-1} و $\text{pH} = 7$ و زمان تماس ۶ دقیقه به دست آمد.

۳-۷- مطالعات سینتیک جذب

سینتیک جذب، شامل جستجوی بهترین مدلی است که به خوبی داده‌های تجربی را نشان دهد. دو مدل سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای شبیه‌سازی داده‌های تجربی پژوهش حاضر، به کار گرفته شد. در تمامی آزمایش‌های سینتیکی، تنها زمان تماس به عنوان متغیر تغییر داده شد و سایر عوامل در شرایط بهینه ثابت نگه داشته شدند. (غلظت اولیه رنگزا 30 mg l^{-1} ، غلظت جاذب 60 mg l^{-1} و $\text{pH} = 7$) داده‌های q_t (مقدار رنگزای جذب شده در زمان t) در طول



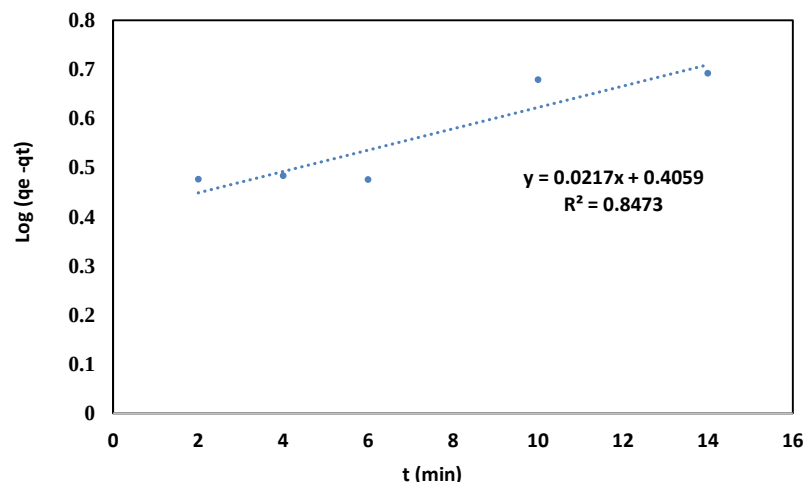
شکل ۶: تاثیر مقدار جاذب بر (a) میزان جذب و (b) درصد حذف رنگ مالاشیت گرین با استفاده از علف شور.

Figure 6: Effect of adsorbent dosage on (a) the Adsorption capacity, and (b) Removal rate of malachite green using Salsola.

جدول ۲: متغیرها در مدل‌های سینتیکی.

Table 2: Parameters of kinetic models.

Kinetic model	Equation	Parameters	Value
Pseudo-first-order	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \frac{t}{2.303}$	$q_e \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	1.500652
		$k_1 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	0.0217
		R^2	0.8473
Pseudo-second-order	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	$q_e \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	31.152
		$k_2 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	0.100044
		R^2	0.9997



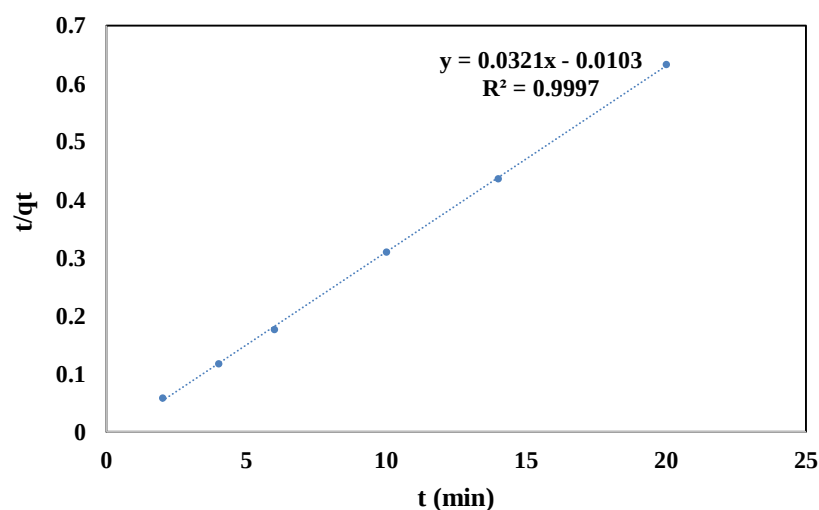
شکل ۷: نمودار سینتیک شبه مرتبه اول برای جذب مالاشریت گرین روی علف شور.

Figure 7: Pseudo-first-order kinetics diagram for malachite green adsorption on salsola.

می‌دهد که سازوکار غالب جذب، بیشتر به فرایندهای شیمیایی و تبادل الکترونی بین سطح جاذب و رنگزا وابسته است تا تنها فرایند فیزیکی سطحی، که در مدل شبه مرتبه اول فرض می‌شود. افزایش تطابق داده‌ها با مدل شبه مرتبه دوم، همسو با گزارش‌های (۲۱) در مورد جذب رنگزاهای آلی توسط جاذب‌های زیستی است، که بیانگر اهمیت مکان‌های فعال سطحی و پیوندهای شیمیایی در تعیین ظرفیت جذب می‌باشد. بنابراین، استفاده از مدل شبه مرتبه دوم، نه تنها کیفیت پیش‌بینی داده‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه بینشی نیز در مورد سازوکار حاکم بر فرایند، فراهم می‌آورد و می‌تواند در بهینه‌سازی شرایط عملیاتی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی مفید باشد.

طبق جدول ۲، در مورد مدل سینتیک شبه مرتبه اول، اگرچه مقادیر ضریب همبستگی تا حدی قابل قبول است، مقادیر q به دست آمده از این مدل سینتیک تطابق خوبی با مدل تجربی ندارند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فرایند جذب از سینتیک شبه مرتبه اول پیروی نمی‌کند، ولی مدل سینتیک شبه مرتبه دوم، مقادیر ضریب همبستگی بالا (>0.99) را نشان داد و تطابق خوبی بین مقادیر q محاسبه شده و تجربی وجود داشت که نشان دهنده قابلیت کاربرد مدل سینتیک شبه مرتبه دوم است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل شبه مرتبه دوم، توانایی بالاتری در توصیف رفتار جذب رنگزای MG توسط علف شور دارد. این نشان



شکل ۸: نمودار سینتیک شبه مرتبه دوم برای جذب مالاشریت گرین روی علف شور.

Figure 8: Pseudo-second-order kinetics diagram for malachite green adsorption on salsola.

۳-۸-۳ مطالعات ایزوترم

برای درک بهتر فرایند جذب سطحی، نیاز به تعادل جذب می‌باشد. تعادل جذب، ماهیت برهم‌کنش جاذب را توصیف می‌کند. آزمایش‌های تعادل، برای غلظت‌های اولیه مختلف رنگزا انجام شد و مشاهده شد که مقدار رنگزا جذب‌شده از ۹/۱ mg/g به ۵۰/۴۵، افزایش یافت، زیرا غلظت اولیه رنگزا از ۱۰ mg l⁻¹ به ۷۰ افزایش یافت، که نشان می‌دهد غلظت اولیه نیروی محرکه قدرتمندی برای غلبه بر مقاومت انتقال جرم بین فازهای آبی و جامد فراهم می‌کند. در حالی که درصد حذف رنگ از ۹۱/۰۱ به ۷۲/۰۷ درصد کاهش یافت.

۳-۸-۱ مدل ایزوترم لانگمویر

ایزوترم لانگمویر، برای جذب روی یک لایه روی سطحی با تعداد نامحدودی از مکان‌های یکسان معتبر است و می‌توان آن را به صورت رابطه ۵ بیان کرد.

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

که در آن، q_e مقدار جذب شده در واحد جرم جاذب در حالت تعادل q_m (mg/g) حداکثر ظرفیت جذب C_e (mg/g) غلظت تعادلی رنگزا (mg/L) و K_L ثابت تعادل جذب است. مشخصه‌های اساسی ایزوترم لانگمویر را می‌توان با یک ثابت به نام عامل تعادل، R_L بیان کرد که مطابق رابطه ۶ تعریف می‌شود.

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad (6)$$

که در آن b ثابت لانگمویر و C_0 غلظت اولیه است. مقدار R_L شکل ایزوترم به صورت، نامطلوب $R_L > 1$ ، خطی $R_L = 1$ ، مطلوب $0 < R_L < 1$ و غیر قابل برگشت $R_L = 0$ نشان می‌دهد (۲۲).

۳-۸-۲ مدل ایزوترم فروندلیچ

معادله تجربی ایزوترم فروندلیچ، با فرض اینکه فرایند جذب سطحی روی سطوح ناهمگن رخ می‌دهد، بیان می‌شود. برای استفاده از ایزوترم فروندلیچ از رابطه‌های ۷ و ۸ استفاده شد (۲۳).

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (8)$$

که در آن q_e مقدار جذب‌شده در واحد جرم جاذب در حالت تعادل C_e (mg/g)، غلظت رنگزای تعادلی محلول K_f (mg/L) و n ثابت‌های فروندلیچ، n نشان دهنده مطلوبیت است. مقادیر K_f و n را می‌توان از نمودار $\log q_e$ در مقابل $\log C_e$ به دست آورد و به ترتیب برابر با فاصله و شیب خط هستند.

۳-۸-۳ مدل ایزوترم تمکین

مدل تمکین، براساس تئوری جذب سطحی است که در آن

برهم‌کنش‌های احتمالی جاذب و رنگزا ارزیابی می‌شود. با توجه به رابطه ۹، گرمای جذب تمام مولکول‌های رنگزا در لایه جذب، به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (9)$$

که در این رابطه، $B = RT \ln b$ مربوط به انرژی جذب است. R ، T و K_T به ترتیب دمای مطلق (K)، ثابت جهانی گازها ($J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) و ثابت تعادل پیوند ($L \text{ mg}^{-1}$) هستند.

۳-۸-۴ مدل دوبینین-رادوشکویچ

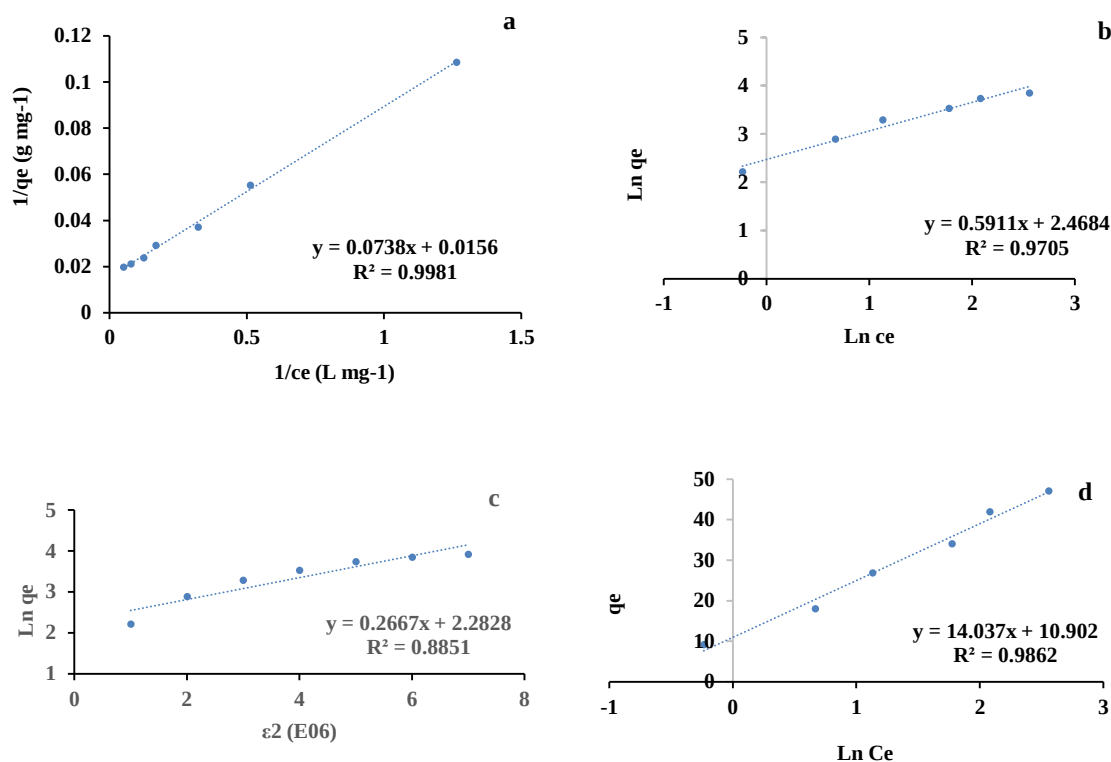
مدل دوبینین-رادوشکویچ، یک مدل ایزوترم جذب تجربی است که به طور کلی برای توصیف سازوکار جذب در سطوح ناهمگن به‌کار می‌رود. این ایزوترم فقط برای محدوده متوسطی از غلظت‌ها قابل استفاده است. ایزوترم دوبینین-رادوشکویچ با رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده می‌شود (۲۴).

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2 \quad (10)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (11)$$

که در آن ε و β ثابت‌های مدل هستند، R و T به ترتیب ثابت گاز ($J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) و دمای مطلق هستند.

ایزوترم جذب از داده‌ها، مورد تحلیل قرار گرفت. داده‌های تعادل جذب برازش خطی از رابطه لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوبینین-رادوشکویچ انجام شد (شکل ۹). جدول ۳ نشان می‌دهد که داده‌های جذب رنگزای MG با استفاده از علف شور، بهترین تطابق را با ایزوترم لانگمویر نشان می‌دهند. تحلیل داده‌های ایزوترم، نشان می‌دهد جذب رنگزای MG روی علف شور بیشتر با مدل لانگمویر هم‌خوانی دارد، که بیانگر تک‌لایه بودن فرایند جذب و یکنواختی مکان‌های فعال سطح جاذب است. کاهش درصد حذف‌رنگ با افزایش غلظت اولیه، علی‌رغم افزایش مقدار جذب، نشان‌دهنده رقابت بین مولکول‌های رنگزا برای دسترسی به مکان‌های فعال محدود سطح جاذب می‌باشد. این رفتار، مشابه یافته‌های پیشین در جذب رنگزاهای آلی توسط جاذب‌های زیستی است (۲۵) و تأکید می‌کند که سازوکار غالب جذب، ترکیبی از برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی است. داده‌های ایزوترم فروندلیچ، تمکین و دوبینین-رادوشکویچ نیز اطلاعات تکمیلی در مورد ناهمگنی سطح و انرژی‌های جذب ارائه می‌دهند، اما ضریب همبستگی پایین‌تر این مدل‌ها نسبت به لانگمویر، نشان‌دهنده اولویت مدل لانگمویر در توصیف دقیق‌تر فرایند جذب، در شرایط مورد مطالعه است. این تحلیل می‌تواند راهنمایی برای بهینه‌سازی غلظت جاذب و طراحی فرایندهای مقیاس بزرگ فراهم کند.



شکل ۹: ایزوترم‌های مختلف برای جذب مالاشریت گرین روی علف شور (a) لانگمویر، (b) فرنرندلیچ، (c) دوبینین و (d) تمکین.

Figure 9: Different isotherms for malachite green adsorption on Salsola a) Langmuir, b) Freundlich, c) Dubinin, and d) Temkin.

جدول ۳: عوامل ایزوترم‌های مختلف برای جذب مالاشریت گرین روی علف شور.

Table 3: Parameters of different isotherms for malachite green adsorption on Salsola.

Isotherms model	Equation	Parameters	Value
Langmuir	$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{K_L q_{\max} C_e} \right) + \frac{1}{q_{\max}}$	K_L	0.2103
		R^2	0.9981
		$q_{\max}$	64.1025
Freundlich	$\ln q_e = \ln K_F + \left(\frac{1}{n} \right) \ln C_e$	K_F	11.803
		$1/n$	0.5911
		R^2	0.9705
Temkin	$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e$	B	14.037
		K_t	2.1742
		R^2	0.9862
Dubinin	$\ln q_e = \ln q_{\max} - \beta \varepsilon^2$	β	0.2667
		$q_{\max}$	9.804
		R^2	0.8851

۹-۳- مطالعات ترمودینامیکی

و ΔG به ترتیب تغییرات آنتالپی (کیلوژول بر مول)، آنتروپی (ژول بر مول بر کلوین) و انرژی آزاد گیبس (کیلوژول بر مول) هستند. مقادیر ΔH و ΔS از شیب $(\Delta H/R)$ و عرض از مبدا $(\Delta S/R)$ نمودارهای $\ln(q_e m/C_e)$ در مقابل $1/T$ تعیین شدند. مقادیر ΔG با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه شدند. مقادیر متغیرهای ترمودینامیکی در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر منفی ΔG نشان داد که فرایند جذب امکان پذیر و خودبخودی بوده است. مقدار ΔS کاهش تصادفی بودن در سطح مشترک جاذب- محلول را در طول جذب توصیف می کند. (۱۶، ۱۷).

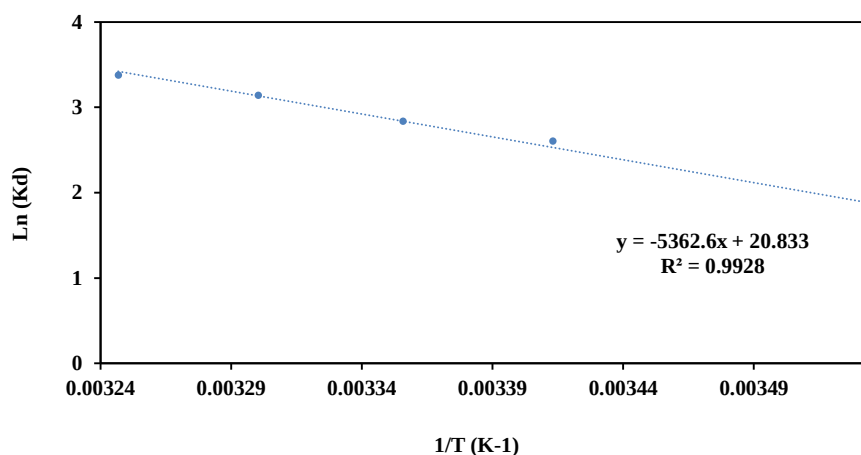
همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، منفی بودن انرژی آزاد گیبس (ΔG°)، نیز دلیلی بر خودبه خود بودن این فرایند است. مقادیر مثبت به دست آمده برای متغیر ΔS ، بی نظم بودن جذب را در طول فرایند جذب نشان می دهد. این موضوع ممکن است به دلیل افزایش تورم جاذب با افزایش دما باشد، که به نفع جذب است. تحلیل نتایج ترمودینامیکی، نشان می دهد که فرایند جذب رنگزای MG روی علف شور از نظر انرژی خودبه خودی است، زیرا مقادیر ΔG در تمام دماها منفی بوده اند. افزایش ظرفیت جذب با افزایش دما و مقادیر مثبت ΔS ، حاکی از افزایش بی نظمی در سطح مشترک جاذب- محلول است که احتمالاً ناشی از تورم ساختار جاذب و دسترسی بهتر مکان های فعال است. مقدار مثبت ΔH نشان می دهد که جذب گرماگیر است و برهم کنش های فیزیکی و شیمیایی بین مولکول های رنگزا و سطح جاذب نقش دارند. این الگو مشابه تحقیقات دیگری است (۲۶)، که افزایش دما باعث افزایش بازده جذب و خودبه خودی بودن فرایند می شود. تحلیل این عوامل می تواند راهنمایی برای طراحی بهینه فرایندهای صنعتی با کنترل دما و مقدار جاذب را فراهم کند.

متغیرهای ترمودینامیکی که بر اساس وابستگی دمایی فرایند جذب، به دست می آیند، اطلاعات عمیقی در مورد تغییرات انرژی مربوط به جذب فراهم می کنند. انرژی آزاد گیبس استاندارد (ΔG°) معیار خود به خودی بودن یک واکنش شیمیایی را نشان می دهد. به منظور محاسبه مقادیر ترمودینامیکی جذب سطحی، تأثیر دما بر جذب MG روی جاذب مورد مطالعه در دماهای ۲۸۳، ۲۹۳، ۳۰۳ و ۳۰۸ کلوین بررسی شد. در این بخش، تنها دمای محلول تغییر داده شد و سایر عوامل مؤثر شامل غلظت اولیه رنگزا، مقدار جاذب و pH در شرایط بهینه ثابت نگه داشته شدند تا اثر مستقل دما بر پارامترهای ترمودینامیکی بررسی شود. مقادیر ظرفیت جذب q_e در هر دما تعیین شد. ثابت توزیع K_d با استفاده از نسبت مقدار رنگزای جذب شده توسط جاذب در حالت تعادل (q_e) به غلظت رنگزای باقی مانده در محلول (C_e) محاسبه شد ($K_d = q_e/C_e$). این مقادیر برای محاسبه متغیرهای ترمودینامیکی ΔG ، ΔH و ΔS مورد استفاده قرار گرفت و در نمودار ترمودینامیک (شکل ۱۰) نشان داده شده اند که ظرفیت جذب از $25/01 \text{ mg g}^{-1}$ به $28/045$ تغییر کرد، زیرا دما از ۲۸۳ به ۳۰۸ کلوین افزایش یافت. متغیرهای ترمودینامیکی، مانند تغییر در آنتالپی (ΔH)، آنتروپی (ΔS) و انرژی آزاد گیبس (ΔG) با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ تعیین شدند.

$$\ln\left(\frac{q_e m}{C_e}\right) = \left(\frac{\Delta S^\circ}{R}\right) - \left(\frac{\Delta H^\circ}{RT}\right) \quad (12)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (13)$$

که در آن m مقدار جاذب (mg)، C_e غلظت تعادلی (mg/l) رنگزا در محلول و q_e غلظت فاز جامد (mg/l) در حالت تعادل است. R ثابت گاز (۸/۳۱۴ ژول بر مول بر کلوین) و T دما (کلوین) است. ΔH ، ΔS



شکل ۱۰: نمودار ترمودینامیک برای جذب مالاشیت گرین روی علف شور.

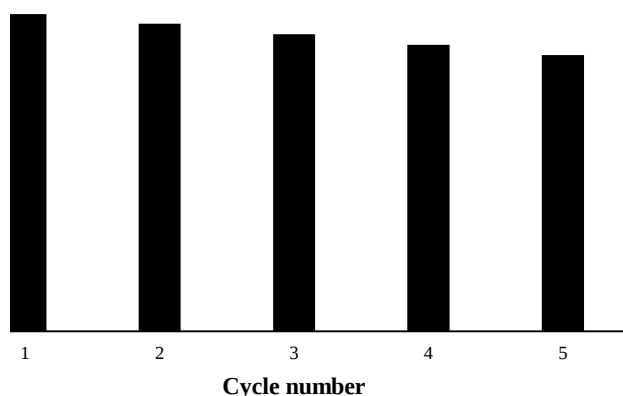
Figure 10: Thermodynamic diagram for malachite green adsorption on Salsula.

جدول ۴: متغیرهای ترمودینامیکی جذب سطحی.

Table 4: Adsorption thermodynamic parameters.

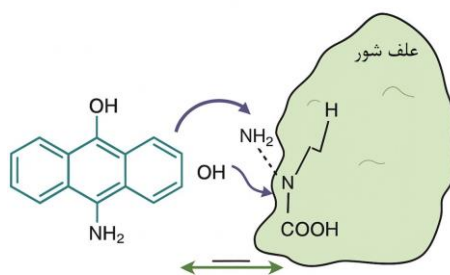
t (k)	(mg/l) c_e	q_e (mg/g)	K_d (l/g)	Δs (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	Δg° (kJ/mol)
283	3/99	25/01	6/26817	20.833	-4318/64
293	1/99	27/01	13/57286	20.833	-6353/27
298	1/6	27/4	17/125	20.833	-7037/64
303	1/2	27/8	23/16667	20.833	-7916/94
308	0/955	28/045	29/36649	20.833	-8654/83

۱۰-۳. قابلیت استفاده مجدد علف‌شور در حذف مالاشریت‌گرین



شکل ۱۱: قابلیت استفاده مجدد ساسولا در حذف مالاشریت‌گرین.

Figure 11: Sasola reusability in removing malachite green.



شکل ۱۲: نمایی از سازوکار جذب مالاشریت‌گرین توسط جاذب علف‌شور.

Figure 12: Schematic of the mechanism of malachite green adsorption on salsola.

قابلیت استفاده مجدد جاذب، یکی از شاخص‌های اقتصادی و عملیاتی مهم، برای ارزیابی کارایی طولانی‌مدت جاذب‌ها است. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده، پس از پنج چرخه استفاده، جاذب علف‌شور همچنان بازده مناسبی دارد و درصد حذف رنگزای MG به حدود ۸۰ درصد کاهش یافته است. پس از هر چرخه جذب، جاذب با آب مقطر چندین بار شسته شد، تا رنگ جذب‌شده از سطح آن به طور کامل حذف شود و سپس در دمای اتاق خشک گردید، تا برای چرخه بعدی آماده شود. این کاهش جزئی در بازده، می‌تواند ناشی از مسدود شدن برخی از مکان‌های فعال روی سطح جاذب یا تغییرات جزئی در ساختار فیزیکی آن باشد. نتایج نشان می‌دهد که علف‌شور به عنوان یک جاذب زیستی، علاوه بر کارایی بالا در جذب اولیه، قابلیت استفاده مجدد چندین بار با حفظ بازده مناسب را دارا است. این ویژگی، ارزش اقتصادی و عملیاتی جاذب را افزایش داده و آن را به گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای حذف رنگ‌های آلی از محلول‌های آبی تبدیل می‌کند.

براساس طیف FTIR، سطح علف‌شور دارای گروه‌های فعال متعدد شامل هیدروکسیل (OH-)، آمین (NH₂-)، کربونیل (C=O-) و کربوکسیل (COOH-) است. این گروه‌های عاملی می‌توانند با مولکول مالاشریت‌گرین از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، پیوند هیدروژنی و نیروهای واندروالسی تعامل کنند و نقش کلیدی در جذب رنگزا ایفا نمایند. بنابراین، جذب MG روی علف‌شور ترکیبی از جذب فیزیکی و شیمیایی است و به صورت نمایی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

رنگ بر روی علف شور، نشان داد که مدل سینتیک شبه مرتبه دوم بهترین برازش را با داده‌های تجربی دارد، که این امر حاکی از یک فرآیند جذب غالباً شیمیایی و به‌صورت تک‌لایه است. علاوه بر این، تحلیل داده‌های تعادل جذب رنگزا به‌طور مؤثر با مدل ایزوترم لانگمویر برازش شد، که نشان‌دهنده ظرفیت جذب بالا و یکنواخت علف شور بر روی سطح است. ظرفیت جذب این جاذب طبیعی برابر با $64/1025 \text{ mg g}^{-1}$ به‌دست آمد که با توجه به عدم نیاز به فرایند پیش پردازشی جاذب و استفاده از جاذب به صورت طبیعی، رقم قابل توجهی است. مطالعه ترمودینامیکی نیز نتایج مثبتی به همراه داشت، به‌طوری‌که فرآیند جذب نشان‌دهنده رفتار گرماگیر و خودبه‌خودی بود. این ویژگی‌ها نشان می‌دهند که فرایند جذب از نظر انرژی کارآمد بوده و در دماهای مختلف بدون نیاز به اعمال انرژی اضافی قابل انجام است. همچنین، از آنجا که جذب رنگزای مالاشیت-گرین توسط علف‌شور از کارایی و پایداری مناسبی برخوردار است، این فرایند با حفظ پایداری زیست‌محیطی و بدون ایجاد اثرات مضر در محیط‌زیست به‌خوبی سازگار است. در نهایت، این تحقیق نشان داد که علف شور نه تنها به‌عنوان یک جاذب زیستی موفق در حذف رنگزاهای کاتیونی از پساب‌های صنعتی می‌تواند باشد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی در فرایندهای تصفیه آب و مدیریت آلودگی‌های رنگی مطرح شده و موجب کاهش هزینه‌های تصفیه آب شود. همچنین به حفظ منابع آبی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی‌های رنگی در اکوسیستم‌های آبی کمک می‌کند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با داده‌های گزارش شده در تحقیقات پیشین، که در جدول ۵ ارائه شده است، مشخص می‌شود که جاذب علف‌شور کارایی بالاتری نسبت به برخی جاذب‌های زیستی و صنعتی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر ظرفیت جذب رنگزای MG توسط علف‌شور در این تحقیق برابر با 1025 mg g^{-1} بوده، در حالی که مقادیر مشابه برای سیب‌زمینی، خاک اره و موز به ترتیب $33/3$ ، $4/3$ و $26/5 \text{ mg g}^{-1}$ برآورد شده است. این تفاوت نشان می‌دهد که علف‌شور به عنوان جاذبی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای حذف رنگزای MG از محلول‌های آبی قابل استفاده است و پتانسیل بالایی برای بهبود فرایندهای تصفیه آب دارد.

جدول ۵: مقایسه حداکثر ظرفیت جذب، در جاذب‌های مختلف برای حذف مالاشیت‌گرین.

Table 5: Comparison of maximum adsorption capacity of different adsorbents for the removal of malachite green.

Reference	Adsorption capacity (mg/g)	Adsorbent
This Study	64.1025	salsola
29	33.3	potato
28	4.3	sawdust
27	26.5	banana

۴- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر، نشان داد که گیاه علف شور، به‌عنوان یک جاذب زیستی می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای حذف رنگزای کاتیونی مالاشیت‌گرین (MG) از پساب‌ها باشد. بررسی سینتیکی فرایند جذب

۵- مراجع

- Gad HM, El-Sayed AA. Activated carbon from agricultural by-products for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution. *J Hazards Mater.* 2009;168(2-3):1070-1081. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.155>.
- Barka N, Qourzal S, Assabane A, Nounah A, Ait-Ichou Y. Photocatalytic degradation of an azo reactive dye, Reactive Yellow 84, in water using an industrial titanium dioxide coated media. *Arabian J Chem.* 2010;3(4):279-83. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.06.016>.
- Bielska M, Szymanowski J. Removal of methylene blue from waste water using micellar enhanced ultrafiltration. *Water res.* 2006;1;40(5):1027-33. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.12.027>.
- Elahmadi MF, Bensalah N, Gadri A. Treatment of aqueous wastes contaminated with Congo Red dye by electrochemical oxidation and ozonation processes. *J Hazards Mater.* 2009; 15;168(2-3):1163-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.139>.
- Karim AB, Mounir B, Hachkar M, Bakasse M, Yaacoubi A. Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by adsorption onto Moroccan clay. *J Hazards Mater.* 2009;30;168(1):304-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.028>.
- Khatti SD, Singh MK. Removal of malachite green from dye wastewater using neem sawdust by adsorption. *J hazards Mater.* 2009;15;167(1-3):1089-94. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.101>.
- Lodha B, Chaudhari S. Optimization of Fenton-biological treatment scheme for the treatment of aqueous dye solutions. *J Hazard Mater.* 2007;5;148(1-2):459-66. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.061>.
- Tehrani-Bagha AR, Nikkar H, Mahmoodi NM, Markazi M, Menger FM. The sorption of cationic dyes onto kaolin: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Desalin.* 2011;31;266(1-

- 3):274-80. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.036>.
9. Han R, Zhang J, Han P, Wang Y, Zhao Z, Tang M. Study of equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters about methylene blue adsorption onto natural zeolite. *Chem Eng J*. 2009;1;145(3):496-504. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.05.003>.
 10. Rastogi K, Sahu JN, Meikap BC, Biswas MN. Removal of methylene blue from wastewater using fly ash as an adsorbent by hydrocyclone. *J hazards Mater*. 2008; 30;158(2-3):531-540. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.105>.
 11. Kushwaha AK, Gupta N, Chattopadhyaya MC, 2010. Enhanced adsorption of malachite green dye on chemically modified silica gel. *J. Chem. Pharm. Res*. 2 (6), 34-45.
 12. Mahmoodi NM, Salehi R, Arami M, Bahrami H. Dye removal from colored textile wastewater using chitosan in binary systems. *Desalin*. 2011;1;267(1):64-72. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.09.007>.
 13. Ncibi MC, Hamissa AB, Fathallah A, Kortas MH, Baklouti T, Mahjoub B, Seffen M. Biosorptive uptake of methylene blue using Mediterranean green alga *Enteromorpha* spp. *J Hazards Mater*. 2009;30;170(2-3): 1050-1055. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.075>.
 14. Kalantari S, Tazeh M. Investigation of the efficacy of *Alhagi maurorum* plant powder for Janus Green B dye removal from wastewater. *Int J Phytorem*. 2024;1-12. <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2354415>.
 15. tazeh M, Saremi Naeini M A. Investigating the efficiency of desert sands in removal methyl orange dye from wastewater, as one of the factors reducing erosion. *E.E.R*. 2025;15(2):40-56. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-877-fa.html>.
 16. Tazeh M, kalantari S. Adsorption of Methylene Blue from aqueous solutions using biomass of the invasive plant *peganum harmala* for the management of non-conventional water resources in desert regions. *Desert Management*, 2025;e728576. https://www.jdmal.ir/article_728576.html?lang=en.
 17. Soufal FZ, AL-Rajabi MM, Mahmood SS, Laoui T, Zehhaf A. Innovative approaches for decolorization of malachite green-contaminated wastewater using sustainable composites: an overview. *Chem Eng Commun*. 2025;14:1-31. <https://doi.org/10.1080/00986445.2025.2532511>.
 18. Abdelrahman EA, Alhamzani AG, Abou-Krishna MM, Shah RK, Alamri HM. Advanced multiphase nanocomposites for effective malachite green dye removal. *Sci Reports*. 2025;18;15(1):26101. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-12057-9>.
 19. Ardakani FP, Kalantari S, Shirmardi M, Tazeh M. Investigation of *Eucalyptus camaldulensis* and *Tamarix aphylla* species' capacities for methylene blue removal in wastewater and heavy metal remediation in soil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024; 196(8):754. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12903-9>.
 20. Sun R, Wang Q, Shao S, Zhang S, Wang Y. Degradation of malachite green by a novel salt-tolerant *Vibrio natriegens*: Optimal degradation conditions, mechanisms, and safety assessment. *Biochem Eng J*. 2025;11:109775. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2025.109775>.
 21. Cetin M, Ozudogru Y. Removal of malachite green dye by adsorption onto chitosan-montmorillonite nanocomposite: kinetic, thermodynamic and equilibrium studies. *J Chinese Chem Soc*. 2025;72(2):196-210. <https://doi.org/10.1002/jccs.202400331>.
 22. Lv D, Zhang J, Luo Z, Dai Z, Tang B. Removal of malachite green in wastewater and its mechanism by three-dimensional graphene oxide-based aerogels. *J Ind Eng Chem*. 2025; 25;144:380-394. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.09.032>.
 23. Bhatnagar A, Minocha AK, Sillanpää M. Adsorptive removal of cobalt from aqueous solution by utilizing lemon peel as biosorbent. *Biochem Eng J*. 2010 Jan 15;48(2):181-186. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.10.005>.
 24. Kumar PS, Gayathri R. Adsorption of Pb²⁺ ions from aqueous solutions onto bael tree leaf powder: isotherms, kinetics and thermodynamics study. *J. Eng. Sci. Technol*. 2009;4, 381-399.
 25. Cetin M, Ozudogru Y. Removal of malachite green dye by adsorption onto chitosan-montmorillonite nano-composite: kinetic, thermodynamic and equilibrium studies. *J Chinese Chem Soc*. 2025;72(2):196-210. <https://doi.org/10.1002/jccs.202400331>.
 26. Hussain S, Salman M, Al-Ahmary KM, Ahmed M. Synthesis of potential adsorbent for removal of malachite green dye using alginate hydrogel nanocomposites. *Int J Biol Macromol*. 2025;1; 289:138816. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138816>.
 27. Neha Gupta NG, Kushwaha AK, Chattopadhyaya MC. Kinetics and thermodynamics of malachite green adsorption on banana pseudo-stem fibers.
 28. Khattri SD, Singh MK. Removal of malachite green from dye wastewater using neem sawdust by adsorption. *J Hazards Mater*. 2009;15;167(1-3):1089-94. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.101>.
 29. Bello OS, Ahmad MA, Ahmad N. Adsorptive features of banana (*Musa paradisiaca*) stalk-based activated carbon for malachite green dye removal. *Chem Ecology*. 2012;1; 28(2):153-67. <https://doi.org/10.1080/02757540.2011.628318>.

How to cite this article:

Tazeh M, Kalantari S. Evaluation of the Ability of Sasola Plant to Remove Malachite Green Dye from Wastewater. *J Color Sci Tech*. 2025;19(2):163-177. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167597.1265> [In Persian].