

Journal of

OceanographyHomepage: joc.inio.ac.ir**ORIGINAL RESEARCH PAPER**

Efficient Photocatalytic Degradation of Tetracycline in Aquaculture Wastewater Using Copper Oxide/Graphene Oxide (CuO/GO) Nanocomposite

M. Jahanshahi^{1,*}, N. Mirhosseini rayen¹

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran

² Master's student University of Jiroft University of Jiroft, 8th km of Persian Golf Highway, Jiroft, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received: 2025/06/1

Revised: 2025/12/13

Accepted: 2025/12/13

Keywords:

Sustainable Purification,
Tetracycline Removal,
Photocatalytic Degradation ,
Nanomaterials ,
Water Treatment

*Corresponding author:

✉ mj.jahanshahi@ujiroft.ac.ir

Doi: [10.52547/joc.16.63.2](https://doi.org/10.52547/joc.16.63.2)

ORID: 0000-0002-6672-9801

ABSTRACT

Background and Objectives: This work investigated the design and synthesis of a copper oxide/graphene oxide (CuO/GO) nanocatalyst for the removal of the pharmaceutical pollutant tetracycline from synthetic and real aquaculture wastewater. The use of advanced water treatment technologies is increasingly important to address the rising levels of pharmaceutical contaminants in water resources. Tetracycline, a widely used antibiotic in aquaculture, can enter water sources due to its low resistance to biological degradation, posing harmful effects on aquatic ecosystems and human health. Given the limitations of conventional treatment methods, this research focuses on designing semiconductor nanomaterials and synthesizing the CuO/GO nanocomposite, with the ultimate goal of achieving maximum photocatalytic degradation of tetracycline.

Methods: In this study, graphite powder was used as a source for synthesizing graphene oxide nanosheets via the modified Hummers' method, and the final CuO/GO nanocomposite was synthesized using a co-precipitation method. The photocatalytic degradation performance of this nanocomposite in removing tetracycline from aquaculture wastewater was evaluated. Influential parameters such as initial concentration, pH, contact time, and nanocomposite dosage were optimized. The structure and morphology of the CuO/GO nanocomposite were characterized using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR).

Findings: The results confirmed the high potential of the CuO/GO nanocomposite in effectively removing tetracycline from aquaculture wastewater and its stability over multiple recovery and reuse cycles. The nanocomposite achieved 97% tetracycline removal under a wide range of operational parameters through a photocatalytic degradation mechanism. Optimization of various processes, including nanocomposite dosage, contact time, and pH, led to higher removal efficiency and faster degradation rates. After four recovery cycles, only a slight reduction in removal efficiency was observed.

Conclusion: The CuO/GO nanocomposite, combining copper oxide and graphene oxide, is introduced as an innovative and efficient method for removing tetracycline from aquaculture wastewater. By increasing active surface area and improving electron transfer, this nanocomposite successfully achieves maximum antibiotic removal under different operational conditions. These findings provide a basis for developing advanced and efficient water treatment methods, representing a significant step toward protecting water resources and mitigating the harmful environmental impacts of such pollutants on ecosystems.

**NUMBER OF TABLES****1****NUMBER OF FIGURES****8****NUMBER OF REFERENCES****28**

مقاله پژوهشی

حذف فوتوکاتالیستی کارآمد تتراسایکلین از پساب آبی پروری با استفاده از نانوکامپوزیت اکسید مس / اکسید گرافن (CuO/GO)

محمد جواد جهانشاهی^{۱*}؛ نگین السادات میرحسینی راین^۲

۱ گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

۲ دانشجوی دانشگاه جیرفت، کیلومتر ۸ بزرگراه خلیج فارس، دانشگاه جیرفت، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

پیشینه و اهداف: در این مطالعه، طراحی و سنتز نانوکاتالیست اکسیدمس / اکسیدگرافن (CuO/GO) با هدف حذف آلاینده‌ی دارویی تتراسایکلین، از پساب مصنوعی و پساب حقیقی آبی پروری مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از فناوری‌های نوین در تصفیه آب، به منظور مقابله با افزایش آلاینده‌های دارویی در منابع آبی، اهمیت فزاینده‌ای دارد. تتراسایکلین، به عنوان یک آنتی‌بیوتیک پرکاربرد در صنعت آبی پروری، به دلیل مقاومت کم در برابر تجزیه بیولوژیکی، می‌تواند به منابع آبی وارد شود و اثرات زیان‌باری بر اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان داشته باشد. با توجه به محدودیت‌های روش‌های تصفیه سنتی، این پژوهش بر طراحی نانو مواد نیمه‌رسانا و سنتز نانوکامپوزیت CuO/GO، متمرکز شده است و هدف نهایی این تحقیق، دستیابی به حداکثر تخریب نوری تتراسایکلین می‌باشد.

روش‌ها: در این مطالعه، از پودر گرافیت به عنوان منبعی برای سنتز نانوصفحات اکسیدگرافن از طریق روش بهبود یافته‌ها استفاده شد و نانوکامپوزیت نهایی CuO/GO به روش هم‌رسوبی سنتز شد. عملکرد تخریب نوری این نانوکامپوزیت در حذف تتراسایکلین از پساب آبی پروری مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای تأثیرگذار مانند غلظت اولیه، pH، زمان تماس و مقدار نانوکامپوزیت، بهینه‌سازی شدند و برای مشخصه‌یابی ساختار و مورفولوژی نانوکامپوزیت CuO/GO، از روش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) استفاده شد.

یافته‌ها: یافته‌های این پژوهش، پتانسیل بالای نانوکامپوزیت CuO/GO را در حذف مؤثر تتراسایکلین از پساب آبی پروری و پایداری آن در چرخه‌های بازیابی و استفاده مجدد تأیید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این نانوکامپوزیت با مکانیسم تخریب نوری، میزان ۹۷ درصد از تتراسایکلین را در بازه وسیعی از پارامترهای عملیاتی حذف می‌کند. بهینه‌سازی فرآیندهای مختلف، مانند غلظت نانوکامپوزیت، زمان تماس و pH، منجر به راندمان حذف بالاتر و افزایش سرعت تخریب شده است. در نهایت با انجام چهار چرخه بازیابی، کاهش جزئی در راندمان حذف تتراسایکلین مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: نانوکامپوزیت CuO/GO، با ترکیب اکسید مس و اکسید گرافن، به عنوان یک روش نوین و کارآمد برای حذف تتراسایکلین از پساب‌های آبی پروری معرفی می‌شود. این نانوکامپوزیت با افزایش سطح فعال و بهبود انتقال الکترون، موفق به حذف حداکثری آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین در شرایط عملیاتی مختلف می‌شود. این نتایج، مبنایی برای توسعه روش‌های نوین و کارآمد تصفیه آب آلوده فراهم می‌آورد و گام مؤثری در جهت حفاظت از منابع آبی و جلوگیری از اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی ناشی از ورود این نوع آلاینده‌ها به اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۱

تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۲

واژگان کلیدی:

پالایش پایدار

حذف تتراسایکلین

تجزیه فوتوکاتالیستی

نانومواد

تصفیه آب

*نویسنده مسئول

✉mj.jahanshahi@ujiroft.ac.ir

Doi: 10.52547/joc.16.63.2

ORID: 0000-0002-6672-9801

مقدمه

امروزه، بحران جهانی آب به یکی از چالش‌های اساسی بشر تبدیل شده است [1]. گزارش‌های معتبر نشان می‌دهند، که تقریباً دو سوم جمعیت جهان با کمبود شدید آب شیرین مواجه است [2]. پیش‌بینی می‌شود، این بحران تا سال ۲۰۵۰ وخیم‌تر شود و دسترسی به آب سالم به نصف میزان فعلی کاهش یابد. این در حالی است که افزایش روزافزون جمعیت و توسعه صنعتی، تقاضا برای آب سالم را به طور قابل توجهی افزایش داده است [3]. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی، از قبیل تخلیه فاضلاب‌های بیمارستانی و شهری صنایع نساجی، فعالیت‌های کشاورزی، و صنایع غذایی و شیمیایی، منجر به آلودگی شدید منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شده‌است. این آلاینده‌ها، که شامل ترکیبات آلی، معدنی و میکروبی هستند، حتی در غلظت‌های پایین نیز اثرات سمی و مخربی بر سلامت انسان و محیط زیست دارند [4]. آمار سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که تنها در سال ۲۰۱۸، حدود ۱٫۶ میلیون نفر به دلیل آلودگی آب جان خود را از دست داده‌اند [5]. این آمار هشداردهنده، لزوم توجه جدی به مدیریت منابع آب و توسعه روش‌های کارآمد برای تصفیه و کاهش آلودگی را بیش از پیش آشکار می‌سازد [6]. در سال‌های اخیر آلودگی منابع آبی توسط آلاینده‌های آلی، از جمله داروها و به‌ویژه آنتی‌بیوتیک‌ها، به چالشی جدی تبدیل شده و نگرانی‌ها در خصوص تأمین آب سالم را افزایش داده است. تتراسایکلین‌ها (TCS) به عنوان یک دسته از آنتی‌بیوتیک‌های وسیع‌الطیف، به دلیل ارزان بودن، یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین آنتی‌بیوتیک‌ها در جهان است [7]. آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین، به دلیل هزینه کم و کارایی بالا، دومین آنتی‌بیوتیک پرمصرف در فعالیت‌های انسانی، دامداری و آبی‌پروری است [8]. اما جذب کم تتراسایکلین در دستگاه گوارش و دفع بالای آن (حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد) از طریق ادرار و مدفوع، منجر به ورود بقایای تصفیه نشده و ایجاد آلودگی در منابع آب می‌شود [9]. مطالعات نشان می‌دهند که TCS از طریق مسیرهای مختلفی از جمله درمان‌های پزشکی، آبی‌پروری و دامپروری به محیط وارد شده و منجر به تولید و انتشار ژن‌های مقاوم به TCS می‌شوند [10]. علاوه بر این، اثرات سمی تتراسایکلین بر موجودات غیرهدف، تهدیدی جدی برای تنوع زیستی در محیط زیست به شمار می‌رود. این ترکیبات سمی، با ورود به زنجیره غذایی آبزیان، احتمال انتقال و تجمع آن‌ها در بدن انسان را افزایش داده و به طور بالقوه سلامت انسان را به خطر می‌اندازند. افزایش حضور آنتی‌بیوتیک‌ها، به‌ویژه تتراسایکلین، در محیط‌های آبی و ترویج مقاومت آنتی‌بیوتیکی، حذف این آلاینده را ضروری می‌سازد. در مطالعه‌ای توسط Guo و همکاران نشان داده شد که میانگین غلظت تتراسایکلین در آب‌های سطحی دریاچه دانگتینگ شرقی در فصل بهار، ۲۰٫۹۲ نانوگرم در لیتر بود [11]. بنابراین اقدام فوری و توسعه فناوری‌های نوین

و کارآمد برای تصفیه پساب حاوی آلاینده‌های دارویی، بیش از پیش اهمیت می‌یابد. روش‌های مرسوم مختلفی برای حذف این دارو از منابع آب وجود دارد، که می‌توان به فرآیند جذب سطحی، فیلتراسیون، روش‌های بیولوژیکی و تبادل یونی اشاره کرد. این روش‌ها اغلب با مشکلاتی مانند: کارایی محدود در مقیاس صنعتی، ایجاد آلودگی ثانویه، هزینه‌های اقتصادی بالا، راندمان پایین در مقیاس صنعتی مواجه هستند [12]. بنابراین، نیاز به توسعه و بهره‌برداری از فناوری‌های مؤثرتر و اقتصادی برای حذف کامل تتراسایکلین از منابع آبی احساس می‌شود. استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند به طور مؤثر، آلودگی‌های دارویی در محیط‌های طبیعی را کاهش دهد و به حفظ سلامت محیط زیست و انسان کمک کند. از جمله روش‌های نوین و پیشرفته می‌توان به فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته، و الکتروشیمیایی اشاره کرد. این فناوری‌ها به دلیل پتانسیل بالا در حذف آلاینده‌های آلی، به عنوان رویکردهای مؤثر و امیدبخش مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان، فناوری فتوکاتالیستی مبتنی بر نیمه‌هادی‌ها، به عنوان یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته نوین، جایگاه ویژه‌ای یافته است. این فناوری با مزایایی همچون سازگاری زیست‌محیطی، عدم سمیت، پایداری در برابر تابش نور خورشید و مهم‌تر از آن، قابلیت تولید رادیکال‌های فعال نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) و سوپراکسید ($\text{O}_2^{\bullet-}$) شناخته می‌شود. این رادیکال‌ها با قدرت اکسیداسیون بالا، قادرند آلاینده‌های آلی گوناگون را به ترکیبات کم‌خطر یا بی‌خطر تجزیه کنند. مکانیزم عمل این فرآیند شامل حمله رادیکال‌های فعال به پیوندهای شیمیایی آلاینده‌ها و اکسیداسیون آن‌ها به محصولات بی‌خطر نظیر دی‌اکسید کربن و آب است [13]. این فرآیند با کمترین تولید پسماند و حداقل مصرف انرژی نسبت به روش‌های سنتی تصفیه آب انجام می‌شود. فتوکاتالیست‌ها با استفاده از انرژی تجدیدپذیر نور خورشید و مواد نیمه‌هادی مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) می‌توانند، به عنوان یک فناوری سبز بسیار کارآمد به تصفیه آب‌های آلوده بپردازند [14]. مطالعات نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند طیف وسیعی از آلاینده‌های آلی، از جمله داروها، رنگ‌ها و سموم را به طور مؤثری حذف کند [15]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای افزایش کاربردهای عملی فناوری فتوکاتالیستی مبتنی بر نانومواد، صورت گرفته است زیرا افزایش کارایی این فناوری به عنوان راهکاری پایدار و مؤثر برای حذف آلاینده‌های آلی در محیط زیست شناخته می‌شود. نانومواد فتوکاتالیستی از قبیل اکسیدهای فلزی مانند: تیتانیوم، روی، تنگستن، مس و غیره در تجزیه طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها مانند: رنگ، سموم و ترکیبات دارویی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این نانوذرات (مانند خواص الکترونیکی، نوری، مکانیکی و مساحت سطح بالا)، در حذف آلاینده‌های آلی بسیار کارآمد هستند [16].

منظور حذف موثر تتراسایکلین از پساب یک مزرعه آبی‌پروری در شرایط عملیاتی بهینه استفاده شد و نتایج نشان دادند که در شرایط بهینه، نانوکامپوزیت CuO/GO ، ۹۷٪ تجزیه نوری در زمان ۶۰ دقیقه از پساب مصنوعی و با تجزیه ۸۸٪ فاضلاب حقیقی آبی‌پروری در زمان ۳۰ دقیقه، راندمان قابل قبولی در حذف تتراسایکلین، در مقایسه با روش‌های سنتی تصفیه، از خود نشان داده است. که این تحقیقات می‌تواند گامی مهم در راستای توسعه‌ی تکنولوژی‌های پایدار تصفیه آب بردارد.

روش پژوهش

۱-۱ مواد مورد نیاز : کلرید مس (II)، گرافیت، سدیم هیدروکسید، استیک اسید، پتاسیم پرمنگنات، سولفوریک اسید، فسفریک اسید، اتانول و هیدروکلریک اسید از شرکت مرک (آلمان) تهیه شدند. کلیه مواد از خلوص بالا برخوردار بودند و در تمام مراحل سنتز نانو مواد از آب فوق خالص استفاده شده است.

۱-۲ سنتز نانوذرات (CuO) : روش هم‌رسوبی برای سنتز نانوذرات CuO طراحی و انتخاب شد. از محلول‌های کلرید مس (۰/۱ مولار) و سدیم هیدروکسید (۰/۱ مولار) در آب دیونیزه استفاده شد. برای سنتز CuO ، ۵۰ میلی‌لیتر محلول کلرید مس با ۱ میلی‌لیتر اسید استیک مخلوط شد در حالی که به طور پیوسته با همزن مغناطیسی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت هم خورد. پس از آن، محلول هیدروکسید سدیم به تدریج به صورت قطره‌ای به محلول بالا اضافه شد تا تغییر رنگ از سبز به سیاه حاصل شود. تشکیل رنگ سیاه سنتز نانوذرات CuO را در مخلوط محلول تایید می‌کند. نانوذرات به مدت ۴ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه شدند تا نانوذرات پایدار CuO تولید شود.

۱-۳ سنتز اکسیدگرافن (GO) : از پودر گرافیت به عنوان منبعی برای سنتز نانوصفحات اکسیدگرافن از طریق روش بهبود یافته هامر استفاده شد [۱۳]. حدود ۳/۰ گرم از پودر گرافیت در مخلوط با نسبت ۹:۱ از اسید فسفریک : اسید سولفوریک غلیظ (۴۰:۳۶۰ میلی‌لیتر) پخش شد و به مدت ۱ ساعت هم خورد. سپس مقدار ۱۸/۰ گرم پتاسیم پرمنگنات با احتیاط و کنترل دمایی ۸ درجه سانتی‌گراد به مخلوط اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد هم‌زده شد. سپس این مخلوط با ریختن ۴۰۰ میلی‌لیتر آب یخ به همراه ۵ میلی‌لیتر آب اکسیژنه (۳۰ درصد) خنک شد. محلول نهایی دارای رنگ قهوه‌ای مایل به زرد بود. این محلول به مدت یک شب رها شد تا رسوب کند، و این رسوب جدا گشت و ده مرتبه با آب و اتانول شستشو و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. در نهایت، اکسیدگرافن حاصل به ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و به مدت ۳ ساعت مورد تابش امواج یک پروپ-سونیکاتور قرار گرفت تا نانوصفحات اکسیدگرافن نازک لایه برداری شده به دست آید.

نانوذرات اکسیدمس (CuO) و اکسیدمس دوگانه (Cu_2O)، به‌عنوان نانوکاتالیست‌های عالی در فرآیندهای فتوکاتالیستی مورد توجه قرار دارند. این نانو مواد به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود، مورد بررسی و استفاده در حذف آلاینده‌های آلی از محیط زیست قرار هستند، اکسیدمس و اکسیدمس دوگانه، به ترتیب دارای شکاف باندی حدود ۱/۲ و ۲/۰ الکترون‌ولت، انتخاب مناسبی برای جذب نور مرئی و فعالیت فتوکاتالیستی می‌باشند. در یک پژوهش توکلی و همکارانش با استفاده از نانوذرات اکسیدمس و اکسیدمس دوگانه با توجه به خاصیت نیمه هادی p آن‌ها و شکاف باند باریکشان، به دنبال افزایش عملکرد فتوکاتالیستی برای تجزیه آلاینده‌های آلی بودند. آن‌ها با سنتز نانوذرات اکسیدمس به عنوان پیش ساز، موفق به حذف بیش از ۹۰٪ رنگ متیلن بلو در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه شدند [۱۷]. در میان انواع مختلف اکسید فلزات واسطه، اکسیدمس به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی برتر در طراحی فوتوکاتالیست‌ها کاربرد فراوان دارد. اما اکسیدمس علی‌رغم مزیت‌هایی همچون فراوانی و غیرسمی بودن، به دلیل فاصله باند کم (حدود ۱،۲ الکترون‌ولت) فعالیت نوری محدودی دارد [۱۸]. این محدودیت، همراه با راندمان پایین جذب انرژی خورشیدی (حداکثر ۵ تا ۶ درصد)، باعث کاربرد و عملکرد محدود آن در فوتوکاتالیست‌ها می‌شود. بنابراین، برای افزایش بهره‌وری از انرژی خورشیدی در این دسته از مواد، توسعه فوتوکاتالیست‌های جدید با خواص بهبود یافته، از جمله افزایش فاصله باند و بهبود جذب انرژی نوری، ضروری است. در فناوری اکسیداسیون پیشرفته از نیمه هادی فوتوکاتالیستی بدون فلز مختلف مانند اکسیدگرافن (GO) نیتريدکربن گرافیتی ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) و نانولوله های کربنی (CNTs) و غیره نیز استفاده می‌شود [۱۹]. اکسیدگرافن یکی از جاذب‌های بر پایه کربن است که دارای سطح ویژه ۲۶۰۰ متر مربع بر گرم، هدایت حرارتی بالا و استحکام مکانیکی و الکتریکی بالا است [۲۰]. علاوه بر این وجود گروه‌های عاملی کربوکسیل، هیدروکسیل و اپوکسی بر روی سطح گرافن می‌تواند تعداد محل‌های اتصال با آلاینده را افزایش دهد، که این عمل به طور قابل توجهی پتانسیل جذب جذب آلاینده‌ها را بهبود می‌بخشد [۲۱]. بسیاری از پژوهش‌های اخیر برای کاهش نرخ نوترکیبی حامل‌های بار، از جفت کردن اکسیدگرافن به دو یا چند نانوذره اکسید فلزی و تشکیل نانوکامپوزیت استفاده می‌کنند [۲۲]. ادغام اکسیدمس با مواد دارای خواص الکترونیکی پیشرفته، مانند اکسیدگرافن، می‌تواند منجر به بهبود فعالیت نوری و کارایی فوتوکاتالیستی این ترکیبات شود. خواص انتقال الکترون بالا و سطح ویژه بالای اکسید گرافن، در کنار خاصیت نیمه‌رسانایی اکسید مس، منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در جذب نور و بهبود انتقال بار در سیستم‌های فوتوکاتالیستی می‌شود. در این پژوهش، با سنتز موفق اکسیدگرافن تزیین شده با اکسید فلزی CuO به

۴-۱ سنتز CuO/GO

برای تهیه CuO/GO از روش هم‌رسوبی مرطوب استفاده شد. حدود ۳۰۰ میلی گرم اکسیدگرافن در ۴۰ میلی لیتر آب مقطر و تحت تابش امواج حمام سونیکاتور به مدت ۵ دقیقه حل شد. و سپس ۳۰۰ میلی گرم اکسیدمس در ۴۰ میلی لیتر آب پراکنده و به محلول اکسیدگرافن منتقل شد. به منظور انجام واکنش، مواد اولیه به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط و تحت همزدن با سرعت بالا مخلوط شدند. در ادامه، رسوب تشکیل شده با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه جدا گردید. نهایتاً، رسوب حاصل به مدت ۸ ساعت در آون و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد.

نتایج و بحث

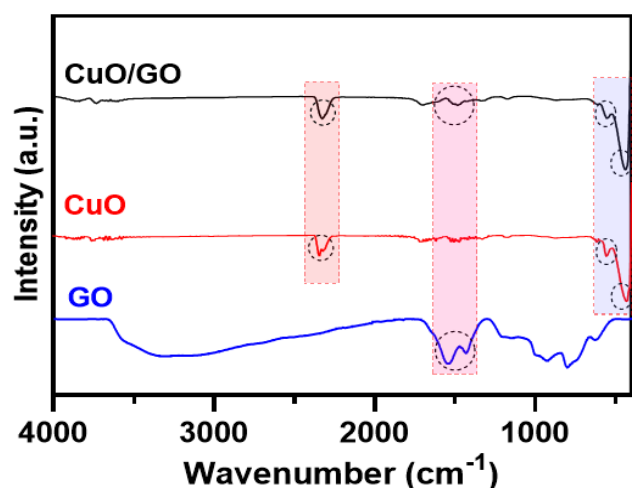
در سنتز نانومواد فتوکاتالیستی، شناسایی و تعیین ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی از اهمیت بسزایی برخوردار است. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری (FTIR) به عنوان دو تکنیک مکمل، نقش حیاتی در این زمینه ایفا می‌کنند. آنالیز پراش اشعه ایکس با ارائه اطلاعات دقیق در مورد فازهای کریستالی به درک جامعی از ترکیب و آرایش اتمی کاتالیزور کمک می‌کند. این اطلاعات برای بهینه‌سازی فرآیند سنتز و بهبود عملکرد کاتالیستی ضروری هستند. از سوی دیگر، FTIR با شناسایی گروه‌های عاملی موجود در سطح فتوکاتالیزور، اطلاعات ارزشمندی در مورد ترکیب شیمیایی و برهمکنش‌های سطحی ارائه می‌دهد. گروه‌های عاملی نقش مهمی در فعالیت فتوکاتالیستی ایفا می‌کنند. به این ترتیب، استفاده همزمان از XRD و FTIR، دیدگاه جامعی از ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی کاتالیزور فراهم می‌سازد. همچنین آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، برای تعیین مورفولوژی و شکل ساختار نانوکامپوزیت CuO/GO مورد استفاده قرار گرفت.

۱-۱ تحلیل طیف FTIR و شناسایی اجزای نانوکامپوزیت (CuO/GO):

تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی FTIR برای تعیین گروه‌های عاملی انجام شد. طیف نانوذرات CuO، GO و نانوکامپوزیت نهایی CuO/GO در محدوده ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} در شکل ۱ نشان داده شده است. حضور پیک قوی و تیز در طول موج‌های ۴۹۲ cm^{-1} و ۶۱۱ cm^{-1} به طور مشخص مربوط به فرکانس کششی پیوند مس و اکسیژن (Cu-O) است. طیف FTIR اکسیدگرافن، وجود گروه عاملی مهم و مرتبط با اکسیدگرافن که شامل گروه‌های هیدروکسیل (-OH)، گروه‌های اپوکسی و پیوندهای آروماتیک (C=C) می‌شود، را تأیید می‌کند. این گروه‌ها در طیف اکسیدگرافن با ایجاد پیک گسترده در محدوده ۲۷۵۰ تا ۳۷۸۰ cm^{-1} به دلیل کشش گروه‌های هیدروکسیل (-OH) و مولکول‌های آب جذب شده در ساختار می‌باشد.

پیک در حدود ۱۷۰۰ cm^{-1} به ارتعاش کششی گروه‌های کربونیل (C=O) نسبت داده می‌شود. ناحیه ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ cm^{-1} به ارتعاش کششی

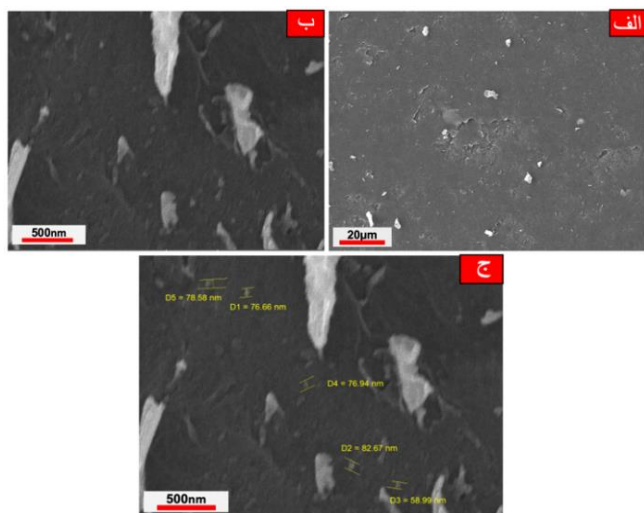
پیوندهای C-O نسبت دارد، که معمولاً با گروه‌های اپوکسی یا آلکوکسی مرتبط است و نشان‌دهنده اکسیداسیون موفقیت‌آمیز گرافیت و تشکیل اکسیدگرافن است. پیک‌های مشخص در ۱۶۱۷ cm^{-1} و ۱۷۳۵ cm^{-1} به کشش آروماتیک پیوندهای C=C در ساختار گرافیتی درون اکسیدگرافن نسبت دارند و نشان‌دهنده حفظ بخش‌هایی از ساختار گرافیتی در طی فرآیند اکسیداسیون هستند. در طیف FTIR بطور قاطعانه وجود گروه‌های عاملی مختلف، که شامل گروه‌های هیدروکسیل، اپوکسی، کربونیل و پیوندهای آروماتیک است، به وضوح مشخص شد که نشان‌دهنده اکسیداسیون موفق و تشکیل اکسیدگرافن است. در نانوکامپوزیت CuO/GO نوارهای جذب در ناحیه ۱۷۵۴ cm^{-1} به پیوندهای C=O نسبت داده می‌شوند. پیک‌های ۱۵۱۱ و ۱۲۸۸ cm^{-1} به C-O و پیک ۶۱۴ cm^{-1} مربوط به فرکانس کششی CuO است. از این رو، سنتز و ادغام مؤثر ذرات CuO در ساختار اکسیدگرافن توسط تجزیه و تحلیل FTIR تایید می‌شود.



شکل ۱- نمودار طیف‌سنجی (FTIR) نانوکامپوزیت CuO/GO و شناسایی گروه‌های عاملی

۲-۱ مشخصه‌یابی ساختاری (CuO/GO) به کمک پراش پرتو ایکس:

فازهای کریستالوگرافی نانوکامپوزیت CuO/GO در شکل ۲ با استفاده از تکنیک پراش اشعه ایکس در محدوده زوایای پراش (2θ) از ۱۰ تا ۸۰ درجه بررسی شد. الگوی XRD به‌دست‌آمده برای نانوکامپوزیت سنتز شده، حضور یک فاز مونوکلینیک واحد را نشان می‌دهد. پیک‌های پراش مشخصه در زوایای ۳۲/۳۷، ۳۵/۵۲، ۳۸/۸۷، ۴۸/۷۷، ۵۳/۱۷، ۵۸/۲۲، ۶۱/۷، ۶۶/۴۷ و ۶۸/۸۴ درجه، به ترتیب به صفحات (۰۱۱)، (۱۱۱)، (۱۱۱)، (۲۰۲)، (۰۲۰)، (۱۱۳)، (۳۱۱) و (۲۲۰) نسبت داده شده‌اند. این پیک‌ها، ساختار کریستالی نانوذرات اکسیدمس را تایید می‌کنند. وجود پیک‌های پراش در پروفایل XRD، نشان‌دهنده بلورینگی بالای CuO و توزیع مناسب



شکل ۳- تصاویر ثبت شده میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM از نانوکامپوزیت CuO/GO

۲. فعالیت کاتالیزوری نانوکامپوزیت CuO/GO در تخریب نوری تتراسایکلین

۱-۲ مشخصات راکتور فتوکاتالیستی و شرایط آزمایش

تخریب نوری

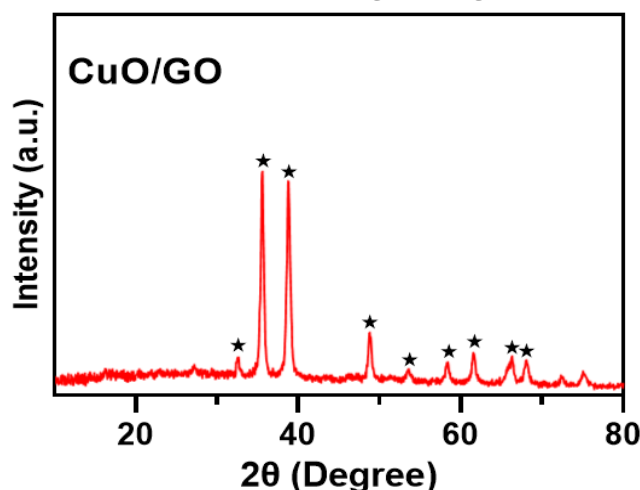
در واکنش تخریب نوری برای حذف تتراسایکلین (TC) تحت تابش نور مرئی، از نانوکامپوزیت CuO/GO به عنوان فتوکاتالیست استفاده شد. آزمایش‌های تخریب نوری در یک راکتور پیرکس با حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر انجام شد. برای هر آزمایش، ۵۰ میلی‌لیتر از محلول‌های آلاینده با غلظت مشخص در دمای اتاق تهیه شد. مقدار مشخصی از فتوکاتالیست CuO/GO با توجه به شرایط هر آزمایش به راکتور پیرکس اضافه و به منظور دستیابی به تعادل جذب و دفع، سیستم به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی هم زده شد، و سپس تحت تابش نور مرئی قرار گرفت. در طول آزمایش، در فواصل زمانی معین، ۲ میلی‌لیتر نمونه برداشت و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفوتومتر UV-Vis در طول موج ۲۵۶ نانومتر برای تعیین غلظت تتراسایکلین بررسی شد.

درصد تخریب: ((غلظت اولیه - غلظت نهایی) / غلظت اولیه) * ۱۰۰
فرمول درصد تخریب نوری تتراسایکلین نشان می‌دهد، چه درصدی از تتراسایکلین اولیه در فرایند تخریب از بین رفته است.

۲-۲ اثر pH اولیه تتراسایکلین

در شکل ۴ اثر pH در سه حالت اسیدی، خنثی و بازی بر راندمان تخریب نوری در فرایند فتوکاتالیستی مورد بررسی قرار گرفته است، تا اثر pH محلول بر تخریب نوری تتراسایکلین در فرایند مشخص شود. از آنجا که pH محلول می‌تواند، بر بار سطحی کاتالیزور تأثیر بگذارد (به عنوان مثال، در pH اسیدی، سطح کاتالیزور ممکن است دارای بار مثبت، در حالی که در pH قلیایی، بار سطحی کاتالیزور ممکن است، منفی باشد) و این تأثیرگذاری بر بار سطحی خود

آن بر روی صفحات مسطح اکسیدگرافن (GO) در ساختار نانوکامپوزیت نهایی است. نتایج حاصل از آنالیز پراش اشعه ایکس به وضوح نشان می‌دهد که فرایند سنتز نانوکامپوزیت CuO/GO با موفقیت انجام پذیرفته است. الگوی پراش به دست آمده، تثبیت مطلوب نانوذرات اکسیدمس بر روی صفحات GO را تأیید می‌کند. این توزیع یکنواخت و چیدمان مناسب نانوذرات بر بستر GO، منجر به تشکیل ساختاری پایدار با بلورینگی بالا شده است. چنین آرایش ساختاری مطلوب می‌تواند به طور قابل توجهی موجب بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی نانوکامپوزیت CuO/GO گردد.



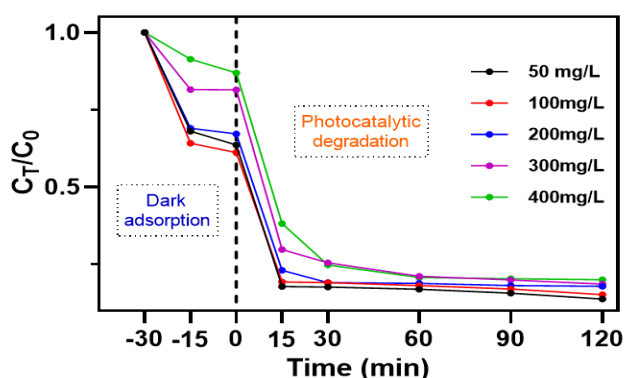
شکل ۲- نمودار ساختار کریستالی CuO/GO با استفاده از XRD

۳-۱ آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

نانوکامپوزیت (CuO/GO):

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ارائه شده در شکل ۳، ساختار نانوکامپوزیت CuO/GO را نشان می‌دهد. در این ساختار، نانوذرات اکسیدمس به صورت یکنواخت در سطح و درون توده‌های متخلخل و گسترده صفحات اکسیدگرافن توزیع شده‌اند. این توزیع، نشان‌دهنده سنتز موفق نانوکامپوزیت CuO/GO است. تصاویر SEM، ساختار ورقه‌ای و لایه لایه صفحات GO را به وضوح نشان می‌دهند. همچنین، توزیع نانوذرات CuO در میان این صفحات نیز به خوبی قابل مشاهده است. این نانوذرات به صورت متمرکز در نقاط مختلف صفحات GO پراکنده شده‌اند که می‌تواند به دلیل برهم‌کنش‌های سطحی بین CuO و اتصال موفق با سطح بستر گرافن اکساید باشد. در تصاویر آنالیز SEM مورفولوژی و اندازه نانوذرات اکسیدمس با قطر متوسط بین ۵۸ تا ۸۲ نانومتر قابل مشاهده است. به طور کلی، تصاویر SEM از نانوکامپوزیت CuO/GO، ساختاری منظم و یکنواخت را نشان می‌دهند که شامل صفحات گسترده و متخلخل GO است که در آن نانوذرات CuO توزیع شده‌اند. این ساختار می‌تواند برای کاربردهای مختلفی، مانند کاربردهای الکترونیکی، کاتالیستی و یا سنسوری، مناسب باشد.

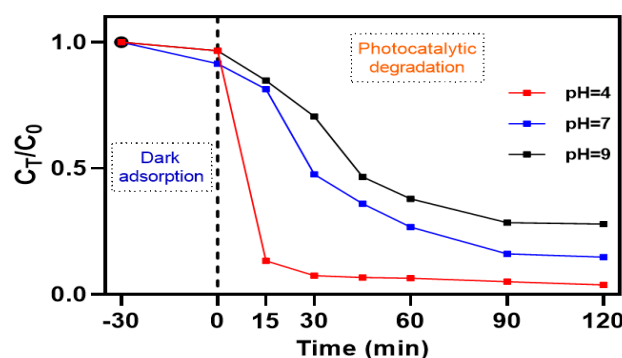
شکل ۵- نمودار اثر مقادیر مختلف کاتالیست (گرم بر لیتر) بر تخریب نوری تتراسایکلین



۴-۲ اثر غلظت اولیه تتراسایکلین

نتایج نرخ تخریب در شکل ۶ نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت در غلظت‌های (۵۰ تا ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) تتراسایکلین عملکرد تخریب نوری بالایی دارد، بطوریکه در همان ۱۵ دقیقه‌ی ابتدایی واکنش، نرخ تخریب ۸۳٪ است و با افزایش غلظت تتراسایکلین تا ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر، عملکرد نانوکامپوزیت در زمان‌های ابتدایی واکنش به‌طور جزئی کاهش می‌یابد، اما در زمان‌های پایانی در غلظت‌های بالا همانند غلظت‌های کم، راندمان تخریب همچنان بالا است. این کاهش عملکرد جزئی در غلظت ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر به دلیل اشباع شدن سطح نانوکاتالیست با مولکول‌های تتراسایکلین است. در غلظت‌های پایین، مولکول‌های تتراسایکلین می‌توانند به‌طور موثرتر به سطح کاتالیست جذب شوند و در معرض نور قرار گیرند، که همین امر منجر به افزایش کارایی تخریب نوری نانوکامپوزیت می‌شود، اما در غلظت‌های بالا، اشباع شدن سطح نانوکاتالیست، دسترسی مولکول‌های تتراسایکلین را به سایت فعال کاتالیست کاهش و در نتیجه، عملکرد تخریب در مراحل اولیه واکنش کمی کاهش می‌یابد. با این حال، نانوکاتالیست در نهایت، حتی در غلظت‌های بالایی همچون ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر تتراسایکلین موفق به تخریب ۸۰٪ این آنتی‌بیوتیک در پایان واکنش می‌شود، بنابراین هرچند که سرعت اولیه تخریب نوری در غلظت‌های بالا به‌صورت جزئی در ابتدای واکنش کاهش می‌یابد، اما در نهایت به دلیل توان بالای نانوکامپوزیت درصد تخریب تتراسایکلین در طول زمان واکنش در حال افزایش است.

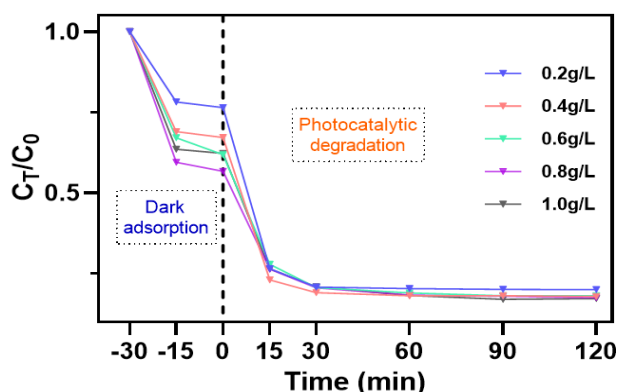
می‌تواند بر جذب و واکنش تخریب نوری تتراسایکلین در سطح کاتالیزور اثرگذار باشد. بنابراین تعیین pH برای دستیابی به حداکثر میزان تخریب نوری ضروری می‌باشد. یکی از مهم‌ترین تأثیرات دیگر pH اثرگذاری بر تشکیل گونه‌های فعال سطحی (حامل‌های بار نوری الکترون و حفره) در سیستم فوتوکاتالیستی است، وجود این گونه‌های واکنش‌پذیر نقش اساسی در واکنش تخریب نوری دارد. به منظور ارزیابی تأثیر pH در فرآیند تخریب نوری نانوکامپوزیت CuO/GO در شرایط غلظت تتراسایکلین (۵۰ میلی گرم بر لیتر)، مقدار فتوکاتالیست (۰/۲ گرم بر لیتر) و زمان تابش (۱۲۰ دقیقه) طراحی شد. (pH محلول تتراسایکلین با افزودن محلول سود و یا محلول هیدروکلریک اسید، ۰/۱M تنظیم شد) در pH=۹ پس از پایان واکنش میزان تخریب نوری تتراسایکلین ۶۳٪ بود، در حالی که در pH خنثی نرخ تخریب نوری تتراسایکلین به ۸۴٪ افزایش یافت. نتایج تخریب نوری در pH=۴ نشان می‌دهد، که با کاهش pH، تخریب تتراسایکلین در حال افزایش است و حداکثر تخریب نوری در این pH اسیدی حدود ۹۷٪ می‌باشد. براساس این نتایج، pH بهینه فوتوکاتالیست سنتز شده در حذف تتراسایکلین، ۴ است. این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب pH مناسب، فاکتور کلیدی در بهینه‌سازی فرآیند فوتوکاتالیستی در حذف آلاینده است. بهینه‌سازی پارامترهای دیگر مانند غلظت دارو، مقدار کاتالیست و زمان تابش از جمله پارامترهای دیگری هستند، که تأثیر مستقیمی در واکنش تخریب نوری دارند، و می‌توانند منجر به ارتقا راندمان تخریب نوری تتراسایکلین شوند.



شکل ۶- نمودار تأثیر pH در طول زمان بر تخریب نوری تتراسایکلین

۳-۲ اثر مقدار نانوکامپوزیت

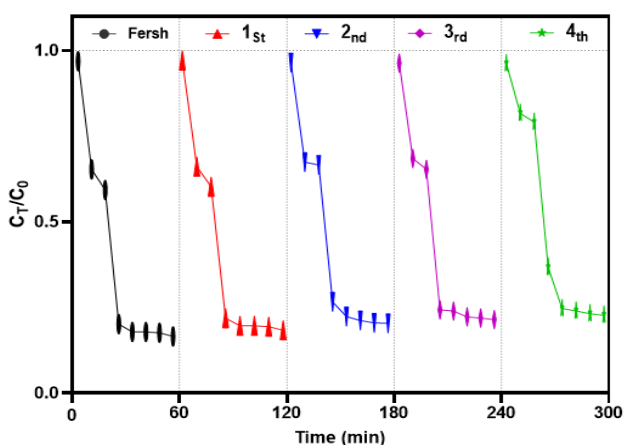
برای بهینه‌سازی مقدار فتوکاتالیست در شرایط ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر در pH=۴ در مقادیر مختلف کاتالیزور تخریب نوری تتراسایکلین مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی غلظت‌های مختلف نانوکاتالیست (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۰/۱۰ گرم بر لیتر)، مشخص شد که با افزایش غلظت نانوکامپوزیت افزایش در نرخ تخریب نوری تتراسایکلین وجود دارد. این افزایش تخریب به علت تعدد سطوح فعال و افزایش سایت‌های کاتالیستی مؤثر در فرآیند جذب و تخریب است. بنابراین، مقدار بهینه نانوکامپوزیت ۰/۴ گرم بر لیتر است که منجر به تخریب ۸۲٪ تتراسایکلین در مدت زمان ۳۰ دقیقه تابش نور می‌گردد. همچنین، ثابت بودن نرخ تخریب پس از ۶۰ دقیقه تابش در شکل ۵ به وضوح نشان می‌دهد که زمان بهینه برای فرآیند تخریب نوری، ۶۰ دقیقه روشنایی می‌باشد.



شکل ۷- نمودار نتایج تخریب نوری کاتالیست CuO/GO در پساب آبی پروری

۲-۶ ارزیابی پایداری در چرخه‌های بازیافتی

بازیابی فتوکاتالیست در چرخه‌های بازیافتی، به لحاظ کاهش هزینه و حفاظت از محیط زیست، بسیار ضروری است. عملکرد نانوکامپوزیت CuO/GO در تصفیه آب، عامل کلیدی در ارزیابی کاربردهای صنعتی و زیست‌محیطی آن می‌باشد. این مطالعه، تأثیر چرخه‌های بازیافت بر کارایی و پایداری این نانوکامپوزیت در حذف تتراسایکلین را مورد بررسی قرار داده است. نتایج نرخ تخریب نوری نشان می‌دهد که ساختار نانوکامپوزیت CuO/GO پس از چهار چرخه بازیافت، به طور قابل ملاحظه‌ای حفظ شده و پایدار است. همچنین، فعالیت آن در حذف تتراسایکلین، در طول چرخه‌های مختلف مطابق شکل ۸ با کاهش اندکی، روبه رو است.



شکل ۸- قابلیت استفاده مجدد و بازیافت کاتالیست CuO/GO

در چرخه اول، حذف تتراسایکلین حدود ۸۷٪ بود و این میزان به تدریج در چرخه‌های بعدی به ۸۴٪ (چرخه دوم)، ۸۳٪ (چرخه سوم)، ۸۱٪ (چرخه چهارم) کاهش یافت. نتایج حاصل از تست‌های بازیافتی نشان می‌دهد، این فتوکاتالیست دارای پایداری بالایی در تخریب نوری تتراسایکلین است و به

شکل ۶- نمودار اثر غلظت‌های مختلف تتراسایکلین (میلی گرم بر لیتر) بر راندمان تخریب نوری

۲-۵ نمودار اثر نانوکامپوزیت CuO/GO بر کاهش غلظت

تتراسایکلین در پساب مزرعه آبی پروری

تتراسایکلین یکی از آنتی‌بیوتیک‌های پرکاربرد در صنعت آبی پروری می‌باشد، که به دلیل استفاده گسترده، و تخلیه نامناسب پساب با ایجاد آلودگی در محیط زیست، تأثیرات منفی قابل توجهی را بر اکوسیستم وارد کرده است. در این تحقیق، به منظور کاهش آلودگی زیست محیطی حاصل از این دارو، نمونه‌ای از پساب مزرعه آبی پروری تهیه شد. این تست در شرایط بهینه pH، زمان و مقدار نانوکامپوزیت انجام شده است. سپس با استفاده از دستگاه اسپکتروسکوپی UV-Vis، غلظت تتراسایکلین در زمان‌های مختلف برای برآورده درصد تخریب نمونه حقیقی اندازه‌گیری شد. براساس نتایج به دست آمده در شکل ۷ نانوکامپوزیت CuO/GO قادر است، در مدت تنها ۳۰ دقیقه ۸۸٪ از غلظت آنتی‌بیوتیک را در نمونه‌ی حقیقی تهیه شده از پساب مزرعه آبی پروری کاهش دهد. این امر، کارایی بالای نانوکامپوزیت را در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و حفظ سلامت اکوسیستم‌های آبی نشان می‌دهد. از این رو، استفاده از این نانوکامپوزیت به عنوان روشی مؤثر برای کاهش آلودگی ناشی از تتراسایکلین در محیط‌های آبی بویژه پساب آبی پروری پیشنهاد می‌شود. نتیجه‌گیری داده‌های تجربی این تحقیق حاکی از آن است که نانوکامپوزیت CuO/GO، تحت تأثیر شرایط محیطی مانند pH و غلظت نانوکاتالیست، قابلیت بالایی در حذف تتراسایکلین از پساب‌های آبی پروری دارد. این نتایج می‌توانند مبنای طراحی سیستم‌های تصفیه آب مؤثر و پایدار در آینده باشند و به ارتقای کیفیت آب‌های طبیعی و محیط زیست کمک کند، این پژوهش اهمیت به‌کارگیری فناوری‌های نوین فتوکاتالیستی را برای بهبود کیفیت آب و سلامت اکوسیستم‌های آبی را به وضوح نشان می‌دهد.

سال‌های اخیر در میزان غلظت و زمان آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین تخریب نوری یافته، از خود نشان می‌دهد. این نانوکامپوزیت با ترکیب خواص منحصر به فرد اکسیدمس و اکسیدگرافن، می‌تواند به بهبود عملکرد فتوکاتالیستی و افزایش کارایی تخریب نوری آلاینده‌های آبی کمک کند.

همین دلیل، انتظار می‌رود که نانوکامپوزیت CuO/GO به‌عنوان یک راهکار پایدار و مؤثر در فرآیندهای تصفیه آب و حفاظت از محیط زیست در آینده به‌کار گرفته شود. ۲-۷ مقایسه عملکرد فتوکاتالیستی: در جدول ۱، عملکرد فتوکاتالیستی CuO/GO با نتایج گزارش‌شده در تحقیقات پیشین مقایسه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند، که نانوکامپوزیت CuO/GO سنتزی برتری قابل توجهی نسبت به سایر تحقیقات در

جدول ۱- مقایسه عملکرد فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت سنتز شده در این مطالعه نسبت به تحقیقات پیشین در تجزیه تتراسایکلین

Catalysts	TC Concentration(mg.L ⁻¹)	Catalyst (g.L ⁻¹)	Time(min)	pH	Degradation (%)	Ref.
CuO/GO	50	0.4	60	4	97.5	This work
Cu@Cu ₂ O@CuO-microalgae	-	0.5	80	6	76.5	[25]
BTiO ₂ -ZnO	50	0.125	120	7	74	[26]
Zinc oxide nanoparticles	50	1	120	7	84	[27]
Ag/ZnO@BC	50	0.01	-	6	70	[28]

حفاظت از منابع آبی و کاهش اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی ناشی از ورود آلاینده‌ها به اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با هدف تخریب نوری تتراسایکلین از پساب آبی‌پروری، نانوکامپوزیت CuO/GO را با روش هم‌رسوبی سنتز شد و کارایی آن را در شرایط عملیاتی مختلف برای حذف تتراسایکلین از پساب‌های مصنوعی و حقیقی آبی‌پروری بررسی نمود. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای این نانوکامپوزیت در حذف تتراسایکلین است و آن را به‌عنوان یک روش مؤثر و نوین در تصفیه آب‌های آلوده به این آلاینده دارویی معرفی می‌کند. ساختار منحصر به فرد نانوکامپوزیت CuO/GO، حاصل از ترکیب اکسید مس و اکسیدگرافن، منجر به افزایش قابل توجه سطح فعال و بهبود انتقال الکترون در واکنش‌های تخریب نوری شده‌است. این ویژگی‌ها، فعالیت نوری و راندمان حذف تتراسایکلین را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. علاوه بر این، بررسی پارامترهای مختلف مانند غلظت نانوکامپوزیت و آلاینده، pH محلول و زمان واکنش، نقش مهمی در بهینه‌سازی فرایند حذف داشته‌اند. نتایج نشان دادند که در شرایط بهینه، نانوکامپوزیت CuO/GO، ۹۷ درصد تجزیه نوری در زمان ۶۰ دقیقه از پساب مصنوعی، و با تجزیه ۸۸ درصدی فاضلاب حقیقی آبی‌پروری در زمان ۳۰ دقیقه، راندمان قابل قبولی در حذف تتراسایکلین در مقایسه با روش‌های سنتی تصفیه، از خود نشان داده است. با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که نانوکامپوزیت CuO/GO نه تنها قابلیت حذف مؤثر تتراسایکلین را داراست، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و کارآمد برای مقابله با آلودگی‌های دارویی در منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها، فرصتی جدید برای توسعه روش‌های تصفیه آب فراهم آورده و گامی اساسی در جهت

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع

- [1] J. Zhang et al., "Photocatalysis coupling with membrane technology for sustainable and continuous purification of wastewater," *Separation and Purification Technology*, vol. 329, p. 125225, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2023.125225.
- [2] R. Mousavi Nadushan and M. Ghiyasabadi, "Identification, introduction, and population fluctuations of cladocerans and copepods in Lake Tar, Damavand," *Journal of Oceanography*, vol. 15, no. 60, pp. 85–98, Mar. 2025, doi: 10.52547/joc.15.60.7.
- [3] A. Balakrishnan and M. Chinthala, "Comprehensive review on advanced reusability of g-C₃N₄ based photocatalysts for the removal of organic pollutants," *Chemosphere*, vol. 297, p. 134190, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134190.

- [12] Z. Xu *et al.*, "Algal organic matter accelerates the photodegradation of tetracycline: Mechanisms, degradation pathways and product toxicity," *Chemical Engineering Journal*, vol. 468, p. 143724, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.143724.
- [13] J. Jing, J. Li, J. Feng, W. Li, and W. W. Yu, "Photodegradation of quinoline in water over magnetically separable Fe₃O₄/TiO₂ composite photocatalysts," *Chemical Engineering Journal*, vol. 219, pp. 355–360, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.cej.2012.12.058.
- [14] M. Hasham Firooz, A. Naderi, M. Moradi, and R. R. Kalantary, "Enhanced tetracycline degradation with TiO₂/natural pyrite S-scheme photocatalyst," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 4954, Feb. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-54549-0.
- [15] D. Chahar, D. Kumar, P. Thakur, and A. Thakur, "Visible light induced photocatalytic degradation of methylene blue dye by using Mg doped Co-Zn nanoferrites," *Materials Research Bulletin*, vol. 162, p. 112205, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.materresbull.2023.112205.
- [16] F. Z. Haque, R. Nandanwar, and P. Singh, "Evaluating photodegradation properties of anatase and rutile TiO₂ nanoparticles for organic compounds," *Optik*, vol. 128, pp. 191–200, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijleo.2016.10.025.
- [17] F. Tavakoli Joorabi, M. Kamali, and S. Sheibani, "Effect of aqueous inorganic anions on the photocatalytic activity of CuO–Cu₂O nanocomposite on MB and MO dyes degradation," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 139, p. 106335, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.mssp.2021.106335.
- [18] R. Ahmadi, R. F. N. Fatahi, P. Sangpour, M. Bagheri, and T. Rahimi, "Evaluation of antibacterial behavior of in situ grown CuO-GO nanocomposites," *Materials Today Communications*, vol. 28, p. 102642, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102642.
- [19] G. Xiao, P. Gao, L. Wang, Y. Chen, Y. Wang, and G. Zhang, "Ultrasonochemical-Assisted Synthesis of CuO Nanorods with High Hydrogen Storage Ability," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2011, no. 1, p. 439162, 2011, doi: 10.1155/2011/439162.
- [20] "Recycled gold-reduced graphene oxide nanocomposite for efficient adsorption and photocatalytic degradation of crystal violet | Scientific Reports." Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-54580-1>
- [4] D. T. Ruziwa *et al.*, "Pharmaceuticals in wastewater and their photocatalytic degradation using nano-enabled photocatalysts," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 54, p. 103880, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103880.
- [5] "Biochar-based nanocomposites for industrial wastewater treatment via adsorption and photocatalytic degradation and the parameters affecting these processes | Biomass Conversion and Biorefinery." Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-023-04512-2>
- [6] S. Ahmady Asbchin, D. Siamian, and N. O. Nasrolahi Omran, "Kinetic and biosorption isotherm studies on biosorption of nickel and cadmium by using Halobacillus trueperi isolated from factory wastewater entry into the Caspian Sea," *Journal of Oceanography*, vol. 15, no. 60, pp. 99–112, Mar. 2025, doi: 10.52547/joc.15.60.8.
- [7] Z. Liu *et al.*, "Empowering wastewater treatment with step scheme heterojunction ternary nanocomposites for photocatalytic degradation of nitrophenol," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 3299, Jan. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-86975-z.
- [8] J. Ma, Y. Chen, G. Zhou, H. Ge, and H. Liu, "Recent Advances in Photocatalytic Degradation of Tetracycline Antibiotics," *Catalysts*, vol. 14, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/catal14110762.
- [9] J. Bi, Z. Zhu, T. Li, and Z. Lv, "Research progress on g-C₃N₄-based materials for efficient tetracyclines photodegradation in wastewater: A review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 66, p. 105941, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105941.
- [10] M. Jahanshahi, R. Afsharipour, and N. alsadat Mirhosseini rayen, "Fabrication of a Spirulina algae-CuFeS₂/CuWO₄ composite for effective photo-Fenton degradation of TC and RhB with environmental assessment," *Journal of Environmental Management*, vol. 381, p. 125340, May 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.125340.
- [11] Y. Zhou *et al.*, "Bandgap engineering of carbon nitride by formic acid assisted thermal treatment for photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride," *Chemical Engineering Journal*, vol. 485, p. 149830, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.149830.

- [26] L. Sawunyama, O. Oyewo, D. C. Onwudiwe, and S. S. Makgato, "Photocatalytic degradation of tetracycline using surface defective black TiO₂-ZnO heterojunction photocatalyst under visible light," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21423.
- [27] H. Abdullahi Ari, Adewole, Alani Olushola, Ugya, Adamu Yunusa, Asipita, Otaru Habiba, Musa, Makiyyu Abdullahi, and W. and Feng, "Biogenic fabrication and enhanced photocatalytic degradation of tetracycline by bio structured ZnO nanoparticles," *Environmental Technology*, vol. 44, no. 9, pp. 1351-1366, Apr. 2023, doi: 10.1080/09593330.2021.2001049.
- [28] M. Hosny, M. Fawzy, and A. S. Eltaweil, "Green synthesis of bimetallic Ag/ZnO@Biohar nanocomposite for photocatalytic degradation of tetracycline, antibacterial and antioxidant activities," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 7316, May 2022, doi: 10.1038/s41598-022-11014-0.
- [21] M. Jahanshahi et al., "Sericin grafted multifunctional curcumin loaded fluorinated graphene oxide nanomedicines with charge switching properties for effective cancer cell targeting," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 572, p. 118791, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijpharm.2019.118791.
- [22] O. Moradi, M. Mirzaian, and S. Sedaghat, "Poly(methyl methacrylate) functionalized graphene oxide/CuO as nanocomposite for efficient removal of dye pollutants," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 22318, Sep. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-72937-4.
- [23] H. Tju, A. Taufik, and R. Saleh, "Enhanced UV Photocatalytic Performance of Magnetic Fe₃O₄/CuO/ZnO/NGP Nanocomposites," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 710, no. 1, p. 012005, Apr. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/710/1/012005.
- [24] W. Bai et al., "Synergistic effect of multiple-phase rGO/CuO/Cu₂O heterostructures for boosting photocatalytic activity and durability," *Applied Surface Science*, vol. 544, p. 148607, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.148607.
- [25] A. Serrà, E. Gómez, J. Michler, and L. Philippe, "Facile cost-effective fabrication of Cu@Cu₂O@CuO-microalgae photocatalyst with enhanced visible light degradation of tetracycline," *Chemical Engineering Journal*, vol. 413, p. 127477, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127477.

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Jahanshahi, M. (Assistant Professor), *Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran.*

✉ mj.jahanshahi@ujiroft.ac.ir

 <https://orcid.org/0000-0002-6672-9801>

Mirhosseini rayen, N (MSc), *Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran.*

✉ neginmirhossini@gmail.com



این قسمت توسط نشریه تکمیل می گردد:



HOW TO CITE THIS ARTICLE

 <http://doi.org/10.52547/joc.16.63.2>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1863-fa.html>

 <https://orcid.org/0000-0002-6672-9801>



COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.