ساخت نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO و بررسی خواص فوتوکاتالیستی آن در حذف رنگ ردامین B به‌عنوان یک آلودگی آلی در محیط‌های آبی

وحید کارگر ده‌بیدی[1*] و منصور فربد[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دکتری فیزیک حالت جامد، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
Vahidkargar2020@gmail.com

۲- استاد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

دریافت: بازنگری: پذیرش:

چکیده

در این پژوهش نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO به شکل کروی و دوکی طی دو مرحله ساخته شدند. محصولات تولید شده به‌وسیله پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و طیف جذبی UV-vis مشخصه‌یابی شدند. نتایج تحلیل فازی نشان داد که همه نمونه‌ها با خلوص بالایی ساخته شده‌اند. در همه نمونه‌ها، هسته‌های Fe_2O_3 دارای فاز کورندم رمبوهدرال و پوسته‌های ZnO دارای فاز هگزاگونال هستند. متوسط قطر نانوذرات برای نمونه‌های کروی شکل به ترتیب ٤٧، ٢٨ و برای نمونه دوکی شکل ١٩ نانومتر بدست آمد. این نانوذرات در هر دو ناحیه مرئی و فرابنفش دارای جذب نور هستند. هم‌چنین با افزایش ضخامت لایه ZnO، میزان جذب در هر دو ناحیه افزایش می‌یابد. از طرفی میزان جذب در نمونه دوکی شکل بسیار بیش‌تر از نمونه‌های کروی شکل است. گاف نوری برای نانوذرات کروی شکل برابر ٢/٦٣ و ٢/٧٩ و برای نانوذرات دوکی شکل برابر ٣/٠٧ الکترون ولت بدست آمد. در نهایت عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO در تخریب رنگ ردامین B به‌عنوان یک آلودگی آلی در محیط آبی بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO دوکی شکل با تخریب فوتوکاتالیستی حدوداً ٨٦ درصد در مدت ٣٠٠ دقیقه عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های کروی شکل از خود نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: نانوذرات، هسته-پوسته، Fe_2O_3@ZnO، فوتوکاتالیستی، حذف، ردامین B.

مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل فعالیت‌های صنعتی، محیط زیست به شدت آلوده شده است (Sridharan et al., 2024). از جمله عوامل آلودگی محیط زیست می‌توان به تخلیه مواد شیمیایی مضر، رنگ‌های صنعتی، فلزات سنگین، داروها، آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، آلاینده‌های آلی، آنتی‌بیوتیک‌ها، زباله‌های پزشکی، فنول‌ها، فاضلاب صنعتی و فاضلاب نساجی اشاره کرد (Saravanan et al., 2021). در این میان، رنگ‌ها در صنایع مختلفی هم‌چون صنایع نساجی، صنایع دارویی، چاپ، صنایع غذایی و مواد آرایشی به‌کار می‌روند. این رنگ‌های آلی مصنوعی تهدیدی برای حیات آبی هستند و اختلال در زنجیره زیست‌بوم و حتی اثرات کشنده برای انسان‌ها را به‌دنبال دارند (Tkaczyk et al., 2020). تاکنون روش‌های مختلفی برای حذف این آلودگی‌ها پیشنهاد شده است (Hitam and Jalil, 2020; Ganeshbabu et al., 2020; Vijayalakshmi et al., 2021). در این میان، روش فوتوکاتالیستی یکی از رویکردهای سازگار با محیط زیست است که آلاینده‌های آلی را با فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و کاهش تخریب می‌کند (Saravanan et al., 2021).

استفاده از نانوبلورهای نیم‌رسانا به‌عنوان ماده فوتوکاتالیست، یک فن‌آوری سبز در حذف آلودگی‌های آلی و معدنی است (Karunakaran and Vinayagamoorthy, 2017). در این بین، ZnO به‌دلایل مختلف از جمله داشتن ظرفیت اکسایشی بالا و گاف نواری مستقیم ٣/٣ الکترون ولت در دمای اتاق، در دسترس و ارزان بودن، بیش‌تر از بقیه مواد مورد توجه بوده است (Buckley et al., 2025). علی‌رغم عملکرد خوب فوتوکاتالیست ZnO در تخریب آلاینده‌های محیطی، عواملی وجود دارد که کنترل آن‌ها باعث بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی آن می‌شود. بازترکیب سریع حامل‌های بار و عدم استفاده از نور مرئی به‌علت گاف نواری بزرگ، از جمله عواملی هستند که عملکرد فوتوکاتالیستی ZnO را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند (Kadhim et al., 2023). یک راه برای جلوگیری از بازترکیب حامل‌ها در این ماده، افزودن نیم‌رساناهای دیگر به ZnO است. در تحقیقات متعدد، نیم‌رساناهای مختلفی با ZnO جفت شده‌اند، که بررسی‌ها حاکی از آن است که این نیم‌رساناهای جفت شده با ZnO، نسبت به ZnO تنها، عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری را نشان می‌دهند (Liu et al., 2024). جفت شدن دو نیم‌رسانا به این معنی است که وقتی آن‌ها در مجاورت یا در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، این امر منجر به تأثیر یک ماده

بر خواص فیزیکی، الکتریکی یا نوری ماده دیگر می‌شود. جفت‌کردن ZnO با سایر نیم‌رساناها نه تنها می‌تواند جذب نور مرئی را افزایش دهد، بلکه بازترکیب حامل‌ها را نیز کاهش می‌دهد، در نتیجه، فعالیت فوتوکاتالیستی بهبود می‌یابد. Fe_2O_3 یک نیم‌رسانای نوع-n با گاف نواری باریک (۲٫۲ الکترون ولت) است که در بین فازهای مختلف اکسید آهن، دارای بیش‌ترین پایداری ترمودینامیکی در شرایط محیطی است، قیمت آن ارزان و مقاومت بالا به فرسایش فوتونی دارد، موافق با محیط زیست است و معمولاً به‌عنوان فوتوکاتالیست در ناحیه مرئی به‌کار می‌رود (Kargar Dehbidi and Farbod, 2024a). از طرفی، ساختارهای هسته–پوسته به‌علت اثر هم‌افزایی خواص هسته و پوسته، بسیار مورد توجه هستند و به‌عنوان یکی از مؤثرترین ریخت‌ها جهت فرآیند فوتوکاتالیستی معرفی شده‌اند (Shafiee et al., 2022). در نتیجه، جفت‌سازی نیم‌رسانای ZnO که دارای گاف نواری پهن است با Fe_2O_3 در قالب ساختار هسته–پوسته، با شتاب‌بخشیدن به نرخ جداسازی حامل‌های بار، فعالیت فوتوکاتالیستی را افزایش می‌دهد. از طرفی با تغییر اندازه و ضخامت هسته یا پوسته می‌توان عملکرد فوتوکاتالیستی را بهبود بخشید (Ninakanti et al., 2024).

در این تحقیق، نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO به شکل تقریباً کروی با قطرهای ۴۷ و ۲۸ نانومتر و ضخامت پوسته ZnO به ترتیب شش و ۱۲ نانومتر، و دوکی شکل با قطر ۱۹ نانومتر، با استفاده از محلول‌های آبی ساده و واکنش‌گرهای ارزان قیمت با موفقیت ساخته شدند. در ادامه، فعالیت فوتوکاتالیستی این نانوذرات به وسیله تخریب رنگ رداماین B (RhB) محلول در آب، تحت تابش لامپ UV مورد ارزیابی قرار گرفت.

این پژوهش در پی یافتن پاسخ به این سوالات است: تغییر در ریخت و اندازه نانوذرات Fe_2O_3@ZnO چه تأثیری بر عملکرد فوتوکالیستی این نانوساختار دارد؟ افزایش ضخامت پوسته در قالب ساختار هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO چه تأثیری بر عملکرد فوتوکالیستی این نانوساختار دارد؟ عملکرد فوتوکالیستی نانوذرات مورد بررسی در این پژوهش با مطالعه‌های مشابه قبلی تا چه میزان قابل مقایسه است؟

مواد و روش‌ها

مواد

مواد به کار رفته در ان تحقیق به شرح زیر می‌باشد: سدیم دی‌هیدروژن فسفات دو آبه ($NaH_2PO_4{\cdot}2H_2O$)، کلرید آهن شش آبه ($FeCl_3{\cdot}6H_2O$)، استات روی دو آبه ($Zn(Ac)_2{\cdot}2H_2O$)، آمونیاک ($NH_3{\cdot}H_2O$)، رنگ رداماین B (RhB). تمامی این مواد باخلوص آزمایشگاهی، ساخت شرکت مرک آلمان بوده و بدون هرگونه خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

ساخت دانه‌های α-Fe_2O_3

برای تهیه نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO، ابتدا دانه‌های α-Fe_2O_3 به روش هیدرولیز اجباری به شرح زیر ساخته شدند (Zhang et al., 2011). ابتدا مقدار ۰٫۰۰۷ گرم از $NaH_2PO_4.2H_2O$ درون ۱۰۰ میلی‌لیتر آب یون‌زدایی شده در دمای اتاق، به‌طور کامل حل، سپس به درون یک فلاسک ۱۰۰ میلی‌لیتر منتقل شده و تا دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد گرم شد. در ادامه، در همین دما، ۱٫۸ میلی‌لیتر از محلول $FeCl_3$ (۱٫۴۸ مول بر لیتر)، قطره قطره به فلاسک اضافه شده و سپس، محلول در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۴ ساعت باقی ماند. در ادامه، بعد از آن‌که محلول حاصل به‌طور طبیعی تا دمای اتاق سرد گردید، جداسازی محصول به‌وسیله دستگاه سانتریفیوژ انجام گرفت، پودر حاصل چندین مرتبه با آب یون‌زدایی شده و الکل شستشو داده شد. در نهایت، پودر حاصل در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. طرح‌واره مراحل ساخت دانه‌های α-Fe_2O_3 در شکل (۱) نشان داده شده است.

ساخت نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO

نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO به روش هسته–در میان با اندکی تغییر ساخته شدند (Wu et al., 2012). به‌طور معمول، ۰٫۱ گرم از دانه‌های α-Fe_2O_3 به‌عنوان هسته در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب یون‌زدایی شده در دمای اتاق پخش گردیده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در همین دما به شدت تحت امواج فراصوت قرار گرفتند. در ادامه، ۵۰ میلی‌لیتر از محلول $Zn(Ac)_2$ با غلظت مشخص به محلول تهیه شده در حالی‌که در دمای اتاق به‌شدت در حال هم خوردن است، قطره قطره اضافه گردید. سپس، ۲۰ میلی‌لیتر محلول آمونیاک پنج درصد وزنی به محلول حاصل که تا دمای۴۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده، قطره قطره اضافه گردید، و محلول حاصل به مدت یک ساعت در همین دما برای واکنش باقی ماند. محصول حاصل چندین مرتبه با آب یون‌زدایی شده و اتانول شستشو داده شده، و پس از جمع‌آوری با سانتریفیوژ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. در نهایت رسوب بدست آمده، در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت با نرخ گرمای دو درجه سانتی‌گراد بر دقیقه در اتمسفر هوا حرارت‌دهی شد. در اینجا، برای ساخت نانوذرات Fe_2O_3@ZnO غلظت پیش‌ماده استات روی ۰٫۰۴ و ۰٫۰۶ مولار است که به ترتیب نمونه‌های S1 و S2 نام‌گذاری شدند.

هم‌چنین نمونه سومی تهیه شد که S3 نام‌گذاری گردید. مراحل تولید این نمونه مشابه دو نمونه دیگر انجام شد با این تفاوت که از ۰٫۱۶ گرم از ذرات α-Fe_2O_3 جهت ساخت استفاده گردید. غلظت پیش‌ماده استات روی در این نمونه ۰٫۰۶ مولار است.

طرح‌واره مراحل ساخت نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO در شکل (۲) نشان داده است.

مشخصه‌یابی نمونه‌ها

در این پژوهش، داده‌های پراش پرتو ایکس (XRD) از نمونه‌های پودری به‌وسیله پراش‌سنج PHILIPS PW1730 تابش $Cu\ K_\alpha$ با طول موج λ=۱٫۵۴۰۵۶ Å و در بازهٔ ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شد. اندازه و ریخت نانوذرات ساخته شده، با میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM- LEO 906E) مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، از دستگاه طیف‌سنج فرابنفش-مرئی (UV-vis) مدل Photonix Ar 2015 به منظور بررسی ویژگی‌های نوری استفاده گردید.

آزمایش تخریب فوتوکاتالیستی

تخریب RhB در محلول آبی تحت تابش UV با کمک فعالیت فوتوکاتالیستی نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO، به‌وسیله لامپ UV، ۳۲ وات (لامپ فرابنفش Osram) که در فاصله ثابت ۱۰ سانتی‌متر بالای ظرف واکنش قرار دارد، انجام شد. ابتدا آزمایش تاریکی انجام شد که طی آن، ۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ با غلظت ۰٫۰۱ گرم بر لیتر به همراه ۰٫۰۲۵ گرم از نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO به مدت ۴۵ دقیقه در تاریکی، برای به تعادل رسیدن مناسب جذب-واجذب مولکول‌های رنگ روی سطح نانوذرات هم زده شدند. این آزمایش به منظور جداکردن جذب سطحی از فرایند فوتوکاتالیستی لازم است. بعد از آن محلول تحت تابش UV قرار گرفت و در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه نمونه‌برداری صورت گرفت و میزان تخریب رنگ به کمک اندازه‌گیری طیف UV-vis اندازه‌گیری شد.

بازده تخریب فوتوکاتالیستی با اندازه‌گیری طیف جذب محلول رنگ تعیین می‌شود. بازده تخریب واکنش فوتوکاتالیستی با استفاده از رابطه (۱) که در ادامه می‌آید، محاسبه می‌شود (Anjaneyulu et al., 2018):

$$\text{Degradation efficiency (DE\%)} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \qquad (۱)$$

که A_0 غلظت اولیه و A_t، غلظت رنگ بعد از واکنش فوتوکاتالیستی در بازه‌های زمانی متفاوت (t) است.

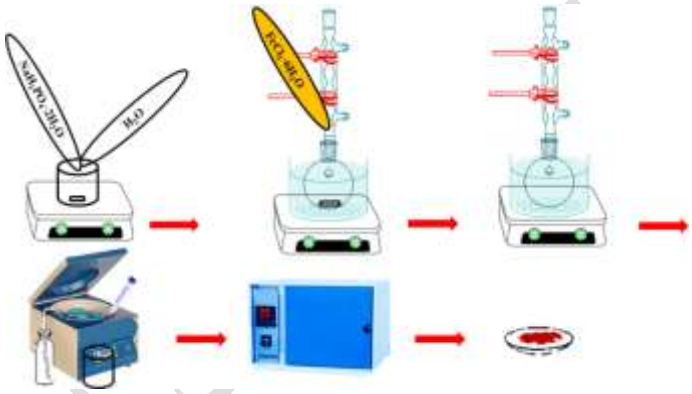


Fig. 1- Schematic of the synthesis steps of α-Fe_2O_3 grains

شکل ۱- طرح‌واره مراحل ساخت دانه‌های α-Fe_2O_3

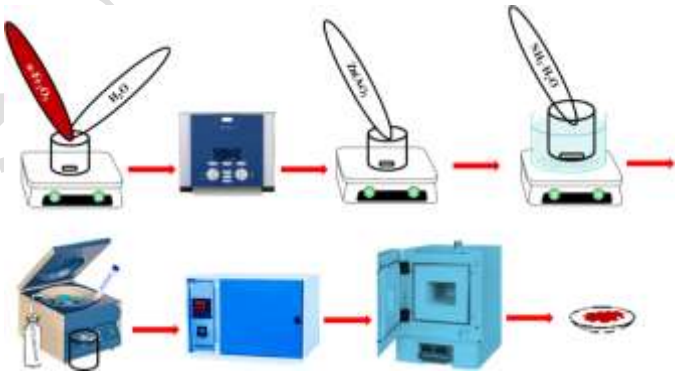


Fig. 2- Schematic of the synthesis steps of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles

شکل ۲- طرح‌واره مراحل ساخت نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO

نتایج و بحث

X-ray و تحلیل ساختاری

الگوی XRD نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO در شکل (۳) نشان داده شده است. در اینجا فاز، خلوص و اندازه بلورک‌ها به‌وسیله XRD تعیین می‌شود. مقایسه مقدار (۲θ) موقعیت قله‌های الگوی پراش پودری هماتیت استاندارد کارت JCPDS به شماره ۰۶۶۴–۳۳ با داده‌های XRD به‌دست آمده، نشان می‌دهد Fe_2O_3 در همه نمونه‌ها دارای فاز کورندم رمبوهدرال می‌باشد. برای بررسی الگوی XRD پوسته‌های ZnO تشکیل شده از کارت استاندارد JCPDS به شماره ۱۴۵۱–۳۶ با فاز هگزاگونال استفاده شد. تطابق قله‌ها حاکی از آن است که در هر سه نمونه نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO، لایه ZnO با خلوص بالایی تشکیل شده است. در نمونه‌های S1 و S2 شدت قله‌های وابسته به ZnO تغییرات قابل توجهی را نشان نمی‌دهند که این مورد نشان‌دهنده نزدیک بودن اندازه ضخامت پوسته در این دو نمونه است. از طرفی شدت قله‌های وابسته به لایه ZnO در نمونه S3 نسبت به نمونه‌های S1 و S2 افزایش یافته است، که نشان دهنده آن است که در این نمونه ضخامت پوسته ZnO نسبت به دو نمونه دیگر افزایش محسوسی داشته است. در هر سه نمونه هسته–پوسته ساخته‌شده، پوسته بلوری ZnO بدون آلیاژشدن تشکیل شده است، زیرا تغییر مکان آشکاری در مکان الگوی پراش آن‌ها مشاهده نمی‌شود. به‌علاوه، در نمونه‌های هسته–پوسته، قله‌های بسیار کوچکی که در شکل با ستاره مشخص شده‌اند، وجود دارند که با هیچ‌کدام از اطلاعات JCPDS Fe_2O_3 یا ZnO تطابق ندارند، این قله‌ها نشان‌دهندهٔ وجود مقدار بسیار اندکی ناخالصی Fe_3O_4 در این نمونه‌ها است.

متوسط اندازه بلورک با استفاده از رابطه شرر محاسبه گردید (Anand et al., 2015). متوسط اندازه بلورک نانوذرات Fe_2O_3 برای هسته نمونه‌های S1 و S2 مقداری ثابت برابر ۱۷ نانومتر و برای هسته نمونه S3 برابر ۴۲ نانومتر به‌دست آمد. از طرفی برای نمونه‌های S1، S2 و S3 متوسط اندازه بلورک پوسته ZnO به‌ترتیب ۳۴، ۴۶ و ۳۴ نانومتر به‌دست آمد.

TEM و تحلیل ریخت‌شناسی

تصاویر TEM نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به تصاویر TEM، همه نمونه‌های نشان داده شده ابعادی در محدوده نانومتر دارند. نانوذرات هسته–پوسته در نمونه‌های S1 و S2 تقریباً کروی شکل هستند. از طرفی نانوذرات هسته–پوسته در نمونه S3 دوکی شکل هستند. متوسط قطر نانوذرات (D_P)، برای نمونه‌های مختلف به‌ترتیب ۴۷، ۲۸ و ۱۹ نانومتر به‌دست آمد (خطا در اندازه‌گیری اندازه ذرات در حدود ۳± نانومتر می‌باشد). در نتیجه در نمونه‌های S1 و S2 با افزایش غلظت یون‌های Zn پیش‌ماده، اندازه نانوذرات هسته–پوسته کاهش یافته است. از طرفی ضخامت پوسته در نمونه‌های S1 و S2 به‌ترتیب شش و ۱۶ نانومتر به‌دست آمده است که با توجه به افزایش غلظت یون‌های Zn پیش‌ماده، این مورد قابل انتظار است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطر نانوذرات در نمونه دوکی شکل نسبت به نمونه‌های کروی کاهش یافته است، این در حالی است که ضخامت پوسته ZnO در این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر افزایش یافته است.

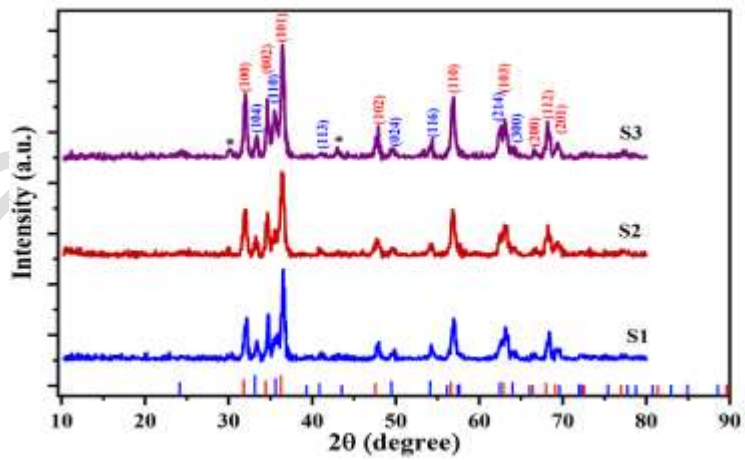


Fig. 3- XRD pattern of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles, According to the standard cards, the Miller indices for Fe_2O_3 and ZnO are marked in blue and red, respectively (S1 and S2 are spherical samples with an average diameter of 47 and 28 nm, respectively, and S3 is a spindle-shaped sample with an average diameter of 19 nm)

شکل ۳- الگوی XRD نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO، شاخص‌های میلر مربوط به Fe_2O_3 و ZnO با توجه به کارت‌های استاندار، به‌ترتیب به رنگ آبی و قرمز مشخص شده است (S1 و S2 نمونه‌های کروی شکل با متوسط اندازه قطر به‌ترتیب ۴۷ و ۲۸ نانومتر و S3 نمونه دوکی شکل با متوسط اندازه قطر ۱۹ نانومتر است)

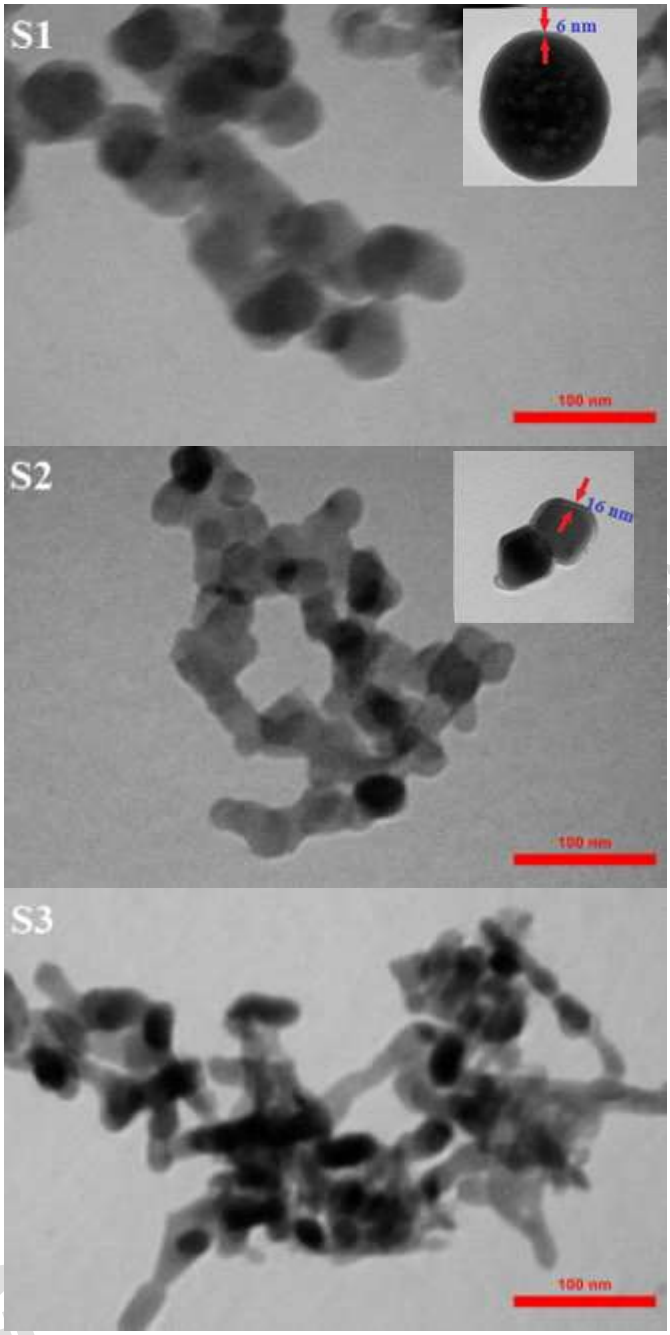


Fig. 4- TEM images of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles (S1 and S2 are spherical samples with an average diameter of 47 and 28 nm, respectively, and S3 is a spindle-shaped sample with an average diameter of 19 nm)

شکل ٤- تصاویر TEM نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO (S1 و S2 نمونه‌های کروی شکل با متوسط اندازه قطر به‌ترتیب ٤٧ و ٢٨ نانومتر و S3 نمونه دوکی شکل با متوسط اندازه قطر ١٩ نانومتر است)

ویژگی‌های نوری

شکل (۵a) طیف جذب UV-vis نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دید که این نانوذرات در هر دو ناحیه مرئی و فرابنفش دارای جذب هستند. این موضوع می‌تواند نشان دهنده پتانسیل بالای نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO به‌عنوان فوتوکاتالیست در تخریب آلودگی‌های مختلف با استفاده از نور خورشید باشد (Al Haiqi et al., 2020; Xie et al., 2015). هم‌چنین با دقت در طیف جذب می‌توان دید با افزایش ضخامت لایه ZnO، میزان جذب افزایش می‌یابد. از طرفی همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه دوکی شکل میزان جذب در هر دو ناحیه مرئی و فرابنفش به نحو چشم‌گیری افزایش یافته است. از طرفی، قله جذب مشاهده شده در هر سه نمونه در حوالی طول موج ۳۷۰ نانومتر، به گاف نواری جذب ذاتی ZnO به علت انتقال از نوار ظرفیت به نوار رسانش نسبت داده می‌شود (Zak et al., 2011).

گاف نوری پارامتر مهمی در تعیین ویژگی‌های نیم‌رساناها و نانومواد بکار رفته در صنایع خورشیدی است و اغلب از طیف جذبی UV-vis به‌دست می‌آید (Motahari et al., 2014). گاف نوری (E_g) براساس طیف جذب نوری با استفاده از معادلهٔ تاک رابطه (۲) تعیین می‌شود (Kargar Dehbidi and Farbod, 2024b):

$$(Ahv)^n = B(hv - E_g) \qquad (۲)$$

که hv انرژی فوتون، A جذب، B ثابت ماده و n برابر ۲ یا $\frac{۱}{۲}$ به‌ترتیب برای گذارهای مستقیم و غیرمستقیم است. گاف نوری برای قله جذب با رسم بخش خطی نمودار $(Ahv)^n$ برحسب hv به سمت صفر به‌دست می‌آید. نداشتن رابطه خطی برای $n = \frac{۱}{۲}$ نشان‌دهنده مستقیم‌بودن گذار برای نیم‌رسانای هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO است. با توجه به شکل (۵b)، E_g برابر ۲٫۶۳، ۲٫۷۹ و ۳٫۰۷ الکترون ولت به‌ترتیب برای نمونه‌های S1، S2 و S3 بدست آمد که نشان‌دهنده پتانسیل کاربردی آن‌ها به‌عنوان فوتوکاتالیست است. از طرفی در این نانوذرات با کاهش قطر نانوذرات و افزایش ضخامت لایه ZnO، گاف نوری افزایش یافته است.

بررسی فعالیت فوتوکاتالیستی

شکل (۶) طیف جذب وابسته به زمان تابش و تصاویر تغییر رنگ محلول RhB بعد از تخریب فوتوکاتالیستی به همراه منحنی غلظت بهنجار شده C/C_0 رنگ، برای نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO را نشان می‌دهد. با افزایش طول مدت تابش، شدت قله جذب مشخصه RhB به‌تدریج کاهش می‌یابد، که به معنی تخریب رنگ RhB توسط نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO است. تخریب فوتوکاتالیستی برای نمونه‌های S1، S2 و S3 به‌ترتیب حدوداً ۷۸، ۸۳ و ۸۶ درصد بعد از گذشت ۳۰۰ دقیقه حاصل شده است. عمل تخریب فوتوکاتالیستی برای نمونه‌های S1 و S3 در بازه‌های زمانی مختلف تقریباً به‌طور یکنواختی صورت گرفته است، در حالی‌که برای نمونه S2 این‌گونه نیست. در نتیجه در مجموع نمونه S3 عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان می‌دهد.

در ادامه سازوکار فعالیت فوتوکاتالیستی نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO به طور مختصر بیان می‌شود (Kuriakose et al., 2014): تابش UV به لایه ZnO باعث تحریک الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش شده و ایجاد حفره‌ها را به دنبال دارد. این الکترون‌ها که با مولکول‌های اکسیژن برهم‌کنش می‌کنند منجر به تشکیل آنیون‌های سوپراکسید بسیار واکنش‌پذیر می‌شوند. حفره‌ها در نوار ظرفیت که با گروه هیدروکسیل برهم‌کنش دارند، رادیکال‌های هیدروکسیل بسیار واکنش‌پذیر تولید می‌کنند که مسئول عملکرد تخریب رنگ RhB هستند. از طرف دیگر، از آن‌جایی که سطح انرژی فرمی Fe_2O_3 همواره از نیم‌رسانای ZnO کم‌تر است، بنابراین الکترون‌ها می‌توانند از نیم‌رسانای ZnO عبور کرده و به سمت Fe_2O_3 بروند، در نتیجه، Fe_2O_3 می‌تواند الکترون‌های مورد نظر را به دام اندخته و از بازترکیب آن‌ها با حفره‌ها جلوگیری کند.

برای مقایسه عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO در این تحقیق با کارهای مشابه قبلی شامل نانوذرات هسته–پوسته α-Fe_2O_3/ZnO Wu et al (2012) و alpha-Fe_2O_3/ZnO Yan et al (2011)، از نظر نوع و غلظت اولیه آلودگی، مقدار کاتالیست، منبع و شدت نور به کار رفته، زمان تابش و درصد تخریب فوتوکاتالیستی، جدول (۱) آورده شده است. شایان ذکر است از آن‌جایی که در فرآیند فوتوکاتالیستی پارامترهای مختلفی درگیر هستند عملاً مقایسه دقیق پژوهش‌های مختلف در این زمینه چالش برانگیز است.

در نهایت، چنین می‌توان نتیجه گرفت که: نانوذرات هسته–پوسته دوکی نسبت به کروی شکل عملکرد فوتوکالیستی بهتری از خود نشان می‌دهند؛ کاهش اندازه نانوذرات موجب افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی آن‌ها شده است؛ افزایش ضخامت لایه ZnO در قالب نانوذرات هسته–پوسته Fe_2O_3@ZnO فعالیت فوتوکالیستی را افزایش داده است.

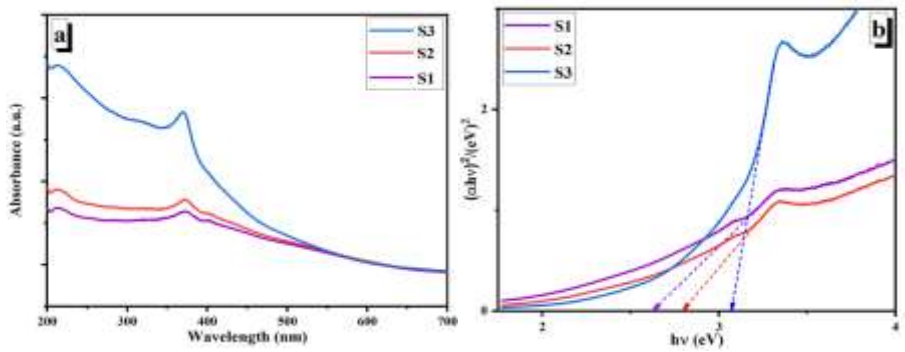


Fig. 5- a) UV-vis absorbance spectra, and b) Calculation of optical gap of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles (S1 and S2 are spherical samples with an average diameter of 47 and 28 nm, respectively, and S3 is a spindle-shaped sample with an average diameter of 19 nm)

شکل ۵- (a) طیف جذب UV-vis و (b) محاسبه گاف نوری نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO (S1 و S2 نمونه‌های کروی شکل با متوسط اندازه قطر به ترتیب ۴۷ و ۲۸ نانومتر و S3 نمونه دوکی شکل با متوسط اندازه قطر ۱۹ نانومتر است)

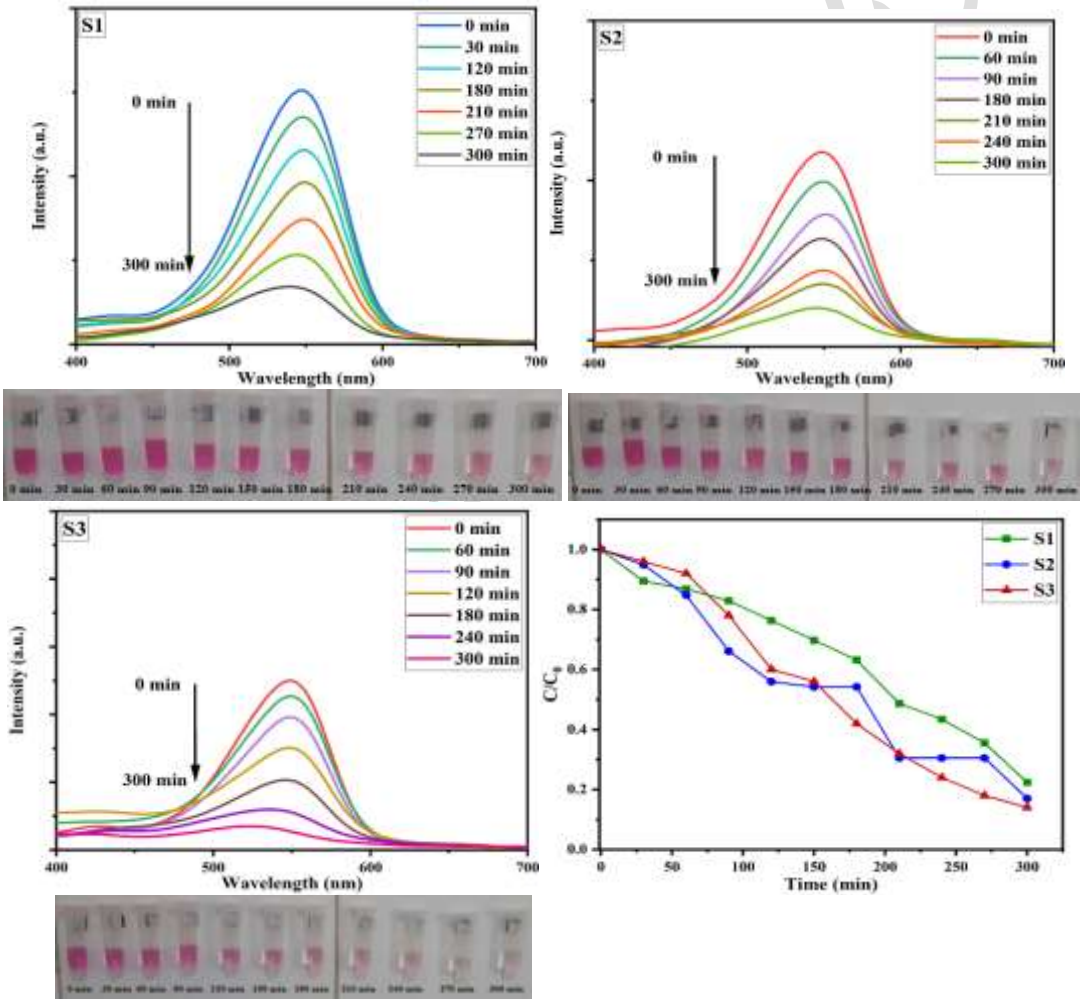


Fig. 6- Time-dependent absorption spectra and color change images of RhB solution after photodegradation, along with the C/C_0 graph according to the irradiation time for Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles (S1 and S2 are spherical samples with an average diameter of 47 and 28 nm, respectively, and S3 is a spindle-shaped sample with an average diameter of 19 nm)

شکل ٦- طیف جذب وابسته به زمان و تصاویر تغییر رنگ محلول RhB پس از تخریب فوتوکاتالیستی، به همراه نمودار C/C_0 برحسب مدت زمان تابش برای نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO (S1 و S2 نمونه‌های کروی شکل با متوسط اندازه قطر به ترتیب ۴۷ و ۲۸ نانومتر و S3 نمونه دوکی شکل با متوسط اندازه قطر ۱۹ نانومتر است)

جدول ۱- مقایسه عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO

Table 1- Comparison of photocatalytic performance of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles

catalyst	Contaminant and initial concentration (mg/L)	catalyst dose (g/L)	Light source (intensity)	Irradiation time (min)	Photocatalytic degradation (%)
α-Fe_2O_3/ZnO	Rhodamin B: 6	0.5	UV and visible light (250 W)	105	86
alpha-Fe_2O_3/ZnO	Methyl Orange: 10	1.33	UV light	140	70
Fe_2O_3@ZnO	Rhodamin B: 10	0.5	UV light (32 W)	300	86

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO به شکل کروی و دوکی با موفقیت ساخته شدند. تحلیل ساختاری این نانوذرات نشان داد که این نانوذرات داری خلوص بالایی هستند. در همه نمونه‌ها، هسته‌های Fe_2O_3 دارای فاز کورندم رمبوهدرال و پوسته‌های ZnO دارای فاز هگزاگونال هستند. متوسط قطر نانوذرات کروی به‌ترتیب ۴۷، ۲۸ و نانوذرات دوکی شکل ۱۹ نانومتر به‌دست آمد. گاف نوری برای نانوذرات کروی شکل برابر ۲٫۶۳ و ۲٫۷۹ و برای نانوذرات دوکی شکل برابر ۳٫۰۷ الکترون ولت به‌دست آمد، که نشان‌دهنده پتانسیل کاربردی آن‌ها به‌عنوان فوتوکاتالیست است، از طرفی با کاهش قطر نانوذرات و افزایش ضخامت لایه ZnO گاف نوری افزایش یافت. در ادامه فعالیت فوتوکاتالیسی این نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO دوکی شکل با تخریب حدوداً ۸۶ درصد رنگ RhB در مدت زمان ۳۰۰ دقیقه، عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری نسبت به نانوذرات کروی شکل از خود نشان دادند.

شایان ذکر است که، در این پژوهش عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO در حذف رنگ رادامین B مورد بررسی قرار گرفت. رنگ رادامین B به‌عنوان یک نوع آلودگی آلی موجود در آب شناخته می‌شود و در نتیجه در مطالعه‌های آینده می‌توان از نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO برای حذف دیگر آلاینده‌های آلی موجود در آب به روش فوتوکاتالیستی استفاده کرد. از آن‌جایی که آلودگی‌های آلی بخش قابل توجهی از آلودگی‌های موجود در آب را تشکیل می‌دهند، در آینده می‌توان استفاده از فعالیت فوتوکالیستی نانوذرات هسته-پوسته Fe_2O_3@ZnO در تصفیه‌خانه‌های مختلف را مورد توجه قرار داد.

سپاسگزاری

این تحقیق برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول می‌باشد که با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم با شماره پژوهانه SCU.SP1403.332 تأمین شده است. نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز اعلام می‌دارند.

References

1- Al Haiqi, O., Nour, A.H., Bargaa, R. and Ayodele, B.V., 2020. Effect of Process Parameters on the Photocatalytic Degradation of Phenol in Oilfield Produced Wastewater using ZnO/Fe_2O_3 Nanocomposites. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, *15(1)*, pp.128-136. DOI: https://doi.org/10.9767/bcrec.15.1.6068.128-136

2- Anand, G.T., Kennedy, L.J., Vijaya, J.J., Kaviyarasan, K. and Sukumar, M., 2015. Structural, optical and magnetic characterization of $Zn1-xNixAl_2O_4$ ($0\leq x\leq 5$) spinel nanostructures synthesized by microwave combustion technique. *Ceramics International*, *41*(1), pp.603-615. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.08.109

3- Anjaneyulu, R.B., Mohan, B.S., Naidu, G.P. and Muralikrishna, R., 2018. Visible light enhanced photocatalytic degradation of methylene blue by ternary nanocomposite, MoO_3/Fe_2O_3/rGO. *Journal of Asian Ceramic Societies*, *6(3)*, pp.183-195. DOI: https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1479011

4- Buckley, D., Lonergan, A. and O'Dwyer, C., 2025. ZnO-based Thin Film Metal Oxide Semiconductors and Structures: Transistors, Optoelectronic Devices and Future Sustainable Electronics. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*,*14(1)*,pp. 015001. DOI: 10.1149/2162-8777/ada3a2

5- Ganeshbabu, M., Kannan, N., Venkatesh, P.S., Paulraj, G., Jeganathan, K. and MubarakAli, D., 2020. Synthesis and characterization of $BiVO_4$ nanoparticles for environmental applications. *RSC advances*, *10(31)*,pp.18315-18322. DOI: https://doi.org/10.1039/D0RA01065K.

6- Hitam, C.N.C. and Jalil, A.A., 2020. A review on exploration of Fe_2O_3 photocatalyst towards degradation of dyes and organic contaminants. *Journal of environmental management*, *258*, pp.110050. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110050

7- Kadhim, M.J., Mahdi, M.A., Selman, A.M., Al-Ani, S.K.J., Hassan, J.J. and Ahmed, N.M., 2023. The most important parameters that affect the photocatalytic activity of ZnO nanostructures against organic dyes: a review. *Iranian Journal of Catalysis*, *13(1)*, DOI: https://doi.org/10.30495/ijc.2023.1969439.1966

8- Kargar Dehbidi, V. and Farbod, M., 2024b. Effect of interfaces in photocatalytic performance of Fe_2O_3@ ZnO core–shell nanoparticles and Fe_2O_3–ZnO nanocomposites. *Journal of the Korean Physical Society*, pp.1-11. DOI: https://doi.org/10.1007/s40042-024-01279-1

9- Kargar Dehbidi, V. and Farbod, M., 2024a. Investigating the effect of adding Ag nanoparticles on the photocatalytic activity of Fe_2O_3-ZnO nanocomposite. *Nanoscale*, *11(3)*, pp. 81-90. DOI: https://doi.org/10.1007/s40042-024-01279-1

10- Karunakaran, C. and Vinayagamoorthy, P., 2017. Superparamagnetic core/shell Fe_2O_3/ZnO nanosheets as photocatalyst cum bactericide. *Catalysis Today*, *284*, pp.114-120. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.11.022

11- Kuriakose, S., Choudhary, V., Satpati, B. and Mohapatra, S., 2014. Facile synthesis of Ag–ZnO hybrid nanospindles for highly efficient photocatalytic degradation of methyl orange. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *16(33)*, pp.17560-17568. DOI: https://doi.org/10.1039/C4CP02228A

12- Liu, J., Wang, H., Wu, H., Yang, Y., Wang, C., Wang, Q., Jia, B. and Zheng, J., 2024. Research progress of zinc oxide-based heterojunction photocatalysts. *Journal of Materials Chemistry A*,. DOI: https://doi.org/10.1039/D4TA03901G

13- Motahari, F., Mozdianfard, M.R., Soofivand, F. and Salavati-Niasari, M., 2014. NiO nanostructures: synthesis, characterization and photocatalyst application in dye wastewater treatment. RSC advances, 4(53),pp.27654-27660. DOI: https://doi.org/10.1039/C4RA02697G

14- Ninakanti, R., Borah, R., Craig, T., Ciocarlan, R.-G., Cool, P., Bals, S. and Verbruggen, S.W., 2024. Au@ TiO_2 Core–Shell Nanoparticles with Nanometer-Controlled Shell Thickness for Balancing Stability and Field Enhancement in Plasmon-Enhanced Photocatalysis. *ACS nano*, *18(49)*, pp. 33430-40. DOI: https://doi.org/10.1021/acsnano.4c09944

15- Saravanan, A., Kumar, P.S., Vo, D.V.N., Yaashikaa, P.R., Karishma, S., Jeevanantham, S., Gayathri, B. and Bharathi, V.D., 2021. Photocatalysis for removal of environmental pollutants and fuel production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*, pp.441-463. DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-020-01077-8

16- Shafiee, A., Rabiee, N., Ahmadi, S., Baneshi, M., Khatami, M., Iravani, S. and R.S., Varma., 2022. Core–shell nanophotocatalysts: review of materials and applications. *ACS Applied Nano Materials*, *5(1)*, pp. 55-86. DOI: https://doi.org/10.1021/acsanm.1c03714

17- Sridharan, S., Perumalsamy, S.V., Kulandaivel, J., Nammalwar, G., Parangusan, H. and Ponnamma, D., 2024. α-Fe_2O_3/ZnO nanocomposite as an efficient photocatalyst for wastewater treatment and flexible electronic device applications. *Ionics*, *30*, pp.1137–1150. DOI: https://doi.org/10.1007/s11581-023-05316-0

18- Tkaczyk, A., Mitrowska, K. and Posyniak, A., 2020. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of the total environment*, *717*,pp.137222. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222

19- Vijayalakshmi, S., Kumar, E., Ganeshbabu, M., Venkatesh, P.S. and Rathnakumar, K., 2021. Structural, electrical, and photocatalytic investigations of PANI/ZnO nanocomposites. *Ionics*, *27*, pp.2967-2977. DOI: https://doi.org/10.1007/s11581-021-04041-w

20- Wu, W., Zhang, S., Xiao, X., Zhou, J., Ren, F., Sun, L. and Jiang, C., 2012. Controllable synthesis, magnetic properties, and enhanced photocatalytic activity of spindlelike mesoporous α-Fe_2O_3/ZnO core–shell heterostructures. *ACS applied materials & interfaces*, *4(7)*, pp.3602-3609. DOI: https://doi.org/10.1021/am300669a

21- Xie, J., Li, M., Hao, Y., Meng, X., Meng, Y. and Li, Z., 2015. Preparation of α-Fe_2O_3/ZnO composites and their photocatalytic activity under simulated sunlight irradiation. *World Journal of Engineering*, *12(4)*, pp. 325-330. DOI: https://doi.org/10.1260/1708-5284.12.4.325

22- Yan, W., Fan, H. and Yang C., 2011. Ultra-fast synthesis and enhanced photocatalytic properties of alpha-Fe_2O_3/ZnO core-shell structure. *Materials Letters*, *65(11)*, pp. 1595-7. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.03.026

23- Zak, A.K., Abrishami, M.E., Majid, W.A., Yousefi, R. and Hosseini, S., 2011. Effects of annealing temperature on some structural and optical properties of ZnO nanoparticles prepared by a modified sol–gel combustion method. *Ceramics International*, ***37(1)***, pp.393-398. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.08.017

24- Zhang, S., Wu, W., Xiao, X., Zhou, J., Ren, F. and Jiang, C., 2011. Preparation and characterization of spindle-like Fe_3O_4 mesoporous nanoparticles. *Nanoscale research letters*, *6*, pp.1-9. DOI: https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-89

پذیرش نهایی - قبل از چاپ

EXTENDED ABSTRACT

Fabrication of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles and investigation of their photocatalytic properties in the removal of Rhodamine B dye as an organic pollutant in aqueous environments

V. Kargar Dehbidi[1*] and M. Farbod [2]

1*- Corresponding Author, PhD graduate in solid state physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. *(Vahidkargar2020@gmail.com)*.
2- Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Keywords: Nanoparticles, Core-shell, Fe_2O_3@ZnO, Photocatalytic, Removal, Rhodamine B.

Introduction

The existence of clean water without any kind of pollution is essential for the continuation of life on earth and for the preservation of human health. In recent years, a large amount of water resources has been severely polluted due to human activities. Among the various pollutants, dyes are widely used in various industries such as paper, plastic, leather, textile and paint (Dilshad et al., 2025). These dyes are one of the most important factors in the pollution of water resources and pose irreversible risks to human health. So far, various methods have been investigated to remove these pollutants from water, among which the photocatalytic method is a very suitable approach for dealing with such pollutants, in which these organic substances are converted into non-toxic minerals such as H_2O and CO_2 (Saravanan et al., 2021). The use of ZnO semiconductor nanoparticles is of great interest due to its availability and cheapness, direct band gap, and high oxidation capacity (Buckley et al., 2025). Despite the good performance of ZnO photocatalyst in the degradation of various pollutants, factors such as recombination of charge carriers and the limitation of the use of visible light due to its large band gap affect the photocatalytic activity of ZnO (Kadhim et al., 2023). The use of other semiconductors along with ZnO can improve the activity of this photocatalyst by reducing the recombination rate of carriers and increasing the absorption of visible light (Liu et al., 2024). Meanwhile, among various semiconductors, Fe_2O_3 is used as a photocatalyst in the visible region due to its narrow band gap, high resistance to photon decay, thermodynamic stability, low cost, and environmental friendliness (Kargar Dehbidi and Farbod, 2024). On the other hand, the photocatalytic activity can be improved by using core-shell structures (Shafiee et al., 2022). As a result, it seems that the use of core-shell Fe_2O_3 @ZnO nanoparticles and optimizing the core size and shell thickness can improve the photocatalytic activity (Ninakanti et al., 2024).

In this study, Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles with diameters of 47 and 28 nm and ZnO shell thicknesses of 6 and 12 nm, respectively, and spindle-shaped nanoparticles with diameters of 19 nm were successfully synthesized using simple aqueous solutions and inexpensive reagents. Subsequently, the photocatalytic activity of these nanoparticles was evaluated by the degradation of water-soluble Rhodamine B (RhB) dye under UV irradiation.

Methodology

This study seeks to answer the following questions: What effect does changing the shape and size of Fe_2O_3@ZnO nanoparticles have on the photocatalytic performance of this nanostructure? What effect does increasing the shell thickness in the form of the Fe_2O_3@ZnO core-shell structure have on the photocatalytic performance of this nanostructure? To what extent is the photocatalytic performance of the nanoparticles studied in this study comparable to previous similar studies?

For this purpose, core-shell Fe_2O_3@ZnO nanoparticles were first synthesized, then the photocatalytic activity of these nanoparticles in the photocatalytic removal of Rhodamine B dye under UV irradiation was studied. The photocatalytic degradation efficiency was calculated by measuring the absorption spectrum of the dye solution and using the equation (1) (Anjaneyulu et al., 2018):

$$\text{Degradation efficiency (DE\%)} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

Where A_0 is the initial concentration and A_t is the dye concentration after photocatalytic reaction at different time intervals (t).

Results and Discussion

In order to investigate the phase and purity of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles, the XRD pattern of these nanoparticles was studied. The studies showed that all samples were synthesized with high purity. On the other hand, in these samples, the Fe_2O_3 cores have a rhombohedral corundum phase and the ZnO shells have a hexagonal phase. The size and morphology of the fabricated nanoparticles were studied using TEM images. The studies indicated that two samples of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles are spherical with an average diameter of 47 and 28 nm and shell thicknesses of 6 and 12 nm, respectively, and one spindle-shaped sample with an average diameter of 19 nm. Subsequently, the optical properties of these nanoparticles were investigated using UV-vis absorption spectra. The results showed that these nanoparticles have absorption in both visible and ultraviolet regions. This can indicate the high potential of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles as photocatalysts in the destruction of various pollutants using sunlight. Also, in the spindle-shaped sample, the absorption rate in both visible and ultraviolet regions has increased significantly. Next, the optical gap of the core-shell nanoparticles was calculated using the Tauc method, and finally the optical gap for spherical nanoparticles was 2.63 and 2.79 eV and for spindle-shaped nanoparticles was 3.07 eV, which indicates their application potential as photocatalysts. On the other hand, the optical gap increased with decreasing the diameter of the nanoparticles and increasing the thickness of the ZnO layer. Finally, the irradiation time-dependent absorption spectrum and color change images of RhB solution after photocatalytic degradation along with the normalized C/C_0 concentration curve of the dye were studied for Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles. With increasing irradiation time, the intensity of the characteristic absorption peak of RhB gradually decreases, which means the photocatalytic degradation of RhB dye by Fe_2O_3 @ZnO core-shell nanoparticles. The photocatalytic degradation was about 78%, 83% for spherical samples and 86% for spindle-shaped samples after 300 min.

Conclusions

In the present study, Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles in spherical and spindle shapes were successfully synthesized. Structural analysis of these nanoparticles showed that these nanoparticles have high purity. In all samples, Fe_2O_3 cores had rhombohedral corundum phase and ZnO shells had hexagonal phase. The average diameter of spherical nanoparticles was 47, 28 and 19 nm for spindle-shaped nanoparticles, respectively. The optical gap was 2.63 and 2.79 eV for spherical nanoparticles and 3.07 eV for spindle-shaped nanoparticles, indicating their potential as photocatalysts. On the other hand, it can be observed that the optical gap increased with decreasing the diameter of nanoparticles and increasing the thickness of ZnO layer. Next, the photocatalytic activity of these nanoparticles was investigated. The spindle-shaped Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles showed better photocatalytic performance than the spherical nanoparticles by destroying approximately 86% of RhB dye in 300 min. It is worth noting that, in this study, the photocatalytic performance of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles in the removal of rhodamine B dye was investigated. Rhodamine B dye is known as a type of organic pollutant in water, and as a result, in future studies, Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles can be used to remove other organic pollutants in water by photocatalytic method. Since

organic pollutants constitute a significant part of the pollutants in water, in the future, the use of the photocatalytic activity of Fe_2O_3@ZnO core-shell nanoparticles in various treatment plants can be considered.

Acknowledgment

This research is taken from the first author's doctoral dissertation. Financial support received from the grant of the 2st author with the grant number SCU.SP1403.332. The authors of this article express their gratitude to Shahid Chamran University of Ahvaz.

References

1- Anjaneyulu, R.B., Mohan, B.S., Naidu, G.P. and Muralikrishna, R., 2018. Visible light enhanced photocatalytic degradation of methylene blue by ternary nanocomposite, MoO_3/Fe_2O_3/rGO. *Journal of Asian Ceramic Societies*, *6(3)*, pp.183-195. https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1479011

2- Buckley, D., Lonergan, A. and O'Dwyer, C., 2025. ZnO-based Thin Film Metal Oxide Semiconductors and Structures: Transistors, Optoelectronic Devices and Future Sustainable Electronics. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*,*14(1)*,pp. 015001. doi: 10.1149/2162-8777/ada3a2

3- Dilshad, S., Ali, A., Firduas, S., Ahmad, M. and Ahmad A., 2025. Exploring the Structural Features and Adsorption Potential of a Newly Synthesized Cobalt (II) Coordination Polymer towards Perilous Organic Dye Contaminants in Water. *Journal of Molecular Structure*, pp.141895. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.141895

4- Kadhim, M.J., Mahdi, M.A., Selman, A.M., Al-Ani, S.K.J., Hassan, J.J. and Ahmed, N.M., 2023. The most important parameters that affect the photocatalytic activity of ZnO nanostructures against organic dyes: a review. *Iranian Journal of Catalysis*, *13(1)*, https://doi.org/10.30495/ijc.2023.1969439.1966

5- Kargar dehbidi, V. and Farbod, M., 2024. Investigating the effect of adding Ag nanoparticles on the photocatalytic activity of Fe_2O_3-ZnO nanocomposite. *Nanoscale*, *11(3)*, pp. 81-90. https://doi.org/10.1007/s40042-024-01279-1

6- Liu, J., Wang, H., Wu, H., Yang, Y., Wang, C., Wang, Q., Jia, B. and Zheng, J., 2024. Research progress of zinc oxide-based heterojunction photocatalysts. *Journal of Materials Chemistry A*,. https://doi.org/10.1039/D4TA03901G

7- Ninakanti, R., Borah, R., Craig, T., Ciocarlan, R.-G., Cool, P., Bals, S. and Verbruggen, S.W., 2024. Au@ TiO_2 Core–Shell Nanoparticles with Nanometer-Controlled Shell Thickness for Balancing Stability and Field Enhancement in Plasmon-Enhanced Photocatalysis. *ACS nano*, *18(49)*, pp. 33430-40. https://doi.org/10.1021/acsnano.4c09944

8- Saravanan, A., Kumar, P.S., Vo, D.V.N., Yaashikaa, P.R., Karishma, S., Jeevanantham, S., Gayathri, B. and Bharathi, V.D., 2021. Photocatalysis for removal of environmental pollutants and fuel production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*, pp.441-463. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01077-8

9- Shafiee, A., Rabiee, N., Ahmadi, S., Baneshi, M., Khatami, M., Iravani, S. and R.S., Varma., 2022. Core–shell nanophotocatalysts: review of materials and applications. *ACS Applied Nano Materials*, *5(1)*, pp. 55-86. https://doi.org/10.1021/acsanm.1c03714