

کاربرد نانو کامپوزیت‌های گرافن اکساید در تخریب فوتوکاتالیستی رنگ‌های آلی پساب‌های صنعتی

منیر نیازی^۱، کسری بهزاد^{۱*}، آفرین بهرامی^۲، زهرا خلج^۱، وحید کیارستمی^۳

^۱گروه فیزیک، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، شهر قدس، ایران

^۲گروه فیزیک، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

^۳گروه شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

ورود پساب‌های رنگی از صنایع نساجی، چاپ و رنگرزی، به دلیل پایداری شیمیایی و مقاومت زیستی رنگ‌ها، تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان محسوب می‌شود. توسعه‌ی روش‌های نوین تصفیه با بهره‌گیری از نانومواد پیشرفته در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در این میان، نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن اکساید به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، گروه‌های عاملی اکسیژنی متعدد و قابلیت اصلاح ساختاری، به عنوان ماده کارآمدی برای تخریب آلاینده‌های آلی به‌ویژه رنگ‌ها مطرح شده‌اند. ترکیب گرافن اکساید با نیمه‌هادی‌ها یا بارگذاری فلزات واسطه بر سطح آن، مانند نانو کامپوزیت‌ها و نانوذرات شامل نقره، روی، تیتانیوم، آهن با بستر پلی‌وینیلیدین منجر به بهبود انتقال بار، کاهش بازترکیب الکترون-حفره و در نهایت افزایش بازدهی فرآیند فوتوکاتالیستی می‌شود. علاوه بر این، خاصیت جذب سطحی بالای گرافن اکساید به همراه عملکرد فوتوکاتالیستی، امکان حذف هم‌زمان رنگ‌ها از محیط آلوده را فراهم می‌سازد. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های گرافن اکساید قادرند رنگ‌های مقاوم متداول از جمله متیلن بلو، متیلن اورنژ و رودامین بی را تحت تابش نور مرئی یا فرابنفش در زمان کوتاه تجزیه کنند. بدین ترتیب، نانوکامپوزیت‌های پایه‌ی گرافن اکساید به‌عنوان گزینه‌ای نوین، کارآمد و سازگار با محیط زیست برای تصفیه پساب‌های رنگی و بهبود کیفیت منابع آبی شناخته می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تخریب رنگ، نانوکامپوزیت گرافن اکساید، پساب‌های صنعتی

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶

فصلنامه ISC
انجمن نانو
فناوری ایران

ایمیل نویسنده مسئول: Kasra.behzad@gmail.com

دنیای نانو

۱. مقدمه

بحران کم‌آبی، توجه به راهبردهایی همچون پیشگیری، مدیریت تقاضا و بازتعریف ارزش آب را ضروری ساخته است. در این راستا، بازیافت و استفاده مجدد از فاضلاب صنعتی به‌ویژه در صنایع نساجی [1]، کاغذ سازی، داروسازی، پلاستیک و صنایع غذایی و غیره اهمیت ویژه‌ای دارد. با افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی و اعمال محدودیت‌های قانونی بر میزان انتشار آلاینده‌ها، رویکردهایی همچون کاهش مصرف آب، به حداقل رساندن تولید پساب و به‌کارگیری فناوری‌های نوین تصفیه و بازیافت به‌عنوان راهکارهای اساسی در جهت حفاظت از محیط زیست و ارتقای بهره‌وری منابع آبی مطرح شده‌اند [۲]. رنگ‌های آلی به‌عنوان یکی از آلاینده‌های پایدار و خطرناک در محیط زیست، به‌طور گسترده در صنایع مذکور مورد استفاده قرار می‌گیرند. پایداری شیمیایی و زیستی بالای این ترکیبات، سبب شده است که بسیاری از آن‌ها در برابر فرآیندهای طبیعی تجزیه مقاوم باشند و برای مدت طولانی در محیط باقی بمانند. ورود این ترکیبات به منابع آبی نه تنها موجب تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی آب می‌شود، بلکه آثار نامطلوبی بر سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی به‌دنبال دارد [۳-۵]. روش‌های فیزیکی همچون جذب سطحی و فیلتراسیون غشایی، روش‌های شیمیایی شامل اکسیداسیون پیشرفته و انعقاد-لخته‌سازی، و همچنین فرآیندهای بیولوژیکی از جمله

این راهکارها به شمار می‌روند [۶]. روش‌های متعددی تاکنون برای حذف رنگ‌های آلی از پساب‌های صنعتی توسعه یافته‌اند. در میان رویکردهای گوناگون تصفیه، جذب و تخریب فوتوکاتالیستی به‌عنوان روش‌هایی کارآمد و نویدبخش مطرح بوده و به دلیل کارایی بالا در حذف آلاینده‌های آلی، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۵، ۷]. فناوری نانو نقش مهمی در جنبه‌های زیست‌محیطی برای حذف آلاینده‌ها در اکوسیستم ایفا می‌کند [۸].

در این مقاله در نظر داریم عملکرد نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن اکساید را در تخریب سه رنگ آلی متیلن بلو، متیلن اورانژ و رودامین بی به‌صورت مقایسه‌ای بررسی کنیم. برای درک بهتر تخریب رنگ، نرم‌افزار Visio 2016 و ابزار آنالین Canva جهت رسم شماتیک ساختار مولکولی به کار گرفته شده است. همچنین با مرور و تحلیل مطالعات محققین پیشین نتایج به دست آمده جمع‌آوری و گزارش شده است. در نهایت، هدف از این مطالعات ارائه یک رویکرد کاربردی تر برای توسعه نانوکامپوزیت‌های کارآمد در زمینه تصفیه پساب‌های صنعتی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی است.

۲. رنگ‌های آلی

رنگ‌ها به‌عنوان ترکیبات آلی آروماتیک با جرم مولکولی نسبتاً بالا شناخته می‌شوند که معمولاً بر اساس کاربرد صنعتی یا ویژگی‌های ساختار شیمیایی خود

دسته‌بندی می‌شوند. از منظر شیمیایی، این ترکیبات به دو گروه اصلی کاتیونی (حامل بار مثبت) و آنیونی (حامل بار منفی) تقسیم می‌شوند [۹]. حضور این ترکیبات در محیط‌های آبی به دلیل ایجاد تغییرات قابل مشاهده در رنگ، نه تنها از نظر زیباشناختی نامطلوب تلقی می‌شود بلکه می‌تواند موجب تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب، از جمله افزایش کدورت، کاهش نفوذ نور و اختلال در فرآیندهای طبیعی اکوسیستم گردد [۱۰]. شایان ذکر است که حتی در غلظت‌هایی پایین‌تر از ۱ ppm نیز، تغییر رنگ آب به‌وضوح قابل مشاهده بوده و این امر چالش جدی در مدیریت و تصفیه پساب‌های آلوده به رنگ ایجاد می‌کند [۹، ۱۱]. در میان انواع رنگ‌ها، رنگ‌های آزو یکی از برجسته‌ترین و پرکاربردترین گروه‌های رنگ‌های تجاری محسوب می‌شوند که حدود ۶۵ الی ۷۰ درصد کل تولید جهانی رنگ‌ها را تشکیل می‌دهند [۱۲، ۱۳]. این ترکیبات آروماتیک دارای گروه‌های عملکردی متنوع نظیر پیوندهای تکی، دوگانه و گروه‌های آزو ($-N=N-$) هستند. حضور گروه‌های نیترو در ساختار آن‌ها علاوه بر افزایش پایداری، سبب ایجاد خاصیت جهش‌زایی، سرطان‌زایی و سمیت قابل توجه می‌شود و تجزیه ناقص آن‌ها می‌تواند محصولات خطرناکی مانند آمین‌های آروماتیک آزاد کند [۱۴، ۱۵] با توجه به تولید گسترده و کاربرد فراوان، رنگ‌های آزو به‌راحتی وارد محیط‌های آبی می‌شوند و به‌عنوان ریزآلاینده‌های پایداری^۱ در اکوسیستم‌های آبی شناخته می‌شوند [۱۲].

فصلنامه
انجمن نانو
فناوری ایران

دنیای نانو

۱۶]. علاوه بر رنگ‌های آزو، رنگ‌های آلی سنتزی نظیر متیلن بلو، متیلن اورنژ و رودامین بی نیز به طور گسترده در صنایع نساجی، کاغذسازی، رنگرزی و چاپ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷]. این ترکیبات به دلیل ساختار آروماتیک پایدار، انحلال‌پذیری بالا و مقاومت در برابر تجزیه زیستی، از مهم‌ترین آلاینده‌های پایداری محیط‌زیستی به شمار می‌روند [۱۸، ۱۹]. ورود این رنگ‌ها به منابع آبی سبب کاهش نفوذ نور، اختلال در فرآیند فتوسنتز موجودات فتوتوتروف، ایجاد تغییرات در زنجیره غذایی، و بروز آثار سمی، جهش‌زا و سرطان‌زا بر سلامت انسان و سایر موجودات زنده می‌شود [۲۰-۲۲]. به منظور روشن‌تر شدن مطلب طبقه‌بندی رنگ‌ها بر اساس گروه عاملی و نمونه‌های آن در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۱ نیز ساختار مولکولی متیلن بلو، متیلن اورنژ و رودامین بی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است به تصویر کشیده شده است.

جدول ۱: طبقه‌بندی رنگ‌های آلی

¹ Persistent Micropollutants

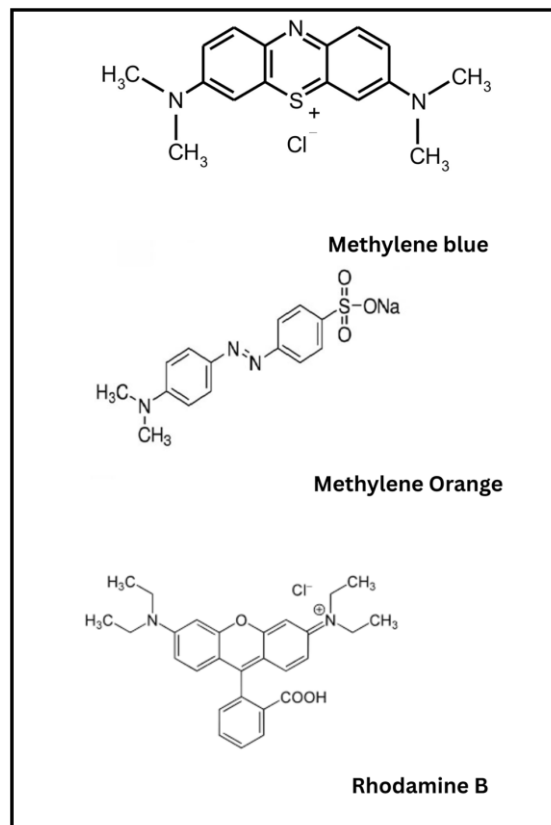
از آب، پتانسیل زیادی برای استفاده در تصفیه آب و

دسته بندی رنگ ها	نمونه رنگ های آلی	گروه های عاملی اصلی
رنگ های آزو	Methyl Orange, Congo Red	-N=N- (آزو)
رنگ های آنتراکینوئیدی	Alizarin	-C=O ، آروماتیک
رنگ های تری آریل متان	Crystal Violet, Malachite Green	-C-N- (آمین (آروماتیک
رنگ های فتالوسیانین	Phthalocyanine Blue/Green	حلقه فتالوسیانین، -NH-
رنگ های کینونیمید	Quinone Dyes	-کوئینون، C=O
رنگ های ناپتول	Naphthol Red	-OH ، آروماتیک

فاضلاب دارند انواع مختلفی از نانومواد نیز برای تصفیه آب و فاضلاب ارائه می شوند که از جمله آنها می توان به نانومواد کربنی، زئولیت ها، پلیمرها و نانوذرات حاوی فلز اشاره کرد [۸]. در این میان، فوتوکاتالیست ها به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در تجزیه رنگ های آلی از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند و امکان تبدیل ترکیبات آلی پایدار به محصولات معدنی بی خطر را فراهم می کنند [۲۳-۲۵].

۳-۱ گرافن اکساید

برای رسیدگی به مشکل حذف آلاینده های نوپدید، به فناوری ها و روش های جدید تصفیه نیاز است. استفاده از گرافن اکساید یکی از این فناوری ها است که نوید حذف آلاینده های نوظهور از آب را داده است [۲۶]. گرافن اکساید به دلیل ساختار لایه ای غنی از



شکل ۲ ساختار مولکولی رنگ های آلی

۳. فناوری نانو در تخریب رنگ

فناوری نانو رویکردها و مواد کارآمدی را برای حل مشکلات پیچیده مختلفی که توسط فناوری ها و تکنیک های معمول قبلی مورد توجه قرار نگرفته بودند، توسعه داده اند. برای یک روش تصفیه مؤثر برای حذف آلاینده ها، به مجموعه ای از مواد طبیعی، نانومواد و نانوکامپوزیت ها نیاز است. ذرات نانو به دلیل داشتن مواد منحصر به فرد با مساحت سطح ویژه بالا برای حذف آلاینده های میکروبی، معدنی و آلی

گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار (مانند هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل)، سطح ویژه بالا و رسانایی مناسب، یکی از مواد برجسته در حوزه نانوکامپوزیت‌ها محسوب می‌شود. این ویژگی‌ها موجب شده است که گرافن اکساید بتواند در ترکیب با فلزات، اکسیدهای فلزی و نیمه‌هادی‌ها به عنوان بستری تقویتی عمل کند و کارایی فوتوکاتالیستی و جذب سطحی آن‌ها را به شکل چشمگیری افزایش دهد [۲۷]. گرافیت یک آلوتروپ سه‌بعدی کربن با ساختار لایه‌ای است که هر یک از این لایه‌ها به عنوان یک لایه گرافن شناخته می‌شوند. با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی قابل توجه گرافن، که شامل مدول یانگ بالا، تحرک بالای الکترون و رسانایی حرارتی بالا کاربردهای قابل توجهی در ابرخازن‌ها، باتری‌ها، پیل‌های سوختی، پرکننده غشاء در تصفیه آب، فوتوکاتالیز، نانوحامل‌ها برای دارورسانی، قطعات خودرو و غیره پیدا کرده است. تفاوت اصلی بین گرافن و گرافن اکساید وجود اکسیژن در ساختار گرافن اکساید است که رسانایی الکتریکی، مقاومت مکانیکی و ویژگی‌های پراکندگی آن را بهبود می‌بخشد. انتخاب بین گرافن و گرافن اکساید به کاربردهای آنها بستگی دارد. برای مثال، عملکرد گرافن در ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند بسیار بهتر از گرافن اکساید باشد. با این حال، گرافن اکساید به عنوان کاتالیزور، انتخاب بهتری است [۲۸].

روش‌های سبز در نانوفناوری، به دلیل مزایایی همچون هزینه‌ی پایین، سرعت بالای فرایند، ایمنی زیست‌محیطی و همچنین ویژگی‌های منحصر به فرد، به عنوان یک رویکرد نوین و قابل توجه در حوزه علم و

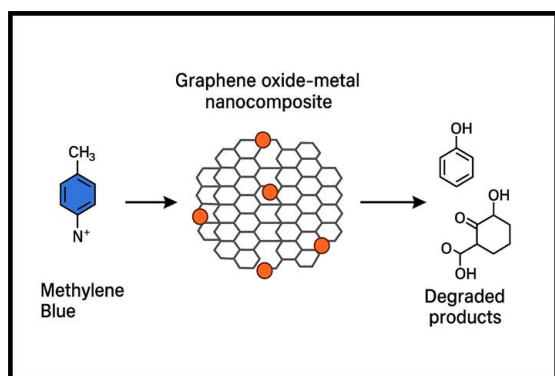
فناوری مطرح شده‌اند. با وجود این، همچنان روش‌های مرسوم به طور گسترده برای سنتز نانومواد نظیر فلزات، اکسیدهای فلزی، نانولوله‌های کربنی و سایر ساختارهای کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این‌رو، توسعه راهبردهای نوین در سنتز و طراحی نانومواد، همراه با ارزیابی در سطوح اتمی، مولکولی و ماکرومولکولی، ضرورتی انکارناپذیر است. چنین رویکردی می‌تواند به تولید مواد نوظهوری منجر شود که دارای خواص الکتریکی، نوری، مغناطیسی و کاتالیزوری برجسته باشند [۲۹-۳۱]. هدف این مطالعه مرور و تحلیل پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کارایی نانوکامپوزیت‌های پایه گرافن اکسید در فرآیند تخریب رنگ‌های متیلن بلو، متیلن اورنژ و رودامین بی است.

۳-۲ نانوکامپوزیت بر پایه گرافن و تخریب متیلن بلو

ژانگ و همکارانش (۲۰۱۹) اثر نانوکامپوزیت پلی وینیلیدین فلوراید/اکسید روی/گرافن اکساید را بر روی تخریب رنگ متیلن بلو تحت نور زنون بررسی کردند و نتیجه مطلوبی گزارش کردند [۳۲]. چگنی و همکارانش (۲۰۲۱) نانوکامپوزیت پرلیت/کبالت/گرافن اکساید کاهش یافته را سنتز کردند و تخریب رنگ متیلن بلو را با این نانوکامپوزیت بررسی کردند و طبق این مطالعه مشخص شد این فوتوکاتالیست، بهترین تخریب رنگ را در pH=11 تحت نور LED از خود نشان داده است [۳۳]. افروزان و همکارانش (۲۰۲۱) نیز اثر نانو

روی/لیگنین^۴ تحت نور مرئی قادر است متیلن بلو را با راندمان بسیار بالا تخریب کند و این ترکیب به عنوان یک فوتوکاتالیست پایدار و کارآمد شناخته می شود [۳۸].

بر اساس شواهد تجربی محققین، نانوکامپوزیت گرافن اکساید/اکسید تیتانیوم بهترین کاربرد را در تخریب متیلن بلو داشته است و در قیاس با سایر فوتوکاتالیست ها بیشترین جذب نور و کمترین باز ترکیب الکترون-حفره را نشان داده است.



شکل ۲: مکانیسم تخریب رنگ متیلن بلو

۳-۳ نانوکامپوزیت بر پایه گرافن و تخریب متیلن اورنژ

اسماعیلی و همکارانش (۲۰۱۶) با سنتز نانوکامپوزیت نقره/برمید نقره/گرافن اکساید و بررسی فرآیند فوتوکاتالیستی، نتیجه مطلوبی را در تخریب متیلن اورانژ گزارش کردند [۳۹]. نگوین و همکارانش (۲۰۱۸) نشان دادند که نانوکامپوزیت اکسید

کامپوزیت های اکسید روی /گرافن اکساید دوپ شده با لانتانیم را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند و به نتایج خوبی از تخریب سونوکاتالیزوری محلول رنگی متیلن بلو تحت فراصوت رسیدند [۳۴]. تأثیر نانو کامپوزیت های اکسید روی، گرافن اکساید و نانوذرات پلیمری پلی وینیل روی تخریب رنگ متیلن بلو تحت نور فرابنفش توسط کاتریسان و همکارانش (۲۰۲۱) بررسی شد و در این میان گرافن اکساید نتایج بهتری در تخریب رنگ نشان داد [۳۵]. در فرآیند تخریب فوتوکاتالیستی رنگ متیلن بلو نگش و همکارانش (۲۰۲۳) با به کارگیری کاتالیزورهای سنتز شده نانوذرات اکسید روی و گرافن اکساید کاهش یافته و ترکیب آن ها به عملکرد بالایی دست یافتند [۲۳]. کارولین و همکارانش (۲۰۲۳) گزارش کردند که ترکیب گرافن اکساید با نانوذرات اکسید آلومینیوم^۲ عملکرد چشمگیری در تخریب متیلن بلو دارد و این ترکیب می تواند جایگزین مناسبی برای فوتوکاتالیست های مرسوم باشد [۳۶]. نادرزاده و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که نانو کامپوزیت اکسید تیتانیوم-گرافن اکساید کاهش^۳ یافته تحت نور مرئی راندمان بالاتری نسبت به اکسید تیتانیوم خالص در تخریب متیلن بلو دارد و این امر ناشی از کاهش باز ترکیب الکترون-حفره و افزایش انتقال بار است [۳۷]. مطالعه یاکوب و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که ترکیب نانوکامپوزیت گرافن اکساید /اکسید

^۲ Al₂O₃

^۳ TiO₂-RGO

^۴ GO/ZnO/Lignin

گرافن اکساید را سنتز کردند و به کمک امواج فراصوت روش کارآمد و مقرون به صرفه ای را برای حذف متیل اورانژ از محیط‌های آبی به کار گرفتند [۴۶]. آمودا و همکارش (۲۰۲۵) نشان دادند که نانوکامپوزیت اکسید زیرکونیوم/گرافن اکساید کاهش^۵ یافته سنتز شده توانست راندمان بالای در تخریب متیلن اورانژ تحت نور مرئی داشته باشد و کاهش چشمگیر در بازترکیب الکترون-حفره ایجاد کند [۴۷].

تحلیل مطالعات تخریب رنگ متیلن اورانژ نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن اکساید در ترکیب با فلزات و نیمه‌هادی‌های مختلف (نقره، روی، آهن، تیتانیوم، قلع، سلنید روی، زیرکونیوم) توانسته‌اند راندمان تخریب متیلن اورانژ را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. این ارتقا عمدتاً ناشی از افزایش جذب نور، کاهش بازترکیب الکترون-حفره و بهبود انتقال بار بوده است. همچنین، استفاده از روش‌های نوین سنتز مانند هیدروترمال، رفلاکس، سنتز سبز و بهره‌گیری از فراصوت و هیدروژل‌های مبتنی بر گرافن مسیرهای تازه‌ای برای دستیابی به فوتوکاتالیست‌های پایدار و مقرون به صرفه فراهم کرده‌اند. طراحی هیبریدی و هدفمند نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به توسعه نسل جدیدی از فوتوکاتالیست‌های کارآمد و سازگار با محیط‌زیست برای حذف رنگ‌های آلی از محیط‌های آبی منجر شود.

روی/گرافن اکساید^۵ سنتز شده به روش هیدروترمال، راندمان بالایی در تخریب رنگ متیلن اورانژ تحت تابش نور فرابنفش دارد این عملکرد به دلیل افزایش جذب نور و کاهش بازترکیب الکترون-حفره گزارش شد [۴۰]. نانوکامپوزیت مغناطیسی اکسید آهن/گرافن اکساید^۶ توسط خواجه و همکارانش (۲۰۲۰) سنتز شد و با بررسی تأثیر این نانوکامپوزیت در جذب رنگ متیلن اورانژ به نتایج خوبی دست یافتند [۴۱]. اثر فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت اکسید تیتانیوم/گرافن اکساید/نقره^۷ جهت حذف رنگ متیلن اورانژ تحت تابش خورشید را رشید المومن و همکارانش (۲۰۲۱) مورد مطالعه قرار دادند و مشخص شد که این نانوکامپوزیت در حذف این رنگ بسیار مؤثر بوده است [۴۲]. اوپیم و همکارانش به راندمان بالایی در تخریب متیلن اورانژ توسط سنتز نانوکامپوزیت اکسید روی-قلع/گرافن اکساید^۸ دست یافتند [۴۳]. عشوری و همکارانش (۲۰۲۲) نیز افزایش راندمان فوتوکاتالیستی گرافن اکساید و نیتريد کربن را با افزودن $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ بررسی و گزارش دادند [۴۴]. فرحمن‌زاده و همکارانش (۲۰۲۴) به روش رفلاکس نانوکامپوزیت سلنید روی/اکسید آهن/گرافن اکساید کاهش یافته^۹ را سنتز کردند و از آن جهت تخریب رنگ متیلن اورانژ بهره بردند و نتایج خوبی در تخریب رنگ گزارش کردند [۴۵]. تاک تاک و همکارانش (۲۰۲۴) نانوکامپوزیت‌های هیدروژل مبتنی بر

⁵ ZnO/GO

⁶ Fe₃O₄/GO

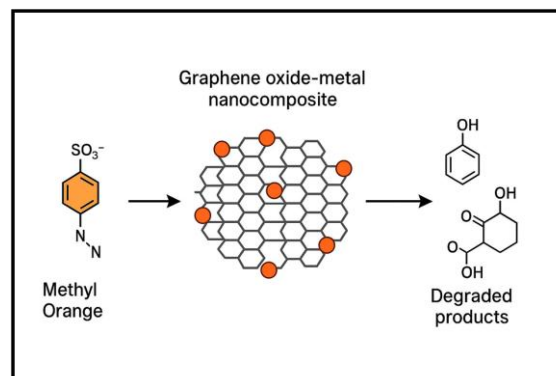
⁷ TiO₂/GO/Ag

⁸ ZnO-Sn/GO

⁹ rGO/Fe₃O₄/ZnSe

¹⁰ rGO/ZrO₂

راندمان بالاتری نسبت به اکسید تیتانیوم یا گرافن اکساید دارد [۵۰]. پرابهاکار رائو و همکارانش (۲۰۲۱) نانوکامپوزیت نیویوم^{۱۲} دوپ شده با اکسید تیتانیوم/گرافن اکساید کاهش یافته^{۱۳} را سنتز کردند و گزارش کردند که این ترکیب تحت نور مرئی راندمان بالاتری در تخریب رودامین بی نسبت به اکسید تیتانیوم دوپ شده داشت [۵۱]. علوان و همکارانش (۲۰۲۲) با موفقیت نانوکامپوزیت‌های اکسید تیتانیوم/گرافن اکساید کاهش یافته^{۱۴} را با روش هیدروترمال سنتز کردند و از آن جهت تخریب رنگ رودامین بی در محلول آبی تحت نور مرئی استفاده کردند و نتایج خوبی را گزارش کردند [۵۲]. سنتز نانوذرات تلورید روی^{۱۵} حساس به نور خورشید و کامپوزیت آنها با گرافن اکساید کاهش یافته^{۱۶} از طریق یک واکنش هیدروترمال ساده توسط دانانجوی و همکارانش (۲۰۲۲) با موفقیت انجام شد و دینامیک انتقال بار و اهمیت تحرک بالاتر حامل‌ها در تخریب رودامین بی مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد کامپوزیت گرافن فعالیت فوتوکاتالیستی نسبتاً بالاتری نسبت به ترکیب تلورید روی تحت تابش نور مرئی داشت و این خاصیت در طول فرآیند تخریب بسیار کمک کرد. و نشان داد این کامپوزیت می‌تواند فوتوکاتالیست امیدوارکننده‌ای در تصفیه فاضلاب باشد [۲۰]. نیلی و همکاران (۲۰۲۴) چندین نانوکاتالیست تک و دو فلزی را با روش سل-



شکل ۳: مکانیسم تخریب رنگ متیلن اورنژ

۳-۴ نانوکامپوزیت بر پایه گرافن و تخریب رودامین بی

الشفائی و همکارانش (۲۰۱۸) سنتز و مشخصه‌یابی نانوکامپوزیت‌های متشکل از گرافن اکساید-اکسیدهای فلزی گرافن اکساید/اکسید آهن/اکسید زیرکونیوم را انجام دادند و مشخص شد که این ترکیبات قادر است رودامین بی را با راندمان بالا تحت نور مرئی تخریب کنند [۴۸]. راماناتان و همکارانش (۲۰۱۹) با استفاده از عصاره گریپ‌فروت و برگ گیاه سنبل آبی^{۱۱} نانوکامپوزیت‌های اکسید روی/گرافن اکساید کاهش یافته را سنتز کردند و گزارش کردند که این ترکیبات در تخریب رودامین بی عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری نسبت به اکسید روی خالص داشتند [۴۹]. نگوین و همکارانش (۲۰۲۰) نانوکامپوزیت اکسید آهن/اکسید تیتانیوم/گرافن اکساید را سنتز کردند و نتایج نشان داد که این ترکیب در تخریب رودامین بی تحت نور مرئی

فصلنامه
انجمن نانو
فناوری ایران

دنیای نانو

¹² Nb

¹³ TiO₂/rGO

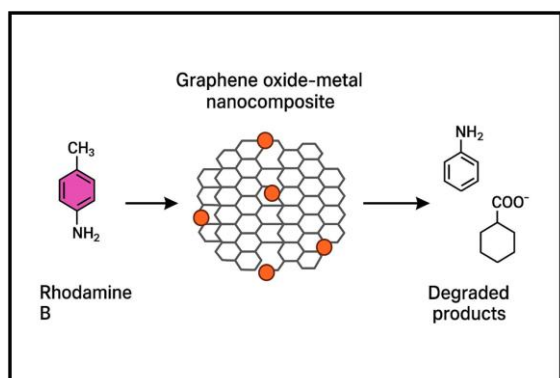
¹⁴ TiO₂/rGO

¹⁵ ZnTe

¹⁶ rGO-ZnTe

¹¹ Eichhornia crassipes

رودامین بی و سایر رنگ‌های آلی از محیط‌های آبی منجر شود.



شکل ۴: مکانیسم تخریب رنگ رودامین بی

با توجه به **Error! Reference source not found.** که نتایج جمع آوری شده از مطالعات انجام شده را نشان می دهد، می توان گفت که طراحی هیبریدی و هدفمند نانوکامپوزیت‌های گرافنی نه تنها موجب ارتقای راندمان تخریب رنگ‌های آلی در شرایط نوری مختلف شده است، بلکه زمینه‌ساز توسعه نسل جدیدی از فوتوکاتالیست‌های پایدار، مقرون به صرفه و قابل تجاری‌سازی برای تصفیه پساب‌های صنعتی است. رویکرد پیشنهادی در خصوص طراحی هیبریدی یعنی ساخت فوتوکاتالیست‌های چندجزئی هوشمند که ترکیبشان دقیقاً بر اساس نیاز و ویژگی‌های رنگ یا آلاینده هدف انتخاب می‌شود، می‌تواند به عنوان یک راهکار کلیدی در فناوری‌های تصفیه آب و محیط‌زیست مطرح شود.

ایمبیلیزاسیون^{۱۷} تهیه کردند و به عنوان فوتوکاتالیست برای تخریب رنگ رودامین بی مورد آزمایش قرار دادند مشخص شد فوتوکاتالیست طلا-پالادیوم/گرافن اکساید کاهش یافته^{۱۸} قدرت کاتالیزوری امیدوارکننده‌ای نسبت به سایر کاتالیزورها دارد و علاوه بر آن پارامترهای مختلفی از جمله pH، غلظت کاتالیزور برای دستیابی به شرایط بهینه تأثیر گذار می باشد [۵۳].

تحلیل این پژوهش ها بیان می کند که نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن اکساید در ترکیب با اکسیدهای فلزی و نیمه‌هادی‌های مختلف (مانند اکسید آهن، اکسید زیرکونیوم، اکسید روی، اکسید تیتانیوم، تلورید روی و کاتالیست‌های دو فلزی طلا-پالادیوم) توانسته‌اند راندمان تخریب رودامین بی را تحت نور مرئی و خورشید به‌طور چشمگیری افزایش دهند. این ارتقا عمدتاً ناشی از بهبود جذب نور، کاهش بازترکیب الکترون-حفره و ارتقای انتقال بار بوده است، به‌ویژه در ترکیبات دوپ شده یا سنتز شده به روش‌های نوین مانند هیدروترمال، سل-ایمبیلیزاسیون و سنتز سبز. همچنین، استفاده از منابع طبیعی و پایدار در فرآیند سنتز و بهره‌گیری از نانوذرات فلزی یا نیمه‌هادی‌های حساس به نور، مسیر تازه‌ای برای توسعه فوتوکاتالیست‌های کارآمد و سازگار با محیط‌زیست فراهم کرده است. در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی هیبریدی و هدفمند نانوکامپوزیت‌های گرافنی می‌تواند به توسعه نسل جدیدی از فوتوکاتالیست‌های پایدار برای حذف

^{۱۷} sol-immobilization method

^{۱۸} Au-Pd/rGO

۴. نتیجه

بررسی جامع مطالعات نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن اکساید، به‌ویژه در ترکیب با فلزات نیمه‌هادی (مانند SnO_2 , TiO_2 , ZnO) و فلزات نجیب (مانند Ag , Au , Pd)، توانسته‌اند راندمان فوتوکاتالیستی قابل توجهی در تخریب رنگ‌های آلی متداول نظیر متیلن بلو، متیل اورانژ و رودامین بی ارائه دهند. این ترکیبات با افزایش جذب نور مرئی، کاهش بازترکیب الکترون-حفره و ارتقای تولید رادیکال‌های فعال، مسیرهای واکنش فوتوکاتالیستی را بهینه کرده‌اند.

دیدگاه جدیدی که در این تحقیق ما به آن رسیدیم حاکی از این است که این مطالعات در طراحی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی چندجزئی نهفته است؛ جایی که ترکیب گرافن اکساید با ساختارهای مغناطیسی، هیدروژل‌های زیست‌تخریب‌پذیر و روش‌های سنتز سبز، علاوه بر افزایش راندمان، امکان پایداری عملیاتی، جداسازی آسان و سازگاری زیست‌محیطی را فراهم کرده است. این ویژگی‌ها، گرافن اکساید را از یک ماده آزمایشگاهی به یک گزینه جدی برای کاربردهای صنعتی در تصفیه پساب‌های نساجی و صنایع رنگی ارتقا داده‌اند. طراحی هیبریدی در حوزه فوتوکاتالیست‌ها به معنای مهندسی و ترکیب هدفمند چند ماده با ویژگی‌های مکمل (مانند

جدول ۲ مقایسه عملکرد نانوکامپوزیت‌های گرافن اکساید در تخریب رنگ‌های آلی طی سال‌های اخیر

متیلن بلو	Perlite-Cobalen-rGO , ZnO/GO:La , ZnO/GO/Polyvinyl , TiO ₂ -rGO , ZnO+rGO , GO+Al ₂ O ₃ , GO/ZnO/Lignin	زنون، LED، فراصوت، UV، مرئی	تخریب مؤثر، راندمان بالا، کاهش بازترکیب $e^- - h^+$ زیست‌سازگار
متیل اورانژ	Ag/AgBr/GO , ZnO/GO , Fe ₃ O ₄ /GO , TiO ₂ /GO/Ag , ZnO-SnO ₂ /GO , GO/g-C ₃ N ₄ +La ₂ Ti ₂ O ₇ , ZnSe/Fe ₂ O ₃ /rGO , Hydrogel/GO , rGO/ZrO ₂	UV، خورشید، مرئی، فراصوت	راندمان بالا، جذب مؤثر، کاهش بازترکیب، روش‌های مقرون‌به‌صرفه
رودامین بی	GO-Fe ₃ O ₄ @ZrO ₂ , ZnO/rGO , Fe ₃ O ₄ -TiO ₂ -GO , Nb-TiO ₂ /rGO , TiO ₂ /rGO , ZnTe/rGO , Au-Pd/rGO	مرئی، خورشید، شرایط مختلف pH	راندمان بالا، عملکرد بهتر نسبت به ترکیبات خالص، فوتوکاتالیست امیدوارکننده

فصلنامه
انجمن نانو
فناوری ایران

دنیای نانو

- nanocomposites for dye photocatalytic degradation: A review," *Materials*, vol. 17, no. 1, p. 135, 2023.
- [4] K. G. Thakre, D. P. Barai, and B. A. Bhanvase, "A review of graphene-TiO₂ and graphene-ZnO nanocomposite photocatalysts for wastewater treatment," *Water Environment Research*, vol. 93, no. 11, pp. 2414-2460, 2021.
- [5] V. Selvaraj, T. S. Karthika, C. Mansiya, and M. Alagar, "An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications," *Journal of molecular structure*, vol. 1224, p. 129195, 2021.
- [6] V. K. Gupta, R. Kumar, A. Nayak, T. A. Saleh, and M. Barakat, "Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes: a review," *Advances in colloid and interface science*, vol. 193, pp. 24-34, 2013.
- [7] S. Khan, T. Noor, N. Iqbal, and L. Yaqoob, "Photocatalytic dye degradation from textile wastewater: a review," *ACS omega*, vol. 9, no. 20, pp. 21751-21767, 2024.
- [8] A. A. Ayalew, "A critical review on clay-based nanocomposite particles for application of wastewater treatment," *Water Science and Technology*, vol. 85, no. 10, pp. 3002-3022, 2022.
- [9] Y. Al-Degs, M. Khraisheh, S. Allen, and M. Ahmad, "Sorption behavior of cationic and anionic dyes from aqueous solution on different types of activated carbons," *Separation Science and Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 91-102, 2001.
- [10] Y. Zhang *et al.*, "Study on anionic and cationic dye adsorption behavior and mechanism of biofilm produced by *Bacillus amyloliquefaciens* DT," *Applied Surface Science*, vol. 573, p. 151627, 2022.
- [11] D. P. Mishra, P. K. Sahu, B. Acharya, S. P. Mishra, and S. Bhati, "A review of the synthesis and application of azo dyes and metal complexes for emerging antimicrobial therapies,"
- گرافن اکساید با سطح ویژه و قابلیت انتقال بار بالا و اکسیدهای فلزی با توانایی جذب نور و تولید جفت الکترون-حفره) است؛ رویکردی که با ایجاد هم‌افزایی عملکردی، موجب افزایش کارایی فوتوکاتالیستی، کاهش بازترکیب حامل‌های بار و ارتقای پایداری فرآیندهای تخریب آلاینده‌های آلی در محیط‌های آبی می‌شود. چشم‌انداز آینده نشان می‌دهد که تمرکز بر بهینه‌سازی شرایط آزمایشگاهی (pH، شدت نور، غلظت رنگ)، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، و توسعه‌ی مقیاس صنعتی می‌تواند مسیر تجاری‌سازی این فناوری را هموار سازد. همچنین، ترکیب گرافن اکساید با دوپینگ فلزی هدفمند و طراحی ساختارهای متخلخل پیشرفته می‌تواند نسل جدیدی از فوتوکاتالیست‌های پایدار و کارآمد را برای حذف مؤثر آلاینده‌های آلی از محیط‌های آبی معرفی کند.

۵. منابع

- [1] D. Bhatia, N. R. Sharma, J. Singh, and R. S. Kanwar, "Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 47, no. 19, pp. 1836-1876, 2017.
- [2] E. Routoula and S. V. Patwardhan, "Degradation of anthraquinone dyes from effluents: a review focusing on enzymatic dye degradation with industrial potential," *Environmental science & technology*, vol. 54, no. 2, pp. 647-664, 2020.
- [3] J. Campos-Delgado and M. E. Mendoza, "Ternary graphene oxide and titania nanoparticles-based



- [21] K. Elewa, A. Tawfic, M. Tarek, N. A. Al-Sagheer, and N. M. Nagy, "Removal of methylene blue from synthetic industrial wastewater by using geopolymer prepared from partially dealuminated metakaolin," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 17633, 2025.
- [22] Y. Liu *et al.*, "Environmental Impacts and Biological Technologies Toward Sustainable Treatment of Textile Dyeing Wastewater: A Review," *Sustainability (2071-1050)*, vol. 16, no. 24, 2024.
- [23] A. Negash, S. Mohammed, H. D. Weldekirstos, A. D. Ambaye, and M. Gashu, "Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using eco-friendly synthesized rGO@ZnO nanocomposites," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 22234, 2023.
- [24] Y. Qin, Z. Sun, W. Zhao, Z. Liu, D. Ni, and Z. Ma, "Improved photocatalytic properties of ZnS/RGO nanocomposites prepared with GO solution in degrading methyl orange," *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 10, pp. 176-181, 2017.
- [25] R. Raliya, C. Avery, S. Chakrabarti, and P. Biswas, "Photocatalytic degradation of methyl orange dye by pristine titanium dioxide, zinc oxide, and graphene oxide nanostructures and their composites under visible light irradiation," *Applied Nanoscience*, vol. 7, no. 5, pp. 253-259, 2017.
- [26] B. Anegbe, I. H. Ifijen, M. Maliki, I. E. Uwidia, and A. I. Aigbodon, "Graphene oxide synthesis and applications in emerging contaminant removal: a comprehensive review," *Environmental Sciences Europe*, vol. 36, no. 1, p. 15, 2024.
- [27] L. Sun, "Structure and synthesis of graphene oxide," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 2251-2260, 2019.
- [28] N. Pourmoghaddam and N. Ayas, "Synthesis, structure characterization, and electrochemical hydrogen storage of reduced graphene oxide and graphene," *International Journal of Results in Chemistry*, vol. 10, p. 101712, 2024.
- [12] S. H. Hashemi and M. Kaykhahi, "Azo dyes: sources, occurrence, toxicity, sampling, analysis, and their removal methods," in *Emerging freshwater pollutants*: Elsevier, 2022, pp. 267-287.
- [13] M. Berradi *et al.*, "Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs," *Heliyon*, vol. 5, no. 11, 2019.
- [14] P. Patil, U. Shedbalkar, D. Kalyani, and J. Jadhav, "Biodegradation of Reactive Blue 59 by isolated bacterial consortium PMB11," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 35, no. 10, pp. 1181-1190, 2008.
- [15] D. Rawat, V. Mishra, and R. S. Sharma, "Detoxification of azo dyes in the context of environmental processes," *Chemosphere*, vol. 155, pp. 591-605, 2016.
- [16] A. Strebel, M. Behringer, H. Hilbig, A. Machner, and B. Helmreich, "Anionic azo dyes and their removal from textile wastewater through adsorption by various adsorbents: a critical review," *Frontiers in Environmental Engineering*, vol. 3, p. 1347981, 2024.
- [17] K. Behzad, P. Attarzade, and A. Bahrami, "Methylene blue removal in a batch reactor using synthesized CdO nanoparticles," 2021.
- [18] S. Al-Qaradawi and S. R. Salman, "Photocatalytic degradation of methyl orange as a model compound," *Journal of Photochemistry and photobiology A: Chemistry*, vol. 148, no. 1-3, pp. 161-168, 2002.
- [19] I. Khan *et al.*, "Review on methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation," *Water*, vol. 14, no. 2, p. 242, 2022.
- [20] D. Das, M. Das, S. Sil, P. Sahu, and P. P. Ray, "Effect of higher carrier mobility of the reduced graphene oxide-zinc telluride nanocomposite on efficient charge transfer facility and the photodecomposition of rhodamine B," *ACS omega*, vol. 7, no. 30, pp. 26483-26494, 2022.



- [37] R. Naderzadeh, M. Vesali-Naseh, and M. Rezaeivala, "Enhanced photocatalytic performance of mixed-phase TiO₂-RGO nanocomposite for fast methylene blue decomposition under visible light," *Research on Chemical Intermediates*, pp. 1-16, 2025.
- [38] T. Yakub, A. Asthana, S. Sanwaria, A. K. Singh, and S. A. Carabineiro, "Highly Efficient Graphene Oxide/Zinc Oxide/Lignin Catalyst for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue and Gentian Violet," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 17, p. 1342, 2025.
- [39] A. Esmaeili and M. H. Entezari, "Sonosynthesis of an Ag/AgBr/Graphene-oxide nanocomposite as a solar photocatalyst for efficient degradation of methyl orange," *Journal of colloid and interface science*, vol. 466, pp. 227-237, 2016.
- [40] V. N. Nguyen *et al.*, "Enhanced photocatalytic degradation of methyl orange using ZnO/graphene oxide nanocomposites," *Research on Chemical Intermediates*, vol. 44, no. 5, pp. 3081-3095, 2018.
- [41] M. Khajeh and A. Barkhordar, "Fe₃O₄/graphene oxide composite for adsorption of methylene blue and methyl orange in water treatment," *Journal of Applied Spectroscopy*, vol. 87, no. 4, pp. 701-707, 2020.
- [42] M. R. Al-Mamun, M. N. Karim, N. A. Nitun, S. Kader, M. S. Islam, and M. Z. H. Khan, "Photocatalytic performance assessment of GO and Ag co-synthesized TiO₂ nanocomposite for the removal of methyl orange dye under solar irradiation," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 22, p. 101537, 2021.
- [43] O. A. Oyewo, S. Ramaila, L. Mavuru, and D. C. Onwudiwe, "Enhanced photocatalytic degradation of methyl orange using Sn-ZnO/GO nanocomposite," *Journal of Photochemistry and Photobiology*, vol. 11, p. 100131, 2022.
- [29] A. K. Potbhare *et al.*, "Bioinspired graphene-based metal oxide nanocomposites for photocatalytic and electrochemical performances: an updated review," *Nanoscale Advances*, vol. 6, no. 10, pp. 2539-2568, 2024.
- [30] K. Behzad, M. Niazi, and A. Bahrami, "Synthesis of ZnO/Graphene Oxide Nanocomposites and Investigating their Applications in Photo-removal of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution under Ultra Violet Light."
- [31] P. Mosayebi, D. Dorrani, A. Sari, and K. Behzad, "Water chemical treatment by photocatalytic activity of reduced graphene oxide-decorated zinc sulfide nanocomposite," *Physica Scripta*, vol. 98, no. 11, p. 115949, 2023.
- [32] D. Zhang, F. Dai, P. Zhang, Z. An, Y. Zhao, and L. Chen, "The photodegradation of methylene blue in water with PVDF/GO/ZnO composite membrane," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 96, pp. 684-692, 2019.
- [33] حدیث، "بررسی تخریب متیلن بلو از محلول های آبی با استفاده از نانوکامپوزیت پرلیت-کبالت اکسید-گرافن اکسید کاهش یافته"، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*, vol. 40, no. 4, pp. 43-54, 2022.
- [34] محمدخواه، "بهبود حذف رنگزا and بازقلعه، عادلۀ در حضور La: ZnO/GO متیلن بلو با نانوکامپوزیت"، *فراصوت*, vol. 16, no. 58, pp. 77-94, 2021.
- [35] G. Kathiresan, K. Vijayakumar, A. P. Sundarajan, H.-S. Kim, and K. Adaikalam, "Photocatalytic degradation efficiency of ZnO, GO and PVA nanoadsorbents for crystal violet, methylene blue and trypan blue dyes," *Optik*, vol. 238, p. 166671, 2021.
- [36] R. C. Jeba and M. K. Kalsi, "Degradation of methylene blue using graphene oxide and aluminium oxide nanoparticles and nanocomposites."

- [50] K. D. V. Nguyen and K. D. N. Vo, "Magnetite nanoparticles-TiO₂ nanoparticles-graphene oxide nanocomposite: Synthesis, characterization and photocatalytic degradation for Rhodamine-B dye," *AIMS Materials Science*, vol. 7, no. 3, 2020.
- [51] N. Prabhakar Rao *et al.*, "Enhanced photocatalytic performance of Nb doped TiO₂/reduced graphene oxide nanocomposites over rhodamine B dye under visible light illumination," *Sustainable Environment Research*, vol. 31, no. 1, p. 37, 2021.
- [52] S. H. Alwan, K. H. Salem, and H. A. Alshamsi, "Visible light-driven photocatalytic degradation of Rhodamine B dye onto TiO₂/rGO nanocomposites," *Materials Today Communications*, vol. 33, p. 104558, 2022.
- [53] A. Al-nayili, H. Khayoon, H. Alshamsi, and N. C. Saady, "A novel bimetallic (Au-Pd)-decorated reduced graphene oxide nanocomposite enhanced Rhodamine B photocatalytic degradation under solar irradiation," *Materials Today Sustainability*, vol. 24, p. 100512, 2023.
- [44] F. Ashouri, M. Khoobi, M. R. Ganjali, and M. S. Karimi, "Construction, characterization, and photocatalytic study of La₂Ti₂O₇/C₃N₄·xH₂O and La₂Ti₂O₇/GO nanocomposites as efficient catalysts toward photodegradation of harmful organic dyes," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 435, p. 114279, 2023.
- [45] F. Farahmandzadeh, M. Molaei, S. Salehi, and E. Molahosseini, "Simultaneous and fast degradation of methylene blue, methylene orange, and Rhodamine B dyes by high-performance rGO/Fe₃O₄/ZnSe magnetic nanocomposites," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 685, p. 133229, 2024.
- [46] F. Taktak and S. Gökçe, "Ultrasound-assisted synthesis of biodegradable graphene oxide-based hydrogel nanocomposites for highly efficient and cost-effective removal of methyl orange from aqueous media," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 58, p. 104837, 2024.
- [47] C. Amudha and M. Santhi, "Photocatalytic activity of methyl orange degradation by Datura stramonium synthesized r-GO/ZrO₂ nanocomposites," *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 1-13, 2025.
- [48] N. M. El-Shafai, M. E. El-Khouly, M. El-Kemary, M. S. Ramadan, and M. S. Masoud, "Graphene oxide-metal oxide nanocomposites: fabrication, characterization and removal of cationic rhodamine B dye," *RSC advances*, vol. 8, no. 24, pp. 13323-13332, 2018.
- [49] S. Ramanathan *et al.*, "Synthesis of reduced graphene oxide/ZnO nanocomposites using grape fruit extract and Eichhornia crassipes leaf extract and a comparative study of their photocatalytic property in degrading Rhodamine B dye," *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 195-207, 2019.



Applications of Graphene Oxide Nanocomposites in Photocatalytic Degradation of Organic Dyes in Industrial Wastewater

Monir Niazi¹, Kasra Behzad^{1*}, Afarin Bahrami², Zahra Khalaj¹, Vahid Kiarostami³

¹ Department of Physics, ShQ.C., Islamic Azad University, Shahr-e Qods, Iran.

² Department of Physics, Isl.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Department of Chemistry, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract:

The discharge of dye-containing wastewater from textile, printing, and dyeing industries poses a significant threat to the environment and human health due to the chemical stability and biological resistance of dyes. In recent years, the development of advanced treatment methods using nanomaterials has garnered considerable attention. Among these, graphene oxide-based nanocomposites have emerged as promising materials for the degradation of organic pollutants, particularly dyes, owing to their high specific surface area, abundant oxygen-containing functional groups, and tunable structural properties. The integration of graphene oxide with semiconductors or the loading of transition metals—such as silver, zinc, titanium, and iron, iron with polyvinylidene substrate—onto its surface, enhances charge transfer, reduces electron-hole recombination, and ultimately improves photocatalytic efficiency. Furthermore, the high adsorption capacity of graphene oxide, combined with its photocatalytic activity, enables the simultaneous removal of dyes from contaminated environments. Recent studies have demonstrated that graphene oxide nanocomposites can effectively degrade common resistant dyes such as methylene blue, methyl orange, and rhodamine B under visible or ultraviolet light within short timeframes. Consequently, graphene oxide-based nanocomposites are recognized as innovative, efficient, and environmentally friendly candidates for the treatment of dye polluted wastewater and the improvement of water quality.

Keywords: Dye degradation, Graphene oxide nanocomposites, Industrial wastewater

فصلنامه
انجمن نانو
فناوری ایران

دنیای نانو