



Evaluation of the Photocatalytic Performance of g-C₃N₄/TiO₂ Nanocomposite in the Removal of Eosin Y Dye from Aqueous Solutions under Visible Light Irradiation

Esmail Torshabi ^{1*}, Nader Bahramifar ², Abass Esmaili Sari ²

1. PhD. Student, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (Corresponding Author) e.torshabi@ag.iut.ac.ir

2. Prof., Dept. of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.558528.3529>

Original Paper

Abstract

Contamination of surface and groundwater by chemicals and wastewater poses a serious threat to human health and ecosystems. Synthetic dyes are persistent pollutants with complex structures. Eosin Y, commonly used for tissue staining, is often discharged into wastewater without treatment, posing risks to both human health and the environment. In recent years, the use of photocatalysts has attracted significant attention due to their effective performance and environmental compatibility. Graphitic carbon nitride is a non-metallic photocatalyst known for properties such as high chemical stability, low toxicity, easy availability, and the ability to operate under visible light. However, this material has drawbacks, including rapid electron-hole recombination, a high weight-to-performance ratio, and low visible-light absorption. To enhance its performance, titanium dioxide waste from the Claus process in gas refineries has been employed. In this study, the effects of various factors such as pH, the titanium dioxide to graphitic carbon nitride ratio, photocatalyst dosage, and dye solution temperature on the dye removal efficiency were investigated. For each factor, 30 mg of the synthesized photocatalyst was tested in 100 mL of Eosin Y solution under irradiation from a 200 W visible-light lamp. FESEM images also confirmed the presence of titanium dioxide nanoparticles on the graphitic carbon nitride sheets. Functional groups of the materials were identified using FTIR analysis. DRS analysis showed that the g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite has a reduced bandgap. The presence of C, N, O, and Ti elements in the photocatalyst was confirmed by EDAX analysis. Under optimal conditions and visible light, the dye removal efficiency exceeded 97%. The photocatalyst with a 2:1 ratio of g-C₃N₄ to TiO₂ demonstrated significant stability, removing more than 90% of Eosin Y after 8 consecutive cycles.

Keywords:
Graphitic Carbon Nitride, Titanium Dioxide, Photocatalyst, Dye Treatment, Visible Light.



Received: Apr. 30, 2025
Revised: July 20, 2025
Accepted: Aug. 16, 2025

Use your device to scan and read the article online



To cite this article:

Torshabi, E., Bahramifar, N., Esmaili Sari, A., 2025. Evaluation of the photocatalytic performance of g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite in the removal of Eosin Y dye from aqueous solutions under visible light irradiation. *Water and Wastewater*, 36(4), 61-78. <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.558528.3529>.

© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

The increasing pollution of surface and groundwater resources by industrial wastewater containing persistent organic pollutants is one of the serious environmental challenges of the last century (Cheng et al., 2019).

In the meantime, synthetic dyes such as eosin Y, which are widely used in textile, printing and pathology laboratories, are considered a serious threat to human health and aquatic ecosystems due to their complex aromatic structure, high toxicity, carcinogenicity and resistance to biodegradation. Conventional treatment methods such as adsorption, coagulation, and chemical oxidation usually do not lead to complete mineralization of these pollutants and can themselves cause the production of secondary pollutants (Cruz et al., 2018). Therefore, advanced oxidation processes¹, especially heterogeneous photocatalysts with visible light activation capability, have attracted the attention of researchers (Milagros Ballari et al., 2010).

Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) is a suitable candidate as a non-metallic semiconductor with an energy band gap of about 2.7 eV, high chemical stability, and low toxicity. However, the rapid electron-hole pair recombination and limited specific surface area reduce its efficiency (Ong et al., 2017). Combining g-C₃N₄ with titanium dioxide (TiO₂), especially the recycled type from industrial waste of Claus process in gas refinery, can improve the optical charge separation and enhance the photocatalytic performance in the visible region by creating energy band alignment (Agahalam et al., 2025).

The aim of this study is to synthesize g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite from recycled sources, investigate its characteristics and evaluate its performance in removing eosin Y dye under visible light, as well as study its recyclability and stability.

2. Methodology

In this experimental study, graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) was first synthesized by heating melamine precursor at 550°C for 4 hours in an electric furnace (Li et al., 2018). TiO₂ nanoparticles were also extracted from the catalytic waste of the Claus process in a gas refinery; after drying, the waste was washed with 1 M hydrochloric acid and finally calcined at 550°C. Then, g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite with different weight ratios (1:1, 1:2 and 2:1) was prepared by magnetic stirring for 9 hours in

¹ Advanced Oxidation Processes (AOPs)

deionized water and drying in a vacuum oven (Li et al., 2018).

In order to characterize the photocatalyst properties, Fourier transform infrared spectroscopy² analyses were used to identify functional groups, diffuse reflectance spectroscopy³ to determine the energy band, field emission scanning electron microscopy⁴ to examine the morphology, and energy dispersive X-ray spectroscopy⁵ for elemental analysis. The photocatalytic removal process of eosin Y dye (with an initial concentration of 50 mg/L) was carried out in a batch reactor containing 100 mL of dye solution and a 200 W lamp (visible light). The effective parameters including TiO₂ to g-C₃N₄ ratio, photocatalyst dosage (10 to 50 mg/L), solution pH (3 to 9), and temperature (15 to 55°C) were optimized by one-factor-at-a-time method. Also, the stability and reusability of the photocatalyst were evaluated in 8 consecutive cycles. The residual dye concentration was measured using a spectrophotometer at a wavelength of 555 nm.

3. Results and Discussion

The results of FTIR analysis confirmed the presence of characteristic peaks related to C-H bending bonds (at 797 cm⁻¹), O-Ti-O stretching vibrations (at 810 cm⁻¹) and C-N bonds (at 1238, 1458 and 1639 cm⁻¹) in the nanocomposite. Comparison of the FTIR spectra of the sample before and after 8 cycles of dye removal operation showed complete similarity, indicating excellent chemical stability and no structural change of the photocatalyst during the process. DRS analysis showed that the energy band for pure g-C₃N₄ decreased by 2.7 eV, for pure TiO₂ by 3.2 eV and for the g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite by 2.8 eV. This reduction in energy bandgap compared to pure TiO₂ indicates successful interaction between the two semiconductors and increased light absorption in the visible region, which improves photocatalytic performance.

FESEM images clearly showed the sheet and layered structure of g-C₃N₄, on which spherical TiO₂ nanoparticles were relatively uniformly dispersed, creating a porous surface with many asperities, which helped to increase the active surface area and facilitate charge transfer. EDAX analysis confirmed the presence of C (41.08%), N (18.44%), O (32.08%), and Ti (8.40%) elements

² Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

³ Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)

⁴ Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

⁵ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDAX)



in the composite and showed a significant increase in oxygen compared to the pure g-C₃N₄ sample that lacked Ti, which was due to the presence of TiO₂. In the process optimization section, the results showed that the optimal ratio of g-C₃N₄ to TiO₂ was 2:1, in which the highest removal percentage (88% in the initial conditions) was achieved. The reason for this is the better formation of heterogeneous bonds and reduced electron-hole recombination. The optimal dose of photocatalyst was determined to be 30 mg/L; at lower doses there were not enough active centers and at higher doses (40 and 50 mg) the efficiency decreased due to increased turbidity and reduced light penetration. The best removal efficiency (more than 97%) was obtained at an acidic pH of 3, which is due to the positive surface charge of the photocatalyst at this pH and the strong electrostatic attraction of the eosin Y dye anions. Increasing the temperature to 55 °C also increased the degradation efficiency, which indicates the endothermic nature of photocatalytic reactions. Photolysis (in the absence of photocatalyst) showed negligible dye removal (<5%), and dark experiments indicated physical adsorption of about 10–20% of dye onto the catalyst surface. The most important achievement was the extraordinary stability of the nanocomposite; after 8 consecutive cycles of

reuse, it was still able to remove more than 90% of the eosin Y dye. Comparison with similar studies showed that this photocatalyst has a higher efficiency than many other photocatalysts such as g-C₃N₄/Sm, g-C₃N₄/BiOBr, and g-C₃N₄/ZrO₂ in a shorter time (120 min) and with a higher number of recovery cycles (8 cycles).

4. Conclusion

This study clearly demonstrated that the reuse of Claus process titanium dioxide waste to fabricate g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite is a successful, economical and green method for producing efficient photocatalysts under visible light. The synthesized nanocomposite with reduced energy band gap, increased light absorption, high active surface area and excellent chemical stability was able to remove more than 97% of eosin Y dye in 120 min under optimal conditions (ratio 2:1, dosage 30 mg/L, pH=3, temperature 55°C). Its high recyclability (more than 90% after 8 cycles) and preservation of chemical structure make this photocatalyst a very suitable option for the treatment of industrial wastewater containing persistent color pollutants. This approach can provide a model for the utilization of industrial wastes in the synthesis of advanced water treatment materials.





بررسی کارایی فتوکاتالیستی نانو کامپوزیت $g-C_3N_4/TiO_2$ در تصفیه رنگ اُوزین Y از محلول‌های آبی تحت تابش نور مرئی

اسماعیل ترشابی^{۱*}، نادر بهرامی فر^۲، عباس اسماعیلی ساری^۲

۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) e.torshabi@ag.iut.ac.ir

۲- استادا، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.558528.3529>

مقاله پژوهشی

چکیده

آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط مواد شیمیایی و فاضلاب، تهدیدی جدی برای سلامت جوامع و اکوسیستم‌ها است. رنگ‌های مصنوعی، آلاینده‌های مقاوم و ساختار سختی دارند. رنگ اُوزین Y که در رنگ‌آمیزی بافت‌ها استفاده می‌شود، معمولاً بدون تصفیه وارد فاضلاب می‌شود و به سلامت انسان و محیط‌زیست آسیب می‌زند. در سال‌های اخیر، استفاده از فتوکاتالیست‌ها به دلیل عملکرد مناسب و سازگاری با محیط‌زیست، مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته است. کربن نیتريد گرافیتی به‌عنوان یک فتوکاتالیست غیرفلزی با ویژگی‌هایی مانند پایداری شیمیایی بالا، سمیت کم، دسترسی آسان و قابلیت فعالیت در نور مرئی شناخته می‌شود. با این حال، این ماده معایبی همچون باز ترکیبی سریع الکترون-حفره، نسبت وزن زیاد نسبت به کارایی و جذب کم نور مرئی دارد. برای بهبود عملکرد آن، از پسماند دی‌اکسید تیتانیوم حاصل از فرایند کلوس در بالایشگاه گازی استفاده شده است. در این پژوهش، تأثیر عوامل مختلفی مانند pH نسبت دی‌اکسید تیتانیوم به کربن نیتريد گرافیتی، دوز فتوکاتالیست و دمای محلول رنگ بر کارایی حذف رنگ بررسی شد. به این صورت که برای بررسی هر فاکتور مقدار ۳۰ میلی‌گرم از فتوکاتالیست سنتز شده در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول رنگ اُوزین Y تحت تابش لامپ مرئی ۲۰۰ وات آزمایش شد. تصاویر FESEM نیز حضور نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم را روی صفحات کربن نیتريد گرافیتی تأیید کرده‌اند. گروه‌های عاملی مواد با استفاده از آنالیز FTIR شناسایی شدند. آنالیز DRS نشان داد که نانو کامپوزیت $g-C_3N_4/TiO_2$ کاهش باند گپ را دارد. حضور عناصر C، N، O و Ti در فتوکاتالیست با آنالیز EDAX تأیید شد. در شرایط بهینه تحت نور مرئی، میزان حذف برای این رنگ بیش از ۹۷ درصد گزارش شد. فتوکاتالیست با نسبت ۲ به ۱، $g-C_3N_4$ به TiO_2 پایداری قابل توجهی نشان داد و پس از ۸ چرخه متوالی توانست بیش از ۹۰ درصد رنگ اُوزین Y را حذف کند.

واژه‌های کلیدی:

کربن نیتريد گرافیتی،
دی‌اکسید تیتانیوم،
فتوکاتالیست، تصفیه رنگ،
نور مرئی



دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۰

اصلاح: ۱۴۰۴/۴/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۵

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

ترشابی، ا.، بهرامی فر، ن.، اسماعیلی ساری، ع.، ۱۴۰۴، بررسی کارایی فتوکاتالیستی نانو کامپوزیت $g-C_3N_4/TiO_2$ در تصفیه رنگ اُوزین Y از محلول‌های آبی تحت تابش نور مرئی. *آب و فاضلاب*. ۳۶ (۴)، ۶۱-۷۸.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.558528.3529>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

سمیت این مواد و تأثیر آن‌ها بر سیستم عصبی و قلب انسان است (Zhang et al., 2017).

یکی از ویژگی‌های بارز پساب‌های صنعتی رنگی، وجود رنگ در آن‌ها است. این پساب‌ها عمدتاً در مراحل اصلی مانند رنگ‌گری و تکمیل فرایندهای صنعتی تولید می‌شوند. در این مراحل، حجم قابل توجهی پساب با غلظت بالای رنگ ایجاد می‌شود (Rezaei Mofard et al., 2014). سالانه بیش از ۱۰ هزار تن رنگ در صنایع مختلف جهان استفاده می‌شود که حدود ۱۰۰۰ تن از این مقدار به پساب‌های صنعتی وارد می‌شود (Tapalad et al., 2008).

رنگ اتوزین Y با وجود کاربردهای گسترده، طبق قانون بین‌المللی ایمنی و بهداشت شغلی (CFR-1910-29) ماده‌ای بسیار خطرناک شناخته شده است. این رنگ در آب یا فاضلاب برای افراد مبتلا به مشکلات تنفسی مضر بوده و باعث تحریک پوست، چشم و سیستم عصبی می‌شود که ممکن است به بروز استوماتیت و درماتیت منجر شود. همچنین، اتوزین Y سرطان‌زای حیوانی بوده و خطرات بهداشتی و محیط‌زیستی قابل توجهی دارد (Cruz et al., 2018).

روش‌های متداول برای تصفیه پساب‌ها شامل جذب با کربن فعال^۲، فیلتراسیون قوی^۳، حذف مواد مغذی^۴، حذف بیولوژیکی^۵ و اکسیداسیون شیمیایی^۶ است. با این حال، این روش‌ها معمولاً در فرایند معدنی‌سازی^۷ و حذف کامل مواد آلی موجود در پساب‌ها به‌طور کامل مؤثر نیستند (Bouarioua and Zerdaoui, 2017).

برای رفع این مشکل، به یک روش پایدار و مؤثر بلندمدت در تصفیه رنگ‌های موجود در پساب‌ها نیاز است. این روش باید بتواند مواد آلی را به‌طور کامل به مواد معدنی تبدیل کند و در عین حال از ایجاد آلاینده‌های ثانویه مضر برای محیط‌زیست جلوگیری کند (Katheresan et al., 2018).

حذف فتوکاتالیستی مواد آلی از پساب، روشی اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست است. مزیت کلیدی این روش، عدم نیاز به

آب نقشی اساسی در ادامه حیات روی زمین دارد و اهمیت آن در جنبه‌های مختلف زندگی انسان انکارناپذیر است. آلودگی منابع آب به یکی از چالش‌های جدی محیط‌زیستی تبدیل شده که تقریباً تمام زیست‌بوم‌های زمین را تحت تأثیر قرار داده است. گسترش فعالیت‌های صنعتی و افزایش جمعیت، موجب بالا رفتن حجم آلاینده‌هایی شده که اغلب بدون فرایند تصفیه وارد آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند (Anastopoulos and Pashalidis, 2020).

بالاین حال تنها حدود ۳ درصد از کل آب‌های موجود در سطح کره زمین قابل استفاده است. امروزه مشکل کم‌آبی در بسیاری از نقاط جهان به یک بحران تبدیل شده و بیش از یک میلیارد نفر به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند (Pimentel et al., 2004, Kato and Kansha, 2024).

از طرفی تحولات اقلیمی باعث بروز بحران کم‌آبی در بسیاری از جوامع شده است. امروزه، کشورهای زیادی با چالش‌هایی در زمینه تأمین آب و حفظ امنیت آبی روبه‌رو هستند (Kılıç, 2020). در این کشورها نیاز به آب نه تنها برای مصارف روزمره، بلکه برای بخش‌هایی مانند صنعت و کشاورزی نیز فشار بیشتری بر منابع آبی وارد کرده است (Jayaswal et al., 2018).

مدیریت دقیق انتشار پساب‌های صنعتی و اجرای سیاست‌های مؤثر محیط‌زیستی برای حفاظت از منابع طبیعی و تضمین سلامت جامعه، امری حیاتی است (Natarajan et al., 2018). آلاینده‌های رنگی که عمدتاً از صنایع نساجی، رنگ‌سازی، چاپ و آزمایشگاه‌های پاتولوژی وارد آب‌های طبیعی می‌شوند، نقش مهمی در آلودگی منابع آبی دارند. این مواد باعث تغییر رنگ، کاهش شفافیت و افزایش سمیت آب شده و زندگی آبزیان و کیفیت آب آشامیدنی را تهدید می‌کنند. مقاومت بالای این ترکیبات در برابر تجزیه، خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی جدی ایجاد می‌کند (Cheng et al., 2019).

این مواد شناخته شده با خاصیت سرطان‌زایی و سمیت بسیار بالا هستند. حتی در مقدار کم، این ترکیبات خطرات جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های طبیعی ایجاد می‌کنند (Aeenjan and Javanbakht, 2018) and قرار گرفتن بیش از حد در معرض محلول‌های رنگی آلی می‌تواند باعث بیماری‌هایی مانند تپش شدید قلب، تهوع، تشنج و آبی شدن پوست شود. این علائم ناشی از

¹ Code of Federal Regulation (CFR)

² Activated Carbon Adsorption

³ Ultra-Filtration

⁴ Nutrient Removal

⁵ Biological Degradation

⁶ Chemical Oxidation

⁷ Mineralization



مشخصات فتوکاتالیست توسط آنالیزهای طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۲، طیف‌سنجی بازتابی نفوذی^۳، میکروسکوپ گسیل میدانی^۴ و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس^۵ انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات استفاده شده

در این پژوهش، از ملامین صنعتی با فرمول شیمیایی $C_3H_6N_6$ تولید شده توسط شرکت پتروشیمی خراسان، به‌عنوان پیش‌ماده برای سنتز کربن نیتريد گرافیتی استفاده شد. همچنین، نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده، از پسماند فرایند کلاوس در پالایشگاه گازی واقع در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس استخراج شد. این اقدام در راستای بازیافت مواد زائد صنعتی و کمک به حفظ محیط‌زیست انجام شد. برای شست‌وشو و خالص‌سازی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، از محلول اسیدکلریدریک ۳۷ درصد تولید شرکت مرک استفاده شد. برای تنظیم pH محلول‌های آبی، اسیدسولفوریک (برای اسیدی‌سازی) و هیدروکسید سدیم (برای قلیایی‌سازی) هر دو از محصولات شرکت مرک، به کار گرفته شدند. همچنین، از آب مقطر و اتانول ۹۶ درصد ساخت شرکت به‌آزما شیمی برای شست‌وشوی نهایی نانو کامپوزیت استفاده شد. استوک رنگ ائوزین Y به‌وسیله انحلال ۱ گرم از پودر این رنگ در ۱ لیتر آب مقطر تهیه شد، سایر محلول‌ها از رقیق‌سازی محلول استوک به‌دست آمده و بلافاصله در آزمایش‌های حذف فتوکاتالیستی به‌کار برده شد. همچنین از لامپ مرئی ۲۰۰ وات مدل SMD و دستگاه pH متر Jenway با شماره مدل ۳۵۱۰ در این پژوهش استفاده شد.

۲-۲- سنتز کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$)

برای سنتز $g-C_3N_4$ از پودر سفیدرنگ ملامین به‌عنوان پیش‌ماده استفاده شد. به این منظور برای شروع، مقدار ۵ گرم از ملامین در یک بوتله چینی ریخته شد. سپس بوتله چینی را در داخل کوره الکتریکی تحت هوا قرار داده و دمای آن با نرخ ۵ درجه سلسیوس

مواد شیمیایی اضافی است که آن را به یک راهکار پایدار در تصفیه پساب تبدیل می‌کند (Sirirerkratana et al., 2019).

عملکرد این سیستم‌ها به تولید رادیکال‌های آزاد، به‌ویژه رادیکال‌های هیدروکسیل، وابسته است. این رادیکال‌ها به دلیل قدرت اکسیدکنندگی بسیار بالا، قادر هستند ترکیبات آلی را به‌خوبی تجزیه کنند. به همین دلیل، این روش‌ها به‌عنوان فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته^۱ شناخته می‌شوند (Milagros Ballari et al., 2010).

(Ballari et al., 2010)

فتوکاتالیست‌های مبتنی بر ترکیبات کربن و نیتروژن در سال‌های اخیر به دلیل نقش کلیدی در بهبود عملکرد فتوکاتالیستی و همچنین خواص الکتروشیمیایی برجسته، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد و کم‌هزینه، قابلیت زیادی برای کاربردهای صنعتی و محیط‌زیستی دارند. از مزایای اصلی فتوکاتالیست‌ها پایداری بالا، قابلیت بازیافت و هزینه تولید کم است (Ong et al., 2017).

از طرفی فتوکاتالیست‌های کربن-نیتروژن به دلیل کارایی نوری محدود و نرخ بالای باز ترکیب الکترون-حفره، برای افزایش کارایی و پایداری، باید با دی‌اکسید تیتانیوم ترکیب شوند (Agahalam et al., 2025).

فرایند کلاوس برای حذف سولفید هیدروژن سمی و تبدیل آن به گوگرد عنصری در صنایع نفت و گاز به کار می‌رود. دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان کاتالیزور، سرعت این واکنش حیاتی را افزایش می‌دهد. سپس از طریق عمل بازیافت فتوکاتالیستی ارزشمند تولید می‌شود. نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به خاطر پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، تمایل به آب، سمیت کم و فراوانی طبیعی از سال ۱۹۷۲ به‌طور ویژه بررسی شدند و در مقایسه با سایر نیمه‌هادی‌ها، جایگاه برجسته‌ای در پژوهش‌های علمی دارند (Gao et al., 2015).

(2015)

به‌طور کلی فتوکاتالیست کربن نیتريد گرافیتی اصلاح شده با دی‌اکسید تیتانیوم، خواص فیزیکی و شیمیایی خاصی دارد که با استفاده از آنالیزهای مختلف تشخیص داده می‌شوند. در این پژوهش، توانایی کامپوزیت تولید شده در شرایط بهینه برای حذف رنگ ائوزین Y در چندین چرخه متوالی بررسی شد و تعیین

¹ Advanced Oxidation Processes (AOPs)

² Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

³ Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)

⁴ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

⁵ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDAX)



۲-۵- بررسی و شناسایی ویژگی‌های فتوکاتالیست سنتز شده
در این پژوهش، برای شناسایی و بررسی مرفولوژی و تشخیص ویژگی‌های فتوکاتالیست سنتز شده از آنالیز FTIR استفاده شد که با تابش نور مادون قرمز و تحلیل طیف جذب، ترکیبات شیمیایی و ساختار مولکولی نمونه‌ها شناسایی شد. آزمایش با دستگاه FTIR 8400S در بازه 400 تا 4000 cm^{-1} و شرایط استاندارد انجام شد. از آنالیز DRS برای اندازه‌گیری بازتاب نور در نواحی مختلف، برای تحلیل خواص نوری و ساختاری مواد جامد و پودرها استفاده شد. در این پژوهش، آنالیز DRS با دستگاه Scinco S-4100 در راستای تعیین شکاف انرژی فتوکاتالیستی در بازه طول موج 200 تا 1000 نانومتر انجام شد. به کمک آنالیز FESEM مرفولوژی و ترکیب سطحی مواد با پرتو الکترون بررسی شد و این آنالیز با دستگاه MIRA3 تسکان انجام شد. همچنین آنالیز EDAX برای تشخیص ترکیب شیمیایی و توزیع فضایی عناصر در نانو کامپوزیت از طریق بررسی طیف پرتوهای ایکس تولید شده استفاده شد.

۲-۶- فرایند حذف فتوکاتالیستی

برای ارزیابی عملکرد فتوکاتالیستی نانو کامپوزیت تهیه شده، تخریب رنگ ائوزین Y بررسی شد. ابتدا مقدار مشخصی از فتوکاتالیست به 100 میلی‌لیتر محلول رنگ با غلظت 50 میلی‌گرم در لیتر اضافه شد که pH آن با اسیدسولفوریک و هیدروکسید سدیم تنظیم شد. محلول به مدت 5 دقیقه تحت امواج اولتراسونیک قرار گرفت تا یکنواخت شود، سپس به مدت 30 دقیقه در تاریکی روی همزن مغناطیسی با سرعت 500 دور بر دقیقه گذاشته شد تا احتمالاً جذب رنگ توسط فتوکاتالیست اتفاق بیفتد. پس از آن، نمونه تحت تابش مستقیم لامپ LED 200 وات در شرایط آزمایشگاهی قرار گرفت و هر 30 دقیقه، 3 میلی‌لیتر از نمونه برداشته و با سرعت 5000 دور بر دقیقه به مدت 10 دقیقه سانتریفیوژ شدند. پس از جداسازی فتوکاتالیست، غلظت رنگ ائوزین Y باقیمانده در طول موج 555 نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر هک مدل DR2800 اندازه‌گیری شد و درصد حذف رنگ با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد. فرایند حذف فتوکاتالیستی آلاینده‌ها با تمرکز بر مکانیسم فتولیز و بهینه‌سازی نسبت TiO_2 به $g-C_3N_4$ بررسی شد. همچنین تأثیر دوز فتوکاتالیست، pH و دمای محلول رنگ بر کارایی فرایند به‌طور سیستماتیک ارزیابی شد. علاوه بر این،

بر دقیقه تا دمای 550 درجه سلسیوس افزایش یافت و به مدت 4 ساعت در داخل کوره حرارت داده شد (Li et al., 2018).

۲-۳- سنتز نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)

فرایند کلاوس برای تبدیل گازهای حاوی هیدروژن سولفید به گوگرد استفاده می‌شود. در این فرایند، دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان کاتالیزور برای تسریع واکنش‌ها و تبدیل دی‌اکسید گوگرد به گوگرد کاربرد دارد. این کاتالیزور مقاومت بالا و عمر طولانی دارد و در صنایع مختلف استفاده می‌شود. پسماندهای حاوی دی‌اکسید تیتانیوم باید به‌درستی مدیریت و بازیافت شوند تا از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری شود.

در این پژوهش، برای تولید نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، مقدار مشخصی از کاتالیست صنعتی که پسماند پالایشگاه گازی منطقه ویژه انرژی اقتصادی پارس بود، ابتدا در آن به مدت 10 ساعت و در دمای 110 درجه سلسیوس خشک شد. سپس ماده حاصل با هاون دستی کاملاً ساییده و از الک 63 میکرون عبور داده شد تا یکنواخت و بسیار ریز شود. در ادامه، پودر با اسیدکلریدریک یک مولار تحت امواج التراسونیک در بشر قرار گرفت تا ناخالصی‌هایی مانند فلزات منیزیم و سدیم حذف شوند. پس از این مرحله، پودر 6 تا 7 بار با آب مقطر شسته شد تا pH آن به حالت خنثی برسد. سپس پودر به مدت 2 ساعت در دمای 110 درجه سلسیوس خشک و در نهایت به مدت 5 ساعت در دمای 550 درجه سلسیوس در کوره الکتریکی کلسینه شد. پس از عملیات بازیافت، پودر سفیدرنگ دی‌اکسید تیتانیوم با خلوص حدود 95 تا 99 درصد تولید شد.

۲-۴- سنتز نانو کامپوزیت $g-C_3N_4/TiO_2$

مقدار $2/1$ گرم $g-C_3N_4$ / 1 گرم TiO_2 درون یک بشر 100 میلی‌لیتر ریخته شد. بعد از آن 50 میلی‌لیتر آب دیونیزه به آن اضافه شد و به مدت 9 ساعت بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس به مدت زمان 2 ساعت اجازه ته‌نشینی داده شد. مرحله بعد محلول رویی رسوب را ریخته و رسوب مانده در کف بشر توسط دستگاه سانتریفیوژ با آب و اتانول شستشو داده شد و رسوب به‌دست آمده به مدت 10 ساعت و دمای 60 درجه سلسیوس داخل آن خلأ قرار گرفت تا خشک و آماده استفاده شود (Li et al., 2018).



آب جذب شده در سطح نمونه‌ها است؛ و در نهایت وجود پیک 3172 cm^{-1} برای هر دو ماده موجود نشان‌دهنده حضور ارتعاش گروه‌های کششی آمین (NH) است (Xia et al., 2019).

طیف‌های FTIR مربوط به کامپوزیت $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ پس از فرایند حذف رنگ ائوزین Y، بسیار مشابه طیف FTIR همین کامپوزیت قبل از استفاده در فرایند حذف رنگ است. این شباهت آشکار نشان می‌دهد که ساختار شیمیایی فتوکاتالیست در طی عملیات حذف آلاینده تغییری نکرده است. حفظ ساختار شیمیایی فتوکاتالیست به معنای حفظ خواص اصلی آن، از جمله خواص نوری و توانایی فتوکاتالیستی آن است؛ بنابراین، کامپوزیت $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ می‌تواند پس از چندین چرخه استفاده در حذف آلاینده‌ها همچنان کارایی بالای خود را حفظ کند و به‌عنوان یک ماده پایدار و مقاوم در فرایندهای تصفیه آب و حذف رنگ‌های آلی به کار رود.

خاصیت فتوکاتالیستی در برخی مواد به این صورت است که با تابش نور، الکترون‌ها از اوربیتال‌های نزدیک هسته به اوربیتال‌های دورتر منتقل می‌شوند و این انتقال برای واکنش‌های فتوشیمیایی لازم است. شکاف انرژی، فاصله بین این لایه‌ها است که در مواد مختلف متفاوت است؛ هرچه شکاف انرژی کمتر باشد، جذب نور و انتقال الکترون بهتر انجام می‌شود. طیف جذب در ناحیه ماورای بنفش و مرئی برای مواد $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ، TiO_2 و $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ در شکل ۲ ارائه شده است. در طیف مربوط به $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ، یک نقطه شکست مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده طول‌موج حدود 490 nm نانومتر است. این طول‌موج متناظر با باند گپی برابر با $2/7$ الکترون‌ولت است (Li et al., 2018). نقطه شکست طیف جذبی برای نانو ذرات TiO_2 در طول موجی کمتر از 400 nm نانومتر قرار دارد که معادل باند گپی حدود $3/2$ الکترون‌ولت است (Roškarič et al., 2025). این مقدار باند گپی نشان‌دهنده کیفیت و خلوص بالای دی‌اکسید تیتانیوم استفاده شده در نمونه است، چراکه در برخی ترکیبات TiO_2 ، باند گپی‌هایی نزدیک به $3/6$ الکترون‌ولت گزارش شده است که می‌تواند ناشی از ناخالصی‌ها یا تغییرات ساختاری باشد (Yang et al., 2025). در کامپوزیت سنتز شده $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ ، نقطه شکست جذب در طول‌موج حدود 475 nm نانومتر مشاهده شده که این مقدار متناظر با باند گپی برابر با

پایداری ساختاری و کارایی فتوکاتالیست در چرخه‌های متوالی به‌منظور بررسی قابلیت استفاده مجدد آن آزمایش شد

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

که در آن

C_0 غلظت اولیه رنگ، C_{eq} غلظت نهایی رنگ و R مقدار حذف رنگ است که به درصد بیان می‌شود.

برای تعیین بیشینه کارایی حذف فتوکاتالیستی، تأثیر پارامترهایی مانند نسبت TiO_2 به $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ، مقدار دوز فتوکاتالیست از 10 تا 50 میلی‌گرم در لیتر، pH محلول رنگ در بازه 3 تا 9 و دمای محلول رنگ از 15 تا 55 درجه سلسیوس با روش تغییر یک پارامتر در یک زمان^۱، مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین، بازیافت و بازیابی فتوکاتالیست سنتز شده برای تشخیص عملکرد آن نیز بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تعیین مشخصات فتوکاتالیست سنتز شده

برای شناسایی پیوندها، از گروه‌های عاملی تشخیص ساختار و در نانو ذرات سنتز شده، از آنالیز FTIR استفاده شد. عموماً، گروه‌های عاملی با قطبیت بالاتر بیشترین جذب را از اشعه مادون‌قرمز نشان می‌دهند. شکل ۱ طیف‌های آنالیز FTIR برای نانو ذرات $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ را قبل و بعد از عمل تصفیه رنگ نشان می‌دهد.

برای آنالیز FTIR، پیک مشاهده شده در ناحیه 797 cm^{-1} نشان‌دهنده پیوند خمشی C-H است (Salamat et al., 2017). پیک موجود در ناحیه 810 cm^{-1} نمونه $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ نشان‌گر ارتعاش کششی پیوند O-Ti-O است (Buddee et al., 2014). همچنین پیک قابل مشاهده در ناحیه 1238 cm^{-1} نشان‌گر ارتعاشات کششی C-N در هر دو نمونه است (Shen et al., 2017). پیک 1317 cm^{-1} مشاهده شده در ذرات $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ برای پیوند کششی C-H است (Emine et al., 2017). پیک مربوط به 1458 cm^{-1} برای ارتعاشات پیوند کششی C-N است (Shen et al., 2017). پیک 1639 cm^{-1} در نمونه‌های $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ حاصل

¹ One Factor at a Time



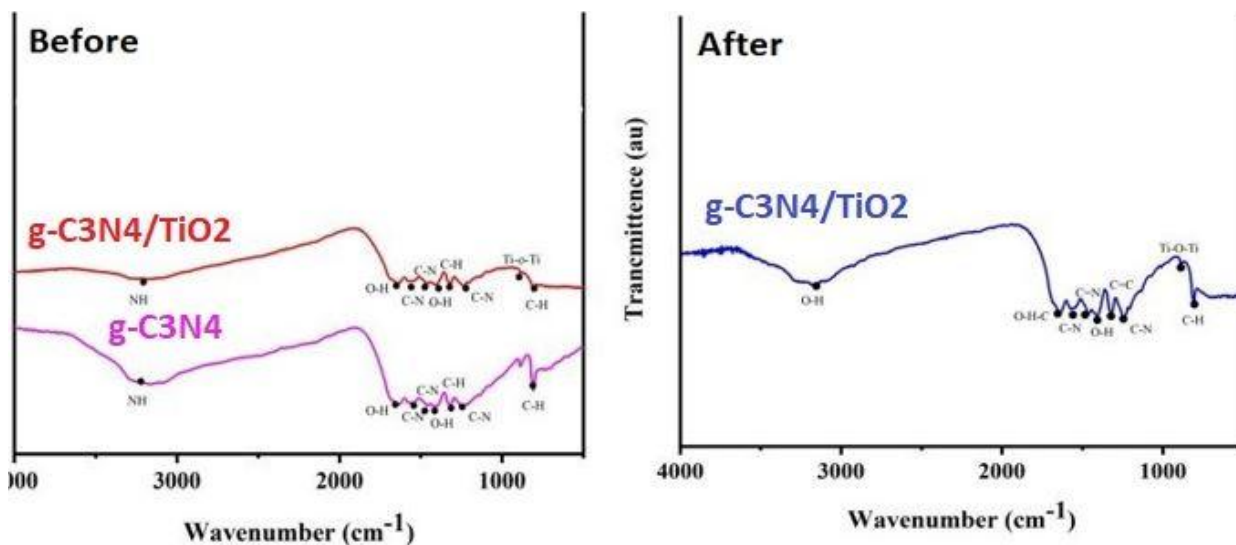


Fig. 1. FTIR spectra, before photocatalytic removal and after 8 times of photocatalytic removal of eosin Y dye
 شکل ۱- طیف‌های FTIR، قبل از عملیات حذف فتوکاتالیستی و بعد از ۸ بار حذف فتوکاتالیستی رنگ ائوزین Y

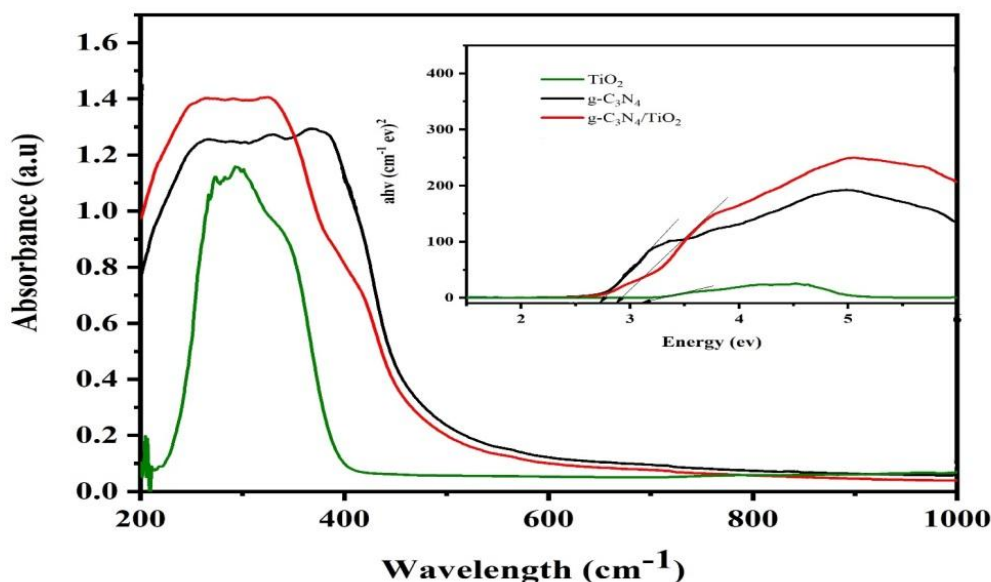


Fig. 2. DRS spectra for TiO_2 , $g-C_3N_4$ and $g-C_3N_4/TiO_2$ samples
 شکل ۲- طیف‌های DRS، برای نمونه‌های TiO_2 ، $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/TiO_2$

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی با تابش پرتوهای الکترونی سطح نمونه را اسکن می‌کند و الکترون‌های پراکنده شده را جمع‌آوری کرده تا تصویری با جزئیات از ساختار و ویژگی‌های سطحی نمونه‌ها ایجاد کند (Rezaei et al., 2025). همان‌طور که در تصاویر شکل ۳ دیده می‌شود، تصویربرداری از سطوح $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/TiO_2$ با مقیاس‌های ۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ نانومتر انجام

۲/۸ الکترون‌ولت است. کاهش باند گپ نسبت به TiO_2 خالص نشان‌دهنده تعامل بین دو ماده و بهبود قابلیت جذب نور در ناحیه مرئی است که می‌تواند عملکرد فتوکاتالیستی این کامپوزیت را افزایش دهد. این تغییرات در ساختار انرژی، نقش مهمی در افزایش کارایی این نانو کامپوزیت‌ها در واکنش‌های فتوشیمیایی دارد (Wu et al., 2021).



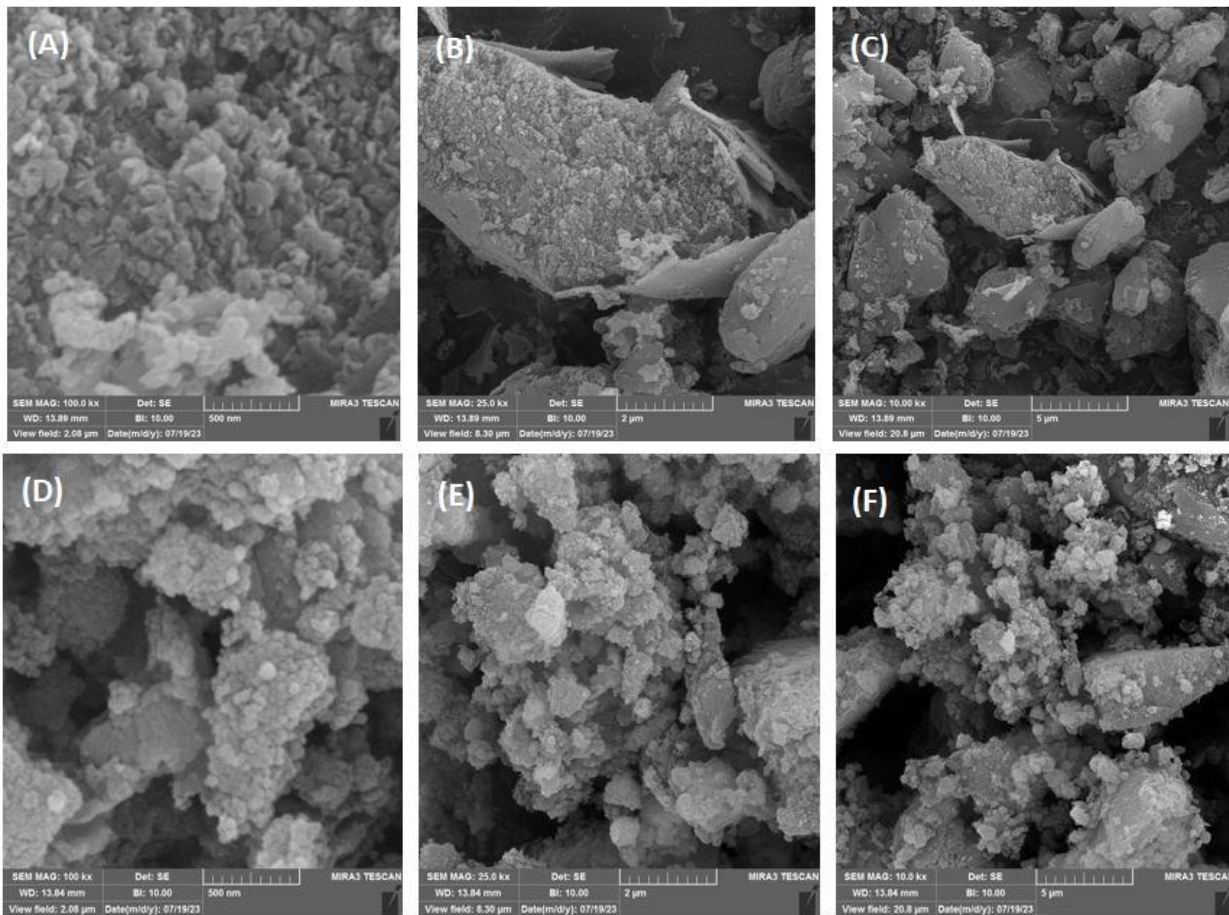


Fig. 3. FESEM analysis images, (A,B,C) for $g-C_3N_4$ and (D,E,F) for $g-C_3N_4/TiO_2$ at scales of 500, 2000 and 5000 nm
 شکل ۳- تصاویر آنالیز FESEM مربوط به $g-C_3N_4$ (A,B,C) و مربوط به $g-C_3N_4/TiO_2$ در مقیاس‌های ۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ نانومتر

نمونه مشخص می‌کند. در این آنالیز، همان نمونه‌های مورد مطالعه در تصاویر FESEM شامل $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/TiO_2$ از نظر ترکیب عنصری تحلیل شدند (شکل ۴).

در جدول ۱، درصد عناصر C، N، O و Ti برای نمونه‌های $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/TiO_2$ ارائه شده است. این داده‌ها نشان می‌دهند که عناصر به‌طور یکنواخت در کل سطح نمونه توزیع شده‌اند که گواهی بر کیفیت مناسب سنتز و یکنواختی ترکیب در مقیاس نانومتری است. در نمونه خالص $g-C_3N_4$ ، حضور گسترده عناصر کربن (C) و نیتروژن (N) در سطح اسکن شده تأیید می‌کند که ساختار اصلی نمونه از کربن نیتريد گرافیتی تشکیل شده است (Jo and Natarajan, 2015). مشاهده عنصر اکسیژن (O) در این نمونه، با وجود اینکه $g-C_3N_4$ به‌طور ذاتی شامل اکسیژن نیست، می‌تواند ناشی از فرایند سنتز آن در محیط هوا و در حضور اکسیژن

شد. ساختار کربن نیتريد گرافیتی به شکل ورقه‌های نازک و پهن شبیه به گرافن است (Aghabarari and Afshar, 2026). روی این صفحات، نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم با شکل کروی و اندازه کوچک به‌صورت متراکم و توده‌ای قرار گرفته‌اند (Jo and Natarajan, 2015). این نانو ذرات به‌گونه‌ای روی سطح گرافیتی پخش شده‌اند و ساختار متخلخل فراوانی ایجاد کرده‌اند که باعث ایجاد ناهمواری‌ها و برجستگی‌های فراوانی شده و سطحی با پستی و بلندی‌های زیاد را شکل داده‌اند (Liu et al., 2023). این ساختار ترکیبی علاوه بر افزایش سطح فعال، می‌تواند نقش مهمی در بهبود انتقال الکترون‌ها و عملکرد فتوکاتالیستی ماده داشته باشد (Krishnan and Shrivastav, 2021).

طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس یک تکنیک تحلیلی است که به‌طور هم‌زمان ترکیب شیمیایی و پراکندگی عناصر را در سطح



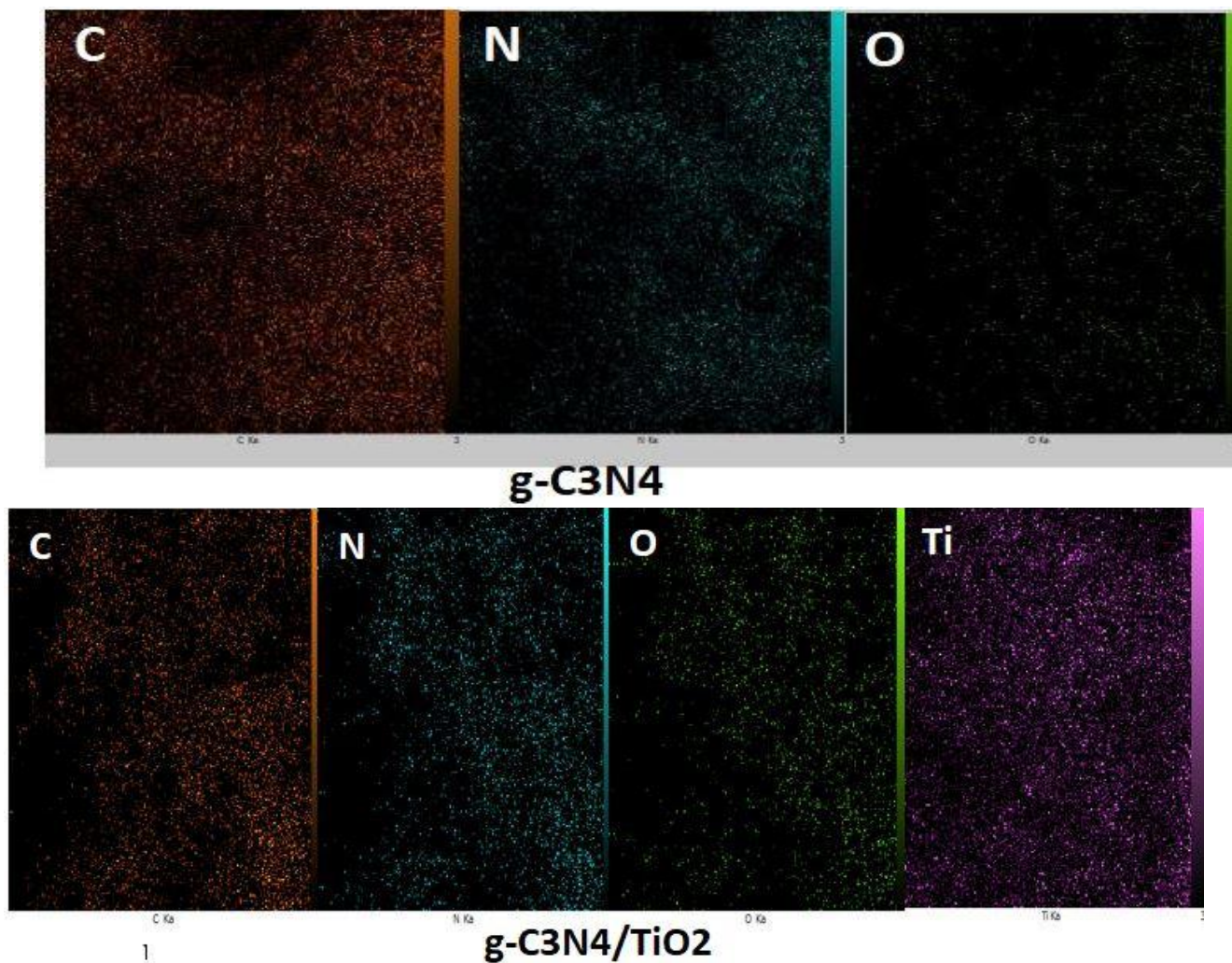


Fig. 4. EDAX analysis for $g-C_3N_4$ and $g-C_3N_4/TiO_2$ samples
 شکل ۴- آنالیز EDAX، برای نمونه‌های $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/TiO_2$

جدول ۱- درصد عناصر تشکیل دهنده دو نمونه $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/TiO_2$

Table 1. Percentage of constituent elements of two samples $g-C_3N_4$ and $g-C_3N_4/TiO_2$

Weight (%)	C	N	O	Ti
$g-C_3N_4$	51.13	35.42	13.45	-
$g-C_3N_4/TiO_2$	41.08	18.44	32.08	8.40

TiO_2 در ساختار کامپوزیت است، زیرا دی‌اکسید تیتانیوم، درصد زیادی از اکسیژن در ترکیب خود دارد (Yang et al., 2025). همچنین، وجود عنصر تیتانیوم (Ti) در آنالیز تأیید می‌کند که ذرات TiO_2 با موفقیت به ساختار $g-C_3N_4$ متصل شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب TiO_2 در ساختار کامپوزیت به درستی انجام شده و منجر به تشکیل یک فتوکاتالیست چند جزئی با پتانسیل

باشد. در چنین شرایطی، احتمال جذب سطحی اکسیژن یا ایجاد پیوندهای سطحی با اکسیژن در طول عملیات حرارتی وجود دارد (Sheng et al., 2019).

در نمونه کامپوزیتی $g-C_3N_4/TiO_2$ ، علاوه بر عناصر C و N مقدار قابل توجهی اکسیژن نیز شناسایی شده که نسبت به نمونه خالص $g-C_3N_4$ افزایش یافته است. این افزایش ناشی از حضور



(2021) وجود این نسبت‌ها از کربن نیتريد گرافیتی و دی‌اکسید تیتانیوم در نانو کامپوزیت باعث کاهش نرخ نوترکیبی الکترون-حفره شده و باعث افزایش کارایی فتوکاتالیست می‌شود (Jiang et al., 2024).

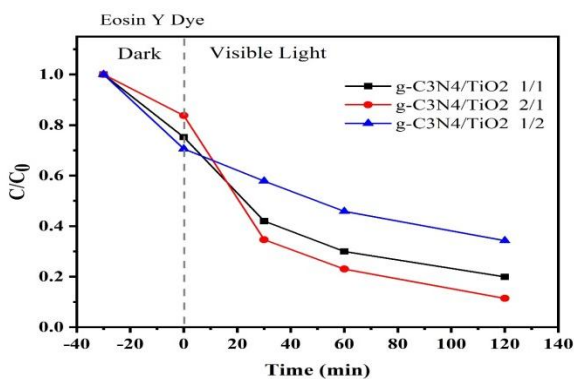


Fig. 5. Graph of the change in the ratios of g-C₃N₄ and TiO₂ for the removal of eosin Y dye in g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite

شکل ۵- نمودار تغییر نسبت‌های g-C₃N₄ و TiO₂ برای حذف رنگ-اٹوزین Y در نانو کامپوزیت g-C₃N₄/TiO₂

۳-۲-۲- تأثیر دوز فتوکاتالیست در حذف رنگ اٹوزین Y به‌منظور تعیین مقدار بهینه دوز فتوکاتالیست و ارزیابی کارایی اقتصادی آن در حفظ محیط‌زیست، تأثیر این پارامتر بر کارایی حذف فتوکاتالیستی بررسی شد. در این بررسی، آزمایش‌ها با دوزهای متفاوتی از فتوکاتالیست g-C₃N₄/TiO₂ انجام شد که مقدار آن از ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر متغیر بود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش دوز فتوکاتالیست، نرخ تجزیه

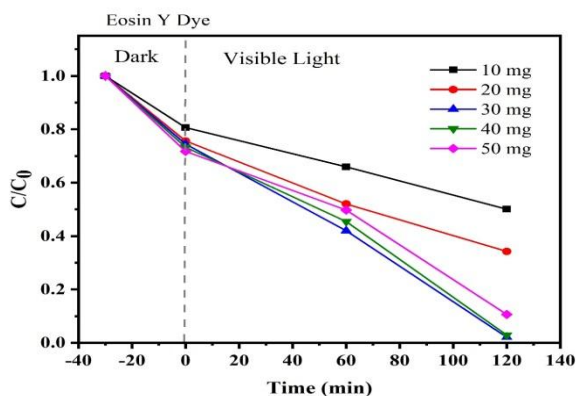


Fig. 6. Diagram of the effect of photocatalyst dosage on the efficiency of removing eosin Y dye

شکل ۶- نمودار اثر دوز فتوکاتالیست بر کارایی حذف رنگ اٹوزین Y

عملکرد بالاتر شده است (Li et al., 2018).

۳-۲-۲- نتایج بررسی متغیرهای مؤثر در حذف فتوکاتالیستی رنگ اٹوزین Y

برای ارزیابی عوامل مؤثر بر کارایی حذف فتوکاتالیستی رنگ اٹوزین Y، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها انجام شد. در این بررسی تأثیر متغیرهایی مانند pH محلول رنگ، دوز فتوکاتالیست، نسبت TiO₂ به g-C₃N₄ و دمای محلول رنگ بررسی شد. ابتدا مقدار بهینه نسبت‌ها و دوز فتوکاتالیست مشخص شد و در مراحل بعد، تأثیر pH و دمای محلول رنگ بر کارایی حذف بررسی و شرایط بهینه برای هر پارامتر تعیین شد. نتایج نشان داد که هر یک از این عوامل نقش مهمی در افزایش کارایی حذف دارند و بهینه‌سازی آن‌ها می‌تواند در توسعه روش‌های کارآمدتر برای تصفیه آب‌های آلوده مؤثر باشد.

۳-۲-۱- تأثیر نسبت TiO₂ به g-C₃N₄ در حذف فتوکاتالیستی رنگ اٹوزین Y

نسبت بین دی‌اکسید تیتانیوم و کربن نیتريد گرافیتی یکی از عوامل کلیدی در بهبود عملکرد فرایند تخریب فتوکاتالیستی محسوب می‌شود، زیرا این نسبت مستقیماً بر ویژگی‌های نوری، ظرفیت جذب و رفتار الکترونی مواد تأثیر می‌گذارد. ترکیب با TiO₂ با g-C₃N₄ می‌تواند منجر به افزایش سطح ویژه، بهبود هدایت الکترونیکی و کاهش نرخ بازترکیب جفت‌های الکترون-حفره شود (Rezaei and Sayahi, 2025). در این پژوهش، نسبت‌های مختلف g-C₃N₄ به TiO₂ شامل ۱:۱، ۲:۱ و ۲:۱ بررسی شد. نتایج برای نسبت ۲:۱ دی‌اکسید تیتانیوم به کربن نیتريد گرافیتی یعنی مقدار g-C₃N₄ دو برابر TiO₂ باشد، بهترین عملکرد را ارائه داد (Li et al., 2018). در این نسبت، به دلیل تشکیل بهتر پیوندهای ناهمگون بین دو ماده، انتقال بار به شکل مؤثرتری انجام شده و واکنش‌های سطحی با کارایی بالاتری انجام شد (Hasaan and Ebrahim, 2025). در این شرایط، بیشترین درصد حذف رنگ برای اٹوزین Y، ۸۸ درصد به‌دست آمد (شکل ۵). در نتیجه، انتخاب نسبت مناسب، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش بازده تخریب فتوکاتالیستی دارد و بهینه‌سازی این نسبت برای دستیابی به عملکرد بهتر در حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آبی است (Kumar et al.,

شامل ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه سرکولاتور ارزیابی شد. نتایج ارائه شده در شکل ۸ بیانگر تغییر روند تخریب فتوکاتالیستی با تغییر دما است. تحلیل داده‌ها نشان داد که افزایش دما باعث تسریع واکنش‌های تخریب شده و میزان حذف رنگ اتوزین Y را افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده ماهیت گرماگیر این واکنش‌ها است (Laghrib et al., 2025). به علاوه، سرعت فرایند تخریب نیز با افزایش دمای محلول افزایش یافت (Byrappa et al., 2006).

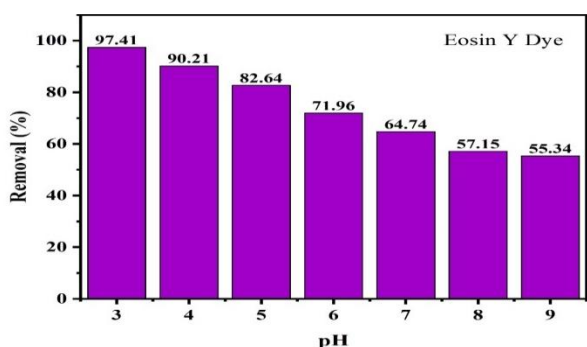


Fig. 7. Diagram of the effect of pH of the dye solution on the degradation of Eosin Y dye

شکل ۷- نمودار اثر pH محلول رنگی بر تخریب رنگ اتوزین Y

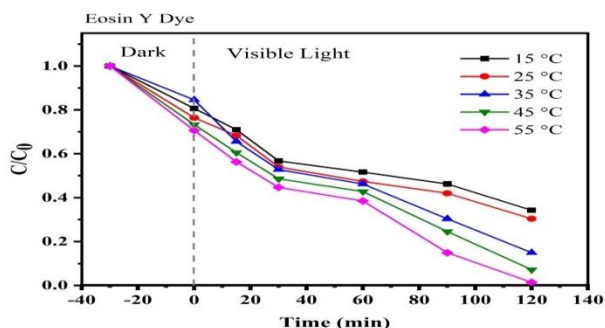


Fig. 8. Diagram of the effect of dye solution temperature on the photocatalytic degradation of Eosin Y dye

شکل ۸- نمودار اثر دمای محلول رنگ بر تخریب فتوکاتالیستی رنگ اتوزین Y

۳-۲-۵- نتایج بررسی قابلیت پایداری و استفاده مجدد فتوکاتالیست سنتز شده

در این آزمایش، قابلیت بازیابی و استفاده مجدد فتوکاتالیست $g-C_3N_4/TiO_2$ برای حذف رنگ اتوزین Y ارزیابی شد. نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که این فتوکاتالیست، قدرت بازیابی بالا دارد و عملکرد خود را در چرخه‌های متعدد حفظ می‌کند. به عبارت دیگر،

رنگ اتوزین Y افزایش می‌یابد، اما این روند تنها تا دوز ۳۰ میلی‌گرم در لیتر ادامه دارد و در مقدار بالاتر یعنی ۴۰ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان حذف کاهش می‌یابد. افزایش دوز فتوکاتالیست تا حد بهینه باعث افزایش تعداد مراکز فعال الکترون-حفره شده و به تبع آن، تولید رادیکال‌های آزاد بیشتری که در فرایند حذف رنگ نقش دارند، افزایش می‌یابد (Hasaan and Ebrahim, 2025).

از سوی دیگر، کاهش کارایی حذف در دوزهای بالا می‌تواند به دلیل افزایش تیرگی محلول و کاهش نفوذ نور به سطح نانو ذرات فتوکاتالیست باشد. همچنین، تراکم بالای نانو ذرات و کاهش فاصله میان آن‌ها موجب تجمع ذرات شده که در نتیجه، سطح تماس کاتالیست با آلاینده‌ها کاهش می‌یابد (Rauf and Ashraf, 2009). همچنین نتایج با (Jiang et al., 2024) منطبق بوده است. بیشترین حذف رنگ اتوزین Y به میزان ۹۷ درصد در ۱۲۰ دقیقه زیر نور مرئی با دوز ۳۰ میلی‌گرم فتوکاتالیست به دست آمد. اگرچه دوزهای ۴۰ و ۵۰ میلی‌گرم نیز حذف مؤثر داشتند، اما به دلیل ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی، دوز ۳۰ میلی‌گرم برای بهینه‌سازی پارامترهای بعدی انتخاب شد.

۳-۲-۳- تأثیر pH محلول رنگ در حذف رنگ اتوزین Y

تأثیر pH اولیه محلول رنگی بر فرایند تخریب رنگ اتوزین Y در بازه ۳ تا ۹ بررسی شد. یکی از عوامل مهم، تغییر بار سطح فتوکاتالیست با تغییر pH است که نرخ واکنش را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Yang et al., 2025). طبق شکل ۷، تغییر pH تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف رنگ دارد (Hassan and Ebrahim, 2025). اتوزین Y یک رنگ با ساختار آنیونی بوده و در pH پایین یا محیط اسیدی بیشترین حذف برابر با ۹۷/۴۱ درصد اتفاق می‌افتد. پس برای مراحل بعدی pH بهینه برای محلول رنگ اتوزین Y برابر ۳ انتخاب شد (Xu et al., 2018).

۳-۲-۴- تأثیر دمای محلول رنگ در حذف رنگ اتوزین Y

در این بخش، تأثیر دما بر فرایند تخریب فتوکاتالیستی بررسی شد. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که دما یکی از پارامترهای کلیدی در این فرایند است و نقش مهمی در بهبود عملکرد تخریب دارد (Alwash, 2025). در این پژوهش، اثر دما در پنج بازه مختلف

برای بررسی احتمال فتولیز رنگ اتوزین Y، آزمایش حذف رنگ بدون حضور فتوکاتالیست و با استفاده از لامپ LED ۲۰۰ وات انجام شد (شکل ۱۰). نتایج نشان داد که نور لامپ به‌تنهایی قادر به حذف رنگ اتوزین Y نیست (Hassan and Ebrahim, 2025). همچنین، آزمایش جذب رنگ اتوزین Y توسط فتوکاتالیست g-C₃N₄/TiO₂ در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه بررسی شد. نتایج نشان داد که درصد جذب رنگ معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ درصد متغیر است که در زمان تاریکی به دلیل جذب فیزیکی یا شیمیایی روی سطح فتوکاتالیست می‌چسبند. این جذب اولیه باعث تجمع آلاینده‌ها روی سطح فتوکاتالیست شده و برای تخریب نوری فعال آماده می‌شوند (Kandasamy et al., 2025, Krishnan and Shriwastav, 2021)

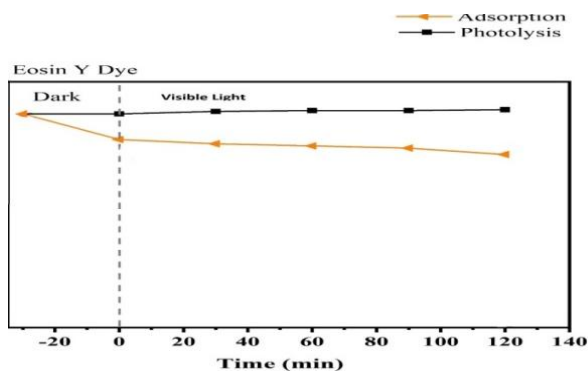


Fig. 10. Diagram of photolysis and absorption of eosin Y dye by g-C₃N₄/TiO₂ photocatalyst
شکل ۱۰- نمودار فتولیز و جذب رنگ اتوزین Y توسط فتوکاتالیست g-C₃N₄/TiO₂

۳-۲-۷- مقایسه نتایج این پژوهش با سایر مطالعات انجام شده (جدول ۲)

جدول ۲- مقایسه نتایج این پژوهش با سایر مطالعات انجام شده

Table 2. Comparing the results of the present study with other studies

Photocatalyst type	Dye name	Source of radiation	Delete time (min)	Maximum recovery cycle	Removal efficiency (%)	Reference
g-C ₃ N ₄ /Sm	Methyl yellow	Visible	240	-	83	(Masunga et al., 2020)
TiO ₂	Methylene blue	UV	180	3	94	(Vishali et al., 2021)
g-C ₃ N ₄ /BiOBr	Rhodamine B	Visible	180	4	94	(Pan et al., 2022)
g-C ₃ N ₄ /ZrO ₂	Eosin	Sun	210	-	87	(Haruna et al., 2024)
g-C ₃ N ₄ /TiO ₂	Eosin Y	Visible	120	8	More than 97	The present research

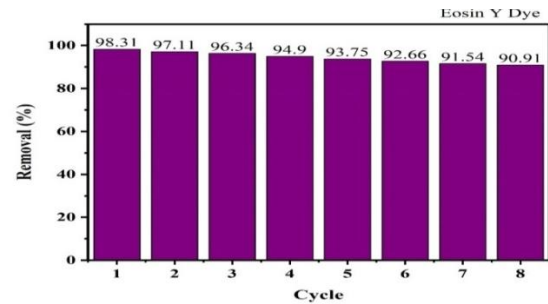


Fig. 9. Recovery diagram of g-C₃N₄/TiO₂ photocatalyst in the removal of eosin Y dye after successive cycles

شکل ۹- نمودار بازیابی فتوکاتالیست g-C₃N₄/TiO₂ در حذف رنگ اتوزین Y پس از چرخه‌های متوالی

پس از هر بار استفاده، امکان بازیافت و استفاده مجدد آن در چرخه‌های بعدی وجود دارد (Yang et al., 2025). این آزمایش شامل ۸ چرخه برای رنگ اتوزین Y بود که همه در شرایط بهینه انجام شد. در تمامی این چرخه‌ها، فتوکاتالیست توانست بیش از ۹۰ درصد از رنگ را تخریب کند، بدون اینکه تغییر قابل توجهی در ساختار نانو کامپوزیت رخ دهد. این خصوصیات نشان می‌دهد که این فتوکاتالیست برای کاربردهای فتوکاتالیستی با قابلیت استفاده مجدد بسیار مناسب است. همچنین، تحلیل‌های آنالیز FTIR قبل و بعد از فرایند حذف رنگ تأیید کرد که ساختار و پیوندهای کامپوزیت g-C₃N₄/TiO₂ دست‌نخورده باقی مانده‌اند؛ بنابراین، این فتوکاتالیست پس از حذف آلاینده‌ها همچنان خواص نوری و فتوکاتالیستی خود را حفظ می‌کند (Salamat et al., 2017, Hassan and Ebrahim, 2025)

۳-۲-۶- نتایج بررسی فتولیز و جذب رنگ توسط فتوکاتالیست سنتز شده



۴- نتیجه گیری

دست آمد که می تواند ناشی از افزایش برهم کنش الکترواستاتیکی بین سطح فتوکاتالیست و مولکول های رنگ باشد. همچنین نسبت بهینه $\text{g-C}_3\text{N}_4$ به TiO_2 برابر با ۱:۲ و دوز فتوکاتالیست ۳۰ میلی گرم در لیتر تعیین شد که در این شرایط، بیشترین تولید گونه های فعال اکسیدکننده مانند رادیکال های هیدروکسیل و سوپر اکسید رخ داده است. یکی از مزایای مهم این فتوکاتالیست، پایداری و قابلیت استفاده مجدد بالا است؛ به طوری که در ۸ چرخه متوالی، کارایی حذف رنگ همواره بیش از ۹۰ درصد باقی ماند. این موضوع نشان دهنده مقاومت ساختاری مناسب و عدم افت محسوس فعالیت فتوکاتالیستی در طول فرایند بود. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که فتوکاتالیست $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ توانایی زیادی برای تخریب آلاینده های رنگی تحت نور مرئی داشته و می تواند به عنوان گزینه ای مؤثر و مقرون به صرفه برای تصفیه پساب های صنعتی رنگی پیشنهاد شود.

۵- قدردانی

نویسندگان، از همکاری و مشارکت ارزشمند تمامی همکاران گرامی آزمایشگاه محیط زیست و آنالیز دستگاهی دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس که در انجام این پژوهش و تحلیل داده ها یاری رساندند، کمال قدردانی را اعلام می کنند.

در این پژوهش، از فتوکاتالیست $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ به عنوان یک روش کارآمد برای حذف رنگ آلی انوزین Y از محیط های آبی استفاده شد. نتایج حاصل از آنالیزهای مشخصه یابی شامل FTIR، DRS، FESEM و EDAX به طور واضح سنتز موفق این فتوکاتالیست را تأیید کردند. طیف FTIR وجود پیوندها و گروه های عاملی مشخص مربوط به هر دو فاز TiO_2 و $\text{g-C}_3\text{N}_4$ را نشان داد. همچنین در آنالیز DRS بیانگر بهبود جذب نور در ناحیه مرئی و کاهش گاف انرژی در اثر ترکیب این دو ماده بود که نقش مهمی در افزایش فعالیت فتوکاتالیستی ایفا می کند. بررسی های مورفولوژیکی با استفاده از FESEM نشان داد که $\text{g-C}_3\text{N}_4$ به صورت نانو صفحات لایه ای و TiO_2 به شکل نانو ذرات کروی با توزیع نسبتاً یکنواخت بر سطح آن قرار گرفته است. این آرایش ساختاری باعث افزایش سطح ویژه، بهبود تماس بین فازها و در نتیجه تسهیل انتقال حامل های بار و کاهش باز ترکیب الکترون-حفره می شود. همچنین نتایج EDAX حضور عناصر مورد انتظار را تأیید کرده و یکنواختی ترکیب شیمیایی فتوکاتالیست را نشان داد. بررسی پارامترهای عملیاتی نشان داد که شرایط محیطی و ترکیب فتوکاتالیست تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف رنگ دارند. بیشترین میزان تخریب رنگ انوزین Y در pH اسیدی برابر با ۳ به

References

- Aeenjan, F. and Javanbakht, V., 2018. Methylene blue removal from aqueous solution by magnetic clinoptilolite/chitosan/EDTA nanocomposite. *Research on Chemical Intermediates*, 44, 1459-1483. <https://doi.org/10.1007/s11164-017-3179-x>.
- Agahalam, M., Hamzehlouyan, T. and Ghasemi, Sh., 2025. The effect of pH synthesis environment on morphology and bioVO₄/g-C₃N₄ photocatalytic function on the removal of the hypo acid tissue pollutant. *Journal of Water and Wastewater*, 36(2), 63-81. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.540493.3507>.
- Aghabarari, B. and Afshar, A. H., 2026. Stable removal of cyanide from water using CuO/AC catalyst derived from polymer waste. *Journal of Water and Wastewater*, 36(3), 19-35. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.544710.3512>.
- Alwash, A., 2025. Impact of calcination temperature on the structural and photocatalytic properties of ZnO synthesized from Gum Arabic for methylene blue dye removal. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, 100625. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100625>.
- Anastopoulos, I. and Pashalidis, I., 2020. Environmental applications of Luffa cylindrica-based adsorbents. *Journal of Molecular Liquids*, 319, 114127. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114127>.



- Bouarioua, A. and Zerdaoui, M., 2017. Photocatalytic activities of TiO₂ layers immobilized on glass substrates by dip-coating technique toward the decolorization of methyl orange as a model organic pollutant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1565-1574. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.02.025>.
- Buddee, S., Wongnawa, S., Sriprang, P. and Sriwong, C., 2014. Curcumin-sensitized TiO₂ for enhanced photodegradation of dyes under visible light. *Journal of Nanoparticle Research*, 16, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2336-z>.
- Byrappa, K., Subramani, A. K., Ananda, S., Rai, K. L., Dinesh, R. and Yoshimura, D. M., 2006. Photocatalytic degradation of rhodamine B dye using hydrothermally synthesized ZnO. *Bulletin of Materials Science*, 29, 433-438. <https://doi.org/10.1007/BF02914073>.
- Cheng, S., Hu, W., Srinivasakannan, C., Xia, H., Zhang, L., Peng, J. et al., 2019. Catalytic pyrolysis of the Eupatorium adenophorum to prepare photocatalyst-adsorbent composite for dye removal. *Journal of Cleaner Production*, 222, 710-721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.103>.
- Cruz, P. E., De Vera, A. P. and Villa, A. D., 2018. The efficiency of Santan flower (*Ixora occinea* Linn.) as an alternative stain to eosin Y in Wright-Giemsa stain. *LPU-Laguna Journal of Allied Medicine*, 3(1), 11-21. [\[Link\]](#)
- Emine, S. E. R. T., Yilmaz, E. and Atalay, F. S., 2017. Comparison of solvothermal and ionothermal methods on catalytic activity of MIL-53 (Fe). *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 18(5), 1107-1117. <https://doi.org/10.18038/aubtda.328791>.
- Gao, M., Zhu, L., Ong, W. L., Wang, J. and Ho, G. W., 2015. Structural design of TiO₂-based photocatalyst for H₂ production and degradation applications. *Catalysis Science and Technology*, 5(10), 4703-4726.
- Haruna, M., Bandoh, C. K., Agorku, E. S., Francis, O., Asare-Donkor, N. K. and Adimado, A. A., 2024. Synthesis of La-doped ZrO₂/g-C₃N₄ nanocomposite for eosin yellow photodegradation: a combined experimental and theoretical studies. *Catalysis Communications*, 187, 106852. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106852>.
- Hasaan, S. H. and Ebrahim, S. E., 2025. Developed a novel reusable magnetic photocatalyst nanocomposite CoFe₂O₄/CuO/Ag₃VO₄ that effectively removes the harmful organic dye from wastewater under optimized conditions. *Alexandria Engineering Journal*, 122, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.03.001>.
- Xia, L., Yang, Y., Cao, Y., Liu, B., Li, X., Chen, X. et al., 2019. Porous N-doped TiO₂ nanotubes arrays by reverse oxidation of TiN and their visible-light photocatalytic activity. *Surface and Coatings Technology*, 365, 237-241. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.033>.
- Jayaswal, K., Sahu, V. and Gurjar, B. R., 2018. Water Pollution, Human Health and Remediation. In: Bhattacharya, S., Gupta, A., Gupta, A., Pandey, A. (eds). *Water Remediation. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore. pp. 11-27. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7551-3_2.
- Jiang, P., Yu, Y., Wang, K. and Liu, W., 2024. Efficient electron transfer in g-C₃N₄/TiO₂ heterojunction for enhanced photocatalytic CO₂ reduction. *Catalysts*, 14(6), 335. <https://doi.org/10.3390/catal14060335>.
- Jo, W. K. and Natarajan, T. S., 2015. Influence of TiO₂ morphology on the photocatalytic efficiency of direct Z-scheme g-C₃N₄/TiO₂ photocatalysts for isoniazid degradation. *Chemical Engineering Journal*, 281, 549-565. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.120>.
- Kandasamy, M., Suresh, S., Rameshkumar, P., Jayasree, R., Sathishkumar, P., Gunnasegaran, P. et al., 2025. Green synthesis of ultrafine zinc oxide nanoparticles for photocatalytic degradation of methylene blue dye: optimization and kinetic studies. *Results in Engineering*, 27, 105846. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105846>.
- Katheresan, V., Kansedo, J. and Lau, S. Y., 2018. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676-4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>.



- Kato, S. and Kansha, Y., 2024. Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 51064-51097. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>.
- Kılıç, Z., 2020. The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4(5), 239-241. <https://doi.org/10.15406/IJH.2020.04.00250>.
- Krishnan, S. and Shriwastav, A., 2021. Application of TiO_2 nanoparticles sensitized with natural chlorophyll pigments as catalyst for visible light photocatalytic degradation of methylene blue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104699. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104699>.
- Kumar, A., Raizada, P., Hosseini-Bandegharai, A., Thakur, V. K., Nguyen, V. H. and Singh, P., 2021. C-, N-Vacancy defect engineered polymeric carbon nitride towards photocatalysis: viewpoints and challenges. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(1), 111-153. <https://doi.org/10.1039/D0TA08384D>.
- Laghrib, S., Gherdaoui, C. E., Belgherbi, O., Benaskeur, N., Boudissa, M., Kanagaraj, A. et al., 2025. Photocatalytic degradation of methylene blue using TiO_2 nanoparticles synthesized via the sol-gel method in acidic and neutral media. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 138, 1725-1745. <https://doi.org/10.1007/s11144-025-02816-0>.
- Li, Y., Feng, X., Lu, Z., Yin, H., Liu, F. and Xiang, Q., 2018. Enhanced photocatalytic H_2 -production activity of C-dots modified $g-C_3N_4/TiO_2$ nanosheets composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 513, 866-876. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.12.002>.
- Liu, H., Sun, F., Li, X., Ma, Q., Liu, G., Yu, H. et al., 2023. $g-C_3N_4/TiO_2/ZnIn_2S_4$ graphene aerogel photocatalysts with double S-scheme heterostructure for improving photocatalytic multifunctional performances. *Composites Part B: Engineering*, 259, 110746. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110746>.
- Masunga, N., Mamba, B. B. and Kefeni, K. K., 2020. Trace samarium doped graphitic carbon nitride photocatalytic activity toward metanil yellow dye degradation under visible light irradiation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 602, 125107. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125107>.
- Milagros Ballari, M. D. L., Alfano, O. M. and Cassano, A. E., 2010. Mass transfer limitations in slurry photocatalytic reactors: experimental validation. *Chemical Engineering Science*, 65(17), 4931-4942. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.04.021>.
- Natarajan, S., Bajaj, H. C. and Tayade, R. J., 2018. Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process. *Journal of Environmental Sciences*, 65, 201-222. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.03.011>.
- Ong, W. J., Putri, L. K., Tan, Y. C., Tan, L. L., Li, N., Ng, Y. H. et al., 2017. Unravelling charge carrier dynamics in protonated $g-C_3N_4$ interfaced with carbon nanodots as co-catalysts toward enhanced photocatalytic CO_2 reduction: a combined experimental and first-principles DFT study. *Nano Research*, 10, 1673-1696. <https://doi.org/10.1007/s12274-016-1391-4>.
- Pan, H., Gu, J., Hou, K., Li, J., Wang, Y. and Yue, Y., 2022. High-efficiency, compressible, and recyclable reduced graphene oxide/chitosan composite aerogels supported $g-C_3N_4/BiOBr$ photocatalyst for adsorption and degradation of Rhodamine B. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107157. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107157>.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E. et al., 2004. Water resources: agricultural and environmental issues. *BioScience*, 54(10), 909-918. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0909:WRAAEI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0909:WRAAEI]2.0.CO;2).
- Rauf, M. A. and Ashraf, S. S., 2009. Radiation induced degradation of dyes-an overview. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 6-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.043>.



- Rezaei Mofard, M. R., Miranzadeh, M. B., Pourgholi, M., Akbari, H. and Dehghani, R., 2014. Study of the effect of advanced oxidation methods on dye removal from textile industry wastewater. *Feyz Medical Sciences Journal*, 17(1), 32-39. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Rezaei, B., Rahmani, F. and Khamforoush, M., 2025. Toward efficient solar-driven photocatalytic treatment of water contaminated with various antibiotics using a porous BiOBr (2D)/UiO-66 (0D) heterojunction nanostructure. *Journal of Water and Wastewater*, 36(2), 23-42. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.535808.3502>.
- Rezaei, H. and Sayahi, H., 2025. Facile synthesis of g-C₃N_{4-x} for the effective destruction/removal of organic pollutants from water and wastewater. *Journal of Water and Wastewater*, 35(6), 20-25. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.515357.3482>.
- Roškarič, M., Žerjav, G., Zavašnik, J., Finšgar, M. and Pintar, A., 2025. Effect of TiO₂ morphology on the properties and photocatalytic activity of g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposites under visible-light illumination. *Molecules*, 30(3), 460. <https://doi.org/10.3390/molecules30030460>.
- Salamat, S., Younesi, H. and Bahramifar, N., 2017. Synthesis of magnetic core-shell Fe₃O₄@TiO₂ nanoparticles from electric arc furnace dust for photocatalytic degradation of steel mill wastewater. *RSC Advances*, 7(31), 19391-19405. <https://doi.org/10.1039/C7RA01238A>.
- Shen, J., Zhang, T., Cai, Y., Chen, X., Shang, S. and Li, J., 2017. Highly fluorescent N, S-co-doped carbon dots: synthesis and multiple applications. *New Journal of Chemistry*, 41(19), 11125-11137. <https://doi.org/10.1039/C7NJ00505A>.
- Sheng, Y., Wei, Z., Miao, H., Yao, W., Li, H. and Zhu, Y., 2019. Enhanced organic pollutant photodegradation via adsorption/photocatalysis synergy using a 3D g-C₃N₄/TiO₂ free-separation photocatalyst. *Chemical Engineering Journal*, 370, 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.197>.
- Sirirerkratana, K., Kemacheevakul, P. and Chuangchote, S., 2019. Color removal from wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide-coated glass, ceramic tile, and stainless steel sheets. *Journal of Cleaner Production*, 215, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.037>.
- Tapalad, T., Neramittagapong, A., Neramittagapong, S. and Boonmee, M., 2008. Degradation of Congo red dye by ozonation. *Chiang Mai Journal of Science*, 35(1), 63-68. [\[Link\]](#)
- Vishali, D., Manikandan, B., John, R. and Murali, K. R., 2021. Degradation of methylene blue dye by TiO₂ nanoparticles biologically synthesized using leaf extract of citrus aurantifolia. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 22, 622-629. <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00270-4>.
- Wu, Z., Zhao, Y., Mi, L., Guo, Y., Wang, H., Liu, K. et al., 2021. Preparation of g-C₃N₄/TiO₂ by template method and its photocatalytic performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 624, 126756. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126756>.
- Xu, L., Yang, L., Johansson, E. M., Wang, Y. and Jin, P., 2018. Photocatalytic activity and mechanism of bisphenol A removal over TiO_{2-x}/rGO nanocomposite driven by visible light. *Chemical Engineering Journal*, 350, 1043-1055. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.046>.
- Yang, Y., Ma, G., An, Z., Wang, W., Hu, X., Wang, Y. et al., 2025. Preparation of recyclable g-C₃N₄/TiO₂ heterojunction/alginate hydrogel microbeads and investigation of their adsorption-photocatalytic properties. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18, 100650. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100650>.
- Zhang, D., Cui, S. and Yang, J., 2017. Preparation of Ag₂O/g-C₃N₄/Fe₃O₄ composites and the application in the photocatalytic degradation of Rhodamine B under visible light. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 1141-1149. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.095>.