



Semnan University

Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

Investigation of Crystal Violet Adsorption Using a Graphene Oxide–Bassorin Cryogel Adsorbent

Sina Azadi ^a, Hossein Anaraki-Ardakani ^{b,*}, Morteza Rouhani ^a, Zohreh Mirjafary ^a, Shahrzad Abdolmohammadi ^c

^a Department of Chemistry, SR.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^b Department of Chemistry, Ka.C, Islamic Azad University, Karaj, Iran

^c Department of Chemistry, ST.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 14/Sep/2025

Revised: 04/Oct/2025

Accepted: 05/Oct/2025

Keywords:

Cryogel,
Crystal Violet,
Dye Adsorption,
Natural Polymer.

ABSTRACT

In this research, a calcium-ion crosslinked cryogel based on Bassorin and graphene oxide (GO-BR) was prepared and examined for its potential to eliminate crystal violet (CV) from aqueous solutions. The cryogel was obtained through a straightforward freeze-drying technique and its structural and physicochemical properties were analyzed by multiple methods, including X-ray diffraction (XRD) to study crystallinity, field emission scanning electron microscopy (FESEM) to observe morphology, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) for functional groups, and Brunauer–Emmett–Teller (BET) analysis for surface area estimation. The adsorption efficiency was assessed under diverse conditions such as contact duration, starting dye level, pH value, temperature, and sorbent dosage. Results demonstrated that the GO-BR cryogel achieved a maximum uptake capacity of 200.08 mg/g. Kinetic investigations showed that the pseudo-first-order model best described the adsorption process, while the equilibrium behavior followed the Langmuir isotherm. Furthermore, the material sustained high removal efficiency through five successive regeneration cycles. Overall, GO-BR emerges as an environmentally friendly and biodegradable sorbent with strong prospects for scalable application in dye-contaminated wastewater treatment and industrial purification systems.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2025.38942.2392>

© 2025 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Associate Professor of Applied Chemistry. E-mail address: hosseinanaraki@yahoo.com

How to cite this article: Azadi, S., Anaraki-Ardakani, H., Rouhani, M., Mirjafary, Z. & Abdolmohammadi, Sh. (2025). Investigation of Crystal Violet Adsorption Using a Graphene Oxide–Bassorin Cryogel Adsorbent. *Applied Chemistry Today*, 20(76), 31-48. (in Persian)

بررسی جذب رنگ کریستال ویولت با جاذب کرایوژلی گرافن اکسید-باسورین

سینا آزادی^۱، حسین انارکی اردکانی^{۲*}، مرتضی روحانی^۱، زهره میرجعفری^۱، شهرزاد عبدالمحمدی^۳

^۱ گروه شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^{۲*} گروه شیمی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

^۳ گروه شیمی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳	در این پژوهش، یک کرایوژل بر پایه باسورین و گرافن اکسید با نام گرافن اکسید-باسورین که با یون‌های کلسیم پیوند عرضی شده بود، تهیه و برای توانایی آن در حذف رنگ کریستال ویولت از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. این کرایوژل با استفاده از روش ساده فریزدرایینگ ساخته شد و ویژگی‌های ساختاری و فیزیکوشیمیایی آن با روش‌های مختلفی از جمله پراش پرتو ایکس برای بررسی بلورینگی، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی برای مطالعه مورفولوژی، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه برای شناسایی گروه‌های عاملی و آزمون برونوئر-امت-تالر برای تعیین سطح ویژه مورد آنالیز قرار گرفت. کارایی جذب تحت شرایط مختلف شامل زمان تماس، غلظت اولیه رنگ، مقدار pH، دما و دوز جاذب ارزیابی شد. نتایج نشان داد که کرایوژل گرافن اکسید-باسورین بیشترین ظرفیت جذب ۲۰۰/۰۸ میلی گرم بر گرم را به دست آورد. بررسی‌های سینتیکی نشان داد که مدل شبه مرتبه اول بهترین انطباق را با داده‌ها دارد، در حالی که داده‌های تعادلی بیشترین تطابق را با ایزوترم لانگمویر نشان دادند. علاوه بر این، این ماده در طی پنج چرخه متوالی بازیابی، بازدهی بالای حذف رنگ را حفظ کرد. در مجموع، این کرایوژل به عنوان یک جاذب زیست‌تخریب‌پذیر و دوستدار محیط زیست با چشم‌انداز قوی برای کاربرد در تصفیه فاضلاب‌های آلوده به رنگ و سامانه‌های تصفیه صنعتی مطرح می‌شود.

کلمات کلیدی:

کرایوژل،
کریستال ویولت،
جذب رنگ،
پلیمر طبیعی.

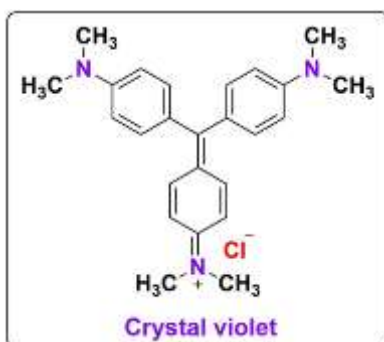
DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2025.38942.2392>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

آب به عنوان بنیادی‌ترین منبع حیات، نقشی محوری در کشاورزی، صنعت و تأمین نیازهای شهری دارد [۱]. با این حال، افزایش فعالیت‌های انسانی موجب آلودگی فزاینده منابع آبی شده است؛ مسئله‌ای که پیامدهای جدی برای سلامت عمومی و پایداری اکوسیستم‌ها به همراه دارد. در میان آلاینده‌های گوناگون، رنگ‌های سنتزی به دلیل پایداری شیمیایی بالا، تجزیه‌ناپذیری زیستی و سمیت قابل توجه، از چالش‌برانگیزترین ترکیبات محسوب می‌شوند. آمارها نشان می‌دهد سالانه حدود ۸۰۰ هزار تا یک میلیون تن رنگ مصنوعی در جهان تولید می‌شود که ۱۰ تا ۱۵ درصد آن مستقیماً از طریق پساب صنایع، به‌ویژه نساجی، وارد محیط‌های آبی می‌گردد [۲]. این ترکیبات علاوه بر مقاومت بالا در برابر فرایندهای طبیعی تخریب، اثرات زیان‌باری همچون سرطان‌زایی، جهش‌زایی و سمیت سلولی ایجاد می‌کنند [۳].

کریستال ویولت، یکی از پرکاربردترین رنگ‌های کاتیونی از خانواده تری‌آریل‌متان، در صنایع نساجی، چرم، لوازم آرایشی و برخی مصارف پزشکی به کار می‌رود [۴]. استفاده گسترده از این رنگ نگرانی‌های جدی زیست‌محیطی و بهداشتی ایجاد کرده است، زیرا ورود آن به فاضلاب‌ها می‌تواند منجر به تحریکات پوستی، مشکلات تنفسی و افزایش ریسک سرطان شود [۵]. ساختار شیمیایی این رنگ در شکل ۱ نمایش داده شده است. گزارش‌ها حاکی از آن است که سالانه صدها هزار تن از این ترکیب به چرخه آبی وارد می‌شود و مقابله با آن ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است [۶].



شکل ۱. ساختار شیمیایی رنگ کریستال ویولت

روش‌های رایج حذف رنگ‌ها مانند انعقاد شیمیایی، الکتروشیمیایی یا فیلتراسیون غشایی اگرچه در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما با معایبی همچون هزینه‌های بالا، پیچیدگی کاربری و تولید لجن یا آلودگی ثانویه همراه هستند. در مقایسه، فرایند جذب سطحی به دلیل سادگی، هزینه پایین، بازدهی بالا و سازگاری با محیط‌زیست، جایگاهی ویژه در تصفیه پساب‌های رنگی پیدا کرده است [۸ و ۷]. کارایی این روش عمدتاً ناشی از برهم‌کنش‌های قوی بین گروه‌های عاملی سطح جاذب و رنگ‌های کاتیونی است که امکان حذف مؤثر آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد [۹-۱۱]. بر همین اساس، پژوهشگران جاذب‌های متنوعی نظیر آئروژل‌ها [۱۲]، بیوجاذب‌ها [۱۳ و ۱۴]، کامپوزیت‌های پلیمری [۱۵]، چارچوب‌های فلزی-آلی [۱۶ و ۱۷] و نانومواد کربنی [۱۸ و ۱۹] را بررسی کرده‌اند. در میان این جاذب‌ها، کریوژل‌ها به دلیل ساختار ماکروپور متصل، استحکام مکانیکی بالا و نفوذپذیری مناسب، جایگزینی نویدبخش برای هیدروژل‌های معمولی محسوب می‌شوند. فرایند انجماد-ذوب در شرایط پرودتی منجر به ایجاد شبکه‌ای متخلخل می‌شود که انتقال جرم را بهبود داده و کارایی جذب را افزایش می‌دهد [۲۰].

از سوی دیگر، استفاده از منابع طبیعی و زیست‌پایه برای توسعه جاذب‌های نوین، با اهداف پایداری و اقتصاد سبز همسو است. در این راستا، باسورین به‌عنوان بخش غیرمحللول در آب صمغ کتیرا، توجه زیادی جلب کرده است. این پلی‌ساکارید آنیونی طبیعی، زیست‌تخریب‌پذیر، غیرسمی و زیست‌سازگار بوده و حاوی گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل فعال است که امکان اصلاح‌پذیری و ایجاد اتصالات عرضی را فراهم می‌سازد. ویژگی‌های منحصر به فرد باسورین، آن را گزینه‌ای ارزشمند برای کاربردهای زیست‌پزشکی، کشاورزی و فناوری‌های محیط‌زیستی معرفی کرده است [۲۱-۲۳].

نواوری پژوهش حاضر در این است که برای نخستین بار کریوژل گرافن اکسید-باسورین با اتصال عرضی یون کلسیم طراحی و سنتز شده است تا به عنوان یک جاذب زیستی پایدار، مقرون به صرفه و قابل بازیافت برای حذف رنگ کریستال ویولت از پساب های آبی به کار رود. ساختار ماکروپور این کریوژل موجب بهبود چشمگیر انتقال جرم و ظرفیت جذب می شود، در حالی که حضور گرافن اکسید استحکام مکانیکی و پایداری شیمیایی آن را افزایش می دهد. بدین ترتیب، ماده پیشنهادی می تواند جایگزین مؤثری برای جاذب های مرسوم باشد و چشم انداز تازه ای در استفاده از بیوپلیمرهای تجدیدپذیر در تصفیه پساب های صنعتی ارائه دهد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

صمغ کتیرا به عنوان یک تراوش گیاهی طبیعی از فروشگاه گیاهان دارویی محلی در تهران، ایران تهیه شد. گرافن اکسید از شرکت سیگما (ایالات متحده) خریداری گردید. کلرید کلسیم دی هیدرات ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، سدیم هیدروکسید به صورت پلت با خلوص بالای ۹۸ درصد و اسید کلریدریک غلیظ، حدود ۳۷ درصد نیز از شرکت مرک (آلمان) تأمین شدند. تمامی مواد شیمیایی مورد استفاده از گرید آزمایشگاهی یا تحلیلی بوده و بدون هیچ گونه خالص سازی اضافی به کار گرفته شدند.

۲-۲- استخراج باسورین

ابتدا یک گرم پودر صمغ کتیرا با اندازه ذرات ۲۰۰-۵۰۰ میکرومتر در ۳۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه پراکنده شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط تحت هم زدن مداوم قرار گرفت تا یک مخلوط یکنواخت حاصل شود. سپس محلول به مدت ۲۰ دقیقه در سرعت ۸۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد تا اجزای محلول از بخش نامحلول جدا شوند. بخش نامحلول که به عنوان باسورین شناخته می شود، جداسازی، خشک و برای مراحل بعدی تحقیق نگهداری گردید.

۲-۳- آماده سازی گرافن اکسید-باسورین

برای تهیه کریوژل، ابتدا ۰/۵ گرم باسورین در ۴۵ میلی لیتر آب دیونیزه پراکنده شد و به مدت ۱ ساعت در دمای محیط تحت هم زدن قرار گرفت تا تورم یکنواخت حاصل شود. به صورت جداگانه، ۵۰ میلی گرم گرافن اکسید در ۵ میلی لیتر آب دیونیزه پراکنده شده و به مدت ۳۰ دقیقه تحت سونیکاسیون قرار گرفت تا لایه لایه شدن مناسب آن تضمین شود. سپس گرافن اکسید به تدریج به محلول باسورین تحت هم زدن مداوم اضافه شد. مخلوط به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد نگه داشته شد تا برهم کنش های بین باسورین و گرافن اکسید تقویت شود، و پس از آن به مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه با روش هموژنیزاسیون

اولتراسونیک یکنواخت شد. ژل حاصل در یک پتری‌دیش ریخته شد و منجمد گردید و در نهایت با روش فریزدرایینگ^۱ خشک شد تا کریوژل متخلخل به دست آید.

۴-۲- ویژگی های نمونه

کریوژل تحت مجموعه‌ای از روش‌های تحلیلی قرار گرفت تا ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیکی آن مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، از ابزارهای متنوعی برای ارزیابی ساختار و خصوصیات سطحی کریوژل استفاده شد. ویژگی‌های بلوری ماده با استفاده از پراش پرتو ایکس روی دستگاه Rigaku Ultima IV (ژاپن) با تابش $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) در بازه زاویه‌ای 10° تا 90° تعیین شد. مورفولوژی و بافت سطحی کریوژل با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی Tescan Mira 4 (جمهوری چک) در ولتاژ ۱۵ کیلوولت مورد بررسی قرار گرفت. سطح ویژه و ویژگی‌های تخلخل کریوژل با استفاده از تحلیل جذب-وا جذب نیتروژن و دستگاه BELSORP Mini II (ژاپن) بر اساس نظریه برونوئر-امت-تلا ارزیابی شد. تغییرات شیمیایی و گروه‌های عاملی سطحی با طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) با دستگاه Thermo Nicolet Avatar 370 (آمریکا) پایش شد. علاوه بر این، اندازه‌گیری غلظت رنگ‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر Thermo Scientific، در طول موج ۲۰۰-۸۰۰ نانومتر انجام شد.

۵-۲- آزمایش جذب

آزمایش‌های جذب انجام شد تا اثر عوامل مختلف از جمله غلظت اولیه رنگ، دوز جاذب، دما، pH و زمان تماس بر حذف رنگ کریستال ویولت توسط کریوژل گرافن اکسید-باسورین بررسی شود. در یک آزمایش معمولی، ۰.۰۲ گرم جاذب به ۲۰ میلی‌لیتر محلول کریستال ویولت با غلظت ۱۰۰ mg/L اضافه شد. pH محلول روی ۶ تنظیم و دما در ۲۵ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته شد. برای بهبود فرآیند جذب، مخلوط با سرعت ۴۰۰ rpm هم زده شد. پس از ۵ دقیقه تماس، جاذب با سانتریفیوژ از محلول جدا شد و غلظت رنگ باقی‌مانده در سوپرناتانت با استفاده از اسپکتروفتومتر در حدود طول موج ۵۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. ظرفیت جذب (qe) به صورت mg/g با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید.

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{w} \times V \quad (1)$$

میزان جذب رنگ توسط کریوژل بر واحد جرم با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد. در این معادله، C_i (mg/L) غلظت اولیه رنگ در محلول، C_e (mg/L) غلظت تعادلی رنگ پس از جذب، V حجم محلول بر حسب لیتر و w جرم کریوژل به کار رفته در آزمایش بر حسب گرم را نشان می‌دهد. برای ارزیابی قابلیت بازیافت ماده، بازده بازیابی (η) با استفاده از معادله (۲) تعیین شد که میزان اثربخشی کریوژل در بازسازی و استفاده مجدد در چرخه‌های متوالی جذب را نشان می‌دهد.

¹ Freeze drying

$$\eta = \frac{q}{q_n} \times 100\% \quad (2)$$

در این معادله، q_n ظرفیت جذب کریوژل پس از n امین چرخه بازیافت و q ظرفیت جذب اولیه کریوژل قبل از انجام هرگونه بازیافت را نشان می‌دهد.

۲-۶- ایزوترم های جذب و مدل های سینتیکی

برای توصیف رفتار تعادلی جذب رنگ روی کریوژل، از دو مدل ایزوترم، لانگمویر و فروندلیچ، و همچنین دو مدل سینتیکی، شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم استفاده شد. ایزوترم های لانگمویر و فروندلیش برای توصیف تعادل جذب و بررسی میزان جاذبه بین سطح جاذب و مولکول های رنگ به کار رفتند. معادله (۳) بیان ریاضی ایزوترم لانگمویر را نشان می‌دهد که مفروضات ویژه این مدل را منعکس می‌کند.

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

برای تعیین پارامترهای جذب، ایزوترم جذب لانگمویر به شکل خطی تبدیل شد که در معادله (۴) نشان داده شده است.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{max}} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (4)$$

بیشترین ظرفیت جذب کریوژل (q_{max}) بر حسب mg/g را نشان می‌دهد، در حالی که K_L (L/mg)، که به عنوان ثابت لانگمویر شناخته می‌شود، میزان تعامل بین جاذب و مولکول های رنگ را مشخص می‌کند. علاوه بر این، معادله (۵) برای محاسبه ضریب جداسازی (R_L) به کار رفت که اطلاعاتی درباره مناسب بودن مکانیزم جذب ارائه می‌دهد.

$$R_L = \frac{1}{1 + C_i \times K_L} \quad (5)$$

معادله (۶) شکل ریاضی ایزوترم جذب فروندلیش را نشان می‌دهد که جذب چندلایه ای روی سطوح ناهمگن را توصیف می‌کند.

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

معادله (۷) بیان خطی شده ایزوترم فروندلیچ را نشان می‌دهد.

$$\text{Log} q_e = \text{Log} K_f + \frac{1}{n} \text{Log} C_e \quad (7)$$

ثابت K_f در ایزوترم فروندلیچ ظرفیت جذب را نشان می‌دهد، در حالی که پارامتر $1/n$ شدت جذب را مشخص می‌کند. مقدار $1/n$ اطلاعاتی درباره ماهیت فرایند جذب مولکول ها ارائه می‌دهد: مقادیر بین $0/1$ تا $0/5$ نشان دهنده جذب مطلوب و مقادیر بالاتر از 2 بیانگر غیرممکن بودن جذب هستند.

سینتیک جذب رنگ کریستال ویولت روی کریوژل با استفاده از مدل های شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم بررسی شد. مدل شبه مرتبه اول در معادله (۸) بیان شده است.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (8)$$

در این معادله، q_t ظرفیت جذب در زمان t ، q_e میزان جذب در حالت تعادلی و K_1 ثابت سرعت در تعادل را نشان می‌دهد. مدل شبه‌مرتبه دوم نیز در معادله (۹) ارائه شده است.

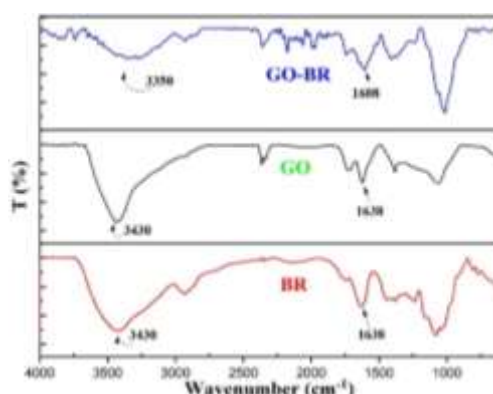
$$\frac{t}{q_e} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (9)$$

K_2 ثابت سرعت تعادلی را نشان می‌دهد و R^2 برای تعیین مناسب‌ترین مدل ایزوترم و سینتیک که بیشترین تطابق را با فرآیند جذب دارد، به کار می‌رود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی و مشخصات کرایوژل گرافن اکسید-باسورین

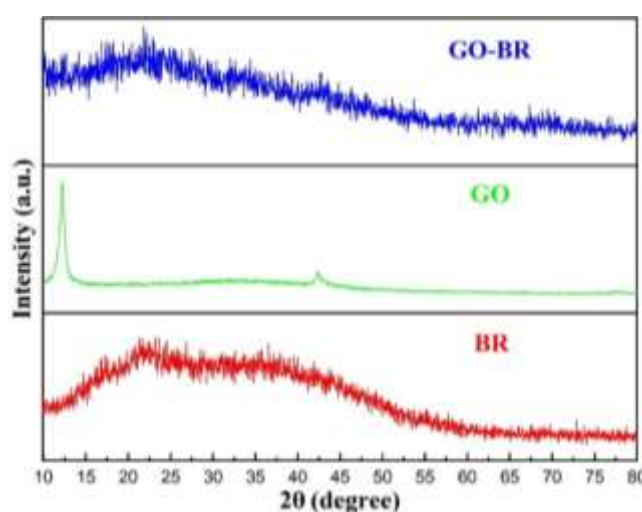
شکل ۲ طیف‌های FTIR کرایوژل گرافن اکسید-باسورین، باسورین و گرافن اکسید را نشان می‌دهد. در طیف باسورین، قله‌های مشخصی در حدود $1638(\text{cm}^{-1})$ و $3430(\text{cm}^{-1})$ دیده می‌شود که به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های اسید کربوکسیلیک (COOH) و هیدروکسیل (OH) هستند [۲۴]. در طیف گرافن اکسید، قله $1638(\text{cm}^{-1})$ مربوط به گروه کربوکسیل و باند جذب در $3430(\text{cm}^{-1})$ مرتبط با ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل است. در طیف FTIR کرایوژل گرافن اکسید-باسورین، باند جذب گسترده مربوط به ارتعاش کششی هیدروکسیل نسبت به باسورین و گرافن اکسید خالص شدت کمتری دارد. کاهش شدت این باند نشان‌دهنده مشارکت گروه‌های OH در برهم‌کنش‌های هیدروژنی بین باسورین و گرافن اکسید است. علاوه بر این، باند مشخصه مشاهده‌شده در $1628(\text{cm}^{-1})$ در باسورین و گرافن اکسید به $1608(\text{cm}^{-1})$ در طیف گرافن اکسید-باسورین تغییر می‌کند. این انتقال به سمت عدد موج پایین‌تر می‌تواند ناشی از هماهنگی یون‌های Ca^{2+} با گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل باشد و نشان‌دهنده تشکیل موفقیت‌آمیز کراس‌لینک کلسیم است که ساختار شبکه‌ای متقاطع را پایدار می‌کند.



شکل ۲. طیف FT-IR نمونه‌ها

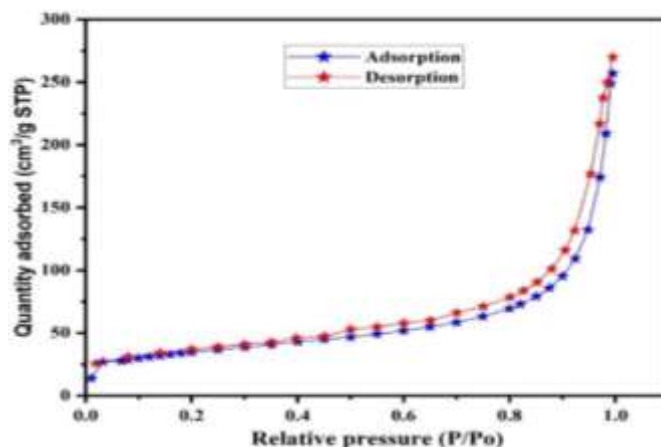
الگوی XRD (شکل ۳) مربوط به باسورین یک پیک گسترده و پراکنده نشان می‌دهد که بیانگر طبیعت عمدتاً آمورف و غیر بلوری آن است. این مشاهده با نتایج قبلی [۲۵] همخوانی دارد که ساختار آمورف باسورین را با استفاده از تحلیل XRD گزارش

کرده‌اند. در مورد گرافن اکسید، پیک مشخصه‌ای در 12° درجه مشاهده شد که مربوط به فاصله شبکه‌ای (d-spacing) است [۲۶]. الگوی XRD کامپوزیت گرافن اکسید-باسورین یک باند پراش گسترده در محدوده $30-15^\circ$ درجه نشان می‌دهد که ویژگی ساختار آمورف پلی‌ساکاریدهاست. ناپدید شدن پیک تیز مشخصه گرافن اکسید در نزدیکی 12° و کاهش قابل توجه انعکاس‌های بلوری آن نشان می‌دهد که لایه‌های گرافن اکسید به‌طور مؤثر لایه‌لایه شده و به‌صورت یکنواخت در ماتریس باسورین توزیع شده‌اند. این تغییر ساختاری نشان‌دهنده برهم‌کنش‌های قوی بین سطحی، مانند پیوند هیدروژنی و پیوند عرضی، بین زنجیره‌های باسورین و صفحات گرافن اکسید است که از بازتراکم گرافن اکسید جلوگیری می‌کند. وجود باند گسترده نیز تشکیل ماده هیبریدی با بلورینگی کاهش‌یافته و جایگیری موفقیت‌آمیز گرافن اکسید در شبکه باسورین را تأیید می‌کند.



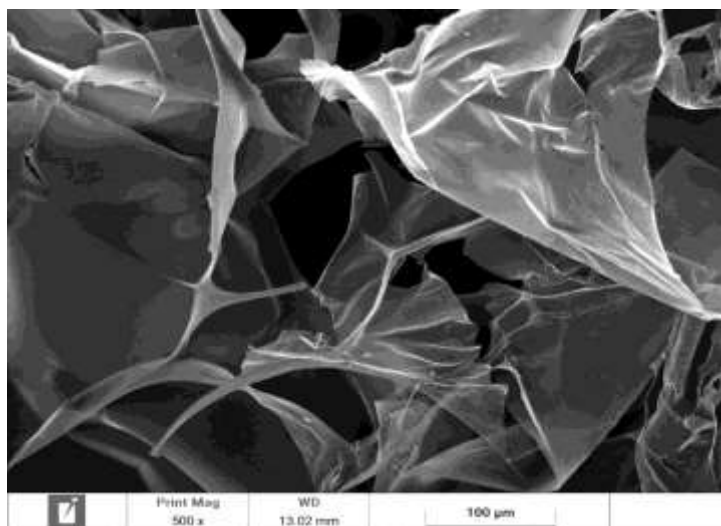
شکل ۱. طیف XRD نمونه‌های گرافن اکسید، باسورین و گرافن اکسید-باسورین

منحنی ایزوترم نمونه گرافن اکسید-باسورین (شکل ۴) نشان‌دهنده یک ایزوترم نوع چهار همراه با حلقه هیستریزس نوع H3 است. بر اساس تحلیل BET، سطح ویژه این نمونه $98/02 \text{ (m}^2/\text{g)}$ ، قطر متوسط حفره‌ها $14/41 \text{ (nm)}$ و حجم کل حفره‌ها $0/41 \text{ (cm}^3/\text{g)}$ تعیین شد.



شکل ۲. ایزوترم BET نمونه گرافن اکسید-باسورین

تصویر SEM کامپوزیت گرافن اکسید-باسورین مورفولوژی ورقه‌ای و چین خورده‌ای را نشان می‌دهد که ناشی از حضور لایه‌های گرافن اکسید است. توزیع یکنواخت و نازک این ورقه‌ها، پراکنش همگن گرافن اکسید در ماتریس باسورین را تأیید می‌کند. وجود حفره‌ها و فضاهای خالی بین لایه‌ها نشان‌دهنده ساختار متخلخل است که برای کاربردهای جذب و انتقال جرم مفید است. علاوه بر این، اتصال و درهم‌تنیدگی ورقه‌ها با زنجیره‌های باسورین، برهم‌کنش‌های قوی بین سطحی مانند پیوند هیدروژنی و پیوند عرضی را نشان می‌دهد که منجر به افزایش پایداری ساختاری کامپوزیت می‌شود.



شکل ۵. تصویر SEM نمونه کرایوژلی گرافن اکسید-باسورین

۳-۲- مطالعه جذب

رنگ کریستال ویولت یک رنگ کاتیونی است که در صنایع مختلف به‌طور گسترده استفاده می‌شود و به دلیل شدت رنگ و خطرات زیست‌محیطی بالقوه، حذف آن از محلول‌های آبی اهمیت یافته است. در این مطالعه، کریوژل به‌عنوان جاذب برای بررسی رفتار جذب این رنگ به کار رفت. فرایند جذب در بازه زمانی ۵ تا ۲۵ دقیقه ارزیابی شد و مقدار رنگ جذب‌شده (q_e) در هر بازه زمانی اندازه‌گیری گردید تا سینتیک جذب مشخص شود.

همان‌طور که در شکل ۶ الف نشان داده شده است، جذب رنگ توسط کریوژل به زمان تماس بستگی قابل توجهی دارد، به ویژه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس داده‌ها افزایش تدریجی ظرفیت جذب را نشان می‌دهند که نزدیک به دقیقه ۲۵ به یک حالت پایدار (تعادل) می‌رسد. این روند ناشی از حضور گسترده سایت‌های فعال در سطح کریوژل در مراحل اولیه است که منجر به جذب سریع رنگ می‌شود. با پر شدن تدریجی این سایت‌ها، نرخ جذب کاهش یافته و سیستم به تعادل می‌رسد. این نتایج با مطالعات قبلی همخوانی دارد [۲۷].

افزایش دما تا ۴۵ درجه سلسیوس منجر به جذب بالاتر رنگ توسط کریوژل شد (شکل ۶ ب). این افزایش به دلیل انرژی جنبشی بالاتر مولکول‌های رنگی در دماهای بالاتر است که نفوذ سریع‌تر و تعامل قوی‌تر با سایت‌های فعال کریوژل را تسهیل می‌کند. رفتار وابسته به دما مشابهی در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است [۲۸].

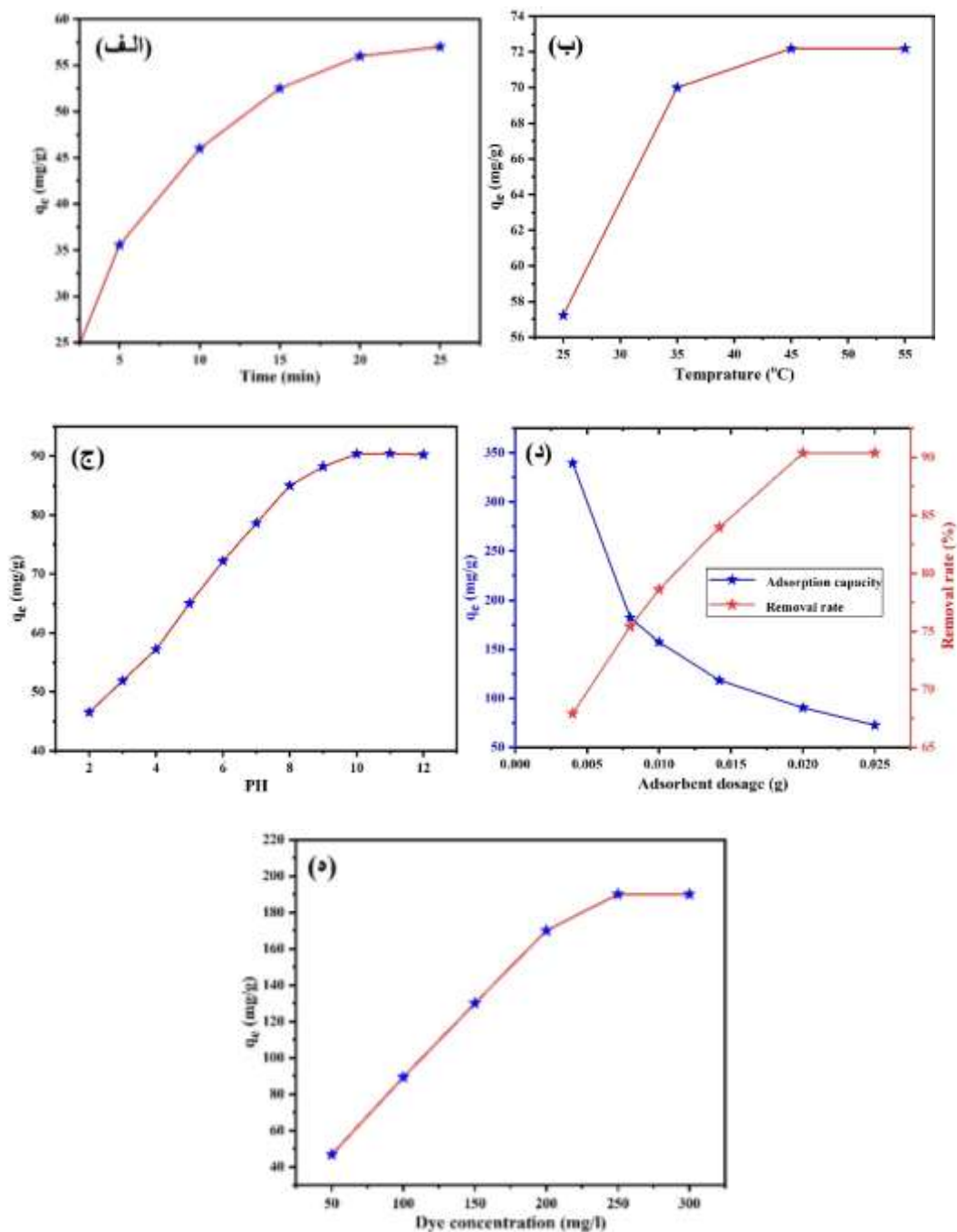
برای بررسی اثر pH بر عملکرد جذب کریوژل، آزمایش‌ها در بازه ۲ تا ۱۲ انجام شد و مقادیر pH با افزودن تدریجی محلول‌های ۰/۱ مولار HCl یا NaOH تنظیم گردید. همان‌طور که در شکل ۶ ج دیده می‌شود، افزایش pH منجر به بهبود قابل توجه کارایی حذف رنگ شد. در pH های اسیدی، سطح کریوژل بار مثبت دارد که به دلیل دافعه الکترواستاتیک و رقابت بین یون‌های H^+ و مولکول‌های رنگ، ظرفیت جذب کاهش می‌یابد. افزایش pH باعث دیپروتونه شدن سطح جاذب و ایجاد بار منفی خالص می‌شود که جذب رنگ کاتیونی را از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک تقویت می‌کند [۲۷].

در pH 10، دوز جاذب نقش مهمی در تعیین کارایی حذف رنگ دارد (شکل ۶ د). جالب است که افزایش مقدار جاذب منجر به کاهش ظرفیت جذب از ۳۳۹/۵۱ به ۷۲/۴۷ میلی گرم شد. این روند معکوس عمدتاً به دلیل ثابت بودن غلظت اولیه رنگ است که میزان رنگ قابل جذب را محدود می‌کند، حتی با وجود سایت‌های فعال بیشتر. الگوهای مشابهی در مطالعات پیشین گزارش شده است [۲۹]. نتایج نشان داد که دوز بهینه جاذب برابر با ۰/۰۲ گرم است.

شکل ۶ اثر غلظت رنگ (mg/L) بر ظرفیت جذب (mg/g) ماده تحت شرایط بهینه را نشان می‌دهد. داده‌ها افزایش تقریباً خطی ظرفیت جذب را با افزایش غلظت اولیه رنگ از ۵۰ تا ۲۵۰ (mg/L) نشان می‌دهند که حداکثر حدود (mg/L) ۱۹۰/۰۲ رسید. فراتر از این مقدار، ظرفیت تثبیت می‌شود و نشان می‌دهد که سایت‌های فعال موجود در سطح جاذب کاملاً اشغال شده‌اند. در غلظت‌های پایین، شیب بالای گرادیان غلظت، نفوذ مؤثرتر مولکول‌های رنگ به سمت جاذب را تسهیل می‌کند، در حالی که در غلظت‌های بالا، پس از اشباع، حضور رنگ اضافی تأثیر قابل توجهی بر جذب بیشتر ندارد [۳۰].

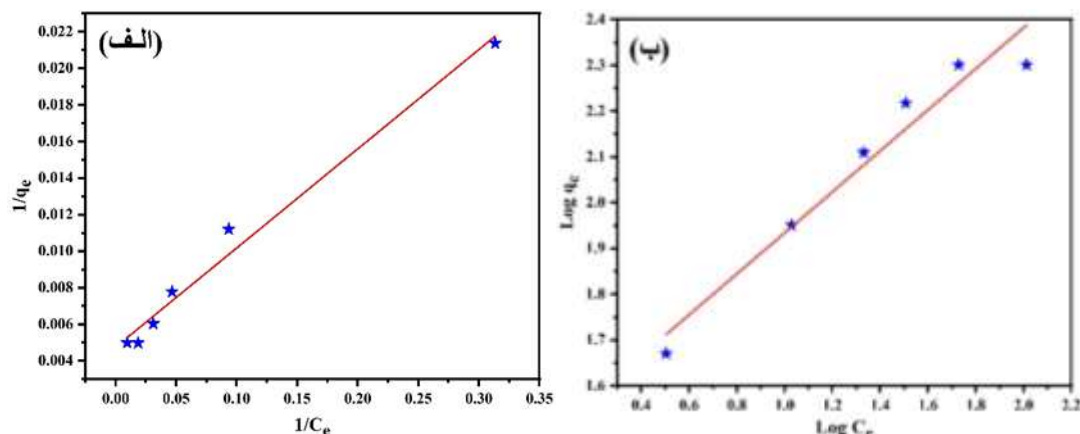
۳-۳- مدل‌های ایزوترم جذب

غلظت اولیه رنگ کریستال ویولت نقش قابل توجهی در تعیین کارایی جذب آن توسط جاذب مورد آزمایش دارد. ایزوترم‌های جذب اطلاعات ارزشمندی درباره ظرفیت جاذب، تمایل به اتصال و ویژگی‌های سطحی فراهم می‌کنند و به روشن شدن مکانیزم جذب کمک می‌کنند. در این مطالعه، رفتار جذب رنگ روی کریوژل با استفاده از مدل‌های فروندلیچ و لانگمویر مورد بررسی قرار گرفت، همان‌طور که در شکل ۷ الف و ب نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودارهای مربوط به بهینه سازی پارامترهای جذب رنگ با جاذب کرایوژلی.

مدل ایزوترم لانگمویر بر اساس فرض جذب تک لایه روی سطح همگن با تعداد محدودی سایت اتصال معادل است. در مقابل، ایزوترم فروندلیچ جذب روی سطوح ناهمگن را توصیف می کند که در آن سایت های اتصال دارای دامنه ای از تمایلات جذب هستند [۳۱ و ۳۲].



شکل ۷. ایزوترم های جذب رنگ کریستال ویولت توسط جاذب کرایوژلی (الف) لانگمویر (ب) فروندلیچ

جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل ایزوترم لانگمویر تطابق بهتری با داده‌های حاصل از آزمایش‌های جذب رنگ روی کریوژل گرافن اکسید-باسورین دارد، به‌طوری که مقدار R^2 برابر با ۰/۹۸ و برای مدل فروندلیش ۰/۹۵ است. این تطابق بهتر نشان می‌دهد که جذب به احتمال زیاد به‌صورت تک‌لایه روی یک سطح همگن رخ می‌دهد و ظرفیت جذب حداکثر برابر با (mg/g) ۲۰۰/۰۸ است.

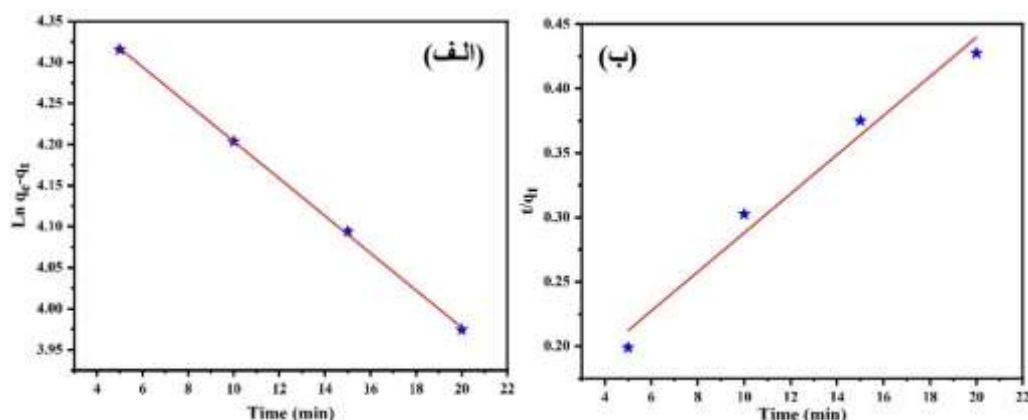
جدول ۱. پارامترهای ایزوترم های جذب

ایزوترم ها پارامتر ها	لانگمویر			فروندلیچ		
	R^2	K_L (L/mg)	q_m (mg/g)	R^2	$1/n$	K_f
	۰/۹۸	۰/۰۸۶۵	۲۰۰/۰۸	۰/۹۵	۰/۴۳۸۰	۳۰/۲۱۱۸

۳-۴- مطالعه سینتیکی جذب

برای درک بهتر مکانیزم حذف رنگ، از معادلات ۸ و ۹ برای محاسبه پارامترهای سینتیکی استفاده شد، همان‌طور که در شکل ۸ الف و ۸ ب نشان داده شده است. نتایج خلاصه‌شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که فرایند جذب بهترین تطابق را با مدل شبه‌مرتبه اول دارد، با ضریب همبستگی بالا.

جالب است که مدل شبه مرتبه اول مقادیر تجربی را به‌طور دقیق‌تری دنبال می‌کند و این موضوع نشان می‌دهد که ممکن است بهتر رفتار واقعی جذب را تحت شرایط آزمایش شده منعکس کند. غالب بودن مدل شبه مرتبه اول نشان می‌دهد که جذب فیزیکی احتمالاً مکانیزم اصلی جذب است، زیرا این فرآیند معمولاً با برهم‌کنش‌های سطحی بدون ایجاد پیوند شیمیایی قابل توجه همراه است. در این زمینه، ثابت سرعت نشان‌دهنده سرعت جذب مولکول‌های رنگ روی سطح جاذب است. هرچه مقدار ثابت سرعت بالاتر باشد، جذب سریع‌تر انجام می‌شود که اثربخشی جاذب در جذب مولکول‌های رنگ از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی را برجسته می‌کند.



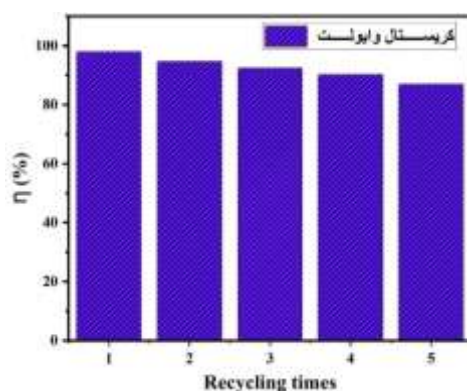
شکل ۸. نمودار مدل های سینتیکی شبه مرتبه اول (الف) و شبه مرتبه دوم (ب)

جدول ۲. پارامتر های مدل های سینتیکی شبه مرتبه اول و دوم

سینتیک شبه مرتبه اول			سینتیک شبه مرتبه دوم		
R^2	$K_1 (\text{min}^{-1})$	$q_e (\text{mg/g})$	R^2	$K_2 (\text{min}^{-1})$	$q_e (\text{mg/g})$
۰/۹۹	۰/۰۳۷۲	۷۴/۰۴	۰/۹۶	۰/۰۰۱۴	۶۵/۹۵

۳-۵- قابلیت استفاده مجدد

قابلیت استفاده مجدد جاذب، در فرآیندهای کم هزینه تصفیه فاضلاب اهمیت ویژه ای دارد. به منظور بررسی این ویژگی در جاذب گرافن اکسید-باسورین، عملکرد آن در جذب رنگ طی پنج چرخه جذب-وا جذب مورد مطالعه قرار گرفت. پس از اتمام چرخه جذب اولیه، جاذب گرافن اکسید-باسورین از محیط با استفاده از کاغذ صافی شیشه ای جدا شد. سپس ۵۰ میلی لیتر اتانول به آن اضافه شد و برای ۶۰ دقیقه هم زده شد تا رنگ به طور کامل از سطح کرایوژل آزاد گردد. جاذب چندین بار با آب تصفیه شده شسته شد و به مدت ۶ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک گردید. چرخه دوم جذب با استفاده از محلول رنگ تازه و در همان شرایط آغاز شد و کارایی حذف رنگ در این چرخه اندازه گیری شد. این روند در چرخه های بعدی نیز تکرار شد. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، نسبت حذف رنگ طی پنج چرخه کاهش یافت و در بازه ۹۶ تا ۸۷ درصد قرار گرفت، که نشان می دهد کرایوژل می تواند به عنوان یک جاذب مؤثر در حذف رنگ از فاضلاب عمل کند.



شکل ۹. نمودار بازیافت جاذب

برای نشان دادن عملکرد جذب کرایوژل گرافن اکسید-باسورین توسعه یافته در این مطالعه، جدول ۴ ظرفیت جذب رنگ کریستال ویولت را با جاذب‌های مختلف گزارش شده مقایسه می‌کند. این جدول نشان می‌دهد که بیشینه ظرفیت جذب (Q_m) کرایوژل گرافن اکسید-باسورین عدد خوبی را نشان می‌دهد و میتواند به عنوان جایگزینی مناسب نسبت به جاذب‌های قبلی باشد.

جدول ۴. مقایسه جاذب‌های مختلف در حذف رنگ کریستال ویولت

منبع	سال	Q_m (mg/g)	ایزوترم های جذب	جاذب ها
[۳۳]	۲۰۲۲	۲۶/۸۵	لانگمویر	پوسته برنج کربنیزه شده
[۳۴]	۲۰۲۰	۲۴/۴۷	لانگمویر	پوسته برنج خام
[۳۵]	۲۰۲۴	۹۲/۸	لانگمویر	وی سی ۱۰۰۰
[۱۴]	۲۰۲۳	۲۷۰/۲۷	لانگمویر	ای‌آ‌اس دی
[۳۶]	۲۰۲۳	۱۲۳/۶۰	لانگمویر	زنولیت CMTKG/PSMA
این مطالعه	۲۰۲۵	۲۰۰/۰۸	لانگمویر	کرایوژل گرافن اکسید-باسورین

۴- نتیجه گیری

این مطالعه با موفقیت نشان داد که کریوژل نوآورانه گرافن اکسید-باسورین یک جاذب مؤثر برای حذف رنگ کریستال ویولت از محلول‌های آبی است. تحلیل‌های دقیق انجام شده نشان داد که این کریوژل دارای ویژگی‌های مطلوبی از جمله ساختار مزوپور منحصر به فرد، پویایی بار سطحی قوی و سینتیک جذب برجسته است که منجر به ظرفیت جذب قابل توجهی می‌شود. برای درک بهتر رفتار جذب، مدل‌های ایزوترم و سینتیک مورد استفاده قرار گرفتند. مطالعات سینتیکی نشان داد که فرایند جذب با مدل شبه مرتبه اول و ایزوترم لانگمویر همخوانی نزدیکی دارد، که مکانیزم جذب مطلوبی را تأیید می‌کند. جاذب تهیه شده به ظرفیت بالای جذب $200/08 \text{ (mg/g)}$ دست یافت. عملکرد این ماده، که در شرایط عملیاتی متنوع ارزیابی شد، پتانسیل آن را به عنوان جایگزینی پایدار و اقتصادی برای جاذب‌های سنتی برجسته می‌کند. علاوه بر این، حفظ ۸۸ درصد کارایی حذف رنگ پس از پنج چرخه بازیابی، توانایی کریوژل را برای استفاده در تصفیه فاضلاب نشان می‌دهد. این نتایج، کریوژل را به عنوان یک جاذب مؤثر در حذف رنگ معرفی می‌کند و به رویکردهای پایدارتر در کاهش آلودگی آب کمک می‌کند.

۵- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات برای فراهم کردن محیط تحقیق و پژوهش صمیمانه تشکر می‌کنم.

۶- فهرست منابع

- [1] E. K. Boon, T. K. F. Gross, R. Oppong-Boateng, and O. Karintseva. (2025). Circular water management solutions for optimising irrigated agricultural production in Ghana: the relevance of nanotechnology. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 24(2), 115–144.
- [2] A. P. Periyasamy. (2024). Recent advances in the remediation of textile-dye-containing wastewater: prioritizing human health and sustainable wastewater treatment. *Sustainability*, 16(2), 495.

- [3] K. Ramamurthy, P. S. Priya, R. Murugan, and J. Arockiaraj. (2024). Hues of risk: investigating genotoxicity and environmental impacts of azo textile dyes. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(23), 33190–33211 .
- [4] S. Shabna, C. J. C. Singh, S. D. S. J. Dhas, S. C. Jeyakumar, and C. S. Biju. (2024). An overview of prominent factors influencing the photocatalytic degradation of cationic crystal violet dye employing diverse nanostructured materials. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 99(5), 1027–1055 .
- [5] X. Li, X. Shen, W. Jiang, Y. Xi, and S. Li. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420 .
- [6] X. Cheng *et al.* (2023). Effective adsorption of crystal violet onto magnetic nanoparticles decorated bacteria: Kinetic and site energy distribution analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 837–846 .
- [7] M. Firouzi, A. Nouri, and A. Nozadgolikand. (2017). Synthesis, characterization and application of alumina nanoparticles for photocatalytic degradation of congo red dye. *Applied Chemistry Today*, 12(42), 23–34 . (in Persian)
- [8] M. Anbia, M. Faryadras, and A. Ghaffarinejad. (2014). Synthesis and characterization of metal organic framework MOF-199 doped with sodium cations for hydrogen storage at ambient temperature. *Applied Chemistry Today*, 9(30), 79–88 . (in Persian)
- [9] S. Azadi, H. Anaraki-Ardakani, M. Rouhani, Z. Mirjafary, and S. Abdolmohammadi. (2025). Eco-Friendly Cryogel Based on Natural Bassorin and CMC for the Efficient Adsorption of Crystal Violet Dye. *Journal of Polymers and the Environment*, 1–15 .
- [10] S. Azadi, H. Anaraki-Ardakani, M. Rouhani, Z. Mirjafari, and S. Abdolmohammadi. (2025). Developing an Eco-Friendly Adsorbent: Isinglass-Bassorin Cryogel for Safranin O Dye Removal. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(6), 1–14 .
- [11] S. Pashaeia. (2023). Synthesis and investigation of polypyrrole/pomegranate peel powder composites and application for removal of heavy metals from water. *Journal of Applied Chemistry*, 18(68), 63–82 .(in Persian)
- [12] S. Azadi, M. Esmkhani, and S. Javanshir. (2022). New collagen-based cryogel as bio-sorbent materials for Rhodamine B removal from aqueous environments. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 103(2):405–415
- [13] S. Gul *et al.* (2025). White clover components as an effective biosorbent for the elimination of toxic malachite green from wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–13 .
- [14] Z. Ahamad and A. Nasar. (2023). Utilization of Azadirachta indica sawdust as a potential adsorbent for the removal of crystal violet dye. *Sustainable Chemistry*, 4(1), 110–126 .

- [15] P. Dhumal *et al.* (2025). One pot synthesis of polymer–clay based composite for effective dye removal application. *Materials Science and Engineering: B*, 313, 117982 .
- [16] C. K. Behl and A. Thakur. (2025). Investigating the Functionality of a Cobalt Metal–Organic Framework for Dye Adsorption, Antimicrobial and Cytotoxicity Activity. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 1–26 .
- [17] A. Nikseresht and H. Normohamadi. (2024). Development and Optimization Synthesis of MIL-101 (Cr) by Ultrasound Irradiation Using Response Surface Methodology. *Applied Chemistry Today*, 19(71), 223–246 .(in Persian)
- [18] H. Ma *et al.* (2025) .Graphene oxide composites for dye removal in textile, printing and dyeing wastewaters: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 23(1), 165–193 .
- [19] M. Faraji, P. Derakhshi, and K. Tahvildari. (2017). Green and facile synthesis of graphene supported Pt nanoparticles for oxygen reduction reaction in polymer electrolyte fuel cells. *Applied Chemistry Today*, 12(45), 31–40 .(in Persian)
- [20] K. Zhang, Z. Yang, M. P. Seitz, and E. Jain. (2024). Macroporous PEG-Alginate Hybrid Double-Network Cryogels with Tunable Degradation Rates Prepared via Radical-Free Cross-Linking for Cartilage Tissue Engineering. *ACS Applied Bio Materials*, 7(9), 5925–5938 .
- [21] M. Größl, S. Harrison, I. Kaml, and E. Kenndler. (2005). Characterisation of natural polysaccharides (plant gums) used as binding media for artistic and historic works by capillary zone electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 1077(1), 80–89 .
- [22] S. Balaghi, M. A. Mohammadifar, A. Zargaraan, H. A. Gavligi, and M. Mohammadi. (2011). Compositional analysis and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of Iranian Astragalus. *Food Hydrocolloids*, 25(7), 1775–1784 .
- [23] Z. Sadeghi, Z. Alizadeh, and M. Moridi Farimani. (2024). Recent reports in the biggest herbal genus, Astragalus, in Iran; with a special viewpoint on tragacanth gum production. *Natural Product Research*, 38(16), 2877–2895 .
- [24] E. Ratiki *et al.* (2023). Removal of a cationic dye from aqueous solution by adsorption on to bassorin hydrogel. *Moroccan Journal of Chemistry* . ۳۳۲–۳۱۸ (۲۰۲۳) ۲–۱۱ , (۲)۱۱ ,
- [25] J. Nilsen-Nygaard, S. P. Strand, K. M. Vårum, K. I. Draget, and C. T. Nordgård. (2015). Chitosan: Gels and interfacial properties. *Polymers*, 7(3), 552–579 .
- [26] Y. Li *et al.* (2013). Methylene blue adsorption on graphene oxide/calcium alginate composites. *Carbohydrate polymers*, 95(1), 501–507 .
- [27] G. A. El Naeem, A. Abd-Elhamid, O. O. Farahat, A. A. El-Bardan, H. M. Soliman, and A. Nayl. (2022). Adsorption of crystal violet and methylene blue dyes using a cellulose-based adsorbent from sugarcane bagasse: characterization, kinetic and isotherm studies. *Journal of Materials research and technology*, 19, 3241–3254 .

- [28] A. Bondarev and C.-G. Gheorghe. (2022). Adsorptive removal of crystal violet dye from aqueous solutions using natural resource systems. *Desalination and Water Treatment*, 264, 215–223 .
- [29] H. S. Al-Shehri, E. Almudaifer, A. Q. Alorabi, H. S. Alanazi, A. S. Alkorbi, and F. A. Alharthi. (2021). Effective adsorption of crystal violet from aqueous solutions with effective adsorbent: equilibrium, mechanism studies and modeling analysis. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 214–226 .
- [30] R. Foroutan, S. J. Peighambaroust, S. H. Peighambaroust, M. Pateiro, and J. M. Lorenzo. (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 .
- [31] P. V. Sierra-Trejo, E. Guibal, and J. F. Louvier-Hernández. (2020). Arsenic sorption on chitosan-based sorbents: comparison of the effect of molybdate and tungstate loading on As (V) sorption properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 28, 934–947 .
- [32] A. Abjadi and S. Azadi. (2021). Numerical Investigation of working parameters effect on the sensible effectiveness of heat wheel. *Journal of Mechanical Research and Application*, 11(3), 51–66 . (in Persian)
- [33] P. L. Homagai, R. Poudel, S. Poudel, and A. Bhattarai. (2022). Adsorption and removal of crystal violet dye from aqueous solution by modified rice husk. *Heliyon*, 8 (4).
- [34] J. O. Quansah *et al.* (2020). Nascent rice husk as an adsorbent for removing cationic dyes from textile wastewater. *Applied Sciences*, 10(10), 3437 .
- [35] F. Ogata, K. Sugimura, N. Nagai, C. Saenjum, K. Nishiwaki, and N. Kawasaki. (2024). Adsorption efficiency of crystal violet from the aqueous phase onto a carbonaceous material prepared from waste cotton and polyester. *RSC Sustainability*, 2(1), 179–186 .
- [36] I. Rani, S. G. Warkar, and A. Kumar. (2023). Removal of Cationic Crystal Violet dye using Zeolite-Embedded Carboxymethyl Tamarind Kernel Gum (CMTKG) based Hydrogel Adsorbents. *ChemistrySelect*, 8(29), e202301434.

