



Semnan University



Research Article

Sonochemical Synthesis of Iron Vanadate/Reduced Graphene Oxide Nanocomposite and Investigation of Its Optical and Photocatalytic Properties

Mohammad Ghodrati, Mehdi Mousavi-Kamazani* , Marzieh Sheikh-Dastjerdi

Department of Nanotechnology, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 13/Dec/2025

Revised: 13/May/2026

Accepted: 18/May/2026

Keywords:

Fe_{0.5}V_{3.5}O₈/rGO,
Nanocomposite,
Sonochemical synthesis,
Photocatalyst,
Methylene blue.

ABSTRACT

This research focuses on the successful synthesis of the Fe_{0.5}V_{3.5}O₈/rGO nanocomposite through a simple sonochemical method. Structural characterization results indicated that the Fe_{0.5}V_{3.5}O₈/rGO phase (with an orthorhombic structure) was formed in the final sample by the complete reduction of GO (graphene oxide) to rGO (reduced graphene oxide). Microscopic images confirmed that the presence of rGO significantly improved the morphology, reduced the particle size, and resulted in their uniform dispersion on the graphene sheets. Optical properties analysis by DRS spectroscopy showed a noticeable red shift and a reduction in the bandgap from 2 eV to 1.6 eV in the nanocomposite, which drastically increased its absorption capability in the visible light region. Photocatalytic evaluation in the degradation of methylene blue (MB) under visible light irradiation using a 400 W Osram lamp for 30 minutes revealed that the nanocomposite achieved a degradation efficiency of 81%. This superior performance is directly attributed to enhanced surface adsorption and improved optical properties, compared to the pure metal oxide. Experimental data indicated that the reaction follows a zero-order kinetic model, with a high correlation coefficient of $R^2 = 0.96$. These results demonstrate the efficiency of the Fe_{0.5}V_{3.5}O₈/rGO nanocomposite in the removal of MB.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.40038.2417>

© 2026 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Associate Professor of Nanochemistry. E-mail address: M.Mousavi@semnan.ac.ir

How to cite this article: Ghodrati, M., Mousavi-Kamazani, M. & Sheikh-Dastjerdi, M. (2026). Sonochemical Synthesis of Iron Vanadate/Reduced Graphene Oxide Nanocomposite and Investigation of Its Optical and Photocatalytic Properties. *Applied Chemistry Today*, 21(78), 139-154. (in Persian)

سنتز نانوکامپوزیت آهن وانادات/گرافن اکساید کاهش یافته به روش سونوشیمی و

بررسی خواص نوری و فوتوکاتالیزوری آن

محمد قدرتی، مهدی موسوی کمزانی*، مرضیه شیخ دستجردی

گروه نانوشیمی، دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲	این پژوهش بر سنتز موفق نانوکامپوزیت آهن وانادات گرافن اکساید کاهش یافته ($Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$) از طریق یک روش سونوشیمی ساده تمرکز دارد. نتایج مشخصه‌یابی ساختاری نشان داد که فاز $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ (دارای ساختار اورتورومبیک) با احیای کامل گرافن اکساید (GO) به گرافن اکساید کاهش یافته (rGO) در نمونه‌ی نهایی تشکیل شده است. تصاویر میکروسکوپی تأیید کردند که حضور rGO باعث بهبود قابل توجه مورفولوژی، کاهش اندازه ذرات و پراکندگی یکنواخت آن‌ها بر روی صفحات گرافن شده است. بررسی خواص نوری توسط طیف‌سنجی، یک انتقال به سرخ قابل توجه و کاهش شکاف نوار از ۲ eV به ۱/۶ eV را در نانوکامپوزیت نشان داد که قابلیت جذب آن در ناحیه نور مرئی را به شدت افزایش داده است. ارزیابی فوتوکاتالیزوری در تخریب متیلن بلو (MB) تحت تابش نور مرئی توسط لامپ ۴۰۰ وات اسرام به مدت ۳۰ دقیقه نشان داد که نانوکامپوزیت با راندمان ۸۱٪، به دلیل جذب سطحی بهتر و خواص نوری تقویت‌شده، عملکرد بسیار بالاتری نسبت به اکسید فلزی خالص دارد. داده‌های تجربی نشان دادند که واکنش از مدل سینتیکی مرتبه صفر پیروی می‌کند و ضریب همبستگی بالایی $R^2 = 0.96$ به دست آمد. این نتایج بیانگر کارایی نانوکامپوزیت $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ در حذف MB است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸	
کلمات کلیدی: $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ نانوکامپوزیت، سنتز سونوشیمیایی، فوتوکاتالیزور، متیلن بلو.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.40038.2417>This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

تأمین آب آشامیدنی سالم به عنوان یکی از مهم‌ترین معضلات جهانی در قرن حاضر شناخته می‌شود. صنعتی‌سازی فزاینده به میزان چشمگیری بر آلودگی منابع آبی دامن زده است. در این میان، رنگ‌ها به عنوان یک دسته‌ی عمده از آلاینده‌ها مطرح هستند. این ترکیبات به دلیل استفاده‌ی گسترده در بخش‌هایی چون نساجی، چاپ و تولید مواد غذایی به طور فراوانی وارد محیط‌های آبی می‌شوند. تولید و مصرف رنگ‌های مصنوعی سهم قابل توجهی در آلودگی آب‌های جهان دارد، به طوری که صنعت نساجی به عنوان یکی از منابع اصلی آلاینده در اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شود [۱، ۲].

آلاینده‌های رنگی رایج مانند متیلن بلو، رودامین B [۳]، کریستال ویولت [۴]، متیل اورنج و متیل رد [۵]، از خروجی صنایع مختلفی نظیر منسوجات، آرایشی، چرم‌سازی، داروسازی، رنگ و لاک و تولید کاغذ سرچشمه می‌گیرند. حتی مقدار بسیار کم (کمتر از یک میلی‌گرم در لیتر) از این رنگ‌های مصنوعی، آب را برای آشامیدن نامناسب می‌سازد [۶].

به دلیل پایداری بالا و مقاومت در برابر تجزیه طبیعی، این مواد شفافیت آب را کاهش داده و ظاهر بدنه‌های آبی را تغییر می‌دهند. وجود رنگ‌ها باعث کاهش نفوذ نور خورشید شده و در نتیجه، فرآیند فوتوسنتز در گیاهان آبی مختل می‌شود. پیامد این امر، افزایش نیاز به اکسیژن بیولوژیکی (BOD) و اکسیژن شیمیایی (COD) است که نهایتاً منجر به کاهش سطح اکسیژن محلول در محیط آبی می‌گردد. برای مثال، پایین بودن نسبت BOD/COD در پساب نساجی (در حدود ۰/۱)، نشان‌دهنده سمی بودن و تجزیه‌ناپذیری مواد اولیه است و لزوم به‌کارگیری روش‌های تخریب غیرزیستی برای حذف کامل آن‌ها را تأیید می‌کند [۶، ۱]. متیلن بلو (MB) یکی از رنگ‌های رایج در مطالعات آلودگی آب است که به دلیل کاربردهای صنعتی و خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی‌اش مورد توجه قرار دارد. این ماده به عنوان رنگ‌کننده در منسوجات و عامل لکه‌گذاری در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود. همچنین، MB خواص ضد عفونی‌کننده و ضدقارچی دارد و در درمان بیماری‌هایی مانند مالاریا و عفونت‌های ادراری به کار می‌رود [۷].

چندین روش تخریب، از جمله جذب سطحی [۸]، انعقاد لخته‌سازی [۹]، تبادل یونی [۱۰]، اکسیداسیون الکتروشیمیایی [۱۱]، ازن‌زنی [۱۲]، فیلتراسیون غشایی [۱۳] و فرآیند فنتون [۱۴] برای حذف رنگ از فاضلاب به‌کار رفته‌اند. به طور کلی، عواملی نظیر هزینه عملیاتی بالا، عدم صرفه اقتصادی، تولید محصولات جانبی ناخواسته، مخاطرات زیست‌محیطی و نیاز به فناوری‌های پیچیده به عنوان معایب اصلی این روش‌ها ذکر شده‌اند.

با توجه به محدودیت‌های روش‌های قدیمی، نیاز به فناوری‌های قدرتمندی که بتوانند آلاینده‌ها را پیش از انتشار به محیط زیست، به محصولات غیرسمی تجزیه کامل کنند، ضروری است. در این راستا، روش‌های شیمیایی پیشرفته‌تر، به ویژه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته AOPs، مورد توجه قرار گرفته‌اند. AOPs از عوامل اکسیدکننده بسیار قوی مانند رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و رادیکال‌های سولفات ($SO_4^{\cdot-}$) برای دستیابی به تجزیه سریع و مؤثر آلاینده‌های آلی از جمله رنگ‌ها استفاده می‌کنند. این فرآیندها به دلایل زیر به عنوان یک گزینه ارجح برای تخریب پیشرفته فاضلاب مطرح هستند: بازدهی بالا، سازگاری با محیط زیست، توانایی تجزیه حتی مقاوم‌ترین ترکیبات آلی به محصولات بی‌ضرر مانند آب و دی‌اکسید کربن، قابلیت حذف برخی از آلاینده‌های معدنی و تطبیق‌پذیری و اثربخشی، به ویژه در شرایطی که کانی‌سازی کامل آلاینده‌ها مورد نیاز است [۱۵، ۱۶]. فرآیند فوتوکاتالیز یک فناوری تخریب نوآورانه است که مزایای متعددی نسبت به روش‌های مرسوم دارد: کارایی بالاتر، قابلیت تجزیه کامل رنگ‌ها حتی در غلظت‌های بسیار پایین، عدم تولید پسماند ثانویه و عملیات ساده‌تر [۱۷].

ترکیبات مبتنی بر وانادات به دلیل پاسخگویی به نور مرئی، پایداری فیزیکوشیمیایی و سازگاری با محیط زیست، به طور گسترده‌ای در فرآیند فوتوکاتالیز استفاده می‌شوند. اگرچه وانادات‌ها به دلیل شکاف نوار باریک، پایداری بالا و مقاومت در برابر خوردگی توجه زیادی را جلب کرده‌اند، اما جداسازی ناکارآمد بار، که منجر به نوترکیبی سریع بارها و فعالیت فوتوکاتالیزوری ضعیف می‌شود، یک محدودیت کلیدی برای آن‌ها است. برای رفع این ضعف، از ساختارهای ناهمگون با استفاده از سایر

نیمه‌رساناها، مانند FeVO همراه با rGO، برای بهبود جداسازی بار و گسترش پاسخ طیفی استفاده می‌شود. یک رویکرد نوین، استفاده از منابع بازیافتی وانادیوم (مانند کاتالیزورهای مصرفی پتروشیمی) برای سنتز فوتوکاتالیزورهای مبتنی بر وانادات است که می‌تواند به توسعه یک اقتصاد چرخشی پایدار کمک کند.

با توجه به این پیشرفت‌ها، مطالعات متعددی بر حذف MB از منابع آبی، به ویژه از طریق روش‌های جذب سطحی و فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، متمرکز شده‌اند. در این مقاله، برای نخستین بار، نانوکامپوزیت $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ با استفاده از یک روش سونوشیمی ساده سنتز شد. این ترکیب از آهن وانادات با ساختار اورتورومبیک تشکیل شده است. حضور rGO موجب بهبود قابل توجه مورفولوژی، کاهش اندازه ذرات و پراکندگی یکنواخت آن‌ها بر روی صفحات گرافن اکساید کاهش یافته گردید. انتخاب این ماده به دلیل پایداری ساختاری، پاسخگویی به نور مرئی و نقش کلیدی rGO در بهبود جداسازی بار و افزایش کارایی فوتوکاتالیزوری صورت گرفته است. متیلن بلو به عنوان یک رنگ کاتیونی می‌تواند از طریق برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ و جاذبه‌های الکترواستاتیکی با مواد مبتنی بر گرافن به خوبی برهم‌کنش داشته باشد. نانوکامپوزیت معرفی شده در این پژوهش، پتانسیل استفاده برای حذف سایر آلاینده‌های آلی موجود در محیط‌های آبی را نیز دارد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی مورد استفاده

مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق (تهیه شده از Sigma Aldrich با خلوص بالای ۹۸٪)

نام ماده	فرمول شیمیایی
گرافیت	
پتاسیم پرمنگنات	KMnO_4
محلول آبی هیدرازین	$\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$
آمونیم متاوانادات	NH_4VO_3
اتانول	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
آب مقطر	H_2O
آهن نترات ۹ آب	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
سولفوریک اسید	H_2SO_4
آمونیاک	NH_3
هیدروژن پراکسید	H_2O_2

۲-۲- ابزار، دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده

با استفاده از دستگاه فراصوت مدل Adeco-10110 سنتز سونوشیمی فوتوکاتالیزور انجام شد. با استفاده از دستگاه Zeiss Sigma300-HV FEGSEM، تصاویر FESEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی) ثبت شدند. از دستگاه Philips-XPertPro برای بررسی الگوهای XRD استفاده شد که با استفاده از تابش $\text{Cu K}\alpha$ تولید و با فیلترهای Ni فیلتر

شدند. از یک طیف‌سنج Magna-IR، طیف‌سنج Nicolet 550، با میزان وضوح ۰/۱۲۵ سانتی‌متر در قرص‌های KBr در محدوده‌ی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر برای تجزیه و تحلیل طیف‌های FT-IR (مادون قرمز تبدیل فوریه) استفاده شد. میزان MB با استفاده از دستگاه UV-Visible مدل Spectrophotometer-UVS-2500 اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۲- روش کار

۲-۳-۲-۱- سنتز GO

گرافن اکسید (GO) به روش هامرز اصلاح شده سنتز شد [۱۸]. برای این منظور، در ابتدا، مقدار ۲ گرم پودر گرافیت به همراه ۸۰ میلی‌لیتر سولفوریک اسید غلیظ (H_2SO_4)، خلوص ۹۰٪ در بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شده و تحت هم زدن یکنواخت قرار گرفت تا مخلوطی همگن حاصل شود. سپس، ۲ گرم سدیم نیترات ($NaNO_3$) و ۱۲ گرم پتاسیم پرمنگنات ($KMnO_4$) به صورت تدریجی به مخلوط افزوده شد. این مرحله منجر به تغییر رنگ محلول به سبز لجن‌مانند گردید که نشان‌دهنده‌ی آغاز فرآیند اکسایش بود. در ادامه، ۴۶ میلی‌لیتر آب دیونیزه به صورت قطره‌قطره و با سرعت کنترل شده به مخلوط واکنش اضافه شد. هم زدن به مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت تا واکنش کامل شود. سپس، ۵ میلی‌لیتر آب دیونیزه و ۱۶ میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید (H_2O_2) ۳۰٪ به سیستم افزوده شد تا عوامل اکساینده‌ی باقی‌مانده خنثی گردند. در این مرحله، رنگ محلول به زرد روشن تغییر یافت. سوسپانسیون حاصل به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج فراصوت با استفاده از دستگاه مافوق صوت قرار گرفت تا لایه‌های گرافن اکسید به‌طور کامل از هم جدا شوند. سپس، مخلوط به مدت سه تا چهار مرحله با محلول ۱۰٪ هیدروکلریدریک اسید (HCl) شست‌وشو داده شد. پس از هر مرحله، فرآیند سانتریفیوژ انجام گرفت و رسوب جامد قهوه‌ای یکنواختی حاصل شد. در نهایت، این رسوب در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید و پودر نهایی گرافن اکسید به دست آمد.

۲-۳-۲-۲- سنتز $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$

در ابتدا، مقدار ۱ میلی‌مول (۰/۴۰۴ گرم) از آهن (III) نیترات ۹ آبه ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) به همراه ۰/۰۲ گرم گرافن اکسید ۳۰ میلی‌لیتر در آب مقطر حل شد و سوسپانسیون حاصل به مدت ۵ دقیقه تحت هم زدن توسط همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس، سوسپانسیون به مدت ۱۰ دقیقه تحت تابش امواج فراصوت با توان ۱۵۰ وات قرار گرفت تا پراکندگی یکنواخت و فعال‌سازی اولیه‌ی یون‌های فلزی انجام شود (سوسپانسیون اول). در مرحله‌ی بعد، مقدار ۱ میلی‌مول (۰/۱۱۶ گرم) از آمونیوم وانادات (NH_4VO_3) در ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل گردید (محلول دوم) و به سوسپانسیون اول افزوده شد. سوسپانسیون حاصل به مدت ۵ دقیقه دیگر تحت هم زدن قرار گرفت. در ادامه، ۲ میلی‌لیتر هیدرازین به سوسپانسیون فوق اضافه گردید و هم‌زدن مجدد به مدت ۵ دقیقه در دمای محیط انجام شد. سپس، سوسپانسیون به مدت ۱۰ دقیقه دیگر تحت تابش امواج فراصوت با

توان ۱۵۰ وات قرار گرفت تا فرآیند احیا و تشکیل نانوذرات به طور کامل انجام شود. پس از پایان واکنش، رسوب حاصل جمع‌آوری گردید و به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی احتمالی، چندین بار با اتانول و آب مقطر شست‌وشو داده شد تا باقی‌مانده احتمالی هیدرازین حذف گردد. در نهایت، نمونه در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت خشک گردید تا پودر نهایی به دست آید. تمامی محلول‌های حاصل از شست‌وشو و پسماندهای شیمیایی مطابق دستورالعمل‌های ایمنی آزمایشگاهی و مدیریت پسماندهای خطرناک جمع‌آوری و دفع شدند.

۲-۳-۳- تخریب متیلن بلو

مرحله اول تهیه ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول آبی MB حاوی غلظت ۱۰ ppm بود. پس از افزودن ۵۰ میلی‌گرم فوتوکاتالیزور $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ سنتز شده، ۳۰ دقیقه هم‌زدن در تاریکی روی هم‌زن تا رسیدن به تعادل جذب-واجذب انجام شد. سپس، ۱ میلی‌لیتر H_2O_2 به سوسپانسیون اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از لامپ ۴۰۰ وات اسرام در معرض نور مرئی قرار گرفت. فاصله لامپ تا سطح محلول ۲۵ cm بود. پس از ۱۰ دقیقه تابش محلول، ۵ میلی‌لیتر برداشته شد و سانتریفیوژ برای جداسازی فوتوکاتالیزور انجام شد. سپس، غلظت محلول آبی از طریق اسپکتروفوتومتر با حداکثر طول موج جذب MB (۶۶۴ نانومتر) تعیین شد. راندمان تخریب نوری (R) متیلن بلو به صورت زیر محاسبه شد:

$$R = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100$$

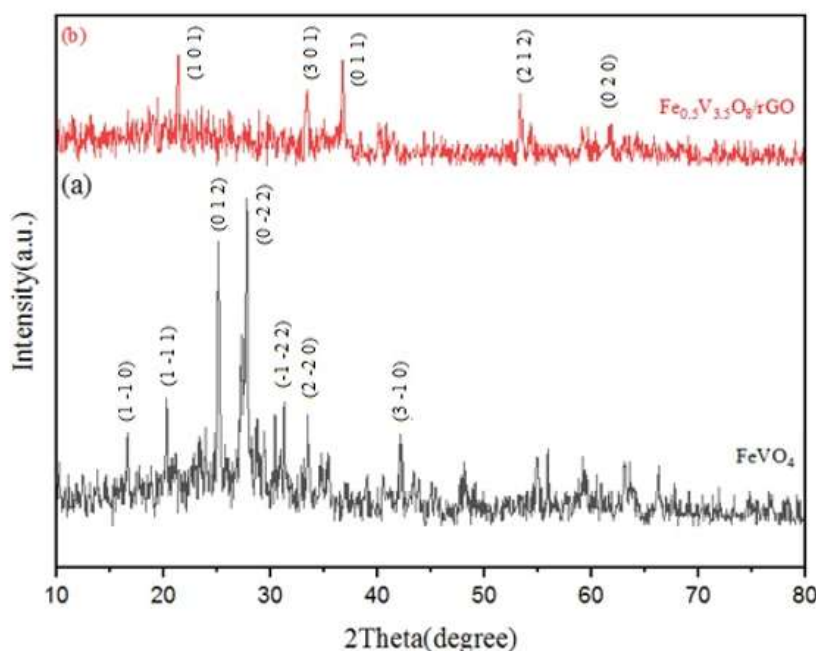
که در آن C_0 و C_1 به ترتیب غلظت اولیه و غلظت باقیمانده محلول متیلن بلو در زمان واکنش t هستند. برای بررسی قابلیت استفاده مجدد، فوتوکاتالیزور جداسازی شده توسط سانتریفیوژ چندین بار با آب مقطر شسته شد و به مدت چند دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد خشک گردید.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- الگوی پراش X فوتوکاتالیزور

شکل 1a مربوط به الگوی XRD نمونه $FeVO_4$ است که در حضور هیدرازین بدون گرافن اکساید کاهش یافته سنتز شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نمونه ترکیب $FeVO_4$ با ساختار اورتورومبیک (۱-۰۷۱-۱۵۹۲ JCPDS) و پارامترهای شبکه $a=6/7190 \text{ \AA}$ ، $b=8/0600 \text{ \AA}$ و $c=9/2540 \text{ \AA}$ را تشکیل داده است. شکل 1b شرایط مشابهی را برای نمونه ۲ نشان می‌دهد که با گرافن اکساید کاهش یافته سنتز شده است. این نمونه در ابتدا ترکیب $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8$ با ساختار اورتورومبیک (۹۶-۰۰۶۰-۹۰۰ JCPDS) و پارامترهای شبکه $a=9/9700 \text{ \AA}$ ، $b=3/0300 \text{ \AA}$ و $c=4/5400 \text{ \AA}$ را تشکیل داده است. نبود پیک تیز در $2\theta = 10/6^\circ$ نشان می‌دهد که غالب GO به rGO تبدیل شده است [۱۹]. توجه به این نکته ضروری است که حضور هیدرازین در این فرآیند، نقشی دوگانه ایفا کرده است: از یک سو، به عنوان منبع OH^- کنترل‌شده، سنتز هدفمند فاز

$\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8$ را ممکن ساخت و از سوی دیگر، احیای GO به rGO را تضمین نمود. قابلیت بالای هیدرازین در مقایسه با سدیم هیدروکسید و آمونیاک در سنتز کنترل شده نانوساختارهای اکسیدی در مطالعات گسترده‌ای آشکار شده است [۲۰-۲۲].

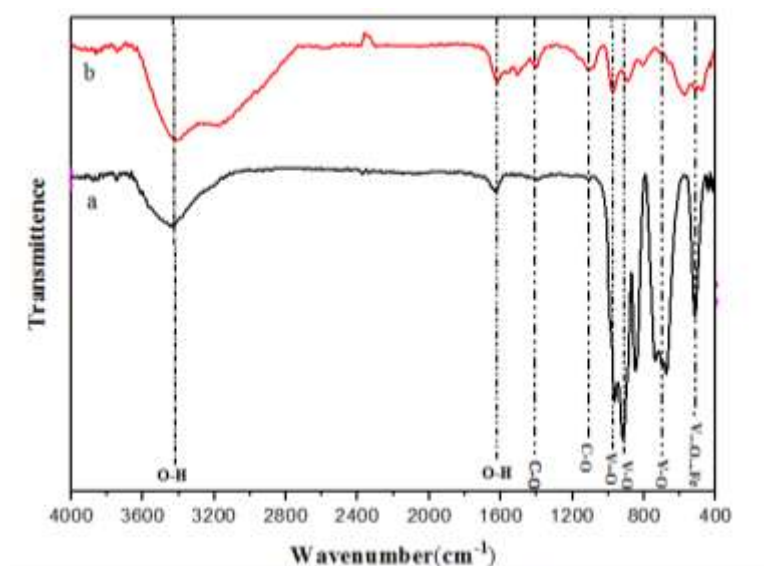


شکل ۱. الگوی XRD نمونه‌های سنتز شده FeVO_4 (a) و $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ (b)

۳-۲- طیف‌سنجی FT-IR فوتوکاتالیزور

طیف‌سنجی FTIR برای تجزیه و تحلیل پیوندهای شیمیایی و گروه‌های آلی نانومواد و نانوکامپوزیت سنتز شده در شکل ۲ ارائه شده است. به ترتیب، پیک‌های مشخصه مربوط به پیوندهای V-O در نواحی 900 تا 1000 cm^{-1} قابل مشاهده هستند [۲۳]. همچنین، یک پیک پهن در بازه 500 cm^{-1} تا 700 cm^{-1} به ارتعاشات خمشی و کششی پیوندهای بین‌فلزی $\text{V}\dots\text{O}\dots\text{Fe}$ اختصاص دارد و بیانگر تشکیل پیوندهای پل‌زن میان یون‌های وانادیوم و آهن است [۲۴]. پیکی در ناحیه 806 cm^{-1} نیز به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن پیوندهای V-O مربوط می‌شود [۲۵]. علاوه بر این، پیک‌هایی در نواحی 830 cm^{-1} تا 845 cm^{-1} به ارتعاشات کششی گروه‌های وانادیل (V=O) نسبت داده می‌شوند که معمولاً به‌عنوان مراکز فعال در فرآیندهای انتقال بار و واکنش‌های سطحی شناخته می‌شوند [۲۶]. در ناحیه پراثرژی طیف، پیک‌های مشاهده‌شده در محدوده 3400 cm^{-1} تا 3600 cm^{-1} و حوالی 1600 cm^{-1} به ترتیب به ارتعاشات کششی و خمشی گروه‌های O-H در مولکول‌های آب جذب‌شده بر سطح نمونه‌ها نسبت داده می‌شوند که نشان‌دهنده حضور آب به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی در ساختار نانوکامپوزیت است [۲۶]. جابجایی و کاهش شدت برخی پیک‌ها در طیف را می‌توان به وجود کرنش‌های ساختاری در شبکه‌ی ماده نسبت داد. این کرنش‌ها که ناشی از تغییر در طول و زاویه‌ی پیوندها، نقص‌های موضعی یا ناهماهنگی‌های شبکه‌ای هستند، موجب تغییر در انرژی ارتعاشی گروه‌های عاملی شده و در نتیجه پیک‌ها به سمت عدد موج‌های متفاوت جابه‌جا شده و شدت آن‌ها کاهش

می‌یابد. چنین تغییراتی معمولاً بیانگر بی‌نظمی ساختاری، تنش‌های درونی و کاهش نظم شبکه‌ای بوده و می‌توانند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی پایداری و یکپارچگی ساختار نانوکامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در طیف FTIR نمونه گرافن کاهش‌یافته (rGO) پیک‌های ثبت‌شده در نواحی 1500 cm^{-1} و 1200 cm^{-1} به ترتیب به ارتعاشات خمشی گروه‌های کربوکسیلیک (-COOH) و ارتعاشات کششی گروه‌های اپوکسی (C-O-C) مربوط می‌شوند. حضور این گروه‌های عملکردی نشان می‌دهد که فرآیند کاهش گرافن اکسید به گرافن کاهش‌یافته به‌طور کامل منجر به حذف گروه‌های اکسیژنی نشده و مقدار کمی از این گروه‌ها باقی مانده‌اند [۲۷].

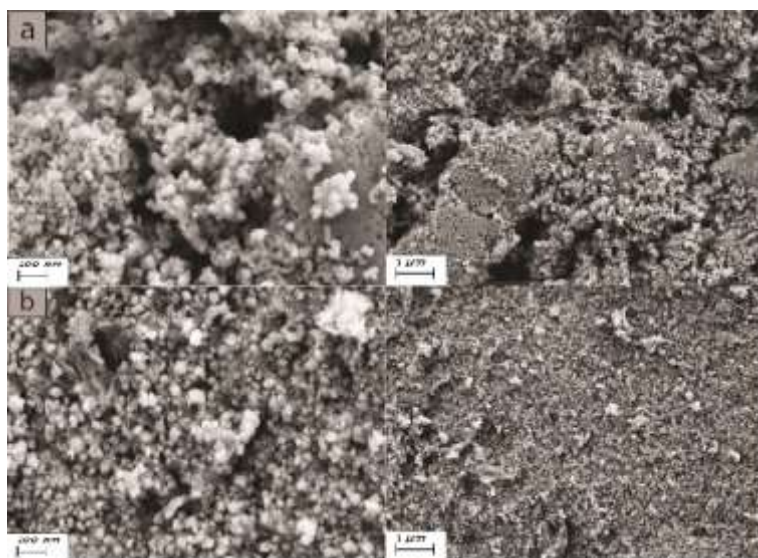


شکل ۲. طیف‌های FT-IR نمونه‌های سنتز شده FeVO_4 (a) و $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ (b)

۳-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی فوتوکاتالیزور

تصاویر با دو بزرگنمایی مختلف برای نمونه‌های FeVO_4 (a) و $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ (b) در شکل ۳ دیده می‌شود. در شکل 3a که مربوط به نمونه FeVO_4 است. ذرات با اندازه نسبتاً بزرگ و در محدوده تقریبی ۸۰ تا ۱۵۰ نانومتر مشاهده شدند. توزیع ذرات به‌صورت غیر یکنواخت و همراه با تجمع‌های محلی بوده که ساختاری نامنظم را به نمایش می‌گذارد. فرم ظاهری نانوذرات عمدتاً بی‌شکل، با سطحی ناهموار و مرزهای نامشخص است که بیانگر رشد کنترل‌نشده و تمایل به هم‌جوشی در طی فرآیند سنتز می‌باشد. شکل 3b که مربوط به نمونه $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ است نشان می‌دهد که به دلیل حضور گرافن، ساختار سطحی نمونه به‌مراتب منظم‌تر و یکنواخت‌تر از تصویر اول ظاهر شده است. صفحات گرافنی با فراهم‌سازی بستری لایه‌ای، موجب پراکندگی بهتر ذرات و جلوگیری از تجمع آن‌ها شده‌اند. اندازه ذرات کاهش یافته و در محدوده ۴۰ تا ۹۰ نانومتر قرار دارد. ساختار ذرات نیز نزدیک به کروی و با مرزهای مشخص‌تر دیده می‌شود. این تغییرات نشان‌دهنده نقش مؤثر گرافن اکساید

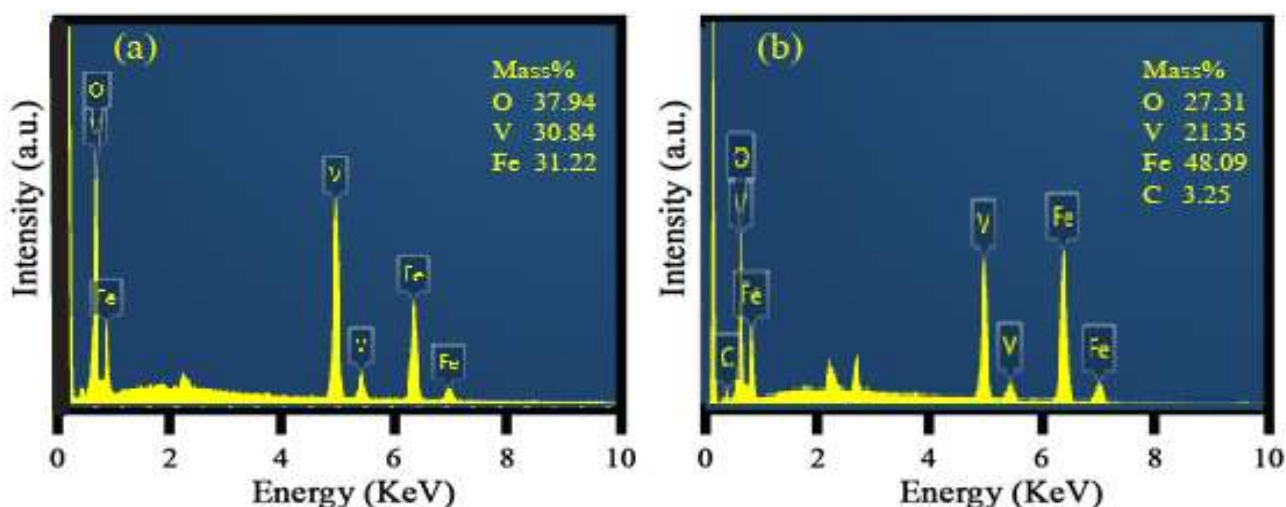
کاهش یافته در کنترل رشد، بهبود مورفولوژی و افزایش سطح فعال ترکیب هستند. فرم نانوذرات نیز منظم‌تر، نزدیک به کروی و با مرزهای واضح‌تر ظاهر شده‌اند که بیانگر تعامل مؤثر بین ذرات و زمینه ساختاری است.



شکل ۳. تصاویر FESEM نمونه‌های سنتز شده (a) FeVO_4 و (b) $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$

۳-۴- آنالیز EDS فوتوکاتالیزور

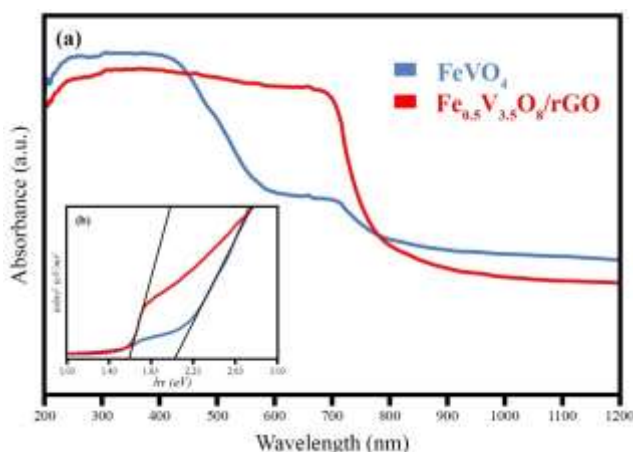
در شکل ۴، با استفاده از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS)، توزیع عناصر و تحلیل کمی و کیفی عناصر موجود در ترکیبات شیمیایی نمایش داده شده است. در شکل ۴، طیف a مربوط به نمونه‌ی FeVO_4 و طیف b مربوط به نمونه‌ی $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ است. تنها عناصر Fe، V و O در طیف EDS برای آهن وانادات قابل مشاهده هستند و برای نانوکامپوزیت آهن وانادات/گرافن اکساید کاهش یافته تنها عناصر Fe، V، C، O در طیف EDS قابل مشاهده هستند و هیچ عنصر دیگری مربوط به ناخالصی مشاهده نمی‌شود. این نتایج با نتایج XRD مطابقت خوبی دارند.



شکل ۴. تجزیه و تحلیل کمی و کیفی نمونه‌های سنتز شده (a) FeVO_4 و (b) $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$

۳-۵- طیف‌سنجی DRS فوتوکاتالیزور

شکل 5a طیف DRS نمونه‌های سنتز شده را نشان می‌دهد. نمونه FeVO_4 جذب بالایی در ناحیه فرابنفش زیر 450 nm نشان می‌دهد. لبه جذب نسبتاً تند است و در محدوده نور مرئی (حدود 500 nm) قرار می‌گیرد، که مشخصه یک نیمه‌رسانا با شکاف نوار متوسط است. لبه جذب نمونه $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ به وضوح به سمت طول موج‌های بلندتر (انتقال به سرخ) جابه‌جا شده است. این نمونه در تمام طول موج‌های نور مرئی و حتی تا ناحیه نزدیک فروسرخ جذب بالاتر و گسترده‌تری (حدود 700 nm) را نشان می‌دهد. شکل 5b نمودار شکاف نوار نمونه‌های سنتز شده را نشان می‌دهد. شکاف نوار برای نمونه‌های FeVO_4 و $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ به ترتیب حدود ۲ و $1/6$ الکترون ولت است. شکاف نوار به طور قابل ملاحظه‌ای از حدود ۲ الکترون ولت به $1/6$ الکترون ولت کاهش یافته است. این کاهش، قابلیت جذب نور مرئی توسط ماده را به شدت افزایش می‌دهد و ماده را به یک فوتوکاتالیزور یا جاذب نوری کارآمدتر تبدیل می‌کند. به طور خلاصه، نتایج DRS نشان‌دهنده بهبود قابل توجه خواص نوری کامپوزیت نسبت به خالص است.

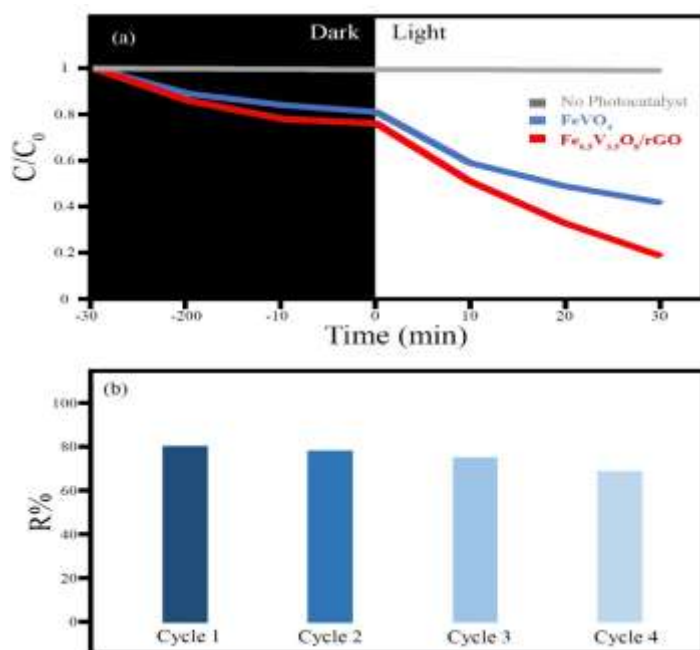


شکل ۵. طیف‌سنجی DRS نمونه‌های سنتز شده (a) DRS و (b) شکاف نوار

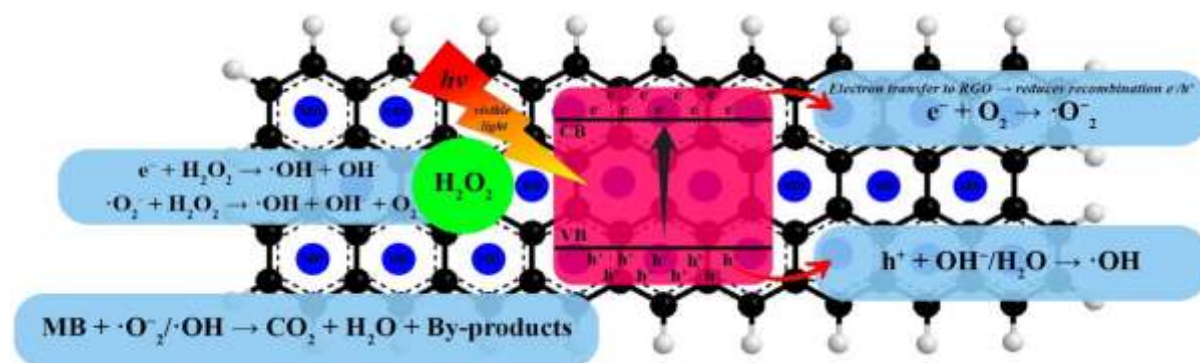
۳-۶- مطالعه فرآیند فوتوکاتالیزوری

شکل ۶ فرآیند فوتوکاتالیزوری نمونه‌های سنتز شده را نشان می‌دهد. نمودار (a) تغییرات غلظت باقی‌مانده رنگدانه را به صورت نسبی (C/C_0) بر حسب زمان (دقیقه) در سه حالت مختلف نشان می‌دهد: ناحیه تاریک این بخش نشان‌دهنده فرآیند جذب سطحی در غیاب نور است. نمونه FeVO_4 نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی جذب سطحی اتفاق افتاده است، به طوری که از ۱ به حدود $0/81$ کاهش یافته است. این کاهش نشان‌دهنده توانایی در جذب رنگدانه بر روی سطح خود است. نمونه $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ جذب سطحی بهتری نسبت به FeVO_4 نشان داده است. دلیل این جذب بهتر می‌تواند حضور لایه‌های rGO باشد که سطح فعال بسیار بیشتری و برهمکنش‌های قوی‌تری برای جذب مولکول‌های رنگدانه فراهم می‌کند. غلظت نسبی آلاینده در غیاب فوتوکاتالیزور تقریباً ثابت و برابر ۱ باقی مانده است، که تأیید می‌کند هیچ کاهشی در غلظت به دلیل جذب

توسط ظروف یا خودبه‌خودی صورت نمی‌گیرد. در حضور نور، فعالیت فوتوکاتالیزوی آغاز شده و با استفاده از نمونه FeVO_4 غلظت نسبی تا حدود ۰/۴۲ در ۳۰ دقیقه کاهش یافته است. این نشان‌دهنده تجزیه رنگدانه توسط گونه‌های فعال نوری تولید شده توسط FeVO_4 است. در حضور نمونه $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ غلظت نسبی در ۳۰ دقیقه به حدود ۰/۱۹ کاهش می‌یابد. عملکرد برتر این نانوکامپوزیت ناشی از دو عامل اصلی است: جذب بالاتر (همانطور که در بخش تاریک مشاهده شد) و افزایش جداسازی زوج‌های الکترون-حفره (e^-/h^+) تولید شده. rGO به عنوان یک دریافت‌کننده و حمل‌کننده الکترون عمل کرده، نوترکیبی زوج‌ها را کاهش می‌دهد و در نتیجه، تعداد گونه‌های فعال (رادیکال‌های هیدروکسیل و ...) افزایش می‌یابد که منجر به تخریب سریع‌تر رنگدانه می‌شود. نمودار (b) در شکل ۶، نرخ حذف رنگدانه را در چهار چرخه متوالی با استفاده از فوتوکاتالیزور $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ را نشان می‌دهد. کاهش ۱۰ درصدی حذف از چرخه ۱ (۰/۸۰) به چرخه ۴ (۰/۷۰)، نشان‌دهنده یک افت اندک و قابل قبول در فعالیت فوتوکاتالیزوری پس از استفاده مجدد است. این نتایج نشان‌دهنده پایداری نسبتاً خوب نانوکامپوزیت سنتز شده هستند. کاهش اندک در فعالیت می‌تواند ناشی از عواملی چون: از دست دادن اندک جرم فوتوکاتالیزور در حین جداسازی و شستشو، پوشیده شدن یا غیرفعال شدن جزئی مراکز فعال توسط محصولات جانبی تجزیه رنگدانه، یا تغییرات جزئی ساختاری در طول واکنش‌های مکرر باشد. تحریک الکترونی موجب انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش و سپس به rGO می‌شود که با کاهش نوترکیبی بارها، تولید رادیکال‌های فعال سطحی مانند OH^\bullet و O_2^\bullet را تسهیل کرده و منجر به تخریب مؤثر متیلن بلو می‌گردد (شکل ۷). مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات مشابه در جدول ۲ نشان داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ عملکرد فوتوکاتالیزوری قابل توجهی تحت نور مرئی از خود نشان می‌دهد و استفاده از این ساختار می‌تواند به عنوان رویکردی مؤثر در حذف آلاینده‌های آلی از محیط‌های آبی مطرح شود.



شکل ۶ (a) نتایج فوتوکاتالیزوری توسط نمونه‌های سنتز شده و (b) قابلیت بازیافت فوتوکاتالیزور $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ پس از چهار چرخه



شکل ۷: طرح گرافیکی سازوکار فوتوکاتالیزوری نانوکامپوزیت $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ در حضور H_2O_2 تحت تابش نور مرئی.

جدول ۲. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات مشابه

مرجع	زمان (دقیقه)	درصد حذف	آلاینده	فوتوکاتالیزور
[۲۹]	۱۲۰	۸۰٪	متیلن بلو	rGO/MnFe ₂ O ₄
[۳۰]	۱۸۰	۸۲٪	متیلن بلو	Bi ₂ S ₃ /WS ₂ /g-C ₃ N ₄
[۳۱]	۱۵۰	۸۳٪	متیلن بلو	Bi ₂ S ₃
این پژوهش	۳۰	۸۱٪	متیلن بلو	Fe _{0.5} V _{3.5} O ₈ /rGO

۴- سینتیک تخریب

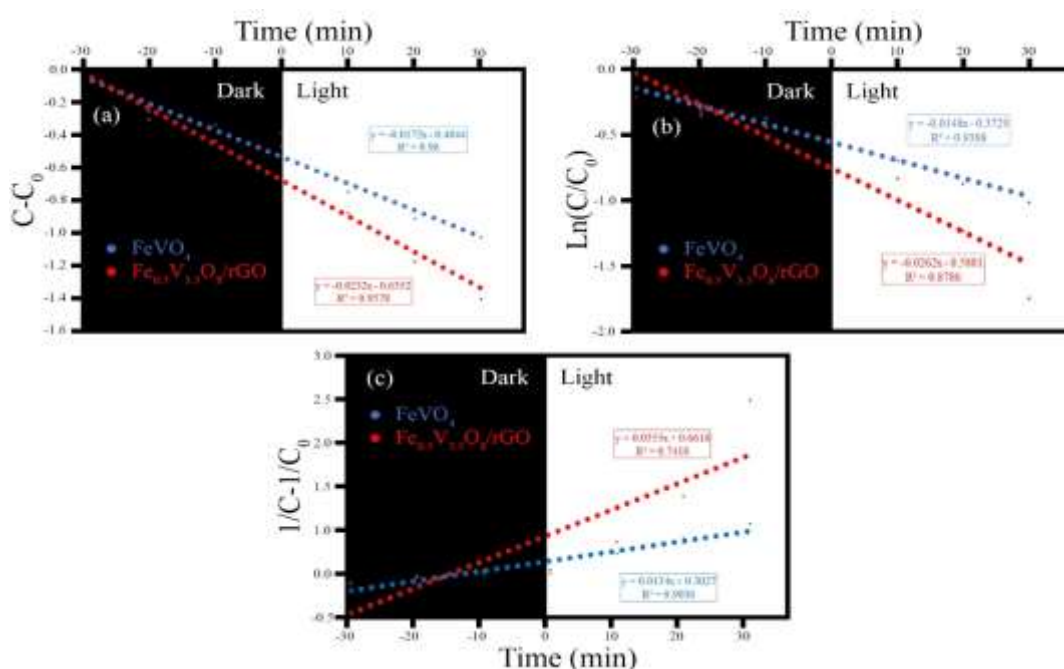
شکل ۸ و جداول ۳ و ۴ نتایج مربوط به سینتیک تخریب نمونه‌های سنتز شده را نشان می‌دهند. ناحیه‌ی تاریک مربوط به هم زدن در غیاب نور است و میزان جذب سطحی MB توسط فوتوکاتالیزور اندازه‌گیری شده است. می‌توان نتیجه گرفت در هر سه نمودار، شیب منحنی $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ در فاز تاریک (جذب) بیشتر از $FeVO_4$ است. این تأیید می‌کند که نانوکامپوزیت به دلیل حضور rGO، دارای سطح فعال و ظرفیت جذب بالاتری برای مولکول‌های MB نسبت به اکسید فلزی خالص است. در ناحیه‌ی نور تخریب فوتوکاتالیزوری انجام می‌شود. در این بخش، ضریب همبستگی (R^2) برای هر مدل سینتیکی بررسی می‌شود تا مشخص شود تخریب از کدام مدل بهتر تبعیت می‌کند. در ناحیه نور (تخریب نوری) شیب منحنی $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ در هر سه نمودار تندتر از شیب $FeVO_4$ خالص است. در مدل مرتبه صفر نرخ واکنش برای نانوکامپوزیت $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ برابر 0.0232 و برای $FeVO_4$ برابر 0.0172 است. این نتیجه تأیید می‌کند نرخ تخریب فوتوکاتالیزوری MB در حضور نانوکامپوزیت $Fe_{0.5}V_{3.5}O_8/rGO$ بالاتر است، که به دلیل کاهش شکاف نوار و جلوگیری از نوترکیبی زوج‌های الکترون-حفره توسط rGO می‌باشد. مدل مرتبه صفر (a) با R^2 حدود 0.96 برای هر دو نمونه، بهترین تطابق خطی را نشان می‌دهد. اگرچه در بسیاری از تحقیقات، مدل مرتبه اول بهتر است، اما در اینجا مدل مرتبه صفر (a) از نظر R^2 برای هر دو نمونه مناسب‌ترین مدل است. مدل مرتبه صفر به دلیل اشباع سطح فوتوکاتالیزور در غلظت اولیه MB (10 ppm) و محدودیت انتقال جرم انتخاب شد. در این شرایط، سرعت واکنش مستقل از غلظت بوده و تنها به شدت تابش و سطح فعال بستگی دارد. مقادیر نرخ واکنش (K) و ضریب همبستگی (R^2) برای هر سه مدل در جدول ۴ آمده است.

جدول ۳. معادلات سینتیکی

نوع سینتیک	معادله سینتیکی	پارامتر تنظیم پذیر	رفرنس
مرتبه صفر	$C = -k_0 t + C_0$	K_0	[۲۲]
مرتبه اول	$\ln C = -k_1 t + \ln C_0$	K_1	[۲۲]
مرتبه دوم	$1/C = k_2 t + 1/C_0$	K_2	[۲۲]

جدول ۴. ثابت‌های سینتیکی تجزیه MB توسط فوتوکاتالیزور سنتز شده

فوتوکاتالیزور	مرتبه صفر		مرتبه اول		مرتبه دوم	
	k_0	R^2	k_1	R^2	k_2	R^2
FeVO ₄	۰/۰۱۷۲	۰/۹۶	۰/۰۱۴۸	۰/۹۳۸۸	۰/۰۳۵۵	۰/۹۰۳۶
Fe _{0.5} V _{3.5} O ₈ /rGO	۰/۰۲۳۲	۰/۹۵۷۸	۰/۰۲۶۲	۰/۸۷۸۶	۰/۰۱۳۴	۰/۷۴۱۸



شکل ۸: مدل‌های سینتیکی (a) مرتبه صفر، (b) مرتبه اول و (c) مرتبه دوم برای نمونه‌های سنتز شده

۵- نتیجه گیری

به طور خلاصه، در این پژوهش، سنتر نانوکامپوزیت Fe_{0.5}V_{3.5}O₈/rGO به عنوان یک فوتوکاتالیزور بسیار مؤثر و امیدوارکننده برای تخریب متیلن بلو به عنوان یک نماینده از آلاینده‌ها با استفاده از یک روش سونوشیمیایی ساده و در حضور هیدرازین برای نخستین بار انجام شد. هیدرازین به عنوان عامل کاهنده سبب کاهش GO به rGO شده و سنتر تک مرحله‌ای نانوکامپوزیت Fe_{0.5}V_{3.5}O₈/rGO را ممکن می‌سازد. عملکرد فوتوکاتالیزوری برتر نانوکامپوزیت Fe_{0.5}V_{3.5}O₈/rGO (با ۸۱٪ تخریب در ۳۰ دقیقه تحت نور مرئی) به طور مستقیم به نقش rGO نسبت داده می‌شود. rGO نه تنها باعث بهینه‌سازی مورفولوژی و افزایش جذب نور مرئی شده، بلکه مهم‌تر از آن، به عنوان یک دریافت‌کننده و حمل‌کننده الکترون کارآمد عمل کرده است. این امر به طور مؤثری از نوترکیبی زوج‌های الکترون-حفره تولید شده در نیمه‌رسانا جلوگیری می‌کند و در نتیجه، تولید گونه‌های فعال

(رادیکال‌ها) برای تجزیه سریع آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، حفظ ۷۰٪ فعالیت اولیه پس از چهار چرخه استفاده مجدد، پایداری بالا و قابلیت استفاده مجدد این نانوکامپوزیت در فرآیندهای صنعتی تخریب نوری را تأیید می‌کند. بررسی سینتیک تخریب MB نشان داد که نانوکامپوزیت $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ به دلیل حضور rGO، ظرفیت جذب سطحی بالاتری نسبت به FeVO_4 دارد. در ناحیه‌ی نور، شیب منحنی نانوکامپوزیت $\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{3.5}\text{O}_8/\text{rGO}$ در تمامی مدل‌ها تندتر بوده و نرخ واکنش در مدل مرتبه صفر (۰/۰۲۳۲) به‌طور قابل توجهی بیشتر از نمونه FeVO_4 (۰/۰۱۷۲) است.

۶- تقدیر و تشکر

همه نویسندگان حاضر در این مقاله از دانشگاه سمنان برای فراهم آوردن امکانات لازم برای کار پژوهشی ارائه شده، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۷- منابع و ماخذ

- [1] Ahmed, H.R., & Kayani, K.F. (2024). A comparative review of Fenton-like processes and advanced oxidation processes for Methylene Blue degradation. *Inorganic Chemistry Communications*, 170, 113467.
- [2] Kayani, K.F., Mohammad, N.N., Kader, D.A., Mohammed, S.J., Shukur, D.A., Alshatteri, A.H., ... & Hassan, H.Q. (2023). Ratiometric Lanthanide Metal-Organic Frameworks (MOFs) for Smartphone-Assisted Visual Detection of Food Contaminants and Water: A Review. *ChemistrySelect*, 8(47), e202303472.
- [3] Balarabe, B.Y., Kanafin, Y.N., Rustembekkyzy, K., Serkul, I., Nauryzbaeva, M.A., & Atabaev, T.S. (2025). Assessing the photocatalytic activity of visible light active Bi_2S_3 -based nanocomposites for methylene blue and Rhodamine B degradation. *Materials Today Catalysis*, 9, 100099.
- [4] Divakara, S.G., Mahesh, B., Jayanna, B.K., & Anil Kumar, H.G. (2025). Photocatalytic degradation of crystal violet dye using honey mediated synthesis of NiFe_2O_4 nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 18(1), 2543931.
- [5] Buddiga, L.R., Gajula, G.R., & Jaishree, G. (2025). Methyl orange dye degradation of dual doped TiO_2 nanoparticles via adjusting visible light absorption. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101938.
- [6] Samarasinghe, L.V., Muthukumar, S., & Baskaran, K. (2024). Recent advances in visible light-activated photocatalysts for degradation of dyes: A comprehensive review. *Chemosphere*, 349, 140818.
- [7] Ali, M.A., & Maafa, I.M. (2024). Recent literature review of Cerium-containing photocatalysts used for methylene blue degradation. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100486.
- [8] Aziz, D.M., Hassan, S.A., Aziz, S.B., & Kader, D.A. (2025). Efficient adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue using HKUST-1: A novel approach for dye removal and wastewater treatment under sunlight. *Next Materials*, 9, 101015.

- [9] Ihaddaden, S., Aberkane, D., Boukerroui, A., & Robert, D. (2022). Removal of methylene blue (basic dye) by coagulation-flocculation with biomaterials (bentonite and *Opuntia ficus indica*). *Journal of water process engineering*, 49, 102952.
- [10] Alatabe, M.J.A., & Ghorbanpour, M. (2024). A performance comparison of photo-fenton decolorization of methylene blue by using bentonite/iron composites prepared by liquid phase and solid phase ion exchange method. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100027.
- [11] Sun, Z., Gan, L., Liu, Y., Liu, Q., Gao, Q., & Ni, Y. (2025). Electrochemical oxidation of methylene blue from high salinity dyeing wastewater by a novel reduced graphene oxide and La co-modified PbO_2 electrode. *Desalination*, 600, 118464.
- [12] Xiang, T., Zhong, D., Zhou, Y., Xu, Y., Tang, D., Li, W., ... & Chen, J. (2025). Degradation of methylene blue by ozone oxidation catalyzed by the magnetic $MnFe_2O_4@Co_3S_4$ nanocomposite. *Langmuir*, 41(4), 2699-2713.
- [13] Tan, H., Zhang, Y., Li, B., Yang, H., Hou, H., & Huang, Q. (2023). Preparation of TiO_2 -coated glass flat membrane and its photocatalytic degradation of methylene blue. *Ceramics International*, 49(11), 17236-17244.
- [14] Afroozan Bazghale, A., & Mohammad-khah, A. (2021). Improvement of methylene blue removal by La:ZnO/GO nanocomposites in the presence of ultrasound. *Applied Chemistry Today*, 16(58), 77-94.
- [15] Samy, M., Mensah, K., & Alalm, M. G. (2022). A review on photodegradation mechanism of bio-resistant pollutants: Analytical methods, transformation products, and toxicity assessment. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103151.
- [16] Mohod, A.V., Momotko, M., Shah, N.S., Marchel, M., Imran, M., Kong, L., & Boczkaj, G. (2023). Degradation of Rhodamine dyes by Advanced Oxidation Processes (AOPs)—Focus on cavitation and photocatalysis—A critical review. *Water Resources and Industry*, 30, 100220.
- [17] Rasheed, T., Ahmad, N., Ali, J., Hassan, A. A., Sher, F., Rizwan, K., ... & Bilal, M. (2021). Nano and micro architected cues as smart materials to mitigate recalcitrant pharmaceutical pollutants from wastewater. *Chemosphere*, 274, 129785.
- [18] Jamjoum, H.A.A., Umar, K., Adnan, R., Razali, M.R., & Ibrahim, M.N.M. (2021). Synthesis, characterization, and photocatalytic activities of graphene oxide/metal oxides nanocomposites: A Review. *Frontiers in Chemistry* 9, 752276.
- [19] Rezayeenik, M., Mousavi-Kamazani, M. & Zinatloo-Ajabshir, S. (2023). $CeVO_4/rGO$ nanocomposite: facile hydrothermal synthesis, characterization, and electrochemical hydrogen storage. *Appl. Phys A* 47, 129.
- [20] Ashrafi, S., Mousavi-Kamazani, M., Zinatloo-Ajabshir, S., Asghari, A. (2020). Novel sonochemical synthesis of $Zn_2V_2O_7$ nanostructures for electrochemical hydrogen storage. *Int. J. Hydrogen Energy* 45, 21611.

- [21] Ghodrati, M., Mousavi-Kamazani, M. (2024). One-step synthesis of Bi/CeVO₄/Cu₄O₃ nanocomposite by hydrothermal method and investigation of its photocatalytic performance in desulfurization of dibenzothiophene. *Applied Chemistry Today* 19, 305-318.
- [22] Khabbaz, S. H., Bagheri, A., & Mousavi-Kamazani, M. (2025). Synthesis, characterization, and application of MnFe₂O₄/Fe_{0.11}V₂O_{5.16}/modified zeolite nanocomposite as an effective photocatalyst for methylene blue degradation and benzothiophene desulfurization. *Heliyon*, 11(1), e41294.
- [23] Lee, K.C., Hsu, S.C., Huang, J. H., Wang, K.S., Pang, W.K., Hu, C.W., ... & Liu, T.Y. (2024). Construction of dual Z-scheme Ag₃VO₄-BiVO₄/InVO₄ photocatalysts using vanadium source from spent catalysts for contaminated water treatment and bacterial inactivation. *Chemosphere*, 363, 142746.
- [24] Yin, X., Wu, D., Lu, Z., Xie, J., Hu, J., Tang, M., ... & Cao, Y. (2024). Innovative synthesis and comprehensive electrochemical evaluation of FeVO₄ for enhanced sodium-ion battery performance. *Applied Energy*, 373, 123872.
- [25] Sivakumar, V., Suresh, R., Giribabu, K., & Narayanan, V. (2015). BiVO₄ nanoparticles: Preparation, characterization and photocatalytic activity. *Cogent chemistry*, 1(1), 1074647.
- [26] H. Khabbaz, S., Bagheri, A., Mousavi-Kamazani, M. (2025). Facile hydrothermal fabrication of nanocomposite based on natural zeolite and its application in catalytic oxidative desulfurization of benzothiophene. *Applied Chemistry Today* 20(76), 117-134.
- [27] Chen, S.J., Zhang, G.S., Li, Y. J., Li, J.L., Lv, R.J., Wang, P., ... & Zhao, D.C. (2020). Synthesis of surfactant-assisted C/Fe-FeVO₄ nanostructure: characterization and photocatalytic degradation of ciprofloxacin. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(9), 5636-5641
- [28] Jamjoum, H.A.A., Umar, K., Adnan, R., Razali, M.R., & Mohamad Ibrahim, M.N. (2021). Synthesis, characterization, and photocatalytic activities of graphene oxide/metal oxides nanocomposites: A review. *Frontiers in Chemistry*, 9, 752276.
- [29] Huang, X., Liu, L., Xi, Z., Zheng, H., Dong, W., Wang G. (2019). One-pot solvothermal synthesis of magnetically separable rGO/MnFe₂O₄ hybrids as efficient photocatalysts for degradation of MB under visible light: *Materials Chemistry and Physics*, 231, 68-74
- [30] Jangra, P., Kumari, P., Sharma, S.K., Yadav, K., Devi, C., Yogesh, G.K. (2025). Synthesis, characterization, and photocatalytic degradation of methylene blue dye using Bi₂S₃/WS₂/g-C₃N₄-based heterojunction nanocomposite, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 197, 109710.
- [31] Nkwe, V.M., Onwudiwe, D.C., Azeez, M.A. (2021). Solvothermal synthesis of pure and Sn-doped Bi₂S₃ and the evaluation of their photocatalytic activity on the degradation of methylene blue, *BMC chemistry*, 15 (1) 65.