



Research Article

Synthesis and combination of SrFe₂O₄ nano-spinel on CuO for photocatalytic removal: a kinetic study

Leila Fatolahi*

Department of Chemistry, Payame Noor University, 19395-4697, Tehran, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 08/Dec/2024

Revised: 20/Apr/2025

Accepted: 19/May/2025

Keywords:SrFe₂O₄-CuO,
Eriochrome Black T,
kinetic study,
photocatalytic removal.

ABSTRACT

Nano photocatalyst based on SrFe₂O₄-CuO composite was synthesized by easy chemical method. The scanning electron microscope image shows the bonding of SrFe₂O₄ and CuO. Ultraviolet-visible spectroscopy has calculated the energy gap of SrFe₂O₄-CuO nanocomposite and it is lower than CuO. EDS spectroscopy was performed to confirm the presence of strontium, iron, copper and oxygen elements. The crystal size of CuO nanoparticles and SrFe₂O₄-CuO nanocomposite is 29.12 and 39.81 nm, respectively. The surface area for samples of CuO nanoparticles and SrFe₂O₄-CuO nanocomposite is equal to 15.12 mg²/g and 45.23 mg²/g. After the successful synthesis of SrFe₂O₄-CuO nanocomposite, it was used in the photocatalytic removal of Eriochrome Black T pollutant under ultraviolet light irradiation. The removal ability of SrFe₂O₄-CuO was higher than CuO nanoparticles. SrFe₂O₄-CuO nanocomposite showed excellent stability and reusability. The identified nanoparticles are very active under UV light irradiation, and hydroxyl radicals and super dioxide showed a major contribution to dye removal.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2025.35373.2310>

© 2025 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:** Assistant Professor of Analytical Chemistry. E-mail address: leilafatolahi@pnu.ac.ir**How to cite this article:** Fatolahi, L. (2025). Synthesis and combination of SrFe₂O₄ nano-spinel on CuO for photocatalytic removal: a kinetic study. *Applied Chemistry Today*, 20(74), 265-280. (in Persian)

سنتز و ترکیب نانو اسپینل های SrFe_2O_4 بر روی CuO برای فوتوکاتالیزوری:

مطالعه سینتیکی

لیلا فتح الهی*

گروه شیمی، دانشگاه پیام نور، ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹	نانو فوتوکاتالیست بر پایه ای از کامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ به روش شیمیایی آسان سنتز شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده اتصال SrFe_2O_4 و CuO است. طیف سنجی فرابنفش-مرئی شکاف انرژی نانو کامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ را محاسبه کرده است و نسبت به CuO کمتر می باشد. طیف سنجی EDS برای تایید حضور عناصر استرانسیم، آهن، مس و اکسیژن انجام شد. اندازه کریستال نانوذرات CuO و نانو کامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ به ترتیب ۲۹/۱۲ و ۳۹/۸۱ نانومتر است. مساحت سطح برای نمونه های نانوذرات CuO و نانو کامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ برابر با mg^2/g ۱۵/۱۲ و mg^2/g ۴۵/۲۳ می باشد. پس از سنتز موفقیت آمیز نانو کامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ از آن در حذف فوتوکاتالیستی آلاینده اریوکروم بلک تی تحت تابش نور فرابنفش استفاده شد. میزان توانایی حذف $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ نسبت به CuO افزایش یافت. نانو کامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ پایداری و قابلیت استفاده مجدد عالی را نشان داد. نانو ذرات مشخص شده تحت تابش نور فرابنفش بسیار فعال هستند و رادیکال های هیدروکسیل و سوپر دی اکسید سهم عمده ای در حذف رنگ نشان داد.

کلمات کلیدی:

$\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$

اریوکروم بلک تی،

مطالعه سینتیکی،

حذف فوتوکاتالیستی.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2025.35373.2310>

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

۱- مقدمه

آلودگی و بحران های انرژی مسئله نوظهور در سراسر جهان است. صنعتی شدن و شهرنشینی راه را برای رشد کارخانه های متعدد در زمینه چرم، کاغذ، مواد غذایی، لوازم آرایشی و نساجی هموار کرده است. این پساب های صنعتی به عنوان یک آلاینده اصلی عمل می کنند و محیط های آبی را آلوده می کنند. آلاینده های رنگی به دلیل ماهیت غیر قابل تجزیه و پایداری برای سلامتی خطرناک هستند. علاوه بر این، آب آشامیدنی هم توسط چندین میکروارگانیسم عفونی آلوده می شود. رشد صنایع داروسازی راه را برای توسعه گونه های مختلف مقاوم به آنتی بیوتیک ها هموار کرد. بنابراین، تصفیه و احیای محیط های آبی، تقاضای اصلی در دهه جاری است. روش های مختلفی برای حذف این گونه آلاینده های آلی مانند حذف فیزیکی، شیمیایی و زیستی اتخاذ شده است. فرآیندهای موجود به دلیل ناکارآمدی، تشکیل لجن یا آلاینده های ثانویه با محدودیت هایی مواجه هستند [۱-۳].

توسعه یک استراتژی جدید موثر دوستدار محیط زیست برای پیامدهای عملی موفق جذاب تر خواهد بود. با توجه به این موضوع، انتخاب فوتوکاتالیزور می تواند راه حل مناسبی باشد زیرا مزایای خاص خود مانند استفاده از انرژی طبیعی، سازگاری با محیط زیست، اکسیداسیون غیرانتخابی، مقرون به صرفه بودن و غیره را دارد. در فرآیند های محیط زیستی حذف آلاینده های آلی با یک فرآیند ردوکس ساده به دست می آید. یکی دیگر از مزایای اصلی این فرآیند این است که منجر به کانی سازی مطمئن آلاینده ها می شود که حذف کامل را تسهیل می کند [۴-۶]. این در مطالعات مختلف با استفاده از فوتوکاتالیست های نیمه رسانای نانو اکسید فلز تحت تابش نور فرابنفش گزارش شده است.

وجود نانو کاتالیزور در فرآیند کاتالیزوری از اکسید فلز نیمه هادی مهم است. تهیه مواد جدید با ساختارهای متنوع توسط محققان برای استفاده در کاربردهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۷-۱۰]. نانو مواد اکسید مس خواص منحصر به فردی دارند و در فوتوکاتالیست ها، حسگرها، کاتالیزور، نانو الکترونیک و غیره کاربرد دارند. در مطالعات قبلی میکرو ذرات کروی CuO سنتر و برای احیا دی اکسید کربن مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. در مطالعاتی دیگر، نانو ذرات CuO برای فرآیند فوتوکاتالیستی تحت تابش نور خورشید مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]. برای بهبود خاصیت فوتوکاتالیستی نانو ذرات CuO ، جفت شدن یک نیمه هادی بسیار سودمند خواهد بود. در میان فوتوکاتالیست های مختلف، فریت های اسپینل با ترکیب شیمیایی $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ به دلیل ویژگی های فرومغناطیسی و ویژگی های برتر، توجه را به خود جلب کرده اند. فریت های اسپینل مغناطیسی می توانند کاندیدای ایده آل برای حذف اکسیداتیو فوتوکاتالیستی آلاینده ها باشند [۱۳]. فریت های اسپینل برای حذف آلاینده های آب و هوا مورد بررسی قرار گرفته اند. از دیگر مزایای آن می توان به قابلیت بازیابی و استفاده مجدد از مواد با کمک آهنرباهای خارجی اشاره کرد. قابلیت استفاده مجدد یک مزیت بزرگ برای رساندن فوتوکاتالیز به مقیاس بزرگ در سطح صنعتی خواهد بود [۱۴ و ۱۵]. بازده مواد و خواص بسته به تکنیک های آماده سازی و نوع کاتیون موجود متفاوت خواهد بود. SrFe_2O_4 با انرژی گپ نسبتاً باریک، پایداری فوتوشیمیایی عالی را ایجاد می کند. SrFe_2O_4 مزایای دیگری مانند سختی مکانیکی، زیست سازگاری، راندمان الکترومغناطیسی بالا و توانایی جذب قوی دارد [۱۶]. با این وجود، توانایی کم تبدیل فوتونی و پتانسیل های کم باند ظرفیت، SrFe_2O_4 را به عنوان یک فوتوکاتالیست ناکافی تبدیل می کند. بنابراین بارگیری SrFe_2O_4 با کو-کاتالیست ها، بهبود کارایی فوتوکاتالیستی را تسهیل می کند. جفت شدن کاتالیزور برای تشکیل اتصال ناهمگون می تواند بارهای ناشی از تابش نور را به طور موثر جدا کند که عملکرد فوتوکاتالیستی را بهبود می بخشد [۱۷ و ۱۸].

در این مطالعه از نانوکامپوزیت CuO ترکیب شده با SrFe_2O_4 برای حذف موثر رنگ اریوکروم بلک تی استفاده شد. این نانوکامپوزیت برای بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی فردی نانوذرات CuO و SrFe_2O_4 تهیه شد. نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ تهیه شده به عنوان فوتوکاتالیست مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد

استرانسیم نیترات، آهن نیترات، استات مس به عنوان نمک های فلزی برای ساخت نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفتند. آمونیاک ۲۸٪، پلی وینیل الکل، سیتریک اسید و اتیلن گلیکول به عنوان مواد فرعی در سنتز استفاده شدند. رنگ اریکروم بلک تی به عنوان آلاینده در واکنش فوتوکاتالیستی مورد مطالعه قرار گرفت. همه مواد شیمیایی مرک می باشند.

۲-۲- سنتز نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$

در این آزمایش، استات مس (۵۰ میلی لیتر، ۰/۱ مولار) و پلی وینیل الکل (۰/۵ گرم) در ۲۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه شده در دمای ۲۷ درجه سانتیگراد حل شدند. پس از آن، ۵/۰ میلی لیتر آمونیاک ۲۸٪ قطره قطره به محلول اصلی افزوده و در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت رفلکس شد. محلول به مدت ۱ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد به شدت هم زده و سپس، محلول را در اتوکلاو قرار داده و در دمای ۱۸۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت حرارت داده شد. محصول سوسپانسیون فیلتر و رسوب حاصل شستشو و در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت در آون خشک شد. نمونه نهایی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت کلسینه شد.

برای سنتز و تهیه کامپوزیت SrFe_2O_4 روی CuO از روش هم‌رسوبی به کمک اولتراسونیک استفاده شد. در ابتدا، CuO (۰/۵ گرم) به روش اولتراسونیک در ۶۰ میلی لیتر محلول استرانسیم نیترات (۵۰ میلی مولار) و آهن نیترات (۱۰۰ میلی مولار) همگن شد و سپس سیتریک اسید/ اتیلن گلیکول (۲۵ میلی لیتر، ۳ مولار) بصورت قطره‌ای افزوده شد. علاوه بر این، محلول تحت امواج اولتراسونیک به مدت ۱ ساعت قرار گرفت و رسوب به دست آمده فیلتر، جمع آوری و شسته شد. رسوب حاصل بعد از شستشو در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت در آون خشک شد. علاوه بر این، در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت کلسینه شد.

۲-۳- دستگاه ها

نمونه‌های نانو با پراش پرتو ایکس (XRD ، Philips X'Pert Pro) برای ارزیابی فاز کریستالی و حالت شیمیایی مورد مطالعه قرار گرفتند. میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (Mira 3 TESCAN) برای بررسی سطح، و مورفولوژیک نانومواد سنتز شده بررسی شد. سطح ویژه توسط دما جذب و واجذب نیتروژن با روش BET و دستگاه ASAP2010 مورد بررسی قرار گرفت. مغناطیس ارتعاشی توسط شرکت مغناطیس ELECTRONIC BALANCE HR 120i دقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل جذب اشعه ماوراء بنفش مرئی توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر JASCO V-570 مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی

فرآیند فوتوکاتالیستی، میزان حذف رنگ اریکروم بلک تی توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر ماوراء بنفش مرئی شرکت شیمادزو مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۴- آزمایش فوتوکاتالیستی

فعالیت فوتوکاتالیزوری نانومواد سنتز شده، توسط رنگ اریکروم بلک تی (EBT) با غلظت ۱۵ میلی گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش، در یک راکتور ناپیوسته مجهز به یک ژاکت آب خنک کننده برای کنترل دما، انجام شد. میزان محلول رنگ EBT برابر با ۵۰ میلی لیتر به همراه ۱/۵ گرم بر لیتر فوتوکاتالیست سنتز شده به راکتور افزوده شد. منبع نور فرابنفش به عنوان منبع تابش مورد نیاز با دو لامپ فرابنفش با توان ۸ وات در بالا راکتور تجهیز شد. عملکرد حذف رنگ از دو فاز تعادلی- جذب سطحی و واکنش اصلی تشکیل شده است. بخش تعادلی توسط محیط تاریک به مدت ۳۰ دقیقه در حضور نانومواد سنتز شده بررسی شد و در مرحله بعد، تحت تابش فرابنفش، در حضور کاتالیست، حذف رنگ EBT مورد مطالعه قرار گرفت. در بازه های زمانی یکسان از محلول اصلی توسط سرنگ نمونه گیری شد و بعد از جداسازی و فیلتراسیون کاتالیست، میزان حذف رنگ EBT توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر ماوراء بنفش مرئی آنالیز شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه یابی نانومواد سنتز شده

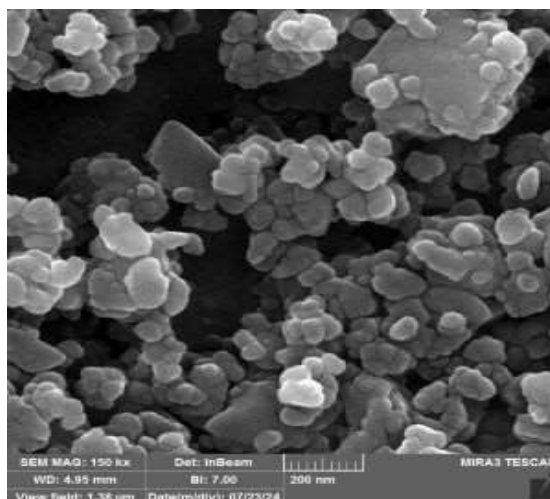
۳-۱-۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

آنالیز FESEM برای مطالعه و بررسی مورفولوژی و ریخت شناسی نانو ذرات تهیه شده، استفاده شد. مورفولوژی نانوذرات CuO و نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ نشان داده شده است (شکل ۱). بر طبق تصاویر به دست آمده، نانوذرات CuO دارای مورفولوژی تقریباً کروی تغییر شکل یافته می باشد (شکل ۱-الف-A). مورفولوژی نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ های سنتز شده، ترکیبی از نانو کره و نانو صفحات متصل به هم را نشان می دهد (شکل ۱-الف-B). برهمکنش سطحی بین دو نانوذرات، انتقال حامل های بار را تسهیل می کند و کارایی فوتوکاتالیستی را بهبود می بخشد [۲۱-۱۹]. عناصر موجود در نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ با استفاده از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) بررسی شد. عناصر استرانسیوم، آهن، مس و اکسیژن به ترتیب با توزیع عنصری ۷، ۱۴، ۱۳ و ۶۴ درصد شناسایی شدند (شکل ۱-ب).

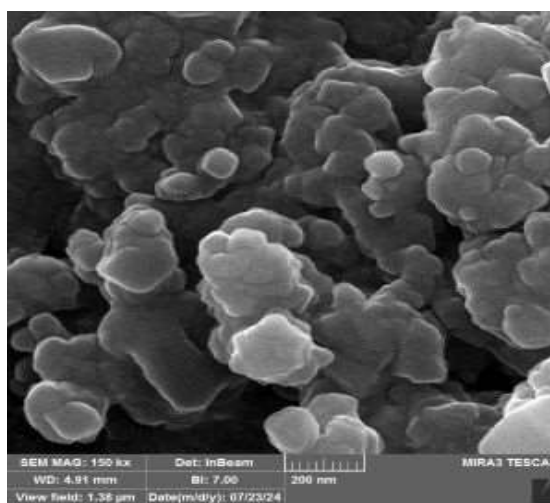
۳-۱-۲- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)

اطلاعات کریستالی کاتالیست سنتز شده از طریق آنالیز XRD مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار XRD نانوذرات CuO نشان داده شده است (شکل ۲). چندین پیک در زاویه های 2θ ۳۲/۸۴، ۳۶/۹۷، ۳۹/۲۷، ۴۸/۳۲، ۵۲/۱۲، ۶۲/۷۴، ۶۶/۵۹ و ۶۸/۷۴ با الگوهای پراش (۱۱۰)، (۱۱۱)، (۱۱۱)، (۲۰۲)، (۰۲۰)، (۱۱۳)، (۳۱۰) و (۲۲۰) مربوط به فاز مونوکلینیک CuO (JCPDS 45-0937) مشاهده می شود [۲۲].

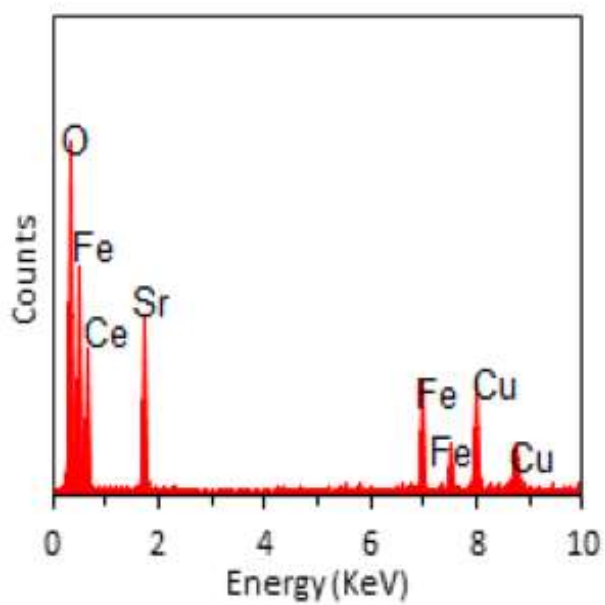
A



B



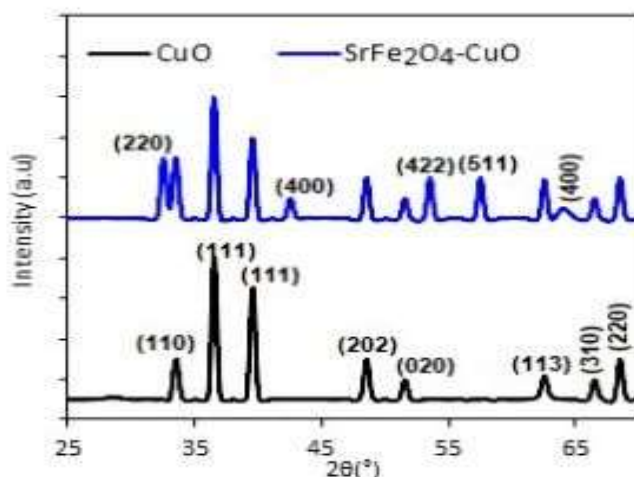
شکل ۱- الف- تصاویر FESEM مربوط به نمونه نانوذرات CuO (A) و نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ (B)



شکل ۱- ب- طیف EDS مربوط به نمونه نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$

با توجه به نمودار XRD نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ ، می توان پیک های نانوذرات SrFe_2O_4 در زوایای 2θ ۵/۳۰، ۲۹/۴۱، ۱۹/۵۶، ۴۴/۵۸ و ۴۰/۶۴ درجه با الگو های پراش (۲۲۰)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱) و (۴۰۰) مربوط به فاز اسپینل SrFe_2O_4 بر طبق کارت استاندارد (JCPDS 48-0156) مشاهده کرد [۱۸].

اندازه کریستال نانومواد سنتز شده توسط معادله شرر محاسبه شد [۲۶-۲۳]. اندازه کریستال نانوذرات CuO و نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ به ترتیب ۲۹/۱۲ و ۳۹/۸۱ نانومتر است.



شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) برای نانوذرات CuO و نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$

۳-۱-۳- تخلخل سنجی

سایت های فعال موجود در سطح نانومواد سنتز شده به بهینه شدن عملکرد فوتوکاتالیستی کمک می کند. داده های حاصل از نمودار جذب و واجذب نیتروژن آورده شده است (جدول ۱). همانطور که مشاهده می شود، مساحت سطح برای نمونه های نانوذرات CuO و نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ برابر با $15/12 \text{ mg}^2/\text{g}$ و $45/23 \text{ mg}^2/\text{g}$ می باشد. گزارش شده است که مساحت سطح بالا از خصوصیات مواد نانوساختار است و فعالیت فوتوکاتالیزوری را افزایش می دهد. سطح بالای بدست آمده را می توان به تثبیت SrFe_2O_4 بر CuO نسبت داد. طی فرآیند تهیه نانوکامپوزیت، نانوذرات به خوبی پراکنده شده و حفره های ایجاد شده منجر به بهبود مساحت سطح شدند [۲۶-۲۳].

جدول ۱- داده های حاصل از تخلخل سنجی نمونه های سنتز شده		
نام ماده	مساحت سطح	حجم حفره
CuO	$15/12 \text{ mg}^2/\text{g}$	$0/085 \text{ cm}^3/\text{g}$
$\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$	$45/23 \text{ mg}^2/\text{g}$	$0/103 \text{ cm}^3/\text{g}$

۳-۱-۴- طیف سنجی بازتابی

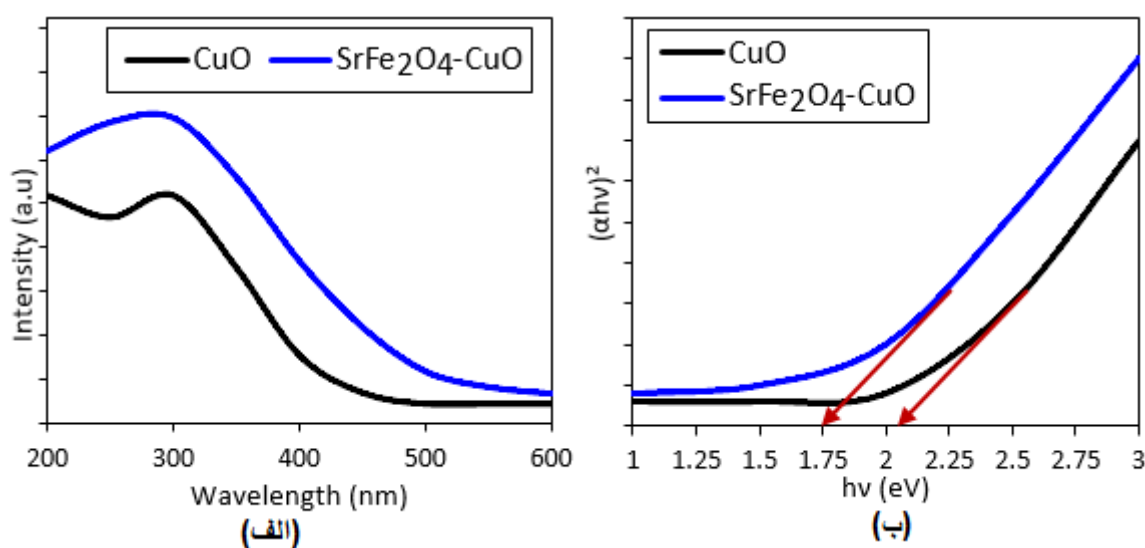
خواص نوری نانوذرات CuO و نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ با استفاده از طیف سنجی فرابنفش- مرئی (UV-Vis) مورد مطالعه قرار گرفت. برحسب نتایج از (شکل ۳-الف) افزودن SrFe_2O_4 بر رفتار نوری و جذب نور CuO برای کامپوزیت تأثیر می گذارد.

با تثبیت SrFe_2O_4 ، لبه جذب افزایش یافته و در ناحیه ۴۹۰ نانومتر قرار می گیرد. با استفاده از رابطه تاک، شکاف انرژی محاسبه می شود [۲۷-۲۸]. در (شکل ۳-ب) مقدار شکاف انرژی نمونه های سنتز شده آورده شده است.

$$\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)^n$$

در این رابطه، α ضریب جذب، h ثابت پلانک، ν فرکانس، A جذب و n برای انتقال مستقیم برابر ۲ است.

شکاف انرژی در فعالیت فوتوکاتالیزوری بسیار تأثیر گذار می باشد. همانطور که مشاهده می گردد مقدار شکاف انرژی نانوذرات CuO و نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ به ترتیب برابر با ۲/۱۲ الکترون ولت و ۱/۷۶ الکترون ولت به دست آمده است.



شکل ۳- (الف) طیف جذبی فرابنفش-مرئی، (ب) مقدار شکاف انرژی نمونه های سنتز شده

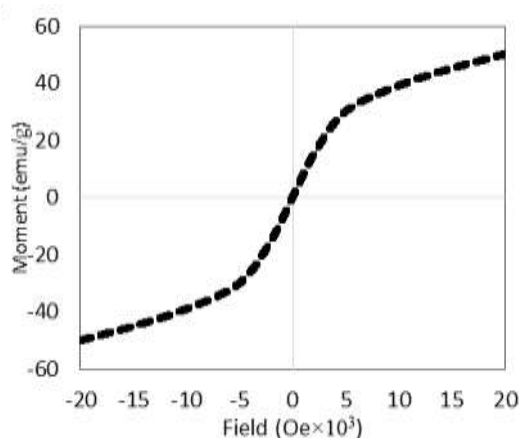
۳-۱-۵- مغناطیس سنجی ارتعاشی (VSM)

توانایی نانوذرات برای بازیابی توسط میدان مغناطیسی ایجاد شده با آهن ربا یک مزیت کلیدی است که به قابلیت استفاده مجدد کمک می کند. SrFe_2O_4 دارای خواص مغناطیسی خوبی است که توسط VSM ارزیابی شده است. حضور نانوذرات SrFe_2O_4 در نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ می تواند خواص مغناطیسی قابل توجه ای را نشان دهد. یکی دیگر از ویژگی های فریت های اسپینل این است که لایه های بی نظم چرخشی ایجاد می کند که از رسیدن آنها به اشباع مغناطیسی کامل حتی با مقادیر میدان مغناطیسی بالا جلوگیری می کند [۱۸]. نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ ماهیت پارامغناطیس با اشباع مغناطیسی ۵۰/۱۳ emu/g را نشان داد (شکل ۴).

۳-۲- ارزیابی عملکرد فوتوکاتالیستی

حذف EBT در شرایط مختلف نشان داده شد (شکل ۵-الف). مشاهده می شود که EBT تحت تابش نور UV بدون حضور هیچ کاتالیستی حدود ۱۰ درصد حذف شده است.

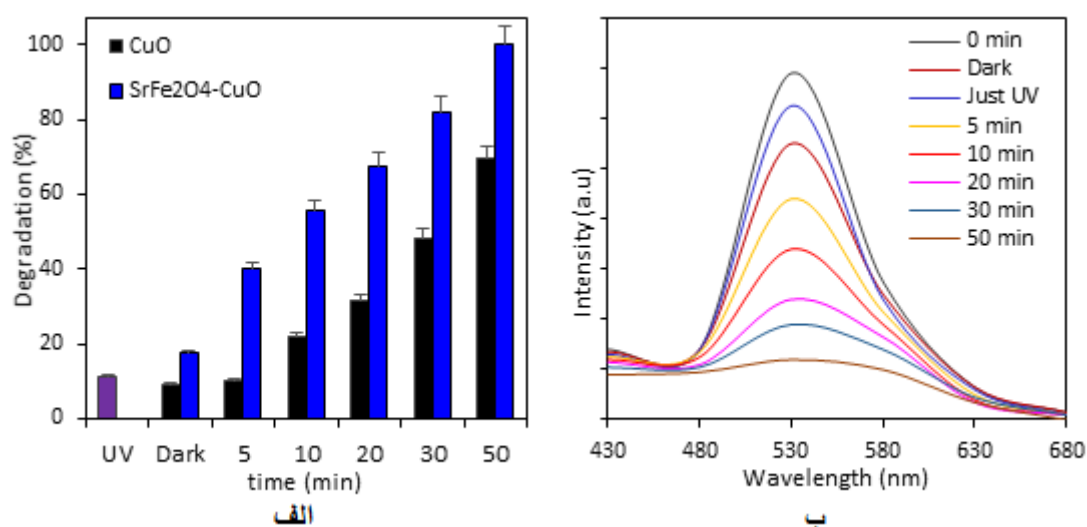
فعالیت فوتوکاتالیزوری توسط نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ با استفاده از رنگ‌زدایی رنگ اریکروم بلک تی (EBT) مورد آزمایش قرار گرفت. میزان جذب رنگ مورد نظر در طول موج بیشینه ۵۳۰ نانومتر مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.



شکل ۴- منحنی مغناطیس مربوط به نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$

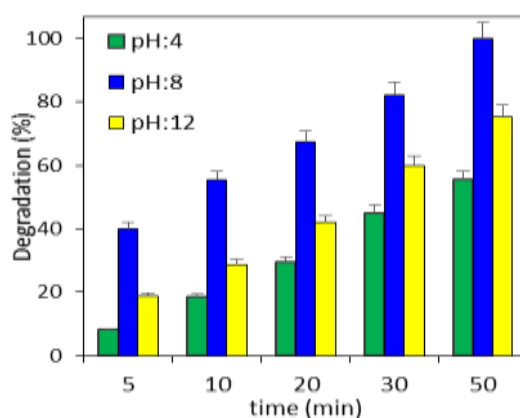
(شکل ۵-ب) ظرفیت جذب نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ از طریق حذف EBT در شرایط تاریکی مورد بررسی قرار گرفت. پس از ۳۰ دقیقه، ظرفیت جذب نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ برابر با ۱۵/۵۰ درصد یافت شد. راندمان حذف نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ تحت نور فرابنفش نشان می‌دهد که تجزیه ۱۰۰/۰ درصدی در مدت زمان ۵۰ دقیقه به دست آمد. پیشرفت حذف EBT با افزایش زمان واکنش، افزایش یافته است.

همانطور که مشاهده می‌شود، نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ دارای راندمان حذف بالاتری نسبت به نانوذرات مس اکسید می‌باشد. این نتیجه به دلیل این می‌باشد که شکاف نوری نانوکامپوزیت به مراتب از نانوذرات مس اکسید پایین‌تر می‌باشد [۲۹-۳۳].



شکل ۵- (الف) روند حذف EBT توسط دو نمونه سنتز شده، (ب) طیف جذب فرابنفش- مرئی EBT و حذف آن در زمان‌های مختلف توسط نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$

pH محلول می تواند بر اندازه و پایداری ذرات معلق که دارای سطوح مختلف هستند تأثیر بگذارد و بنابراین در دسترس بودن فعالیت کاتالیست را تحت تأثیر قرار می دهد. بر اساس آزمایش زتا پتانسیل کاتالیست سنتز شده، بار نقطه صفر (pHpzc) نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ برابر با ۶/۵ است. در زیر این مقدار pH، سطح دارای بار مثبت است و این باعث می شود کاتالیزور با مولکول های EBT در محلول برهمکنش کند [۳۴ و ۳۵]. تأثیر pH بر روی اکسیداسیون نوری رنگ EBT ارزیابی شد (شکل ۶). مشخص شد که در $\text{pH} \sim 8$ ، بهترین فعالیت نوری نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ حاصل می شود. نتیجه ای مطابق با گزارش های قبلی که تأثیر قابل توجه pH را بر روی اکسیداسیون نوری نشان می دهد.

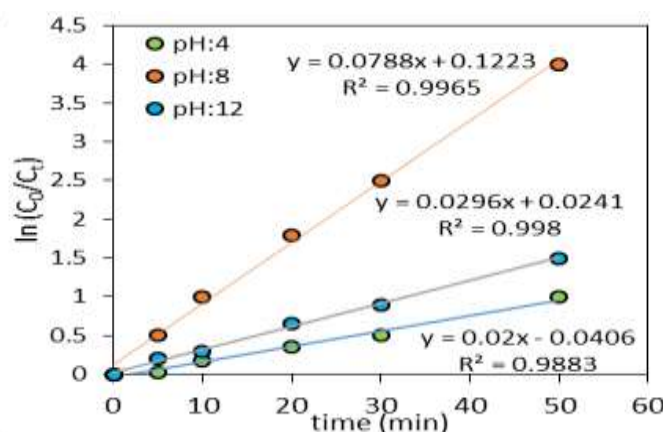


شکل ۶- روند حذف EBT توسط نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ در pH های مختلف

سینتیک حذف فوتوکاتالیستی رنگ های آلی معمولاً از مکانیسم لانگمویر-هینسلوود پیروی می کند [۳۶].

$$r = -dC/dt = \ln(C_0/C_t) = k_t t$$

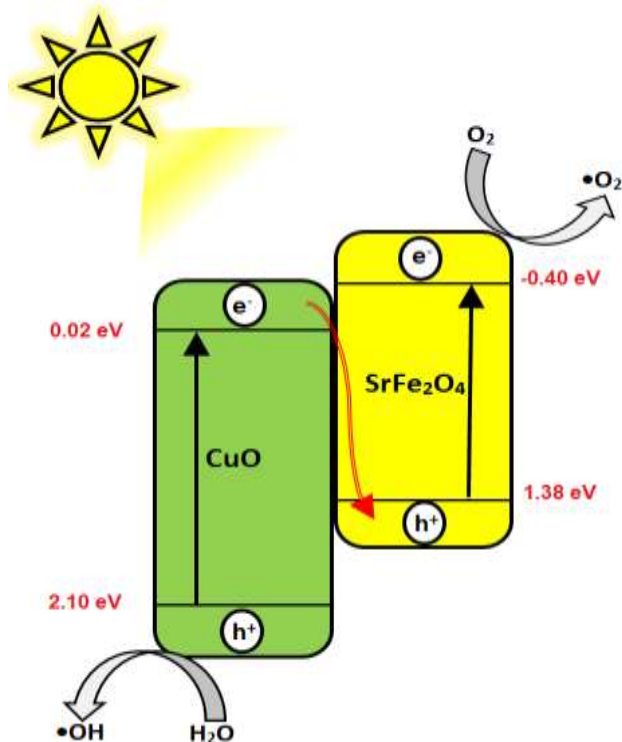
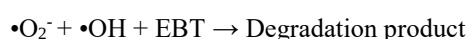
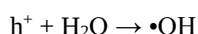
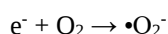
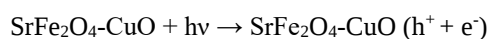
که در آن C نشان دهنده غلظت اولیه، C_t غلظت بعد از واکنش و k_t ثابت سرعت واکنش است. نمودارهای $\ln(C_0/C_t)$ در مقابل زمان برای pH های مختلف نشان داده شده است (شکل ۷). ثابت سرعت در pH: 4، pH: 8 و pH: 12 به ترتیب ۰/۰۲۹۶، ۰/۰۷۸۸ و ۰/۰۲۰۰ بر دقیقه می باشد. مشاهده می شود که سرعت واکنش در محیط با pH: 8، ۲/۶۶ و ۳/۹۴ برابر بیشتر از pH: 4 و 12 است.



شکل ۷- نمودار سینتیکی حذف EBT توسط نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ در pH های مختلف

۳-۲-۱- مکانیسم حذف فوتوکاتالیستی

با تابش نور فرابنفش به نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ ، نانوکامپوزیت یک فوتون را جذب می کند، و به تبع آن، الکترون و حفره ایجاد می شوند. بر اساس نمودار انرژی، الکترون های موجود در نوار هدایت CuO به نوار ظرفیت SrFe_2O_4 مهاجرت می کنند، در همین حال حفره ها با الکترون های مهاجرت کرده زوج ساخته و مجدد تحت تابش برانگیخته می شوند. با توجه به قرار گیری نوار هدایت SrFe_2O_4 در شرایط منفی تر نسبت پتانسیل $\text{O}_2/\cdot\text{O}_2^-$ ، اکسیژن موجود به سوپردی اکسید رادیکال تبدیل می شود و می تواند رنگ EBT را حذف کند [۳۶ و ۳۷]. از طرفی با توجه به قرار گیری نوار ظرفیت CuO در شرایط مثبت تر نسبت به پتانسیل $\text{H}_2\text{O}/\cdot\text{OH}$ ، هیدروکسیل رادیکال توسط حفره های موجود از مولکول های آب تولید می شوند. حضور هیدروکسیل رادیکال، قابلیت حذف بسزایی برای حذف رنگ EBT ایجاد می کند و در نتیجه، عملکرد فوتوکاتالیستی بیشتر بهبود می یابد (شکل ۸) [۳۶]. فرآیند حذف رنگ EBT توسط نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ به شرح ذیل می باشد:

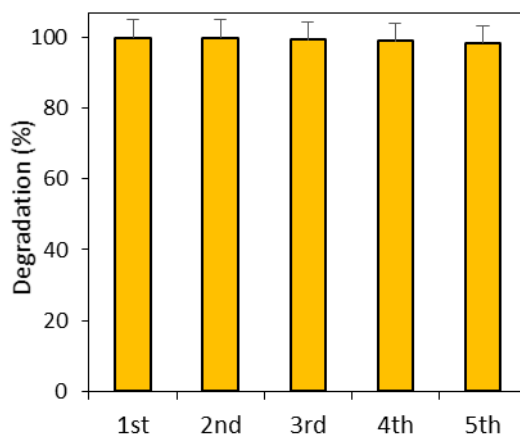


شکل ۸ - مکانیسم حذف فوتوکاتالیستی EBT توسط نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$

۳-۲-۲- قابلیت استفاده مجدد و پایداری ساختاری

بازیابی نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ از آب تصفیه شده با استفاده از آهنربا یک نیاز حیاتی برای پیاده سازی قابلیت استفاده مجدد است [۳۷]. نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ به صورت مغناطیسی بازیابی شد. عملکرد فوتوکاتالیستی برای پنج چرخه متوالی

نشان داده شده است (شکل ۹). می توان اشاره کرد که حتی پس از چرخه پنجم نیز کاهش ناچیزی در فعالیت فوتوکاتالیزوری مشاهده شد. پایداری عالی نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ ، آن را به یک نامزد امیدوارکننده برای کاربردهای صنعتی تبدیل می کند.



شکل ۹ - نمودار بازیابی نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ برای حذف EBT

۳-۲-۳- بررسی کارایی نانوکامپوزیت های تهیه شده

با توجه به جدول ۱، همانطور که مشاهده می شود نتایج حاصل از این مطالعه در مقایسه با مطالعات قبلی دارای پتانسیل ویژه ای می باشد. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ توانایی حذف رنگ EBT را با راندمان ۱۰۰ درصد و در مدت زمان کوتاه را دارا می باشد. این کارایی مرتبط با ساختار انرژی و شکاف باند نانوکامپوزیت تهیه شده می باشد که در مقایسه با نانوکامپوزیت های مشابه عملکرد بهتری را نشان می دهد.

جدول ۲- مقایسه عملکرد نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ با مطالعات قبلی

نانوکامپوزیت	رنگ مورد مطالعه	میزان حذف	مرجع
$\text{ZnO/g-C}_3\text{N}_4$	متیلن بلو	۸۸ درصد، ۱۸۰ دقیقه	[۳۸]
$\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CuO}$	متیلن بلو	۹۴ درصد، ۱۰۰ دقیقه	[۳۹]
$\text{SnO}_2\text{-ZnO}$	اریوکروم بلک تی	۹۸ درصد، ۱۸۰ دقیقه	[۴۰]
$\text{CuO/Fe}_3\text{O}_4$	بریلیانت گرین	۹۴ درصد، ۹۰ دقیقه	[۴۱]
$\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$	اریوکروم بلک تی	۱۰۰ درصد، ۵۰ دقیقه	در این مطالعه

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، سنتز و تثبیت نانو اسپینل های SrFe_2O_4 بر CuO جهت ارزیابی فوتوکاتالیزوری مورد آزمایش قرار گرفت. روش هم رسوبی به کمک اولتراسونیک برای ساخت نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ انتخاب شد. نانوکامپوزیت های تشکیل شده برای خواص مورفولوژیکی، ساختاری، نوری و مغناطیسی نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ مورد ارزیابی قرار گرفت. نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ به دلیل افزایش فعالیت توسط اثر هم افزایی، ۱۰۰٪ رنگ اریوکروم بلک تی را در مدت ۵۰ دقیقه

تحت تابش نور فرابنفش حذف کرد. برحسب بررسی مکانیسم حذف، هیدروکسیل رادیکال و سوپر دی اکسید رادیکال نقش بسزایی در حذف EBT توسط نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ دارند. نانوکامپوزیت $\text{SrFe}_2\text{O}_4\text{-CuO}$ قابلیت بازیافت مغناطیسی و پایداری بالایی دارند که با آزمایش پنج چرخه متوالی تایید شد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسنده این مقاله مراتب قدردانی خود را از دانشگاه پیام نور بخاطر حمایت های مادی و معنوی این کار پژوهشی اعلام می دارند.

۶- فهرست منابع و مآخذ

- [1] Fox, M.A., & Dulay, M.T. (1993). Heterogeneous photocatalysis. *Chem. Rev*, 93, 341-357.
- [2] Ben Hariz, S.H., Lahmar, H., Rekhila, G., Bouhala, A., Trari, M., & Benamira, M. (2022). A novel $\text{MgCr}_2\text{O}_4/\text{WO}_3$ hetero-junction photocatalyst for solar photo reduction of hexavalent chromium cr (VI). *J. Photochem. Photobiol. A Chem*, 430, 113986.
- [3] Laouici, R., Douafer, S., Lahmar, H., Rekhila, G., Trari, M., & Benamira, M. (2021). Elaboration and studies of physical and photo-electrochemical properties of La_2NiO_4 and its use with SnO_2 in photo-evolution of hydrogen under visible light irradiation. *Optik (stuttgart)*, 236.
- [4] Lahmar, H., Benamira, M., Douafer, S., Messaadia, L., Boudjerda, A., & Trari, M. (2020). Photocatalytic degradation of methyl orange on the novel hetero-system $\text{La}_2\text{NiO}_4/\text{ZnO}$ under solar light. *Chem. Phys. Lett*, 742, 137132.
- [5] Gherbi, R., Nasrallah, N., Amrane, A., Maachi, R., & Trari, M. (2011). Photocatalytic reduction of cr (VI) on the new hetero-system $\text{CuAl}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$. *J. Hazard. Mater*, 186, 1124-1130.
- [6] Cong, Z., Zhou, L., Zheng, N., & Sesay, T. (2023). Synthesis and visible-light photocatalytic property of spinel CuAl_2O_4 for vehicle emissions. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 30, 64123-64136.
- [7] Ponmudi, S., Sivakumar, R., Sanjeeviraja, C., Gopalakrishnan, C., & Jeyadheepan, K. (2019). Facile fabrication of spinel structured n-type CuAl_2O_4 thin film with nano-grass like morphology by sputtering technique. *Appl. Surf. Sci*, 483, 601-615.
- [8] Kaci, M.M., Nasrallah, N., Djaballah, A.M., Akkari, I., Belabed, C., Soukeur, A., Atmani, F., & Trari, M. (2022). Insights into the optical and electrochemical features of CuAl_2O_4 nanoparticles and its use for methyl violet oxidation under sunlight exposure. *Opt. Mater. (amst)*, 126, 112198.
- [9] Kiamouche, S., Messaadia, L., Lahmar, H., Rekhila, G., & Trari, M. (2022). Enhanced photocatalytic degradation of ponceau S red dye on the novel hetero-system $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{WO}_3$ under solar light irradiation *React. Kinet. Mech. Catal.*, 1-16.
- [10] Lourghi, M., Lahmar, H., Rekhila, G., Bouatam, I., Trari, M., & Benamira, M. (2024). Fabrication of the new p- Co_3O_4 /n-AgI hetero-junction and its solar photo-degradation of the fast green FCF, *J. Photochem. A Chem.*, 447, 115195.
- [11] Li, Da., Huang, Linlin. Liu, Tongtong., Jia, Liu., & Feng, Yujie. (2019). Electrochemical reduction of carbon dioxide to formate via nano-prism assembled CuO microspheres. *Chemos*, 23, 124527.

- [12] Sughra Jamila, G., Sajjad, S., Ahmed Khan Leghari, S., & Mahmood, T., (2020). Role of nitrogen doped carbon quantum dots on CuO nano-leaves as solar induced photo catalyst. *J. Phys. Chem. Solid*, 138, 109233.
- [13] Gazi, M., Panda, S., & Bordoloi, A., (2024). Synthesis of surface-engineered SrFe_2O_4 for efficient catalytic partial oxidation of methane. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 5, 100045.
- [14] S, H., Jayakumar, O. D., & Sambhudevan, S., (2024). Temperature-controlled morphology and enhanced functionalities of hydrothermally synthesized SrFe_2O_4 nanostructures for multifaceted applications, 48, 104252.
- [15] Eltaweil, S.A., Mohamed, H., & El-Subruiti, M., (2024). Designing of SrFe_2O_4 -decorated sulfur-MXene for super-fast adsorption of mercury. *Journal of Molecular Liquids*, 408, 125275.
- [16] Karim, S., Chakraborty, A., & Das, D., (2022). Devising SrFe_2O_4 spinel nanoflowers as highly efficient catalyst for enhanced electrochemical water oxidation in different basic concentration. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 919, 116465.
- [17] Zhang, D., & Zhang, L., (2016). Ultrasonic-assisted sol-gel synthesis of rugby-shaped SrFe_2O_4 /reduced graphene oxide hybrid as versatile visible light photocatalyst. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 69, 156-162.
- [18] Bo, L., Hu, Y., & Tong, J., (2019). Efficient photocatalytic degradation of Rhodamine B catalyzed by $\text{SrFe}_2\text{O}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$ composite under visible light. *Polyhedron*, 168, 94-100.
- [19] Douafer, S., Lahmar, H., Laouici, R., Akika, F.Z., Trari, M., Avramova, I., & Benamira, M. (2023). Synthesis and characterization of CdFe_2O_4 nanoparticles: application for the removal of methyl green under solar irradiation, *Mater. Today Commun.* 105630.
- [20] Boulahbel, H., Benamira, M., Bouremmad, F., Nada, A., Kiamouche, S., Lahmar, H., Souici, A., & Trari, M. (2023). Enhanced photodegradation of Congo red dye under sunlight irradiation by pn $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ heterostructure. *Inorg. Chem. Commun*, 110921.
- [21] Ahmia, N., Benamira, M., Messaadia, L., Colmont, M., Boulahbel, H., Lahmar, H., Souici, A., & Trari, M. (2024). Photocatalytic activity of $\text{ZnMn}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ heterostructure under solar light irradiation: Experimental and theoretical study. *J. Mol. Struct*, 1306, 137834.
- [22] Cai, Yuan., Yang, Fuxing., Wu, Lili., Shu, Yuxian., Qu, Guangmiao., Fakhri, Ali., & Kumar Gupta, Vinod.(2021). Hydrothermal-ultrasonic synthesis of CuO nanorods and CuWO_4 nanoparticles for catalytic reduction, photocatalysis activity, and antibacterial properties. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123919.
- [23] Boughelout, A., Macaluso, R., Kechouane, M., & Trari, M. (2020). Photocatalysis of rhodamine B and methyl orange degradation under solar light on ZnO and Cu_2O thin films. *React. Kinet.Mech.Catal*, 129, 1115-1130.

- [24] Boumaza, S., Kaouah, F., Hamane, D., Trari, M., Omeiri, S., Bendjama, Z. (2014). Visible light assisted decolorization of azo dyes: direct red 16 and direct blue 71 in aqueous solution on the p-CuFeO₂/n-ZnO system. *J. Mol. Catal. A Chem.* 393, 156–165.
- [25] Reda, I., & Andreas, A. (2004). Solar position algorithm for solar radiation applications. *Sol. Energy*, 76, 577-589.
- [26] Almorox, J., Voyant, C., Bailek, N., Kuriqi, A., & Arnaldo, J.A. (2021). Total solar irradiance's effect on the performance of empirical models for estimating global solar radiation: an empirical-based review. *Energy*, 236, 121486.
- [27] Nicolet, M. (1989). Solar spectral irradiances with their diversity between 120 and 900 nm, *Planet. Space Sci.* 37, 1249-1289.
- [28] Gueymard, C.A. (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Sol. Energy*. 76, 423–453.
- [29] Myrick, M.L., Simcock, M.N., Baranowski, M., Brooke, H., Morgan, S.L., & McCutcheon, J. N. (2011). The kubelka-munk diffuse reflectance formula revisited. *Appl. Spectrosc. Rev.* 46, 140-165.
- [30] Gelderman, K., Lee, L., & Donne, S.W. (2007). Flat-band potential of a semiconductor: using the Mott-schottky equation. *J. Chem. Educ.* 84, 685.
- [31] Xie, J. X., Bakker, E., (2015). Solvatochromic dyes as pH-independent indicators for ionophore nanosphere-based complexometric titrations. *Anal. Chem.* 87, 12318-12323.
- [32] Akika, F.Z., Benamira, M., Lahmar, H., Trari, M., Avramova, I., & Suzer, S, (2020). Structural and optical properties of cu-doped ZnAl₂O₄ and its application as photocatalyst for Cr (VI) reduction under sunlight. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100406.
- [33] Turchi, C.S., & Ollis, D.F, (1990). Photocatalytic degradation of organic water contaminants: mechanisms involving hydroxyl radical attack. *J. Catal.* 122, 178–192.
- [34] Lahmar, H., Douafer, S., Laouici, R., Hamdi, M., Souici, A., Trari, M, & Benamira, M.(2024). Synthesis and characterization of CuAl₂O₄ nanoparticles: Application for the removal of Eriochrome Black T under solar light irradiation. *Inorganic Chemistry Communications*, 163,112316
- [35] Kazeminezhad, Iraj., & Sadollahkhani, Azar. (2014). Photocatalytic degradation of Eriochrome black-Tdye using ZnO nanoparticles. *Materials Letters*, 120, 267-270.
- [36] Nosaka,Y.,& Nosaka. A. (2016). Understanding hydroxyl radical ($\bullet\text{OH}$) generation processes in photocatalysis. *ACS Energy Lett.* 1, 356–359.
- [37] Barker, D.J., Mannucchi, G.A., Salvi, S.M.L. & Stuckey, D.C. (1999). Characterisation of soluble residual chemical oxygen demand (COD) in anaerobic wastewater treatment effluents. *Water Res*, 33, 2499-2510.
- [38] Renathung C, Ngullie., Saleh O, Alaswad., Kandasamy Bhuvaneswari., Paramasivam Shanmugam., Thangavelu Pazhanivel., & Prabhakarn Arunachalam. (2020). Synthesis and

Characterization of Efficient ZnO/g-C₃N₄ Nanocomposites Photocatalyst for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue. *Coatings*, 10(5), 500.

[39] Vijayakumar, T.P., Benoy, M.D., Duraimurugan, J., Suresh Kumar, G., Mohd. Shkir., Maadeswaran, P., Senthil Kumar, A., & Ramesh Kumar, K.A. (2022). Hydrothermal synthesis of CuO/g-C₃N₄ nanosheets for visible-light driven photodegradation of methylene blue. *Diamond and Related Materials*, 121, 108735.

[40] Golmohammadi, M., Nabipoor Hassankiadeh, M., & Zhang, L. (2021). Facile biosynthesis of SnO₂/ZnO nanocomposite using *Acroptilon repens* flower extract and evaluation of their photocatalytic activity. *Ceramics International*, 47, 29303-29308.

[41] Mihieka Asai, M., & Tapadia, K. (2025). Biofabricated magnetic CuO@Fe₃O₄ nanocomposites: Synthesis, characterization and Brilliant Green dye removal from aqueous media and its kinetics study. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102 (5) , 101668.