



Removal of Tetracycline from Aqueous Environments Using CTF-P Photocatalyst with Organic-Covalent Structure under Visible Light

Mohammad Bashar¹, Soheil Sobhan Ardakani^{2*}, Mehrdad Cheraghi³, Bahareh Lorestani³,
Behzad Shahmoradi⁴

1. Ph.D. Candidate, Dept. of the Environmental Engineering, College of Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran
2. Prof., Dept. of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran (Corresponding Author) s_sobhan@iauh.ac.ir
3. Prof., Dept. of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran
4. Prof., Dept. of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Kurdistan University of Medical Sciences, Sanandaj, Iran

 <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.500893.3460>

Original Paper

Abstract

Tetracycline is a common commercial antibiotic that is used in large quantities against bacteria and a wide range of microorganisms. The presence of TC in pharmaceutical industries and hospital wastewater can cause an unpleasant odor, skin disorders, and microbial resistance in pathogenic agents, and can lead to the death of effective microorganisms responsible for purifying wastewater. Therefore, its removal before entering into the environment is of great importance. Given the importance of the issue, this study evaluates the efficiency of TC removal from aqueous environments using a photocatalyst with an organic-covalent structure under visible light. In this study, a photocatalyst with an organic-covalent structure (CTF-P) was synthesized by reflux method and its efficiency was investigated. To identify the synthetic photocatalyst characterization, transmission electron microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, elemental mapping analysis (EDX-Mapping), Fourier transform infrared spectroscopy, nitrogen adsorption-desorption analysis (BET) and diffuse reflectance spectroscopy were employed. Moreover, the effects of pH variables (4-9), photocatalyst concentration (10-40 mg) and contact time ((-30)-180 min) on the removal process were evaluated. Based on the results obtained, maximum removal efficiency was achieved at a 90 min contact time, 30 mg of photocatalyst content, and pH=7. The study of scavengers showed that the oxidants (i.e. $O_2^{\bullet-}$, e^- and H^*) play an important role in the degradation process of TC from wastewater. As shown, CTF-P photocatalyst with organic-covalent structure could be used as an effective material for the removal of TC from industrial wastewater under visible light.

Keywords:

Tetracycline, Organic-Covalent Structure, Aqueous Solution, Photocatalyst, Visible Light.



Received: Sep. 4, 2024
Revised: Oct. 28, 2024
Accepted: Dec. 2, 2024

To cite this article:

Bashar, M., Sobhan Ardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and Shahmoradi, B., 2025. Removal of tetracycline from aqueous environments using CTF-P photocatalyst with organic-covalent structure under visible light. *Water and Wastewater*, 35(5), 24-38. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.500893.3460>.

© The Author(s).

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

Use your device to scan and read the article online



1. Introduction

Water is an essential component of life that plays a significant role in the proper functioning of Earth's ecosystems. In many parts of the world, drinking water is not readily available. More than 700 types of organic and inorganic pollutants have been reported in the world's waters, some of which are toxic and carcinogenic, and some remain in the environment for long periods and are not biodegradable. Among these, antibiotics are the most widely used drugs, employed in the treatment of medical, veterinary, and other infections.

According to the World Health Organization, 7,700 kilograms of antibiotics are produced worldwide every day. Tetracycline¹ is among the antibiotics that enter water sources through pharmaceutical and human wastewater, and exposure to it or its metabolized compounds can increase the risk of cancer and mutations in germ cells and embryonic cells. Among non-metallic photocatalysts, a new group of crystalline and porous organic materials with a polymer structure-porous organic polymer with a triazine structure-has attracted the attention of scientists due to their unique physicochemical properties, such as high specific surface area, abundant porosity, and narrow band gap, making them potential candidates for the photocatalytic removal process. Therefore, given the importance of the subject, in this study, a covalent organic polymer with a triazine structure is prepared, and the photocatalytic removal of TC residues from aqueous solution is investigated.

2. Materials and method

2.1. Synthesis of covalent triazine framework polymer²

For the preparation of the CTF-P, first an agitated solution of piperazine (0.861g, 10 mmol) and K₂CO₃ (2.5g, 25mmol) in 1,4-dioxane (60 mL) was added to a 250 mL round-bottomed flask. Subsequently, a solution of cyanuric chloride (1.47 g, 8 mmol) dissolved in 1,4-dioxane (40mL) was gradually added to the piperazine solution and mixed for 1 h; the solution was mixed and heated at 120 °C for 48 h under N₂. Then, the obtained white product was gathered by vacuum filtration through a membrane filter (0.45 μm) and washed with dichloromethane, methanol, and acetone several times and oven-dried for 24 h at 70 °C (Hu et al., 2019).

¹ Tetracycline (TC)

² Covalent Triazine Framework Polymer (CTF-P)

2.2. Photocatalytic tests

The photocatalytic performance of the synthesized CTF-P was evaluated for the degradation of TC in aqueous solution using a 50 W LED-COB lamp. In accordance with standard photocatalytic reaction procedures, 100 mL of the TC solution (20 mg/L) was combined with 30mg of the CTF-P in a 100mL Pyrex reactor. The mixture was then agitated in the dark for 30 min until the adsorption process reached equilibrium. The sample was exposed to air to purge the suspension, which allowed the reaction temperature to be maintained at 25 °C with flowing cooling water. The lamp was switched on and sampling was done at different times (0-180 min). 3.5 mL samples were taken and were passed through cellulose filters (Whatman, 0.22 μm) for UV-visible spectrophotometry analysis.

3. Results

3.1. Characterization of CTF-P

Furthermore, the TEM image of CTF-P displays a stacking layered structure attributed to the stacking of two-dimensional nanosheet. SEM images were captured to analyze the shape and size of the synthesized CTF-P with different magnifications. As shown in Fig. 1, the particles exhibit several nanosheets with a size of less than 64 nm. From the elemental mapping results, it is evident that carbon and nitrogen are evenly distributed throughout the synthesis sample, indicating the successful formation of the CTF-P structure (Fig. 1).

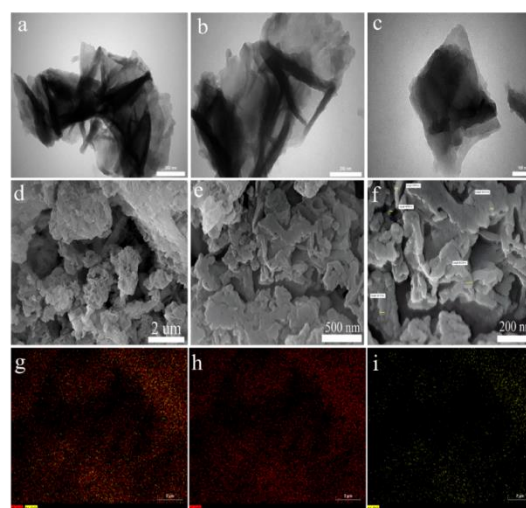


Fig. 1. TEM images of CTF-P (a, b and c), FESEM images of CTF-P (d, e and f), and elemental mapping of CTF-P (g, h and i)



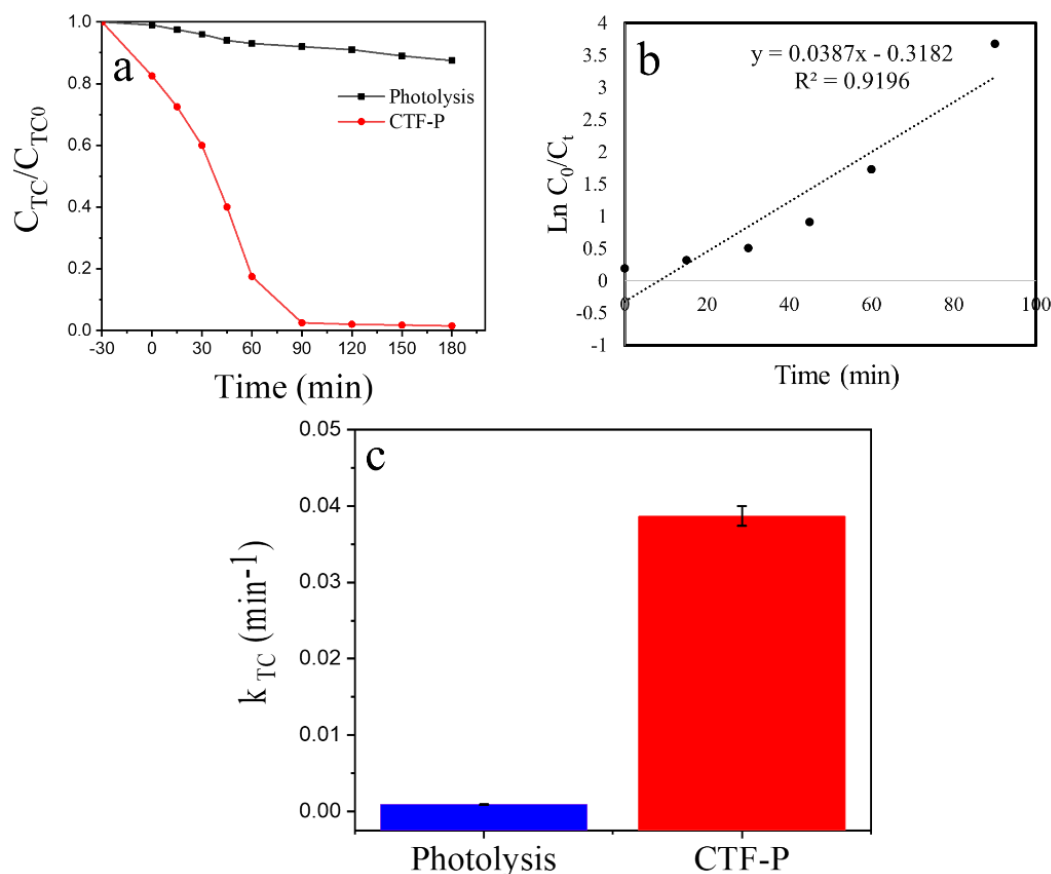


Fig. 2. Time-course survey of the normalized concentration degradation of TC with CTF-P (a), the pseudo-first order plot (b) and pseudo-first order rate constants (c)

3.2. Photoactivity of CTF-P for TC degradation

We evaluated the ability of CTF-P to pollution degradation using TC as a test substance. Prior to the exposure of the samples to light, a 30-min dark adsorption experiment was conducted to establish equilibrium between adsorption and desorption. The CTF-P displayed low TC adsorption of around 17.5%. As presented in Fig. 2, the photocatalytic activity of CTF-P led to roughly 97.5% of the removal of TC in 90 min. The pseudo-first-order kinetic equation was used to better understand how photocatalysis works for the degradation of TC. The result shows that the k of TC photocatalytic degradation is calculated to be 0.0387 min^{-1} .

4. Conclusion

In this study, an organic-covalent polymer was

synthesized and used in the removal of TC. SEM, TEM, EDX, EDX-Mapping, XRD, FTIR, BET, UV-Vis and DRS analyses confirmed the synthesis of the polymer and indicated thin, flat, two-dimensional nanosheets of the polymer material. The results also showed that the maximum TC removal efficiency was achieved at pH=7, a contact time of 90 min, and a photocatalyst dose of 30 mg. The reusability study of the organic-covalent polymer photocatalyst demonstrated that the efficiency of photocatalytic degradation of TC from aqueous solution decreased slightly after 5 times of use, while no significant decrease in the reaction rate constant was observed. Overall, the results showed that the organic-covalent polymer has a significant capacity for the removal of TC under visible light and its application in the treatment of wastewater containing these drugs is recommended.





حذف داروی تتراسایکلین از محیط‌های آبی با استفاده از فتوکاتالیست CTF-P واجد ساختار آلی-کووالانسی تحت نور مرئی

محمد بشر^۱، سهیل سبحان اردکانی^{۲*}، مهرداد چراغی^۳، بهاره لرستانی^۳، بهزاد شاهرادی^۴

۱- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۲- استاد، گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران (نویسنده مسئول) sobhan@iauh.ac.ir

۳- استاد، گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۴- استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.500893.3460>

مقاله پژوهشی

چکیده

تتراسایکلین یکی از آنتی‌بیوتیک‌های تجاری رایج است که به دلیل پایداری شیمیایی بالا در برابر باکتری‌ها و طیف گسترده‌ای از میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌شود. حضور این آنتی‌بیوتیک در فاضلاب صنایع دارویی و پساب بیمارستانی باعث ایجاد بوی نامطبوع، اختلالات پوستی و مقاومت میکروبی در موجودات بیماری‌زا می‌شود و می‌تواند منجر به مرگ میکروارگانیسم‌های مؤثر در تصفیه فاضلاب شود و از این رو، تصفیه آن قبل از ورود به محیط‌زیست، اهمیت زیادی دارد. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی کارایی حذف داروی تتراسایکلین از محیط‌های آبی با استفاده از فتوکاتالیست با ساختار آلی-کووالانسی تحت نور مرئی انجام شد. در این پژوهش، ابتدا فتوکاتالیست با ساختار آلی-کووالانسی به روش رفلاکس سنتز شد. ویژگی‌های فتوکاتالیست سنتز شده نیز با استفاده از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی عبوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، دستگاه پراش پرتو ایکس، آنالیز نقشه برداری عنصری، طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه، آنالیز جذب و واجذب نیتروژن و طیف‌سنجی بازتابی نفوذی شناسایی شدند. همچنین، اثر متغیرهای pH (معادل ۴ تا ۹)، غلظت فتوکاتالیست (۱۰ mg تا ۴۰) و زمان تماس (۳۰ min تا ۱۸۰) نیز بر کارایی حذف تتراسایکلین ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که با افزایش زمان تماس تا ۹۰ min، غلظت فتوکاتالیست تا ۳۰ mg و در pH برابر با ۷، کارایی حذف تتراسایکلین افزایش یافته است. مطالعه اسکانوجرها نشان داد که اکسند‌های H^{\bullet} و e^{-} ، $\text{O}_2^{\bullet-}$ نقش قابل توجهی در فرایند تخریب داروی تتراسایکلین از محلول آبی توسط CTF-P داشته‌اند. نتایج نشان داد پلیمر با ساختار آلی-کووالانسی می‌تواند به‌عنوان یک فتوکاتالیست مؤثر و در دسترس برای حذف تتراسایکلین از پساب‌های صنعتی تحت نور مرئی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی:
تتراسایکلین، ساختار آلی-کووالانسی، فتوکاتالیست، محلول آبی، نور مرئی



دریافت: ۱۴۰۳/۷/۱۴

اصلاح: ۱۴۰۳/۸/۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۱۲

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



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

بشر، م.، سبحان اردکانی، س.، چراغی، م.، لرستانی، ب.، شاهرادی، ب.، ۱۴۰۳، حذف داروی تتراسایکلین از محیط‌های آبی با استفاده از فتوکاتالیست CTF-P واجد ساختار آلی-کووالانسی تحت نور مرئی.

آب و فاضلاب، ۳۵(۵)، ۲۴-۳۸.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.500893.3460>



© 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

تاکنون، به‌منظور حذف آلاینده‌های دارویی و کاهش ورود فاضلاب‌ها به آب‌های سطحی روش‌های مختلفی بررسی شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از فرایندهای انعقاد شیمیایی، اسمز معکوس، الکتروشیمی، اکسیداسیون پیشرفته، روش‌های زیستی و جذب سطحی اشاره کرد (Mahdavi and Ashraf Talesh, 2021). در این بین، اکسیداسیون پیشرفته یکی از روش‌هایی است که در آن با اتکا بر تولید گونه‌های بسیار فعال مانند رادیکال‌های هیدروکسیل که قادرند دامنه وسیعی از آلاینده‌های آلی را به‌سرعت اکسید کنند، این آلاینده‌ها در حضور عوامل اکسیدکننده مانند کاتالیزورها و پراکسیدها تخریب می‌شوند (Koundle et al., 2025).

از روش‌های اکسیداسیون پیشرفته می‌توان به فرایندهای فنتون، فوتوفنتون، ازن‌زنی و اکسیداسیون با پراکسید هیدروژن و استفاده از فتوکاتالیست‌های نیمه‌هادی اشاره کرد (Koundle et al., 2025) که واکنش‌های فتوکاتالیستی از طریق تابش نوری با انرژی بزرگتر یا مساوی با شکاف انرژی، به یک نیمه‌رسانا انجام شده و باعث برانگیخته شدن الکترون‌های نوار ظرفیت و انتقال آنها به نوار رسانش می‌شوند (Zandipak et al., 2024a). الکترون برانگیخته شده می‌تواند مولکول‌های آلاینده را احیا کند و یا با الکترون گیرنده مانند سوپراکسید جذب شده روی سطح کاتالیست یا حل شده در آب واکنش داده و آنیون رادیکالی O_2^- را تولید کند. حفره ایجاد شده در نوار رسانش نیز می‌تواند به‌طور مستقیم مولکول‌های آلاینده را اکسید کرده یا با آب و یا OH^- واکنش داده و آنها را به رادیکال‌های هیدروکسیل تبدیل کند (Ravi and Golder, 2025).

فتوکاتالیست‌ها شامل موادی مانند دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید روی، اکسید سریم، دی‌اکسید زیرکونیوم، تری‌اکسید تنگستن، اکسید وانادیوم، اکسید آهن، سولفید کادمیم و سولفید روی هستند (Camara et al., 2025). گروه دیگری از فتوکاتالیست‌ها، انواع غیرفلزی همچون کربن نیتريد گرافیتی، کاربیدهای بور، فسفر قرمز، مواد کربنی پلی‌فیلین، گرافن دوپ شده با فسفر، کربن نانو متخلخل و پلی‌آمید هستند که قابلیت حذف ترکیبات آلی در حضور نور مرئی را دارند (Zandipak et al., 2025a). در میان فتوکاتالیست‌های غیرفلزی، گروه جدیدی از مواد آلی کریستالی و متخلخل با ساختار پلیمری به نام پلیمرهای آلی متخلخل با ساختار تریازین به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد همچون سطح ویژه بالا، تخلخل فراوان و باند گپ باریک مورد

آب یک جزء مهم و ضروری از حیات است که نقش مهمی در عملکرد بوم‌سازگان‌ها ایفا می‌کند (Liu et al., 2021). بیش از ۷۰۰ نوع آلاینده آلی و معدنی در آب‌های جهان شناسایی و گزارش شده است که برخی از آنها سمی و سرطان‌زا بوده و برخی نیز به‌مدت طولانی در محیط‌زیست باقی مانده و غیرقابل تجزیه هستند (Pan, 2025, Siddiq et al., 2025). در سال‌های اخیر، مصرف دارو و دسترسی مردم به انواع داروها به دلیل گسترش بیماری‌ها، پیشرفت علوم پزشکی، داروسازی و پوشش درمانی افزایش یافته است (Sohrabi et al., 2021).

ایران یکی از بزرگترین کشورهای مصرف‌کننده دارو در جهان است. به‌طوری‌که از لحاظ مصرف دارو جزء ۲۰ کشور نخست جهان محسوب می‌شود و در آسیا هم بعد از چین مقام دوم را به خود اختصاص می‌دهد (Zandipak and Sobhanardakani, 2018). در این بین، آنتی‌بیوتیک‌ها پرمصرف‌ترین داروها هستند که به‌طور گسترده در درمان عفونت‌های پزشکی، دامپزشکی و نظیر آن استفاده می‌شوند. طبق برآورد سازمان جهانی بهداشت، روزانه ۷۷۰۰ کیلوگرم آنتی‌بیوتیک در سراسر جهان تولید می‌شود (Xiang et al., 2024).

از آنجا که ۳۰ تا ۹۰ درصد آنتی‌بیوتیک‌های مورد مصرف انسان، دام و همچنین آبزیان به‌طور کامل در ارگانیسم‌ها متابولیزه نشده و از طریق ادرار و مدفوع، به‌عنوان ترکیب فعال به محیط‌زیست تخلیه می‌شود و یا به‌صورت غیرمستقیم از طریق داروهای مصرف نشده و یا تاریخ گذشته به محیط وارد می‌شوند (Carino et al., 2007, Chen et al., 2024). بنابراین امروزه، آلودگی محیط‌زیست به‌ویژه خاک و آب با آنتی‌بیوتیک‌ها توسط فاضلاب خانگی، بیمارستان‌ها و صنایع داروسازی به دلیل برخورداری از خطرات بالقوه برای سلامت انسان و محیط‌زیست به یکی از نگرانی‌های مهم جوامع بشری تبدیل شده است (Yu et al., 2024).

تتراسایکلین در زمره آنتی‌بیوتیک‌هایی است که از طریق فاضلاب‌های دارویی و انسانی به منابع آبی وارد می‌شود و قرار گرفتن در معرض این دارو و یا ترکیبات متابولیزه آن مخاطره ابتلا به سرطان، ایجاد جهش در سلول‌های جنسی و یاخته‌های جنینی را افزایش می‌دهد (Jin et al., 2024, Liu et al., 2024).



نیترژن در دمای 180°C به مدت 48 h قرار گرفت. در مرحله بعد، رسوب حاصل با فیلترهای غشایی $45\ \mu\text{m}$ جمع‌آوری و با دی کلرومتان، متانول و استون به روش سوکسله چندین بار شستشو داده شد. در نهایت، پلیمر به دست آمده در 24 h در دمای 60°C خشک شد (Hu et al., 2019).

۲-۳- شناسایی ویژگی‌های فتوکاتالیست سنتز شده

در این پژوهش، برای شناسایی و بررسی مورفولوژی و مشخصات ساختاری فتوکاتالیست سنتز شده از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲، میکروسکوپ الکترونی عبوری^۳، طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه^۴، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۵، آنالیز جذب و واجذب نیترژن^۶ و آنالیز نقشه‌برداری عنصری^۷ استفاده شد. همچنین، برای تعیین شکاف انرژی از طیف‌سنجی بازتابی نفوذی^۸ استفاده شد.

۲-۴- فرایند حذف فتوکاتالیستی

به منظور بررسی کارایی فتوکاتالیست سنتز شده در حذف داروی تتراسایکلین از محلول آبی، راکتوری حاوی $100\ \text{mL}$ از محلول تتراسایکلین با غلظت اولیه $20\ \text{mg/L}$ ، مقدار مشخصی از فتوکاتالیست، لامپ مرئی $50\ \text{W}$ و پمپ هوادهی که بر روی یک همزن مغناطیسی در دمای محیط قرار گرفته بودند، طراحی شد. به این صورت که در زمان‌های مشخص نمونه‌برداری انجام و غلظت داروی تتراسایکلین در محلول آبی توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج $356\ \text{nm}$ نانومتر خوانده شد. لازم به ذکر است که همه نمونه‌ها ابتدا به مدت $30\ \text{min}$ در تاریکی قرار گرفته و میزان جذب آن‌ها ثبت شد. در نهایت، نرخ حذف داروی تتراسایکلین از محلول آبی با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Zandipak and Sobhanardakani, 2018, Asgari et al., 2024)

$$R(\%) = 1 - \frac{C_t}{C_0} * 100 \quad (1)$$

² Scanning Electron Microscope (SEM)

³ Transmission Electron Microscopy (TEM)

⁴ Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

⁵ X-Ray Diffraction (XRD)

⁶ Brunauer Emmett Teller (BET)

⁷ Energy- Dispersive X-Ray Spectroscopy Mapping (EDX- Mapping)

⁸ Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)

توجه دانشمندان قرار گرفته و آن‌ها را به نامزدی بالقوه برای فرایند حذف فتوکاتالیستی تبدیل کرده است (Zandipak et al., 2024b). بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، این پژوهش با هدف بررسی کارایی حذف داروی تتراسایکلین از محیط‌های آبی با استفاده از فتوکاتالیست با ساختار آلی-کووالانسی تحت نور مرئی انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات استفاده شده

در این پژوهش که در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط بسته انجام شد، مواد استفاده شده شامل پیرازین ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_2$)، پتاسیم کربنات (K_2CO_3)، سیانوریک کلرید ($\text{C}_3\text{Cl}_3\text{N}_3$)، دی‌اکسان ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)، دی کلرومتان (CH_2Cl_2)، متانول (CH_3OH)، تری بوتانول ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$)، اتیلن دی آمین تتراسایکلین اسید ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$)، دی‌متیل فرم‌آمید ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$)، اتیلن گلیکول ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$)، استون ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)، اسید کلریدریک (HCl) و هیدروکسید سدیم (NaOH) بود که همگی با بالاترین خلوص آزمایشگاهی از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. همچنین، داروی تتراسایکلین برای ساخت محلول استوک نیز از شرکت مرک خریداری شد (شکل ۱). استوک تتراسایکلین به وسیله انحلال $1\ \text{g}$ از ماده جامد تتراسایکلین در $1\ \text{L}$ آب دوبار تقطیر تهیه شد. سایر محلول‌های استفاده شده نیز با رقیق‌سازی استوک اولیه تتراسایکلین تهیه و بلافاصله در آزمایش‌های حذف فتوکاتالیستی تتراسایکلین استفاده شدند. از طرفی، لامپ مرئی $50\ \text{W}$ از شرکت نمانور، دستگاه اسپکتروفتومتر مدل OPTIZEN ALPHA، دستگاه pH متر Jenway مدل 3510 نیز در اجرای این پژوهش استفاده شدند.

۲-۲- سنتز پلیمر با ساختار آلی-کووالانسی^۱

در این پژوهش، برای سنتز پلیمر با ساختار آلی-کووالانسی، $861\ \text{g}$ پودر پیرازین ($10\ \text{mmol}$) و $5/2\ \text{g}$ بی‌کربنات پتاسیم ($25\ \text{mmol}$) به $60\ \text{mL}$ محلول دی‌اکسان اضافه و به مدت $1\ \text{h}$ در دمای 25°C هم زده شد. سپس، $1/47\ \text{g}$ سیانوریک کلراید ($8\ \text{mmol}$) در $40\ \text{mL}$ دی‌اکسان حل شد و به تدریج به محلول پیرازین اضافه و در شرایط هم زدن $200\ \text{RPM}$ و تحت گاز

¹ Covalent Triazine Framework Polymer (CTF-P)



که در آن C_0 نشان‌دهنده غلظت داروی تتراسایکلین در زمان صفر و C_t نیز بیانگر غلظت نهایی داروی تتراسایکلین هر دو برحسب mg/L هستند.

به‌علاوه، به‌منظور ارزیابی کارایی حذف داروی تتراسایکلین، اثر پارامترهای تأثیرگذار در فرایند فتوکاتالیستی از جمله: pH محلول، غلظت فتوکاتالیست و زمان واکنش نیز بررسی شدند. همچنین، به‌منظور تعیین انواع اکسندهای فعال در فرایند حذف داروی تتراسایکلین از محلول آبی آزمایش‌هایی با استفاده از اسکاونجرهای مختلف همچون بنزوکینون، ترت بوتانول، اتیلن دی آمین تراستیک اسید و نیترات نقره انجام شد.

نتایج طیف FTIR از پلیمر آلی-کوالانسی (شکل ۲-۲) که توسط اسپکترومتر FTIR در ناحیه ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ تهیه شدند، نشان داد که پیک موجود در ناحیه ۱۵۳۰ cm ناشی از ارتعاشات کششی پیوند C=N بوده و همچنین، ناحیه ۸۰۰ cm نشان‌دهنده ساختار تریازین است. هر دو باند در نواحی ۲۸۵۰ و ۲۹۲۰ cm را می‌توان به ارتعاشات کششی C=H نسبت داد. بر اساس طیف IR از ترکیب پیرازین، ارتعاشات کششی ۳۴۱۱ و ۲۸۵۱ cm به ترتیب به گروه‌های N-H و C-H نسبت داده می‌شوند. از طرفی، طیف به‌دست‌آمده سیانوریک کلراید نشان داد که پیک موجود در ناحیه ۸۵۴ cm ناشی از ارتعاشات کششی پیوند Cl-Cl است. علاوه بر این، یک پیک قابل‌توجه در ۱۵۳۲ cm مشاهده می‌شود که با گروه C=N همراه است.

به‌منظور بررسی سینتیک حذف، نتایج حاصل از تماس پساب پتروشیمی با فتوکاتالیست‌های مختلف توسط مدل سینتیک مرتبه اول بررسی شد. پس از آن، معادله مرتبه اول $\ln C_t$ برحسب زمان برای فتوکاتالیست‌های مختلف ترسیم شد و ضریب رگرسیون هر منحنی به‌عنوان معیار انتخاب، مدنظر قرار گرفت.

به‌منظور بررسی سینتیک حذف، نتایج حاصل از تماس پساب پتروشیمی با فتوکاتالیست‌های مختلف توسط مدل سینتیک مرتبه اول بررسی شد. پس از آن، معادله مرتبه اول $\ln C_t$ برحسب زمان برای فتوکاتالیست‌های مختلف ترسیم شد و ضریب رگرسیون هر منحنی به‌عنوان معیار انتخاب، مدنظر قرار گرفت.

$$-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = kt \quad (2)$$

ایزوترم‌های جذب/واجذب نیتروژن برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ساختاری فتوکاتالیست نشان داد CTF-P دارای سطح ویژه $5/0.3 \text{ m}^2/\text{g}$ و حجم کل منافذ $0.17 \text{ cm}^3/\text{g}$ است که با توجه به طبقه‌بندی آیوپاک، از مدل ایزوترم نوع چهارم پیروی می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که فتوکاتالیست دارای ساختار متخلخل درشت است و قابلیت جذب چند لایه دارد (شکل ۲-۲).

که در آن C_0 نشان‌دهنده غلظت داروی تتراسایکلین در زمان صفر و C_t نیز بیانگر غلظت نهایی داروی تتراسایکلین هر دو برحسب mg/L هستند. k ضریب ثابت و t نیز نشان‌دهنده زمان واکنش برحسب دقیقه است (Zandipak et al., 2025b).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مشخصه‌یابی فتوکاتالیست سنتز شده

نتایج آنالیز DRS به‌منظور تعیین سنجش شکافت انرژی ساختار فتوکاتالیست سنتز شده در شکل ۳ آمده است. طیف جذب UV-Vis فتوکاتالیست تولید شده در دامنه طول‌موج جذب نوری ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ nm را نشان داد که لبه جذب CTF-P در طول‌موج ۳۷۰ nm حاصل شده است. از طرفی، انرژی باند گپ نیز بر اساس معادله $1239.8/h$ با لبه جذب $\lambda=370 \text{ nm}$ برابر با $2/9 \text{ eV}$ به‌دست آمد.

تصاویر TEM از پلیمر آلی-کوالانسی با بزرگنمایی‌های مختلف (شکل ۱) نشان داد که ساختار پلیمر به‌صورت ورقه‌ای و دوبعدی است. همچنین، تصاویر SEM (شکل ۱) نشان‌دهنده نانوصفحات با اندازه کوچکتر از ۶۴ nm است. نتایج آنالیز EDX و آنالیز عنصری Mapping که به‌منظور تعیین ترکیبات موجود در ساختار فتوکاتالیست سنتز شده انجام شد، نشان داد که فقط کربن (۵۵/۹) و نیتروژن (۴۴/۰۴) در نمونه فتوکاتالیست قابل‌مشاهده هستند (شکل‌های ۱ و ۲-a). آنالیز XRD (شکل ۲-b) نیز پیک‌های

۳-۲- نتایج بررسی متغیرهای مؤثر در حذف داروی تتراسایکلین

۳-۲-۱- نتایج بررسی اثر زمان تماس و سینتیک واکنش بر کارایی حذف داروی تتراسایکلین توسط فتوکاتالیست CTF-P
زمان تماس از متغیرهای بسیار مهم در فرایند حذف فتوکاتالیستی



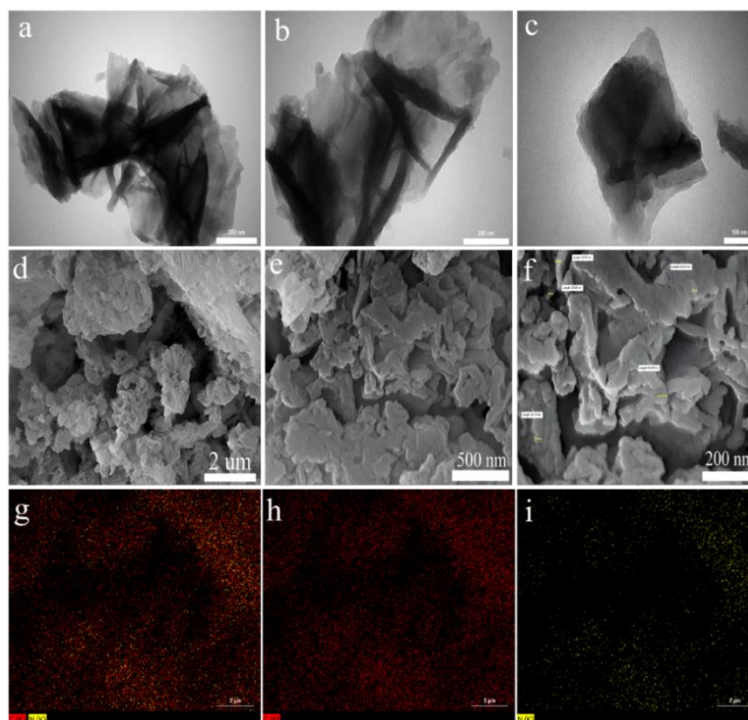


Fig. 1. TEM images of CTF-P (a, b and c), FESEM images of CTF-P (d, e and f) and elemental mapping of CTF-P (g, h and i)

شکل ۱- تصاویر TEM از CTF-P (a و b و c)، تصاویر FESEM از CTF-P (d و e و f) و تصاویر آنالیز عنصری از CTF-P (g، h و i)

قالب $\ln C_1$ برحسب زمان ترسیم شد و ضریب رگرسیون^۱ منحنی به عنوان معیار انتخاب مدنظر قرار گرفت (شکل ۴-ب). مقدار پیش‌بینی شده ثابت سرعت واکنش فتوکاتالیستی (k_{OBS}) توسط این مدل برابر با 0.387 min^{-1} حاصل شد که نشان می‌دهد غلظت بالایی از گونه‌های اکسنده در محیط واکنش فعال شده‌اند.

۳-۲-۲- نتایج بررسی اثر pH بر کارایی حذف داروی تتراسایکلین توسط فتوکاتالیست CTF-P

نتایج بهینه‌سازی pH محلول تتراسایکلین نشان داد که با افزایش pH از ۴ به ۷، کارایی حذف تتراسایکلین از ۴۸ به ۹۸/۶ درصد افزایش و بیشینه نرخ حذف در pH برابر با ۷ رخ داده است و از این‌رو، pH معادل ۷ به عنوان pH بهینه برای انجام سایر آزمایش‌ها انتخاب شد (شکل ۵-ا). اثر قابل توجه pH محلول بر روی K_{obs} نشان داد که بیشترین نرخ سرعت واکنش در حدود 0.387 min^{-1} در pH برابر با ۷ حاصل شده است (شکل ۵-ب).

است. نتایج حاصل از فتولیز، جذب در زمان تماس ۳۰ min و اثر زمان تماس بر کارایی حذف داروی تتراسایکلین تحت نور مرئی در شکل‌های ۴-ا و ۴-ب آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که نرخ حذف دارو توسط فتوکاتالیست CTF-P تا زمان ۹۰ min افزایش یافته و در زمان‌های بعدی ثابت شده است. همچنین، نتایج نشان داد که بیشترین ثابت سرعت واکنش در زمان تماس ۹۰ min حاصل شده است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حذف دارو در دو مرحله انجام شده است. مرحله اول، مرحله جذب روی سطح فتوکاتالیست و مرحله دوم، حذف تتراسایکلین توسط رادیکال‌های آزاد تولید شده از جمله الکترون‌های رادیکالی، حفره‌های الکترونی تولید شده و هیدروکسیل‌های رادیکالی ناشی از برانگیختگی الکترونی CTF-P در مدت زمان فرایند بوده است. این نتایج با دستاورد پژوهش جین و همکاران در سال ۲۰۲۴ که نشان دادند با افزایش زمان تماس، کارایی حذف تتراسایکلین افزایش یافته است، مطابقت دارد (Jin et al., 2024).

مطالعه سینتیکی در غلظت ۲۰ mg/L از داروی تتراسایکلین با فتوکاتالیست، توسط معادله مرتبه اول بررسی شد و نتایج آن در

¹ Regression Coefficient (R^2)



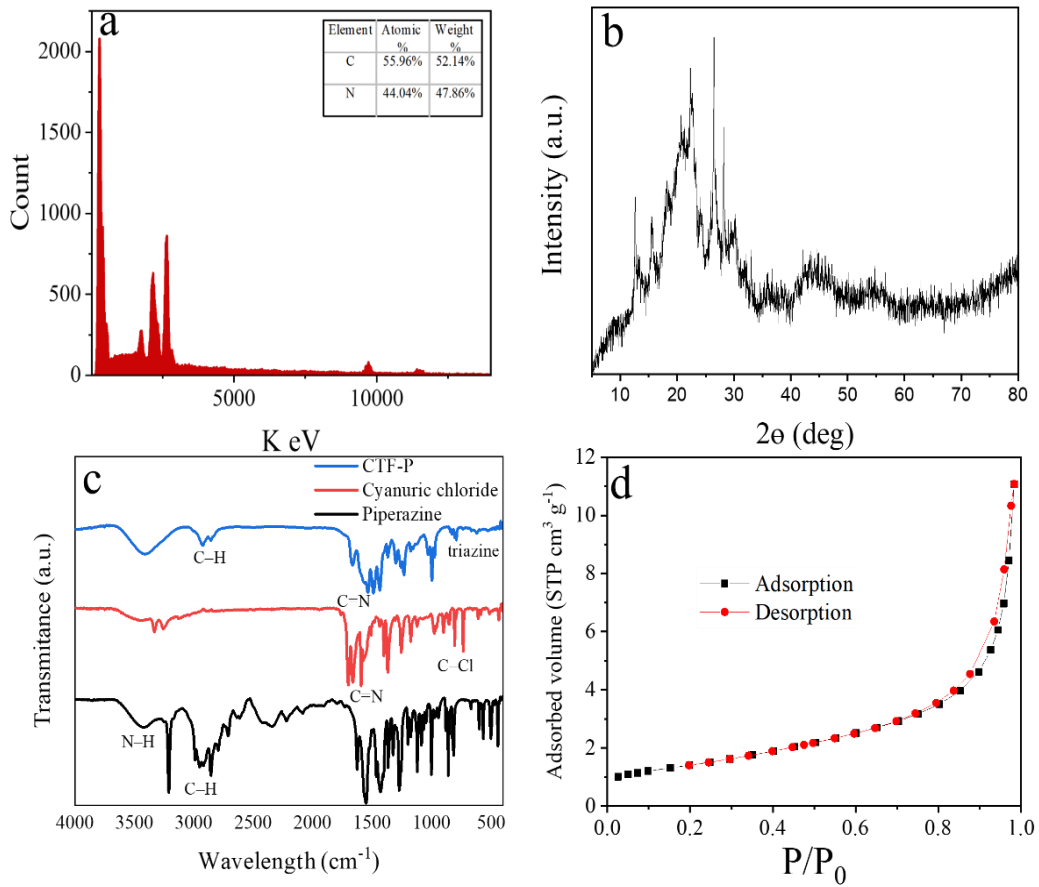


Fig. 2. EDX spectrums of CTF-P (a), XRD patterns of the CTF-P (b), FTIR spectra of the CTF-P(c), N2 adsorption–desorption isotherms of CTF-P (d) شکل ۲- تصاویر (a) از EDX، (b) از XRD، (c) از FTIR و (d) از BET از CTF-P

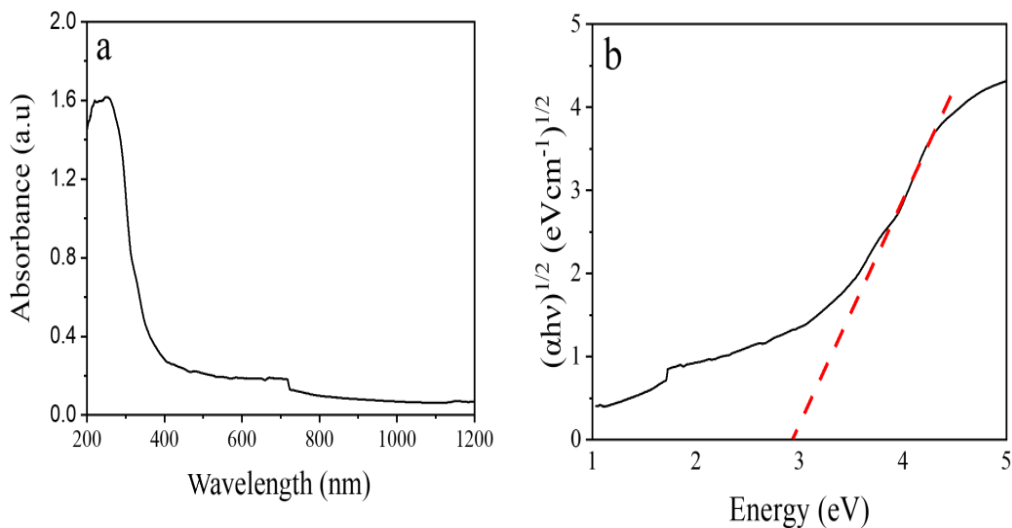


Fig. 3. UV–Visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis DRS) absorption spectra (a) and the determination of the bandgap energy (b) شکل ۳- تصاویر UV-Vis از CTF-P (a) و تعیین سنجش شکافت انرژی (b)



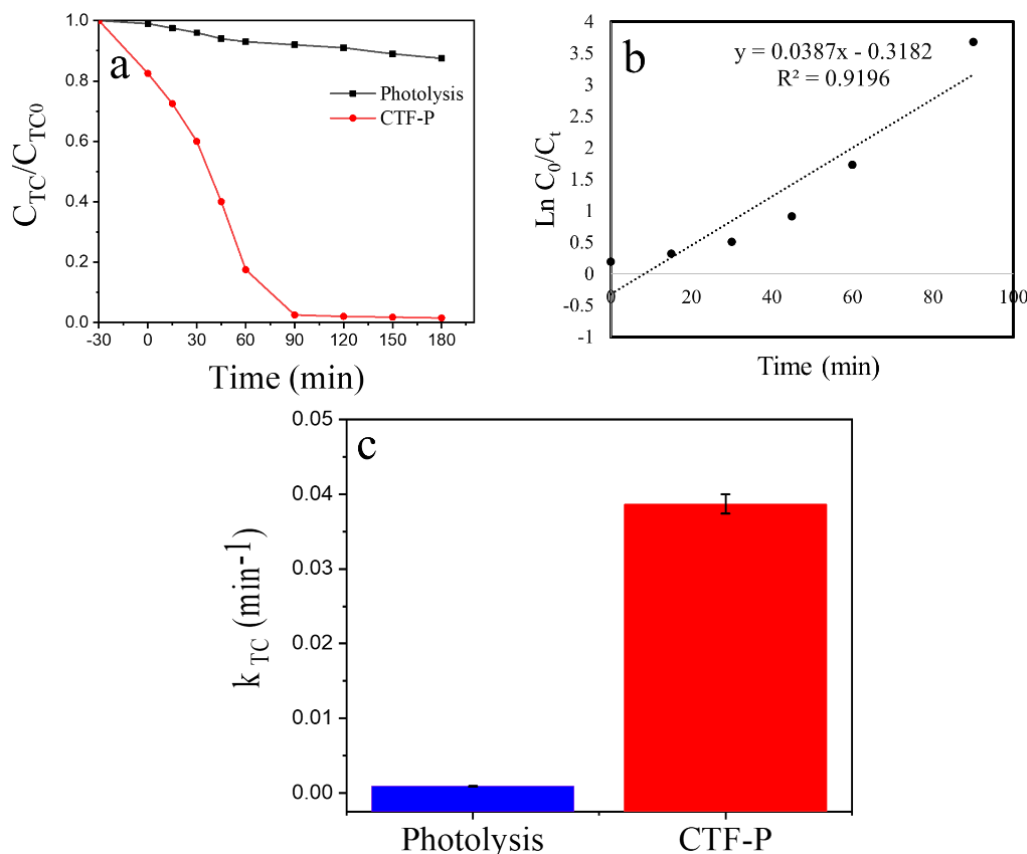


Fig. 4. Time-curve survey of the normalized concentration degradation of TC with CTF-P (a), the pseudo-first order plot (b) and the pseudo-first order rate constants (c)

شکل ۴- بررسی منحنی زمان تخریب غلظت نرمال شده TC با CTF-P (a)، نمودار شبه مرتبه اول (b) و ثابت های سرعت شبه مرتبه اول (c)

کردند حذف تتراسایکلین از محیط آبی با استفاده از فتوکاتالیست $Bi_{19}Cl_3S_{27}/Bi_2MoO_6$ با افزایش pH تا ۷ افزایش می یابد، مطابقت دارد (Li et al., 2024).

۳-۲-۳- نتایج بررسی اثر غلظت فتوکاتالیست بر کارایی حذف

داروی تتراسایکلین توسط CTF-P

نتایج بررسی اثر غلظت فتوکاتالیست بر کارایی حذف داروی تتراسایکلین در شکل ۶ آورده شده است. بر این اساس، با افزایش مقدار فتوکاتالیست CTF-P تا 0.3 g/L ، نرخ حذف دارو افزایش یافته است (شکل ۶-a). شکل ۶-b اثر قابل توجه غلظت فتوکاتالیست بر روی K_{obs} را نشان می دهد که بیشترین نرخ سرعت واکنش در حدود 0.395 min^{-1} در غلظت فتوکاتالیست 0.3 g/L را نشان می دهد. این نتایج بیانگر آن است که کارایی حذف تتراسایکلین به دلیل افزایش سطح و محل های جذب قابل دسترسی و همچنین تولید رادیکال های هیدروکسیل برای حذف دارو افزایش

علاوه بر این، نتایج نشان داد که pH_{pzc} نانوکامپوزیت سنتز شده برابر با ۵/۵ بوده است. در نتیجه، در $pH > 5/5$ سطح فتوکاتالیست دارای بار منفی و در $pH < 5/5$ سطح فتوکاتالیست واجد بار مثبت بوده است.

در $pH < 5/5$ گروه های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل موجود بر سطح پلیمر پرتونه شده و سطح فتوکاتالیست دارای بار مثبت می شود که این موضوع به کاهش میزان جذب تتراسایکلین بر روی فتوکاتالیست و در نهایت حذف کمتر آن منجر می شود. این در حالی است که در $pH > 5/5$ ، سطح فتوکاتالیست واجد بار منفی بوده که با ظهور نیروی جاذبه، به افزایش فرایند فتوکاتالیستی منجر می شود. کارایی زیاد حذف تتراسایکلین در شرایط خنثی را می توان با وجود یون های OH^- بر روی سطح فتوکاتالیست مرتبط دانست که به تشکیل رادیکال های OH^\bullet به عنوان یک گونه اکسیدکننده قوی در فرایندهای فتوکاتالیستی توسط فتوحفره ها منجر می شود. این نتایج با دستاورد پژوهش لی و همکاران در سال ۲۰۲۴ که گزارش



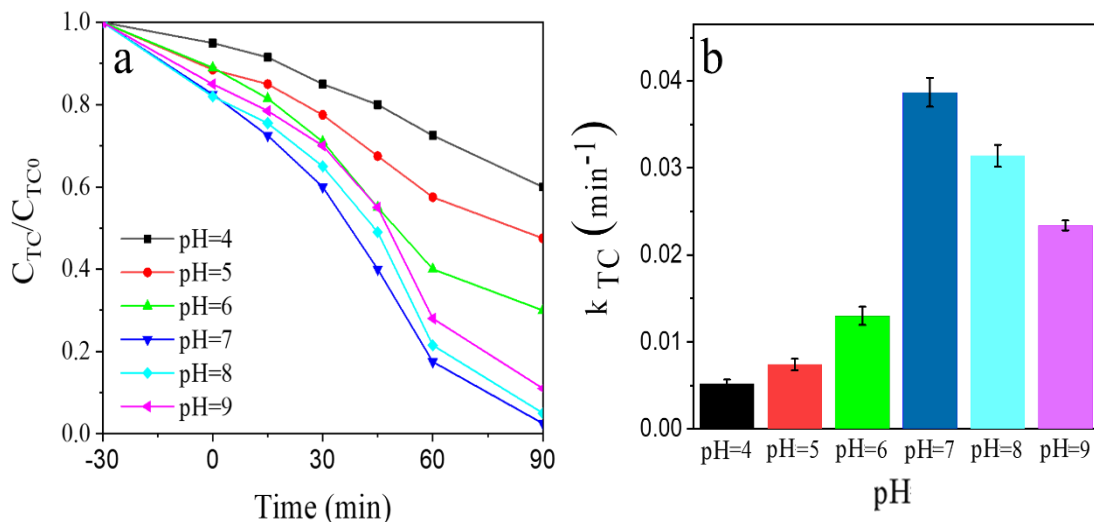


Fig. 5. pH impact on the temporal normalized concentration of TC with CTF-P (a), and pseudo-first order rate constants (b)

شکل ۵- تأثیر pH بر تخریب غلظت نرمال شده TC با CTF-P (a) و ثابت‌های سرعت شبه‌مرتبه اول (b)

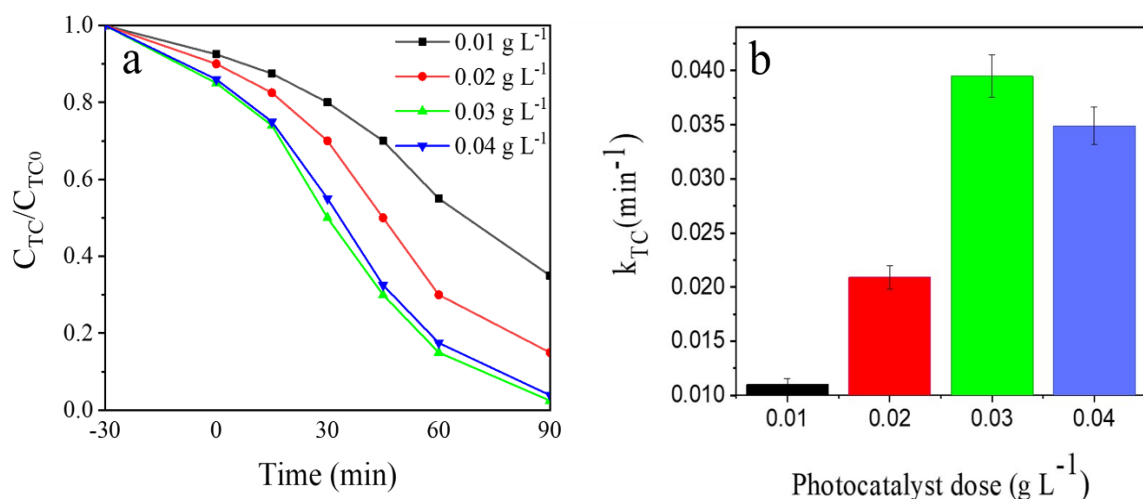


Fig. 6. Photocatalyst dose impact on the temporal normalized concentration of TC with CTF-P (a), and pseudo-first order rate constants (b)

شکل ۶- تأثیر دوز فتوکاتالیست بر تخریب غلظت نرمال شده TC با CTF-P (a) و ثابت‌های سرعت شبه‌مرتبه اول (b)

۳-۲-۴- نتایج بررسی اثر آنیون‌های غیر آلی و اثر اسکاونجرها بر کارایی حذف داروی تتراسایکلین توسط فتوکاتالیست CTF-P نتایج ارزیابی تأثیر آنیون‌های غیر آلی Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} و HCO_3^- بر روی تخریب فتوکاتالیستی تتراسایکلین (شکل ۷-ا) نشان داد که حضور آنیون‌های HCO_3^- و SO_4^{2-} در محلول به کاهش کارایی حذف فتوکاتالیستی داروی تتراسایکلین منجر شده است. همچنین، یافته‌ها نشان‌دهنده آن بود که تأثیر آنیون NO_3^- بر روی تخریب

یافته است. از سوی دیگر، افزایش مقدار اولیه فتوکاتالیست با ایجاد کدورت به نوبه خود باعث کاهش شدت نور مرئی و در نتیجه کاهش تولید رادیکال هیدروکسیل شده است. این نتایج با دستاورد پژوهش گایو و همکاران در سال ۲۰۲۴ که گزارش کردند حذف تتراسایکلین از محیط آبی با افزایش غلظت فتوکاتالیست MgFe_2O_4 ترکیب شده با CoCr_2O_4 افزایش یافته است، مطابقت دارد (Gao et al., 2024).



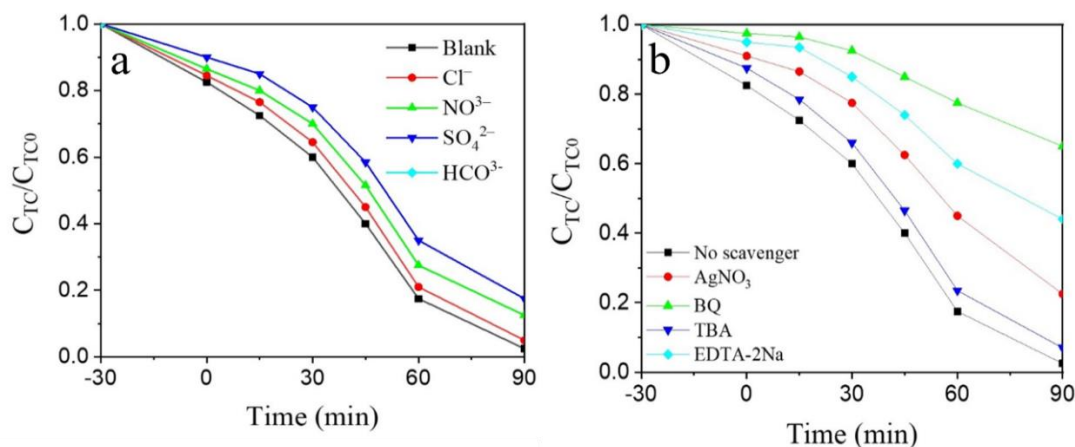


Fig. 7. Inorganic anions impact on the temporal normalized concentration of TC with CTF-P (a) and scavenger impact on the temporal normalized concentration of TC with CTF-P (b)

شکل ۷- تأثیر آنیون‌های غیر آلی بر تخریب غلظت نرمال شده TC با CTF-P (a) و ثابت‌های سرعت شبه مرتبه اول (b)

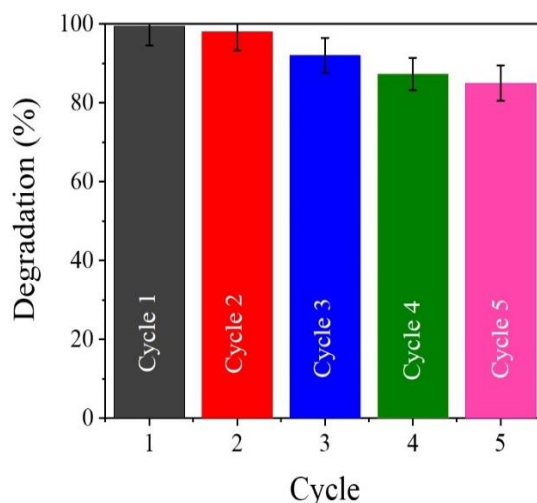


Fig. 8. Influence of recyclability of CTF-P on TC removal

شکل ۸- قابلیت استفاده مجدد CTF-P در حذف تتراسایکلین

آبی با استفاده از CTF-P داشته‌اند.

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

قابلیت استفاده مجدد فتوکاتالیست‌ها یک پارامتر حیاتی در کاربرد آنها در تخریب آلاینده‌های محیط‌های آبی است. نتایج آزمایش‌های بازیابی فتوکاتالیست برای بررسی قابلیت استفاده مجدد از آن در فرایند حذف داروی تتراسایکلین (شکل ۸) نشان داد که کارایی تخریب فتوکاتالیستی دارو پس از ۵ بار استفاده به‌طور جزئی از ۹۹/۵ به ۸۵ درصد کاهش یافته است.

فتوکاتالیستی تتراسایکلین کمتر از سایر آنیون‌ها و تأثیر آنیون Cl^- نیز در مقایسه با سایرین قابل چشم‌پوشی است.

نقش اسکاونجرها در فرایند حذف داروی تتراسایکلین از محلول آبی توسط فتوکاتالیست CTF-P در شکل ۷-b آمده است. به‌علت اهمیت ترکیبات آلی بر خاصیت اسکاونجری مواد، در این پژوهش، نقش چهار نوع ترکیب شامل: بنزوکینون، ترت بوتانول، اتیلن دی آمین تتراستیک اسید دی سدیم و نیترات نقره بر کارایی حذف تتراسایکلین از محلول آبی بررسی شد. نتایج بررسی حاصل از مطالعه اسکاونجرها نشان داد که اکسنددهای $O_2^{\cdot-}$ و H^+ تأثیر قابل توجهی بر فرایند تخریب تتراسایکلین از محلول



۴- نتیجه‌گیری

دیگر، کاهش قابل توجهی در ثابت سرعت واکنش مشاهده نشد. در مجموع، نتایج نشان داد که پلیمر آلی-کوالانسی، ظرفیت حذف قابل توجه داروی تتراسایکلین تحت نور مرئی را داشته و کاربرد آن در تصفیه پساب حاوی این داروها پیشنهاد می‌شود.

۵- قدردانی

این پژوهش مستخرج از رساله دکترای تخصصی مهندسی محیط‌زیست-آب و فاضلاب مصوب واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی با کد ۱۷۱۱۴۸۰۰۰۶۹۰۷۶۴۲۱۷۰۲۱۱۶۲۷۹۵۰۸ است که نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه به‌خاطر همکاری در اجرای پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

در این پژوهش، پلیمر آلی-کوالانسی سنتز و از آن برای حذف داروی تتراسایکلین استفاده شد. آنالیزهای SEM، TEM، EDX، EDX-Mapping، UV-Vis، BET، FTIR، XRD و DRS سنتز پلیمر را تأیید کرد و نشان‌دهنده ساختار نانو ورقه‌ای نازک و مسطح و دوبعدی نانوصفحات پلیمری است. همچنین، نتایج نشان داد که بیشینه کارایی حذف تتراسایکلین در pH برابر با ۷، زمان تماس برابر با ۹۰ min و غلظت فتوکاتالیست برابر با ۳۰ mg/L حاصل شد. نتایج بررسی قابلیت استفاده مجدد فتوکاتالیست پلیمر آلی-کوالانسی نشان داد که کارایی تخریب فتوکاتالیستی تتراسایکلین از محلول آبی پس از ۵ بار استفاده به‌طور جزئی کاهش یافت. از سوی

References

- Asgari, G., Alahabadi, A., Shomoossi, N., Yazdani-Aval, M., Shabanloo, A., Darvishmotevalli, M. et al., 2024. Mineralization and biodegradability improvement of textile wastewater using persulfate/dithionite process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 21363-21373. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04128-6>.
- Carino, I. S., Pasqua, L., Testa, F., Aiello, R., Puoci, F., Iemma, F. and Picci, N., 2007. Silica-based mesoporous materials as drug delivery system for methotrexate release. *Drug Delivery*, 14, 491-495. <https://doi.org/10.1080/10717540701606244>.
- Camara, A. G., Sousa, R. P., Costa, M. J. S., Dantas, E. J. M., Frety, R., Luz, G. E. et al., 2025. Heterostructured g-C₃N₄-TiO₂ nanocomposites applied to p-toluic acid degradation under solar light-induced photocatalytic process. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 459, 116021. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116021>.
- Chen, R., Zhang, H., Dong, Y. and Shi, H., 2024. Dual metal ions/BNQDs boost PMS activation over copper tungstate photocatalyst for antibiotic removal: intermediate, toxicity assessment and mechanism. *Journal of Materials Science and Technology*, 170, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.07.005>.
- Gao, H., Angadi, J., Wang, S., Zhou, X., Yang, H., Al-Enizi, A. M. et al., 2024. Designing of Z-scheme MgFe₂O₄/Fe₂O₃ coupled CoCr₂O₄ heterojunction with high photocatalytic activity for the removal of tetracycline hydrochloride in wastewater. *Advanced Sustainable Systems*, 8, 2300533. <https://doi.org/10.1002/adsu.202300533>.
- Hu, X., Long, Y., Fan, M., Yuan, M., Zhao, H., Ma, J. et al., 2019. Two-dimensional covalent organic frameworks as self-template derived nitrogen-doped carbon nanosheets for eco-friendly metal-free catalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 244, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.11.028>.
- Jin, J., Xu, M., Dong, F., Hu, H., Yang, Y., Jin, W. et al., 2024. Synthesis of novel Cu₂WS₄/Bi₂WO₆ heterojunctions and evaluation of their photocatalytic activity for removal of tetracycline under visible light irradiation. *Optical Materials*, 147, 114700. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114700>.
- Koundle, P., Nirmalkar, N. and Boczkaj, G., 2025. High performance ozone nanobubbles based advanced oxidation processes (AOPs) for degradation of organic pollutants under high pollutant loading. *Journal of Environmental Management*, 374, 124107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124107>.



- Li, Y., Wang, H., Liu, J., Liu, X., Guan, J., Fu, J. et al., 2024. Synthesis of a novel Bi₁₉Cl₃S₂₇/Bi₂MoO₆ Z-type heterojunction for efficient photocatalytic removal of tetracycline antibiotic and Cr (VI): intermediate toxicity and mechanism insight. *Environmental Research*, 263, 120212. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120212>.
- Liu, B., Li, Y., Wu, Y. and Xing, S., 2021. Enhanced degradation of ofloxacin by persulfate activation with Mn doped CuO: synergetic effect between adsorption and non-radical activation. *Chemical Engineering Journal*, 417, 127972. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127972>.
- Liu, J., Li, Y., Liu, X., Fu, J., Li, J., Liu, Y. et al., 2024. Synthesis of a novel flower-like Bi₄Ti₃O₁₂/AgI Z-type heterojunction for efficient photocatalytic removal of tetracycline antibiotic and RhB. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106262. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106262>.
- Mahdavi, R. and Ashraf Talesh, S. S., 2021. Enhanced selective photocatalytic and sonocatalytic degradation in mixed dye aqueous solution by ZnO/GO nanocomposites: response surface methodology. *Materials Chemistry and Physics*, 267, 124581. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124581>.
- Pan, Y., Lin, B., Li, X., Li, X., Hu, C., Chen, Z. et al., 2025. Porous hierarchical sphere g-C₃N₄ with coordinated Co ions as an efficient and stable self-fenton photocatalyst for the removal of antibiotic. *Separation and Purification Technology*, 354, 129456. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129456>.
- Ravi, R. and Golder, A. K., 2025. Photocatalytic and biological degradation processes to mineralize pharmaceutically active compounds and catalyst recovery: a review. *Coordination Chemistry Reviews*, 523, 216267. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216267>.
- Siddiq, H. A., Alhifithi, A., Ghubayra, R. and Madkour, M., 2025. Layered bismuthene forming the interfacial pathway for rapid charge transfer in CuNb₁₃O₃₃/g-C₃N₅ photocatalyst for enhancing ciprofloxacin degradation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 459, 116073. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116073>.
- Sohrabi, N., Mohammadi, R., Ghassemzadeh, H. R. and Heris, S. S. S., 2021. Equilibrium, kinetic and thermodynamic study of diazinon adsorption from water by clay/GO/Fe₃O₄: modeling and optimization based on response surface methodology and artificial neural network. *Journal of Molecular Liquids*, 328, 115384. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115384>.
- Xiang, X., Zhang, M., Huang, Q., Mao, Y., Jia, J., Zeng, X. et al., 2024. Construction of S-scheme CuInS₂/ZnIn₂S₄ heterostructures for enhanced photocatalytic activity towards Cr(VI) removal and antibiotics degradation. *Chemosphere*, 352, 141351. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141351>.
- Yu, G., Sun, Q., Yang, Y., Chen, S., Long, Y., Li, Y. et al., 2024. BiOCl-based composites for photocatalytic degradation of antibiotics: a review of synthesis method, modification, factors affecting photodegradation and toxicity assessment. *Journal of Alloys and Compounds*, 981, 173733. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173733>.
- Zandipak, R., Bahramifar, N., Torabi, M., Calero, M., Muñoz-Batista, M. J. and Solís, R. R., 2024a. Synergistic effect of graphitic-like carbon nitride and sulfur-based thiazole-linked organic polymer heterostructures for boosting the photocatalytic degradation of pharmaceuticals in water. *Chemical Engineering Journal*, 494, 152843. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152843>.
- Zandipak, R., Bahramifar, N., Younesi, H. and Zolfigol, M. A., 2024b. Electro-photocatalyst effect of N-S-doped carbon dots and covalent organic triazine framework heterostructures for boosting photocatalytic degradation of phenanthrene in water. *Chemosphere*, 364, 142980. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142980>.
- Zandipak, R., Bahramifar, N., Younesi, H. and Zolfigol, M. A., 2025a. Decoration of carbon nanodots on conjugated triazine framework nanosheets as Z-scheme heterojunction for boosting opto-electro photocatalytic degradation of



- organic hydrocarbons from petrochemical wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13, 115380. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115380>.
- Zandipak, R., Bahramifar, N., Younesi, H. and Zolfigol, M. A., 2025b. Photocatalytic degradation of rhodamine B dye from aqueous media using imide conjugated polymer photocatalyst under visible light. *Iranian Journal of Health and Environment*, 17, 741-756. (In Persian) [\[Link\]](#)
- Zandipak, R. and Sobhanardakani, S., 2018. Novel mesoporous Fe₃O₄/SiO₂/CTAB-SiO₂ as an effective adsorbent for the removal of amoxicillin and tetracycline from water. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 871-885. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1507-5>.

