Integrated Management of Soil Erosion and Environmental Pollution Using the Native Desert Plant, *Seidlitzia rosmarinus*, for Crystal Violet Dye Removal from Wastewater

Mahdi Tazeh [a,*], **Saeideh Kalantari** [a]
[a] *Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran.*

Research Full Paper
Article History (Received: 2025/12/31 **Accepted:** 2026/04/1)

Extended abstract

Extended Abstract

1. Introduction

Rapid population growth, industrial development, and unsustainable environmental exploitation have imposed increasing pressures on water and soil systems worldwide. Discharge of industrial effluents into surface and groundwater not only threatens aquatic ecosystems but also indirectly impacts soil quality. Organic dyes, such as crystal violet, are particularly concerning due to their chemical stability, toxicity, and resistance to biodegradation. When these pollutants infiltrate soils, they can alter physical and chemical properties, reduce infiltration, disrupt microbial activity, and weaken aggregate stability, increasing soil susceptibility to both water and wind erosion. These effects are especially pronounced in arid and semi-arid regions with sparse vegetation cover.Cleaner production and sustainable resource management strategies aim to minimize environmental contamination through reduced resource consumption, elimination of toxic chemicals from production processes, and decreased effluent generation. In this context, natural, biodegradable, and low-cost biosorbents have gained attention as effective tools for removing organic pollutants from wastewater. Plant-derived materials are particularly promising because they are readily available, environmentally friendly, and do not generate secondary pollution. Furthermore, integrating biosorbent-based wastewater treatment with controlled water reuse can enhance soil moisture, support vegetation growth, and indirectly contribute to soil conservation and erosion control.This study focuses on evaluating *Seidlitzia rosmarinus*, a native desert plant, as a biosorbent for removing crystal violet from aqueous solutions. The research aims to develop an effective, economical, and environmentally compatible treatment approach, which simultaneously improves aquatic ecosystem health, enables controlled water reuse, and indirectly reduces soil vulnerability to erosion.Crystal violet, a synthetic cationic triphenylmethane dye with molecular weight of 407.98 g/mol and chemical formula $C_{25}H_{30}N_3Cl$, is widely used in textile, medical, and laboratory applications. Its structural stability and covalent bonding make it highly resistant to light, heat, and microbial degradation. Conventional wastewater treatment methods—including chemical oxidation, coagulation-flocculation, membrane filtration, photocatalysis, ion exchange, electrochemical processes, and aerobic or anaerobic treatments—often involve high costs, complex operations, or secondary pollutant formation. Adsorption, due to its simplicity, high efficiency, and scalability, remains a practical method for dye removal. However, common adsorbents like activated carbon face limitations related to production cost, regeneration difficulty, and environmental impact. Consequently, research has shifted toward unconventional natural biosorbents, including agricultural residues and desert plants, for their affordability, biodegradability, and capability for safe water reuse.

2. Methodology

Seidlitzia rosmarinus biomass was collected from desert regions in Yazd Province, Iran. Samples were washed, dried, ground, and sieved to produce fine powder. Crystal violet solutions with concentrations ranging from 40 to 90 mg/L were prepared using distilled water. Batch adsorption experiments were conducted to evaluate the influence of pH, biosorbent dosage, contact time, and initial dye concentration. Solution pH was adjusted with 0.1 M HCl or NaOH.The point of zero charge (pHpzc) of the biosorbent was determined using the pH drift method, providing insight into surface charge behavior under different pH conditions. Dye concentrations were measured using UV–Vis spectrophotometry at 558 nm. Adsorption capacity (qe) and removal efficiency (%) were calculated through standard mass balance

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

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

equations. Kinetic studies were performed using pseudo-first-order and pseudo-second-order models, while equilibrium data were fitted to Langmuir, Freundlich, Temkin, and Dubinin–Radushkevich isotherms. Thermodynamic parameters (ΔG°, ΔH°, ΔS°) were estimated at multiple temperatures. Reusability was assessed over five consecutive adsorption–desorption cycles

3. Results

FTIR analysis revealed the presence of hydroxyl, carbonyl, carboxyl, aromatic, and amine groups on the biosorbent surface, suggesting the potential for hydrogen bonding, electrostatic interactions, and π–π interactions with crystal violet molecules. The pHpzc was found to be 7.1, indicating that the biosorbent surface carries a negative charge under neutral to slightly alkaline conditions, favoring adsorption of the cationic dye.Maximum dye removal occurred at pH 7. Contact time experiments showed rapid adsorption, reaching equilibrium within 15 minutes. Increasing biosorbent dosage enhanced removal efficiency until a saturation point was reached. Higher initial dye concentrations led to decreased removal percentages due to competition for limited adsorption sites.Kinetic analysis showed that adsorption followed the pseudo-second-order model more accurately than the pseudo-first-order model, indicating that chemisorption on active sites dominated the process. Equilibrium data fitted best to the Dubinin–Radushkevich isotherm, with a maximum adsorption capacity (qm) of 35.41 mg/g. Thermodynamic analysis indicated spontaneous adsorption (negative ΔG°), endothermic behavior, and reduced system disorder (negative ΔS°). Reusability tests demonstrated acceptable adsorption efficiency over multiple cycles, confirming the practical applicability of *S. rosmarinus* as a sustainable biosorbent.

4. Discussion & Conclusions

The results confirm that *Seidlitzia rosmarinus* is an effective and sustainable biosorbent for crystal violet removal, combining high adsorption capacity, rapid kinetics, and favorable thermodynamics. The pseudo-second-order kinetic model and Dubinin–Radushkevich isotherm suggest that adsorption is governed by chemical interactions on active sites and micro-pore diffusion mechanisms.Beyond its efficiency in dye removal, using *S. rosmarinus* supports controlled reuse of treated wastewater, which can enhance soil moisture content, promote vegetation establishment, and stabilize soil aggregates. These indirect effects are particularly valuable for mitigating soil erosion in arid and semi-arid regions. By improving water availability and maintaining vegetation cover, this approach contributes to sustainable soil management and erosion control.Utilizing native, plant-based biosorbents aligns with cleaner production and integrated environmental management strategies. It reduces reliance on costly synthetic adsorbents, minimizes secondary pollution, and facilitates eco-friendly wastewater treatment practices. Moreover, this approach provides a dual benefit: protecting aquatic ecosystems by removing persistent dyes and supporting terrestrial ecosystems by indirectly improving soil structure and resilience to erosion.In conclusion, *Seidlitzia rosmarinus* represents a low-cost, environmentally compatible, and technically feasible biosorbent for industrial dye removal. Its application supports sustainable wastewater treatment, enables controlled water reuse, and contributes indirectly to soil conservation and erosion mitigation. These findings highlight the potential of combining biosorption technology with ecosystem-based management strategies to address water and soil challenges in arid and semi-arid landscapes. Future research should explore field-scale applications and integration with land management practices to maximize environmental benefits.

Key Words: Water reuse; Wastewater treatment; Biosorption; Soil conservation; Soil erosion; desert plants; Sustainable land management.

Cite this article: Tazeh, M., & Kalantari, S. (2026). Integrated Management of Soil Erosion and Environmental Pollution Using the Native Desert Plant, Seidlitzia rosmarinus, for Crystal Violet Dye Removal from Wastewater. Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 16 (1) :160-179. http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.160

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.160
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

مدیریت همزمان فرسایش خاک و آلودگی محیطی با بهره‌گیری از گیاه بومی اشنان در حذف رنگ کریستال ویوله از پساب

مهدی تازه*: *دانشیار گروه طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، یزد، ایران*
سعیده کلانتری: *دانشیار گروه طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، یزد، ایران*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲)
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.160

چکیده

افزایش جمعیت، توسعه فعالیت‌های صنعتی و تغییرات شتابان محیطی در دهه‌های اخیر، منجر به افزایش تولید پساب‌های آلاینده و تشدید فشار بر منابع آب و خاک شده است که این روند به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با تخریب خاک و تشدید فرسایش همراه است. پساب‌های حاوی رنگ‌های آلی پایدار، علاوه بر آلودگی منابع آب، در صورت نفوذ یا استفاده ناصحیح، می‌توانند کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک را کاهش داده، نفوذپذیری و پایداری خاکدانه‌ها را مختل کرده و فرآیندهای فرسایشی را تشدید کنند. در این چارچوب، تصفیه پساب و امکان بازچرخانی ایمن آن، به‌عنوان راهبردی مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب و حفاظت خاک مطرح است. هدف این پژوهش، بررسی قابلیت گیاه بومی و بیابانی اشنان به‌عنوان یک جاذب زیستی طبیعی و سازگار با محیط‌زیست در حذف رنگ کریستال ویوله از محلول‌های آبی و تبیین نقش بالقوه این رویکرد در حمایت از برنامه‌های مدیریت فرسایش خاک است. آزمایش‌های جذب به‌صورت ناپیوسته انجام شد و اثر پارامترهای pH، غلظت اولیه رنگ، زمان تماس و مقدار جاذب بررسی گردید و داده‌ها با استفاده از مدل‌های سینتیکی شبه‌مرتبه اول و شبه‌مرتبه دوم و ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیش، تمکین و دوبینین–رادوشکویچ تحلیل شدند. نتایج نشان داد، بیشترین راندمان حذف رنگ در pH برابر ۷ حاصل شد و فرآیند جذب با مدل سینتیکی شبه‌مرتبه دوم تطابق بیشتری دارد؛ همچنین ایزوترم دوبینین–رادوشکویچ بهترین انطباق را با داده‌های تجربی نشان داد، به‌طوری که ظرفیت جذب ۳۵/۴۱ میلی‌گرم بر گرم و حداکثر راندمان حذف ۹۶/۲۵ درصد به‌دست آمد. بر اساس نتایج، استفاده از گیاه بومی اشنان در تصفیه پساب، علاوه بر کاهش آلودگی‌های محیطی، می‌تواند زمینه بازچرخانی کنترل‌شده آب را برای تقویت پوشش گیاهی فراهم سازد که از طریق افزایش رطوبت خاک، بهبود پایداری ساختاری خاک و کاهش رواناب، به‌طور غیرمستقیم در کنترل و مدیریت فرسایش خاک مؤثر است. این رویکرد تلفیقی، ظرفیت بالایی برای به‌کارگیری در برنامه‌های حفاظت خاک و مدیریت پایدار اکوسیستم‌های مستعد فرسایش دارد.

واژگان کلیدی: بازچرخانی آب؛ تصفیه پساب؛ جذب زیستی؛ حفاظت خاک؛ فرسایش خاک؛ گیاه بیابانی؛ مدیریت پایدار سرزمین.

* نویسندهٔ مسئول:

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

۱ـ مقدمه

رشـد جمعیت و توسـعه فعالیت‌های صـنعتی فشـار قابل توجهی بر محیط‌های آبی وارد کرده است و ورود آلاینده‌های صـنعتی به منابع آب، علاوه بر تهدید اکوسـیسـتم‌های آبی، می‌تواند کیفیت خاک را کاهش دهد. پسـاب‌های حاوی رنگ‌های آلی در صـورت نفوذ یا اسـتفاده ناصحیح، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر داده، نفوذپذیری و پـایداری سـاختاری آن را کاهش می‌دهند و فعالیت میکروارگانیسـم‌های مفید خاک را مختل می‌کنند. این تغییرات موجب تضـعیف ساختار خاک و افزایش حساسیت آن نسبت به فرسایش آبی و بادی می‌شود، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشـک با پوشش گیاهی محدود. از این منظر، تصفیه مؤثر پساب و بازچرخانی کنترل‌شده آب، علاوه بر کاهش آلاینده‌ها، امکان توسعه پوشش گیاهی، افزایش رطوبت خاک و کاهش رواناب را فراهم می‌کند و به‌طور غیرمستقیم در کنترل و مدیریت فرسایش خاک مؤثر است(Piri Ardakani et al., 2024). تولید پاک با کاهش مصرف منابع، حذف مواد سمی از فرایندهای تولیدی و کاهش آلاینده‌ها، راهکاری عملی برای جلوگیری از آلودگی‌های ثانویه ارائه می‌دهد. بر همین اسـاس، پژوهش‌ها در راستای استفاده از جاذب‌های زیستی، طبیعی و کم‌هزینه برای حذف آلاینده‌های آلی از پسـاب‌های صـنعتی در حال گسـترش است. در میان این جاذب‌ها، مواد گیاهی با منشأ طبیعی که زیست‌تخریب‌پذیر، ارزان و در دسـترس هسـتند، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. اسـتفاده از این مواد نه‌تنها به کاهش آلاینده‌های شـیمیایی در محیط‌زیسـت کمک می‌کند، بلکه با فراهم‌سازی امکان تصفیه و بازچرخانی کنترل‌شده پساب، می‌تواند به بهبود شرایط رطوبتی خاک و توسـعه پوشـش گیاهی منجر شود؛ عواملی که نقش مهمی در حفظ پایداری خاک و کاهش حساسیت آن نسبت به فرسایش آبی و بادی دارند. از این منظر، به‌کارگیری جاذب‌های زیستی در چارچوب تولید پاک، علاوه بر مدیریت‌آلودگی، در حمایت از برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل فرسایش نیز قابل توجه است(Essekri et al., 2023). پژوهش حاضـر به بررسی ظرفیت جذب گیاه بومی اشنان به‌عنوان یک جاذب زیستی برای حذف رنگ کریستال ویوله از پسـاب‌ها می‌پردازد. هدف، ارائه روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای تصفیه پساب است؛ روشی که علاوه بر ارتقای سـلامت زیست‌بوم‌های آبی، با فراهم‌سازی امکان تصفیه و بازچرخانی کنترل‌شده آب، بتواند در تقویت پوشـش گیاهی، بهبود شـرایط رطوبتی خاک و در نتیجه کاهش حسـاسیت خاک نسبت به فرسایش آبی و بادی نقش مؤثری ایفا کند.

کریسـتال ویوله، یک رنگ آلی سـنتتیک از گروه تری‌فنیل متان است که وزن مولکولی آن حدود ۴۰۷/۹۸ gr/mol اسـت. این رنگ دارای سـاختار مولکولی پایدار با فرمول $C_{25}H_{30}N_3Cl$ اسـت و به دلیل پیوندهای کووالانسـی قوی، مقاومت بالایی در برابر نور، حرارت و تجزیه زیسـتی دارد. کریستال ویوله به صورت نمک کلرید، محلول آبی بنفش-نیلی رنگ، استفاده می‌شود و به دلیل خاصیت سمیت، قابلیت جذب بالا و مقاومت در برابر شکست، کاربرد گسترده‌ای در صنایع پزشکی، نساجی و آزمایشگاهی دارد. این ویژگی‌ها حذف آن را از پساب‌های صنعتی چالش‌برانگیز می‌سازد و در صورت رهاسازی، تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، روش‌های گوناگون فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای حذف رنگ‌ها و سایر آلاینده‌ها از پساب توسعه یافته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به جذب سـطحی، اکسـیداسـیون شیمیایی، انعقاد و لخته‌سازی، جداسازی غشایی، تجزیه فوتوکاتالیزوری، تبادل یونی، فرآیندهای الکتروشـیمیایی، ازون‌زنی، تصفیه‌های هوازی و بی‌هوازی، و نیز نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس اشاره

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

کرد. هر یک از این روش‌ها بسته به نوع آلاینده، شرایط عملیاتی، هزینه‌های اجرایی و پیامدهای زیست‌محیطی، عملکرد متفاوتی دارند. در این میان، فرآیند جذب سطحی، به‌دلیل سادگی در اجرا، هزینه پایین، راندمان بالا، قابلیت بازیافت، سهولت در مقیاس‌پذیری و عدم تولید ترکیبات سمی، از جایگاه ویژه‌ای در تصفیه پساب برخوردار است (Huang et al., 2020). کارایی این فرایند تحت تأثیر عواملی مانند نوع و سطح تماس جاذب و جذب‌شونده، اندازه ذرات جاذب، سطح ویژه، مقدار جاذب، غلظت آلاینده، زمان تماس، دمای محیط و pH محلول قرار دارد. در میان انواع جاذب‌ها، کربن فعال به‌دلیل سطح مؤثر بالا، فعالیت سطحی قوی و بازدهی مناسب، یکی از پرکاربردترین مواد در صنعت به‌شمار می‌رود. با این حال، هزینه بالای تولید، دشواری در احیا و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف مکرر آن، استفاده گسترده از این ماده را محدود کرده‌است (Massoudinejad et al., 2019). در نتیجه، پژوهشگران در سال‌های اخیر به سمت استفاده از جاذب‌های غیرمتعارف با منشأ طبیعی یا پسماندهای کشاورزی گرایش پیدا کرده‌اند. استفاده از این جاذب‌ها علاوه بر کاهش آلودگی‌های شیمیایی، امکان تصفیه و بازچرخانی ایمن پساب را فراهم می‌کند که می‌تواند در مدیریت پایدار منابع آب و خاک مؤثر باشد. در این زمینه، انواع مختلفی از مواد طبیعی مانند رس، پوسته برنج، هسته خرما برای جذب رنگ کریستال ویوله از پساب مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Homagai et al., 2022). با وجود تنوع زیاد در استفاده از جاذب‌های طبیعی، هنوز بررسی‌های دقیق و گسترده‌ای درباره کاربرد گیاه اشنان برای حذف رنگ کریستال ویوله از پساب انجام نشده است. این پژوهش در راستای پر کردن این خلأ علمی و معرفی یک جاذب نوین، کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست طراحی شده است.

اشنان در مناطق بیابانی و نیمه‌خشک پراکندگی دارد و گیاه چندساله و بوته‌ای، دارای برگ‌های باریک و سوزنی‌شکل است که به سازگاری آن با شرایط خشکی و شوری محیط کمک می‌کند. سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده این گونه، امکان جذب آب از لایه‌های عمیق خاک را فراهم کرده و آن را در تحمل تنش‌های آبی و شور بسیار مقاوم می‌سازد. این گیاه به دلیل سازگاری‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی خود، نمونه‌ای بارز از فلور بیابانی است که با شرایط سخت زیست‌محیطی سازگار شده است (Shurigin et al., 2020).

در این مطالعه، توانایی گیاه بومی اشنان *(Seidlitzia rosmarinus)* برای حذف رنگ کریستال ویوله از محلول‌های آبی مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌کارگیری مستقیم جاذب زیستی اشنان، بدون نیاز به فرآیندهای اصلاح یا فعال‌سازی پیچیده، ضمن کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی، رویکردی پایدار و کم‌ضرر برای حذف مؤثر آلاینده‌های رنگی از پساب‌ها محسوب می‌شود. این رویکرد با فراهم‌سازی امکان تصفیه و بازچرخانی کنترل‌شده پساب، می‌تواند در چارچوب مدیریت پایدار منابع آب و خاک و حمایت از برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل فرسایش، به‌ویژه در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک، مورد توجه قرار گیرد. در این راستا، تأثیر عوامل مختلفی شامل pH محلول، غلظت اولیه رنگ، مقدار جاذب و زمان تماس تحت شرایط آزمایشگاهی گوناگون بررسی شد تا شرایط بهینه فرآیند جذب تعیین شود.

۲ـ مواد و روش‌ها

۲-۱ آماده‌سازی جاذب

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

گیاه اشنان از مناطق بیابانی استان یزد، جمع‌آوری شد. به‌منظور حذف ذرات خاک و آلودگی‌های سطحی، شستشو انجام گرفت و سپس، دو بار با آب مقطر شسته شد. پس از خشک کردن، نمونه به‌طور کامل خرد شده و با استفاده از آسیاب به پودر ریز تبدیل گردید. مشخصات فیزیکوشیمیایی پودر گیاه اشنان، از جمله اسیدیته و گروه‌های عاملی فعال سطحی، به‌منظور شناسایی ساختار و ویژگی‌های مؤثر بر فرآیند جذب مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۲ آماده‌سازی محلول رنگ

رنگ کریستال ویوله از شرکت مرک هند تهیه شد. برای تهیه محلول‌های استاندارد، مقادیر مشخصی از پودر رنگ در آب مقطر حل شد. به‌عنوان نمونه، برای محلول ۱۰۰ppm، ۵۰ mg پودر رنگ در ۵۰۰ml آب مقطر حل گردید و به مدت ۲۰ دقیقه توسط شیکر هم‌زده شد. محلول‌هایی با غلظت‌های ۴۰ تا ۹۰ ppm نیز به همین روش تهیه شدند.

۲-۳ نقطه بار صفر جاذب (pH_{PZC})

برای تعیین نقطه‌ای که بار سطحی جاذب برابر صفر می‌شود، محلولی با غلظت ۰/۱M از سدیم کلرید با استفاده از آب مقطر تهیه گردید. سپس نمونه‌هایی به حجم ۱۰۰ml از این محلول جدا شدند و pH اولیه آنها در محدوده‌های متنوع بین ۱ تا ۱۱، با کمک محلول‌های اسید هیدروکلریک و سدیم هیدروکسید تنظیم شد. پس از افزودن ۰/۱gr جاذب (پودر اشنان) به هر نمونه، در شرایط دمای اتاق و با استفاده از شیکر، هم زده شدند، تا تعادل pH برقرار شود. سپس، میزان pH نهایی هر نمونه ثبت گردید. با ترسیم نموداری که اختلاف pH نهایی و اولیه را نسبت به pH اولیه نمایش می‌دهد، نقطه‌ای که اختلاف این دو مقدار صفر شود، به عنوان pH_{PZC} در نظر گرفته شد. این نقطه نشان‌دهنده شرایطی است که جاذب فاقد بار سطحی بوده و از اهمیت زیادی در تعیین شرایط بهینه جذب برخوردار است (Hong et al., 2009).

۲-۴ روش جذب

آزمایش‌ها به‌صورت دسته‌ای و در دمای محیط انجام شد. pH با محلول‌های۰/۱M از HCl و NaOH تنظیم گردید. نمونه‌ها پس از زمان تماس معین (۳۰ دقیقه)، صاف شده و جذب رنگ با اسپکتروفتومتر UV-Vis در طول‌موج ۵۵۸nm اندازه‌گیری شد که ابتدا تأثیر pH محلول بر جذب کریستال ویوله بررسی گردید، تا مقدار بهینه pH تعیین شود. سپس، با ثابت نگه داشتن pH بهینه، اثر زمان تماس بر راندمان جذب در بازه‌های زمانی مختلف ارزیابی شد. پس از تثبیت این دو پارامتر، تأثیر غلظت اولیه رنگ در شرایط بهینه pH و زمان تماس مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، اثر دوز جاذب گیاه اشنان بر حذف رنگ بررسی شد، در حالی که سایر پارامترها ثابت و بهینه شده بودند. این رویکرد مرحله‌ای، امکان تعیین دقیق شرایط بهینه جذب را فراهم نمود.

درصد حذف رنگ طبق معادله ۱ محاسبه گردید (Kalantari et al., 2024):

$$(\%)Sorption = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \quad (۱)$$

که در آن، C_0 نشان‌دهنده غلظت اولیه رنگ (mg/g) و C_e مقدار رنگ باقی‌مانده در زمان مشخص t است.

ظرفیت جذب رنگ توسط جاذب در زمان رسیدن به تعادل (q_e) طبق معادله ۲ محاسبه شد (Zandipak et al., 2025):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (۲)$$

در این رابطه، c_e غلظت رنگ در مرحله تعادل (mg/l)، V حجم کل محلول (l) و m وزن خشک جاذب (g) است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

۲-۵ مطالعه ایزوترم های جذب

ایزوترم جذب لانگمویر فرایند جذب تک‌لایه‌ای را بر سطح خارجی جاذب توصیف می‌کند، به‌طوری که پس از اشباع این لایه، جذب بیشتری رخ نمی‌دهد. این مدل فرض می‌کند انرژی جذب در سطح یکنواخت است و هیچ انتقالی از ماده جذب‌شده در سطح رخ نمی‌دهد.معادله اصلی این مدل به صورت رابطه ۳ است (Loganathan et al., 2022):

$$q_e = \frac{q_m K_l C_e}{1+K_l C_e} \quad (۳)$$

که C_e: غلظت ماده جذب‌شونده در محلول در حالت تعادل (mg/l)، q_e: مقدار ماده حل شونده جذب شده بر واحد جرم جاذب در حالت تعادل (mg/l)، K_l : ثابت ایزوترم L/g هستند. q_m و K_l از برازش داده‌های آزمایشگاهی با ایزوترم لانگمویر به‌دست می‌آیند.

ایزوترم فروندلیش به طور گسترده‌ای برای توصیف جذب روی سطوح ناهمگن به کار می‌رود. معادله غیرخطی این مدل به صورت زیر بیان می‌شود (Sultana et al., 2022):

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (۴)$$

در این معادله، K_f ثابت ایزوترم فروندلیش (li/mg)، n نمایانگر شدت جذب، C_e غلظت رنگ در حالت تعادل (mg/l) و qe میزان جذب رنگ به ازای هر گرم جاذب در تعادل (mg/g) هستند.برای تسهیل تحلیل داده‌ها، معادله بالا به شکل خطی معادله ۵ تبدیل شد (Fekri et al., 2023):

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (۵)$$

ثابت K_f بیانگر ظرفیت تقریبی جذب است و پارامتر 1/n به شدت فرایند جذب اشاره دارد. در صورتی که n=1، میزان جذب مستقل از غلظت محلول خواهد بود و توازن بین دو فاز بدون تغییر باقی می‌ماند.

در ایزوترم جذب تمکین، سطح جاذب به عنوان یک سطح ناهمگن با مکان‌های جذب دارای انرژی پیوندی مشابه، در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، به دلیل تأثیرات متقابل بین جاذب و ماده جذب‌شونده، گرمای جذب در لایه‌های مختلف به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.

معادله (۶) فرم خطی ایزوترم تمکین را نشان می‌دهد (Yap et al., 2019):

$$q_e = B \ln K_T + B\ ln\ C_e \quad (۶)$$

که در آن q_e میزان جذب در تعادل، C_e غلظت ماده جذب‌شونده در تعادل، و B و K_T ثابت‌های مربوط به ایزوترم هستند.

ایزوترم دوبینین مدلی تجربی است که، برای توصیف فرآیند جذب سطحی در جاذب‌های میکرو متخلخل توسعه یافته است. این مدل بر پایه نظریه پتانسیل جذب و پر شدن حجم منافذ استوار است و معمولاً برای پیش‌بینی ظرفیت جذب در شرایط مختلف و ارزیابی عملکرد جاذب‌های طبیعی و صنعتی کاربرد دارد و طبق معادله ۷ نشان داده می‌شود :

$$lnq_e = \ln q_m + \beta C_2 \quad (۷)$$

برای تعیین بهترین مدل برازش، ضریب تعیین (R^2) مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر داده‌های تجربی با مدل ایزوترم است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

۲-۶ مطالعات سینتیکی جذب

برای تحلیل رفتار سینتیکی جذب، مدل‌های سینتیکی شبه‌مرتبه اول و شبه‌مرتبه دوم مورد بررسی قرار گرفتند تا درک بهتری از مکانیسم جذب حاصل شود. مدل سینتیکی شبه‌مرتبه اول لاگرگرن را می‌توان با استفاده از معادله ۸ بیان کرد (Sarabadan et al., 2019):

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (۸)$$

در این رابطه، q_e و q_t (mg/g) به‌ترتیب بیانگر میزان ماده جذب‌شده در حالت تعادل و در زمان t هستند؛ k_1 نیز ثابت سرعت تعادلی در مدل شبه‌مرتبه اول (li/m) است. با ترسیم نمودار خطی $\log (q_e - q_t)$ در برابر زمان(t) ، مقدار k_1 به‌دست می‌آید.

برای توصیف رفتار سینتیکی فرآیند جذب، می‌توان از مدل شبه‌مرتبه دوم استفاده کرد. شکل انتگرالی و خطی‌شده این معادله به صورت معادله ۹ ارائه می‌شود:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (۹)$$

با ترسیم نمودار qt/t در برابر زمان(t) ، می‌توان مقادیر ظرفیت جذب در حالت تعادل (q_e) و ثابت سرعت سینتیکی(k_2) (را محاسبه کرد (Tazeh & Saremi naeini, 2025).

۲-۷ طرح آزمایشی و تحلیل آماری

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های جذب به‌صورت ناپیوسته و در دمای محیط انجام شد. طرح آزمایش مورد استفاده به صورت تک‌عاملی و مرحله‌ای طراحی گردید؛ به این معنا که برای تعیین شرایط بهینه، اثر هر یک از فاکتورهای مستقل شامل pH محلول، غلظت اولیه رنگ، زمان تماس و مقدار جاذب به صورت جداگانه بررسی شد، در حالی که سایر پارامترها در سطح ثابت نگه داشته شدند. مقدار بهینه هر پارامتر در مرحله قبلی، به عنوان ورودی ثابت برای مرحله بعدی در نظر گرفته شد. کلیه تیمارها در سه تکرار، اجرا شد و داده‌های نهایی به صورت میانگین در نظر گرفته شد. جهت تحلیل داده‌ها و برازش مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی، از رگرسیون غیرخطی و محاسبه ضریب تعیین (R^2) استفاده شد تا بهترین مدل توصیفی برای فرآیند جذب انتخاب گردد.

۳-یافته‌ها

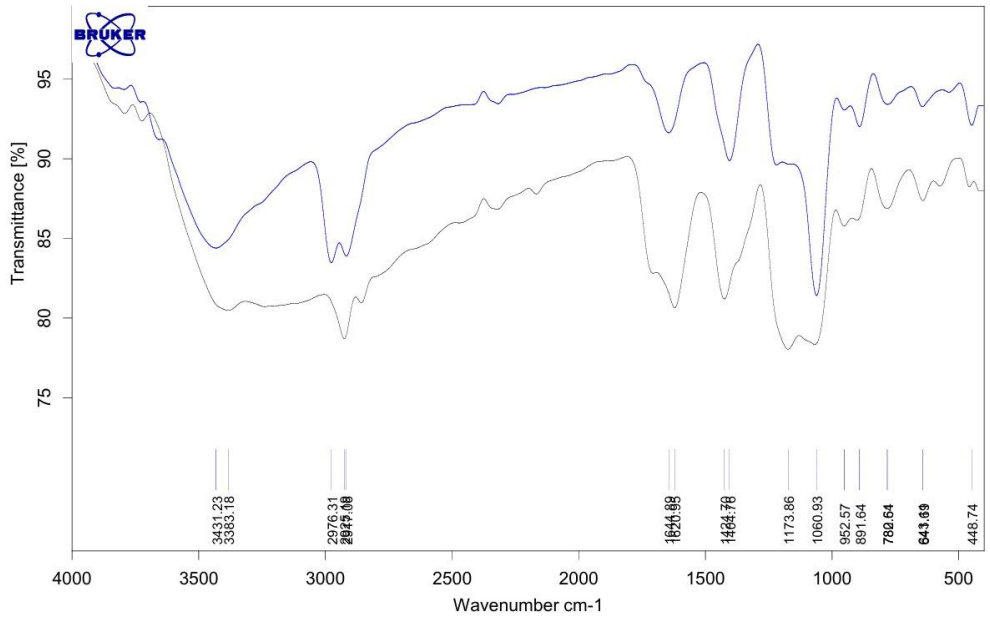
۳-۱ تفسیر FTIR

طیف FTIR جاذب گیاهی اشنان در محدوده ۴۰۰۰ تا ۵۰۰ cm^{-1} مورد بررسی قرار گرفت تا گروه‌های عاملی مؤثر در فرآیند جذب رنگ کریستال ویوله شناسایی شود. در ناحیه ۳۵۰۰–۳۰۰۰ cm^{-1} یک پیک پهن و نسبتاً شدید در حوالی ۳۴۴۰–۳۴۵۰ cm^{-1} مشاهده شد که به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (O–H) مربوط بوده و بیانگر حضور گسترده سلولز، همی‌سلولز، ترکیبات فنولی و تشکیل پیوندهای هیدروژنی در ساختار جاذب است. وجود این گروه‌ها در بهبود برهم‌کنش‌های سطحی با بار مثبت مولکول رنگ نقش مهمی دارد. در ناحیه ۳۰۰۰–۲۸۰۰ cm^{-1} دو پیک مشخص در حدود ۲۹۲۵ و ۲۸۵۰ cm^{-1} ظاهر شد که ناشی از ارتعاش کششی گروه‌های C–H آلکانی CH_2 و CH_3 است. این پیک‌ها نشان‌دهنده حضور ساختارهای آلی و لیپیدهای گیاهی در ماتریس جاذب هستند. در ادامه، یک پیک متمایز در محدوده ۱۶۴۰–۱۶۵۰ cm^{-1} مشاهده شد که به ارتعاش کششی گروه کربونیل (C=O) در ترکیبات پکتینی یا لیگنین و همچنین ارتعاش C=C در ساختارهای آروماتیک نسبت داده می‌شود. این گروه‌ها می‌توانند در ایجاد برهم‌کنش‌های π–π بین

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

جاذب و حلقه‌های آروماتیک مولکول رنگ ایفای نقش کنند. پیک‌های موجود در ناحیه ۱۵۰۰–۱۳۰۰ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی C–H و همچنین ارتعاش C–N در ساختارهای پروتئینی یا آلکالوئیدی هستند. این گروه‌ها با فراهم‌کردن مکان‌های فعال سطحی، در جذب الکترواستاتیکی رنگ مؤثرند. افزون بر این، در محدوده ۱۳۰۰–۱۰۰۰ cm^{-1} چندین پیک برجسته مشاهده شد،که به ارتعاشات C–O و پیوندهای C–O–C در پلی‌ساکاریدهای گیاهی از جمله سلولز و همی‌سلولز نسبت داده می‌شود. این گروه‌ها با قابلیت ایجاد پیوند هیدروژنی و تبادل یونی، یکی از مهم‌ترین مراکز فعال برای اتصال مولکول رنگ محسوب می‌شوند. در نهایت، پیک‌های ضعیف‌تر در بازه ۹۰۰–۶۰۰ cm^{-1} ظاهر شدند که مربوط به ارتعاشات خارج‌صفحه‌ای حلقه‌های آروماتیک و ارتعاشات اسکلت سلولزی هستند. حضور این طیف از گروه‌های عاملی، نشان می‌دهد که جاذب اشنان از لحاظ شیمیایی دارای مراکز فعال متعدد بوده و می‌تواند از طریق برهم‌کنش‌های هیدروژنی، الکترواستاتیکی، π–π و تبادل یونی در حذف مؤثر رنگ کریستال ویوله نقش‌آفرینی کند.



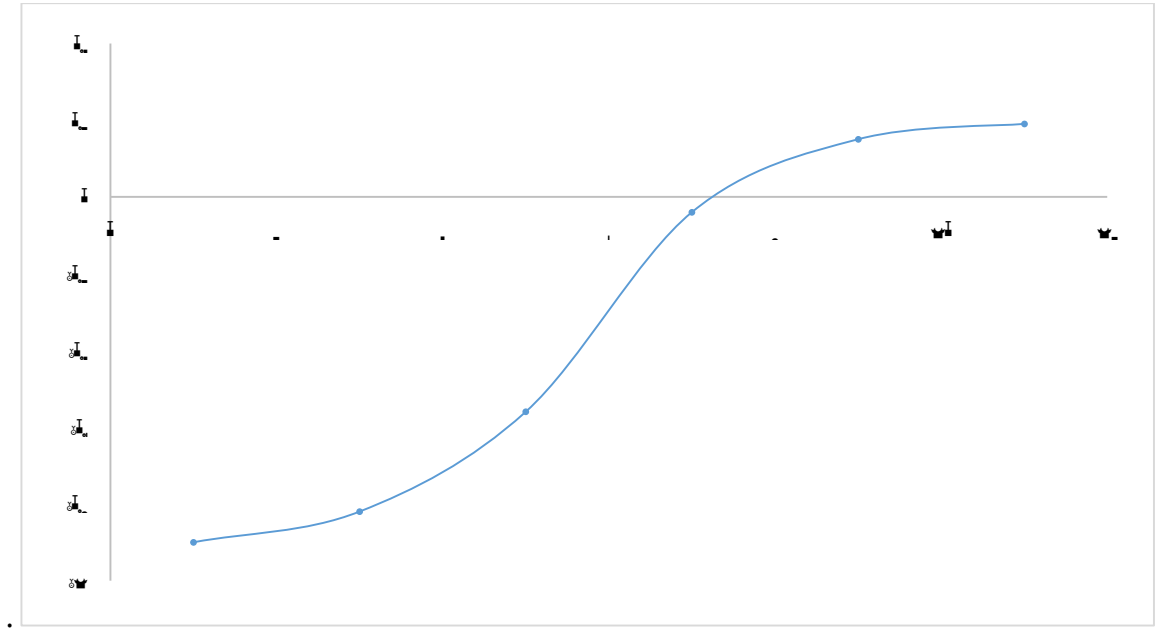
شکل ۱. FTIR اشنان

۲-۳ نقطه بار صفر جاذب (pH_{PZC})

نقطه ای است که در آن بارهای مثبت و منفی جاذب باهم برابر بوده و در آن pH برابر با صفر است. طبق نتایج حاصل، مقدار pH_{PZC} برای جاذب مورد مطالعه، حدود ۷/۱ به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، این مقدار نقطه‌ای است که در آن بار سطح جاذب برابر با صفر است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]



شکل ۲. نمودار تعیین نقطه بار صفر زیست‌توده اشنان در فرایند حذف رنگ کریستال ویوله

۳-۳ تأثیر pH بر فرآیند جذب

در پروژه‌های تصفیه پساب، عوامل متعددی بر ظرفیت جذب تأثیر می‌گذارند که در میان آن‌ها، pH محلول یکی از عوامل کلیدی به شمار می‌رود (Mirbolooki et al, 2025)، pH نه‌تنها بر میزان یونیزه شدن مولکول‌های جاذب و جذب‌شونده مؤثر است، بلکه ویژگی‌های سطحی جاذب را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Boulahbal et al, 2022). در این مطالعه، بیشترین میزان حذف رنگ (۸۳/۰۳ ٪) در pH برابر ۷ به‌دست آمد، در حالی که کمترین میزان جذب در pH برابر ۵ مشاهده شد. شکل (۳-الف) اثر تغییرات pH بر فرایند جذب رنگ کریستال ویوله توسط جذب اشنان را نشان می‌دهد. مقدار pH برابر ۷ به عنوان شرایط بهینه برای انجام سایر آزمایش‌ها انتخاب گردید.

۳-۴ تأثیر مقدار جاذب

دوز جاذب در بازه mg ۲ تا ۴۰ تغییر داده شد. با افزایش مقدار جاذب از mg ۲ تا ۲۰، درصد حذف رنگ کریستال ویوله به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. بیشینه جذب رنگ توسط جاذب اشنان در بازه mg ۱۵ تا ۴۰ تغییر چندانی نداشت و نقطه تعادل در دوز mg ۲۰ قرار دارد، که در این شرایط کارایی حذف حدود ۸۶/۳۶٪ بود. شکل (۳-ب) این نتایج را نشان می‌دهد.

۳-۵ تأثیر زمان تماس بر فرآیند جذب

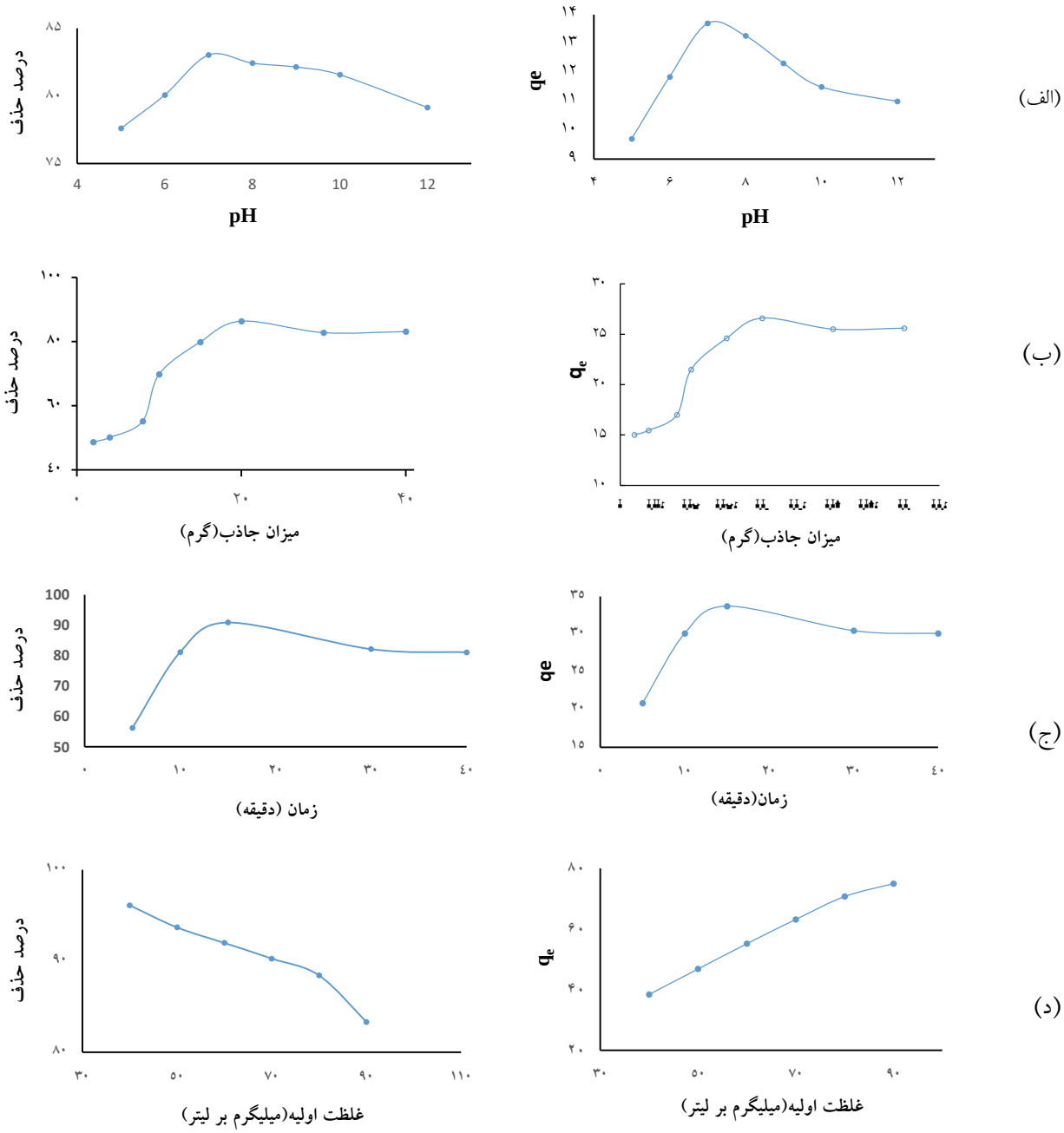
زمان تماس در بازه min ۵ تا ۴۰ دقیقه تغییر داده شد و سایر پارامترها ثابت نگه داشته شد، با افزایش زمان تماس، درصد حذف رنگ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت و مطابق شکل (۳-ج) بیشینه حذف معادل ۹۰/۸۸ ٪ در زمان min ۱۵ حاصل شد. در min ۵ ابتدایی، ظرفیت حذف رنگ نسبتاً کند بود که به محدود بودن تماس اولیه بین مولکول‌های رنگ و سطح جاذب مربوط است. زمان تماس بهینه در این مطالعه برابر ۱۵min تعیین شد.

۳-۶ تأثیر غلظت اولیه رنگ

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

غلظت رنگ کریستال ویوله در بازه ۴۰ mg/L تا۹۰ تغییر داده شد و سایر پارامترها ثابت نگه داشته شدند. با افزایش غلظت اولیه ، درصد حذف رنگ کاهش یافت. مطابق شکل(۳-د) در غلظت ۴۰ mg/li، ظرفیت حذف به بیشینه‌ی ۹۶/۱۲۵٪ رسید که به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.



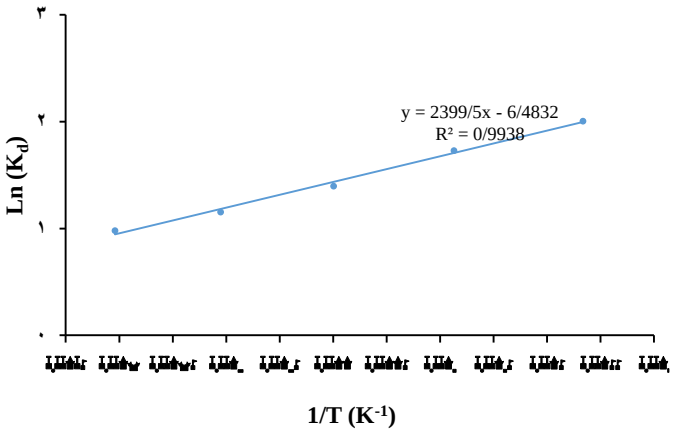
شکل ۳. اثر الف) pH ب) میزان جاذب (گرم) ج) زمان (دقیقه) د) غلظت اولیه (میلی‌گرم بر لیتر) بر میزان جذب و درصد حذف رنگ کریستال ویوله توسط زیست‌توده اشنان

۳-۷ ترمودینامیک

مقادیر پارامترهای ترمودینامیکی جذب رنگ کریستال ویوله، توسط جاذب طبیعی اشنان در دماهای مختلف در جدول ۱، ارائه شده است. انرژی آزاد گیبس ($\Delta G°$) در تمامی دماها منفی بوده، همچنین مقدار تغییرات آنتروپی($\Delta S°$) ، در

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

تمام دماها ثابت و برابر با $-19/95\ J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$ به دست آمد. نسبت توزیع تعادلی (K_d) نیز با افزایش دما کاهش نشان داد، به‌طوری که از ۳۱/۰۹ در دمای ۲۸۳ K به ۲۱/۱۰ در دمای ۳۲۳ K رسید. این تغییرات ترمودینامیکی در شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار ترمودینامیک برای جذب رنگ کریستال ویوله توسط زیست‌توده اشنان

جدول ۱. کمیت‌های ترمودینامیکی

دما (K)	C_e (mg/l)	q_e (mg/g)	تغییر آنتروپی	انرژی آزاد گیبس (Kj/mol)
۲۸۳	۴/۳	۳۱/۹	-۱۹/۹۵	-۴۷۱۵/۱۱
۲۹۳	۴/۳۷	۲۴/۶۳	-۱۹/۹۵	-۴۲۱۲/۳۴
۳۰۳	۵/۷۵	۲۳/۲۵	-۱۹/۹۵	-۳۵۱۹/۵۱
۳۱۳	۶/۹۵	۲۲/۰۵	-۱۹/۹۵	-۳۰۰۴/۵۲
۳۲۳	۷/۹	۲۱/۱	-۱۹/۹۵	-۲۶۳۸/۱۹

C_e: غلظت ماده جذب‌شونده در محلول در حالت تعادل (mg/l)

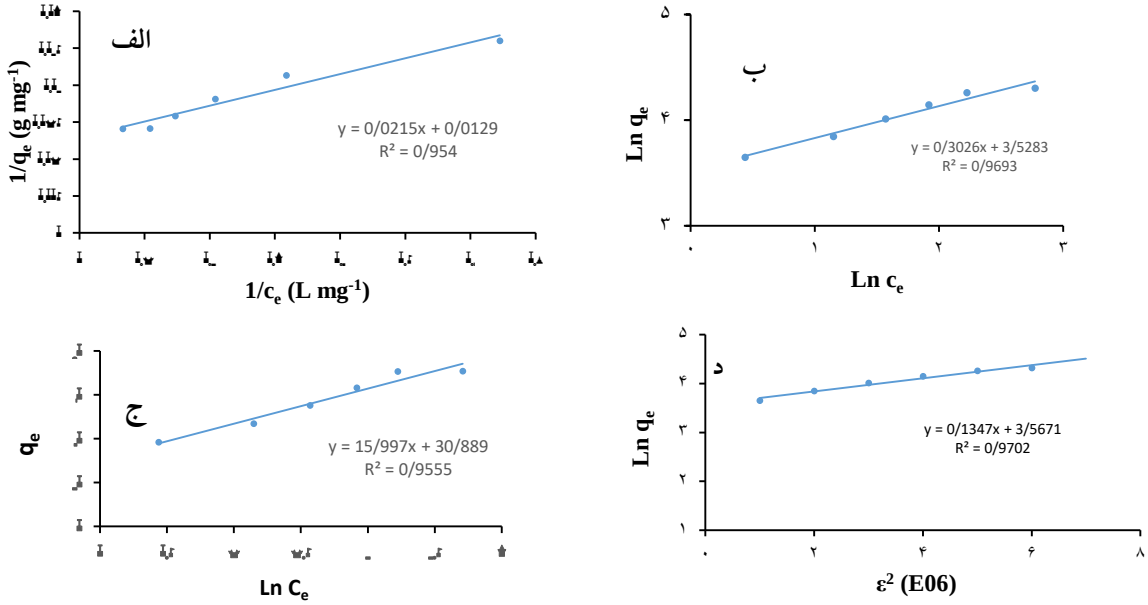
q_e: مقدار ماده حل شونده جذب شده در حالت تعادل (mg/g)

۳-۸ مطالعه ایزوترم جذب

جهت تحلیل رفتار تعادلی فرآیند جذب کریستال ویوله توسط جاذب طبیعی اشنان، داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ایزوترم لانگمویر، فروندلیش، تمکین و دوبینین-رادوشکویچ برازش داده شدند. نمودارهای مربوطه در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس مدل لانگمویر، مقدار ظرفیت جذب بیشینه ، برابر با ۴۶/۵۱ mg/g و ثابت تعادل لانگمویر (K_L) از طریق رسم نمودار $1/q_e$ در برابر $1/C_e$ تعیین گردید. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای این مدل برابر با ۰/۹۵۴ به‌دست آمد. همچنین با محاسبه ضریب جداسازی تعادلی ($R<1$) نوع جذب فیزیکی مطلوب است. در مدل فروندلیش نیز، با ترسیم نمودار $\ln q_e$ در برابر $\ln C_e$ ، پارامترهای K_F و n به‌ترتیب برابر با ۳۴/۱ L/mg و ۳/۳۱ محاسبه شدند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]



شکل ۵. ایزوترم‌های جذب رنگ کریستال ویوله الف-لانگمویر، ب-فرندلیچ، ج-تمکین و د-دوبینین

کلیه ضرایب و پارامترهای مهم مدلهای ایزوترمی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترها و ضرایب همبستگی ایزوترم‌های لانگمویر، فرندلیش، تمکین و دوبینین

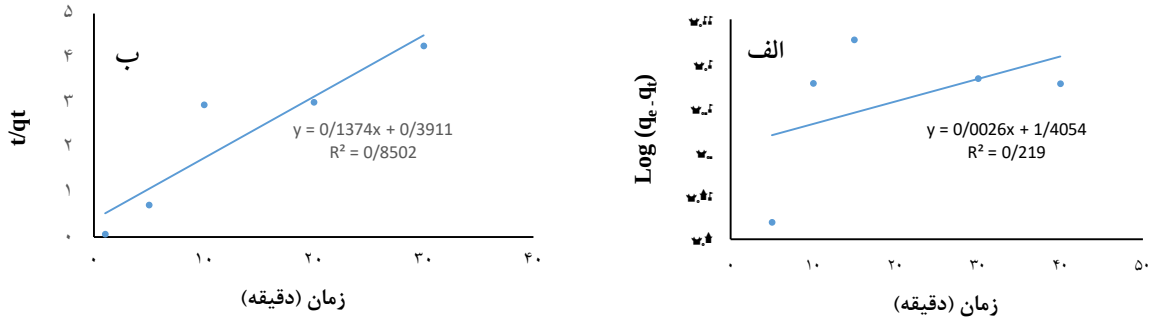
ایزوترم	رابطه خطی	پارامترها	مقدار
لانگمویر	$\frac{1}{q_e}=\left(\frac{1}{K_L q_{max} C_e}\right)+\frac{1}{q_{max}}$	K_L	۱/۶۶۶
		R^2	۰/۹۵۴
		q_{max}	۴۶/۵۱
فرندلیچ	$\ln q_e = \ln K_F + \left(\frac{1}{n}\right) ln\ C_e$	K_F	۳۴/۱
		$1/n$	۳/۳۱
		R^2	۰/۹۶۹
تمکین	$q_e = B \ln K_T + B\ ln\ C_e$	B	۱۵/۹۹
		K_T	۶/۸۹
		R^2	۰/۹۵۵
دوبینین	$lnq_e = \ln q_{max} + \beta C_2$	β	۰/۱۳۴
		q_{max}	۳۵/۴۱
		R^2	۰/۹۷

۳-۹ سینتیک جذب

برای بررسی مکانیزم و سرعت جذب رنگ کریستال ویوله توسط جاذب اشنان، دو مدل سینتیکی شبه‌مرتبه اول (لاگرگرن) و شبه‌مرتبه دوم مورد ارزیابی قرار گرفتند.مطابق شکل ۶، نمودار لاگرگرن (log(qe−qt) بر حسب زمان، خطی بود و

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

ضریب همبستگی (R^2) برابر ۰/۲۱۹ به دست آمد که نشان‌دهنده عدم تطابق مناسب مدل با داده‌هاست. نمودار t/qt در برابر زمان نیز رابطه خطی داشت و ضریب تعیین R^2 ، q_e و k به ترتیب برای مدل شبه‌مرتبه دوم برابر ۰/۲۱۹، ۴/۰۸ و ۰/۰۰۲۶ و برای مدل شبه مرتبه دوم ۰/۸۵، ۸/۱۸ و ۰/۰۲۱۶ بود، که مدل شبه مرتبه دوم تطابق بسیار بهتری با داده‌ها نشان می‌دهد.

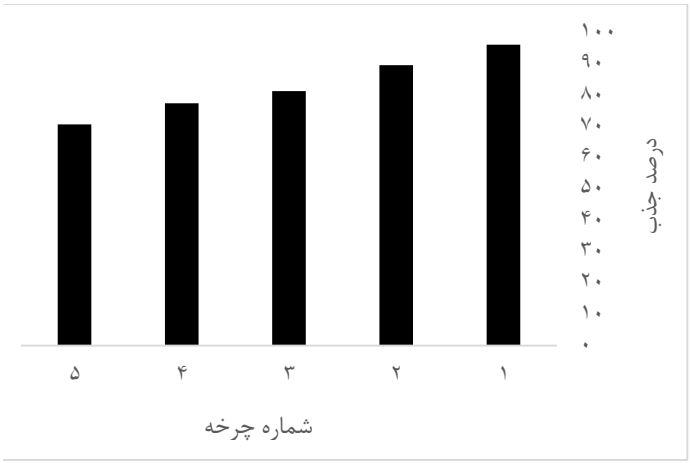


شکل ۶. سینتیک‌های جذب رنگ کریستال ویوله الف- شبه مرتبه اول، ب-شبه مرتبه دوم

۳-۱۰ قابلیت استفاده مجدد جاذب اشنان در حذف کریستال ویوله

ارزیابی قابلیت استفاده مجدد جاذب یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای تعیین کارایی عملی و پایداری بلندمدت مواد جاذب در کاربردهای واقعی است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پنج چرخه متوالی ، جاذب اشنان پس از هر مرحله جذب با شست‌وشوی کامل و خشک‌سازی در دمای محیط برای استفاده مجدد آماده شد. مقادیر واجذب ثبت‌شده (۹۶/۱۲ تا ۷۰/۷ درصد) نشان‌دهنده کاهش تدریجی راندمان در چرخه‌های متوالی است(شکل ۷)؛ کاهشی که احتمالاً ناشی از اشغال یا غیرفعال شدن برخی مکان‌های فعال سطحی، تغییرات محدود در ساختار فیزیکی جاذب یا پایداری نسبی رنگ باقیمانده در منافذ ریز آن می‌باشد.با وجود این افت تدریجی، روند کلی نتایج نشان می‌دهد که جاذب اشنان دارای پایداری چرخه‌ای قابل قبولی است و می‌تواند بدون کاهش شدید کارایی، طی چندین مرحله متوالی جذب و واجذب عملکرد خود را حفظ کند. این رفتار، قابلیت بازتولیدپذیری و ارزش عملی این جاذب زیستی را تقویت کرده و آن را به گزینه‌ای مناسب، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای کاربردهای تصفیه پساب تبدیل می‌کند؛ به‌گونه‌ای که استفاده از آن می‌تواند با تسهیل تصفیه و بازچرخانی کنترل‌شده آب، در چارچوب مدیریت پایدار منابع آب و حمایت از برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل فرسایش، به‌ویژه در مناطق مستعد فرسایش، مورد توجه قرار گیرد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]



شکل ۴: قابلیت استفاده مجدد اشنان در حذف کریستال ویوله

۴- بحث

PH $_{PZC}$-

مقدار PH $_{PZC}$ نشان می‌دهد که سطح جاذب در pH کمتر از این مقدار دارای بار مثبت و در pH بالاتر از آن دارای بار منفی است. این ویژگی از اهمیت بالایی در فرآیند جذب برخوردار است، چراکه تعیین PH $_{PZC}$ امکان پیش‌بینی نوع برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی بین سطح جاذب و مولکول‌های رنگ را فراهم می‌کند. در جذب رنگ‌های کاتیونی نظیر کریستال ویوله، انتظار می‌رود که راندمان جذب در pH بالاتر از PH $_{PZC}$ افزایش یابد، چرا که در این شرایط سطح جاذب بار منفی دارد و می‌تواند با یون‌های مثبت برهم‌کنش مؤثرتری برقرار کند در این شرایط، سطح جاذب بار منفی کافی را برای جذب یون‌های مثبت رنگ کریستال ویوله از طریق نیروهای الکترواستاتیکی فراهم می‌کند که با یافته‌های پژوهش‌های مشابه همخوانی دارد (Quansah et al., 2020). این مقدار مناسب از PH $_{PZC}$ تأیید می‌کند که اشنان می‌تواند در شرایط نزدیک به خنثی نیز به‌طور مؤثری در حذف آلاینده‌های کاتیونی عمل کند.

- تأثیر pH بر فرآیند جذب

افزایش pH محلول، موجب بهبود جذب کریستال ویوله شد، که ناشی از تبدیل بار سطحی جاذب به حالت منفی و تقویت جاذبه الکترواستاتیکی با رنگ دارای بار مثبت است. این روند با یافته‌های Bentahar و همکاران (۲۰۱۷) هم‌راستا است که بیشینه‌ی جذب را در pH خنثی تا قلیایی گزارش کرده‌اند (Bentahar et al., 2017). در محیط اسیدی، دافعه بین یون‌های مثبت جاذب و رنگ باعث کاهش راندمان می‌شود. تفاوت در مقدار دقیق pH بهینه در مطالعات مختلف را می‌توان به نوع جاذب و pH نقطه‌ای صفر بار سطح (pH_{pzc}) نسبت داد.

- تأثیر مقدار جاذب

افزایش دوز جاذب، باعث افزایش تعداد مکان‌های فعال سطحی و بهبود جذب کریستال ویوله می‌شود. در این مطالعه نیز افزایش دوز جاذب تا مقدار مشخصی باعث افزایش راندمان حذف شده، ولی پس از رسیدن به نقطه اشباع، تغییرات قابل توجهی مشاهده نشده است. این موضوع معمولاً به دلیل اشباع سطح جاذب یا کاهش غلظت رنگ قابل جذب اتفاق می‌افتد

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

این یافته با نتایج مطالعات Islam و همکاران (۲۰۱۸) که به افزایش راندمان حذف با بالا رفتن مقدار جاذب اشاره داشتند، تطابق دارد.

-تأثیر زمان تماس بر فرآیند جذب

افزایش زمان تماس، باعث افزایش فرصت برخورد بین مولکول‌های رنگ و مکان‌های فعال سطح جاذب شده و جذب را بهبود می‌بخشد (Soni et al., 2020). یافته ها نشان می‌دهد که پس از min ۱۵، تغییرات جذب اندک استT که ناشی از رسیدن به حالت تعادل جذب است.

- تأثیر غلظت اولیه رنگ

کاهش درصد حذف با افزایش غلظت اولیه، ناشی از ثابت بودن مقدار جاذب است که باعث افزایش رقابت بین مولکول‌های رنگ برای سایت‌های جذب محدود می‌شود. این روند در مطالعات قبلی نیز مشاهده شده است؛ برای مثال، نتایج مشابهی توسط محققینی گزارش شده است، که در آن‌ها نیز افزایش غلظت رنگ باعث کاهش راندمان حذف می‌شود (Foroutan et al., 2021). همچنین، افزایش غلظت رنگ نیازمند نیروی محرکه بالاتر برای انتقال جرم است که ممکن است باعث کاهش برخورد موثر یون‌ها با سطح جاذب شود.

-ترمودینامیک

بررسی پارامترهای ترمودینامیکی جذب رنگ کریستال ویوله توسط اشنان نشان می‌دهد که فرآیند در تمام دماهای بررسی‌شده خودبه‌خودی است؛ چراکه مقدار ΔG° در تمام موارد منفی گزارش شده است. کاهش تدریجی مقدار ΔG° با افزایش دما بیانگر آن است که جذب در دماهای بالاتر از نظر ترمودینامیکی مطلوب‌تر انجام می‌شود. این رفتار با یافته‌های پژوهش‌هایی نظیر مطالعه جذب کریستال ویوله بر روی زباله های شهری همخوانی دارد، که در آن نیز جذب در دماهای بالاتر با انرژی آزاد منفی‌تر گزارش شد(Kamal et al., 2025). مقدار منفی ΔS° برابر J/mol·K ۱۹/۹۵- نشان‌دهنده کاهش بی‌نظمی در سیستم طی فرآیند جذب است. این امر حاکی از آن است که مولکول‌های رنگ پس از جذب به سطح جاذب، در محل‌های فعال به‌صورت سازمان‌یافته مستقر شده‌اند و آزادی حرکتی آن‌ها کاهش یافته است. همچنین کاهش K_d با افزایش دما نشان‌دهنده تمایل کمتر رنگ برای اتصال به سطح جاذب در دماهای بالا است که ممکن است ناشی از رقابت میان انرژی گرمایی و پیوندهای سطحی ضعیف‌تر باشد.

-مدل‌های ایزوترم جذب

تحلیل مدل‌های ایزوترم نشان می‌دهد که جاذب طبیعی اشنان دارای ظرفیت بالایی برای حذف رنگ کریستال ویوله است. مقدارq_m محاسبه‌شده در مدل دوبینین mg/g ۳۵/۴۱ نشان می‌دهد که سطح جاذب توانایی قابل‌توجهی در نگهداری مولکول‌های رنگ دارد. ضریب تعیین بالای مدل دوبینین R^2=۰/۹۷ نیز موید همخوانی خوب داده‌ها با این مدل است و ایزوترم دوبینین نسبت به سایر مدل‌ها تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد که نشان‌دهنده نقش مؤثر نفوذ مولکولی در فرآیند جذب است و با مطالعات مشابه همخوانی دارد(Radoor et al., 2025).

-مدل‌های سینتیک جذب

تطابق بهتر مدل شبه‌مرتبه دوم با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که مکانیزم جذب غالباً شامل واکنش شیمیایی کنترل‌شده بر سطح جاذب است، در پژوهشی نیز نشان داده شده که جذب کریستال ویوله با مدل شبه‌مرتبه دوم بهتر توصیف می‌شود،

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

زیرا فرآیند جذب وابسته به واکنش سطحی و ظرفیت سایت‌های فعال است و با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد(Khan et al., 2016).

- مکانیسم جذب کریستال ویوله توسط جاذب طبیعی اشنان

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های pH_{PZC} ، سینتیک، ایزوترم و تحلیل‌های ترمودینامیکی، مکانیسم جذب کریستال ویوله توسط جاذب اشنان به صورت ترکیبی از جذب فیزیکی و شیمیایی توضیح داده می‌شود:

تأثیر pH و pH_{PZC} : مقدار pH_{PZC} سطح جاذب نشان می‌دهد که در pH بالاتر از pH_{PZC} ، سطح جاذب بار منفی دارد. این ویژگی باعث تقویت برهم‌کنش الکترواستاتیکی بین سطح جاذب و مولکول‌های کریستال ویوله با بار مثبت می‌شود و راندمان جذب در pH خنثی تا قلیایی افزایش می‌یابد.

برهم‌کنش‌های سطحی و شیمیایی: تطابق داده‌های سینتیکی با مدل شبه‌مرتبه دوم نشان می‌دهد که واکنش جذب وابسته به تعداد سایت‌های فعال سطح جاذب است و فرآیند کنترل شیمیایی می‌شود. علاوه بر مدل سینتیکی، نتایج حاصل از آنالیز FTIR وجود گروه‌های عاملی نظیر هیدروکسیل(O-H) ، کربونیل (C=O) و پیوندهای C-O را در ساختار اشنان تأیید می‌کند که می‌توانند با مولکول‌های رنگ برهم‌کنش برقرار سازند. همچنین، وابستگی راندمان جذب به pH و نزدیک بودن نقطه بهینه به pH خنثی، نشان‌دهنده نقش نیروهای الکترواستاتیکی است. بنابراین، با تکیه بر شواهد طیف‌سنجی و رفتار pH ، مکانیسم جذب می‌تواند شامل تعاملات الکترواستاتیکی، برهم‌کنش‌های هیدروژنی و احتمالاً پیوندهای π–π میان حلقه‌های آروماتیک موجود در ساختار لیگنینی گیاه و مولکول رنگ باشد.

نقش ظرفیت سطح و نفوذ مولکولی: بر اساس انطباق داده‌ها با مدل دوبینین–رادوشکویچ که مبتنی بر نظریه پر شدن حجم منافذ است، فرآیند جذب علاوه بر سطح بیرونی، شامل نفوذ و جایگیری مولکول‌های رنگ در ساختار متخلخل جاذب نیز می‌باشد و جادب ذارای ظرفیت بالای نگهداری مولکولهای رنگ است. .

نتایج ترمودینامیکی: مقادیر منفی ΔG° در تمام دماها نشان‌دهنده خودبه‌خودی بودن فرایند و مقدار منفی ΔS° بیانگر کاهش بی‌نظمی سیستم است، که به معنای استقرار سازمان‌یافته مولکول‌های رنگ در سایت‌های فعال جاذب است. همچنین کاهش K_d با افزایش دما بیانگر آن است که فرآیند جذب ماهیت گرمازا دارد و در دماهای پایین‌تر پایداری بیشتری دارد؛ چرا که افزایش انرژی حرارتی باعث تضعیف پیوندهای سطحی و جدایی مولکول‌های رنگ از جاذب می‌شود . بنابراین، مکانیسم جذب ترکیبی از تعاملات شیمیایی سطحی (کنترل شده توسط واکنش سایت فعال) و جذب فیزیکی ناشی از نفوذ مولکولی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و هیدروژنی است که با داده‌های سینتیکی، ایزوترمی و ترمودینامیکی همخوانی دارد

.در جمع‌بندی نهایی بخش بحث و مطابق جدول ۳، حداکثر مقدار جذب (q_m) با سایر جاذب‌ها مقایسه شد. زیست‌توده اشنان با توجه به ظرفیت جذب ۳۵/۴۱ میلی‌گرم بر گرم، به دلیل بومی بودن، دسترسی آسان، هزینه بسیار پایین و عدم نیاز به فرآیندهای پیچیده شیمیایی، عملکردی رقابت‌پذیر و در سطح قابل قبولی برای حذف رنگ کریستال ویوله از خود نشان داده است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

جدول ۳. مقایسه حداکثر ظرفیت جذب،در جاذب‌های مختلف برای حذف کریستال ویوله

جاذب	رفرنس	ظرفیت جذب (mg/g)
اشنان	پژوهش حاضر	۳۵/۴۱
پوسته برنج	Homagai et al.,) (2025	۲۴/۴۷
خاکستر برنج	(Islam et al., 2018)	۸/۳
سیلیس کربنی جاسازی شده از پوسته برنج	(Islam et al., 2018)	۱۸/۷۸
زئولیت کربنی جاسازی شده از پوسته برنج	(Islam et al., 2018)	۱۹/۲۸
کربن فعال چوب لیمو	Alorabi et al.,) (2021	۲۳/۶
بیوچار مشتق شده از پوسته هسته خرما	(Kyi et al., 2020)	۲۴/۴۵

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر اثربخشی جاذب زیستی اشنان را به‌عنوان یک جاذب بالقوه برای حذف رنگ کریستال ویوله از محلول‌های آبی به‌خوبی نشان داد. به‌منظور ارزیابی خواص جذب این جاذب و تعیین ظرفیت آن، پارامترهای متعددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حذف رنگ کریستال ویوله به‌طور قابل‌توجهی به pH وابسته است و بیشترین میزان حذف در pH برابر ۷ به‌دست آمد. تحلیل داده‌های سینتیکی با استفاده از مدل‌های شبه‌مرتبه اول و شبه‌مرتبه دوم انجام شد که بر اساس ضرایب همبستگی بالاتر، فرآیند جذب با مدل شبه‌مرتبه دوم سازگاری بیشتری داشت. همچنین داده‌های تعادلی با بهره‌گیری از ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیش، تمکین و دوبینین بررسی شدند که در این میان، مدل دوبینین بهترین تطابق را نشان داد و بیشترین ظرفیت جذب برابر با ۳۵/۴۱ میلی‌گرم بر گرم محاسبه گردید. در نهایت، نتایج بیانگر آن است که استفاده از مواد زیستی طبیعی و بومی مانند گیاه اشنان، گامی مؤثر در توسعه فناوری‌های پاک و پایدار به‌شمار می‌آید که ضمن کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی، به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی کمک می‌کند. این رویکرد با فراهم‌سازی امکان تصفیه و بازچرخانی کنترل‌شده پساب، می‌تواند در چارچوب مدیریت پایدار منابع آب و خاک، تقویت پوشش گیاهی و بهبود شرایط رطوبتی خاک مورد توجه قرار گیرد و از این طریق، به‌طور غیرمستقیم در حفاظت خاک و کاهش حساسیت آن نسبت به فرسایش نقش مؤثری ایفا کند.

منابع:

1. Ardakani, F. P. Kalantari, S. Shirmardi, M. & Tazeh, M. (2024). 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*, *196* (8), 754. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12903-9.
2. Essekri, A. Laabd, M. Fatni, A. Ait Addi, A. Lakhmiri, R. & Albourine, A. (2023). The use of raw and modified acacia leaves for adsorptive removal of crystal violet from water. *Chemical Engineering Research and Design*, *190*, 143-156. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.12.010.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

3. Huang, Y. R. Kong, Y. Li, H. Z. & Wei, X. M. (2020). Removal of crystal violet by ultraviolet/persulfate: effects, kinetics and degradation pathways. *Environmental Technology & Innovation*, *18*, 100780. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100780
4. Massoudinejad, M. Rasoulzadeh, H. & Ghaderpoori, M. (2019). Magnetic chitosan nanocomposite: fabrication, properties, and optimization for adsorptive removal of crystal violet from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, *206*, 844-853. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.048
5. Alorabi, A. Q. Hassan, M. S. Alam, M. M. Zabin, S. A. Alsenani, N. I. & Baghdadi, N. E. (2021). Natural clay as a low-cost adsorbent for crystal violet dye removal and antimicrobial activity. *Nanomaterials*, *11*(11), 2789. https://doi.org/10.3390/nano11112789
6. Homagai, P. L. Poudel, R. Poudel, S. & Bhattarai, A. (2022). Adsorption and removal of crystal violet dye from aqueous solution by modified rice husk. *Heliyon*, *8*(4).
7. Kyi, P. P. Quansah, J. O. Lee, C. G. Moon, J. K. & Park, S. J. (2020). The removal of crystal violet from textile wastewater using palm kernel shell-derived biochar. *Applied Sciences*, *10*(7), 2251. https://doi.org/10.3390/app10072251
8. Shurigin, V. Egamberdieva, D. Li, L. Davranov, K. Panosyan, H. Birkeland, N. K. ... & Bellingrath-Kimura, S. D. (2020). Endophytic bacteria associated with halophyte Seidlitzia rosmarinus Ehrenb. ex Boiss. from saline soil of Uzbekistan and their plant beneficial traits. *Journal of Arid Land*, *12*(5), 730-740. https://doi.org/10.1007/s40333-020-0019-4
9. Hong, S. Wen, C. He, J. Gan, F. & Ho, Y. S. (2009). Adsorption thermodynamics of methylene blue onto bentonite. *Journal of hazardous materials*, *167*(1-3), 630-633. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.014
10. Kalantari, S. & Tazeh, M. (2024). Investigation of the efficacy of Alhagi maurorum plant powder for Janus Green B dye removal from wastewater. *International Journal of Phytoremediation*, *26*(11), 1764-1775. https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2354415
11. Zandipak, R. Bahramifar, N. Younesi, H. & Zolfigol, M. A. (2025). Photocatalytic degradation of rhodamine B dye from aqueous media using imide conjugated polymer photocatalyst under visible light. *Iranian Journal of Health and Environment*, *17*(4), 741-756. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6941-en.html
12. Loganathan, M. Raj, A. S. Murugesan, A. & Kumar, P. S. (2022). Effective adsorption of crystal violet onto aromatic polyimides: Kinetics and isotherm studies. *Chemosphere*, *304*, 135332. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135332
13. Sultana, S. Islam, K. Hasan, M. A. Khan, H. J. Khan, M. A. R. Deb, A. ... & Rahman, M. W. (2022). Adsorption of crystal violet dye by coconut husk powder: isotherm, kinetics and thermodynamics perspectives. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *17*, 100651. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100651
14. 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. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6768-en.html
15. Yap, P. S. & Priyaa, V. (2019, April). Removal of crystal violet and acid green 25 from water using kaolin. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 495, No. 1, p. 012052). IOP Publishing. https://doi.org/10.1007/s11814-019-0356-1
16. Sarabadan, M. Bashiri, H. & Mousavi, S. M. (2019). Removal of crystal violet dye by an efficient and low cost adsorbent: Modeling, kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *36*(10), 1575-1586.
17. 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. Environmental Erosion Research Journal. 2025;15(2):56. (In Persian)

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]

18. Mirbolooki, H. Mahdavi, S. Solgi, E. Razdar, B. Zarabi, M. & Akhzari, D. (2025). Equilibrium and kinetic investigation of solophenyl dye removal from aqueous solution using cellulose adsorbents. *Iranian Journal of Health and Environment*, *17*(4), 845-870. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6988-en.html
19. Boulahbal, M. Malouki, M. A. Canle, M. Redouane-Salah, Z. Devanesan, S. AlSalhi, M. S. & Berkani, M. (2022). Removal of the industrial azo dye crystal violet using a natural clay: Characterization, kinetic modeling, and RSM optimization. *Chemosphere*, *306*, 135516. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135516
20. Quansah, J. O. Hlaing, T. Lyonga, F. N. Kyi, P. P. Hong, S. H. Lee, C. G. & Park, S. J. (2020). Nascent rice husk as an adsorbent for removing cationic dyes from textile wastewater. *Applied Sciences*, *10*(10), 3437. https://doi.org/10.3390/app10103437
21. Bentahar, S. Dbik, A. El Khomri, M. El Messaoudi, N. & Lacherai, A. (2017). Adsorption of methylene blue, crystal violet and congo red from binary and ternary systems with natural clay: Kinetic, isotherm, and thermodynamic. *Journal of environmental chemical engineering*, *5*(6), 5921-5932. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.003
22. Islam, T. Liu, J. Shen, G. Ye, T. & Peng, C. (2018). Synthesis of chemically modified carbon embedded silica and zeolite from rice husk to adsorb crystal violet dye from aqueous solution. *Applied Ecology & Environmental Research*, *16*(4). https://www.aloki.hu/pdf/1604_39553967
23. Soni, S. Bajpai, P. K. Bharti, D. Mittal, J. & Arora, C. (2020). Removal of crystal violet from aqueous solution using iron based metal organic framework. *Desalination and Water Treatment*, *205*, 386-399. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26387
24. Foroutan, R. Peighambardoust, S. J. Peighambardoust, S. H. Pateiro, M. & Lorenzo, J. M. (2021). Adsorption of crystal violet dye using activated carbon of lemon wood and activated carbon/Fe3O4 magnetic nanocomposite from aqueous solutions: a kinetic, equilibrium and thermodynamic study. *Molecules*, *26*(8), 2241. https://doi.org/10.3390/molecules26082241
25. Kamal, A. B. Hassane, A. M. An, C. Deng, Q. Hu, N. Abolibda, T. Z. ... & Gomaa, H. (2025). Developing a cost-effective and eco-friendly adsorbent/photocatalyst using biomass and urban waste for crystal violet removal and antimicrobial applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*(7), 10089-10107. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05850-5
26. Radoor, S. Jayakumar, A. Shivanna, J. M. Karayil, J. Kim, J. T. & Siengchin, S. (2025). Adsorptive removal of crystal violet from aqueous solution by bioadsorbent. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*(2), 2431-2442. https://doi.org/10.1007/s13399-023-05079-8
27. Khan, M. M. R. Rahman, M. W. Ong, H. R. Ismail, A. B. & Cheng, C. K. (2016). Tea dust as a potential low-cost adsorbent for the removal of crystal violet from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, *57*(31), 14728-14738. https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1066272

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.160]