



Photocatalytic Removal of Doxorubicin from Aqueous Solution Using a Covalent Organic Triazine Polymer under Visible Light

Seyed Mohammad Amir Shah Karami¹, Soheil Sobhanardakani^{2*}, Mehrdad Cheraghi³, Bahareh Lorestani³, Atefeh Chamani⁴

1. PhD. Candidate, Dept. of the Environmental Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran
2. Prof., Dept. of the Environment, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran (Corresponding Author) s_sobhan@iau.ac.ir
3. Prof., Dept. of the Environment, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran
4. Assoc. Prof., Dept. of the Environment, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.521130.3490>

Original Paper

Abstract

Doxorubicin is a potent anti-cancer drug, and its presence in wastewater may pose harmful effects on the environment and public health. Even at very low doses, this drug is toxic and can disrupt the natural functioning of aquatic ecosystems, negatively impacting the growth, reproduction, and survival of various aquatic organisms. Therefore, this study was conducted to investigate the effectiveness of removing doxorubicin from aquatic environments using a covalent organic triazine polymer-based photocatalyst under visible light. In this research, a photocatalyst based on a covalent organic triazine polymer was first synthesized via a reflux method, and its efficiency in removing doxorubicin was examined. To characterize the synthesized photocatalyst, analyses including transmission electron microscopy, scanning electron microscopy, x-ray diffraction, energy dispersive x-ray mapping, fourier transform infrared spectroscopy and diffuse reflectance spectroscopy were performed. Additionally, the effects of variables such as pH (3-9), photocatalyst concentration (10-40 mg), and contact time (30-120 minutes) on the removal efficiency of doxorubicin were evaluated. The findings showed that the removal efficiency of doxorubicin was 98% at contact time of 30 min, with photocatalyst concentration of 40 mg, and pH = 7. The scavenger study revealed that oxidants such as $O_2^{\cdot-}$, e^- and H^{\cdot} played a significant role in the degradation process of doxorubicin in aqueous solution by COTP. The results demonstrated that the covalent organic triazine polymer can serve as an effective photocatalyst for removing doxorubicin from pharmaceutical wastewater under visible light.

Keywords:

Doxorubicin, Covalent Organic Triazine Polymer, Photocatalytic Degradation, Aqueous Solution, Visible Light.



Received: Jan. 5, 2025
Revised: Apr. 5, 2025
Accepted: Apr. 21, 2025

To cite this article:

Amir Shah Karami, S. M., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., Chamani, A., 2025. Photocatalytic removal of doxorubicin from aqueous solution using a covalent organic triazine polymer under visible light. *Water and Wastewater*, 36(1), 58-73. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.521130.3490>.

Use your device to scan and read the article online



© 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

Rising industrial activity has led to water pollution by synthetic chemicals, harming aquatic life and humans (Zandipak et al., 2020). Micropollutants like metabolites, radionuclides, and endocrine disruptors from hospital and pharmaceutical wastewaters contaminate rivers, lakes, sediments, and groundwater (Sobhanardakani et al., 2022). Doxorubicin¹, a common chemotherapy drug for cancers such as leukemia and breast cancer, is poorly soluble in neutral water but dissolves in acidic or basic conditions. Its toxicity, genotoxicity, and mutagenicity make it potentially dangerous to living organisms. Pharmaceuticals are very resistant to hydrolysis and biological degradation (Ghafoori et al., 2022).

Covalent organic polymers featuring a triazine framework are emerging as promising non-metallic photocatalysts. These materials, characterized by their crystalline, porous structure and polymeric nature, exhibit notable features such as large surface area, extensive porosity, and a narrow band gap, which enhance their photocatalytic capabilities (Bashar et al., 2025). In this research, a triazine-based covalent organic polymer was synthesized, and its effectiveness in degrading DOX residues in water through photocatalysis was evaluated.

2. Materials and methods

2.1. Synthesis of covalent organic triazine polymer²

The synthesis involved two main steps: first, preparing TAT by reacting cyanuric chloride with p-nitrophenol under reflux, followed by purification. Second, TAT was reacted with iron powder, creating a precipitate after pH adjustment. In the final stage, TAT was combined with PTCDA, zinc acetate, and imidazole, heated at 200 °C for 12 hours, then cooled and filtered. The product was washed, treated with acid, filtered again, and dried to obtain the final material (Zandipak et al., 2025).

2.2. Photocatalytic tests

To assess the photocatalytic ability of the prepared COTP, its capacity to break down DOX in water was tested using a 50 W LED-COB light. A mixture of 100 mL of DOX solution (10 mg/L) and 40 mg of COTP was placed in a Pyrex container. The mixture was stirred in darkness for 30 minutes to reach adsorption equilibrium.

¹ Doxorubicin (DOX)

² Covalent Organic Triazine Polymer (COTP)

Subsequently, it was exposed to air to purge the suspension, which maintained the reaction temperature at 25 °C with flowing cooling water. The light was then turned on, and samples of 3.5 mL were collected at intervals up to 120 min, filtered through 0.22 µm cellulose filters, and analyzed via UV-Vis spectrophotometry (Zandipak et al., 2024a).

3. Results

3.1. Characterization of COTP

To examine the morphology of COTP in detail, TEM and FESEM images were used at various magnifications (Fig. 1). The TEM images reveal that COTP exhibits a nanosheet arrangement. The TEM image of COTP shows a stacked, layered structure resulting from the overlapping of two-dimensional sheets. As shown in Fig. 1d, e and f, the FESEM images confirm a nanosheet-like structure. The FESEM-EDX elemental mapping analysis of COTP demonstrated the high purity of the synthesized material and the presence of the expected elements (C, O and N) (Fig. 1).

3.2. Photoactivity of COTP for DOX degradation

To evaluate the capacity of COTP to break down pollutants, DOX was selected as the model contaminant. Before light exposure, a 30 min dark phase was performed to reach adsorption-desorption equilibrium. The photocatalyst's affinity for DOX was limited, with approximately 30% adsorption observed. As shown in Fig. 2, under illumination, COTP achieved approximately 98% degradation of DOX within 30 min. The degradation kinetic was analyzed using a pseudo-first-order model, revealing a rate constant (k) of 0.0741 min⁻¹.

4. Conclusion

This research involved the synthesis of a covalent organic polymer, which was subsequently employed to facilitate the removal of DOX. Characterization techniques-including SEM, TEM, EDX, EDX mapping, XRD, FTIR, UV-Vis, and DRS verified the formation of the polymer and revealed its structure as thin, planar, two-dimensional nanosheets. The optimal removal of DOX was achieved at neutral pH=7, with a contact duration of 30 min and a photocatalyst loading of 40 mg. Reusability tests indicated that the photocatalytic efficiency experienced a slight decline after five cycles, although the reaction rate constant remained largely unchanged. Overall, the results demonstrate that this covalent organic polymer



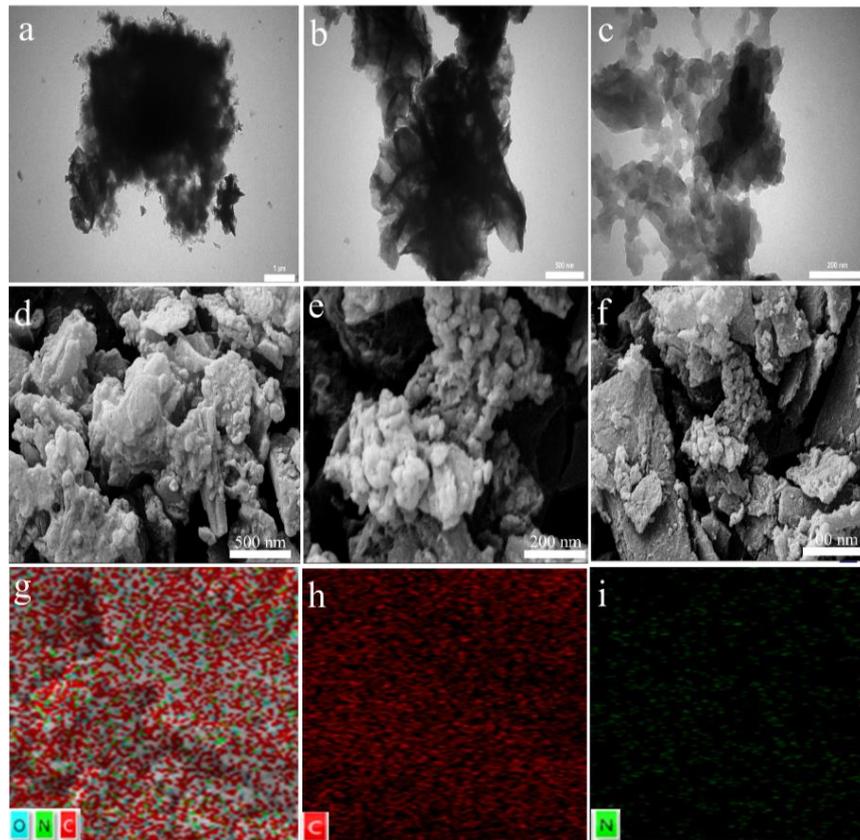


Fig. 1. TEM images of COTP (a, b and c), FESEM images of COTP (d, e and f) and elemental mapping of COTP (g, h and i)

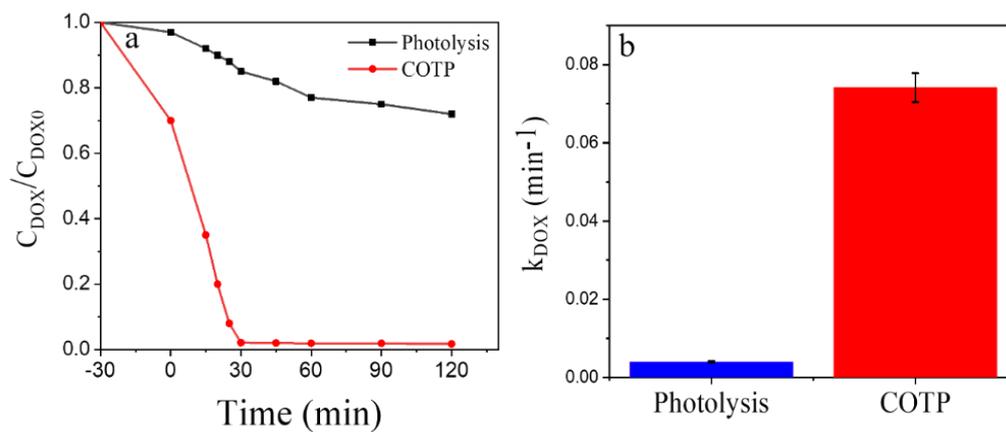


Fig. 2. Time-course survey of the normalized concentration degradation of DOX with COTP (a) and pseudo-first order rate constants (b)

exhibits high removal capability for DOX under visible light irradiation, suggesting its potential

application in wastewater treatment processes involving pharmaceutical contaminants.





حذف فتوکاتالیستی داروی دوکسوروبیسین از محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست پلیمر با ساختار آلی-کووالانسی تریازین تحت نور مرئی

سید محمد امیر شاه کرمی^۱، سهیل سبحان اردکانی^{۲*}، مهرداد چراغی^۳، بهاره لرستانی^۳، عاطفه چمنی^۴

- ۱- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی محیط‌زیست، گروه مهندسی محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
 ۲- استاد، گروه محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران (نویسنده مسئول) s_sobhan@iau.ac.ir
 ۳- استاد، گروه محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
 ۴- دانشیار، گروه محیط‌زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران



<https://doi.org/10.22093/wjw.2025.521130.3490>

مقاله پژوهشی

چکیده

دوکسوروبیسین یک داروی ضد سرطان قوی است و وجود باقیمانده آن در فاضلاب می‌تواند اثرات مخربی بر محیط‌زیست و سلامت عمومی داشته باشد. این دارو، حتی در مقدار بسیار اندک نیز سمی است و می‌تواند با اختلال در عملکرد طبیعی اکوسیستم‌های آبی، بر رشد، تولیدمثل و بقای انواع موجودات آبی تأثیر منفی بگذارد. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی کارایی حذف داروی دوکسوروبیسین از محیط‌های آبی با استفاده از فتوکاتالیست با ساختار آلی-کووالانسی تریازین تحت نور مرئی انجام شد. در این پژوهش، ابتدا فتوکاتالیست با ساختار آلی-کووالانسی تریازین به روش رفلکس سنتز و کارایی آن در حذف دوکسوروبیسین بررسی شد. به منظور شناسایی فتوکاتالیست سنتز شده از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی عبوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، دستگاه پراش پرتو ایکس، آنالیز نقشه‌برداری عنصری، طیف‌سنجی مادون قرمز فوری و طیف‌سنجی بازتابی نفوذی استفاده شد. همچنین، اثر متغیرهای pH معادل ۳ تا ۹، غلظت فتوکاتالیست ۱۰ تا ۴۰ mg و زمان تماس ۳۰ تا ۱۲۰ min نیز بر کارایی حذف دارو ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که با افزایش زمان تماس تا ۳۰ min، غلظت فتوکاتالیست تا ۴۰ mg و در pH برابر با ۷، کارایی حذف دوکسوروبیسین تا ۹۸ درصد افزایش یافت. مطالعه اسکاوتی‌ها نیز نشان داد که اکسنددهای H^+ و e^- نقش قابل‌توجهی در فرایند تخریب داروی دوکسوروبیسین از محلول آبی توسط COTP داشته‌اند. به‌طور کلی، پلیمر آلی-کووالانسی تریازین می‌تواند به‌عنوان یک فتوکاتالیست مؤثر برای حذف دوکسوروبیسین از پساب‌های دارویی تحت نور مرئی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی:
 دوکسوروبیسین، پلیمر آلی-کووالانسی تریازین، تخریب فتوکاتالیستی، محلول آبی، نور مرئی



دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

اصلاح: ۱۴۰۴/۱/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۱

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



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

امیرشاه کرمی، س. م.، سبحان اردکانی، س.، چراغی، م.، لرستانی، ب.، چمنی، ع.، ۱۴۰۴، حذف فتوکاتالیستی داروی دوکسوروبیسین از محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست پلیمر با ساختار آلی-کووالانسی تریازین تحت نور مرئی.

<https://doi.org/10.22093/wjw.2025.521130.3490> آب و فاضلاب. ۳۶(۱)، ۷۳-۵۸.



© 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

آلودگی آب به دلیل تخلیه روزافزون فاضلاب شهری و صنعتی، وجود آلاینده‌های سمی و مدیریت نامناسب مواد زائد جامد، سلامتی بشر را به صورت جدی تحت تأثیر قرار داده است (Xiang, Bashir et al., 2023, et al., 2025). فاضلاب‌های تولیدی، تلاش برای دستیابی به تصفیه بهینه فاضلاب برای تخلیه ایمن به محیط ضروری است (Zandipak et al., 2024a). در میان آلاینده‌های متفاوت، داروها عنصر بسیار مهم و جزء لاینفک زندگی مدرن امروزی به شمار می‌آیند و برای درمان بیماری‌های انسان و حیوان استفاده می‌شوند (Liu et al., 2025).

بیشتر ترکیبات دارویی به‌علت وزن مولکولی کم، خاصیت آبدوستی، مقاومت در برابر تجزیه زیستی، در طی سوخت‌وساز و تبدیل شدن به سایر شکل‌های قابل دفع، به راحتی از طریق ادرار به محیط آبی وارد شده و اثرات سمی، سرطان‌زایی و جهش‌زایی خود را بر محیط‌زیست و موجودات زنده باقی می‌گذارند (Sharma et al., 2025, Hou et al., 2025). تولید دارو را از مهم‌ترین منابع ورود آلاینده‌های دارویی به محیط‌زیست می‌دانند (Ali et al., 2021). در این میان، داروهای ضد سرطان علی‌رغم اینکه در مقایسه با سایر ترکیبات دارویی مصرف سالیانه کمتری دارند؛ اما، به‌علت اثرات بالقوه آن‌ها بر محیط‌زیست، قابلیت سرطان‌زایی و جهش‌زایی، تجزیه پذیری بسیار کم و پایداری زیاد آن‌ها در محیط‌زیست اهمیت به‌سزایی دارند (Zandipak et al., 2020).

دوکسوروبیسین از داروهای درمان سرطان است که از طریق فاضلاب‌های دارویی و انسانی وارد منابع آبی می‌شود و قرار گرفتن در معرض باقیمانده این دارو و ترکیبات متابولیزه آن، ریسک ابتلا به سرطان، ایجاد جهش در سلول‌های جنسی و یاخته‌های جنینی را افزایش می‌دهد (Al-Hazmi et al., 2023). بیشتر داروها به دلیل ایجاد پیوندهای قوی، غیرقابل تجزیه زیستی بوده، فرایندهای تصفیه متداول مانند فیلترهای غشایی، تبادل یونی، انعقاد و لخته‌سازی و همچنین جذب، روش مؤثری برای حذف آن‌ها محسوب نمی‌شوند (Zahid et al., 2025).

همچنین، روش‌های مرسوم تصفیه به‌طور معمول مقدار قابل توجهی لجن برجای می‌گذارند که مشکلات محیط‌زیستی دیگری را به دنبال خواهد داشت. با توجه به محدودیت‌هایی که هر

کدام از روش‌های مذکور دارند، به‌کارگیری روش‌های دوستدار محیط‌زیست و روش‌هایی که مصرف انرژی کمی دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Ghosh et al., 2025). یکی از این روش‌ها، تجزیه فتوکاتالیستی آلاینده‌ها است که به‌عنوان فناوری ارزان و دوستدار محیط‌زیست به‌طور قابل‌توجهی در حال گسترش است. این سیستم‌ها مبتنی بر تولید رادیکال‌های آزاد به‌ویژه رادیکال‌های هیدروکسیل هستند که به دلیل قدرت اکسیدکنندگی قابل توجه خود، تمایل زیادی برای تجزیه ترکیبات دارند و تحت عنوان روش‌های اکسیداسیون پیشرفته^۱ شناخته می‌شوند که روش‌های فتوکاتالیستی از جمله آن‌ها محسوب می‌شوند (Monjezi et al., 2024). مزایای این روش‌های اکسیداسیون پیشرفته می‌تواند به کارایی بالا، سهولت، قابلیت بازیابی و راهبری آسان آن‌ها اشاره کرد (Dai et al., 2025). در فرایند فتوکاتالیست، آلاینده‌ها به کمک کاتالیزورهای مناسب به‌طور کامل تجزیه و به مولکول‌های آب، دی‌اکسید کربن و اسیدهای معدنی تجزیه می‌شوند (Liu et al., 2024).

تاکنون، تعدادی از فتوکاتالیست‌های نیمه‌هادی که با استفاده از نور مرئی و UV سبب تخریب تعداد زیادی از آلاینده‌ها در سیستم‌های آبی می‌شوند، معرفی شده‌اند که در این میان می‌توان به دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂)، اکسید روی (ZnO)، دی‌اکسید سرب (CeO₂) و اکسید مس (CuO) اشاره کرد (Sun et al., 2023). در کنار کاتالیست‌های فلزی، کاتالیست‌های فاقد فلز از مواد ارزان‌قیمت و فراوان موجود در زمین از جمله کربن، ازت، اکسیژن، فسفر و گوگرد ساخته می‌شوند که دارای وزن کم و مقاوم در برابر خوردگی هستند. از کاتالیست‌های بدون فلز می‌توان به پلیمرهای آلی مزدوج همچون کربن نیتريد گرافیت (g-C₃N₄)، پلیمرهای خطی و نقاط پلیمری (Pdots) اشاره کرد (Li et al., 2023).

پلیمرهای آلی مزدوج موادی غیر مضر، نیمه‌رسانا، از نظر شیمیایی بی‌اثر و از نظر مکانیکی دوام زیادی دارند که ماهیت آب‌گریزی آن‌ها سبب تجمع آلاینده‌های آلی در سطح این ترکیبات و به‌تبع آن افزایش نرخ اکسیداسیون می‌شود (Zandipak et al., 2025). بسیاری از پلیمرهای مزدوج در برابر اشعه ماورای بنفش مقاوم بوده، و به راحتی اکسید نمی‌شوند. خصوصیتی که باعث

¹ Advanced Oxidation Processes (AOPs)



خلوص آزمایشگاهی (۹۹/۹۹ درصد) از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. همچنین، داروی دوکسوروبیسین برای ساخت محلول استوک نیز از شرکت مرک خریداری شد. به این منظور، استوک دوکسوروبیسین به وسیله انحلال ۱ g از ماده جامد دوکسوروبیسین در ۱ L آب دو بار تقطیر تهیه شد. سایر محلول‌ها با غلظت متفاوت با رقیق‌سازی استوک اولیه دوکسوروبیسین تهیه و بلافاصله در آزمایش‌های حذف فتوکاتالیستی دارو استفاده شدند. از طرفی، لامپ مرئی ۵۰ W از شرکت نماور، دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل OPTIZEN ALPHA و دستگاه pH متر Jenway مدل ۳۵۱۰ نیز در اجرای این پژوهش استفاده شدند.

۲-۲- سنتز پلیمر آلی-کووالانسی تریازین^۱

پلیمر آلی-کووالانسی تریازین در دو مرحله تهیه شد. در ابتدا محلولی از ۱/۵ g سیانوریک کلرید (۸/۲ mmol) حل شده در استون (۱۰۰ mL) به تدریج به محلول ۳ g نیتروفنول (۲۵/۲ mmol) و ۳ g هیدروکسید سدیم (۳/۷ mmol) در حلال آب (۱۰۰ mL) و استون (۱۰۰ mL) حل شد. مخلوط تحت رفلکس در دمای ۶۰ °C به مدت ۲ h هم زده شد. محصول اولیه فیلتر و متعاقباً چندین بار با آب دو بار تقطیر و متانول شسته و در خلأ خشک شد. محصول جامد کریستالی سفید به نام ۴-آمینوفنوکسی ۱، ۳، ۵، تریازین تولید شد. سپس، ۱/۷۸ g از ۴-آمینوفنوکسی ۱، ۳، ۵، تریازین (۳/۷ mmol)، ۳ g کلرید آمونیوم (۵۵ mmol)، اتانول (۶۰ mL) و آب دیونیزه (۲۰ mL) تحت رفلکس در دمای ۸۰ °C به مدت ۲ h هم زده شد. پس از آن پودر آهن کاهش یافته (۵۵ mmol) اضافه و سپس مخلوط آماده شده فیلتر شد و یک فیلتر حاصل دو بار با ۱۰۰ mL آب داغ شسته شد. بی‌کربنات سدیم برای تنظیم pH در حدود ۹ استفاده شد. پس از فیلتر و شستشو محصول زرد کم‌رنگ به دست آمده در آن در دمای ۶۰ °C به مدت ۶ h خشک شد (Zandipak et al., 2024b).

در مرحله بعد، ۰/۸۰۴ g از محصول به دست آمده در مرحله قبل (۲ mmol)، ۱/۱۷۶ g از ۱۰، ۹، ۴، ۳-پریلن تتراکربوکسیلیک دی‌انیدرید (۳ mmol) و ۰/۵۵ g استات روی (۳ mmol) به ۵

می‌شود پلیمرهای مزدوج ویژگی رسانایی داشته باشند، پیوندهای یگانه و دوگانه متناوب است که جایگاه این پیوندها به صورت دائم با یکدیگر عوض می‌شوند. بنابراین، حد واسطی میان پیوندهای مذکور به وجود می‌آید که به پلیمرهایی با این چنین ساختاری، پلیمرهای مزدوج می‌گویند (Li et al., 2025). ساختار بیان شده باعث می‌شود که یک ابر اوربیتالی π در همه طول زنجیره پلیمری به وجود آید که به آن سامانه π مزدوج می‌گویند. بر این اساس، وجود پیوندهای دوگانه یک‌درمیان برای یک پلیمر رسانا ضروری و قابل اهمیت است.

زندگی پاک و همکاران در سال ۲۰۲۴، کربن نیتريد ترکیب شده با پلیمر آلی کووالانسی را به عنوان فتوکاتالیست برای تخریب آلاینده‌های آلی از محلول آبی مورد استفاده قرار داده و کارایی حذف ۹۸ درصد را گزارش کردند (Zandipak et al., 2024a). در پژوهشی دیگر، بی و همکاران (۲۰۲۴) چارچوب آلی-کووالانسی ترکیب شده با BiOBr را به عنوان فتوکاتالیست به منظور تخریب آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین از منابع آبی استفاده کرده و گزارش کردند که کارایی حذف دارو قابل قبول بوده است (Bi et al., 2024).

در این پژوهش، پس از سنتز پلیمر آلی-کووالانسی تریازین، از آن برای حذف فتوکاتالیستی داروی دوکسوروبیسین در محلول آبی استفاده شد. همچنین، تأثیر پارامترهای مختلف مانند pH اولیه، میزان فتوکاتالیست و زمان تماس بر روی فرایند فتوکاتالیستی ارزیابی شد. علاوه بر این، مطالعات سینتیکی با استفاده از مدل مرتبه اول بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات استفاده شده

در این پژوهش که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد، مواد استفاده شده شامل سیانوریک کلرید ($C_3Cl_3N_3$)، نیتروفنل ($C_6H_5NO_3$)، اسید کلریدریک (HCl)، هیدروکسید سدیم (NaOH)، متانول (CH_3OH)، استون (C_3H_6O)، کلرید آمونیوم (NH_4Cl)، اتانول (C_2H_6O)، بی‌کربنات سدیم ($NaHCO_3$)، ۳، ۴، ۹، ۱۰-پریلن تتراکربوکسیلیک دی‌انیدرید ($C_{24}H_8O_6$)، زینک استات ($ZnC_4H_6O_4$) و ایمیدازول ($C_3H_4N_2$) بوده که همگی با بالاترین

¹ Covalent Organic Triazine Polymer (COTP)



که در آن

C_0 نشان‌دهنده غلظت داروی دوکسوروبیسین در زمان صفر و C_t نیز بیانگر غلظت نهایی داروی دوکسوروبیسین برحسب mg/L است.

به‌علاوه، به‌منظور ارزیابی کارایی حذف داروی دوکسوروبیسین، اثر پارامترهای تأثیرگذار در فرایند فتوکاتالیستی از جمله pH محلول، غلظت فتوکاتالیست و زمان واکنش نیز بررسی شدند. همچنین، به‌منظور تعیین انواع اکسندده‌های فعال در فرایند حذف داروی دوکسوروبیسین از محلول آبی آزمایش‌هایی با استفاده از اسکاوانجرهای مختلف همچون بنزوکینون، تورت بوتانول، اتیلن دی آمین ترا استیک اسید و نیترات نقره انجام شد. به‌منظور بررسی سینتیک حذف، نتایج حاصل از تماس محلول دوکسوروبیسین 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 (R^2) هر منحنی به‌عنوان معیار انتخاب، مدنظر قرار گرفت

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

که در آن

C_0 و C_t به ترتیب نشان‌دهنده غلظت داروی دوکسوروبیسین در زمان صفر و غلظت نهایی دارو هر دو برحسب mg/L هستند. k ضریب ثابت و t نیز زمان واکنش برحسب min را نمایندگی می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مشخصه‌یابی فتوکاتالیست سنتز شده

تصاویر TEM از پلیمر آلی-کووالانسی تریازین با بزرگنمایی‌های مختلف (شکل ۱) نشان داد که ساختار پلیمر به‌صورت صفحه‌ای در ابعاد نانو و دوبعدی است. همچنین، تصاویر SEM (شکل ۱) ساختار نانو صفحه‌ای پلیمر را تأیید کرد. نتایج آنالیز عنصری Mapping و آنالیز EDX که به‌منظور تعیین ترکیبات موجود در ساختار فتوکاتالیست سنتز شده انجام شد، نشان داد که فقط کربن (۸۴/۹)، اکسیژن (۶ درصد) و نیتروژن (۹/۱) در نمونه فتوکاتالیست قابل مشاهده هستند (شکل‌های ۱ و ۲-a). نتیجه آنالیز

ایمیدازول در شرایط هم‌زدن و تحت گاز نیتروژن در دمای $18^\circ C$ به مدت ۱۲ h افزوده شد. پس از طی این مدت، رسوب حاصل در دمای اتاق سرد و ۲۵۰ mL اسید کلریدریک ۱ mol به آن اضافه و به مدت ۸ h با شیکر هم‌زده شد. در مرحله بعد، رسوب حاصل با آب و اتانول ۷ بار شسته شد و در پایان، پلیمر حاصل در فریزدرایر به مدت ۲۴ h خشک شد (Zandipak et al., 2024b).

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^۱، میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲، طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه^۳، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۴ و آنالیز نقشه‌برداری عنصری^۵ استفاده شد. همچنین، برای تعیین شکاف انرژی، از طیف‌سنجی بازتابی نفوذی^۶ استفاده شد.

۲-۴- فرایند حذف فتوکاتالیستی

به‌منظور بررسی کارایی فتوکاتالیست سنتز شده در حذف داروی دوکسوروبیسین از محلول آبی، راکتوری حاوی ۱۰۰ mL از محلول دوکسوروبیسین با غلظت اولیه ۱۰ mg/L ، مقدار ۰/۰۴ g/L از فتوکاتالیست، لامپ مرئی ۵۰ W و پمپ هوادهی که بر روی یک همزن مغناطیسی در دمای محیط قرار گرفته است، طراحی شد. به این صورت که در زمان‌های مشخص نمونه‌برداری انجام و غلظت داروی دوکسوروبیسین در محلول آبی توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۰ nm خوانده شد. لازم به ذکر است که همه نمونه‌ها ابتدا به مدت ۳۰ min در تاریکی قرار گرفته و میزان جذب آن‌ها ثبت شد. در نهایت، نرخ حذف داروی تراسایکلین از محلول آبی با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد

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

¹ Scanning Electron Microscopy (SEM)

² Transmission Electron Microscopy (TEM)

³ Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

⁴ X-Ray Diffraction (XRD)

⁵ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy Mapping (EDX-Mapping)

⁶ Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)



پیک‌ها در ناحیه اثرانگشت نیز ساختار پلیمریزاسیون را نمایندگی می‌کنند.

نتایج آنالیز DRS به‌منظور تعیین سنجش شکافت انرژی ساختار فتوکاتالیست سنتز شده در شکل ۳ آمده است. طیف جذب UV-Vis فتوکاتالیست در دامنه طول‌موج جذب نوری ۲۰۰ تا ۴۱۰ nm نشان داد که لبه جذب COTP در طول‌موج ۴۱۰ nm حاصل شده است. از طرفی، انرژی باند گپ نیز بر اساس معادله $h\nu = 1239.8/\lambda$ با لبه جذب $\lambda = 410$ nm برابر با 2.97 eV به‌دست آمد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، استفاده از ۱۰،۹،۴،۳-پرین تراکربوکسیلیک دی‌انیدرید به‌عنوان بلوک ساختمانی، قابلیت جذب نور در COTP را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید و امکان جذب گسترده در کل طیف نور مرئی را فراهم کرد (Zandipak et al., 2025).

XRD (شکل ۲-b) نیز نشان‌دهنده پیک‌های ۱۰،۸ و ۱۵/۹ است که پلیمر دارای ساختار دوبعدی را نمایندگی می‌کند. لازم به یادآوری است که پیک در ناحیه ۲۶/۱ نشان‌دهنده ساختار کریستالی پلیمر است.

نتایج طیف FTIR از پلیمر آلی-کووالانسی تریازین (شکل ۲-c) برای PTCDA، باندهای کششی متقارن و نامتقارن گروه‌های C=O متعلق به گروه‌های عاملی انیدرید را به‌ترتیب در طول‌موج‌های ۱۷۷۰ و 1736cm^{-1} شناسایی کرد. در مقابل، طیف FTIR برای TAT، گروه‌های کششی NH_2 را در 3367cm^{-1} نشان داد. علاوه بر این، ارتعاشات کششی C=N به‌ترتیب در ۱۵۸۶ و 832cm^{-1} ظاهر شدند. پس از تکمیل فرایند پلیمریزاسیون، پیک جذب برجسته در 1662cm^{-1} ، تشکیل گروه‌های ایمید را نشان می‌دهد. همچنین، گسترش قابل‌توجهی از

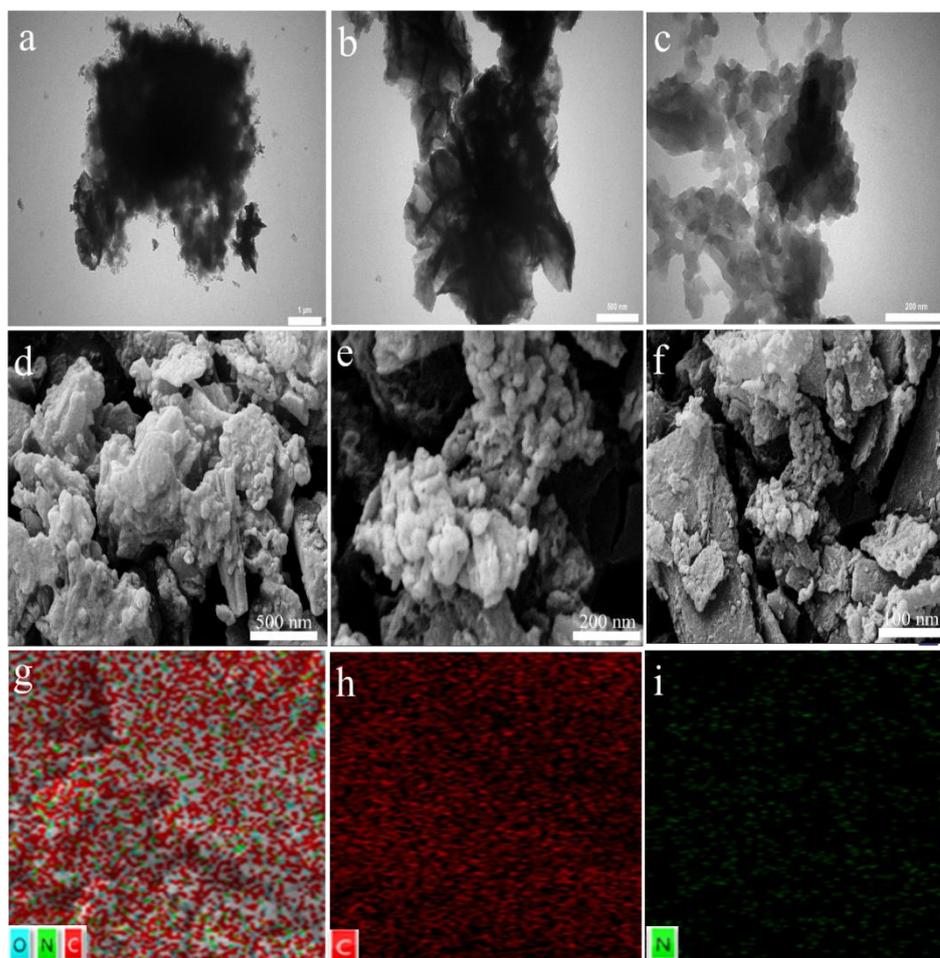


Fig. 1. TEM images of COTP (a, b and c), FESEM images of COTP (d, e and f) and elemental mapping of COTP (g, h and i)

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



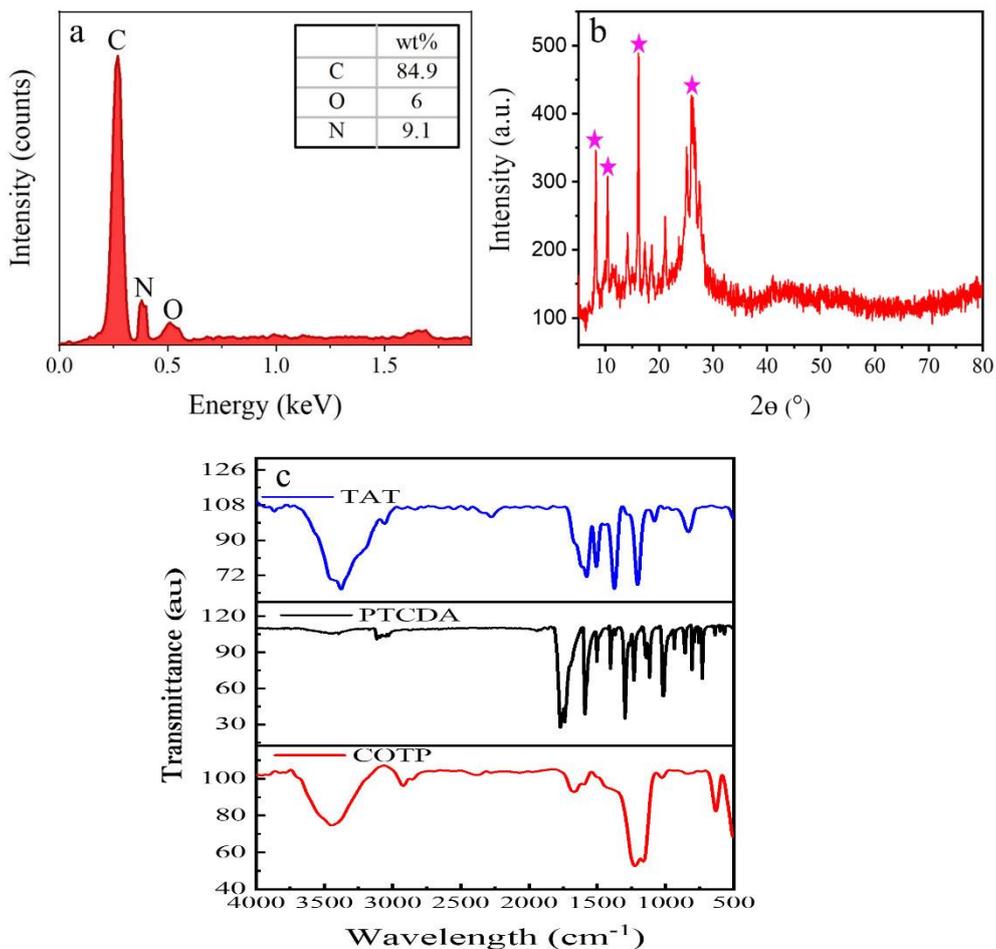


Fig. 2. (a) EDX spectrums of COTP, (b) XRD patterns of the COTP and (c) FTIR spectra of the COTP

شکل ۲- (a) تصاویر EDX از COTP، (b) XRD از COTP و (c) FTIR از COTP

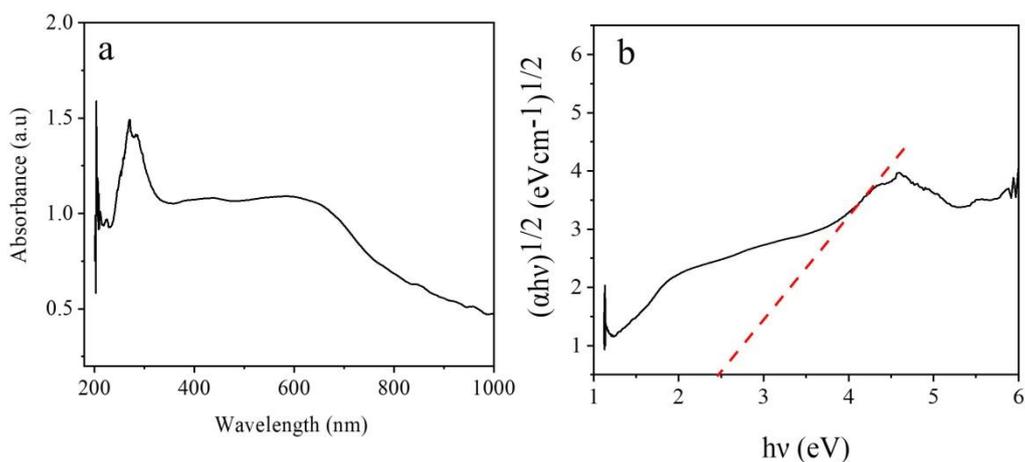


Fig. 3. UV-Visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis DRS) absorption spectra of COTP (a) and the determined bandgap energy (b)

شکل ۳- (a) تصاویر UV-Vis از COTP و (b) تعیین سنجش شکافت انرژی (b)



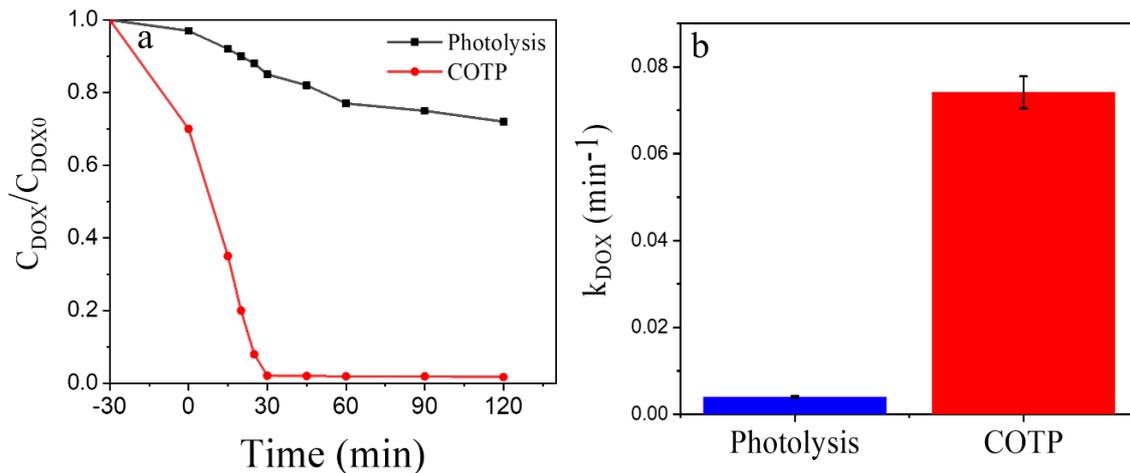


Fig. 4. Time-curve survey of the normalized concentration degradation of DOX with COTP (a) and pseudo-first order rate constants (b)

شکل ۴- بررسی منحنی زمان تخریب غلظت نرمال شده دوکسوروبیسین با COTP (a) و ثابت‌های سرعت مرتبه اول (b)

مطالعه سینتیکی در غلظت 10 mg/L از داروی دوکسوروبیسین با فتوکاتالیست، توسط معادله مرتبه اول بررسی شد و نتایج آن در قالب $\ln C_t$ بر حسب زمان ترسیم شد و ضریب رگرسیون 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 0.0741 min^{-1} حاصل شد که نشان می‌دهد غلظت بالایی از گونه‌های اکسنده در محیط واکنش فعال شده‌اند (Liu et al., 2025).

۲-۲-۳- نتایج بررسی اثر pH بر کارایی حذف داروی دوکسوروبیسین توسط فتوکاتالیست COTP

نتایج بهینه‌سازی pH محلول دوکسوروبیسین نشان داد که با افزایش pH از ۳ به ۷، کارایی حذف دوکسوروبیسین از ۵۵ به ۹۸ درصد افزایش و بیشینه نرخ حذف در pH برابر با ۷ رخ داده است و از این رو، $\text{pH} = 7$ 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 0.0741 min^{-1} در pH برابر با ۷ حاصل شده است (شکل ۵-ب). علاوه بر این، نتایج نشان داد که pH_{pzc} پلیمر سنتز شده برابر با ۵ بوده است. در نتیجه، در $\text{pH} > 5$ سطح فتوکاتالیست دارای بار منفی و در $\text{pH} < 5$ سطح فتوکاتالیست واجد بار مثبت بوده است. به این صورت که در $\text{pH} < 5$ ، گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل

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

۱-۲-۳- نتایج بررسی اثر زمان تماس و سینتیک واکنش بر کارایی حذف داروی دوکسوروبیسین توسط فتوکاتالیست COTP

زمان تماس از متغیرهای بسیار مهم در فرایند حذف فتوکاتالیستی است. نتایج حاصل از فتولیز، جذب در زمان تماس ۳۰ min و اثر زمان تماس بر کارایی حذف داروی دوکسوروبیسین تحت نور مرئی در شکل ۴ آورده شده است.

بر این اساس، نرخ حذف دارو توسط فتوکاتالیست COTP تا زمان ۳۰ min افزایش یافته و در زمان‌های بعدی بدون تغییر باقی مانده که بیانگر حذف دارو در زمان ۳۰ min است. همچنین، نتایج نشان داد که بیشترین ثابت سرعت واکنش در زمان تماس ۳۰ min حاصل شده است.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حذف دارو در دو مرحله جذب روی سطح فتوکاتالیست (مرحله اول) و حذف دوکسوروبیسین توسط رادیکال‌های آزاد تولید شده از جمله الکترون‌های رادیکالی، حفره‌های الکترونی تولید شده و هیدروکسیل‌های رادیکالی ناشی از برانگیختگی الکترونی COTP در مدت زمان فرایند (مرحله دوم) بوده است. این نتایج با دستاورد پژوهش چراغی و همکاران که نشان دادند با افزایش زمان تماس، کارایی حذف دوکسوروبیسین افزایش یافته است، مطابقت دارد (Cheraghi et al., 2022).



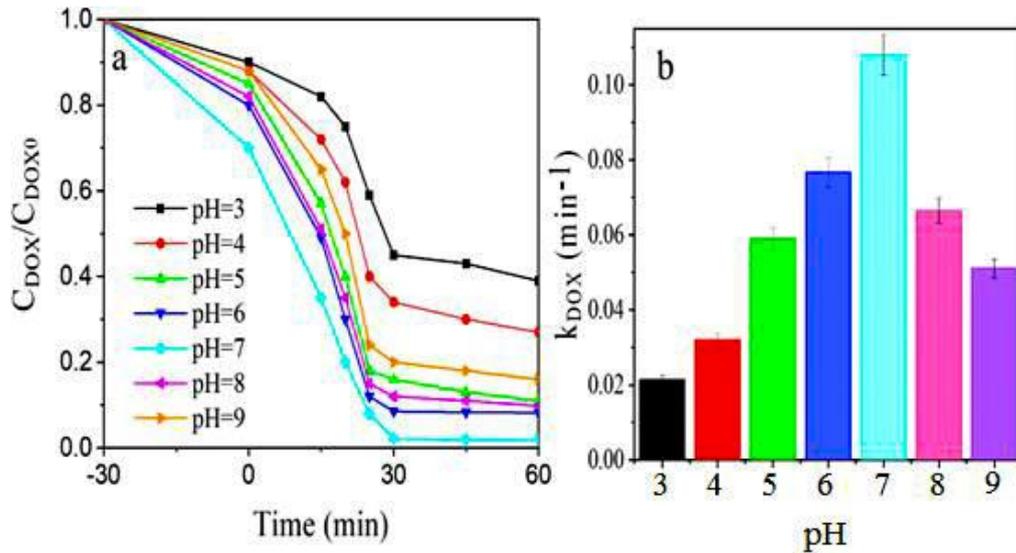


Fig. 5. pH impact on the temporal normalized concentration of DOX with COTP (a), and pseudo-first order rate constants (b)

شکل ۵- تأثیر pH بر تخریب غلظت نرمال شده دوکسوروبیسین با COTP (a) و ثابت‌های سرعت مرتبه اول (b)

یافته است. شکل ۶-b اثر قابل توجه غلظت فتوکاتالیست بر روی مثبت می‌شود که این موضوع به کاهش میزان جذب دوکسوروبیسین بر روی فتوکاتالیست و در نهایت حذف کمتر آن منجر می‌شود. این در حالی است که در $\text{pH} > 5$ سطح فتوکاتالیست واجد بار منفی بوده که با ظهور نیروی جاذبه، به افزایش فرایند فتوکاتالیستی منجر می‌شود. کارایی بالای حذف دوکسوروبیسین در شرایط خنثی را می‌توان با وجود یون‌های OH^- بر روی سطح فتوکاتالیست مرتبط دانست که به تشکیل رادیکال‌های OH^\bullet به عنوان یک گونه اکسیدکننده قوی در فرایندهای فتوکاتالیستی توسط فتوحفرها منجر می‌شود. این نتایج با دستاورد پژوهش‌های همکاران که گزارش کردند حذف دوکسوروبیسین از محیط آبی با افزایش غلظت فتوکاتالیست $\text{Mo}_2\text{C-ZnFe}_2\text{O}_4@\text{PPNB}$ افزایش یافته است، مطابقت دارد (Althobaiti et al., 2025).

موجود بر سطح پلیمر پروتونه شده و سطح فتوکاتالیست دارای بار مثبت می‌شود که این موضوع به کاهش میزان جذب دوکسوروبیسین بر روی فتوکاتالیست و در نهایت حذف کمتر آن منجر می‌شود. این در حالی است که در $\text{pH} > 5$ سطح فتوکاتالیست واجد بار منفی بوده که با ظهور نیروی جاذبه، به افزایش فرایند فتوکاتالیستی منجر می‌شود. کارایی بالای حذف دوکسوروبیسین در شرایط خنثی را می‌توان با وجود یون‌های OH^- بر روی سطح فتوکاتالیست مرتبط دانست که به تشکیل رادیکال‌های OH^\bullet به عنوان یک گونه اکسیدکننده قوی در فرایندهای فتوکاتالیستی توسط فتوحفرها منجر می‌شود. این نتایج با دستاورد پژوهش‌های همکاران که گزارش کردند حذف دوکسوروبیسین از محیط آبی با استفاده از فتوکاتالیست نانو میله‌های آلومینا با افزایش pH تا ۷ افزایش می‌یابد، مطابقت دارد (Al-Hazmi et al., 2023).

۳-۲-۳- نتایج بررسی اثر اسکاونجرها بر کارایی حذف داروی

دوکسوروبیسین توسط فتوکاتالیست COTP

نقش اسکاونجرها در فرایند حذف داروی دوکسوروبیسین از محلول آبی توسط فتوکاتالیست COTP در شکل ۷ نشان داده شده است. به علت اهمیت ترکیبات آلی بر خاصیت اسکاونجری مواد، در

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

داروی دوکسوروبیسین توسط COTP

نتایج بررسی اثر غلظت فتوکاتالیست بر کارایی حذف داروی دوکسوروبیسین در شکل ۶ آمده است. بر این اساس، با افزایش مقدار فتوکاتالیست COTP تا 0.04 g/L ، نرخ حذف دارو افزایش



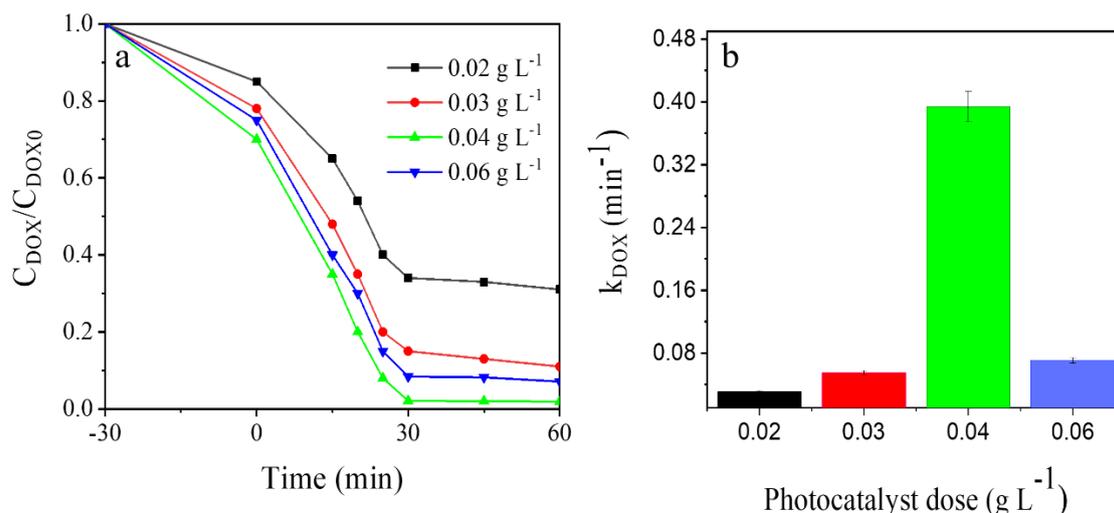


Fig. 6. Photocatalyst dose impact on the temporal normalized concentration of DOX with COTP (a) and pseudo-first order rate constants (b)

شکل ۶- تأثیر دوز فتوکاتالیست بر تخریب غلظت نرمال شده دوکسورویسین با COTP (a) و ثابت‌های سرعت مرتبه اول (b)

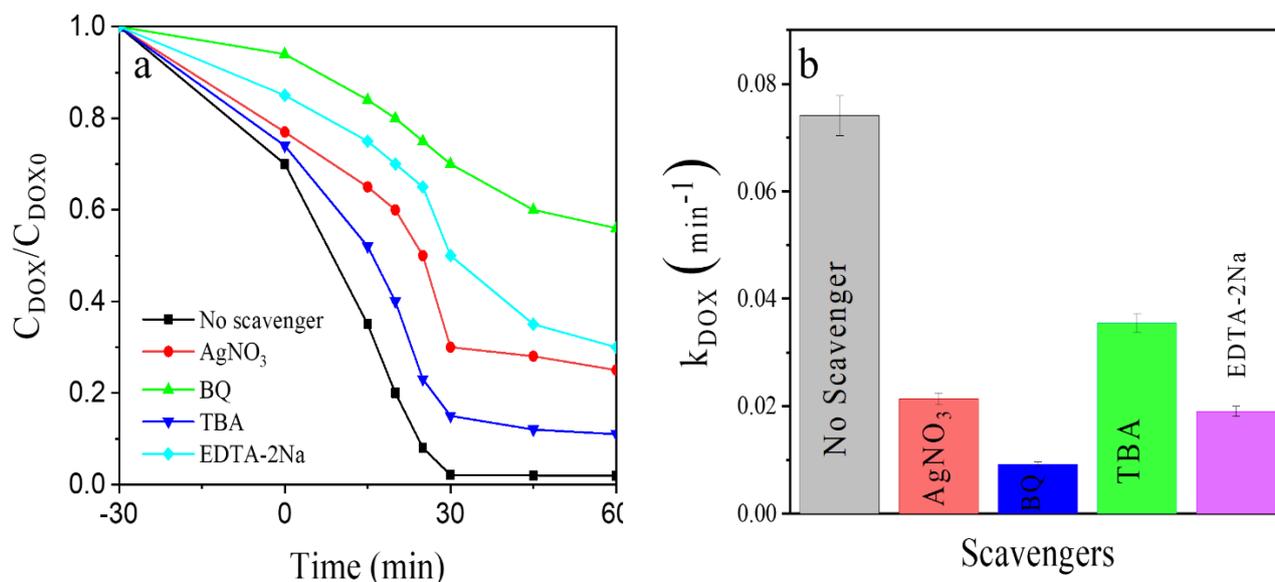


Fig. 7. Scavenger impact on the temporal normalized concentration of DOX with COTP (a) and pseudo-first order rate constants (b)

شکل ۷- تأثیر آنیون‌های غیر آلی بر تخریب غلظت نرمال شده دوکسورویسین با COTP (a) و ثابت‌های سرعت مرتبه اول (b)

حضور بنزوکینون کاهش یافت که اثبات‌کننده نقش قابل توجه O_2^- در فرایند تخریب دوکسورویسین است. همچنین، با افزودن اتیلن دی آمین تترا استیک اسید دی سدیم به واکنش، عملکرد حذف دوکسورویسین در حدود ۷۰ درصد کاهش یافت و سرعت واکنش (K_{obs}) نیز از 0.0741 به 0.019 h^{-1} افت کرد که نشان می‌دهد تخریب دوکسورویسین بدون کاهش قابل توجهی ادامه داشته و

این پژوهش، نقش چهار نوع ترکیب شامل بنزوکینون، تری بوتانول، اتیلن دی آمین تترا استیک اسید دی سدیم و نیترات نقره بر کارایی حذف دوکسورویسین از محلول آبی بررسی شد. بر این اساس، استفاده از بنزوکینون سبب کاهش کارایی حذف دوکسورویسین از ۹۸ به ۴۴ درصد توسط فتوکاتالیست COTP شد. همچنین، سرعت واکنش نیز در حدود ۸ برابر در مقایسه با عدم



جدول ۱- مقایسه سیستم‌های فتوکاتالیستی مختلف برای تخریب دوکسوروبیسین

Table 1. Comparison of the various photocatalysts systems for DOX degradation

Photocatalyst	Light source	Removal efficiency (%)	Reaction conditions	Ref.
D/3D Nb ₂ O ₅ QDs/C-doped g-C ₃ N ₄	500 W Metal halide	98.2%	(C ₀ = 10 mg/L, C _{CAT} = 0.02 g/L, pH = 8.0)	(Zhao et al., 2023)
BiFe (C ₂ O ₄) ₃ ·3H ₂ O	UV light	79%	(C ₀ = 2 mg/L, C _{CAT} = 0.04 g/L, pH = 8.0)	(Dumitru et al., 2019)
Fe-Ni NP's	UV light	83%	(C ₀ = 100 mg/L, C _{CAT} = 0.5 g/L, pH = 7.0)	(Kadu et al., 2017)
GO/CeO ₂	Visible light	99%	(C ₀ = 0.5 mM, C _{CAT} = 0.01 g/L, pH = 7.0)	(Abbasi et al., 2022)
C ₃ N ₄ /SnO ₂ /CoFe ₂ O ₄	Hg lamp	84%	(C ₀ = 20 μM, C _{CAT} = 0.25 g/L, pH = 7.0)	(Garg et al., 2023)
GO@Fe ₃ O ₄ @CeO ₂	300 W Xe lamp	98%	(C ₀ = 50 mg/L, C _{CAT} = 0.04 g/L, pH = 7.0)	(Rashtchi et al., 2023)
COTP	30 W Visible lamp	98%	(C ₀ = 10 mg/L, C _{CAT} = 0.04 g/L, pH = 7.0)	This study

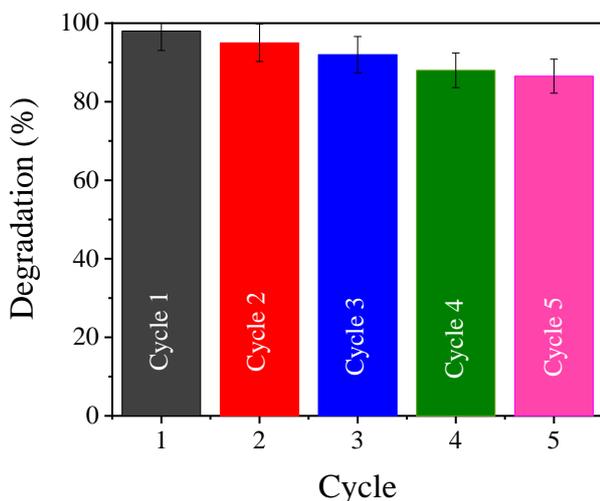


Fig. 8. Influence of recyclability on recovery (%) of COTP for DOX

شکل ۸- قابلیت استفاده مجدد بر بازیابی COTP برای حذف دوکسوروبیسین

COTP افزایش یافته است، مطابقت دارد (Monjezi et al., 2024).

۳-۳- نتایج مقایسه کارایی تخریب فتوکاتالیستی دوکسوروبیسین با پژوهش‌های دیگر

عملکرد فتوکاتالیستی COTP در مقایسه با سایر فتوکاتالیست‌ها با هدف ارزیابی اصالت این پژوهش در تخریب نوری داروی دوکسوروبیسین در جدول ۱ آورده شده است. اگرچه می‌توان به

نقش قابل توجه حفره‌های رادیکالی در فرایند حذف دوکسوروبیسین را توجیه می‌کند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که استفاده از نیترات نقره نیز سبب کاهش ۷۵ درصد کارایی حذف دوکسوروبیسین از محلول آبی توسط فتوکاتالیست COTP شده که این خود با نقش قابل توجه الکترون‌های برانگیخته در واکنش حذف دوکسوروبیسین مرتبط است. نتایج مطالعه اسکانوجرها نشان داد که اکسندهای H^+ و e^- ، $O_2^{\cdot-}$ تأثیر قابل توجهی بر فرایند تخریب دوکسوروبیسین از محلول آبی با استفاده از COTP داشته‌اند.

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

قابلیت استفاده مجدد فتوکاتالیست‌ها یک پارامتر حیاتی در کاربرد آن‌ها در تخریب آلاینده‌ها در محیط‌های آبی است. نتایج آزمایش‌های بازیابی COTP برای بررسی قابلیت استفاده مجدد از آن در فرایند حذف داروی دوکسوروبیسین (شکل ۸) نشان داد که کارایی تخریب فتوکاتالیستی دارو پس از ۵ بار استفاده به‌طور جزئی (از ۹۸ به ۸۶/۵ درصد) کاهش یافته است. از سوی دیگر کاهش قابل توجهی در ثابت سرعت واکنش مشاهده نشد که بیانگر تأیید نتایج بازیابی فتوکاتالیست بود. این نتایج با دستاورد پژوهش منجزی و همکاران که گزارش کردند حذف دوکسوروبیسین از محیط آبی با افزایش غلظت فتوکاتالیست



محللول آبی به‌طور جزئی کاهش یافت. از سوی دیگر، کاهش قابل توجهی در ثابت سرعت واکنش مشاهده نشد. در مجموع، نتایج نشان داد که پلیمر آلی- کووالانسی تریازین، قابلیت حذف قابل توجه داروی دوکسوروبیسین تحت نور مرئی را دارد و کاربرد آن در تصفیه پساب حاوی این داروها پس از انجام پژوهش بر روی محللول‌های واقعی و بررسی اثر تداخل‌های مرتبط با سایر آلاینده‌های احتمالی موجود در پساب‌ها و محللول‌های واقعی در شرایط مختلف محیطی پیشنهاد می‌شود.

۵- قدردانی

این پژوهش مستخرج از رساله دکترای تخصصی مهندسی محیط‌زیست مصوب واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی با کد ۱۷۱۴۴۸۳۰۰۶۹۰۷۶۴۲۱۳۰۳۷۱۶۲۹۸۴۳۳۰ است که نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه برای همکاری در اجرای پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

نرخ تخریب به نسبت بالای (بیش از ۹۸ درصد) دوکسوروبیسین اشاره کرد که کارایی قابل توجهی است؛ اما نکته قابل توجه این است که در این پژوهش، فرایند تخریب فتوکاتالیستی در مدت‌زمان کوتاه ۳۰ min انجام شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پلیمر آلی- کووالانسی تریازین سنتز و از آن برای حذف داروی دوکسوروبیسین استفاده شد. آنالیزهای TEM, SEM, EDX, FTIR, XRD, EDX-Mapping, UV-Vis و DRS سنتز پلیمر را تأیید کرد و نشان‌دهنده ساختار نانو صفحه‌ای و دوبعدی پلیمر هستند.

همچنین، نتایج نشان داد که بیشینه کارایی حذف دوکسوروبیسین در pH برابر با ۷، زمان تماس برابر با ۳۰ min و غلظت فتوکاتالیست برابر با ۴۰ mg/L حاصل شد. نتایج بررسی قابلیت استفاده مجدد فتوکاتالیست پلیمر آلی- کووالانسی تریازین نشان داد که کارایی تخریب فتوکاتالیستی دوکسوروبیسین از

References

- Abbasi, M. A., Amin, K. M., Ali, M., Ali, Z., Atif, M., Ensinger, W. et al., 2022. Synergetic effect of adsorption-photocatalysis by GO-CeO₂ nanocomposites for photodegradation of doxorubicin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 107078. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107078>.
- Al-Hazmi, G. H., Refat, M. S., Alshammari, K. F., Kubra, K. T. and Shahat, A., 2023. Efficient toxic doxorubicin hydrochloride removal from aqueous solutions using facial alumina nanorods. *Journal of Molecular Structure*, 1272, 134187. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134187>.
- Ali, I., Kon'kova, T., Kasianov, V., Rysev, A., Panglisch, S., Mbianda, X. et al., 2021. Preparation and characterization of nano-structured modified montmorillonite for dioxidine antibacterial drug removal in water. *Journal of Molecular Liquids*, 331, 115770. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115770>.
- Althobaiti, S. A., Nabil, G. M. and Mahmoud, M. E., 2025. Insight into optimization of doxorubicin removal by a novel nanobiocomposite of doped molybdenum carbide and zinc ferrite onto pomegranate peels nanobiochar (Mo₂C-ZnFe₂O₄@PPNB). *Journal of Molecular Liquids*, 127597. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127597>.
- Bashar, M., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and Shahmoradi, B., 2025. Covalent triazine framework polymer as a photocatalyst for the degradation of Ofloxacin under visible light irradiation. *Water, Air and Soil Pollution*, 236, 154. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-07790-w>.
- Bashir, M., Batool, M., Arif, N., Tayyab, M., Zeng, Y. J. and Zafar, M. N., 2023. Strontium-based nanomaterials for the removal of organic/inorganic contaminants from water: a review. *Coordination Chemistry Reviews*, 492, 215286. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215286>.
- Bi, J., Zhang, Z., Tian, J. and Huang, G., 2024. Interface engineering in a nitrogen-rich COF/BiOBr S-scheme heterojunction triggering efficient photocatalytic degradation of tetracycline antibiotics. *Journal of Colloid and Interface Science*, 661, 761-771. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.01.213>.



- Cheraghi, M., Lorestani, B., Zandipak, R. and Sobhanardakani, S., 2022. GO@Fe₃O₄@ZnO@CS nanocomposite as a novel adsorbent for removal of doxorubicin hydrochloride from aqueous solutions. *Toxin Reviews*, 41, 82-91. <https://doi.org/10.1080/15569543.2020.1839910>.
- Dai, X., Chen, Q., Hu, J., Fan, Y., Xiong, Y. and Li, X., 2025. Selective removal of microcystin from eutrophic water by a nanobody-metal hybrid photocatalyst. *Chemical Engineering Journal*, 159993. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159993>.
- Dumitru, R., Ianculescu, A., Păcurariu, C., Lupa, L., Pop, A., Vasile, B. et al., 2019. BiFeO₃-synthesis, characterization and its photocatalytic activity towards doxorubicin degradation from water. *Ceramics International*, 45, 2789-2802. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.298>.
- Ghafoori, M., Cheraghi, M., Kiani Sadr, M., Lorestani, B. and Sobhanardakani, S., 2022. Magnetite graphene oxide modified with β -cyclodextrin as an effective adsorbent for the removal of methotrexate and doxorubicin hydrochloride from water. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(23), 35012-35024. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18725-x>.
- Garg, T., Aggarwal, D., Kumar, V., Tikoo, K., Paulik, C., Kaushik, A. et al., 2023. Rational construction of g-C₃N₄/SnO₂/CoFe₂O₄ dual Z-scheme system as a potential scaffold for fluorescence sensing and visible light driven photocatalytic degradation of lethal pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 110744. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110744>.
- Ghosh, S., Zhang, G., Chen, Y. and Hu, J., 2025. The efficacies of degrading antibiotic resistance genes (ARGs) by applying UV light emitting diodes (UV-LEDs) based advanced oxidation processes (AOPs). *Water Research*, 276, 123197. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123197>.
- Hou, C. P., Wang, Q., Liu, Q., Li, Z. G., Ke, C. L., Wang, X. F. et al., 2025. Development and application of porous materials to antibiotic drug adsorption and removal. *Journal of Water Process Engineering*, 69, 106583. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106583>.
- Kadu, B. S., Wani, K. D., Kaul-Ghanekar, R. and Chikate, R. C., 2017. Degradation of doxorubicin to non-toxic metabolites using Fe-Ni bimetallic nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 325, 715-724. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.097>.
- Li, Q., Zhu, Y., Pan, T., Zhang, G. and Pang, H., 2025. Covalent organic framework nanomaterials: syntheses, architectures, and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 339, 103427. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103427>.
- Li, X., Chen, T., Qiu, Y., Zhu, Z., Zhang, H. and Yin, D., 2023. Magnetic dual Z-scheme g-C₃N₄/BiVO₄/CuFe₂O₄ heterojunction as an efficient visible-light-driven peroxydisulfate activator for levofloxacin degradation. *Chemical Engineering Journal*, 452, 139659. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139659>.
- Liu, H., Xin, F., Wen, X., Zhang, H., Wang, H. and Wei, J., 2025. Iron and nitrogen co-doped biochar membrane for SMX removal in water by filtration and catalytic oxidation. *Separation and Purification Technology*, 359, 130562. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130562>.
- Liu, Q., Li, X., Wan, Z., Xu, D. and Liu, C., 2024. Enhanced photocatalytic activity and antibacterial potential of a novel ternary ZnO-Ag₂MoO₄-AgI heterojunction photocatalyst. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 700, 134765. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134765>.
- Monjezi, Z., Tarlani, A., Esfahani, H., Asghar, A., Salemi, A., Zadmand, R. et al., 2024. Simultaneous photocatalytic degradation of remdesivir, favipiravir, and diclofenac from aqueous solutions using a quaternary plasmonic Ag/Ag-SG-TiO₂-rGO photocatalyst: synthesis, characterization, optimization, and toxicity assessment. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106267. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106267>.



- Rashtchi, N., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Goodarzi, A. and Lorestani, B., 2023. High-efficient photocatalytic degradation of tamoxifen and doxorubicin by novel ternary heterogeneous GO@Fe₃O₄@CeO₂ photocatalyst. *Toxin Reviews*, 42, 701-708. <https://doi.org/10.1080/15569543.2023.2245027>.
- Sharma, R. K., Chen, J. S., Siddique, J. A., Dey, G., Banerjee, P., Mesina, M. T. L. A. et al., 2025. Optimization and surface functionalization of biologically synthesized mesoporous silica nanoparticles to remove ASA drug from water: sorption and regeneration study. *Separation and Purification Technology*, 353, 128262. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128262>.
- Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Jafari, A. and Zandipak, R., 2022. PECVD synthesis of ZnO/Si thin film as a novel adsorbent for removal of azithromycin from water samples. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(17), 5229-5246. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1793973>.
- Sun, B., Guo, Z., Ren, F., Pan, X., Lyu, C., Qiao, X. et al., 2023. Enhanced photocatalyst with TiO₂-anchored iron tailings structure for highly efficient degradation of doxycycline hydrochloride. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139241>.
- Xiang, P., Tang, C., Ma, K. and Li, X., 2025. Adsorption of Rhodamine B pollutants from wastewater using MoS₂: the critical role of crystal phase regulation. *Journal of Water Process Engineering*, 70, 107130. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107130>.
- Zahid, M., Khan, Z. U. H., Sun, J., Muhammad, N., Sabahat, S., Shah, N. S. et al., 2025. Biochar-derived photocatalysts for pharmaceutical waste removal, a sustainable approach to water purification. *Applied Surface Science Advances*, 26, 100721. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100721>.
- 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, 15284. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152843>.
- Zandipak, R., Bahramifar, N., Younesi, H. and Zolfigol, M. A., 2024b. Electro-photocatalyst effect of NS-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., 2025. 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., Sobhan Ardakani, S. and Shirzadi, A., 2020. Synthesis and application of nanocomposite Fe₃O₄@SiO₂@CTAB-SiO₂ as a novel adsorbent for removal of cyclophosphamide from water samples. *Separation Science and Technology*, 55, 456-470. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1566262>.
- Zhao, C., Li, C., Chen, M., Niu, T., Zhao, Q., Ni, T. et al., 2023. Effective removal of antineoplastic doxorubicin by 0D Nb₂O₅ quantum dots embed 3D porous C-doped g-C₃N₄: degradation mechanism, pathway and toxicity assessment. *Applied Surface Science*, 612, 155861. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155861>.

