

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

Sarina Dousti, Bahaaddin Mahmoodi, Mehran Bijari, Afsaneh Shahbazi*

Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, P.O. Code: 1983969411, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09-03-2024

Accepted: 13-07-2024

Available online: 16-09-2024

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/JCST.2024.167291.1224

Keywords:

Photocatalytic process

Graphite carbon nitride

Rhodamine B

Decolorization

ABSTRACT

Photocatalytic processes using solar energy are one of the new chemical purification methods in the purification of colored organic pollutants, attracting much attention. Graphite carbon nitride photocatalyst (g-C₃N₄) was synthesized using the thermal polymerization method and using (single or combined) melamine, thiourea, and ammonium chloride precursors. Synthesized photocatalysts based on g-C₃N₄ were analyzed to investigate their structure, morphology, and properties using XRD, FT-IR, SEM, EDX, BET, PL, and DRS analyses and to degrade the cationic dye Rhodamine B (RhB) used. The results of the experiments showed that the graphite carbon nitride synthesized with the combined precursor of melamine, thiourea, and ammonium chloride (MTA) with a dose of 0.2 g/l and a color concentration of 50 mg/l has the highest performance on the degradation of RhB color and after 2 hours, caused 100% decolorization of the dye solution. Also, the photocatalytic efficiency of MTA in the degradation of RhB dye was almost constant in five consecutive cycles. In addition, according to the results of the trapping experiments, the active species of superoxide radical ($\cdot O_2^-$) was the dominant species for the degradation process of RhB. Hence, MTA can be considered an efficient catalyst due to its advantages, such as one-step synthesis, effective photocatalytic performance, and reusability.

*Corresponding author: * a_shahbazi@sbu.ac.ir





بررسی اثر پیش‌ماده‌های مختلف در سنتز و بهبود عملکرد کاتالیزور نوری کربن نیتريد گرافیتی در تخریب ماده رنگزای رودامین بی توسط نور مرئی

سارینا دوستی^۱، بهاء‌الدین محمودی^۱، مهران بیجاری^۲، افسانه شهبازی^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه فناوری‌های محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، کدپستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

۲- دانشجوی دکترا، گروه فناوری‌های محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، کدپستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

۳- دانشیار، گروه فناوری‌های محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، کدپستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/JCST.2024.167291.1224

واژه‌های کلیدی:

فرایند کاتالیزور نوری

کربن نیتريد گرافیتی

رودامین بی

رنگ‌زدایی

فرایندهای کاتالیزور نوری با استفاده از انرژی خورشید، در زمره روش‌های تصفیه شیمیایی نوین در تصفیه آلاینده‌های آلی رنگی می‌باشد که در حال حاضر توجه بسیاری را به خود جلب نموده است. کاتالیزور نوری کربن نیتريد گرافیتی (g-C₃N₄) با استفاده از روش اسپارش حرارتی و با بهره‌گیری (تکی و یا ترکیبی) از پیش‌ماده‌های ملامین، تیوره و کلرید آمونیم سنتز شد. کاتالیزورهای نوری سنتز شده بر پایه g-C₃N₄ برای بررسی ساختار، ریخت‌شناسی و خواص آن‌ها با استفاده از آنالیزهای BET, EDX, SEM, FT-IR, XRD, PL و DRS مورد بررسی قرار گرفتند و به منظور تخریب ماده رنگزای کاتیونی رودامین بی (RhB) استفاده شدند. نتایج آزمایشات نشان داد که کربن نیتريد گرافیتی سنتز شده با پیش‌ماده ترکیبی ملامین، تیوره و کلرید آمونیم (MTA) با دوز ۰.۲ گرم بر لیتر و غلظت ماده رنگزای ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین عملکرد را بر تخریب RhB داشته و در بازه زمانی ۱۲۰ دقیقه (۲ ساعت) سبب رنگ‌زدایی ۱۰۰ درصدی از محلول رنگزا شد. همچنین کارایی کاتالیزور نوری MTA در تخریب ماده رنگزای RhB در پنج چرخه متوالی تقریباً ثابت بوده است. علاوه بر این، طبق نتایج آزمایشات به دام انداختن گونه‌های فعال رادیکال سوپر اکسید (•O₂⁻) گونه غالب برای فرآیند تخریب RhB بود. از این رو، MTA را می‌توان به دلیل مزایایی مانند سنتز یک مرحله‌ای، عملکرد کاتالیزور نوری موثر و قابلیت استفاده مجدد، یک کاتالیزور کارآمد در نظر گرفت.



۱- مقدمه

از کل آب‌های موجود کره زمین، ۹۷ درصد آب شور است و تنها ۳ درصد کل آب شیرین را تشکیل می‌دهد که به صورت نابرابر در سراسر زمین به شکل رودخانه‌ها، نهرها، یخچال‌ها و غیره پراکنده شده است. با این حال انتشار آلاینده‌های مختلف از صنایع به اکوسیستم‌های آبی، همین منابع آبی محدود را از نظر تامین آب شرب مورد نیاز انسان‌ها و حیات آبریان تهدید می‌کند (۱، ۲). بر این اساس، افزایش مداوم آلودگی آب‌ها یکی از مشکلات اساسی جوامع انسانی کنونی است (۳، ۴). آلودگی آب مستقیماً منجر به کمبود جدی منابع آب شیرین می‌شود. بر اساس گزارش شورای جهانی آب (WWC)، نزدیک به ۳٫۸ میلیارد نفر تا سال ۲۰۳۰ با کمبود آب مواجه خواهند شد (۵). لذا با توسعه صنعت چاپ و رنگرزی، مقدار زیادی از رنگزاهای آلی و سایر آلاینده‌ها به منابع آب شیرین ریخته می‌شوند و به محیط زیست آسیب جدی وارد می‌کنند (۶). در بین صنایع مختلف، صنایع نساجی حجم زیادی از پساب خود را که شامل رنگزاهای آلی باشد، به محیط‌های آبی تخلیه می‌کنند. آلودگی آب ناشی از رنگزاهای یک نگرانی زیست‌محیطی قابل توجه است، به ویژه در صنایعی مانند نساجی، کاغذ و فرآوری چرم، که در آن رنگزاهای زیادی استفاده می‌شود (۷). رنگزاهای آبی می‌توانند از طریق مسیره‌های مختلف وارد پیکره‌های آبی شوند که منجر به اثرات نامطلوب بر اکوسیستم‌های آبی و به طور بالقوه بر سلامت انسان می‌شود (۸، ۹). در این میان، گروه زانتن به دلیل خواص فتوفیزیکی عالی خود از جمله بازده کوانتومی فلورسانس بالا، ضریب خاموشی مولی، مقاومت در برابر سفیدکننده نوری و حلالیت متوسط در آب به خوبی شناخته شده هستند (۱۰-۱۲). این ویژگی‌های منحصر به فرد، رنگزاهای زانتن را تبدیل به گزینه مناسبی برای صنایع نساجی، داروسازی و چاپ تبدیل کرده است. یکی از آلاینده‌های گروه زانتن که اغلب در صنایع نساجی، لاستیک و کاغذ یافت می‌شود رودامین بی است. رودامین بی (RhB) یک ماده رنگزای کاتیونی است. به این معنی که می‌تواند در محلول آبی به یون‌های دارای بار مثبت تفکیک شود. RhB می‌تواند با گروه‌های منفی روی مولکول‌های الیاف تعامل کند و نمک‌هایی را تشکیل دهد که محکم‌تر به الیاف متصل شود و در نتیجه الیاف را رنگ‌دار کند. این ماده رنگزای دارای یک ساختار زنجیره کربنی طولی در دو طرف حلقه بنزن با نیتروژن در وسط همراه با یک گروه کربوکسیل است (۱۳، ۱۴). RhB برای انسان سمی بوده و در بدن انباشته می‌شود، سیستم غدد درون ریز را مختل می‌کند، باروری را مختل می‌کند و باعث آسیب ژنتیکی می‌شود (۱۵). قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های حاوی RhB می‌تواند باعث برقان و نارکوزیس در انسان شود (۱۶، ۱۷). علاوه بر این، RhB نیز به عنوان یک ماده رنگزای نوروتوکسیک در انسان و حیوانات طبقه‌بندی می‌شود که در صورت بروز آلودگی می‌تواند باعث عفونت در چشم، پوست، دستگاه

گوارش و دستگاه تنفسی شود (۱۸). رنگزا RhB مولکول‌های ضعیف قلیایی هستند که جدا می‌شوند و کاتیون‌های رنگارنگی تولید می‌کنند که پایدار بوده و قابل تجزیه زیستی نیستند (۱۹، ۲۰). بنابراین، نیاز فوری به توسعه روش‌های کارآمد، پایدار و سازگار با محیط زیست برای حذف آلاینده‌ها از پساب وجود دارد. در حال حاضر روش‌های رایج حذف مواد رنگزای آلی در صنعت شامل جداسازی غشایی، جذب سطحی، رسوب شیمیایی و الکتروشیمیایی، اکسایش صوتی و کاتالیزوری نوری می‌باشند (۲۱). در میان آن‌ها، کاتالیزوری نوری یک فناوری تصفیه آلودگی کارآمد و سازگار با محیط‌زیست است که می‌تواند مواد آلی را به طور کامل معدنی کرده و آنها را از طریق واکنش‌های ناشی از نور به دی‌اکسید کربن و آب تجزیه کند و در نتیجه از آلودگی ثانویه جلوگیری کند. در تحقیقات متعددی فناوری کاتالیزور نوری نیمه‌هادی بر روی تصفیه پساب مواد رنگزای آلی مورد مطالعه قرار گرفته است (۲۲، ۲۳). به عنوان منبع نور برای فرایند کاتالیزور نوری، نور خورشید با مزیت‌های برجسته از جمله منبع سازگار با محیط‌زیست و پایان‌ناپذیر، به عنوان ایده‌آل‌ترین قدرت برای رفع کمبود انرژی و حذف آلودگی استفاده شده است (۲۴). به منظور استفاده مؤثرتر از نور خورشید یا پرتوهای ناشی از منابع مصنوعی در واکنش‌های کاتالیزوری نوری، کاتالیزورهای نوری با جذب قوی در ناحیه مرئی باید ایجاد شوند (۲۵). در بین کاتالیزورهای نوری نیمه‌رسانای نور مرئی قوی و پایدار، نیتريد کربن گرافیتی (g-C₃N₄)، اخیراً توجه فوق‌العاده‌ای را به خود جلب کرده است. ساختار حلقه هپتازین و درجه چگالش بالا، این نانوماده بدون فلز را قادر می‌سازد تا دارای مزایای بسیاری مانند پایداری فیزیکی - شیمیایی خوب و همچنین ساختار الکترونیکی جذاب همراه با شکاف باند متوسط (eV ۲٫۷) باشد (۲۶-۲۸). این ویژگی‌های منحصر به فرد، g-C₃N₄ را به یک گزینه امیدوارکننده برای کاربردهای کاتالیزور نوری با استفاده از انرژی مرئی تبدیل می‌کند. همچنین عدم سمیت و پایداری شیمیایی و حرارتی بالاتر کاتالیزورهای نوری مبتنی بر g-C₃N₄، آن را برای کاربردهای متنوعی مانند تولید پراکسید هیدروژن، تولید هیدروژن، تثبیت نیتروژن و تصفیه پساب ایده‌آل می‌کند (۲۹، ۳۰). علاوه بر این، g-C₃N₄ فراوان است و به راحتی از طریق بسپارش یک مرحله‌ای مواد اولیه ارزان‌قیمت مانند سیانامید (۲۶، ۳۱)، اوره (۳۲، ۳۳)، تیواوره (۳۵)، ملامین (۳۶، ۳۷) و دی‌سیانامید (۳۸، ۳۹) تهیه می‌شود که باعث می‌شود کاتالیزوری نوری مبتنی بر g-C₃N₄ در مقایسه با سایر کاتالیزورهای نوری مرسوم انتخاب بهتری باشد (۴۰). با این حال، به دلیل جذب ناکافی نور مرئی و بازترکیب سریع جفت‌های الکترون-حفره تولید شده، عملکرد کاتالیزوری نوری g-C₃N₄ نیازمند بهبود است (۲۴).

نوآوری این پژوهش ادغام یک مرحله‌ای دو روش مختلف برای

ماده رنگزای RhB، پارامترهای موثر همچون pH، مقدار کاتالیزور نوری و غلظت ماده رنگزا با استفاده از نمونه اصلاح شده بررسی شد. به منظور بررسی عملکرد نمونه سنتز شده در شرایط طبیعی آزمایش حذف ماده رنگزا RhB تحت نور طبیعی خورشید انجام شد. مطالعات پایداری کاتالیزور نوری اصلاح شده طی ۵ چرخه حذف با کاتالیزور نوری و احیا انجام شد. همچنین مطالعات تکمیلی برای بررسی سینتیک تخریب آلاینده‌های رنگی و مطالعات سازوکار فرایندهای کاتالیزوری نوری به منظور بررسی رفتار حذف کاتالیزور نوری ماده رنگزای RhB توسط کربن نیتريد گرافیتی اصلاح شده در این مطالعه انجام شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

مواد استفاده شده در این پژوهش شامل ملامین^۱، تیواوره^۲، آمونیوم کلرید^۳، رنگزا رودامین بی^۴، هیدروکلریک اسید^۵ و سدیم هیدروکسید^۶ هستند. تمامی مواد استفاده شده از شرکت مرک خریداری شدند. مشخصات رنگزای رودامین بی و ساختار شیمیایی آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ توضیح داده شده است.

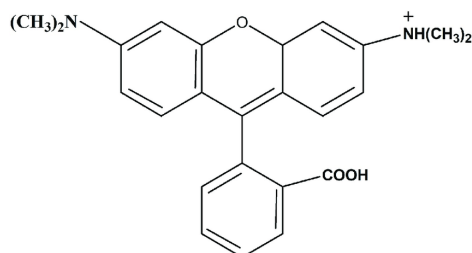
- 1- Band gap
- 2- Melamine
- 3- Thiourea
- 4- Ammonium chloride
- 5- Rhodamine B dye
- 6- Hydrochloric acid
- 7- Sodium hydroxide

اصلاح کربن نیتريد گرافیتی به منظور افزایش کیفیت کربن نیتريد گرافیتی اصلاح شده است. در این مطالعه، پژوهشگران از ترکیب هم‌زمان روش‌های دوپینگ غیر فلزی عنصر گوگرد در کنار لایه‌برداری توسط عامل دمنده شیمیایی آمونیوم کلرید برای افزایش عملکرد کاتالیزوری نوری کربن نیتريد گرافیتی اصلاح شده بهره برده‌اند. یک روش کارآمد و شناخته‌شده برای تنظیم شکاف گاف نوار^۱ $g-C_3N_4$ دوپ کردن عنصر گوگرد است که به طور قابل توجهی جذب نور را افزایش می‌دهد. رایج ترین روش برای سنتز کربن نیتريد گرافیتی دوپ‌شده با عنصر گوگرد، استفاده از پیش‌ماده تیواوره در فرایند بسپارش حرارتی است. استفاده از این روش با دو چالش اساسی همراه است. چالش اول، بازده تولید بسیار پایین کربن نیتريد گرافیتی از پیش‌ماده تیواوره نسبت به پیش‌ماده‌های دیگر همچون ملامین است که در این مطالعه برای حل این مشکل از ترکیب پیش‌ماده‌های ملامین و تیواوره به عنوان پیش‌ماده استفاده شده است. دومین چالش نرخ بالای بازترکیبی الکترون-حفره‌ها در نمونه‌های سنتز شده با پیش‌ماده تیواوره است. پژوهشگران در این مطالعه برای حل این مشکل از آمونیوم کلرید به عنوان عامل دمنده به منظور افزایش مساحت سطح و فاصله بین لایه‌های در کربن نیتريد گرافیتی و در نتیجه کاهش نرخ بازترکیبی الکترون-حفره‌ها استفاده کرده‌اند. به این ترتیب در یک سنتز یک‌مرحله‌ای به‌صورت هم‌زمان روش‌های دوپ کردن غیرفلزی عنصر گوگرد و لایه‌برداری توسط عامل دمنده آمونیوم کلرید مورد استفاده قرار گرفت. عملکرد کاتالیزور نوری نانومواد سنتز شده و تعیین کاتالیزور نوری بهینه با استفاده از آزمایش حذف ماده رنگزای کاتیونی RhB تحت شرایط ثابت انجام شد. به منظور تعیین شرایط بهینه برای حذف

جدول ۱: مشخصات رنگزا RhB.

Table 1: The characteristics of the RhB dye.

Dye	Acronyms	Molecular Weight (g/mol)	λ max (nm)	Classification	Linear Molecular Structure	Melting Point	Solubility in Water
Rhodamine B	RhB	472.02	553	Xanthene	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$	210-211	8-15



شکل ۱: ساختار مولکولی رنگزای RhB.

Figure 1: The molecular structure of the RhB dye.

۲- روش کار

ابتدا محلولی از ماده رنگزا، تحت تابش نور مرئی قرار داده شد. این کار در غیاب کاتالیزور نوری انجام گرفت تا از مقاومت ماده رنگزا در برابر تخریب مستقیم توسط نور در طول مدت مورد نظر اطمینان حاصل گردد. همچنین آزمایش‌های کنترلی نیز به منظور مقایسه تاثیر متغیرهای مختلف موثر بر فرایند تخریب در شرایط مختلف انجام شد. فعالیت کاتالیزوری نوری نانوماده برای تخریب رودامین بی در دمای اتاق و هوای آزاد با استفاده از تابش نور مرئی توسط یک لامپ ۵۰ وات با فاصله ۵ سانتی‌متری بین محلول و منبع تابش نور، مورد بررسی قرار گرفت. قبل از تابش نور، محلول با استفاده از هم‌زن مغناطیسی در محیط تاریک به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد تا تعادل جذب- و جذب برقرار گردد. همه متغیرهای موثر در تمامی بررسی‌ها ثابت در نظر گرفته شده و متغیری که تاثیر آن بر میزان تخریب مورد بررسی قرار می‌گیرد، به عنوان تنها متغیر سیستم تعریف شد. اثر متغیرهای مانند pH، مقدار کاتالیزور نوری مصرفی و غلظت محلول رنگی بر میزان تخریب سنجیده شد. علاوه بر این، به منظور بررسی میزان تاثیر نور خورشید بر فرایند رنگبری و مقایسه آن با منبع نور مصنوعی، فعالیت کاتالیزوری نوری نانوماده تحت نور خورشید در محیط طبیعی نیز انجام گردید.

۲-۱- سنتز کاتالیزور نوری کربن نیتريد گرافیتی

در این روش، ابتدا ۱۰ گرم پودر ملامین به قایقک آلومینا منتقل گردید. سپس قایقک در کوره لوله‌ای در دمای 550°C با نرخ افزایش دمای $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ به مدت ۳ ساعت در اتمسفری از گاز نیتروژن حرارت داده شد. پس از خنک شدن کوره تا دمای اتاق، پودر حاصل که کربن نیتريد گرافیتی پایه می‌باشد M نام‌گذاری شد. سپس در مرحله بعد، ۱۰ گرم مخلوط پودر ملامین و آمونیم کلرید با نسبت (۱:۱) به مدت یک ساعت در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه هم زده شد تا محلول همگن شود. سپس محلول به مدت ۱۲ ساعت در دمای 100°C خشک شد. در ادامه، پودر حاصل به قایقک آلومینا منتقل گردیده و در کوره لوله‌ای در شرایط مشابه با ماده پایه حرارت داده شد. پس از خنک شدن کوره تا دمای اتاق، پودر حاصل MA نام‌گذاری شد. در پایان، ۱۰ گرم مخلوط پودر ملامین، تیواوره و آمونیم کلرید با نسبت ۱:۱:۱ به مدت یک ساعت در ۱۰۰ ml آب دیونیزه به وسیله هم‌زن مغناطیسی، هم زده شد. سپس محلول به مدت ۱۲ ساعت در دمای 100°C در آون خشک شد و پودر حاصل، در قایقک آلومینا قرار گرفته و به مدت ۳ ساعت در کوره لوله‌ای در دمای 550°C با نرخ افزایش دمای $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ و در اتمسفری از گاز نیتروژن حرارت داده شد. پس از خنک شدن کوره در دمای اتاق، پودر شیری رنگ حاصل، کربن نیتريد گرافیتی سنتز شده با بهره‌گیری ترکیبی از پیش‌ماده‌های ملامین، تیواوره و آمونیم کلرید است که با عنوان MTA نام‌گذاری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شناسایی ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی و نوری

کاتالیزور نوری سنتز شده

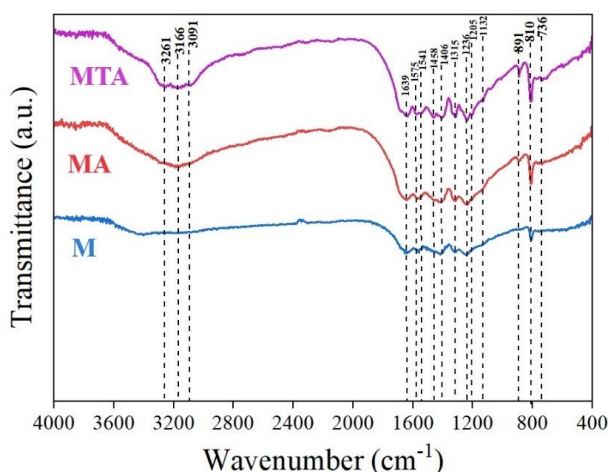
۳-۱-۱- تحلیل آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

(FTIR)

به منظور تعیین ساختارهای گرافیتی نمونه‌های سنتز شده، طیف FT-IR گرفته شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. همه نمونه‌ها قله‌های ارتعاشی مشابهی را نشان دادند. بنابراین، نتیجه گرفته شد که گروه‌های عاملی مشابهی روی سطح نمونه‌های سنتز شده وجود دارد. این قله‌ها مشابه ساختار گزارش شده کربن نیتريد گرافیتی در پژوهش‌های قبلی بودند (۴۲، ۴۱).

قله جذب قوی با مرکزیت تقریباً 1610 و 1575 cm^{-1} به ترتیب با مشخصه واحدهای تری-اس-تری-آزین و حالت تغییر شکل N-H در گروه‌های آمینو مطابقت دارد. این مورد با آنچه قبلاً در مطالعات گذشته (۴۴، ۴۳) گزارش شده بود، مشابهت داشت.

همچنین در این شکل فرکانس‌های ارتعاشات کششی هتروسیکل‌های N-C در محدوده 1200 تا 1639 cm^{-1} نشان داده شده است. در این محدوده، قله موجود در ناحیه 1639 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی پیوند C=O، قله‌های موجود در ناحیه 1541 و 1575 cm^{-1} و دو قله 1458 cm^{-1} و 1406 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی پیوند COO- است (۴۵). علاوه بر این، قله‌های وسیع در ناحیه 3000 تا 3500 cm^{-1} مربوط به حالت‌های ارتعاش کششی N-H می‌باشد (۴۶). دوپ شدن گوگرد در قله 736 cm^{-1} آشکار شد که به حالت‌های ارتعاش کششی C-S نسبت داده شد (۴۷). نتایج طیف FT-IR نشان می‌دهد که نانوماده مورد نظر به خوبی سنتز شده است.



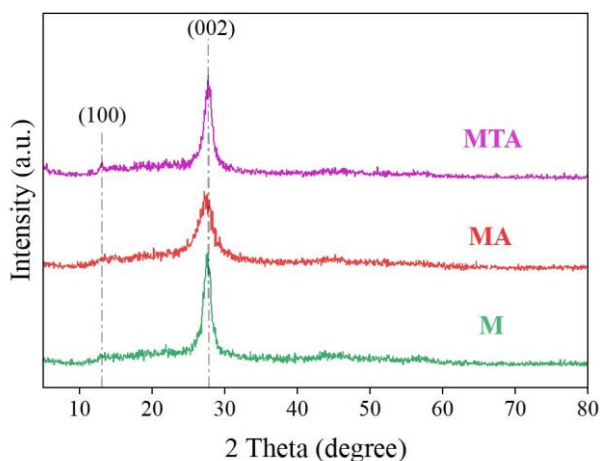
شکل ۲: طیف FT-IR نمونه‌های M، MA و MTA.

Figure 2: The FT-IR spectra of the synthesized M, MA and MTA.

می‌شود (۵۰). همچنین، ساختار متخلخل MTA را می‌توان به وجود گاز H_2S حاصل از پیش‌ماده تیواوره در طول فرایند کشته‌سازی نسبت داد. نتایج تجربی ذکر شده مطابقت خوبی با نتایج BET دارد (۴۸).

۴-۱-۳- طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX)

علاوه بر این، آنالیزهای EDX و mapping نیز برای آشکار کردن توزیع همگن عناصر C، N، O و S و محتوای هر یک در MTA استفاده شد. نتایج در شکل ۵ و جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، نسبت اتمی و نسبت وزنی گوگرد برای کاتالیزور نوری به ترتیب ۲٫۸۲ درصد و ۶٫۶۴ درصد بود که حضور گوگرد در ساختار نمونه را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که این عنصر با موفقیت بر روی کاتالیزور نوری دوپ شده است.



شکل ۳: الگوهای XRD نمونه‌های M، MA و MTA.

Figure 3: The XRD analysis of the synthesized M, MA and MTA.

۳-۱-۳- تحلیل الگوهای آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)

شکل ۳ الگوهای XRD نمونه‌های سنتز شده کربن نیتريد گرافیتی (MA و MTA) را همراه با الگو کربن نیتريد گرافیتی پایه (M) نشان می‌دهد. همه نمونه‌ها قله‌های پراش مشابهی را نشان می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده، قله قوی و واضح در 27.6° به دلیل انباشته شدن سامانه‌های آروماتیک مزدوج است که برای مواد گرافیتی به عنوان قله (۰۰۲) (0.325 nm) اختصاص داده شده است. اوج پراش در $13/04^\circ$ (0.658 nm) مربوط به وجه بلوری (۱۰۰) است که نشان‌دهنده بسته‌بندی ساختاری داخلی است. در مقایسه با نتایج آنالیز گزارش شده در مطالعات قبلی، الگوهای XRD از مطابقت خوبی برخوردار هستند (۴۸، ۲۶). پس از دوپ کردن گوگرد، ویژگی‌های الگوهای XRD نشان می‌دهد که ساختار کلی عمدتاً حفظ می‌شود. با این حال، شدت قله‌ها ظاهراً ضعیف و پهنای آن‌ها عریض‌تر شده‌اند، که می‌تواند ناشی از تغییر ساختار شبکه ناشی از کاهش اندازه ذرات پس از دوپ کردن باشد (۴۹).

۳-۱-۳- تحلیل نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

جزئیات ساختار فیزیکی و مورفولوژی سطح نمونه سنتز شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نمونه سنتز شده دارای شکاف و تخلخل است. در طی سنتز کاتالیزور نوری، تجزیه ملامین و آمونیوم کلرید باعث تولید گاز آمونیاک می‌شود. بنابراین مقدار قابل توجهی از گاز آمونیاک در سیستم تولید می‌شود که به عنوان یک گاز دینامیک ایفای نقش می‌کند. نتیجه انتشار گاز آمونیاک، گسترش سطح نمونه سنتز شده است. این عمل نه تنها باعث افزایش سطح ویژه کاتالیزور نوری و ایجاد مکان‌های فعال بیشتر برای واکنش می‌شود، بلکه بار حامل‌های تولید شده را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، وجود گاز آمونیاک در فرایند بسپارش باعث گسترش سطح کاتالیزور نوری

جدول ۲: مقادیر عناصر تشکیل دهنده فتوکاتالیست سنتز شده (MTA)

Table 2: The amount of the constituent elements of the synthesized photocatalyst.

Elements	Weight Percentage (%)	Atomic Percentage
C	41.7	47.42
N	46.53	45.38
O	5.12	4.38
S	6.64	2.83
Total	100.00	100.00

روش، همان‌گونه که در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد، نمودار بر حسب $(\alpha h\nu)$ در محور عمودی و انرژی فوتون (E_g) در محور افقی رسم شد. سپس، خطی که کاملاً با خط نمودار مماس بوده و در یک راستا قرار داشت و به طوری که $\alpha=0$ بود، رسم شد و نقطه‌ای که این خط محور افقی را قطع می‌کرد، انرژی گاف نوار نوری مستقیم در نظر گرفته شد. برای محاسبه انرژی باند گپ از رابطه ۱ استفاده شد:

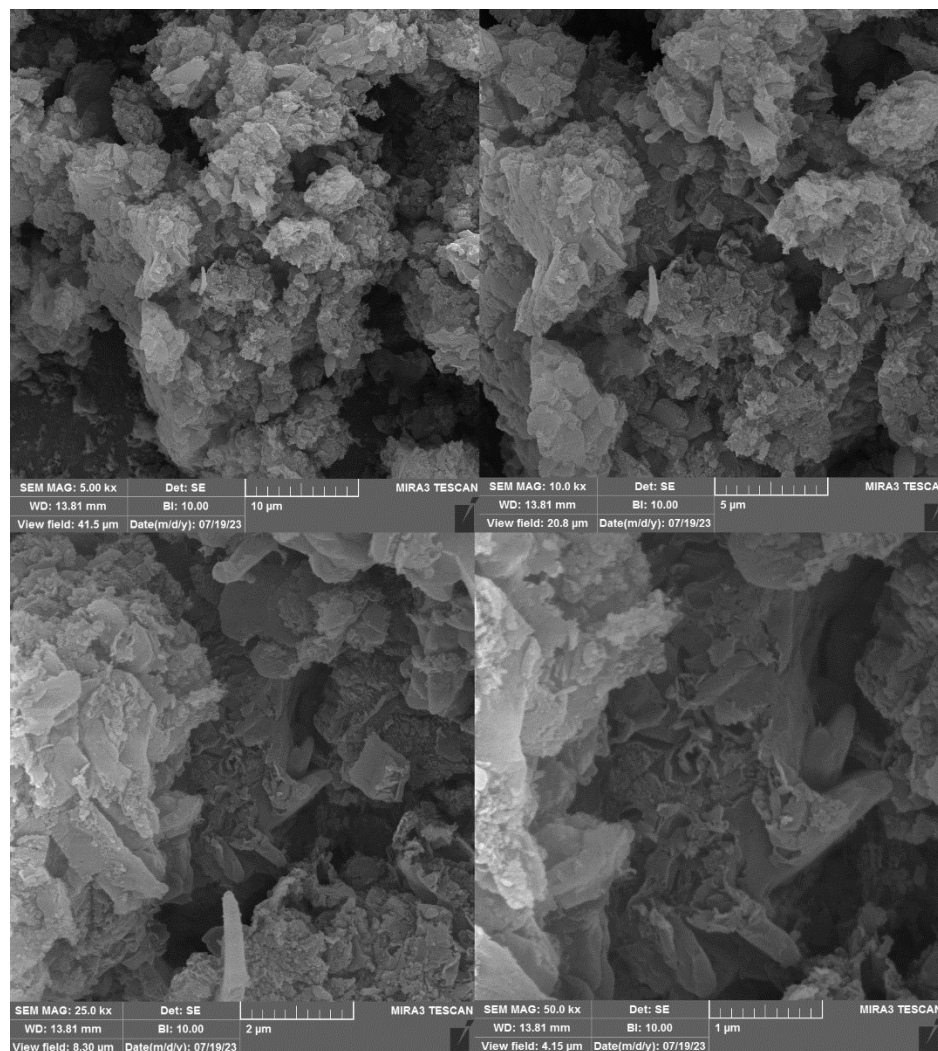
$$(\alpha h\nu)^2 = k(h\nu - E_g) \quad (1)$$

در این معادله α ضریب جذب ماده، $h\nu$ انرژی فوتون (eV)، E_g انرژی گاف نوار نوری (eV) و k یک ثابت تناسب است.

۳-۱-۵- تحلیل نتایج آزمون طیف‌سنجی بازتابی (DRS)

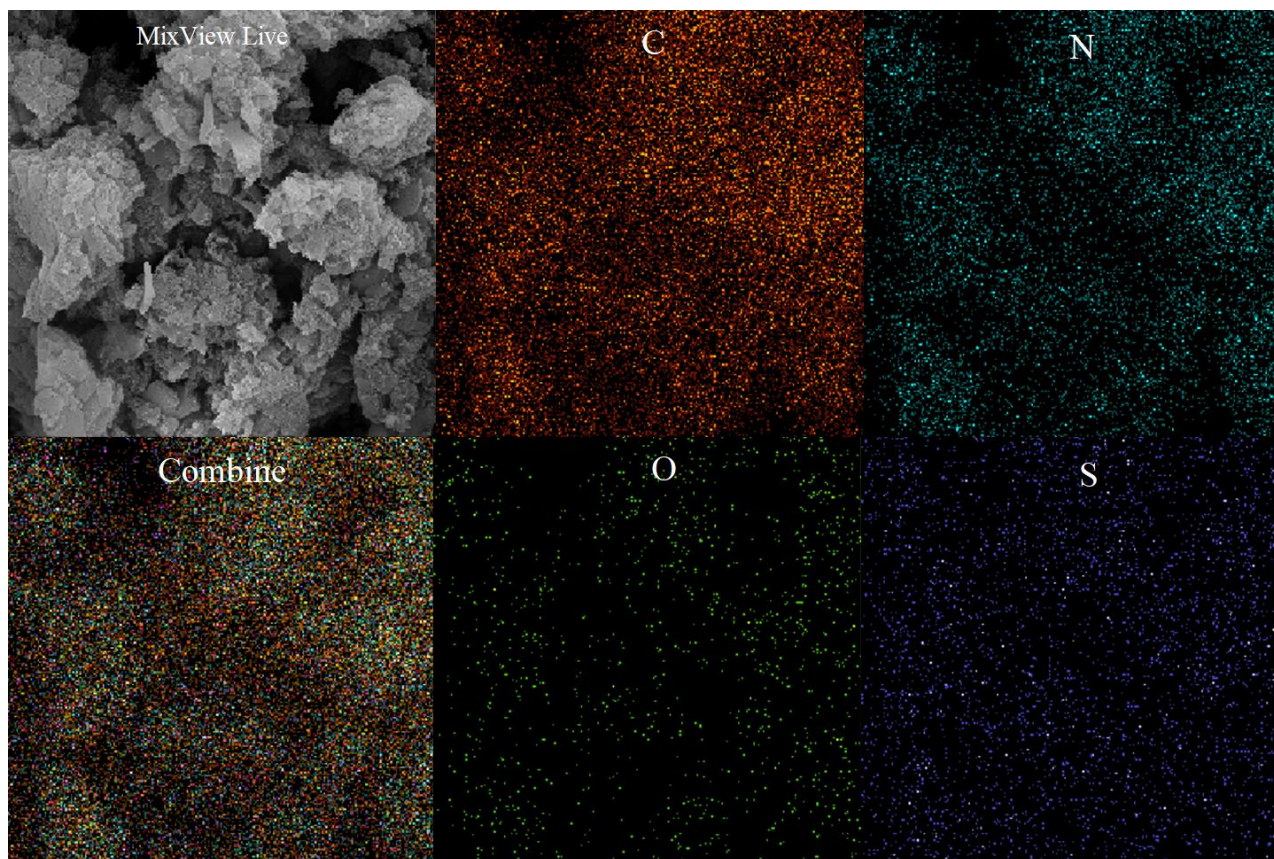
ویژگی‌های نوری و توانایی جذب نور نمونه‌های سنتز شده از طریق آنالیز DRS Vis-UV تعیین گردید. نتایج آنالیز برای نمونه‌های MA، M و MTA در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل قابل مشاهده است، همه نمونه‌ها قادر به جذب نور در ناحیه مرئی بودند، اما شدت جذب توسط MTA بیشتر از گونه‌های دیگر بود. بنابراین، مواد سنتز شده دارای ویژگی‌های مناسب برای فعالیت‌های کاتالیزوری نوری در ناحیه نور مرئی هستند. یکی از معیارهای مناسب و مهم که برای مطالعه تشکیل جفت‌های الکترون-حفره القا شده توسط نور و انتقال آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد انرژی گاف نوار است (۵۱). لذا انرژی گاف نوار کاتالیزورهای نوری سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، از نمودار تاوک^۱ برای محاسبه انرژی گاف نوار به دست آمده از نتایج آنالیز DRS Vis-UV استفاده شد. در این

1- Tauc



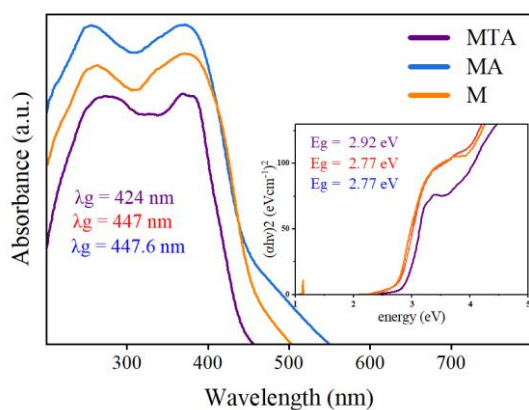
شکل ۴: تصویر SEM نمونه MTA.

Figure 4: The SEM analysis of the MTA.



شکل ۵: تصویر EDX و عناصر تشکیل دهنده نمونه MTA.

Figure 5: The EDX analysis and elements of the MTA.



شکل ۶: نمودار UV-Vis نمونه‌های MTA, MA, M.

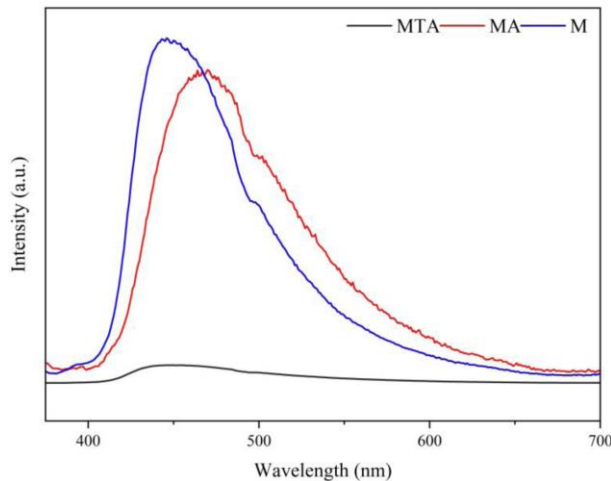
Figure 6: The UV-vis graph of the MTA, MA and the M specimens.

به کمک نتایج به دست آمده از این آزمون‌ها مشخص شد که مقادیر E_g برای نمونه‌های MTA, MA, و M به ترتیب ۲٫۹۲، ۲٫۸ و ۲٫۷۲ است. این نتایج نشان می‌دهد ساختار الکترونیکی نیتريد کربن تغییرات جزئی داشته است که به تغییرات اندازه کوانتومی نسبت داده می‌شود (۵۲). در این نمودار فاصله نوار بعد از دوپ کردن گوگرد بیشتر شده است اما با این حال عملکرد جذب نوری به طور قابل توجهی بهبود یافته و کارایی استفاده از تابش افزایش یافته است که متعاقباً منجر به افزایش فعالیت کاتالیزوری نوری شده است (۴۲). همچنین وجود آمونیم کلرید و به دنبال آن وجود گاز آمونیم کلرید باعث اصلاح کربن نیتريد گرافیتی پایه شده است (۵۰). از این رو، مشاهده شد که نمونه MTA در ناحیه نور مرئی، به دلیل ترکیب مجدد کمتر جفت الکترون-حفره القا شده با نور، دارای فعالیت کاتالیزوری نوری بهتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر است.

جدول ۳: جدول گاف نوار و لبه جذب نمونه‌های M, MA, MTA

Table. 3 The band gap of the MTA, MA, and M specimens.

Sample	Band Gap (eV)	Adsorption Band Edge (nm)
M	2.72	466
MA	2.8	447
MTA	2.92	420



شکل ۷: نمودار PL نمونه‌های M, MA, MTA

Fig. 7 The PL graph of the MTA, MA and M specimens

همان‌طور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود، ایزوترم جذب- و اجذب گاز نیتروژن نمونه MTA به ایزوترم نوع IV با حلقه پسماند H_3 نسبت داده شده است، که نشان از ساختار متخلخل نمونه دارد. با استفاده از نمودارهای BET، سطح ویژه M, MA و MTA به ترتیب حدود ۳,۶۷، ۱۱,۳۳۷ و ۸۵,۵ m^2/g بود. همچنین قطر حفرات M, MA و MTA به ترتیب حدود ۱۶,۵، ۱۱,۴۱ و ۶,۸۳ nm بوده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که کامپوزیت MTA بالاترین مساحت سطح را نسبت به M و MA داشته است. از آنجا که لایه‌برداری شیمیایی توسط عامل دمنده آمونیم کلرید در کنار دوپ کردن غیر فلزی عنصر گوگرد به $g-C_3N_4$ می‌تواند مساحت سطح ویژه را افزایش دهد، بنابراین مکان‌های واکنش فراوان تری را فراهم می‌کند و فعالیت کاتالیزوری نوری را برای تجزیه RhB بهبود می‌بخشد. بدین ترتیب کاتالیزور نوری سنتز شده دارای مساحت سطح ویژه مناسب و ساختار متخلخل می‌باشد که نقش مهمی در فعالیت کاتالیزوری نوری ایفا می‌کند (۵۰).

۳-۱-۶- طیف سنجی فوتولومینسانس (PL)

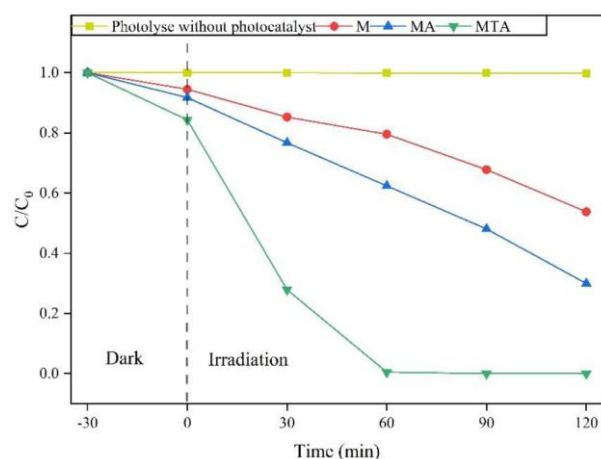
بازدهی جداسازی و انتقال جفت الکترون - حفره تولید شده از نور نقش اساسی را در بهبود عملکرد نیمه‌هادی‌ها بازی می‌کند. بدین منظور طیف نورتابی (PL) برای نمونه‌های سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷). در مقایسه با M و MA، نمودار PL نمونه MTA تغییرات قابل توجهی داشته است. این تغییرات به دلیل اثر اندازه کوانتومی است که با آنالیز UV-vis DRS سازگار می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت PL نمونه نهایی بسیار کمتر از نمونه‌های دیگر است که به وضوح نشان می‌دهد افزایش مساحت سطح ویژه کربن نیتريد گرافیتی در اثر لایه‌برداری شیمیایی توسط عامل دمنده آمونیم کلرید که موجب افزایش فاصله بین لایه‌ای در نمونه شده، در کنار دوپ کردن عنصر گوگرد بر روی سطح فتوکاتالیست فرایند بازترکیبی جفت الکترون - حفره تولید شده را تحت تاثیر قرار داده است. این نتیجه نشان‌دهنده جداسازی کارآمدتر حامل‌های بار توسط کاتالیزور نوری MTA می‌باشد. افزایش راندمان جداسازی MTA عمدتاً به این دلیل است که لایه‌برداری به کمک عامل دمنده باعث افزایش مساحت سطح کاتالیزور نوری شده و مکان‌های فعال بیشتری را برای جذب نور فراهم می‌کند و از سوی دیگر دوپ کردن عنصر گوگرد را می‌توان به عنوان مکان‌های به دام انداختن برای جلوگیری از نوترکیبی بار تصور کرد، از این رو به طور موثری از نوترکیب الکترون - حفره جلوگیری می‌کند و خواص کاتالیزوری نوری را ارتقا می‌دهد. علاوه بر این، ماده MTA دارای وسیع‌ترین محدوده طول موج پاسخ فوتولتائیک در مقایسه با M و MA است که نشان‌دهنده کارآمدترین ظرفیت جذب نور کاتالیزور MTA است که به خوبی با نتایج طیف جذبی UV-vis که در بالا ذکر شد مطابقت دارد (۴۲، ۵۳).

۳-۱-۷- تخلخل سنجی (BET)

به منظور تجزیه و تحلیل سطوح سطح ویژه BET و تخلخل نمونه‌ها که عوامل مهمی برای کارایی کاتالیزوری نوری هستند، آزمایش‌های ایزوترم جذب و دفع گاز نیتروژن در دمای 77 K انجام شد. نتایج اندازه‌گیری‌های سطح BET، حجم منافذ و قطر منافذ در جدول ۴ خلاصه شده است.

I- Hysteresis

نوری فراهم کند (۴۱). سپس محلول تحت تابش نور مرئی با شدت نور 120.5 w/m^2 قرار گرفت. پس از ۱۲۰ دقیقه تابش، ۴۶٫۲۱ درصد و ۷۰٫۰۳ درصد آلاینده به ترتیب توسط M و MA تجزیه شدند، در حالی که MTA با ۱۰۰ درصد تخریب، بیشترین فعالیت کاتالیزوری نوری را داشت. علاوه بر این، همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، عملکرد کاتالیزوری نوری $\text{g-C}_3\text{N}_4$ افزایش یافته در این مطالعه با سایر نتایج قبلی مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کاتالیزور نوری سنتز شده ۹۹٫۴۷ درصد رنگزا را در ۶۰ دقیقه تحت تابش نور مرئی تجزیه کرده است که کارایی کاتالیزوری نوری بالاتری نسبت به سایر مقادیر گزارش شده ایجاد می‌کند. با توجه به مطالب عنوان شده، به دلیل این که MTA بالاترین عملکرد کاتالیزوری نوری را در تخریب آلاینده آلی از خود نشان داد، این ماده به عنوان کاتالیزور نوری نهایی برای بررسی تاثیر سایر متغیرها بر فرایند تخریب رنگزا انتخاب گردید.



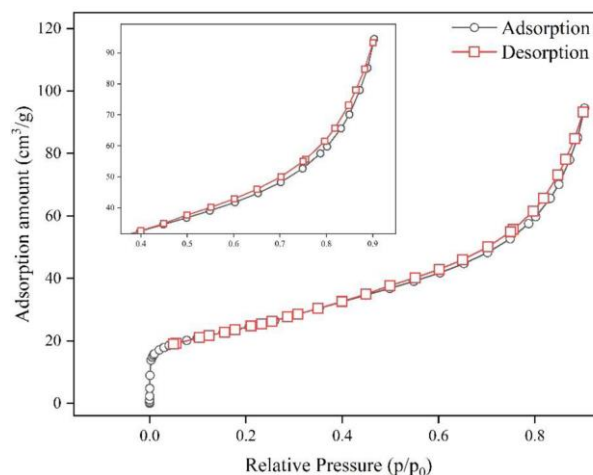
شکل ۹: مقایسه فعالیت کاتالیزوری نوری نمونه‌های MTA، MA و M برای تخریب نوری رنگزا تحت تابش نور مرئی در شرایط ۱۲۰ دقیقه تابش نور، pH: ۴٫۰، مقدار فوتوکاتالیست ۰٫۳ گرم بر لیتر و غلظت اولیه رنگزا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر.

Figure 9: The comparison between photocatalytic performance of MTA, MA and M specimens for dye photodegradation under visible light (irradiation time: 120 min, pH: 4/0, photocatalyst dosage: 0/3 g/l, initial concentration: 50 mg/l).

جدول ۴: ویژگی‌های جذب گاز نیتروژن نمونه‌های M, MA, MTA.

Table 4: The Nitrogen adsorption features of the MTA, MA and the M specimens.

Sample	Pore Diameter (nm)	Pore Volume (cm^3/g)	BET Surface Areas (m^2/g)
M	16.508	0.0151	3.6729
MA	11.411	0.0323	11.337
MTA	6.8373	0.1462	85.503



شکل ۸: نمودار جذب-واجذب نمونه MTA.

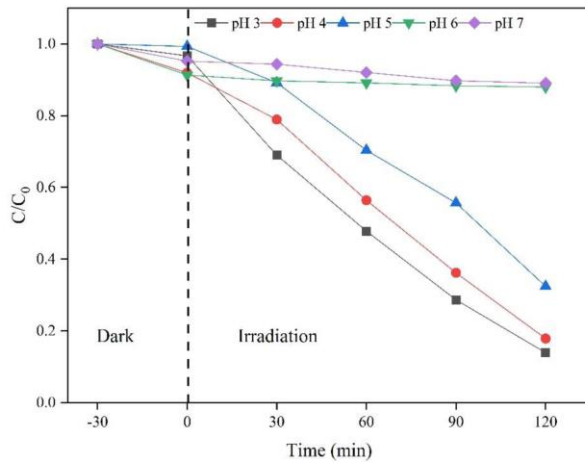
Figure 8: The Adsorption-Desorption analysis of the MTA.

۲-۳- بررسی کارایی کاتالیزوری نوری نانومواد سنتز شده

۲-۳-۱- انتخاب کاتالیزور نوری بهینه

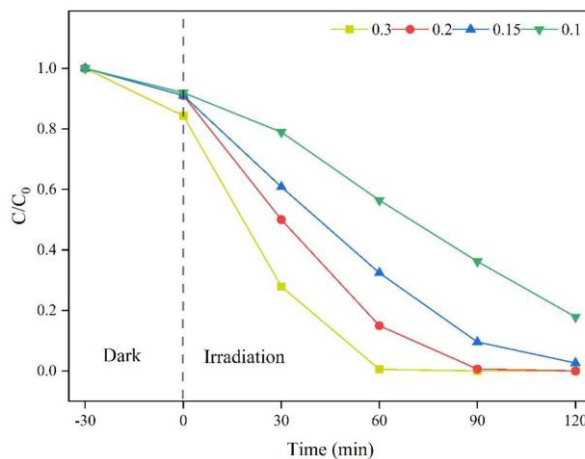
ابتدا، برای مقایسه عملکرد کاتالیزورهای نوری سنتز شده تحت تابش نور مرئی (۴۰۰-۷۰۰ nm)، شرایط عملیاتی مشابه در نظر گرفته شد (شکل ۹). در این راستا، رنگزای رودامین بی به عنوان آلاینده هدف، با غلظت ۵۰ mg/L و pH طبیعی محلول (۴٫۰) تنظیم گردید. به منظور بررسی تخریب آلاینده در غیاب کاتالیزور نوری، فرایند نورکافت تحت نور مرئی انجام شد. مشخص شد که رنگزا نمی‌تواند به راحتی تحت تابش مصنوعی تجزیه شود، زیرا پس از ۱۲۰ دقیقه تابش تخریب قابل توجهی در غلظت رنگزا مشاهده نگردید. پس از اطمینان از عدم تخریب آلاینده در غیاب کاتالیزور نوری، ۰٫۳ mg/l از هر کاتالیزور نوری به محلول اضافه گردید. پس از آماده‌سازی، محلول به مدت ۳۰ دقیقه بر روی هم‌زن مغناطیسی مخلوط شد تا به تعادل جذب-واجذب برسند. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، ۵٫۵۱ و ۱۴٫۸۸ درصد جذب به ترتیب توسط M و MA به دست آمد، در حالی که ۱۵٫۹۴ درصد توسط MTA جذب شد. این افزایش در جذب بیشتر مربوط به خصوصیات ساختار کاتالیزور نوری است. به گونه‌ای که مساحت سطح ویژه بیشتر می‌تواند مکان‌های واکنش سطحی بیشتری برای جذب و واکنش کاتالیزوری را در طول تخریب

فعال کمتری در طی فرایند تولید می‌شود که باعث کاهش میزان تخریب خواهد شد. با در نظر گرفتن این نتایج، مقدار 0.2 mg/l مقادار بهینه کاتالیزور نوری برای آزمایش‌های بعدی در نظر گرفته شد.



شکل ۱۰: تاثیر pH اولیه رنگزا MTA بر فرایند تخریب نوری در شرایط 120 دقیقه تابش نور، مقدار کاتالیزور نوری 0.1 گرم بر لیتر و غلظت اولیه ماده رنگزا 50 میلی‌گرم بر لیتر.

Fig. 10 The effect of initial pH of the dye solution on the photodegradation process (irradiation time: 120 min, photocatalyst dosage: 0.1 g/l , initial concentration: 50 mg/l).



شکل ۱۱: تاثیر مقدار اولیه کاتالیزور نوری بر فرایند تخریب نوری مرئی (زمان تابش 120 دقیقه، pH 4 و غلظت اولیه رنگزا 50 میلی‌گرم بر لیتر).

Figure 11: The effect of initial dosage of photocatalyst on the photodegradation process (irradiation time: 120 min, pH:4.0, initial concentration: 50 mg/l).

۲-۲-۳-۲- اثر متغیرها بر عملکرد فتوکاتالیست بهینه

۲-۲-۳-۱- اثر pH محلول در فرآیند تخریب رنگزا

در این بخش، اثرات تغییر pH محلول بر عملکرد فرایند کاتالیزوری نوری با شرایط عملیاتی مشابه (مقدار کاتالیزور 0.1 mg/l ، غلظت 50 mg/l رنگزا، شرایط منبع نور مشابه و زمان تابش 120 دقیقه) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، ابتدا pH طبیعی محلول اندازه‌گیری شد (۴). سپس محلول‌های رنگی با pHهای متفاوت (۳، ۵، ۶ و ۷) تهیه گردید که برای تنظیم pH محلول‌ها از محلول‌های رقیق HCl و NaOH استفاده گردید.

بر طبق شکل ۱۰، راندمان حذف MTA در بازه زمانی 120 دقیقه تابش نور مرئی در pHهای ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ به ترتیب ۸۲، ۶۷، ۶۷ و ۱۲ درصد بود که می‌توان نتیجه گرفت سرعت تخریب رنگزا پس از افزایش pH محلول کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقدار pH از مقدار طبیعی (۴)، بازده تخریب رنگزا به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان به بار سطحی کاتالیست نسبت داد. طبق گزارش‌های قبلی نقطه بار صفر (pzc)، کربن نیتريد گرافیتی pH 4.2 است (۵۴). بنابراین، سطح MTA زمانی که مقدار pH از 4.2 افزایش می‌یابد، بار منفی ایجاد می‌شود که باعث عدم واکنش گونه‌های فعال با سطح کاتالیست شده و این امر باعث کاهش راندمان تخریب رنگزا می‌شود (۵۵). از این رو، شرایط طبیعی با مقدار pH ۴ برای آزمایش‌های بعدی انتخاب شد.

۲-۲-۳-۳- اثر مقدار کاتالیزور نوری در فرایند تخریب رنگزا

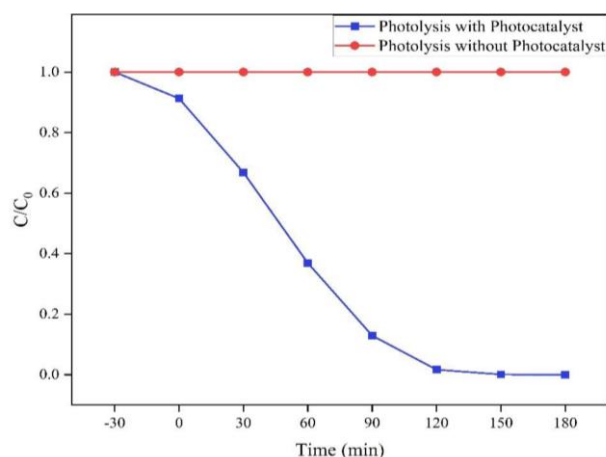
در ادامه بررسی متغیرهای مختلف عملیاتی، اثرات تغییر مقدار کاتالیزور بر عملکرد حذف رنگزا مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، مقادیر مختلف MTA (0.1 ، 0.15 ، 0.2 و 0.3 mg/l) با شرایط عملیاتی مشابه (pH طبیعی (۴)، غلظت 50 mg/l رنگزا، شرایط منبع نور مشابه و زمان تابش 120 دقیقه) مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱۱ نشان داد که بازده حذف با مقدار اولیه 0.3 mg/l کاتالیست ۱۰۰ درصد بود و با کاهش این مقدار به 0.2 mg/l بازده حذف ثابت باقی ماند. اما با کاهش بیشتر مقدار کاتالیست از این مقدار به 0.15 و 0.1 mg/l مقدار حذف به ۹۶ و ۸۴ درصد کاهش یافت. این کاهش به دلیل مکان‌های فعال کاتالیستی ناکافی است. بر طبق مطالب ذکر شده، گونه‌های فعال OH $^{\cdot}$ ، $O_2^{\cdot-}$ ، e^- و h^+ و واکنش این گونه‌ها با مولکول‌های آلاینده نقش مهمی در فرایند تخریب کاتالیزوری نوری ایفا می‌کنند. مساحت سطح بیشتر کاتالیزور و رسیدن فوتون‌های تابیده شده به آن‌ها باعث تولید بیشتر این رادیکال‌ها می‌شود. بنابراین با کاهش مقدار کاتالیزور، مساحت سطح در دسترس برای مولکول‌های آلاینده کاهش می‌یابد و رادیکال‌های

۳-۲-۲-۴- بررسی تخریب رنگزا با نور طبیعی (خورشید)

فعالیت کاتالیزوری نوری MTA همراه با تجزیه نوری محلول RhB در غیاب کاتالیزور تحت تابش نور طبیعی با شدت نوری 650 W/m^2 در شرایط 120 دقیقه تابش نور، $\text{pH} 4$ ، مقدار کاتالیزور نوری 0.3 گرم بر لیتر و غلظت اولیه رنگزا 50 میلی‌گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت (مکان: دانشگاه شهید بهشتی؛ تاریخ: $1402/2/23$ ؛ وضعیت آب و هوا: آفتابی) (شکل ۱۳). نتایج نشان می‌دهد که کاتالیزوری نوری MTA می‌تواند محلول RhB را تحت تابش نور طبیعی در فضای باز به طور کامل تخریب کند.

۳-۲-۲-۵- مطالعات سینتیک فرایند

به منظور تفسیر داده‌های تجربی و بررسی بیشتر فعالیت کاتالیزوری نوری، سینتیک تخریب رنگزا (شکل ۱۴) با شرایط عملیاتی مشابه با قبل (pH طبیعی (۴)، غلظت 50 mg/l رنگزا، شرایط منبع نور مشابه و زمان تابش 120 دقیقه) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به معادله $(\ln(C_0/C) = k.t)$ ، نتایج نشان داد که تخریب نوری رنگزا به خوبی با مدل سینتیکی شبه مرتبه اول مطابقت دارد. نتایج سینتیکی ثبت شده تأیید می‌کند که علی‌رغم تفاوت ناچیز نرخ واکنش بین 40 mg/l و 50 mg/l ، ثابت سرعت شبه مرتبه اول MTA (k) برای 50 mg/l (0.0365 در دقیقه) حدود 1.5 برابر و 3.11 برابر بیشتر از 60 mg/l (0.0243 در دقیقه) و 70 mg/l (0.0117 در دقیقه) بود. این نتایج نشان می‌دهد که نرخ ثابت کاتالیزور نوری با کاهش غلظت اولیه افزایش می‌یابد.



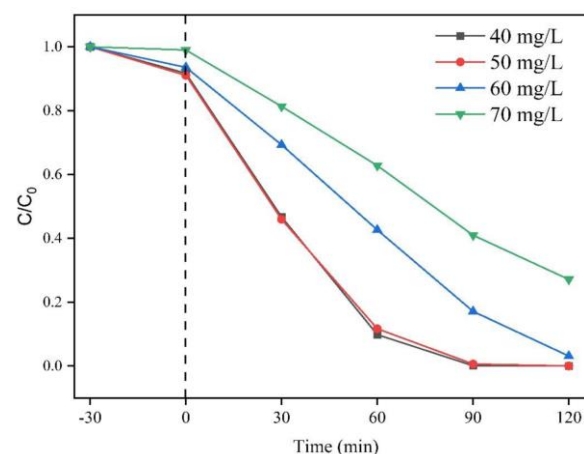
شکل ۱۳: بررسی تخریب رنگزا توسط MTA تحت نور خورشید در 120 دقیقه تابش نور، $\text{pH} 4$ ، مقدار فوتوکاتالیست 0.3 گرم بر لیتر و غلظت اولیه رنگزا 50 میلی‌گرم بر لیتر.

Figure 13: Investigation of the photodegradation of dye under sunlight (irradiation time: 120 min, pH : 4.0, photocatalyst dosage: 0.3 g/l, initial concentration: 50 mg/l).

۳-۲-۲-۳- اثر غلظت رنگزا در فرایند تخریب رنگزا

غلظت رنگزا ممکن است بر تجزیه آن و سپس بر فعالیت کاتالیزوری نوری تأثیر بگذارد. لذا در این مرحله تأثیر تغییرات غلظت رنگزا بر فرایند حذف مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، محلول‌هایی از رنگزا با غلظت‌های 40 ، 50 ، 60 و 70 mg/l تهیه گردید و سایر متغیرها شامل pH ، شرایط تابش نور، مقدار کاتالیزور نوری و مدت زمان نوردهی ثابت در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از این بخش (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که زمان مورد نیاز برای تجزیه محلول رنگزا به طور قابل توجهی به غلظت اولیه رنگزا بستگی دارد و با افزایش غلظت آلاینده، مقدار و سرعت حذف کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که تخریب کامل رنگزا در کمتر از 120 دقیقه برای مقادیر نسبتاً کم غلظت اولیه (40 – 50 mg/l) ممکن بوده اما برای غلظت‌های اولیه بالاتر (60 – 70 mg/l) امکان‌پذیر نیست.

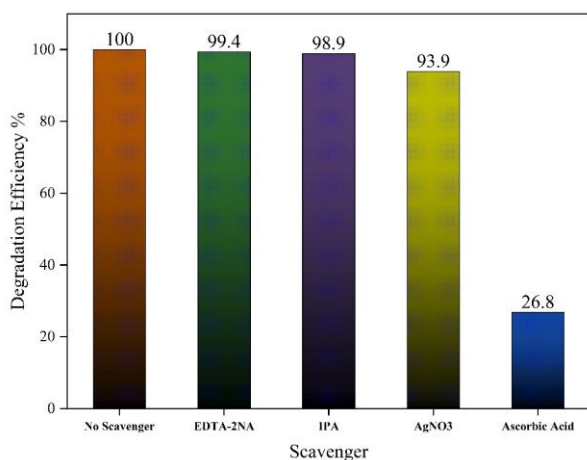
می‌توان نتیجه گرفت که سرعت تخریب نوری به شدت به غلظت اولیه رنگزا بستگی دارد. بازه تجزیه نوری RhB با افزایش غلظت اولیه رنگزا کاهش یافت. این فرایند می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش غلظت اولیه رنگزا، مقدار بیشتری از ماده رنگزا روی سطح کاتالیزور نوری جذب می‌شود. بنابراین، تولید رادیکال‌های فعال کاهش می‌یابد، زیرا مکان‌های فعال توسط رنگزا اشغال می‌شوند (56 – 58). با افزایش غلظت اولیه رنگزا، مولکول‌های جذب شده آن در سطح کاتالیزور افزایش می‌یابد و بر فعالیت کاتالیزوری ماده تأثیر می‌گذارد (59 ، 60). علاوه بر این، کاهش طول مسیر نور به دلیل افزایش غلظت رنگزا را نیز نمی‌توان نادیده گرفت.



شکل ۱۲: تأثیر غلظت اولیه MTA بر فرایند تخریب نوری در 120 دقیقه تابش نور، $\text{pH} 4$ ، مقدار فوتوکاتالیست 0.1 گرم بر لیتر.

Figure 12: The effect of initial concentration on the photodegradation process (irradiation time: 120 min, pH : 4.0, photocatalyst dosage: 0.1 g/l).

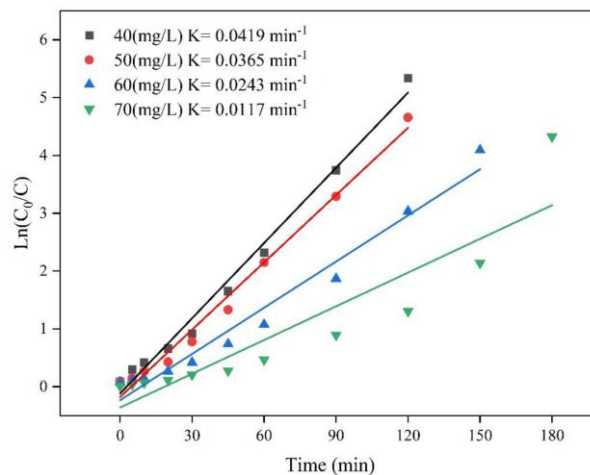
فرایند تخریب داشت و بازده تخریب را به ترتیب به ۹۹,۴، ۹۸,۹ و ۹۳,۹ درصد کاهش داد، که نشان می‌دهد الکترون‌ها، رادیکال‌های هیدروکسیل و حفرات گونه‌های فعال اصلی نیستند. از سوی دیگر، افزودن اسکوربیک اسید^۲، تخریب نوری کاتالیزور نوری را به طور قابل توجهی (۲۶,۸ درصد) کاهش داد. با بررسی این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که گونه فعال $\bullet\text{O}_2^-$ نقش قابل توجهی در واکنش کاتالیزوری نوری ایفا می‌کند.



شکل ۱۵: تاثیرات گیراندازهای EDTA-2Na، IPA، AgNO₃ و Ascorbic acid بر فرایند کاتالیزوری نوری.

Figure 15: The effects of EDTA-2Na, IPA, AgNO₃ and Ascorbic acid on photocatalytic process.

- 1- Trap experiment
- 2- Scavengers
- 3- Ascorbic Acid



شکل ۱۴: مطالعات سینتیکی MTA در تخریب نوری آلاینده.

Figure 14: Kinetic studies of the MTA for pollutant photodegradation.

۳-۳ سازوکار تخریب آلاینده

به طور کلی و بر اساس مطالب ذکر شده، گونه‌های فعال تولید شده در فرایند نقش مهم و اساسی در تخریب نوری ایفا می‌کنند. بر این اساس، به منظور بررسی سازوکار واکنش کاتالیزور نوری ماده سنتز شده، آزمایش به دام انداختن گونه‌های فعال^۱ انجام شد. در آزمایش، اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA-2Na، ۱ میلی‌مولار)، ایزوپروپانول (IPA، ۱ میلی‌مولار)، نیترات نقره (AgNO₃، ۱ میلی‌مولار) و اسید اسکوربیک (ویتامین C، ۱ میلی‌مولار) به ترتیب به عنوان عوامل جذب برای حفرة، رادیکال‌های هیدروکسیل، الکترون‌ها و رادیکال‌های سوپراکسید تولید شده با نور استفاده شد. همان طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، حضور گیراندازها^۲ همگی کارایی تخریب MTA را کاهش دادند. حضور IPA، AgNO₃ و EDTA-2Na تأثیر کمی بر

جدول ۵: مقایسه عملکرد کاتالیزوری نوری در این پژوهش با مطالعات قبلی.

Table 5: The comparison of photocatalytic performance of MTA with previous studies.

Ref.	Band gap (eV)	BET (m ² .g ⁻¹)	Degradation Percentage	Exposure Duration (min)	Photocatalyst Dosage (g.l ⁻¹)	Dye Concentration (mg.l ⁻¹)	Dye	Source of Light	Photocatalyst
(61)	1.78	-	84.25	120	1	30	RhB	Tungsten wire lamp, 300 W	S-d g-C ₃ N ₄
(48)	2.76	14.77	96.13	18	1	10	RhB	Xe lamp, 300W	S-d porous g-C ₃ N ₄
(62)	2.7	60.2	90	180	0.5	10	MO	Halogen lamp 100 W	SCNPNS ^a
(41)	2.56	52	85	120	1	10	RhB	Xe lamp, 500W	S-d g-C ₃ N ₄ porous rods
This Study	2.94	85.503	99.47 (in 60 min)	120	0.3	50	RhB	LED, 50 W	MTA

۴- نتیجه‌گیری

درصد انجام شد. همچنین فعالیت کاتالیزوری نوری MTA با نور طبیعی (خورشید) نیز مورد بررسی قرار گرفت که در حضور ۰,۳ g کاتالیزور نوری سنتز شده و pH ۴ پس از ۱۲۰ دقیقه تابش خورشید عمل رنگ‌زدایی به میزان ۱۰۰ درصد انجام شد. همچنین مشخص کردید که $O_2 \cdot$ تولید شده، نقش مهمی در فرآیند تخریب نوری ایفا می‌کند. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که MTA یک نانوماده بسیار مناسب برای کاربردهای کاتالیزوری نوری سازگار با محیط‌زیست جهت رنگ‌زدایی مواد رنگزای صنعتی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه شهید بهشتی که حمایت مالی این پژوهش را بر عهده داشته است کمال تشکر را دارند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

در این پژوهش، کاتالیزور نوری کربن نیتريد گرافیتی حاصل از ترکیب پیش‌ماده‌های ملامین، تیوره و آمونیم کلرید (MTA) همراه با مساحت سطح بالا و خواص کاتالیزوری نوری مناسب از طریق بسپارش حرارتی یک مرحله‌ای با موفقیت سنتز شد. ساختار، ریخت‌شناسی و خواص نوری MTA با جزئیات مورد بررسی قرار گرفت. از طریق بررسی خصوصیات (شامل تجزیه و تحلیل XRD، EDX، BET و FT-IR) افزایش مساحت سطح ویژه و دوپ‌کردن موفق گوگرد در کاتالیزور نوری از طریق تشکیل پیوند C-S در C_3N_4 با جایگزینی اتم‌های N شبکه با اتم‌های S تایید گردید. کاتالیزور نوری سنتز شده برای رنگ‌زدایی از محلول رنگزای RhB مورد استفاده قرار گرفت و تحت نور مرئی، فعالیت کاتالیزور نوری بهبود یافته‌ای را نشان داد. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شد که تنها پس از ۱۲۰ دقیقه تابش نور مرئی در حضور ۰,۱ g کاتالیزور نوری سنتز شده و pH ۴، عمل رنگ‌زدایی به میزان ۱۰۰

۵- مراجع

1. Taghipour S, Ataie-Ashtiani B, Hosseini SM, Yeung KL. Graphitic carbon nitride-based composites for photocatalytic abatement of emerging pollutants. Nanostructured Carbon Nitrides for Sustainable Energy and Environmental Applications: Elsevier; 2022. p. 175-214. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823961-2.00001-X>.
2. Ahmadpur M, Gokasar I. Spatial analysis and evaluation of road traffic safety performance indexes across the provinces of Turkey from 2015 to 2019. Int J Inj control Saf Promot. 2021;28(3):309-24. <https://doi.org/10.1080/17457300.2021.1925923>.
3. Wang J, Liang Y, Wang Z, Huo B, Liu C, Chen X, et al. High efficiently degradation of organic pollutants via low-speed water flow activation of $Cu_2O@MoS_2/PVDF$ modified pipeline with piezocatalysis performance. Chem Eng J. 2023;458:141409. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141409>.
4. Wei Z, Cai C, Fu Y. Photothermal bio-based membrane via spectrum-tailoring and dual H-bonding networks strategies for seawater treatment and crude oil viscosity reduction. Energy Convers Manage. 2022;260:115645. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115645>.
5. Gu P, Liu S, Cheng X, Zhang S, Wu C, Wen T, Wang X. Recent strategies, progress, and prospects of two-dimensional metal carbides (MXenes) materials in wastewater purification: A review. Sci Total Environ. 2023;169533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169533>.
6. Jia M, Liu C, Dang Z, Zhao X, Chen K. Efficient Adsorption and Mechanism of Organic Dyes on Freeze-Dried Graphene. ChemistrySelect. 2023;8(19):e202204569. <https://doi.org/10.1002/slct.202204569>.
7. Arévalo-Fester J, Briceño A. Insights into selective removal by dye adsorption on hydrophobic vs multivalent hydrophilic functionalized MWCNTs. ACS Omega. 2023;8(12), 11233-11250. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08203>.
8. Khezami L, Bessadok A, Aissa MAB, Ahmed AH, Modwi A, Benhamadi N, Assadi AA. Revolutionizing dye removal: g-C₃N₄-Modified ZnO nanocomposite for exceptional adsorption of basic fuchsin dye. Inorg Chem Commun. 2024;164:112413. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112413>.
9. Sachin, Pramanik BK, Gupta H, Kumar S, Tawale JS, Shah K, et al. Development of a ZnO/C composite as a potential adsorbent for the effective removal of fast green dye from real wastewater. ACS omega. 2023;8(10):9230-8. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06873>.
10. Dai M, Yang YJ, Sarkar S, Ahn KH. Strategies to convert organic fluorophores into red/near-infrared emitting analogues and their utilization in bioimaging probes. Chem Soc Rev. 2023; <https://doi.org/10.1039/D3CS00475A>.
11. Khan Z, Sekar N. Deep Red to NIR Emitting Xanthene Hybrids: Xanthene-Hemicyanine Hybrids and Xanthene-Coumarin Hybrids. Chem Select. 2023;8(5):e202203377. <https://doi.org/10.1002/slct.202203377>.
12. Khan Z, Sekar N. Far-red to NIR emitting xanthene-based fluorophores. Dyes Pigm. 2023;208:110735. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110735>.
13. Xi M, Cui K, Cui M, Ding Y, Guo Z, Chen Y, et al. Enhanced norfloxacin degradation by iron and nitrogen co-doped biochar: Revealing the radical and nonradical co-dominant mechanism of persulfate activation. Chem Eng J. 2021; 420:129902. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129902>.
14. He J, Xiao Y, Tang J, Chen H, Sun H. Persulfate activation with sawdust biochar in aqueous solution by enhanced electron donor-transfer effect. Sci Total Environ. 2019;690:768-77. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.043>.
15. Kamaraj M, Babu PS, Shyamalagowri S, Pavithra M, Aravind J, Kim W, Govarthanam M. β -cyclodextrin polymer composites for the removal of pharmaceutical substances, endocrine disruptor chemicals, and dyes from aqueous solution-A review of recent trends. J Environ Manag.

- 2024;351:119830. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.1016/j.apcatb.2021>.
16. Fathima JB, Pugazhendhi A, Oves M, Venis R. Synthesis of eco-friendly copper nanoparticles for augmentation of catalytic degradation of organic dyes. *J Mol Liq.* 2018;260:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.033>.
 17. Rafique M, Shafiq F, Gillani SSA, Shakil M, Tahir MB, Sadaf I. Eco-friendly green and biosynthesis of copper oxide nanoparticles using *Citrofortunella microcarpa* leaves extract for efficient photocatalytic degradation of Rhodamin B dye form textile wastewater. *Optik.* 2020;208:164053. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.1016/j.apcatb.2021>.
 18. Hamdaoui O. Intensification of the sorption of Rhodamine B from aqueous phase by loquat seeds using ultrasound. *Desalin.* 2011;271(1-3):279-86. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.043>.
 19. Yang C, Wu S, Cheng J, Chen Y. Indium-based metal-organic framework/graphite oxide composite as an efficient adsorbent in the adsorption of rhodamine B from aqueous solution. *J Alloys and Compd.* 2016;687:804-812. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.173>.
 20. 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>.
 21. Ardani MR, Pang AL, Pal U, Haniff MASM, Ismail AG, Hamzah AA, et al. Ultrasonic-assisted of TiO₂-MWCNT nanocomposite with advanced photocatalytic efficiency for elimination of dye pollutions. *Diamond Relat Mater.* 2023;137:110066. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.1016/j.apcatb.2021>.
 22. Pare B, Nagraj G, Solanki VS, Albakri GS, Alreshidi MA, Abbas M, et al. Eco-friendly LEDs radiation-assisted photocatalytic mineralization of toxic azure B dye using Bi₂MoZnO₇ nanocomposite. *Inorg Chim Acta.* 2024; 568:122109. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2024.1016/j.apcatb.2021>.
 23. Zhang P, Wang H, Lai Y, Xu Y, Chen L, Wu Q, et al. Synergistic Co/S co-doped CeO₂ sulfur-oxide catalyst for efficient catalytic reduction of toxic organics and heavy metal pollutants under dark conditions. *J Water Process Eng.* 2024;58:104820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.1016/j.apcatb.2021>.
 24. Jiang L, Yuan X, Pan Y, Liang J, Zeng G, Wu Z, Wang H. Doping of graphitic carbon nitride for photocatalysis: a review. *Appl Catalysis B: Environ.* 2017;217:388-406. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.003>.
 25. Ohno T, Mitsui T, Matsumura M. Photocatalytic activity of S-doped TiO₂ photocatalyst under visible light. *Chem Lett.* 2003;32(4):364-5. <https://doi.org/10.1246/cl.2003.364>.
 26. Wang X, Maeda K, Thomas A, Takanabe K, Xin G, Carlsson JM, et al. A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light. *Nature Mater.* 2009;8:76-80. <https://doi.org/10.1038/nmat2317>.
 27. Balakrishnan A, Chinthala M. Effective sequestration of tetracycline from aqueous streams using metal-free chemically functionalized porous g-C₃N₄. *Environ Pollut.* 2023;333:122057. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.1016/j.apcatb.2021>.
 28. Balakrishnan A, Chinthala M, Polagani RK, Vo D-VN. Removal of tetracycline from wastewater using g-C₃N₄ based photocatalysts: a review. *Environ Res.* 2023;216:114660. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.1016/j.apcatb.2021>.
 29. Kong W, Xing Z, Fang B, Cui Y, Li Z, Zhou W. Plasmon Ag/Na-doped defective graphite carbon nitride/NiFe layered double hydroxides Z-scheme heterojunctions toward optimized photothermal-photocatalytic-Fenton performance. *Appl Catal B: Environ.* 2022;304:120969. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021>.
 30. Balakrishnan A, Chinthala M. Comprehensive review on advanced reusability of g-C₃N₄ based photocatalysts for the removal of organic pollutants. *Chemosphere.* 2022; 297: 134190. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.1016/j.apcatb.2021>.
 31. Takanabe K, Kamata K, Wang X, Antonietti M, Kubota J, Domen K. Photocatalytic hydrogen evolution on dye-sensitized mesoporous carbon nitride photocatalyst with magnesium phthalocyanine. *Phys Chem Chem Phys.* 2010; 12(40):13020-13025. <https://doi.org/10.1039/C0CP00611D>.
 32. Dong F, Wu L, Sun Y, Fu M, Wu Z, Lee S. Efficient synthesis of polymeric g-C₃N₄ layered materials as novel efficient visible light driven photocatalysts. *J Mater Chem.* 2011; 21(39):15171-15174. <https://doi.org/10.1039/C1JM2844B>.
 33. Liu J, Zhang Y, Lu L, Wu G, Chen W. Self-regenerated solar-driven photocatalytic water-splitting by urea derived graphitic carbon nitride with platinum nanoparticles. *Chem Commun.* 2012;48(70):8826-8828. <https://doi.org/10.1039/C2CC33644H>.
 34. Zhang Y, Liu J, Wu G, Chen W. Porous graphitic carbon nitride synthesized via direct polymerization of urea for efficient sunlight-driven photocatalytic hydrogen production. *Nanoscale.* 2012;4(17):5300-5303. <https://doi.org/10.1039/C2NR30948C>.
 35. Hong J, Xia X, Wang Y, Xu R. Mesoporous carbon nitride with in situ sulfur doping for enhanced photocatalytic hydrogen evolution from water under visible light. *J Mater Chem.* 2012;22(30):15006-15012. <https://doi.org/10.1039/C2JM32053C>.
 36. Yan S, Li Z, Zou Z. Photodegradation of rhodamine B and methyl orange over boron-doped g-C₃N₄ under visible light irradiation. *Langmuir.* 2010;26(6):3894-901. <https://doi.org/10.1021/la904023j>.
 37. Wang Y, Wang Z, Muhammad S, He J. Graphite-like C₃N₄ hybridized ZnWO₄ nanorods: Synthesis and its enhanced photocatalysis in visible light. *Cryst Eng Comm.* 2012; 14(15):5065-70. <https://doi.org/10.1039/C2CE25517K>.
 38. Zhang G, Zhang J, Zhang M, Wang X. Polycondensation of thiourea into carbon nitride semiconductors as visible light photocatalysts. *J Mater Chem.* 2012;22 (16): 8083-8091. <https://doi.org/10.1039/C2JM00097K>.
 39. Zhang J, Zhang M, Sun RQ, Wang X. A facile band alignment of polymeric carbon nitride semiconductors to construct isotype heterojunctions. *Angew Chem Int Ed.* 2012;51(40):10145-9. <http://dx.doi.org/10.1002%2Fanie.201205333>.
 40. Thomas A, Fischer A, Goettmann F, Antonietti M, Müller J-O, Schlögl R, Carlsson JM. Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts. *J Mater Chem.* 2008;18(41):4893-908. <https://doi.org/10.1039/B800274F>.
 41. Fan Q, Liu J, Yu Y, Zuo S, Li B. A simple fabrication for sulfur doped graphitic carbon nitride porous rods with excellent photocatalytic activity degrading RhB dye. *Appl Surf Sci.* 2017;391:360-8. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.055>.
 42. An TD, Phuc NV, Tri NN, Phu HT, Hung NP, Vo V, editors. Sulfur-doped g-C₃N₄ with enhanced visible-light photocatalytic activity. *Appl Mech Mater.* 2019: Trans Tech Publ.
 43. Lan L, Li Y, Zeng M, Mao M, Ren L, Yang Y, et al. Efficient UV-vis-infrared light-driven catalytic abatement of benzene on amorphous manganese oxide supported on anatase TiO₂ nanosheet with dominant {001} facets promoted by a photo-thermocatalytic synergetic effect. *Appl Catal B.* 2017;

- 203:494-504. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.10.047>.
44. Dong F, Wang Z, Sun Y, Ho W-K, Zhang H. Engineering the nanoarchitecture and texture of polymeric carbon nitride semiconductor for enhanced visible light photocatalytic activity. *J Colloid Interface Sci.* 2013; 401:70-9. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.03.034>.
45. Chen Y, Li J, Hong Z, Shen B, Lin B, Gao B. Origin of the enhanced visible-light photocatalytic activity of CNT modified gC₃N₄ for H₂ production. *Phys Chem Chem Phys.* 2014;16(17):8106-13. <https://doi.org/10.1039/C3CP55191A>.
46. Zhao H, Yu H, Quan X, Chen S, Zhang Y, Zhao H, Wang H. Fabrication of atomic single layer graphitic-C₃N₄ and its high performance of photocatalytic disinfection under visible light irradiation. *Appl Catal B.* 2014;152:46-50. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.01.023>.
47. Li X-H, Tang Z-X, Zhang X-Z. Molecular structure, IR spectra of 2-mercaptobenzothiazole and 2-mercaptobenzoxazole by density functional theory and ab initio Hartree-Fock calculations. *Spectrochim Acta Part A.* 2009;74(1):168-73. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2009.05.026>.
48. Xiao X, Wang Y, Bo Q, Xu X, Zhang D. One-step preparation of sulfur-doped porous gC₃N₄ for enhanced visible light photocatalytic performance. *Dalton Trans.* 2020;49(24):8041-50. <https://doi.org/10.1039/D0DT00299B>.
49. Goettmann F, Fischer A, Antonietti M, Thomas A. Chemical synthesis of mesoporous carbon nitrides using hard templates and their use as a metal-free catalyst for Friedel-Crafts reaction of benzene. *Angew Chem Int Ed.* 2006;45(27):4467-71. <https://doi.org/10.1002/anie.200600412>.
50. Dang Y, Hu Q, He P, Ren T. Tailoring the ratio of ammonium chloride and graphitic carbon nitride for high photocatalytic activity. *J Mol Struct.* 2020;1209:127961. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020>.
51. Gao Y, Li S, Li Y, Yao L, Zhang H. Accelerated photocatalytic degradation of organic pollutant over metal-organic framework MIL-53 (Fe) under visible LED light mediated by persulfate. *Appl Catal B.* 2017;202:165-74. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.09.005>.
52. Wang X, Feng S, Zhao W, Zhao D, Chen S. Ag/polyaniline heterostructured nanosheets loaded with gC₃N₄ nanoparticles for highly efficient photocatalytic hydrogen generation under visible light. *New J Chem.* 2017;41(17):9354-60. <https://doi.org/10.1039/C7NJ01903C>.
53. Liu G, Qiao X, Gondal M, Liu Y, Shen K, Xu Q. Comparative study of pure g-C₃N₄ and sulfur-doped g-C₃N₄ catalyst performance in photo-degradation of persistent pollutant under visible light. *J Nanosci Nanotechnol.* 2018;18(6):4142-54. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15243>.
54. Zhao Y, Wang L, Malpass-Evans R, McKeown NB, Carta M, Lowe JP, et al. Effects of g-C₃N₄ heterogenization into intrinsically microporous polymers on the photocatalytic generation of hydrogen peroxide. *ACS Applied Materials & Interfaces.* 2022;14(17):19938-48. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c23960>.
55. Konstantinou IK, Albanis TA. TiO₂-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations: a review. *Appl Catal B.* 2004; 49(1):1-14. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.11.010>.
56. Alaton IA, Balcioglu IA. Photochemical and heterogeneous photocatalytic degradation of waste vinylsulphone dyes: a case study with hydrolyzed Reactive Black 5. *J Photochem Photobiol A.* 2001;141(2-3):247-54. [https://doi.org/10.1016/S0-6030\(01\)00440-3](https://doi.org/10.1016/S0-6030(01)00440-3).
57. Daneshvar N, Salari D, Khataee A. Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: investigation of the effect of operational parameters. *J Photochem Photobiol A.* 2003; 157(1):111-6. [https://doi.org/10.1016/S0-6030\(03\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0-6030(03)00015-7).
58. Grzechulska J, Morawski AW. Photocatalytic decomposition of azo-dye acid black 1 in water over modified titanium dioxide. *Appl Catal B.* 2002;36(1):45-51. [https://doi.org/10.1016/S0926-33732-00275\(01\)2](https://doi.org/10.1016/S0926-33732-00275(01)2).
59. Cater SR, Stefan MI, Bolton JR, Safarzadeh-Amiri A. UV/H₂O₂ treatment of methyl tert-butyl ether in contaminated waters. *Environ Sci Technol.* 2000;34(4):659-62. <https://doi.org/10.1021/es9905750>.
60. Malato S, Blanco J, Richter C, Braun B, Maldonado M. Enhancement of the rate of solar photocatalytic mineralization of organic pollutants by inorganic oxidizing species. *Appl Catal B.* 1998;17(4):347-56. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(98\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(98)00019-8).
61. Wang K, Li Q, Liu B, Cheng B, Ho W, Yu J. Sulfur-doped g-C₃N₄ with enhanced photocatalytic CO₂-reduction performance. *Appl Catal B.* 2015;176:44-52. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.045>.
62. Kadam AN, Moniruzzaman M, Lee S-W. Dual functional S-doped g-C₃N₄ pinhole porous nanosheets for selective fluorescence sensing of Ag⁺ and visible-light photocatalysis of dyes. *Molecules.* 2019;24(3):450. <https://doi.org/10.3390/molecules24030450>.

How to cite this article:

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].