

MXene/MIL-101 Nanocomposite with Octahedral and Rod-like Morphology: Synthesis and Application in Rhodamine B Removal

Maryam Fayazi^{*1}, Saeideh Eslaminejad²

1- Department of Environment, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, P.O. Box: 76315-117, Kerman, Iran

2- Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology, P.O. Box: 16846-13114, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06-06-2026

Accepted: 23-09-2026

Available online: 10-10-2026

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2026.167811.1286

Keywords:

MXene/MIL-101 nanocomposite

Rhodamine B

Water treatment

Removal

Morphology

ABSTRACT

In this study, MXene/MIL-101 nanocomposites with two different morphologies, octahedral (via solvothermal method) and rod-like (via reflux method), were synthesized. The synthesized products were characterized using XRD, FTIR, and SEM analyses. The results of the structural analyses showed that the synthesis method has a significant effect on the morphology of the nanocomposites, such that the solvothermal synthesis led to the formation of octahedral particles, while the reflux method produced rod-like particles. Rhodamine B adsorption experiments demonstrated that both nanocomposites exhibit high performance in dye removal. Furthermore, the nanocomposite with octahedral morphology showed a higher removal efficiency (about 93%) compared to the rod-like morphology (about 85%). The maximum adsorption capacity under optimal conditions (i.e., pH = 7, adsorbent dosage = 0.05 g, and contact time = 50 min) was found to be 61.73 mg g⁻¹ for the adsorbent synthesized via the solvothermal method. The kinetic data were analyzed using the Lagergren pseudo-first-order and pseudo-second-order equations, and the pseudo-second-order model showed the best fit for the kinetic studies ($R^2 > 0.99$). Moreover, the reusability study showed that the proposed adsorbent retains its favorable performance even after six adsorption-regeneration cycles. Finally, the findings of this study indicate that the MXene/MIL-101 nanocomposite synthesized via the solvothermal method is an efficient adsorbent for the removal of organic dyes and can play an effective role in the development of novel water treatment technologies.

*Corresponding author: * m.fayazi@kgut.ac.ir



نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 با ریخت هشت وجهی و میله‌ای: سنتز و کاربرد در حذف رودامین بی

مریم فیاضی^{۱*}، سعیده اسلامی نژاد^۲

۱- دانشیار، گروه پژوهشی محیط زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، صندوق پستی: ۷۶۳۱۵-۱۱۷

۲- دانش آموخته دکتری، دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۸۴۶-۱۳۱۱۴

چکیده

در این پژوهش، نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 با دو ریخت متفاوت هشت وجهی (روش سلووترمال) و میله‌ای (روش تقطیر برگشتی) سنتز شد. محصولات سنتز شده با استفاده از آزمون‌های FT-IR، XRD و SEM شناسایی شدند. نتایج حاصل از آزمون‌های ساختاری نشان داد که روش سنتز تأثیر قابل توجهی بر ریخت نانوکامپوزیت‌ها دارد، به طوری که سنتز سلووترمال منجر به تشکیل ذرات هشت وجهی شد، در حالی که روش تقطیر برگشتی ذرات میله‌ای ایجاد کرد. آزمایش‌های جذب رودامین بی نشان دادند که هر دو نانوکامپوزیت عملکرد بالایی در حذف رنگزا دارند. همچنین، نانوکامپوزیت با ریخت هشت وجهی بازده حذف بالاتری (حدود ۹۳ درصد) نسبت به ریخت میله‌ای (حدود ۸۵ درصد) نشان داد. بیشینه ظرفیت جذب تحت شرایط بهینه (از قبیل pH=۷، مقدار جاذب=۰/۰۵ گرم و زمان تماس=۵۰ دقیقه) مقدار ۶۱/۷۳ mg g⁻¹ برای جاذب سنتز شده به روش سلووترمال به دست آمد. داده‌های سینتیکی با استفاده از معادله شبه مرتبه اول و شبه دوم لاگرگرن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مدل شبه مرتبه دوم بهترین تناسب را برای مطالعات سینتیکی نشان داد ($R^2 > 0/99$). علاوه بر این، بررسی قابلیت استفاده مجدد نشان داد که جاذب پیشنهادی پس از شش چرخه جذب و بازیابی همچنان عملکرد مطلوب خود را حفظ می‌کند. در نهایت، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال، جاذبی کارآمد برای حذف رنگ‌های آلی بوده و می‌تواند در توسعه فناوری‌های نوین تصفیه آب نقش مؤثری ایفا کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۷/۱۸

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2026.167811.1286

واژه‌های کلیدی:

نانوکامپوزیت MXene/MIL-101

رودامین بی

تصفیه آب

حذف

ریخت

*Corresponding author: * m.fayazi@kgut.ac.ir



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، آلودگی منابع آبی به رنگزاهای آلی مصنوعی به ویژه رودامین بی به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و بهداشتی در سطح جهانی تبدیل شده است (۱). رودامین بی به عنوان یک رنگزای کاتیونی سنتزی با ساختار پیچیده، در صنایع نساجی، رنگرزی، کاغذسازی و مواد آرایشی به طور گسترده استفاده می‌شود و به دلیل پایداری شیمیایی بالا و قابلیت حل شدن در آب، به سختی تجزیه می‌شود. حضور این رنگزا در منابع آبی موجب کاهش نفوذ نور، اختلال در فرایند فتوسنتز گیاهان آبزی و کاهش سطح اکسیژن محلول می‌شود که نهایتاً تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان‌ها ایجاد می‌کند (۲). علاوه بر این، رودامین بی به دلیل خواص سرطان‌زا و جهش‌زای خود می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان داشته باشد، از جمله می‌توان به مسمومیت عصبی، اختلالات سیستم تنفسی و کاهش باروری اشاره کرد. بنابراین، توسعه روش‌های مؤثر و پایدار برای حذف این آلاینده‌ها از منابع آبی امری ضروری است (۳، ۴). روش‌های مختلفی، شامل روش‌های فیزیکی (مانند جذب سطحی)، روش‌های شیمیایی (نظیر اکسایش پیشرفته) و روش‌های زیستی برای حذف رنگزاهای آلی از منابع آبی معرفی شده‌اند (۵-۷). روش جذب سطحی به دلیل سادگی در طراحی و عملکرد مناسب، یک راهبرد امیدوارکننده در بین این روش‌ها است (۸).

چارچوب‌های آلی - فلزی (MOF) به عنوان مواد متخلخل با سطح ویژه بالا، ظرفیت جذب قابل توجه و ساختار قابل تنظیم، گزینه‌ای بسیار مناسب برای حذف آلاینده‌ها هستند. این مواد از یون‌های فلزی یا خوشه‌های فلزی متصل به لیگاند‌های آلی تشکیل شده و شبکه‌ای سه‌بعدی و پیچیده ایجاد می‌کنند که موجب افزایش سطح تماس و قابلیت جذب بالای آن‌ها می‌شود (۹، ۱۰). MIL-101 یکی از پرکاربردترین MOFها است که به دلیل پایداری بالا، سطح ویژه وسیع و ظرفیت جذب مناسب، کاربردهای گسترده‌ای در ذخیره‌سازی گاز و تصفیه آب دارد (۱۱، ۱۲). MIL-101 به‌ویژه برای جذب و حذف آلاینده‌هایی مانند رنگ‌های آلی، داروهای مقاوم به تجزیه و فلزات سنگین از آب کاربرد دارد و می‌تواند ظرفیت بالا، انتخاب‌پذیری مناسب و پایداری محیطی ارائه دهد (۱۳).

علاوه بر این، ترکیب MOFها با دیگر مواد می‌تواند ویژگی‌های عملکردی آن‌ها را بهبود بخشد (۱۴، ۱۵). MXene، یک ماده نانویی دوبعدی با رسانایی بالا، سطح ویژه بزرگ و پایداری خوب در آب، در حذف آلاینده‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند و می‌تواند با ترکیب با MOFها، عملکرد جذب آن‌ها را ارتقا دهد (۱۶). نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 به دلیل ترکیب مزایای MXene و MIL-101، عملکرد بالاتر، ظرفیت جذب بیشتر و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی بهبود یافته‌ای را ارائه می‌دهند که آن‌ها را به ابزار مؤثری برای حذف

رنگزاهای و آلاینده‌های مختلف از منابع آبی تبدیل می‌کند (۱۷).

روش‌های سنتز MOFها نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری ریخت، اندازه ذرات و ویژگی‌های سطحی آن‌ها دارند و در نتیجه به‌طور مستقیم بر کارایی جذب آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارند. استفاده از روش سلووترمال/هیدروترمال معمولاً منجر به تشکیل ذرات با ساختار منظم‌تر و سطح ویژه بالا می‌شود، در حالی که روش تقطیر برگشتی شرایط ملایم‌تری ایجاد کرده و می‌تواند ذرات با ریخت متفاوت، مانند میله‌ای یا هشت‌وجهی، تولید کند که این تفاوت‌ها در ریخت بر درصد حذف آلاینده اثرگذار است (۱۹، ۱۸).

MXene به عنوان نسل جدیدی از مواد دوبعدی با ساختار لایه‌ای، به دلیل وجود گروه‌های عاملی سطحی فعال، رسانایی الکتریکی بالا، مساحت سطح قابل توجه و قابلیت تبادل یون به‌صورت گسترده در فرایندهای حذف آلاینده‌ها استفاده می‌شود (۲۰). علاوه بر این، MXene به علت پایداری شیمیایی مناسب، فرایند سنتز نسبتاً ساده و قابلیت اصلاح سطحی، گزینه‌ای بسیار ارزشمند برای ترکیب با MOFها محسوب می‌شود (۲۱). به‌طور کلی، برهم‌کنش میان MOF و MXene در ساختار نانوکامپوزیت‌های ترکیبی می‌تواند از طریق سازوکار الکترواستاتیک (بین سطح باردار ورقه‌های MXene با یون‌های فلزی یا پیش‌ماده‌های MOF با بار مخالف) شروع شود و همچنین پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های π - π منجر به پایداری ساختار این کامپوزیت‌ها می‌شوند (۲۲). ترکیب MXene با MOFها می‌تواند منجر به ایجاد نانوکامپوزیت‌هایی با هم‌افزایی عملکردی شود که در آن، MXene مسیرهای انتقال بار سریع‌تر، افزایش جذب الکترواستاتیکی و بهبود پایداری ساختاری را فراهم می‌کند، در حالی که MOF سطح ویژه و تخلخل بالا را ارائه می‌دهد. این هم‌افزایی موجب توسعه جاذب‌های کارآمدتر، بادوام‌تر و با ظرفیت جذب بالاتر در حذف آلاینده‌های آبی می‌شود (۲۳). مطالعات قبلی نشان داده‌اند که برخی جاذب‌های مبتنی بر MOF یا MXene ممکن است محدودیت‌هایی نظیر پایداری پایین در شرایط محیطی مختلف و هزینه بالای تولید داشته باشند، که نیاز به بهینه‌سازی بیشتر و ترکیب هوشمندانه مواد را ضروری می‌کند (۲۴، ۲۵).

در این تحقیق، نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 با دو ریخت متفاوت با روش سلووترمال و روش تقطیر برگشتی سنتز شدند. عملکرد نانوکامپوزیت‌های سنتزی در حذف رودامین بی از محلول آبی مطالعه گردید. سینتیک جذب، ایزوترم جذب و قابلیت استفاده مجدد جاذب پیشنهادی نیز مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با آخرین بررسی‌ها حذف رودامین بی با جاذب MXene/MIL-101 هنوز مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا، انتظار می‌رود مطالعه حاضر زمینه را برای توسعه جاذب‌های کارآمد در تصفیه آب و فاضلاب فراهم سازد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی

برای سنتز نانوکامپوزیت MXene/MIL-101، از مواد شیمیایی با خلوص بالا استفاده شد. ترفتالیک اسید و کلرید آهن (III) ۵ آبه به عنوان پیش سازهای اصلی چارچوب آلی - فلزی MIL-101، دی متیل فورمامید (DMF) به عنوان حلال واکنش و متانل برای شستشو و خالص سازی نانوکامپوزیت از شرکت مرک (آلمان) تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. MXene از شرکت ردوکس کالا (ایران) تهیه شد. همچنین، رنگ رودامین بی تهیه شده از شرکت مرک (آلمان) برای آزمایش های جذب و ارزیابی کارایی نانوکامپوزیت در حذف آلاینده رنگی به کار گرفته شد. تمامی مواد بدون انجام هیچ فرآوری یا خالص سازی اضافی مورد استفاده قرار گرفتند و شرایط نگهداری استاندارد برای حفظ خلوص و پایداری آن ها رعایت شد. انتخاب این مواد و حلال ها با توجه به قابلیت های شیمیایی، پایداری ساختاری و توانایی ایجاد تعامل های مؤثر بین MOF و MXene انجام شد تا نانوکامپوزیتی با ظرفیت جذب بالا و عملکرد مطلوب حاصل گردد.

۲-۲- وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی

ریخت شناسی نانوکامپوزیت ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, KYKY, EM8000F) بررسی شد. گروه های عاملی سطحی ترکیبات توسط طیف سنج فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR- 8400S, Shimadzu) مورد بررسی قرار گرفت. پتانسیل زتا به وسیله دستگاه پتانسیل زتا (Zeta View, articleMetrix) اندازه گیری شد. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) با دستگاه JEOL JDX-8030 ثبت گردید و طیف های جذب UV محلول آلاینده با استفاده از طیف سنج (Shimadzu UV-1700) اندازه گیری شدند. برای سنتز سلووترمال، اتوکلاو استیل (حجم ۵۰ سی سی) مقاوم در برابر فشار استفاده شد و در سنتز تقطیر برگشتی از بالن ۱۰۰ میلی لیتری مجهز به منبع حرارت کنترل شده و چگالنده بازگرداننده بخار بهره گرفته شد تا دمای حلال در طول واکنش ثابت باقی بماند و بخار DMF به محلول بازگردد. تمامی تجهیزات مطابق استانداردهای آزمایشگاهی و روش های مرسوم برای سنتز نانوکامپوزیت های MXene/MOF مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۳- آماده سازی نانوکامپوزیت MXene/MIL-101

برای سنتز سلووترمال نانوکامپوزیت MXene/MIL-101، ۱ میلی مول H₂BDC و ۱ میلی مول FeCl₃·6H₂O در ۴۰ میلی لیتر DMF حل شدند و پس از ایجاد محلول یکنواخت، ۰/۱ گرم MXene به آن اضافه گردید. مخلوط حاصل به مدت ۱۵ دقیقه با هم زن مغناطیسی هم زده شد تا توزیع یکنواخت MXene در محلول صورت گیرد. سپس محلول در اتوکلاو ریخته شد و در دمای ۱۲۰ درجه

سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. پس از پایان واکنش، بلورهای تیره قهوه ای حاصل خارج شدند و سه مرتبه با DMF و متانل شستشو داده شدند تا ناخالصی ها و حلال های باقی مانده حذف شوند. نمونه ها در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد برای ۱۲ ساعت خشک شدند. این روش منجر به تولید نانوکامپوزیت با ریخت مشخص و سطح ویژه بالا شد که مناسب آزمایش های جذب است.

برای سنتز تقطیر برگشتی نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 همان مقادیر مواد اولیه (۱ میلی مول H₂BDC، ۱ میلی مول FeCl₃·6H₂O و ۰/۱ گرم MXene در ۴۰ میلی لیتر DMF) استفاده شدند. محلول حاصل ۱۵ دقیقه با هم زن مغناطیسی هم زده شد و سپس در یک بالن ۱۰۰ میلی لیتری قرار گرفت. واکنش به مدت ۱۲ ساعت در دمای جوش کنترل شده DMF (۱۵۰± درجه سانتی گراد) انجام شد. در این فرایند، بلورهای MIL-101 بر روی صفحات MXene رشد کردند و نانوکامپوزیت با ریخت متفاوت حاصل شد. پس از پایان واکنش، محلول خنک شد، بلورها صاف و سه مرتبه با DMF و متانل شستشو داده شدند. نمونه ها در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد خشک شدند.

۲-۴- روش کار

به منظور ارزیابی توانایی نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 در حذف رودامین بی از محلول های آبی، آزمایش های جذب ناپیوسته در شرایط کنترل شده انجام گرفت. در این آزمایش ها، نانوکامپوزیت های سنتزی با ریخت متفاوت در شرایط یکسان مورد آزمون قرار گرفتند تا تأثیر ریخت بر کارایی جذب بررسی شود. تمامی آزمایش ها در بالن های مخروطی حاوی ۳۰ میلی لیتر محلول رنگزا، بر روی تکان دهنده مکانیکی با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه و در دمای آزمایشگاه (۲۵ ± ۲ °C) انجام شدند. پس از گذشت زمان لازم برای برقراری تعادل جذب، جاذب ها توسط گریزانه جداسازی شدند و محلول شفاف بالایی برای اندازه گیری غلظت باقی مانده رنگزا به کمک دستگاه طیف سنج ($\lambda_{\text{max}} \approx 554 \text{ nm}$) مورد تحلیل قرار گرفت. هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین داده ها به عنوان نتایج نهایی گزارش گردید تا از صحت و تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود. بازده حذف (R %) از طریق رابطه ۱ محاسبه شد.

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

که در این رابطه C_0 (mg·L⁻¹) غلظت اولیه و C_e (mg·L⁻¹) غلظت تعادلی رنگزا می باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- یافته‌ها

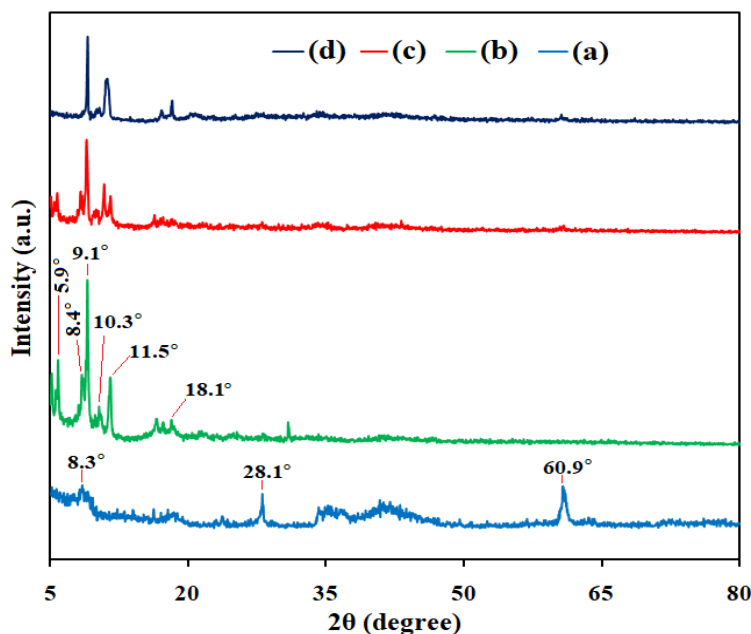
به منظور بررسی ساختار و ویژگی‌های نانوکامپوزیت‌های سنتز شده MXene/MIL-101، از چندین روش شناسایی مکمل استفاده شد. الگوهای XRD به منظور تعیین فازهای بلوری، شناسایی ساختار بلوری و ارزیابی میزان تبلور نمونه‌ها ثبت گردید. آزمون FTIR برای جهت شناسایی گروه‌های عاملی موجود بر سطح جاذب‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین آزمون SEM برای بررسی ریخت و شکل ذرات MOF و بستر مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، نانوکامپوزیت‌های سنتزی با ریخت متفاوت در فرایند حذف رنگزا رودامین بی از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار گرفتند. سپس اثر مقدار عوامل آزمایشگاهی، سنتیک و ایزوترم جذب مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، قابلیت استفاده مجدد هر یک از نانوکامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۲- تعیین مشخصه جاذب

در شکل ۱ الگوهای XRD نمونه‌های MXene، MIL-101 و نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال و تقطیر برگشتی نشان داده شده است. برای MXene (شکل ۱ a)، الگوی XRD قله‌های مختلفی را نشان می‌دهد که در زوایای $8/3^\circ$ ، $9/1^\circ$ و $28/1^\circ$ قرار دارند و به ترتیب با اندیس‌های میلر (۰۰۲)، (۱۱۰) و (۰۰۶) مطابقت دارند (۲۶). در الگوی MIL-101 (شکل ۱ b) نیز قله‌های پراش در نواحی $5/9^\circ$ ، $8/4^\circ$ ، $9/1^\circ$ ، $10/3^\circ$ ، $11/5^\circ$ و $18/1^\circ$ قرار دارند.

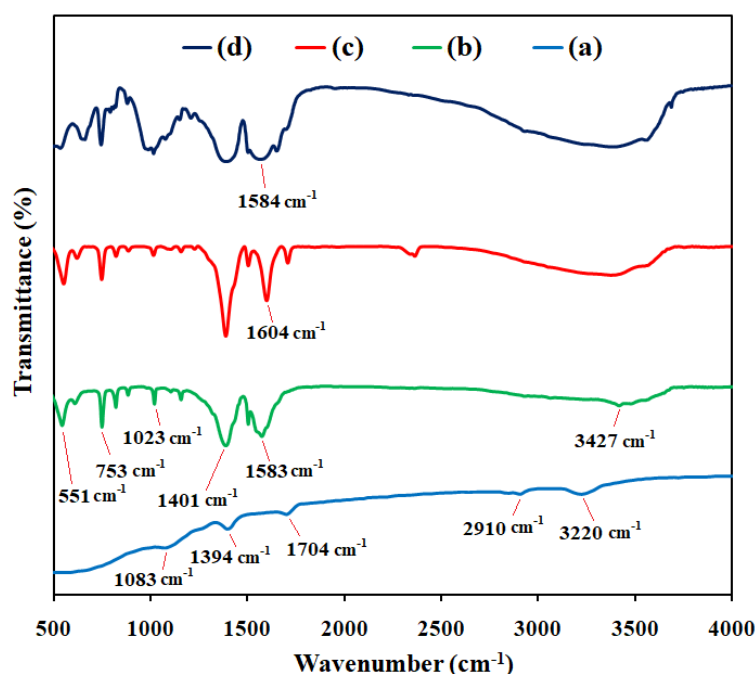
$18/1^\circ$ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده بلورینگی بالای چارچوب آلی فلزی است و با داده‌های گزارش شده در مقالات پیشین همخوانی دارد (۲۷-۲۹). در نانوکامپوزیت‌های سنتزی (شکل‌های ۱ c و ۱ d)، حضور قله‌های نمونه‌های خالص MXene و MIL-101 و کاهش نسبی شدت قله‌ها، تأییدی بر تشکیل نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 و برهم‌کنش بین دو فاز است. این تغییرات بیانگر کاهش نسبی بلورینگی به دلیل توزیع MIL-101 بر روی بستر MXene و ایجاد برهم‌کنش‌های سطحی میان آن‌ها است. همچنین در الگوی XRD نانوکامپوزیت سنتز شده به روش تقطیر برگشتی، شدت برخی قله‌ها نسبت به روش سلووترمال ضعیف‌تر است، که به کاهش درجه بلورینگی MOF در ساختار کامپوزیت اشاره دارد. این رفتار اغلب ناشی از شرایط ملایم‌تر فرایند تقطیر برگشتی است که موجب ایجاد ساختارهایی با نظم کمتر نسبت به روش سلووترمال می‌شود.

در شکل ۲ طیف‌های FTIR برای نمونه‌های MXene، MIL-101 و نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 حاصل از دو روش سنتزی متفاوت (سلووترمال و تقطیر برگشتی) ارائه شده است. در طیف MXene (شکل ۲ a)، قله در موقعیت 1083 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاش کششی پیوند کربن-فلوئور (C-F) نسبت داد که طی فرایند شست‌وشوی اسیدی بر روی نمونه MXene باقی‌مانده است (۳۰). قله 1394 cm^{-1} عمدتاً به ارتعاش خمشی پیوند O-H مربوط به گروه‌های هیدروکسیل سطحی مربوط می‌شود. قله در ناحیه 1704 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاش کششی پیوند دوگانه کربن-اکسیژن (C=O) نسبت داد (۳۱).



شکل ۱: الگوی XRD (a) MXene، (b) MIL-101 و نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش (c) سلووترمال و (d) تقطیر برگشتی.

Figure 1: XRD patterns of (a) MXene, (b) MIL-101, and (c) MXene/MIL-101 nanocomposites synthesized by (c) solvothetmal and (d) reflux methods.



شکل ۲: طیف‌های FTIR (a) MXene، (b) MIL-101 و نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش (c) سلووترمال و (d) تقطیر برگشتی.
Figure 2: FTIR spectra of (a) MXene, (b) MIL-101 and MXene/MIL-101 nanocomposites synthesized by (c) solvothermal and (d) reflux methods.

یافته با گزارش‌های پیشین درباره نقش اتصال میان‌سطحی قوی در نانوکامپوزیت‌های MOF/2D-material بر بهبود انتقال جرم و کارایی جذب همسو است (۳۶، ۲۳). این امر می‌تواند ناشی از شرایط واکنش حاکم بر روش سنتز سلووترمال باشد؛ به‌طوری که دمای بالا و زمان واکنش طولانی‌تر در این روش، محیط مساعدتری برای نفوذ و پراکندگی یکنواخت پیش‌ماده‌های MOF بر روی صفحات MXene و برهم‌کنش مؤثر میان گروه‌های عاملی سطحی دو فاز فراهم می‌آورد. در چنین شرایطی، انرژی حرارتی کافی برای غلبه بر سد فعال‌سازی لازم جهت تشکیل پیوند کئوردیناسیونی میان مراکز فلزی آهن و گروه‌های اکسیژن‌دار سطحی MXene در دسترس است، که این امر می‌تواند به شکل‌گیری برهم‌کنش بین‌فازی قوی‌تر و در نتیجه جایگاه‌های فعال بیشتر و سطح مشترک عملکردی مناسب‌تر برای جذب مولکول رنگزا منجر شود.

در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به MXene و نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال و تقطیر برگشتی در مقیاس‌های مختلف نشان داده شده است. تصویر SEM نمونه MXene (شکل‌های ۳ a و ۳ b)، شکل لایه‌ای آکاردئون‌مانندی را نشان می‌دهد که از نانوصفحات دوبعدی روی هم چیده شده تشکیل شده است. در نمونه نانوکامپوزیت سنتز شده به روش سلووترمال (شکل‌های ۳ c و ۳ d)، ساختاری با ذرات هشت‌وجهی مشاهده می‌شود که به‌طور متراکم آرایش یافته‌اند. این ریخت، ناشی از شرایط دما و فشار بالا در فرایند سلووترمال است که

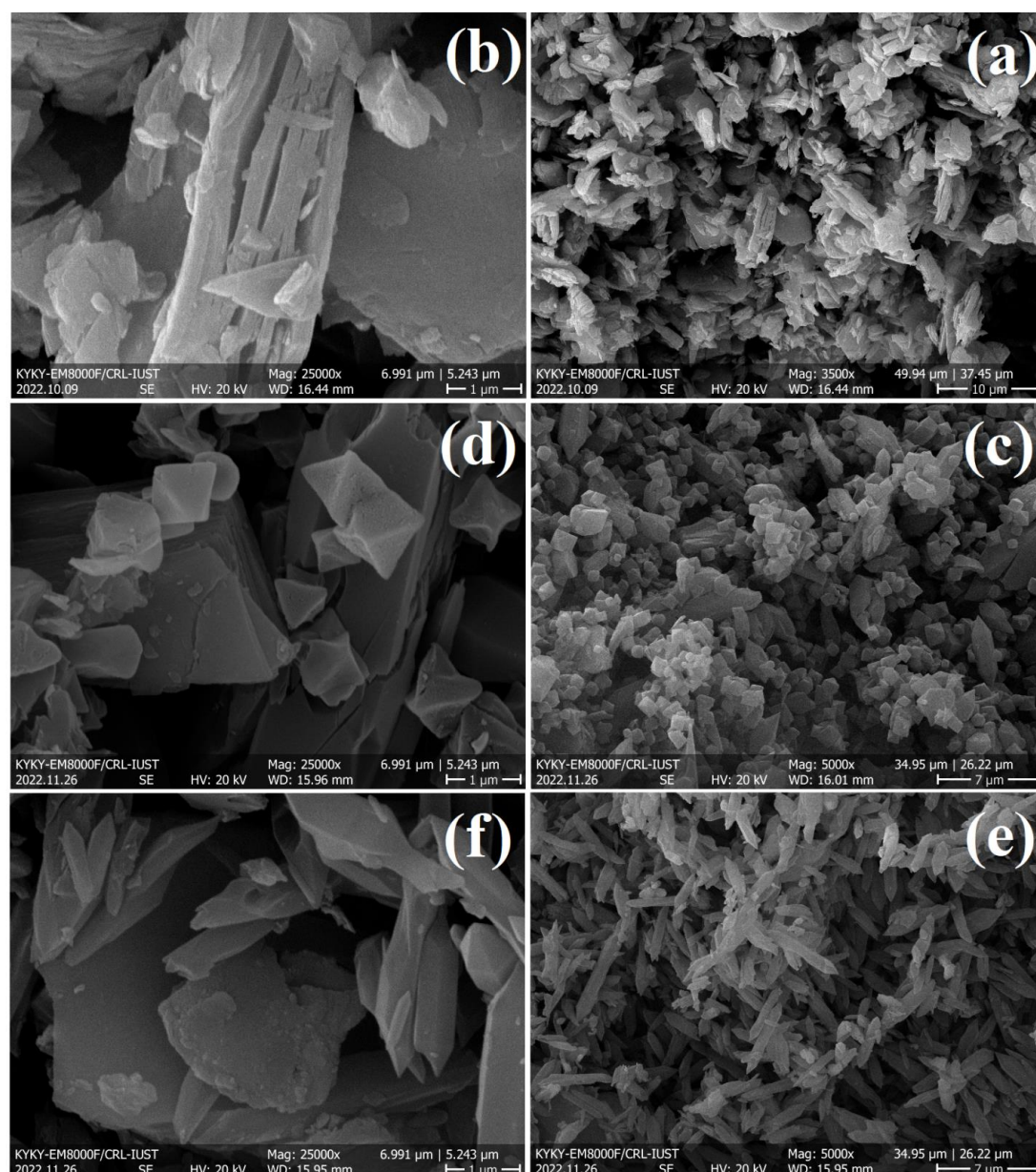
قله در ناحیه 2910 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوند C-H نسبت داده می‌شود. همچنین نوار پهن در محدوده 3220 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوند O-H مربوط به گروه‌های هیدروکسیل سطحی و همچنین مولکول‌های آب فیزیکی جذب‌شده بین لایه‌ای نسبت داده می‌شود (۳۲). در طیف MIL-101 (شکل b ۲)، طیف مشاهده شده در 551 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوند Fe-O در ساختار چارچوب فلز-آلی نسبت داده می‌شود (۳۳). قله 753 cm^{-1} به ارتعاش خمشی خارج‌صفحه‌ای پیوند C-H حلقه بنزنی لیگاند آلی و قله 1023 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوند C-O-C نسبت داده می‌شوند. قله‌های واقع شده در 1401 cm^{-1} و 1583 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن گروه O-C-O هستند که با مقالات گزارش شده مطابقت دارد (۳۴). همچنین نوار پهن مشاهده شده در حوالی 3427 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوند O-H نسبت داده می‌شود که ناشی از حضور گروه‌های هیدروکسیل و همچنین مولکول‌های آب فیزیکی جذب‌شده است. طیف‌های FTIR مربوط به کامپوزیت‌های MXene/MIL-101 ساخته شده به روش سلووترمال و تقطیر برگشتی به ترتیب در شکل‌های ۲ c و ۲ d نشان داده شده است. در طیف مربوط به نمونه کامپوزیت سنتز شده به روش سلووترمال، مکان نوار کربوکسیلات از 1583 cm^{-1} به 1604 cm^{-1} تغییر یافته است. این جابه‌جایی به سمت بسامدهای بالاتر را می‌توان به برهم‌کنش موثرتر در سطح مشترک بستر MXene و ترکیب MIL-101 در روش سلووترمال در مقایسه با روش تقطیر برگشتی نسبت داد (۳۵). این

نانوکامپوزیت‌های سنتز شده، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای ارزیابی درصد حذف رنگزا در مقادیر مختلف pH انجام شد که نتایج آن در شکل a ۴ ارائه شده است. ظرفیت جذبی جاذب‌های سنتز شده با روش سلووترمال و تقطیر برگشتی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر pH قرار دارد. در محدوده pH بین ۲ تا ۹، درصد حذف رنگزا ابتدا افزایش چشمگیر و سپس کاهش ملایمی می‌یابد و در pH حدود ۷ به بیشینه خود می‌رسد. در pH های اسیدی، پروتون‌دار شدن گروه‌های عاملی سطح، ماهیت مثبت کامپوزیت را افزایش می‌دهد. و از آنجا که رنگ رودامین‌بی در محیط اسیدی عمدتاً به صورت گونه کاتیونی وجود دارد،

امکان تبلور بهتر، رشد همگن‌تر و ایجاد ساختارهای با تقارن بیشتر را فراهم می‌کند (۳۷). در مقابل، تصاویر SEM مربوط به روش تقطیر برگشتی (شکل‌های e ۳ و f ۳) بیانگر تشکیل ساختارهای میله‌ای از MOF است که به صورت متراکم بر روی بستر نشانده شده‌اند. به‌طور کلی، مقایسه تصاویر SEM نشان می‌دهد که روش سنتز، تأثیر مستقیم و تعیین‌کننده‌ای بر ریخت نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 دارد.

۳-۳- بررسی جذب سطحی

به منظور تعیین pH بهینه برای جذب رودامین‌بی توسط



شکل ۳: تصاویر SEM (a, b) MXene، نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش (c, d) سلووترمال و (e, f) تقطیر برگشتی.

Figure 3: SEM images of (a, b) MXene and MXene/MIL-101 nanocomposites synthesized by (c, d) solvothermal and (e, f) reflux methods.

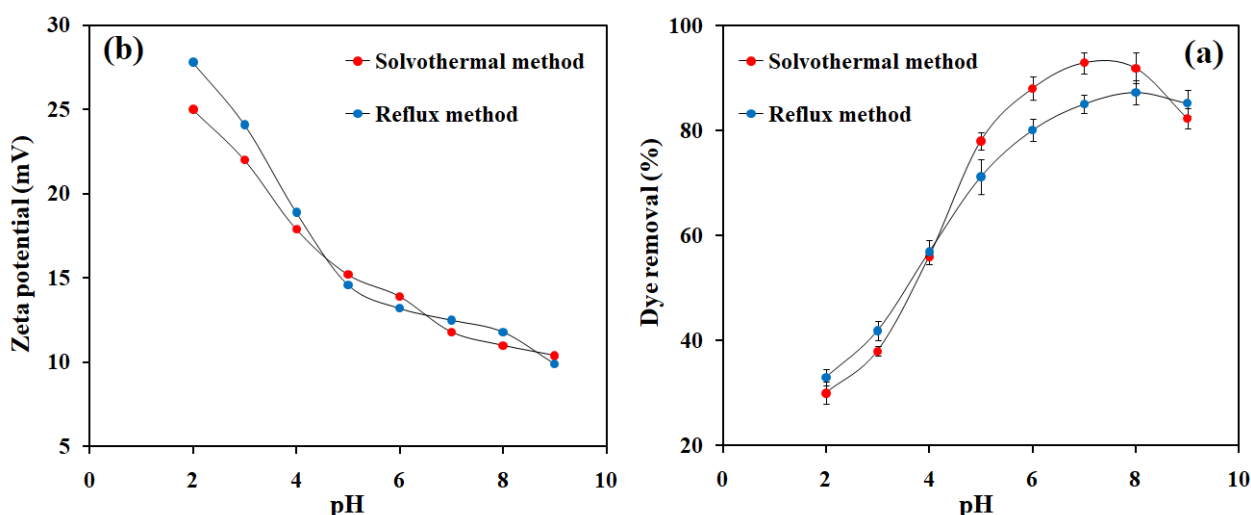
را کاهش دهد. علاوه بر این، احتمال تشکیل تجمع‌های مولکولی رنگزای رودامین بی در pHهای بالاتر می‌تواند دسترسی مولکول‌های رنگزا به برخی منافذ و جایگاه‌های داخلی را محدود کند و منجر به کاهش بازده حذف شود.

عملکرد جذبی نانوکامپوزیت‌های سنتز شده به همراه اجزای آن‌ها (MXene و MIL-101) برای رنگزای رودامین بی در pH بهینه مقایسه شد که نتایج آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کامپوزیت‌های سنتزی عملکرد جذبی بهتری نسبت به نمونه‌های MXene و MIL-101 ارائه دادند. همچنین نانوکامپوزیت سنتز شده به روش سلووترمال عملکرد جذبی مطلوب‌تری از جاذب آماده‌شده به روش تقطیر برگشتی نشان داد. این افزایش احتمالاً به دلیل توزیع منظم‌تر و دسترسی مناسب‌تر جایگاه‌های فعال برای جذب مولکول رنگزا در نمونه MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال است.

اثر مقدار جاذب بر میزان رنگ جذب‌شده با جاذب در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از بررسی اثر میزان جاذب روی فرایند جذب رودامین بی در شکل ۶ نشان داده شده است. ابتدا با افزایش میزان جاذب به دلیل اینکه مساحت سطح بیشتر و در نتیجه مکان‌های جذب بیشتری در اختیار است جذب سطحی افزایش پیدا می‌کند. اما این میزان از یک حد به بعد روند ثابتی پیدا می‌کند که می‌توان آن را به عنوان مقدار بهینه جاذب در نظر گرفت. بنابراین مقدار ۰/۰۵ گرم جاذب در آزمایشات بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

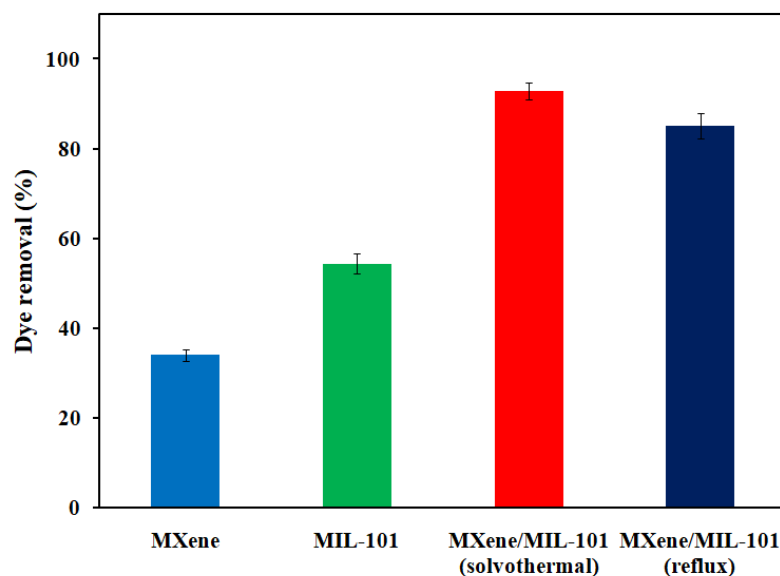
دافعه الکترواستاتیکی بین سطح جاذب و رنگزا موجب کاهش جذب می‌شود. با افزایش pH به سمت ۷، پروتون‌زدایی تدریجی گروه‌های سطحی باعث کاهش بار مثبت و در نتیجه کاهش دافعه الکترواستاتیکی می‌شود. این شرایط، همراه با سایر برهم‌کنش‌های سطحی (نظیر پیوند هیدروژنی و برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$)، محیط مناسب‌تری برای جذب رنگزا فراهم می‌کند و می‌تواند دلیل جذب بیشینه در pH=۷ باشد.

منحنی پتانسیل زتا برای نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال و تقطیر واکنشی در محدوده pH بین ۲ تا ۹ در شکل ۴b به تصویر کشیده شده است. مطابق شکل، پتانسیل زتای مثبت برای هر دو جاذب از pH ۲ تا ۹ کاهش نشان داد، اما حتی در pH=۹ نیز سطح کامپوزیت همچنان مثبت باقی می‌ماند. بنابراین، جذب رنگزا را نمی‌توان صرفاً بر اساس جاذبه الکترواستاتیکی بین یک سطح کاملاً منفی و رنگ کاتیونی توضیح داد. با این حال کاهش در بار مثبت سطحی منجر به کاهش دافعه الکترواستاتیکی می‌شود و منجر به جذب رنگزا بهتر در pHهای بالاتر می‌شود. مطابق نتایج، از pH ۷ تا ۹ بازده جذب رنگزا کاهش نسبی می‌یابد که احتمالاً به دلیل افزایش سهم گونه‌های زویتریونی رنگ رودامین بی است (۳۸) که می‌تواند ویژگی کاتیونی مؤثر مولکول رنگزا را کاهش دهد. بنابراین، اگرچه افزایش pH موجب کاهش بار مثبت سطح می‌شود، افزایش سهم گونه‌های زویتریونی می‌تواند جاذبه الکترواستاتیکی مؤثر بین رنگزای کاتیونی و جایگاه‌های مناسب سطح



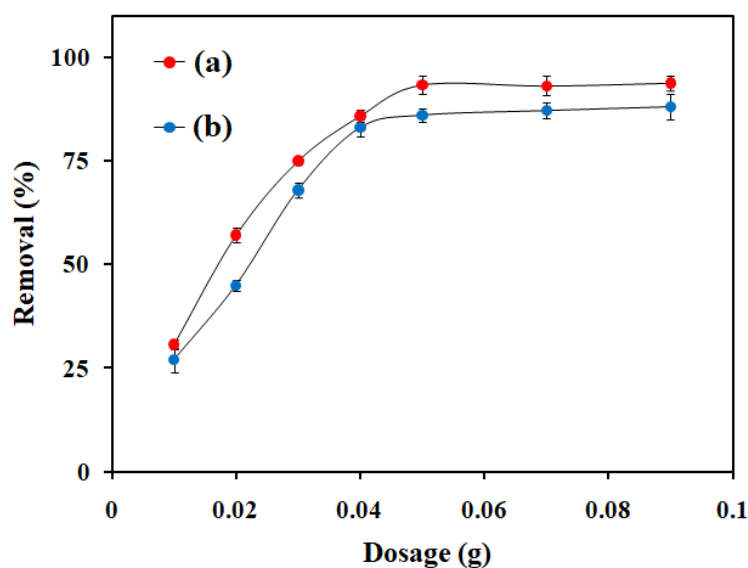
شکل ۴: (a) اثر pH بر حذف رودامین بی با استفاده از نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال و تقطیر برگشتی (شرایط: مقدار جاذب=۰/۰۵ گرم و زمان تماس=۵۰ دقیقه) و (b) مقادیر پتانسیل زتای نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال و تقطیر برگشتی در pHهای مختلف.

Figure 4: (a) Effect of pH on removal of Rhodamine B using MXene/MIL-101 nanocomposites synthesized by solvothermal and reflux methods (Conditions: adsorbent dosage=0.05 g and contact time=50 min), and (b) Zeta potential values of MXene/MIL-101 nanocomposites synthesized by the solvothermal and reflux methods at various pH levels.



شکل ۵: بازده حذف رنگزای رودامین بی توسط جاذب‌های مختلف (شرایط: pH=7، مقدار جاذب=0.05 گرم و زمان تماس=50 دقیقه)

Figure 5: Rhodamine B dye removal efficiency by different adsorbents (Conditions: pH=7, adsorbent dosage=0.05 g and contact time=50 min).



شکل ۶: اثر مقدار جاذب بر حذف رودامین بی با استفاده از نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال.

Figure 6: Effect of adsorbent dosage on Rhodamine B removal using MXene/MIL-101 nanocomposite synthesized by solvothermal method.

محلول به سمت سطح خارجی کامپوزیت MXene/MIL-101 است. با اشغال تدریجی جایگاه‌های فعال سطحی، انتقال مولکول‌های رنگزا به جایگاه‌های جذب داخلی محدودتر شده و فرایند انتشار با سرعت کمتری انجام می‌شود. این فرایند انتشار آهسته، موجب کاهش سرعت جذب رودامین بی در مرحله دوم می‌شود. در نهایت پس از ۵۰ دقیقه تعادل جذب برقرار شد و این زمان به عنوان زمان تماس بهینه در آزمایشات بعدی در نظر گرفته شد. تغییرات طیف UV-Vis در طول

تأثیر زمان تماس درصد حذف رودامین بی توسط نانوکامپوزیت های سنتزی در بازه زمانی ۰ تا ۹۰ دقیقه بررسی شد و نتایج در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فرایند جذب رنگزا توسط هر دو جاذب از یک سازوکار دو مرحله‌ای پیروی می‌کند که شامل جذب سریع اولیه رنگزا (۳۰ دقیقه اول) و به دنبال آن مرحله دوم با سرعت جذب کمتر (بین ۳۰ تا ۵۰ دقیقه) است. سرعت بالای حذف در مراحل اولیه احتمالاً ناشی از انتشار سریع مولکول‌های رنگ از

مدل شبه مرتبه دوم از رابطه ۳ پیروی می‌کند. در این معادله از شیب و عرض از مبدأ منحنی t/q_t در مقابل t برای محاسبه ثابت سرعت استفاده می‌شود (شکل b ۸) (۳۹).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

که q_t (mg) مقدار ماده جذب شده در حالت تعادل، q_e (mg g⁻¹) مقدار ماده جذب شده در زمان t و K_1 (1 min⁻¹) و K_2 (g mg⁻¹ min⁻¹) ثابت سرعت جذب است. عوامل سینتیکی هر دو مدل در جدول ۱ آورده شده است.

مطالعات ایزوترم می‌توانند نحوه برهم‌کنش ماده جذب‌شونده با جاذب را توصیف کند. به‌منظور بررسی ایزوترم جذب، مقدار ماده جذب‌شده در جاذب به عنوان تابع غلظت در دمای ثابت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است.

فرایند جذب رودامین بی توسط نانوکامپوزیت سنتز شده به روش سلووترمال نیز در داخل شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت قله‌های جذبی در طول موج ۵۵۴ نانومتر با افزایش زمان تماس کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده جذب موثر غلظت مولکول‌های رودامین بی توسط جاذب پیشنهادی است.

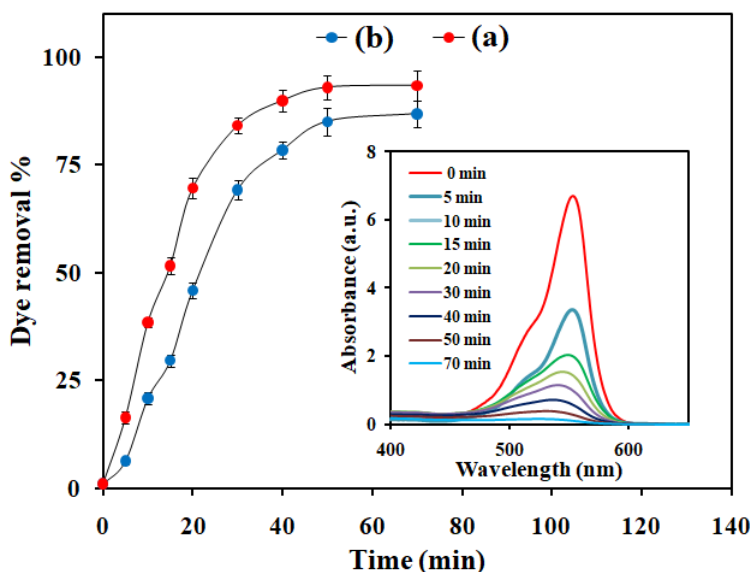
در ادامه با استفاده از نمودار زمان، سینتیک جذب مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از دو مدل سینتیکی که به‌طور گسترده استفاده می‌شوند، یعنی مدل شبه مرتبه اول و مدل شبه مرتبه دوم برای بررسی رفتار سینتیکی جذب رنگزای رودامین بی استفاده شد. تطابق بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده بوسیله مدل با محاسبه ضریب همبستگی و با رعایت این نکته که ظرفیت جذب تجربی نزدیک به مقدار تئوری باشد، مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر مربوط به مدل شبه مرتبه اول از رابطه ۲ محاسبه شد (شکل a ۸).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (2)$$

جدول ۱: عوامل سینتیکی جذب رودامین بی بر روی سطح جاذب.

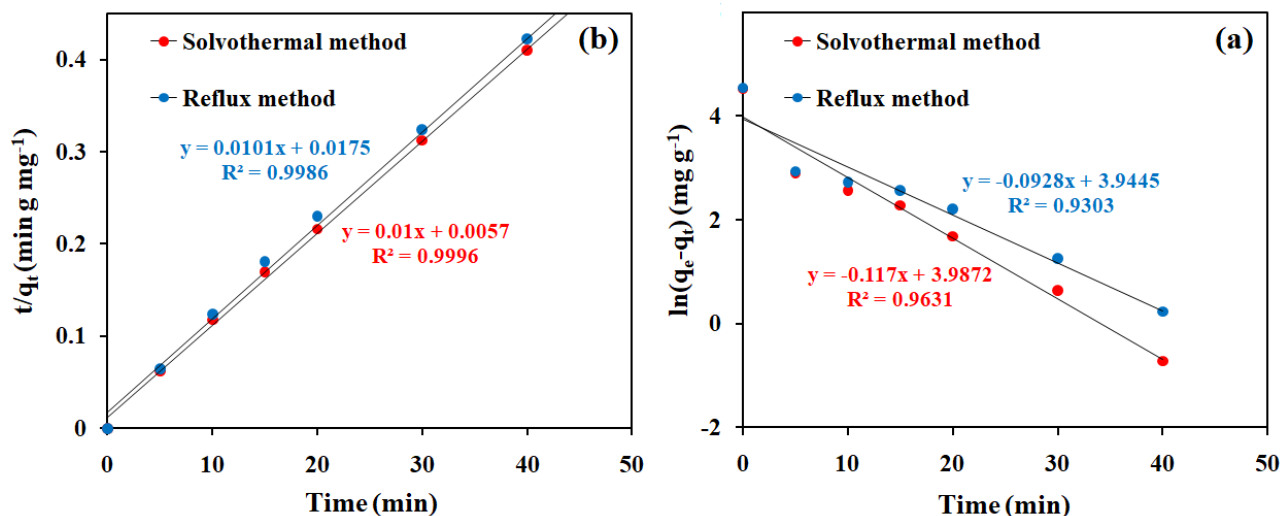
Table 1: Kinetic parameters for adsorption of Rhodamine B onto adsorbent surface.

Synthesis method	Pseudo-first-order		pseudo-second-order	
	K_1 (1min ⁻¹)	R^2	K_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	R^2
Solvothermal	0.117	0.9631	0.017	0.9986
Reflux	0.0928	0.9303	0.006	0.9996



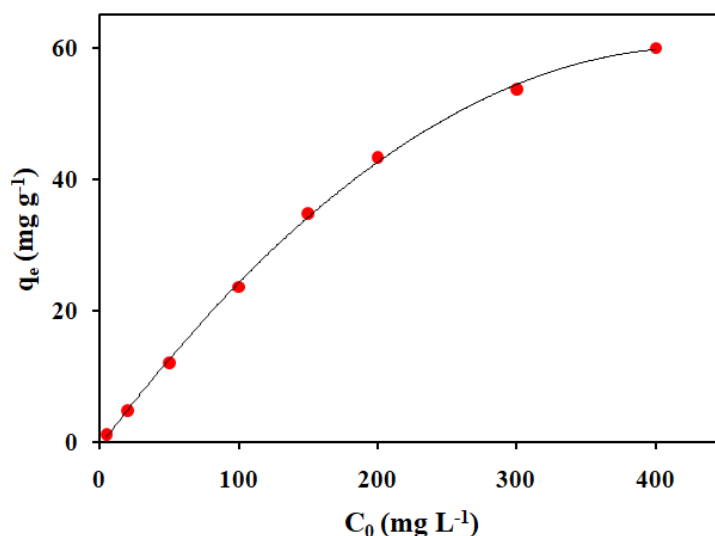
شکل ۷: حذف رودامین بی با استفاده از نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش (a) سلووترمال و (b) تقطیر برگشتی در شرایط بهینه. نمودار داخل طیف UV-Vis جذب رودامین بی توسط MXene/MIL-101 سنتز شده با روش سلووترمال را نشان می‌دهد.

Figure 7: Removal of Rhodamine B using MXene/MIL-101 nanocomposites synthesized by (a) solvothermal, and (b) reflux methods in optimal conditions. Inset shows UV-Vis absorption spectrum of Rhodamine B by MXene/MIL-101 synthesized by solvothermal method.



شکل ۸: (a) سنتیک شبه مرتبه اول و (b) سنتیک شبه مرتبه دوم حذف رودامین بی با استفاده از نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101.

Figure 8: (a) Pseudo-first-order kinetics, and (b) pseudo-second-order kinetics of Rhodamine B removal using MXene/MIL-101 nanocomposites.



شکل ۹: ایزوترم جذب رودامین بی روی نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال.

Figure 9: Adsorption isotherm of Rhodamine B on MXene/MIL-101 nanocomposite synthesized by solvothermal method.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

ایزوترم تمکین نیز برای جذب رودامین بی توسط نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 اعمال شد (شکل ۱۰ c). این مدل با فرم خطی زیر (رابطه ۶) ارائه می‌شود:

$$q_e = B_T \ln K_T + B_T \ln C_e \quad (6)$$

در روابط فوق، C_e (mg L⁻¹) غلظت تعادلی آنالیت در محلول، q_e (mg g⁻¹) مقدار جذب شده به ازای واحد وزن جاذب، q_{max} ظرفیت جذب بیشینه تئوری، K_L (L mg⁻¹) ثابت لانگمویر،

ایزوترم‌های لانگمویر، فرن‌دلیچ و تمکین به طور وسیعی برای توصیف فرایند جذب در حد فاصل جامد-مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت به دست آوردن ثابت‌های لانگمویر طبق رابطه ۴ نمودار C_e/q_e بر حسب C_e رسم و نتایج در شکل ۱۰ a گزارش شده است.

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

ایزوترم فرن‌دلیچ از رابطه ۵ پیروی می‌کند و جهت به دست آوردن ثابت‌های فرن‌دلیچ نمودار $\ln q_e$ بر حسب $\ln C_e$ رسم شده است (شکل ۱۰ b).

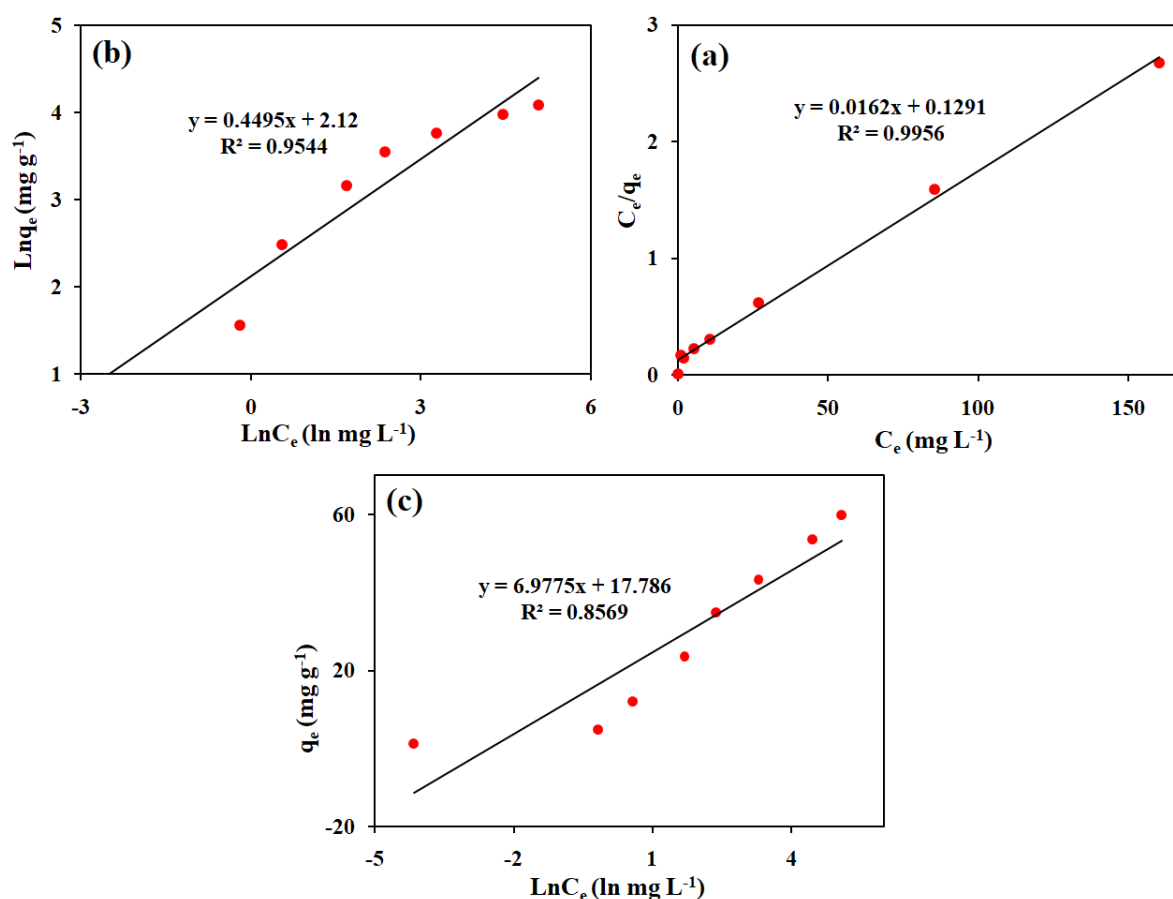
لانگمویر مؤید غالب بودن جذب تک‌لایه است، در حالی که برازش قابل قبول مدل فرندلیچ نیز حاکی از وجود درجه‌ای از ناهمگنی سطحی است. از طرفی، برازش ضعیف‌تر مدل تمکین ($R^2 = 0.8569$) نسبت به لانگمویر و فرندلیچ را می‌توان به این دلیل اصلی نسبت داد که این مدل قادر به توصیف مکانیسم پرشدگی حفرات که در ساختار متخلخل MIL-101 محتمل است، نمی‌باشد.

نتایج حاصل از آنالیز لانگمویر، فرندلیچ و تمکین در جدول ۲ آورده شده است. مقادیر ضریب همبستگی برای مدل لانگمویر، فرندلیچ و تمکین به ترتیب 0.9956 ، 0.9544 و 0.8569 بدست آمد و نشان‌دهنده این واقعیت است که جذب مولکول رودامین بی به خوبی از مدل پیشنهادی لانگمویر پیروی می‌کند. برازش برتر مدل

جدول ۲: عوامل ایزوترم جذب رودامین بی روی نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال.

Table 2: Calculated parameters of adsorption isotherm models of Rhodamine B on MXene/MIL-101 nanocomposite synthesized by solvothermal method.

	K_L ($L \cdot mg^{-1}$)	q_m ($mg \cdot g^{-1}$)	R^2
Langmuir model	0.1255	61.73	0.9956
	K_f ($mg \cdot g^{-1} (L \cdot mg^{-1})^{1/n}$)	n	R^2
Freundlich model	8.33	2.22	0.9544
	B_t	K_t	R^2
Temkin model	6.978	12.81	0.8569



شکل ۱۰: مدل‌های (a) لانگمویر، (b) فرندلیچ و (c) تمکین برای جذب رودامین بی روی نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 سنتز شده به روش سلووترمال.

Figure 10: Models of (a) Langmuir, (b) Freundlich, and (c) Temkin for Rhodamine B adsorption on MXene/MIL-101 nanocomposite synthesized by solvothermal method.

می‌دهد.

قابلیت بازیابی و استفاده مجدد جاذب‌ها یکی از معیارهای کلیدی در کاربردهای محیط‌زیستی برای حذف آلاینده‌های آلی است. در این مطالعه، نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 با دو ریخت هشت‌وجهی و میله‌ای برای حذف رودامین بی از محلول آبی مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌های جذب، جاذب‌ها توسط گریزان جمع‌آوری شده و با اتانل و آب دیونیزه شستشو داده شدند تا رنگ‌زا جذب‌شده به طور کامل از سطح جاذب حذف شود. تمام آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام شده و مقادیر میانگین برای تحلیل استفاده شد. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت سنتز شده به روش سلووترمال قادر بود بدون کاهش قابل توجه در بازده حذف تا شش چرخه بازسازی مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۱۱). این پایداری نشان‌دهنده استحکام شیمیایی و ثبات ساختاری جاذب تحت شرایط بازیابی است.

علاوه بر این، از ویژگی‌های اساسی مدل جذب لانگمویر فاکتور جداسازی (R_L) است که با رابطه ۷ بیان می‌شود:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (7)$$

که K_L ($L \cdot mg^{-1}$) ثابت لانگمویر و C_0 ($mg \cdot L^{-1}$) غلظت اولیه در فاز مایع است. مقدار R_L نشان می‌دهد که شکل ایزوترم نامطلوب ($R_L > 1$)، خطی ($R_L = 1$)، مطلوب ($0 < R_L < 1$) یا برگشت ناپذیر ($R_L = 0$) است. با توجه به اینکه مقادیر R_L گزارش شده در جدول ۳ در محدوده صفر تا یک است، بنابراین جذب رودامین بی بر روی جاذب یک فرایند مطلوب است.

ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد جذب MXene/MIL-101 با برخی جاذب‌های گزارش شده ($40-45$) در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، در مقایسه با سایر جاذب‌های مستند شده در مطالعات قبلی، جاذب پیشنهادی ظرفیت جذب قابل توجهی برای جذب رنگ رودامین بی از خود نشان

جدول ۳: مقادیر فاکتور جداسازی بر اساس معادله لانگمویر.

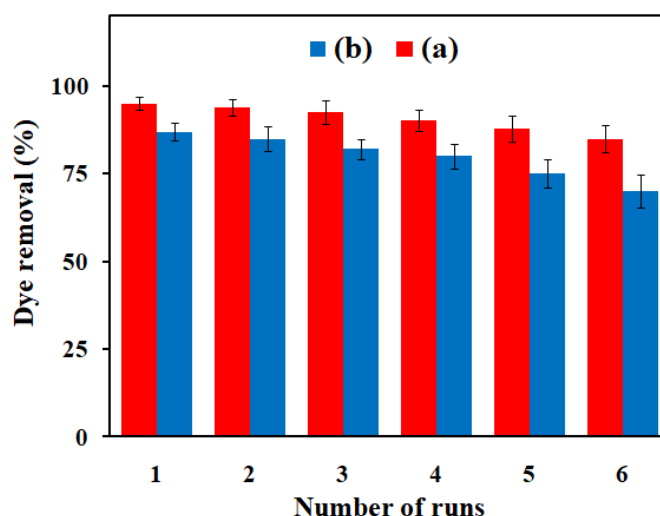
Table 3: Separation factor values based on the Langmuir equation.

Initial concentration ($mg \cdot L^{-1}$)	R_L
20	0.28
50	0.14
100	0.07

جدول ۴: ظرفیت جذب جاذب‌های مختلف برای حذف رنگ رودامین بی.

Table 4: Adsorption capacity of different adsorbents for removal of Rhodamine B dye.

Reference	Adsorption capacity ($mg \cdot g^{-1}$)	Adsorbent type
40	82.12	MoS ₂ /MXene
41	68.49	Coumarin-modified cellulose
42	32.7	Raw Date Seed
43	28.36	Fe ₃ O ₄ /MIL-100
44	16.18	MOF/COF hybrid
45	28.81	Biopolymeric membrane
This work	61.73	MXene/MIL-101



شکل ۱۱: قابلیت استفاده مجدد از نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده به روش الف) سلووترمال و ب) تقطیر برگشتی.

Figure 11: Reusability of MXene/MIL-101 nanocomposites synthesized by (a) solvothermal, and (b) reflux methods.

شکل هشت‌وجهی به دلیل پایداری ساختاری بالاتر، عملکرد بهتری در چرخه‌های متوالی نسبت به فرم میله‌ای از خود نشان داد، که اهمیت ریخت در پایداری و دوام عملیاتی جاذب را آشکار می‌کند. در مجموع، نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 سنتز شده، ترکیبی از کارایی بالای حذف رنگزا، قابلیت بازیابی و انعطاف‌پذیری در ریخت‌های متفاوت را ارائه می‌دهند و به‌عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار برای تصفیه آب‌های آلوده به رنگزاهای آلی، به ویژه رودامین بی، مطرح هستند.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از یک طرح پژوهشی بوده که توسط پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران تحت گرنت شماره ۴۱۵ حمایت شده است. بدینوسیله از همکاری ریاست محترم آن مرکز و همکارانشان تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نانوکامپوزیت‌های MXene/MIL-101 با دو ریخت متفاوت با موفقیت سنتز و برای جذب رنگ رودامین بی از محلول آبی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که این نانوکامپوزیت‌ها دارای ظرفیت جذب بالا، سرعت جذب مناسب و ثبات ساختاری قابل توجه هستند که آن‌ها را به گزینه‌ای مؤثر نسبت به بسیاری از جاذب‌های مرسوم تبدیل می‌کند. تحلیل مقایسه‌ای اثر ریخت نشان داد که شکل هشت‌وجهی به دلیل برهم‌کنش بین‌فازی قوی‌تر و در نتیجه جایگاه‌های فعال جذب بیشتر، درصد حذف بالاتری نسبت به شکل میله‌ای ارائه می‌دهد. بطوری‌که شکل هشت‌وجهی سنتز شده توانست بازده حذف بالایی تا ۹۳٪ را در مدت زمان ۵۰ دقیقه به دست آورد. همچنین، ایزوترم‌های جذب و سینتیک بررسی شدند و نتایج تجربی نشان داد که فرایند جذب رودامین بی از مدل لانگمویر تبعیت می‌کند و بیشینه ظرفیت جذب با استفاده از این مدل 61.73 mg g^{-1} به‌دست آمد. مطالعات سینتیکی نیز نشان داد که جذب رودامین بی بر روی نانوکامپوزیت MXene/MIL-101 با مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم مطابقت دارد. آزمایش‌های قابلیت استفاده مجدد نیز تأیید کردند که جاذب‌ها پس از چند چرخه حذف متوالی رنگ می‌توانند بدون کاهش قابل توجه در بازده، مجدداً مورد استفاده قرار گیرند.

۵- مراجع

1. Dousti S, Mahmoodi B, Bijari M, Shahbazi A, Investigating the Effect of Various Precursors in the Synthesis and Improvement of the Photocatalytic Performance of Graphite Carbon Nitride in the Degradation of Rhodamine B Dye Under Visible Light. J Color Sci Tech. 2024;18(2):135-150. <https://doi.org/10.30509/JCST.2024.167291.1224>. [In Persian].
2. Safa MB, Steffy J, Syed A, Subhiksha V, Elgorban AM, Verma M, et al. Unveiling the enhanced rhodamine B degradation in water by $\text{Sn}_3\text{O}_4@ \text{Au}$: Insight into degradation pathway and by-products toxicity evaluation. J Water Process Eng. 2025;72:107475. <https://doi.org/10.1016/j>

- jwpe.2025.107475.
3. Liu D, Chen D, Hao Z, Tang Y, Jiang L, Li T, et al. Efficient degradation of Rhodamine B in water by $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ and $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PMS}$ systems: A comparative study. *Chemosphere*. 2022; 307:135935. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135935>.
 4. Fayazi M. Synthesis of ZnO nanostructures with different morphologies on biochar support for photocatalytic degradation of organic dye. *J Water Environ Nanotechnol*. 2024;9(2):137-148. <https://doi.org/10.22090/jwent.2024.02.02>.
 5. Ahmad S, Muftaba G, Zubair M, Shah MUH, Daud M, Mu'azu ND, et al. A review of performance, mechanism, and challenges of layered double hydroxide-based biocomposites for the adsorptive removal of dye contaminants from water and wastewater. *J Water Process Eng*. 2025;70:106837. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106837>.
 6. Farazmand S, Fayazi M. Single-step solvothermal synthesis of sepiolite- CoFe_2O_4 nanocomposite as a highly efficient heterogeneous catalyst for photo Fenton-like reaction. *Mater Chem Phys*. 2024;312:128627. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128627>.
 7. Bhatia D, Sharma NR, Singh J, Kanwar RS. Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review. *Critical Reviews Environ Sci Technol*. 2017;47(19):1836-1876 <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1393263>.
 8. Jafaryan P, Foroughirad S. Magnetic Molecularly Imprinted Polymers: Fundamentals, Synthesis, Characterization, and Adsorptive Applications in the Removal of Organic Contaminants from Water and Wastewater. *J Color Sci Tech*. 2026;20(1):17-36. <https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167783.1284> [In Persian].
 9. Eslaminejad S, Rahimi R, Fayazi M. Sepiolite-metal organic framework-iron oxide catalyst for degradation of Rhodamine B using Fenton-like process. *J Taiwan Inst Chem Eng*. 2023; 152:105181. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105181>.
 10. Gharanjig K, Kazemian H, Hosseinneshad M, Ghasemi E, Etehad SM, Goudarzi S, Imani H, Gharanjig H. Removal of Reseda Luteola Dyes in Dyeing Wastewater by Metal-organic Framework Adsorbent. *J Color Sci Tech*. 2024; 18(2):79-92. <https://doi.org/10.30509/JCST.2024.82014>. [In Persian].
 11. Akiyama G, Matsuda R, Sato H, Hori A, Takata M, Kitagawa S. Effect of functional groups in MIL-101 on water sorption behavior. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2012;157:89-93. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.01.015>.
 12. Zorainy MY, Gar Alalm M, Kaliaguine S, Boffito DC. Revisiting the MIL-101 metal-organic framework: design, synthesis, modifications, advances, and recent applications. *J Mater Chem A*. 2021;9(39):22159-217. <https://doi.org/10.1039/D1TA06238G>.
 13. Far HS, Hasanzadeh M, Najafi M, Rabbani M. Magnetic metal-organic framework ($\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{MIL-101}$) functionalized with dendrimer: Highly efficient and selective adsorption removal of organic dyes. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2022;32(10):3848-63. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02398-7>.
 14. Hasanzadeh M, Simchi A, Far HS. Nanoporous composites of activated carbon-metal organic frameworks for organic dye adsorption: Synthesis, adsorption mechanism and kinetics studies. *J Ind Eng Chem*. 2020;81:405-14. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.09.031>.
 15. Song Y, Zheng S, Ji Y, He B, Wang M. Fabrication of novel mixed matrix composite membranes with polyethyleneimine-modified MIL-101 for CO_2/CH_4 separation. *Chem Eng J*. 2025;518:164526. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164526>.
 16. Lei J-C, Zhang X, Zhou Z. Recent advances in MXene: Preparation, properties, and applications. *Front Phys*. 2015; 10(3):276-86. <https://doi.org/10.1007/s11467-015-0493-x>.
 17. Qu L, Wu M, Zhao L, Li J, Pan H. A sandwich electrochemical immunosensor based on MXene@ dual MOFs for detection of tumor marker CA125. *Microchim Acta*. 2023;190(4):147. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05719-w>.
 18. Stock N, Biswas S. Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): routes to various MOF topologies, morphologies, and composites. *Chemical reviews*. 2012;112(2):933-69. <https://doi.org/10.1021/cr200304e>.
 19. Huang L, Wang H, Chen J, Wang Z, Sun J, Zhao D, et al. Synthesis, morphology control, and properties of porous metal-organic coordination polymers. *Microporous Mesoporous Mater*. 2003;58(2):105-14. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(02\)00609-1](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(02)00609-1).
 20. Choi J, Choi J-S, Park D, Park CM, Jang M, Jun B-M, et al. Applications of MXene-based nanomaterials for the removal of inorganic contaminants from water: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2026;504:141312. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141312>.
 21. Huo J-B, Qin T, Cheng R, Guo X, Yu G. MXene-based composites as emerging adsorbents for removal of environmental pollutants. *Sep Purif Technol*. 2025:134408. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134408>.
 22. Chen Y, Shi Y, Song G, Yang B, Pang H. Compositing MXene with organic coordination frameworks (MOFs, COFs, and HOFs) for enhanced electrochemical performance. *Next Mater*. 2025;6:100323. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100323>.
 23. Kashif S, Akram S, Murtaza M, Amjad A, Shah SSA, Waseem A. Development of MOF-MXene composite for the removal of dyes and antibiotic. *Diamond Relat Mater*. 2023; 136:110023. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110023>.
 24. Khurram A, Jabbar A, Khan MA, Liu W, Mutahir S, Munir A, et al. 7pH-responsive MIL-101 (Fe)/NiFe-LDH composite membranes for high-flux removal of cationic and anionic dyes in wastewater treatment. *Desalin*. 2025:119438. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119438>.
 25. Safarkhani M, Aldhaer A, Lima EC, Zargar M, Jung EE, Huh Y, et al. Engineering MXene@ MOF composites for a wide range of applications: a perspective. *ACS Applied Engineering Materials*. 2023;1(11):3080-98. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c00529>.
 26. Khot AC, Dongale TD, Park JH, Kesavan AV, Kim TG. Ti_3C_2 -based MXene oxide nanosheets for resistive memory and synaptic learning applications. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2021;13(4):5216-27. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c19028>.
 27. Li Z, Wang L, Sun D, Zhang Y, Liu B, Hu Q, et al. Synthesis and thermal stability of two-dimensional carbide MXene Ti_3C_2 . *Mater Sci Eng B*. 2015;191:33-40. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2014.10.009>.
 28. Liu X, Liu Z, Zhang Q, Wu H, Wang R. Hydrothermal Catalytic Conversion of Glucose into Lactic Acid with Acidic MIL-101 (Fe). *J Chem*. 2020;2020(1):1341563. <https://doi.org/10.1155/2020/1341563>.
 29. Edebal S. Synthesis and characterization of MIL-101 (Fe)

- as efficient catalyst for tetracycline degradation by using NaBH₄: Artificial neural network modeling. *Appl Surf Sci Adv*. 2023;18:100496. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100496>.
30. Haq Y-U, Ullah R, Mazhar S, Khattak R, Qarni AA, Haq Z-U, et al. Synthesis and characterization of 2D MXene: Device fabrication for humidity sensing. *J Sci: Adv Mater Devices*. 2022;7(1):100390. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2021.08.003>.
 31. Lee E, Vahid Mohammadi A, Prorok BC, Yoon YS, Beidaghi M, Kim D-J. Room temperature gas sensing of two-dimensional titanium carbide (MXene). *ACS Appl Mater Interfaces*. 2017;9(42):37184-90. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b11055>.
 32. Xue Q, Zhang H, Zhu M, Pei Z, Li H, Wang Z, et al. Photoluminescent Ti₃C₂ MXene quantum dots for multicolor cellular imaging. *Adv Mater*. 2017;29(15). <https://doi.org/10.1002/adma.201604847>.
 33. Hamed A, Trotta F, Borhani Zarandi M, Zanetti M, Caldera F, Anceschi A, et al. In situ synthesis of MIL-100 (Fe) at the surface of Fe₃O₄@ AC as highly efficient dye adsorbing nanocomposite. *Int J Mol Sci*. 2019;20(22):5612. <https://doi.org/10.3390/ijms20225612>.
 34. Li Z, Liu X, Jin W, Hu Q, Zhao Y. Adsorption behavior of arsenicals on MIL-101 (Fe): the role of arsenic chemical structures. *J Colloid Interface Sci*. 2019;554:692-704. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.07.046>.
 35. Liu Z, He W, Zhang Q, Shapour H, Bakhtari MF. Preparation of a GO/MIL-101 (Fe) composite for the removal of methyl orange from aqueous solution. *ACS omega*. 2021;6(7):4597-608. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05091>.
 36. Zheng S, Zhou K, Zhang X, Ren N. Metal-organic framework/MXene-based materials: preparations and applications. *RSC Adv*. 2025;15(37):30921-68. <https://doi.org/10.1039/d5ra04436g>.
 37. Liao X, Wang F, Wang F, Cai Y, Yao Y, Teng B-T, et al. Synthesis of (100) surface oriented MIL-88A-Fe with rod-like structure and its enhanced fenton-like performance for phenol removal. *Appl Catal B*. 2019;259:118064. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118064>.
 38. Chen M-S, Fan H-F, Lin K-C. Kinetic and thermodynamic investigation of Rhodamine B adsorption at solid/solvent interfaces by use of evanescent-wave cavity ring-down spectroscopy. *Anal Chem*. 2010;82(3):868-77. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.01.002>.
 39. Fayazi M, Taher MA, Afzali D, Mostafavi A. Preparation of molecularly imprinted polymer coated magnetic multi-walled carbon nanotubes for selective removal of dibenzothiophene. *Mater Sci Semicond Process*. 2015;40: 501-7. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.018>.
 40. Patel R, Mahabari K, Patel K, Patel M, Jadhav AH, Dharaskar S, et al. MoS₂/MXene composite material for high-performance removal of Rhodamine B dye: synthesis and application. *Sci Rep*. 2025;15(1):42099. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26240-5>.
 41. Saad HE, Mahmoud A. Coumarin-modified cellulose as an efficient adsorbent for cationic dye removal from aqueous environments: synthesis, characterization, and adsorption performance. *Sci Rep*. 2025;15(1):32511. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17789-2>.
 42. Celik Caglar T, Kayranli B. Comparative evaluation of regeneration strategies for Rhodamine B removal using raw date seeds: Insights into adsorption mechanisms. *ACS omega*. 2026;11(25):37266-83. <https://doi.org/10.1021/acsomega.6c01845>.
 43. Liu H, Ren X, Chen L. Synthesis and characterization of magnetic metal-organic framework for the adsorptive removal of Rhodamine B from aqueous solution. *J Ind Eng Chem*. 2016;34:278-85. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.11.020>.
 44. Firoozi M, Rafiee Z, Dashtian K. New MOF/COF hybrid as a robust adsorbent for simultaneous removal of auramine O and rhodamine B dyes. *ACS omega*. 2020;5(16):9420. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00539>.
 45. Shenvi SS, Isloor AM, Ismail AF, Shilton SJ, Al Ahmed A. Humic acid based biopolymeric membrane for effective removal of methylene blue and rhodamine B. *Ind Eng Chem Res*. 2015;54(18):4965-75. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00761>.

How to cite this article:

Fayazi M, Eslaminejad S. MXene/MIL-101 Nanocomposite with Octahedral and Rod-like Morphology: Synthesis and Application in Rhodamine B Removal. *J Color Sci Tech*. 2026;20(2):107-122. <https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167811.1286> [In Persian]