

Fabrication and Performance Investigation of 3D Printed g-C₃N₄ as an Adsorbent for Organic Dye Removal

Samahe Sadjadi^{*1}, Fatemeh Ranjbar², Amir Masood Rezadoust²

1- Gas Conversion Department, Faculty of Petrochemicals, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P. O. Box: 14975-112, Tehran, Iran.

2-Composites Department, Faculty of Process, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P. O. Box: 14975-112, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received:07-07-2025

Accepted:05-08-2025

Available online:29-12-2025

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI:10.30509/jscw.2025.167585.1246

Keywords:

3D printing

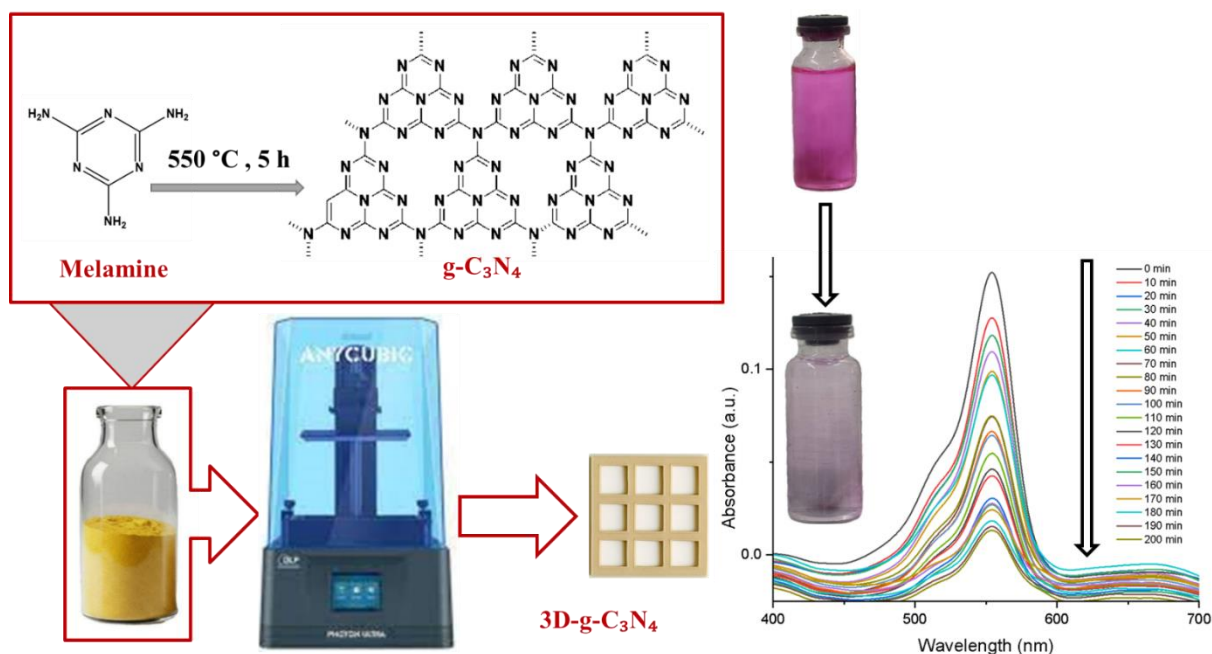
Adsorbent

Graphitic carbon nitride

Rhodamine B

ABSTRACT

A novel adsorbent was fabricated using 3D printing technology for the removal of dyes. First, graphite carbon nitride (g-C₃N₄) was synthesized and then its powder form was transformed into a structure with a desired features using a DLP 3D printer. The performance of this adsorbent in the removal of rhodamine dye was investigated and effects of adsorption variables including pH, temperature and contact time were appraised and optimized. The results showed that the dye adsorption reached its maximum value (81%) under basic condition (pH=10), temperature of 80°C and contact time of 180 minutes. Comparison with the sample without active material showed that the presence of g-C₃N₄ in the printed structure leads to improved adsorption efficiency. Also, the design of a porous and uniform structure through 3D printing technology plays an effective role in increasing the contact surface and improving the adsorption performance through effective interaction with dye molecules. In addition, the efficiency of this adsorbent in removing methyl orange (73%) and Congo red (56%) dyes was confirmed.



Corresponding author: *s.sadjadi@ippi.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ساخت و بررسی عملکرد $g-C_3N_4$ چاپ سه بعدی به عنوان جاذب برای حذف رنگزاهای آلی

سماحه السادات سجادی^{۱*}، فاطمه رنجبر^۲، امیرمسعود رضادوست^۳

- ۱- استاد، گروه تبدیل گاز، پژوهشکده پتروشیمی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۷۵-۱۱۲.
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه کامپوزیت، پژوهشکده فرایند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۷۵-۱۱۲.
- ۳- دانشیار، گروه کامپوزیت، پژوهشکده فرایند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۷۵-۱۱۲.

چکیده

یک جاذب نوین با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی برای حذف رنگزاهای ساخته شد. ابتدا گرافیت کربن نیتريد ($g-C_3N_4$) سنتز و سپس شکل پودری آن با بهره گیری از چاپگر سه بعدی نوع DLP به ساختاری با ابعاد دلخواه تبدیل گردید. عملکرد این جاذب در حذف رنگزای رودامین بی بررسی و تأثیر عوامل مختلف از جمله pH، دما و زمان تماس به منظور تعیین شرایط بهینه جذب ارزیابی شدند. نتایج نشان دادند که جذب رنگزا در شرایط قلیایی ($pH=10$)، دمای ۸۰ درجه سانتیگراد و زمان تماس ۱۸۰ دقیقه به بیشترین میزان کارایی خود (۸۱ درصد) می رسد. مقایسه با نمونه فاقد ماده فعال نشان داد که حضور $g-C_3N_4$ در ساختار چاپ شده منجر به ارتقا کارایی جذب می شود. همچنین طراحی ساختار متخلخل و یکنواخت از طریق فناوری چاپ سه بعدی، نقش موثری در افزایش سطح تماس و بهبود عملکرد جذب از طریق تعامل مؤثر با مولکول های رنگزا، دارد. به علاوه کارایی این جاذب در حذف رنگزاهای متیل ارنج (۷۳ درصد) و کنگو رد (۵۶ درصد) تایید گردید.

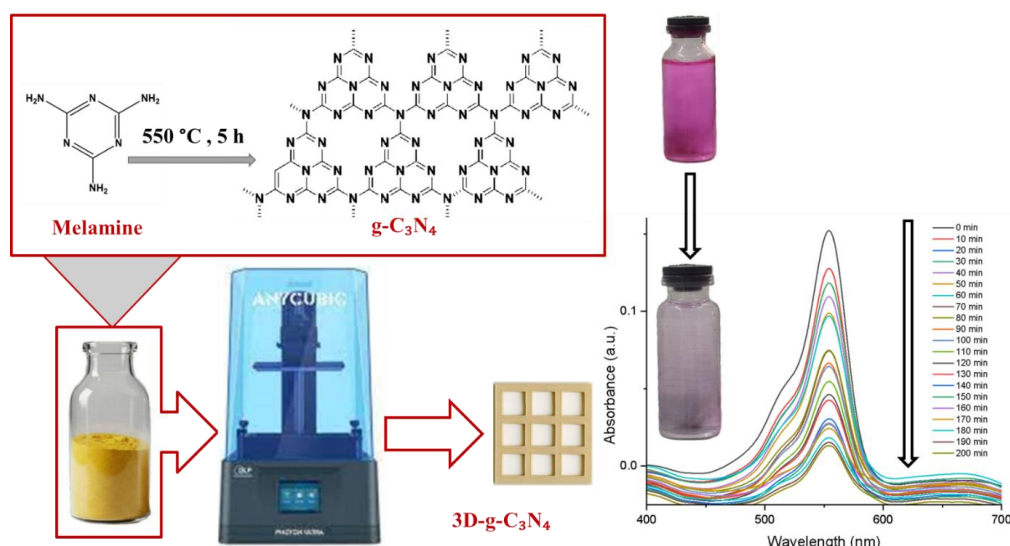
اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸
شاپا چاپی: ۲۲۷۸-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167585.1246

واژه های کلیدی:

چاپ سه بعدی
جاذب
گرافیت کربن نیتريد
رودامین بی



۱- مقدمه

افزایش روز افزون مصرف آب در صنایع مختلف از جمله نساجی، داروسازی، رنگرزی و کاغذسازی، منجر به ورود مقادیر قابل توجهی از رنگها به منابع آبی شده است (۱). آلایندہ‌های مختلفی مانند داروها (۲)، رنگرهای آلی (۳)، فلزات سنگین (۴) و غیره، نه تنها باعث آسیب جدی به محیط زیست می‌شوند، بلکه از طریق زنجیره غذایی بر کل اکوسیستم تأثیر می‌گذارند. رنگرهای آلی، یکی از مهم‌ترین آلایندہ‌های آب هستند که به صورت گسترده در محیط تخلیه می‌شوند. از میان این آلایندہ‌ها، رودامین بی (RhB) یکی از رنگرهای کاتیونی پرکاربرد در صنایع است که به دلیل پایداری شیمیایی و ماندگاری بالا در محیط، نگرانی‌های جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها ایجاد کرده است (۵، ۶). برای حل این مشکلات زیست‌محیطی، مجموعه‌ای از روش‌ها از جمله نورکافت^۱، فراصافش^۲، تجزیه زیستی، انعقاد، اکسایش و جذب برای حذف رنگرها توسعه یافته‌اند (۷-۹). در این میان، جذب سطحی به‌عنوان روشی ساده، ارزان، و مؤثر شناخته شده است که قابلیت حذف مؤثر رنگرهای آلی را بدون تولید محصولات جانبی سمی داراست (۱۰). طی سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری بر روی توسعه جاذب‌های پیشرفته برای جذب رنگرها (۱۱، ۱۲) انجام شده است. در این راستا، جاذب‌های طبیعی و مصنوعی مختلفی نظیر خاک رس، پلیمرها، زئولیت و کربن معرفی شده‌اند. یکی از جاذب‌های نوظهور با ویژگی‌های منحصر به فرد، گرافیت کربن نیتريد $g-C_3N_4$ است (۱۳-۱۴) که دارای ساختار دو بعدی، سطح فعال بالا، پایداری حرارتی و شیمیایی، و قابلیت سنتز آسان با پیش‌ماده‌هایی مانند اوره یا ملامین می‌باشد (۱۴). گرافیت کربن نیتريد به دلیل دارا بودن نیتروژن جفت الکترون تنها، قادر به برهم‌کنش مؤثر با رنگرهای کاتیونی از طریق نیروهای الکترواستاتیکی، پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ است (۱۵، ۱۳). با این حال، با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه جاذب‌ها برای تصفیه آب استفاده از $g-C_3N_4$ در حالت پودری دارای محدودیت‌هایی از جمله دشواری بازیابی، تمایل به تجمع نانوذرات، و کاهش بازده جذب در کاربردهای پیوسته است (۱۶). برای غلبه بر این چالش فناوری چاپ سه‌بعدی، به دلیل دقت بالا، توانایی ساخت ساختارهای متخلخل و مهندسی‌شده، و سازگاری با انواع رزین‌ها، به ابزاری نوین در ساخت جاذب‌ها، کاتالیزورها و صافی‌های کارا تبدیل شده است (۱۷-۱۹). چاپ سه‌بعدی این قابلیت را دارد که مسیرهای جدیدی را برای ساخت ساختارهای دقیق (۲۰، ۱۹، ۱۷) و سفارشی با اشکال، اندازه‌ها و میزان تخلخل‌های مطلوب ارائه دهد (۲۱-۲۴). یکی از پرکاربردترین روش‌های چاپ سه‌بعدی، پردازش نور دیجیتالی (DLP) است. این روش بر پایه ساخت قطعه به‌صورت لایه به لایه و با کمک تابش نور فرابنفش (UV) برای پخت رزین عمل می‌کند (۲۵-۲۷). در تحقیقات قبلی گزارش شده است که جاذبی با ترکیب ۵۰ درصد گل سرخ و متاکائولن و با روش چاپ سه‌بعدی

نگارش مستقیم جوهر (DIW) ساخته و برای حذف متیلن‌بلو به کار گرفته شدند. ساختار چاپ‌شده دارای تخلخل بالا، سطح ویژه زیاد و قابلیت بازیابی تا ۱۰ چرخه بود و همچنین پایداری و کارایی خوبی در حذف متیلن‌بلو داشت (۲۸).

در مطالعه‌ای دیگری، ساختار سه‌بعدی چاپ‌شده حاوی کامپوزیت ترکیب MXene/MOF (چارچوب‌های فلز-آلی) برای حذف رنگرهای آنیونی طراحی شد. این جاذب دارای سطح ویژه بالا، جذب مؤثر (۹۱/۹ درصد برای متیل اورنج و ۸۴/۹ درصد برای رنگرهای مستقیم قرمز ۳۱)، و بازیابی ساده تا چهار چرخه بدون افت عملکرد بود (۲۹). همچنین چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) با روش چاپ سه‌بعدی و استفاده از پیونده زیست‌سازگار آلزینات کلسیم-ژلاتین (CA-GE) به شکل‌های مختلف چاپ شدند. نمونه چاپ‌شده حاوی MOF، بازده حذف متیلن‌بلو را تا ۹۹/۸ درصد در ۲۰ دقیقه در مقایسه با ۴۳/۶ درصد برای نمونه بدون MOF افزایش داد. جاذب چاپ‌شده تا ۷ بار بدون افت عملکرد بازیابی شد، در حالی که نوع پودری فقط تا ۲ بار قابلیت استفاده مجدد داشت. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد برتر ساختارهای چاپ‌شده در حذف رنگرهای آلی بودند (۱۵). در مطالعه‌ای دیگر یک ساختار شبکه‌ای با قابلیت جذب رنگرهای رودامین بی با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول دی‌اکریلات و هیدروکسی اتیل متاکریلات با چاپ سه‌بعدی ساخته شد. ساختار شبکه‌ای با ترکیب آب‌دوست، بهترین کارایی را با بازده حذف تا ۹۵ درصد نشان داد. جذب رنگر در دماهای بالاتر بهتر بود و داده‌ها با مدل ردلیش-پترسون و سینتیک شبه درجه دوم سازگار بودند. ساختار چاپ شده مقاومت مکانیکی خوب و قابلیت استفاده چندباره را داشت (۳۰).

پژوهش حاضر با هدف طراحی و ساخت یک جاذب سه‌بعدی متشکل از $g-C_3N_4$ و رزین آکریلاتی به کمک فناوری چاپ DLP انجام شده است، که برای نخستین بار، ساختار چاپ‌شده $g-C_3N_4$ به‌صورت مهندسی‌شده و هدفمند برای جذب رنگر RhB به کار گرفته شده است. نوآوری اصلی این تحقیق در شکل‌دهی و تبدیل ساختار پودری $g-C_3N_4$ به یک ساختار یکپارچه با طراحی و تخلخل دلخواه و بررسی کامل پارامترهای مؤثر بر جذب (pH، دما، زمان تماس) است. جاذب قطعه‌ای طراحی شده در این تحقیق علاوه بر اینکه به راحتی قابل جداسازی از محیط می‌باشد می‌تواند به عنوان یک جاذب چند منظوره برای حذف انواع رنگرهای آلی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

چاپ $g-C_3N_4$ به روش DLP و با استفاده از رزین تجاری آکریلات بود که از شرکت Anyubic خریداری شده است. اتانل (EtOH) و ملامین از Sigma-Aldrich خریداری شده و برای سنتز $g-C_3N_4$ استفاده شدند.

² Ultrafiltration¹ Photolysis

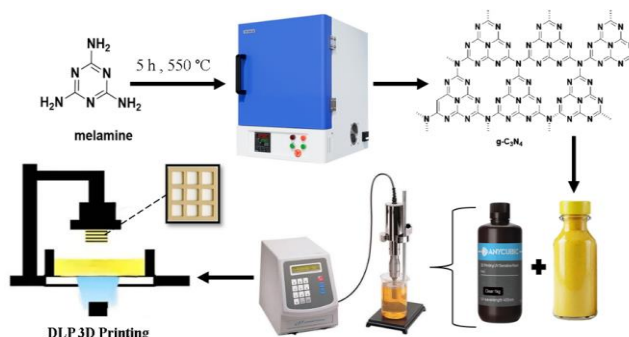
۲-۲- ابزار و تجهیزات

برای شناسایی $g-C_3N_4$ و ارزیابی عملکرد جاذب چاپ سه بعدی شده، از روش‌های زیر استفاده شد: مطالعه ریخت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) توسط دستگاه VEGAII TSCAN مجهز به آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس RONTec.QX2 انجام شد. طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FT-IR)، با استفاده از دستگاه BRUKER TENSOR 35 در محدوده $400-3500\text{ cm}^{-1}$ و با دقت طیفی 4 cm^{-1} توسط قرص‌های KBr انجام شد. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه Rigaku Ultima IV و با لامپ Cu-K α در محدوده $2\theta = 27-60^\circ$ صورت گرفت. صورت گرفت. پایداری حرارتی نمونه‌های آماده شده با استفاده از آنالیز گرما وزن‌سنجی (TGA، دستگاه METTLER TOLEDO)، در بازه دمایی ۳۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد که با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تحت اتمسفر O_2 کار می‌کرد، مورد بررسی قرار گرفت. طیف‌سنجی فرابنفش- مرئی (UV-Vis) با دستگاه Shimadzu، مدل UV-1700 در $\lambda_{max} = 556\text{ nm}$ مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام عملیات حرارتی از کوره‌ای با مشخصات AF18-1200 ساخت شرکت آترا با بیشینه دمای کاری ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. پس از اتمام واکنش، $g-C_3N_4$ مایل به زرد به پودر ریز تبدیل شد و برای چاپ سه بعدی استفاده شد.

۲-۳- تهیه $3D-g-C_3N_4$

۲-۳-۱- سنتز $g-C_3N_4$

$g-C_3N_4$ از طریق عملیات حرارتی ملامین تهیه شد. به طور دقیق‌تر، ۱۰ گرم ملامین در یک کوره قرار داده شد و به مدت ۵ ساعت تا دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. برای جلوگیری از هرگونه شوک حرارتی احتمالی و اطمینان از تشکیل موفق $g-C_3N_4$ ، نرخ گرمایش روی ۲/۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد.



شکل ۱: طرح‌واره از فرایند تولید جاذب.

Figure1: Schematic of the adsorbent production process.

۲-۳-۲- الگوی چاپ سه بعدی

برای طراحی یک الگوی جدید برای جاذب چاپ سه بعدی از نرم‌افزار SolidWorks استفاده شد.

در واقع، یک ساختار مربعی شکل به ابعاد $30Y \times 30X$ میلی‌متر طراحی شد (شکل ۱). این ساختار شبکه‌ای، از نظر طراحی مهندسی دارای مزایای متعددی در فرایند است.

تقسیم‌بندی منظم سطح به سلول‌های مربعی باعث کاهش حجم ماده مصرفی و زمان چاپ بدون کاهش استحکام قطعه می‌شود. همچنین این نوع ساختار موجب توزیع یکنواخت تنش در طول چاپ شده و از تاب برداشتن یا جدا شدن قطعه از صفحه ساخت جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، اگر چنین ساختاری به عنوان جاذب مورد استفاده قرار گیرد، ویژگی‌های مثبتی را به همراه دارد؛ اولاً طراحی با منافذ باز آن منجر به افزایش نسبت سطح به حجم می‌شود که یکی از عوامل کلیدی در کارایی جاذب‌هاست. همچنین، عبور جریان سیال از میان سلول‌های باز این ساختار آسان می‌شود، که در فرایندهای جذب سطحی بسیار اهمیت دارد. همچنین، ساختار منظم و تکرار شونده سلولی می‌تواند توزیع یکنواخت مواد جذب‌شونده در سطح جاذب را فراهم کرده و بازده کلی فرایند جذب را بهبود بخشد. در مجموع، استفاده از این نوع طراحی شبکه‌ای در چاپ سه بعدی نه تنها از نظر مکانیکی و ساختاری مفید است، بلکه در کاربردهای پیشرفته مانند جاذب‌ها نیز قابلیت بهینه‌سازی عملکرد را فراهم می‌سازد. در واقع، این الگو به گونه‌ای انتخاب شد که از نظر اقتصادی و زیست محیطی مفید باشد و به تثبیت ماده فعال $g-C_3N_4$ کمک کند.

۲-۳-۳- آماده‌سازی جوهر

برای تهیه جوهر چاپ برای ساخت قطعه حاوی $g-C_3N_4$ چاپ سه بعدی، ۲ گرم $g-C_3N_4$ و ۲۰ گرم رزین آکریلات تجاری مخلوط شده و به مدت ۲۰ دقیقه برای اطمینان از پراکندگی یکنواخت پودر در رزین با قدرت ۱۵۰ وات فراصوت شد.

۲-۳-۴- چاپ سه بعدی $g-C_3N_4$

جوهر آماده شده با استفاده از یک چاپگر (DLP Photon Ultra، AnyCubic Ltd، ساخت چین) چاپ شد. ضخامت لایه نمونه ۵۰ میکرومتر بود. زمان نوردهی برای ۴ لایه اول روی ۶۰ ثانیه تنظیم شد در حالی که برای لایه‌های بعدی این مقدار به ۵ ثانیه کاهش یافت. زیرا لایه‌های اول نقش مهمی در چسبیدن قطعه به سکوی ساخت دارند پس زمان نوردهی اولیه باید بیشتر از لایه‌های بعدی در نظر گرفته شود. سایر مشخصه‌های فرایند چاپ در جدول ۱ خلاصه شده است. فرایند چاپ سه بعدی با آماده‌سازی یک رزین آغاز می‌شود. در حین چاپ، یک منبع نور دیجیتال، الگوی نوری هر لایه از مدل سه بعدی را مطابق با مقطع طراحی شده به سطح رزین تابانده و آن را به صورت

نهایتاً درصد حذف رنگزا با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه گردید:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m} \quad (1)$$

$$\text{Removal (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (2)$$

که در آن m ، V ، C_t ، C_0 ، q_t به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت جذب، غلظت اولیه محلول (mg/L)، غلظت ثانویه محلول (mg/L)، حجم محلول (L) و مقدار جاذب (g) و بازده حذف (%) هستند. همچنین اثر عواملی همچون pH و زمان تماس بررسی شد. برای اندازه‌گیری جذب در pHهای مختلف، از محلول‌های HCl و NaOH برای تنظیم pH محلول RhB استفاده شد و نتایج نشان دادند که بیشترین بازده حذف در pH=۱۰ و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش pH از ۴ به ۱۰، میزان ظرفیت جذب (q_t) به ۰/۴ (mg/g) رسید و بالاترین بازده جذب در pH=۱۰ به دست آمد. این رفتار به دلیل افزایش بار منفی سطح جاذب در محیط قلیایی و تقویت برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک بین گروه‌های آنیونی سطح جاذب و مولکول‌های رنگزای کاتیونی RhB قابل توجیه است. که نشان از کارایی مطلوب جاذب در شرایط قلیایی دارد.

همچنین برای بررسی نقش زمان تماس بر میزان حذف RhB، آزمایش‌هایی در بازه زمانی ۲۰ تا ۱۸۰ دقیقه انجام گرفتند. با افزایش زمان تماس، ظرفیت جذب به ۰/۲۵ (mg/g) افزایش یافت. این روند بیانگر آن است که در زمان‌های اولیه، سطح جاذب دارای تعداد زیادی سایت‌های فعال خالی است و امکان نفوذ سریع رنگزا به سطح جاذب فراهم می‌باشد. با گذشت زمان، این مکان‌های فعال اشباع شده و فرایند به حالت تعادل نزدیک می‌شود. بیشترین ظرفیت جذب در زمان ۱۸۰ دقیقه و دمای ۸۰ درجه با بازده ۸۱ درصد ثبت شد. علاوه بر آن افزایش دما از ۴۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد موجب بهبود ظرفیت جذب تا ۰/۲ (mg/g) شد. با افزایش دما، تحرک مولکول‌های رنگزا بیشتر شده و نفوذ به منافذ جاذب تسهیل می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات g-C₃N₄

برای تأیید تشکیل موفق g-C₃N₄، از طیف‌سنجی FTIR استفاده شد. همانطور که در شکل ۲A نشان داده شده، نوارهای مشخصه g-C₃N₄ یعنی نوارهایی در ۸۰۵ cm⁻¹ (۱۶) نشان‌دهنده حالت خمشی خارج از صفحه حلقه تری‌آزین در g-C₃N₄ است و آنهایی که در ۱۵۵۸ و ۱۶۴۷ cm⁻¹ (۳۱) هستند، به دامنه کشش و دامنه ارتعاش C=N نسبت داده می‌شوند. باندهای مشاهده شده در ۳۱۰۰-۳۲۵۰ cm⁻¹ (۳۱) به دلیل گروه‌های عاملی N-H و -NH₂ می‌باشند. برای مطالعه ساختاری بیشتر،

انتخابی بسپارش می‌کند. تابش نور فرابنفش موجب آغاز واکنش‌های بسپارش زنجیره‌ای در نواحی مشخص شده می‌گردد و این نواحی از حالت مایع به جامد تبدیل می‌شوند. پس از پخت کامل یک لایه، سکوی ساخت به میزان ضخامت یک لایه به سمت بالا جابجا می‌شود تا لایه جدیدی از رزین مایع در زیر آن جاری شده و آماده تابش نور برای لایه بعدی شود. این فرایند به صورت لایه‌به‌لایه تکرار می‌شود تا ساختار سه‌بعدی نهایی به‌طور کامل شکل گیرد. از آنجایی که در چاپگرهای DLP، هر لایه به‌طور هم‌زمان و یکپارچه، نوردهی و پخت می‌شود، این فناوری از سرعت بالای چاپ برخوردار بوده و در عین حال دقت و وضوح ابعادی بالایی را نیز حفظ می‌کند. پس از اتمام فرایند چاپ، قطعه ساخته‌شده از سکوی ساخت جدا شده و برای حذف رزین‌های باقی‌مانده، با استفاده از اتانل شست‌وشو داده شد. برای تکمیل واکنش پخت و بهبود خواص مکانیکی، قطعه چاپ شده به جعبه UV منتقل شد و به مدت ۱۰ دقیقه در معرض نور فرابنفش قرار گرفت.

۲-۴- حذف رنگزا

برای ارزیابی عملکرد جذب رنگزا توسط 3D-g-C₃N₄، ابتدا قطعه چاپ سه‌بعدی شده 3D-g-C₃N₄ تهیه شد. وزن تقریبی هر قطعه چاپ شده حدود ۰/۵ گرم و مقدار جاذب در هر نمونه ۲ گرم بود. برای ارزیابی مقدار جذب توسط جاذب‌های چاپ سه‌بعدی شده، محلول RhB با غلظت اولیه ۱/۱ میلی‌گرم در لیتر (حاوی ۱/۱ میلی‌گرم رودامین بی در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب) تهیه شد و محلول توسط هم‌زن مغناطیسی تا دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. سپس، 3D-g-C₃N₄ در این محلول غوطه‌ور شد و جذب رنگزا با استفاده از طیف‌سنجی UV-Vis با دستگاه Shimadzu، مدل UV-1700 در $\lambda_{\text{max}} = 556 \text{ nm}$ طی ۲۰۰ دقیقه در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. پس از فرایند جذب نمونه جداسازی شد. برای محاسبه درصد حذف رنگ RhB از قانون بیر-لامبرت استفاده شد. ابتدا غلظت اولیه محلول رنگزا (۱/۱ میلی‌گرم در لیتر) مشخص بود. سپس با اندازه‌گیری میزان جذب محلول پس از تماس با جاذب توسط طیف‌سنجی UV-Vis در طول موج بیشینه ($\lambda_{\text{max}} = 556 \text{ nm}$) مقدار جذب ثبت شد و با استفاده از رابطه بیر-لامبرت غلظت باقی مانده رنگ (C_t) محاسبه شد.

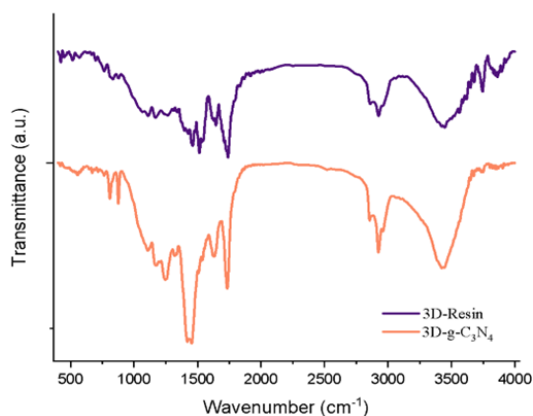
جدول ۱: جزئیات قطعه چاپ سه‌بعدی شده.

Table 1: Printing details of monolith.

Printing parameters	Value
Layer thickness	0.050
Normal exposure time (s)	5
The first layers exposure time (s)	60
First layers no.	5

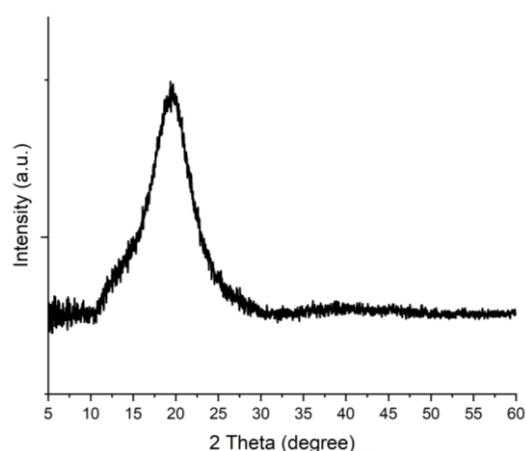
تشخیص یک باند پهن در محدوده ۲۰ از ۱۵-۳۰ درجه، طبیعت بی شکل 3D-g-C₃N₄ را تایید نمود.

برای بررسی دقیق تأثیر افزودن g-C₃N₄ بر ریخت قطعه چاپ سه بعدی شده، تصاویر SEM از هر دو نمونه 3D-g-C₃N₄ (شکل های A-B) و نمونه بدون g-C₃N₄ یعنی رزین چاپ سه بعدی شده (شکل C-D)، ثبت و مقایسه شدند. همانطور که نشان داده شده است، هر دو نمونه ریخت منظمی را نشان می دهند. با این حال، تصاویر SEM با بزرگنمایی بیشتر نشان می دهند که افزودن g-C₃N₄ به رزین چاپ بر ریخت اثر گذار است که منجر به ریخت متمایز 3D-g-C₃N₄ از 3D-Resin می شود. به طور دقیق تر، نمونه 3D-Resin سطح لایه ای صاف را نشان می دهد، در حالی که سطح 3D-g-C₃N₄ با ذرات ریز g-C₃N₄ پوشیده شده است. این مشاهدات، ادغام نانوکامپوزیت آماده شده را در قطعه چاپ سه بعدی تایید می کند. این موضوع دسترسی جاذب به رنگزا را تضمین می کند و برای کاربرد جذب مناسب است.



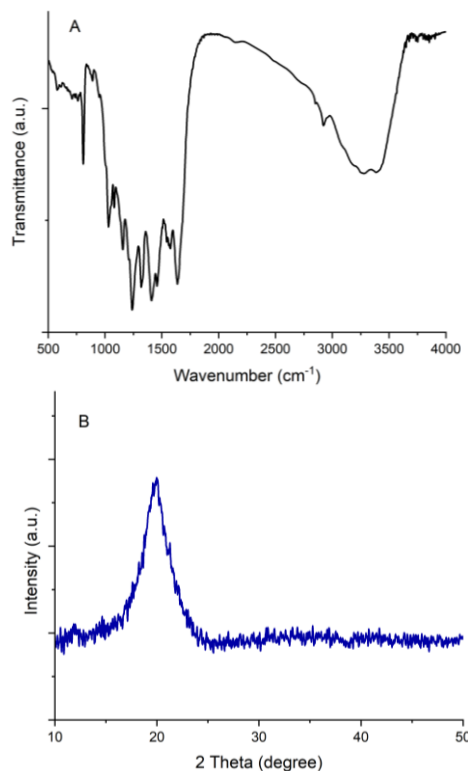
شکل ۳: طیف FTIR از 3D-resin و 3D-g-C₃N₄.

Figure 3: FTIR spectra of 3D-g-C₃N₄ and 3D-resin.



شکل ۴: الگوی XRD از 3D-g-C₃N₄.

Figure 4: XRD pattern of 3D-g-C₃N₄.



شکل ۲: (A) طیف FTIR و (B) الگوی XRD از g-C₃N₄.

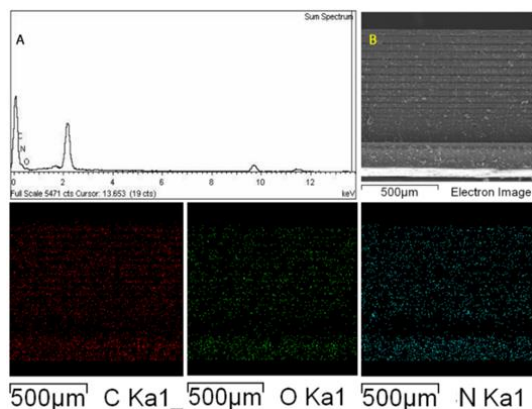
Figure 2: A) FTIR spectra, and (B) XRD patterns of g-C₃N₄.

الگوی XRD از g-C₃N₄ نیز بررسی شد، شکل ۲B. همانطور که نشان داده شد، g-C₃N₄ یک قله در $2\theta = 20^\circ$ را نشان داد که نشان دهنده انباشته شدن لایه ها در سیستم های آروماتیک مزدوج است (۱۴).

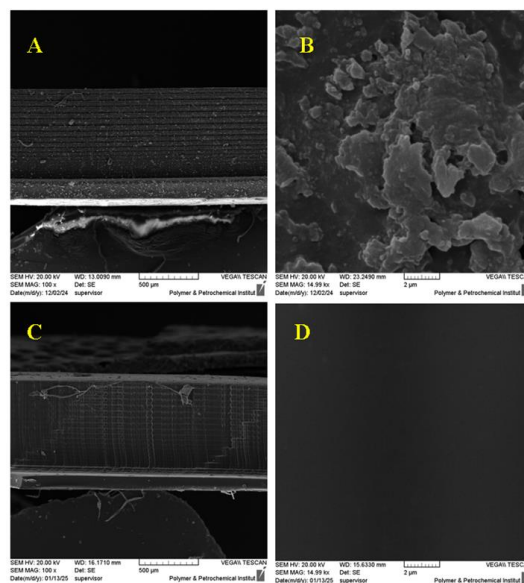
۲-۳- خصوصیات 3D-g-C₃N₄

طیف FTIR از 3D-g-C₃N₄ و 3D-resin در شکل ۳ مقایسه شده اند. همانطور که نشان داده شده، رزین چاپ سه بعدی شده نوارهای جذبی را در 3434 cm^{-1} (۲۴) نشان می دهد که مربوط به گروه عاملی OH است. باندهای جذبی در ناحیه های 2910 cm^{-1} و 2854 cm^{-1} ، نماینده گروه -CH₂ است و پیوندهای مشاهده شده در 1743 cm^{-1} و 1637 cm^{-1} (۲۴) به گروه های C=O و C-O- نسبت داده می شوند. در طیف FTIR از 3D-g-C₃N₄، باندهای مشخصه g-C₃N₄ و رزین چاپ سه بعدی شده قابل تشخیص است که ادغام g-C₃N₄ در ساختار قطعه را تأیید می کند. همانطور که قبلاً بحث شد، تجزیه و تحلیل XRD از g-C₃N₄ ساختار بی شکل آن را مشخص کرد. طبق مطالعه قبلی (۱۳)، رزین تجاری نیز یک ترکیب بی شکل است و بسیاری نوری آن در جریان چاپ سه بعدی منجر به یک زنجیره پلیمری بی شکل می شود. از این رو، انتظار می رفت که 3D-g-C₃N₄ نیز ماهیت بی شکل را نشان دهد. برای تایید این موضوع، الگوی XRD از 3D-g-C₃N₄ ثبت شد، شکل ۴، که در آن

سوی دیگر، چاپ سه بعدی $g-C_3N_4$ برای تبدیل شکل پودری جاذب به یک ساختار قطعه مانند بسیار مفید بود و بازیابی آن از محیط واکنش را آسان می کرد. همانطور که قبلاً بحث شد، مقدار کمی از $g-C_3N_4$ برای ساخت $3D-g-C_3N_4$ مورد استفاده قرار گرفت و در شبکه پلیمری چاپ سه بعدی جاسازی شد. از این رو، اولین نگرانی دسترسی RhB به ماده جاذب یعنی، $g-C_3N_4$ و کارایی $3D-g-C_3N_4$ بود. برای روشن شدن این موضوع و همچنین نقش چاپ سه بعدی در بازده حذف RhB ، جذب رزین چاپ سه بعدی شده بدون $g-C_3N_4$ و $3D-resin$ برای حذف RhB در شرایط مشابه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت (شکل ۸). همان طور که نشان داده شد، $3D-resin$ رفتار جذبی برای RhB نشان داد، که می تواند از برهم کنش های الکترواستاتیکی مولکول های RhB و عملکردهای پلیمر چاپ شده با چاپ سه بعدی و گیرافتادن فیزیکی RhB در زنجیره پلیمری ناشی شود. این مشاهدات نشان داد که نقش چاپ سه بعدی نه تنها محدود به ساخت شکل قطعه مانند جاذب است، بلکه باعث افزایش عملکرد آن نیز می شود. مقایسه پتانسیل حذف RhB با $3D-g-C_3N_4$ و $3D-resin$ به وضوح بر عملکرد برتر $3D-g-C_3N_4$ تأکید می کند، که نشان دهنده کارایی $g-C_3N_4$ برای جذب RhB و این واقعیت است که حتی پس از چاپ سه بعدی، $g-C_3N_4$ می تواند در جذب RhB مشارکت داشته باشد. این موضوع همچنین از طریق تجزیه و تحلیل SEM تأیید شد و نشان داد که ذرات $g-C_3N_4$ در سطح بیرونی $3D-g-C_3N_4$ قرار دارند و دارای پراکندگی یکنواخت هستند. شایان ذکر است که یکی از چالش های اصلی در چاپ DLP گونه های فعال، رسوب تدریجی آن ها در طول فرایند چاپ سه بعدی است که منجر به پراکندگی ناهمگن آنها در قطعه به دست آمده می شود. برای جلوگیری از این موضوع، همگن سازی مناسب با استفاده از فراصوت و همچنین طراحی الگوی چاپ سریع تر در این کار پیشنهاد شد.



شکل ۶: (A) EDS، و (B) نگاشت عنصری $3D-g-C_3N_4$
Figure 6: (A) EDS, and (B) Elemental mapping of $3D-CDP-g-C_3N_4$



شکل ۵: تصاویر SEM از $3D-g-C_3N_4$ (A و B) و $3D-resin$ (C و D)
Figure 5: (A, B) SEM images of $3D-g-C_3N_4$, and (C, D) $3D-resin$

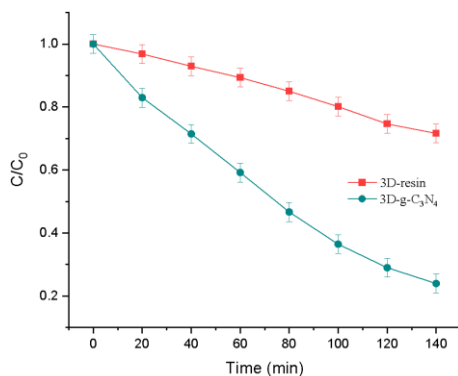
خصوصیات بیشتر $3D-g-C_3N_4$ با استفاده از EDS و تجزیه و تحلیل نقشه برداری عنصری انجام شد (شکل ۶). همانطور که در شکل ۶A نشان داده شده است، عناصر C، O و N در تجزیه و تحلیل EDS شناسایی شدند که در میان آنها، عنصر N می تواند نشان دهنده ادغام موفقیت آمیز $g-C_3N_4$ در قطعه چاپ سه بعدی باشد. عناصر C و O را می توان به رزین چاپ نسبت داد. نگاشت عنصری $3D-g-C_3N_4$ ، شکل ۶B، تأییدکننده پراکندگی همگن و یکنواخت $g-C_3N_4$ در قطعه چاپ سه بعدی است.

پایداری حرارتی $3D-g-C_3N_4$ نیز از طریق TGA، شکل ۷ بررسی شد. همانطور که نشان داده شده است، در دماهای زیر ۲۰۰ درجه سانتی گراد، تقریباً ماده بدون تغییر باقی می ماند و هیچ کاهش وزن قابل توجهی مشاهده نمی شود. این نشان می دهد که نمونه در برابر دماهای پایین مقاومت نشان می دهد. در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد، کاهش وزن جزئی شروع می شود که به تجزیه گروه های عاملی ناپایدار یا تخریب اولیه زنجیره های پلیمری نسبت داده می شود. با این حال، میزان کاهش وزن حداقل است و نشان می دهد که ساختار کلی پلیمر پایدار می ماند. کاهش وزن شدید بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد نشان دهنده تجزیه اولیه ساختارها است.

۳-۳- پتانسیل جذب $3D-g-C_3N_4$

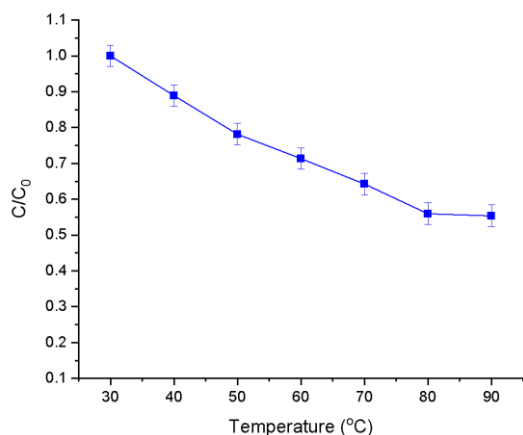
۳-۳-۱- نقش چاپ سه بعدی در جذب

هدف اصلی این تحقیق ترکیب شیمی مواد و فناوری چاپ سه بعدی برای ایجاد یک جاذب برای حذف RhB با بازده بالا آسان بود. برای این هدف، ابتدا $g-C_3N_4$ برای بهره مندی از ویژگی های آن تهیه شد. از



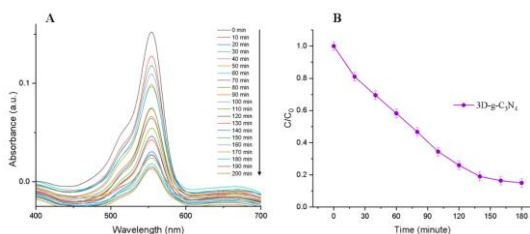
شکل ۸: مقایسه کارایی 3D-g-C₃N₄ و 3D-resin برای حذف RhB شرایط واکنش: غلظت اولیه محلول RhB: ۱/۱ میلی گرم بر لیتر، دما: ۸۰ درجه سانتی گراد، زمان تا ۱۴۰ دقیقه.

Figure 8: Comparison of the efficiency of 3D-resin and 3D-g-C₃N₄ for RhB removal. Reaction conditions: RhB solution initial concentration: 1.1 mg/L, temperature: 80 °C, time up to 140 min.



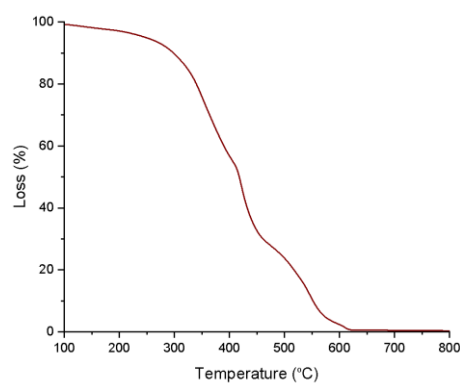
شکل ۹: بررسی تاثیر دما بر جذب RhB با استفاده از 3D-g-C₃N₄. غلظت اولیه محلول RhB: ۱/۱ میلی گرم بر لیتر، زمان تا ۱۴۰ دقیقه.

Figure 9: Investigation of the influence of temperature on the adsorption of RhB using 3D-g-C₃N₄, RhB solution initial concentration: 1.1 mg/L, time up to 140 min.



شکل ۱۰: بررسی تاثیر زمان تماس بر جذب RhB با استفاده از 3D-g-C₃N₄. (A) نمودار طیف UV-Vis و (B) غلظت در مقابل زمان.

Figure 10: Investigation of the influence of contact time on the adsorption of RhB using 3D-g-C₃N₄. (A) The plot of UV-Vis spectra, and (B) concentrations vs time.



شکل ۷: نمودار TGA از 3D-g-C₃N₄.

Figure 7: Thermogram of 3D-g-C₃N₄.

۳-۳-۲- اثر دما

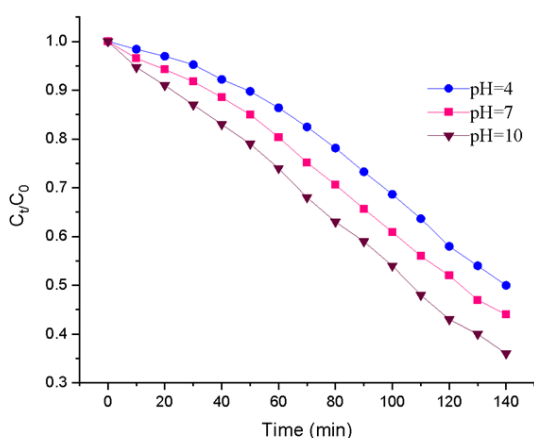
یکی از عوامل موثر در جذب رنگزها دما است. فرض بر این است که با افزایش دما و در نتیجه افزایش برخورد مؤثر مولکولهای RhB با جاذب، بازده حذف افزایش می یابد. برای تایید این فرض، حذف RhB با استفاده از 3D-g-C₃N₄ در دماهای مختلف (۹۰-۲۰ درجه سانتی گراد) ارزیابی شد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش دما از ۲۰ به ۸۰ درجه سانتی گراد، جذب و رنگزدایی RhB بهبود یافت. با این حال، تغییر دمای واکنش از ۸۰ به ۹۰ درجه سانتی گراد، تأثیر قابل توجهی بر جذب RhB نداشت و تنها افزایش جزئی در حذف رنگزا مشاهده شد. با در نظر گرفتن این نتایج، دمای بهینه واکنش ۸۰ درجه سانتی گراد انتخاب شد.

۳-۳-۳- تاثیر زمان تماس

برای یافتن دمای بهینه برای حذف RhB، عملکرد 3D-g-C₃N₄ به عنوان تابعی از زمان تماس مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱۰). برای این منظور، محلول RhB با غلظت مشخص تهیه شد. حذف رنگزا در حضور 3D-g-C₃N₄ با استفاده از طیفسنجی UV-Vis در فواصل زمانی کوتاه (۱۰ دقیقه) اندازه گیری شد. با توجه به نتایج، با افزایش زمان تماس به ۱۸۰ دقیقه، غلظت RhB به تدریج کاهش یافت که بر اهمیت این عامل بر عملکرد 3D-g-C₃N₄ تأکید می کند. قابل توجه است که طولانی شدن بیشتر زمان تماس تأثیر چندانی نشان نداد و غلظت RhB با افزایش زمان تماس تا ۱۹۰ دقیقه تغییر قابل توجهی نداشت. از این رو، زمان تماس بهینه برای حذف RhB ۱۸۰ دقیقه به دست آمد.

(۳۳، ۳۲). یکی از رنگزاهای کاتیونی پرکاربرد که عملکرد $g-C_3N_4$ در حذف آن مورد توجه قرار گرفته، رنگزای (RhB) می‌باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که سازوکار اصلی جذب RhB بر روی سطح $g-C_3N_4$ از نوع جذب شیمیایی است که به صورت خود به خود انجام می‌شود. نتایج نشان داد که داده‌های جذب به طور دقیق با مدل لانگمویر (تک‌لایه) تطابق دارد و تحلیل سینتیکی شبه درجه دو سازگار است؛ این دو نشانه قوی از جذب شیمیایی و برقراری پیوند میان رنگ و سطح ماده هستند (۳۴). تحلیل‌های ایزوترمی نشان داده‌اند که فرایند جذب RhB از مدل لانگمویر تبعیت کرده که نشانگر وجود مکان‌های فعال شیمیایی و نیرویی قوی در پیوند مولکول با سطح جاذب است و دارای ماهیت تک‌لایه‌ای و شیمیایی است (۳۵). همچنین، انرژی جذب و تغییرات ترمودینامیکی مانند ΔG منفی و ΔH مثبت تأییدکننده ماهیتی شیمیایی هستند (۳۵، ۳۶). از منظر مولکولی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی بین بار منفی سطح $g-C_3N_4$ و بخش کاتیونی RhB تعاملات $\pi-\pi$ میان ساختار آروماتیک $g-C_3N_4$ و حلقه‌های بنزی RhB، نقشی اساسی در پایداری جذب دارند (۳۳). در نمونه‌هایی که از نانوساختارهای $g-C_3N_4$ مانند نانوصفحات یا نانولوله‌ها استفاده شده، ظرفیت جذب به طور قابل توجهی افزایش یافته است (۳۷).

اساس جذب با گرافیت کربن نیتريد شیمیایی است اما به علت چاپ سه بعدی قطعه که یک ساختار متخلخل است نمی‌توان سازوکار جذب فیزیکی را در ساختار چاپ شده نادیده بگیریم. برهم‌کنش‌های شیمیایی نظیر پیوندهای هیدروژنی بین رزین پلیمری شده می‌تواند در جذب نقش بازی کند. پس می‌توان نتیجه گرفت که سازوکار جذب مجموعه‌ای از جذب فیزیکی و شیمیایی است که خود این مسئله دلیلی بر کارایی قطعه تولید شده است.



شکل ۱۲: بررسی تاثیر pH بر جذب RhB با استفاده از $3D-g-C_3N_4$ ، غلظت اولیه محلول RhB: ۱/۱ میلی گرم بر لیتر، زمان تا ۱۴۰ دقیقه.

Figure 12: Investigation of the influence of pH on the adsorption of RhB using $3D-g-C_3N_4$, RhB solution initial concentration: 1.1 mg/L, time up to 140 min.



شکل ۱۱: تغییر رنگ $3D-g-C_3N_4$ تازه از زرد به صورتی بر اثر جذب RhB شرایط واکنش: غلظت اولیه محلول RhB: ۱/۱ میلی گرم بر لیتر، دما: ۸۰ درجه سانتی گراد.

Figure 11: C: color change of fresh $3D-g-C_3N_4$ from yellow to pink upon RhB adsorption reaction conditions: RhB solution initial concentration: 1.1 mg/L, temperature: 80°C.

با جذب RhB، رنگ قطعه $3D-g-C_3N_4$ که از رنگ زرد به صورتی تغییر یافته است، (شکل ۱۱)، جذب موفقیت آمیز رنگ RhB را در سراسر یک پارچه تایید می‌کند.

۳-۳-۴- اثر pH

تأثیر pH محلول بر عملکرد جذبی $3D-g-C_3N_4$ نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، جذب RhB در محلول‌های اسیدی (pH=۴) و بازی (pH=۱۰) اندازه‌گیری و با محلول خنثی (pH=۷) مقایسه شد. بر اساس نتایج، $3D-g-C_3N_4$ بهترین و بدترین عملکرد خود را به ترتیب در شرایط بازی و اسیدی از خود نشان داد. با توجه به اینکه RhB یک رنگزای کاتیونی است، این مشاهدات قابل توجیه است. به طور دقیق‌تر، بار منفی در $g-C_3N_4$ که از شش الکترون تک جفت نیتروژن ناشی می‌شود، می‌تواند تحت شرایط اسیدی پروتونه شود و بازده جذب RhB را کاهش دهد. به عبارت دیگر، از آنجایی که در pH=۴ غلظت H^+ بالا است، این یون‌ها با رنگزا RhB برای برهم‌کنش با مکان‌های فعال در جاذب‌ها رقابت می‌کنند و در نتیجه جذب RhB را کاهش می‌دهند. در مقابل، در شرایط اولیه، مولکول‌های RhB شانس بیشتری برای برهم‌کنش با $3D-g-C_3N_4$ دارند و عدم وجود گونه‌های رقیب منجر به بهبود بازده جذب می‌شود (شکل ۱۲).

۳-۴- سازوکار جذب رودامین بی توسط $g-C_3N_4$

گرافیت کربن به عنوان یک جاذب نیمه‌هادی پلیمری با ساختار آروماتیک غنی از نیتروژن، دارای ویژگی‌هایی چون سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل، پایداری شیمیایی و حرارتی مناسب و همچنین توانایی در برقراری برهم‌کنش‌های سطحی مؤثر با آلاینده‌های آلی است.

۳-۵- سینتیک واکنش

مطابق با مطالعات پیشین، فرایند جذب رنگ RhB توسط جاذبها اغلب از سینتیک شبه مرتبه دوم تبعیت می‌کند. برای بررسی رفتار سینتیکی واکنش جذب رنگزای رودامین بی توسط جاذب 3D-g-C₃N₄ آزمایش‌ها در دمای مختلفی انجام شد. غلظت رنگ (C_t) در طول فرایند جذب از طریق اندازه‌گیری میزان جذب نوری رنگ در طول موج بیشینه آن (λ_{max}) محاسبه شد. به همین ترتیب نرخ واکنش جذب از طریق کاهش جذب نوری RhB در λ_{max} نسبت به زمان تعیین شد. از آن جا که نسبت جذب نوری رنگ به جذب نوری اولیه A₀ برابر با نسبت غلظت C_t/C₀ است، ثابت سرعت ظاهری (k_{app}) برحسب min⁻¹ 1 با توجه به روابط ۳ و ۴ تعریف می‌گردد:

$$\frac{dC_t}{dt} = -k_{app} C_t \quad (3)$$

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = \frac{\ln A_t}{A_0} = -k_{app} t \quad (4)$$

با توجه به جذب نوری در زمان t به مقدار اولیه، مقادیر k_{app} از شیب نمودار ln(A_t/A₀) بر حسب زمان t (ثانیه) محاسبه شد. مقادیر بدست آمده از k_{app} در دماهای مختلف (۳۱۳، ۳۲۳، ۳۳۳، ۳۴۳، ۳۵۳ درجه کلون) در جدول ۲ گزارش شده‌اند. مشاهده شد که با افزایش دمای واکنش، انرژی جنبشی افزایش می‌یابد. این پدیده را می‌توان به افزایش شدت برخورد بین مولکول‌ها در دماهای بالا نسبت داد. بر اساس رابطه آرنیوس (رابطه ۵) انرژی های فعال سازی (E_a) با رسم نمودار lnk در مقابل 1/T (شکل ۱۳) بدست آمد. مقدار R² در این نمودار برای رنگزای RhB برابر با ۰/۹۸ بدست آمد.

سپس از رابطه آرنیوس برای محاسبه انرژی فعال سازی (E_a) استفاده گردید.

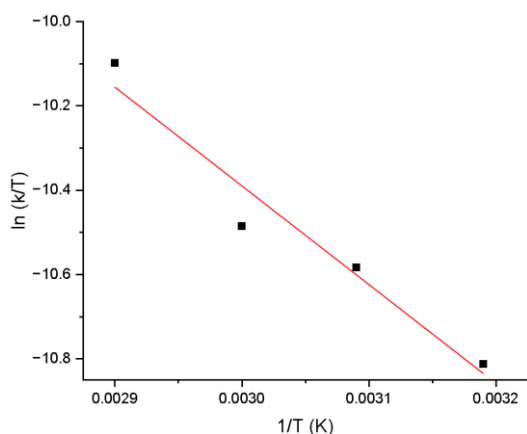
$$\ln k = \ln A - \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (5)$$

که در آن A ضریب آرنیوس، R ثابت گاز ایده آل برابر با JK⁻¹ mol⁻¹ و ۸/۳۱۴ T دمای مطلق (برحسب کلون) است. مقدار انرژی فعال سازی واکنش برابر با ۱۲/۳۷ kJ/mol محاسبه شد که نشان‌دهنده نیاز نسبتاً پایین واکنش به انرژی برای انجام است.

در ادامه عوامل ترمودینامیکی واکنش، شامل آنتروپی فعال سازی (ΔS[#]) و آنتالپی فعال سازی (ΔH[#]) با استفاده از رابطه آیرینگ (رابطه ۶) محاسبه شدند.

$$\ln \left(\frac{k}{T} \right) = \ln \left(\frac{k_B}{h} \right) + \frac{\Delta S^\#}{R} - \frac{\Delta H^\#}{R \left(\frac{1}{T} \right)} \quad (6)$$

در این رابطه، k_B ثابت بولتزمن (۱/۳۸×۱۰ JK⁻¹) و h ثابت پلانک (۶/۲۶×۳۴-۱۰ JK⁻¹mol⁻¹) هستند. نمودار ln(k/T) در برابر 1/T ترسیم شد (شکل ۱۴). مقدار R² در این نمودار برای رنگزای RhB برابر با ۰/۹۶ بدست آمد. آنتروپی فعال سازی ΔS[#] برابر با ۲۴۶ J/mol.K و آنتالپی فعال سازی (ΔH[#]) برابر با ۹/۵ kJ/mol بدست آمد. که مقدار منفی ΔS[#] نشان دهنده کاهش بی‌نظمی در حالت گذار است که می‌تواند ناشی از ساختار منظم و متراکم ناحیه فعال جاذب در طول واکنش باشد. همچنین مقدار مثبت و نسبتاً پایین ΔH[#] موید ماهیت گرماگیر و کم انرژی بودن مسیر واکنش است. این نتایج به طور کلی بیانگر آن هستند که واکنش کاهش RhB در حضور g-C₃N₄ چاپ سه‌بعدی با سرعت مناسب و نیاز به انرژی پایین انجام شده است و ساختار منظم و فعال سطح جاذب نقش موثری در بهبود عملکرد سینتیکی آن داشته است.



شکل ۱۳: نمودار lnk در برابر 1/T (رابطه آرنیوس) در پنج دمای مورد مطالعه.

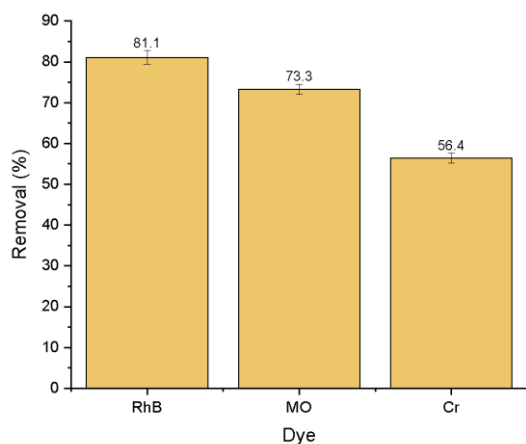
Figure 13: The diagram of ln k vs.1/T (Arrhenius equation) at five studied temperatures.

جدول ۲: مقادیر ترمودینامیکی و سینتیکی برای رنگزای RhB.

Table 2: The thermodynamic and kinetic values of the RhB.

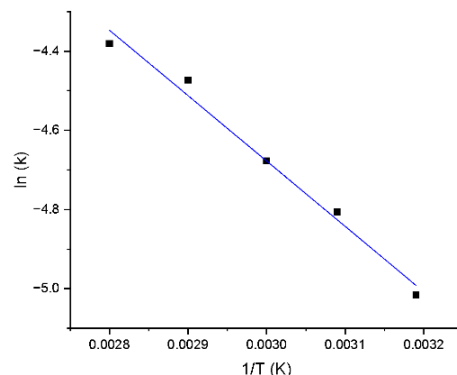
Dye	T (K)	k (min ⁻¹)	E _a (kJ/mol)	ΔS [#] (J/mol.K)	ΔH [#] (kJ/mol)
RhB	313	0.00663	12.374	-246.0	9.56
	323	0.00817			
	333	0.00930			
	343	0.0141			
	353	0.01251			

(جدول ۳). یکی از جذاب‌ترین دسته‌ها از مواد جاذب برای رنگبری، مواد زیست-پایه می‌باشند. برای مثال می‌توان به پرلیت اشاره نمود که یک سنگ آتشفشانی است و همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود این ماده کارایی مطلوبی را برای حذف رودامین بی داشته است. البته باید اشاره نمود که این نوع از سنگ آتشفشانی در همه جا در دسترس نمی‌باشد و این ترکیب به صورت یک پودر نرم وجود دارد که جداسازی آن را از محیط آبی دشوار می‌سازد. از جمله دیگر این مواد می‌توان به کربن فعال حاصل از شکر سفید اشاره نمود. همانطور که در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد این ترکیب نیز دارای کارایی رنگبری بالایی است اما روش سنتز این ترکیب، یک روش چند مرحله‌ای شامل اسیدشویی و فعال‌سازی با باز قوی در شرایط استفاده از جو بی‌اثر می‌باشد. در این مورد نیز خاصیت پودری شکل جاذب می‌تواند جداسازی و بازیافت آن را تحت تاثیر قرار دهد. سایر مواد فهرست شده در جدول ۳ نیز دارای کارایی مناسب برای حذف رودامین بی داشته‌اند البته به دلیل تفاوت شرایط جذب نمی‌توان مقایسه دقیقی بین جاذب گزارش شده در این مقاله و سایر جاذب‌ها داشت، اما با توجه به این جدول می‌توان نتیجه‌گیری نمود که مهم‌ترین ویژگی مطلوب $3D-g-C_3N_4$ به عنوان جاذب، شکل قطعه‌ای مانند آن است که فرایند بازیافت را تسهیل می‌نماید. همچنین استفاده از گرافیت کربن نیتريد به عنوان ماده جاذبی که با روشی ساده به دست می‌آید و کاربرد مقدار بسیار ناچیز از این ترکیب در قطعه چاپ شده از دیگر مزایای $3D-g-C_3N_4$ می‌باشند. بنابراین هر چند جاذب‌های موثرتر دیگری نیز گزارش شده‌اند، عملکرد جاذب حاضر می‌تواند قابل قبول تلقی گردد.



شکل ۱۵: مقایسه کارایی $3D-g-C_3N_4$ برای حذف رنگزاهای آلی مختلف.

Figure15: Comparison of the efficiency of $3D-g-C_3N_4$ for removal of various organic dyes.



شکل ۱۴: نمودار $\ln k/T$ در برابر $1/T$ (رابطه آیرینگ) در چهار دمای مورد مطالعه.

Figure14: The diagram of $\ln k/T$ vs. $1/T$ (Eyring equation) at four temperatures.

در جدول ۲، مقادیر ثابت سرعت ظاهری برای رنگزای RhB در پنج دمای مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دما از 313 به 353 درجه کلوین، مقدار از 0.006 به 0.012 min^{-1} افزایش یافته است که بیانگر افزایش نرخ واکنش با دما است. همچنین مقادیر $\ln(k/T)$ و $1/T \cdot \ln k$ برای تحلیل‌های سینتیکی و ترمودینامیکی محاسبه شده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده آن است که ساختار $g-C_3N_4$ چاپ‌شده با داشتن سطح فعال مناسب و ویژگی‌های ترمودینامیکی مطلوب، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انرژی فعال‌سازی و تسریع فرایند حذف رنگزای آلی مانند RhB داشته باشد.

۳-۶- مطالعه جذب سایر رنگزاهای

بازده بالای $3D-g-C_3N_4$ برای حذف RhB انگیزه‌ای شد تا بررسی جذب سایر رنگزاهای نیز مورد بررسی قرار گیرد. آزمون‌های حذف رنگزای برای همه آزمون‌ها سه مرتبه تکرار شد. برای این منظور، جذب متیل نارنجی (MO) و کنگو رد (Cr) در شرایط بهینه (دما 80°C ، درجه سانتی‌گراد، زمان 180 دقیقه و غلظت اولیه رنگزا $1/1$ میلی گرم در لیتر)، شکل ۱۵ ارزیابی شد. عملکرد جذب رنگزاهای در شرایط ثابت ذکر شده به ترتیب برای RhB برابر با $(81.1 \pm 3.2)\%$ ، برای MO $(73.3 \pm 3.2)\%$ و برای Cr $(56.4 \pm 4.2)\%$ گزارش شد. با توجه به نتایج، $3D-g-C_3N_4$ نه تنها می‌تواند به طور مؤثر RhB را که یک رنگزای کاتیونی است جذب کند، بلکه برای جذب رنگزاهای آلی دیگر نیز فعال بوده و تطبیق‌پذیری $3D-g-C_3N_4$ یکپارچه توسعه یافته را تایید می‌کند.

۳-۷- مقایسه با فعالیت‌های صورت گرفته

در حوزه حذف رنگزاهای آلی از پساب‌ها، انواع مختلفی از جاذب‌ها به کار رفته‌اند که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند

جدول ۳: مقایسه فعالیت های صورت گرفته برای حذف رنگزای RhB.

Table 3: Comparison of activities carried out to remove RhB dye.

Entry	Adsorbent	Contact Time (min)	Initial Dye Concentration	Removal efficiency (%)	References
1	3D-g-C ₃ N ₄	180	1.1 mg	81	-
2	Perlite	50	20-100	90	(38)
3	Pomegranate Peel	10	5	89.8	(42)
4	Activated White Sugar Carbon	12	50 mg/L	98	(39)
5	Polymeric Dowex	100	100	98.4	(40)
6	Peat	240	10	93	(41)

یکی از معایبی که می توان برای جاذب چاپ شده سه بعدی در نظر گرفت، آن است که میزان دسترسی رنگزا به گرافیت کربن نیتريد در ساختار چاپ شده کم می شود چراکه این ماده در ساختار پلیمری دفن می شود. بنابراین ممکن است نسبت به گرافیت کربن چاپ نشده کارایی کمتری داشته باشد.

۴- نتیجه گیری

با هدف ساخت یک جاذب قطعه ای g-C₃N₄ سنتز و پس از اختلاط در رزین، با روش چاپ سه بعدی به روش پخت نوری سازه شامل آن ساخته شد. عملکرد قطعه به دست آمده، 3D-g-C₃N₄ برای حذف RhB از محیط آبی ارزیابی گردید و اثرات عوامل تأثیرگذار، شامل دما، زمان تماس و pH مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که افزایش دما و طولانی شدن زمان تماس با جاذب برای جذب مفید بوده و دما و زمان تماس بهینه به ترتیب ۸۰ درجه سانتی گراد و ۱۸۰ دقیقه است. علاوه بر این، 3D-g-C₃N₄ بهترین کارایی را برای حذف RhB کاتیونی در شرایط اولیه نشان داد. مطالعات مقایسه ای با نمونه بدون جاذب، یعنی 3D-resin نشان داد که نقش چاپ سه بعدی تنها به شکل دهی جاذب محدود نمی شود، بلکه بهبود ظرفیت جذب از طریق ایجاد برهم کنش های الکترواستاتیکی با RhB و به دام افتادن فیزیکی آن است. شایان ذکر است که جاذب چاپ سه بعدی شده در این تحقیق می تواند برای جذب سایر رنگزاها مانند Cr و MO استفاده شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران قدرانی می نمایند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

۳-۸- مزایا و محدودیت های جاذب سنتز شده

یکی از مهم ترین مزایای استفاده از گرافیت کربن نیتريد در این ترکیب، سادگی سنتز آن از طریق فرایند حرارتی است. ماده اولیه آن، ملامین، به عنوان پیش ماده ارزان قیمت و در دسترس، امکان تولید آسان و مقرون به صرفه را فراهم می کند. همچنین g-C₃N₄ به دلیل دارا بودن گروه های عاملی مانند -NH₂ و =N- دارای مراکز فعال برای برهم کنش های شیمیایی و فیزیکی با آلاینده هاست. این امر موجب افزایش بازده جذب در طیف وسیعی از رنگزاهای آنیونی و کاتیونی می شود (۴۲). این ماده پایداری شیمیایی و حرارتی بالایی دارد (۴۳) و یکی از جاذب های غیرسمی با طرز تهیه آسان (۴۴) و کاتالیزور نوری شناخته شده است (۴۵). همان طور که اشاره شد، این ماده می تواند از طریق برهم کنش های شیمیایی در فرایند جذب نقش فعالی ایفا کند. از دیگر مزایای این جاذب، چند منظوره بودن آن است، به گونه ای که قابلیت بررسی و حذف سایر رنگزاهای آلی را نیز داراست. افزون بر این، ویژگی هایی همچون سازگاری با محیط زیست، هزینه ساخت پایین، و خواص الکترونی خاص موجب شده تا این ماده به طور گسترده در کاربردهای زیست محیطی به عنوان جاذب مورد توجه قرار گیرد (۴۶). یکی دیگر از مزایای کلیدی نانولایه های کربن نیتريد گرافیتی، سطح ویژه ی بسیار بالای آن هاست که با فراهم کردن تعداد زیادی محل فعال، به طور مؤثری ظرفیت جذب را افزایش می دهد و بازده فرایند را در حذف ترکیبات رنگزا بهبود می بخشد (۴۸، ۴۷). علاوه بر این، با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی، این امکان حاصل شد تا حالت پودری این ماده به شکل قطعه ای تبدیل شود؛ امری که بازایی و استفاده مجدد از آن را تسهیل می کند. برای چاپ قطعه از روش پردازش نور دیجیتال (DLP) استفاده شد که روشی ساده، کم هزینه و نسبتاً سریع است. چاپ سه بعدی علاوه بر فراهم سازی ساختاری منسجم، به دلیل افزایش سطح تماس و ایجاد برهم کنش های فیزیکی، می تواند به بهبود عملکرد جذب نیز کمک کند.

۵- مراجع

1. Xing J, Wang N, Li X, Wang J, Taiwaikuli M, Huang X, et al. Synthesis and modifications of g-C₃N₄-based materials and their applications in wastewater pollutants removal. *J Environ Chem Eng.* 2022;10(6):108782. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108782>
2. Wang W, Xu P, Chen M, Zeng G, Zhang C, Zhou C, et al. Alkali metal-assisted synthesis of graphite carbon nitride with tunable band-gap for enhanced visible-light-driven photocatalytic performance. *ACS Sustain Chem Eng.* 2018;6(11):15503-16. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03965>
3. Li R, Cui X, Bi J, Ji X, Li X, Wang N, et al. Urea-induced supramolecular self-assembly strategy to synthesize wrinkled porous carbon nitride nanosheets for highly-efficient visible-light photocatalytic degradation. *RSC Adv.* 2021;11(38):23459-70. <https://doi.org/10.1039/D1RA03524J>
4. Bi J, Huang X, Wang J, Tao Q, Lu H, Luo L, et al. Self-assembly of immobilized titanate films with different layers for heavy metal ions removal from wastewater: Synthesis, modeling and mechanism. *Chem Eng J.* 2020;380:122564. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122564>
5. Al-Tohamy R, Ali SS, Li F, Okasha KM, Mahmoud YA-G, Elsamahy T, et al. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2022;231:113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
6. Solayman H, Hossen MA, Abd Aziz A, Yahya NY, Leong KH, Sim LC, et al. Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review. *J Environ Chem Eng.* 2023;11(3):109610. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109610>
7. Shabir M, Yasin M, Hussain M, Shafiq I, Akhter P, Nizami A-S, et al. A review on recent advances in the treatment of dye-polluted wastewater. *J Ind Eng Chem.* 2022;112:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.05.013>
8. Kumari H, Sonia, Suman, Ranga R, Chahal S, Devi S, et al. A review on photocatalysis used for wastewater treatment: dye degradation. *Water Air Soil Pollut.* 2023;234(6):349. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06359-9>
9. Cao M, Zhuang Z, Liu Y, Zhang Z, Xuan J, Zhang Q, et al. Peptide-mediated green synthesis of the MnO₂@ ZIF-8 core-shell nanoparticles for efficient removal of pollutant dyes from wastewater via a synergistic process. *J Colloid Interface Sci.* 2022;608:2779-90. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.003>
10. Qiu B, Shao Q, Shi J, Yang C, Chu H. Application of biochar for the adsorption of organic pollutants from wastewater: Modification strategies, mechanisms and challenges. *Sep Purif Technol.* 2022;300:121925. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121925>
11. Xiao G, Wang Y, Xu S, Li P, Yang C, Jin Y, et al. Superior adsorption performance of graphitic carbon nitride nanosheets for both cationic and anionic heavy metals from wastewater. *Chin J Chem Eng.* 2019;27(2):305-13. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.028>
12. Ahmadi A, Hajilou M, Zavari S, Yaghmaei S. A comparative review on adsorption and photocatalytic degradation of classified dyes with metal/non-metal-based modification of graphitic carbon nitride nanocomposites: Synthesis, mechanism, and affecting parameters. *J Clean Prod.* 2023;382:134967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134967>
13. Molla A, Youk JH. Mechanochemical synthesis of graphitic carbon nitride/graphene oxide nanocomposites for dye sorption. *Dyes Pigments.* 2023;220:111725. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111725>
14. Li J, Xiong Y, Wan H, Chen J, Fang S, Song X, et al. In-situ investigation of dye pollutant adsorption performance on graphitic carbon nitride surface: ATR spectroscopy experiment and MD simulation insight. *J Hazard Mater.* 2021;418:126297. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126297>
15. Pei R, Fan L, Zhao F, Xiao J, Yang Y, Lai A, et al. 3D-Printed metal-organic frameworks within biocompatible polymers as excellent adsorbents for organic dyes removal. *J Hazard Mater.* 2020;384:121418. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121418>
16. Liu X, Zhao S, Li Q, He P, Duan X, Jia D, et al. 3D printed GO-g-C₃N₄-geopolymer components with acid treatment for the removal of methylene blue from wastewater. *J Am Ceram Soc.* 2025;108(5):e20377. <https://doi.org/10.1111/jace.20377>
17. Chen L, Zhou S, Li M, Mo F, Yu S, Wei J. Catalytic Materials by 3D Printing: A Mini Review. *Catalysts.* 2022;12(10):1081. <https://doi.org/10.3390/catal12101081>
18. Rezadoust AM, Sadjadi S, Heydari A. 3D-printed metal-organic framework encapsulated Keggin heteropolyacid for catalytic purpose. *J Mol Struct.* 2024;1305:137808. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137808>
19. Wang X, Guo W, Abu-Reziq R, Magdassi S. High-Complexity WO₃-Based Catalyst with Multi-Catalytic Species via 3D Printing. *Catalysts.* 2020;10(8):840. <https://doi.org/10.3390/catal10080840>
20. Sadjadi S, Rezadoust AM, Yaghoubi S, Monflier E, Heydari A. 3D-Printed Cyclodextrin Polymer Encapsulated Wells-Dawson: A Novel Catalyst for Knoevenagel Condensation Reactions. *ACS omega.* 2023;8(48):45844-53. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06592>
21. Mishra V, Ror CK, Negi S, Kar S, Borah LN. 3D printing with recycled ABS resin: Effect of blending and printing temperature. *Mater Chem Phys.* 2023;309:128317. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128317>
22. Daguano JK, Giora FC, Santos KF, Pereira AB, Souza MT, Davila JL, et al. Shear-thinning sacrificial ink for fabrication of Biosilicate® osteoconductive scaffolds by material extrusion 3D printing. *Mater Chem Phys.* 2022;287:126286. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126286>
23. Ravandi MRM, Dezianian S, Ahmad MT, Ghoddosian A, Azadi M. Compressive strength of metamaterial bones

- fabricated by 3D printing with different porosities in cubic cells. *Mater Chem Phys.* 2023;299:127515. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127515>
24. Ranjbar F, Rezadoust AM, Sadjadi S. Design and fabrication of collapsible 3D-printed monoliths and their potential applications as temperature indicator and thermos-responsive releasing carrier. *Prog Addit Manuf.* 2025;1-13. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01016-5>
 25. Zhu J, Wu P, Chao Y, Yu J, Zhu W, Liu Z, et al. Recent advances in 3D printing for catalytic applications. *Chem Eng J.* 2022;433:134341. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134341>
 26. Gao Y, Lalevée J, Simon-Masseron A. An overview on 3D printing of structured porous materials and their applications. *Adv Mater Technol.* 2023;8(17):2300377. <https://doi.org/10.1002/admt.202300377>
 27. Chen J, Wu P, Bu F, Gao Y, Liu X, Guan C. 3D printing enhanced catalysis for energy conversion and environment treatment. *DeCarbon.* 2023;2:100019. <https://doi.org/10.1016/j.decarb.2023.100019>
 28. Gonçalves NP, Olhero SM, Labrincha JA, Novais RM. 3D-printed red mud/metakaolin-based geopolymers as water pollutant sorbents of methylene blue. *J Clean Prod.* 2023;383:135315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135315>
 29. Far HS, Najafi M, Hasanazadeh M, Rabbani M. Self-supported 3D-printed lattices containing MXene/metal-organic framework (MXOF) composite as an efficient adsorbent for wastewater treatment. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2022;14(39):44488-97. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c13830>
 30. Ng TS, Norman A, Mohd Yusoff NH, Chong CH, Cheah KH, Yap TC, et al. 3D Printing and Optimization of Biocompatible and Hydrophilic PEGDA-HEMA Lattice for Enhanced RhB Dye Removal From Aqueous Solution. *Int J Polym Sci.* 2024;2024(1):6633503. <https://doi.org/10.1155/2024/6633503>
 31. Pawar OY, Lu B, Lim S. Enhanced Flexible Piezoelectric Nanogenerators Using Ethanol-Exfoliated $g-C_3N_4$ /PVDF Composites via 3D Printing for Self-Powered Applications. *Nanomaterials.* 2024;14(19):1578. <https://doi.org/10.3390/nano14191578>
 32. Yang X, Zhang L, Wang D, Zhang Q, Zeng J, Zhang R. Facile synthesis of nitrogen-defective $g-C_3N_4$ for superior photocatalytic degradation of rhodamine B. *RSC Adv.* 2021;11(49):30503-9. <https://doi.org/10.1039/D1RA05535F>
 33. Zheng M, Guo M, Ma F, Li W, Shao Y. Recent advances in graphitic carbon nitride-based composites for enhanced photocatalytic degradation of rhodamine B: mechanism, properties and environmental applications. *Nanoscale Adv.* 2025. <https://doi.org/10.1039/D5NA00439J>
 34. Modwi A, Elamin MR, Idriss H, Elamin NY, Adam FA, Albadri AE, et al. Excellent adsorption of dyes via $MgTiO_3@g-C_3N_4$ nanohybrid: construction, description and adsorption mechanism. *Inorganics.* 2022;10(11):210. <https://doi.org/10.3390/inorganics10110210>
 35. Alhathloul R, Aldaghri O, Ibnaouf K, Alqarni LS, Modwi A, Taha KK, et al. Efficient Rhodamine B dye uptake onto $MgZrO_3@g-C_3N_4$ nanostructures: Fabrication and adsorption mechanism. *Inorg Chem Commun.* 2024;165:112477. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112477>
 36. Bazan-Wozniak A, Jędrzejczak A, Wolski R, Kaczmarek S, Nosal-Wiercińska A, Cielecka-Piontek J, et al. A study on the adsorption of rhodamine b onto adsorbents prepared from low-carbon fossils: kinetic, isotherm, and thermodynamic analyses. *Molecules.* 2024;29(6):1412. <https://doi.org/10.3390/molecules29061412>
 37. Miao J, Xu G, Liu J, Lv J, Wu Y. Synthesis and photocatalytic performance of $g-C_3N_4$ nanosheets via liquid phase stripping. *J Solid State Chem.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.11.028>
 38. Vijayakumar G, Tamilarasan R, Dharmendrakumar M. Adsorption, Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic studies on the removal of basic dye Rhodamine-B from aqueous solution by the use of natural adsorbent perlite. *J Mater Environ Sci.*
 39. Xiao W, Garba ZN, Sun S, Lawan I, Wang L, Lin M, et al. Preparation and evaluation of an effective activated carbon from white sugar for the adsorption of rhodamine B dye. *J Clean Prod.* 2020;253:119989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119989>
 40. Khan M, Siddiqui MR, Otero M, Alshareef SA, Rafatullah M. Removal of rhodamine b from water using a solvent impregnated polymeric dowex 5wx8 resin: statistical optimization and batch adsorption studies. *Polymers.* 2020;12:500. <https://doi.org/10.3390/polym12020500>
 41. Chiang HI, Lim LB, Priyantha N. Sorption characteristics of peat from Brunei Darussalam for the removal of rhodamine B dye from aqueous solution: adsorption isotherms, thermodynamics, kinetics and regeneration studies. *Desalination and Water Treatment.* 2015;55:664-77. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.919609>
 42. Saigl ZM, Ahmed AM. Separation of rhodamine b dye from aqueous media using natural pomegranate peels. *Indonesia. J. Chem.* 2021;21(1):212. <https://doi.org/10.22146/ijc.5859>
 43. Pan K, Yu F, Liu Z, Zhou X, Sun R, Li W, et al. Enhanced low-temperature CO-SCR denitration performance and mechanism of two-dimensional CuCoAl layered double oxide. *J Environ Chem Eng.* 2022;10(3):108030. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108030>
 44. Barveen NR, Parasuraman B, Wang P-Y, Zeng C-W, Cheng Y-W, Thangavelu P. Facile construction of $ZnWO_4/g-C_3N_4$ heterojunction for the improved photocatalytic degradation of MB, RhB and mixed dyes. *Surf Interfaces.* 2024;53:105039. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2024.105039>
 45. Akram MY, Ashraf T, Tong L, Yin X, Dong H, Lu H. Architecting high-performance photocatalysts: A review of modified 2D/2D graphene/ $g-C_3N_4$ heterostructures. *J Environ Chem Eng.* 2024;12(5):113415. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113415>
 46. Khan MA, Mutahir S, Shaheen I, Qunhui Y, Bououdina M, Humayun M. Recent advances over the doped $g-C_3N_4$ in photocatalysis: A review. *Coord Chem Rev.* 2025;522:216227. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216227>

47. Luo W, Chen X, Wei Z, Liu D, Yao W, Zhu Y. Three-dimensional network structure assembled by $g-C_3N_4$ nanorods for improving visible-light photocatalytic performance. *Appl Catal B: Environ.* 2019;255:117761. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.117761>
48. Yan Y, Meng Q, Tian L, Cai Y, Zhang Y, Chen Y. Engineering of $g-C_3N_4$ for photocatalytic hydrogen production: a review. *Int J Mol Sci.* 2024;25(16):8842. <https://doi.org/10.3390/ijms25168842>

How to cite this article:

Sadjadi S, Ranjbar F, Rezadoust A.M. . Fabrication and performance investigation of 3D rinted $g-C_3N_4$ as an adsorbent for organic dye removal. *J Stud Color World.* 2025;15(2):449-463. <https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167585.1246> [In Persian].