

مقاله پژوهشی

تخریب آلاینده آلی رنگی با استفاده از فتوکاتالیست مگنتیت/سولفید روی سنتز شده با روش شیمیایی

شیرین کلانتری*^۱، علی شکوه‌فر^۱ و محمدرضا خدابخش^۲

۱- دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- پژوهشکده مهندسی مواد و فرایندهای پیشرفته، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲

چکیده

در این پژوهش، سنتز نانو کامپوزیت اکسید آهن/نیمه‌رسانا با خواص مغناطیسی و فتوکاتالیستی برای تجزیه آلاینده آلی می‌باشد. این نانو کامپوزیت علاوه بر داشتن کاربرد مناسب فتوکاتالیستی برای تخریب آلاینده‌های آلی رنگی، قابلیت بازیابی و تکرارپذیری نیز به دلیل خاصیت مغناطیسی دارد. از این رو نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی با خاصیت فلئورسنت و سوپرپارامغناطیس سنتز و مشخصه‌یابی شد. در مرحله اول نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی به کمک آهن کلراید ۴ و ۶ آبه تهیه شد و سپس نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی با روش هم‌رسوبی سنتز شد. به منظور تایید فازهای تشکیل شده و محاسبه اندازه میانگین کریستالی نمونه‌های سنتز شده XRD انجام شد، نتایج این آنالیز حضور هم‌زمان فازهای مکعبی اکسید آهن و سولفید روی را تایید کرد. بررسی مورفولوژی نمونه‌های سنتز شده با کمک SEM انجام پذیرفت، تصویر SEM نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی را با مورفولوژی کروی نشان می‌دهد، قطر نانو کامپوزیت سنتز شده بین ۵۰ تا ۱۵۰ nm متغیر است. با بررسی تصویر میکروسکوپ فلئورسانس نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی تحت تابش نور UV، نور آبی رنگی از آن مشاهده شد که مشخصه خاصیت فلئورسنت نانو کامپوزیت سنتز شده است. خاصیت مغناطیسی نمونه‌های سنتز شده توسط VSM بررسی شد. نتایج آنالیز مغناطیسی خاصیت سوپرپارامغناطیس بودن نانو کامپوزیت سنتز شده را نشان داد. با استفاده از طیف نورسنج UV-Vis کاهش پیک جذب آلاینده رنگی مورد ارزیابی قرار گرفت و درصد حذف رنگ محاسبه شد. بعد از مدت زمان تابش لامپ UV-C (۳۰۰ دقیقه) حدود ۹۰٪ از رنگ ردآمین بی از محلول آبی حذف شد.

واژه‌های کلیدی: نانو کامپوزیت، فتوکاتالیست، آلاینده رنگی، نیمه‌رسانا، مغناطیس.

۱- مقدمه

ترکیبات، رنگ‌های آلی در منابع آبی به فراوانی یافت می‌شوند و حذف آن‌ها به دلیل پایداری فیزیکی و شیمیایی بالا دشوار است [۲]. رنگ‌های آلی بیش از ۷۰۰۰۰۰ تن در سال برای کاربردهای مختلف شامل منسوجات، چاپ و

فاضلاب صنایع مختلف به دلیل حجم بالایی از ترکیبات سمی و سرطان‌زا منبع آلودگی هستند [۱]. در میان این

* **عهده‌دار مکاتبات:** شیرین کلانتری

نشانی: دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تلفن: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۳۰۴، دورنگار: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۳۰۴، پست الکترونیکی: sh.kalantari@email.kntu.ac.ir

اکسیدهای نیمه‌رسانا (به عنوان مثال ZnO ، ZrO_2 ، TiO_2 ، WO_3 ، MoO_3 ، SnO_2 ، $\alpha-Fe_2O_3$ و غیره) و سولفیدهای نیمه‌رسانا (به عنوان مثال ZnS ، CdS ، $CdSe$ ، WS_2 ، MoS_2 و غیره) می‌توانند به عنوان کاتالیست برای واکنش‌های شیمیایی تهییج شده با نور (Photoinduced) به علت ساختار الکترونیکی ذاتی خود که شامل یک باند ظرفیت پر (VB) و یک باند هدایت خالی (CB) است، استفاده شوند. هنگامی که یک فوتون با انرژی ($h\nu$) بیشتر یا برابر انرژی گاف نواری (E_g) به نیمه‌رسانا می‌رسد، الکترون (e^-) تولید شده با نور (Photogenerated) در باند ظرفیت به باند هدایت برانگیخته می‌شود و حفره مثبت (h^+) در باند ظرفیت بجا می‌گذارد. حامل‌های بار تهییج شده با نور نقش کلیدی در فرآیند تخریب فتوکاتالیستی دارند. حفرات واسطه اکسیداسیون ترکیبات آلی از طریق تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل ($\bullet OH$) و الکترون‌ها از طریق تشکیل رادیکال‌های سوپراکسید ($\bullet O_2$) واسطه واکنش‌های اکسایش-کاهش می‌باشند [۷].

به منظور افزایش رنج کاربردهای نانوذرات اکسید آهن، چندین مواد کاربردی به عنوان نانو ساختارهای کامپوزیتی جدید معرفی شده‌اند. هم‌اکنون، نیمه‌رساناهایی با گاف نواری گسترده با خواص فتوکاتالیستی خوب برای عامل دار کردن اکسید آهن مغناطیسی استفاده شده است. در یک سیستم کامپوزیتی نیمه‌رسانا-اکسید آهن، اکسید آهن مغناطیسی نمی‌تواند فقط جدا شده و فتوکاتالیست را بازیابی کند، بلکه می‌تواند هتروساختارهای (Heterostructures) نیمه‌رسانا با گاف نواری باریک/عریض را تشکیل دهد. هتروساختارهای نیمه‌رسانا با گاف نواری باریک/عریض می‌تواند بطور موثر جدایش جفت الکترون-حفره، در نتیجه افزایش استفاده از نور مرئی و در نهایت بهبود راندمان فتوکاتالیستی را ایجاد کند [۷].

سولفید روی (ZnS) دارای پتانسیل الکتریکی قابل تنظیم و باند مناسب است که می‌تواند شرایط ترمودینامیکی برای واکنش اکسایش-کاهش فتوکاتالیستی ایجاد کند، از این رو

طراحی تولید می‌شوند. برآوردها حاکی از آن است که بیش از ۲۰٪ آن‌ها به فاضلاب صنعتی رها می‌شوند و به گیاهان، خاک‌ها و منابع آب شیرین آسیب می‌رساند [۳].

روش‌های متفاوتی برای حذف رنگ‌های آلی از جمله روش‌های بیولوژیکی (هوازی و غیرهوازی)، فیزیکی (فناوری غشا و جذب)، شیمیایی (انعقاد-لخته‌سازی، رسوب شیمیایی، الکترولیز و فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته) بکار برده شد [۴]. فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته مانند فتوکاتالیست هتروژن از دهه ۱۹۷۰ به دلیل پتانسیل کاربردی آن در تصفیه آب گسترش یافته است [۵]. یکی از مزایای اصلی آن منبع تابش مورد استفاده در فعالیت فتوکاتالیستی است که می‌تواند مصنوعی یا طبیعی باشد [۶].

اکسید آهن یک ترکیب رایجی است که به فراوانی در طبیعت وجود دارد و می‌تواند در مقیاس بزرگ سنتز شود. بیش از ۶۰ سال است که کاربرد آزمایشگاهی نانوذرات اکسید آهن بررسی می‌شود. در طی چند دهه گذشته، نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی با ساختارها و مورفولوژی‌های مختلف ساخته شده است. از سوی دیگر، اکسیدهای آهن مغناطیسی به دلیل طیف وسیعی از کاربردها، از جمله سیال‌های مغناطیسی، کاتالیست، ره‌ایش هدفمند دارو، بایوسنسور، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی، ذخیره‌سازی داده‌ها و اصلاح محیط‌زیست، مورد توجه محققین است.

روش‌های سنتز متعددی برای سنتز نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی، از جمله رسوب‌دهی هم‌زمان، تجزیه حرارتی دمای بالا، واکنش هیدروترمال و واکنش سولوترمال، واکنش‌های سل-ژل و روش پلی‌ال (Polyol)، سنتز میکروامولسیون، واکنش سونوشیمیایی، سنتز به کمک مایکروویو و بایوسنتز استفاده شده است. علاوه بر روش‌های فوق، روش‌های جایگزین شیمیایی یا فیزیکی نیز می‌تواند برای سنتز نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی مانند روش‌های الکتروشیمیایی، سنتز تزریق جریان، روش‌های ابروسل/بخار و غیره، استفاده شود.

شکل Fe_3O_4/ZnS با ساختار هسته-پوسته با روش دانه واسطه رشد (Seed mediated growth method) سنتز کرده که از پروسه پوشش دوتایی برای افزایش فعالیت سطحی زنجیره‌های Fe_3O_4 برای تشکیل لایه کریستالی ZnS استفاده کردند [۱۴].

رشیدی و همکارانش نانوذرات زیست‌سازگار اکسید آهن سوپرپارامغناطیسی و نانو کامپوزیت $Fe_3O_4@ZnS$ با روش آسان رسوب همزمان با کمک فلاکس با استفاده از عامل پوشش EDTA (capping agent) سنتز کردند. دلیل انتخاب EDTA خاصیت زیست‌سازگاری و ایجاد هماهنگی بین کاتیون‌های آهن و روی بود. از آنجایی که روی خاصیت غیرسمی دارد از این نانو کامپوزیت برای کاربردهای زیستی استفاده شد [۱۵]. در تحقیقی دیگر مندال (Mondal) و همکارانش هتروساختارهای Fe_3O_4/ZnS دو کاربردی با خاصیت مغناطیسی و فلئورسنت با روش هم‌رسوبی به صورت هسته (اکسید آهن)-پوسته (سولفید روی) سنتز کرده و برای کاربرد مغناطیسی هایپرترمیا مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. در کار تحقیقاتی حاضر هدف سنتز نانو کامپوزیت دو کاربردی با خواص مغناطیسی و نوری مطلوب است. از این‌رو در ابتدا نانوذرات اکسید آهن مگنتیت به کمک آهن کلراید ۴ و ۶ ظرفیتی آماده شد، سپس نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی به کمک TAA و استات روی سنتز شد. خواص ساختاری، نوری، مغناطیسی و موفولوژی نانو کامپوزیت سنتز شده بررسی شد. سپس کاربرد آن به عنوان فتوکاتالیست برای حذف آلاینده آلی رنگ ردامین-بی تحت نور UV-C ارزیابی شد و حدود ۹۰٪ قابلیت تجزیه این رنگ را در مدت زمان ۵ h تابش از خود نشان داد. با بررسی خواص مغناطیسی این فتوکاتالیست به قابلیت بازیابی آن از محلول آبی بعد از تجزیه رنگ دست یافتیم. طبق دانش ما تاکنون مطالعات بسیار اندکی در زمینه کاربرد فتوکاتالیستی این نانو کامپوزیت در حذف رنگ‌های آلی انجام پذیرفته است.

یک فتوکاتالیست با کارایی بالا محسوب می‌شود [۸]. می‌دانیم که فعالیت فتوکاتالیستی نانومواد ارتباط نزدیکی با مورفولوژی، میکروساختار، اندازه ذرات و خواص سطح دارد. بنابراین تلاش‌های زیادی برای بدست آوردن ZnS با مورفولوژی‌ها و ساختارهای مختلف مانند میکروکره‌ها صورت گرفت [۹]. سولفید روی نیمه‌رسانا سولفید فلزی غیرسمی دسته II-IV است [۱۰] و در دو فاز ساختاری، ساختار بلند روی (Zinc blend) (اسفلرایت) (Sphalerite) با فاز مکعبی و ساختار ورتزیت (Wurtzite) با فاز هگزاگونال وجود دارد. انرژی گاف نواری این دو فاز ZnS، $eV 3/5$ - $eV 3/7$ و $eV 3/8$ - $eV 3/7$ به ترتیب برای فازهای مکعبی و هگزاگونال است [۱۱،۱۲]. چندین تحقیق انجام شده بر اکسید آهن/سولفید روی در ادامه آمده است.

شاه (Shah) و همکارانش نانوذرات هماتیت/سولفید روی را با ساختار هسته-پوسته سنتز کرده و خواص فتوکاتالیستی آن را برای تخریب فرمالدئید تحت تابش نور فرابنفش مورد بررسی قرار دادند، نتیجه فعالیت فتوکاتیوتیته به صورت $ZnS/Fe_2O_3 > ZnS > Fe_2O_3$ بدست آمد [۱۰].

کاک (Koc) و همکارانش نانو کره‌های کامپوزیت سوپرپارامغناطیس $ZnS@Fe_3O_4$ با روش رسوب‌دهی همزمان سنتز کردند، نانو کره‌های دو کاربردی $ZnS@Fe_3O_4$ خواص مغناطیسی مگنتیت را حفظ کرده و خواص نوری لومینسنت نانوذرات ZnS را نیز نشان داد. مورفولوژی $ZnS@Fe_3O_4$ ساختار کروی شکل با اندازه متوسط حدود ۱۰۰ nm است. نانو کامپوزیت نهایی رفتار سوپرپارامغناطیس و فلئورسنت را نشان داد. مقدار مغناطیس‌پذیری اشباع نانو کره‌های $ZnS@Fe_3O_4$ ۳۰ emu/g و طول موج تابش ۳۳۰ nm بدست آمد. خواص مغناطیسی نانو کره‌ها به دلیل وجود مگنتیت و خواص فلئورسنت توسط نقاط کوانتومی ZnS ایجاد شد. با این خواص می‌توان در ره‌ایش هدف‌مند دارو در درمان تومور استفاده کرد [۱۳].

لیو (Liu) و همکارانش نانو کامپوزیت‌های ۱ بعدی زنجیره‌ای

۲- فعالیت‌های تجربی

آهن کلراید چهار آب ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)، آهن کلراید شش آب ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، محلول آمونیاک ۲۵٪ (NH_3)، هیدروکلریک اسید (HCl)، سدیم دودسیل سولفات (SDS)، استات روی دی هیدرات $\text{Zn}(\text{AC})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، تیواستامید (TAA)، رنگ ردامین-بی (RhB).

دو محلول با غلظت مشخصی از آهن کلراید چهار آب و آهن کلراید شش آب آماده شد، این دو محلول به هم افزوده و به مدت زمان ۰/۵ h در دمای 60°C بر روی استیرر هم‌زده شد. برای تنظیم pH محلول، محلول آمونیا را قطره‌قطره افزوده تا زمانی که pH به ۱۰ برسد، سپس دمای محلول را به 80°C رسانده و در این دما به مدت ۲ h هم‌زده شد. در نهایت برای جداسازی اکسید آهن از مخلوط حاصل از آهن ربای قوی استفاده شد، چندین مرتبه شستشو با آب دیونیزه و جداسازی با آهن ربا انجام شد، بعد از اتمام فرآیند شستشو و جداسازی، در اون خشک شد.

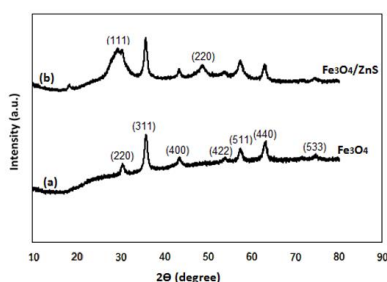
سنتز نانو کامپوزیت مطابق با روش هانگ و همکارانش (۲۰۱۶) انجام پذیرفت [۱۷]، بطور خلاصه ۰/۳ گرم اکسید آهن سنتز شده در محلول ۰/۱ مولار HCl ریخته شد و به مدت ۳۰ دقیقه آلتراسونیک شد، چندین مرتبه با آب دیونیزه شده شستشو داده شد و سپس به محلول آبی SDS افزوده شد و به مدت ۲۴ h هم‌زده شد. در مرحله بعد به محلول آبی استات روی اضافه شد و این بار هم به مدت ۲۴ h هم‌زده شد. در مرحله آخر به حمام روغن انتقال داده شد و محلول تیواستامید به آن افزوده شد و به مدت ۷ h در دمای 65°C نگه داشته شد. محصول با آهن ربا جدا شد و چندین مرتبه با آب دیونیزه شده و اتانول شستشو داده شد، نمونه آماده شده به مدت ۱۲ h در دمای 60°C خشک شد.

الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) نانوذرات سنتز شده توسط پراش سنج BRUKER D8 ADVANCE X-RAY با تابش $\text{CuK}\alpha$ در زاویه 2θ بین ۱۰ تا 80° درجه انجام شد. موفولوژی نمونه‌های سنتز شده با استفاده از دستگاه Vega III LMU-SEM مشاهده شد. میکروسکوپ فلورسینس

(BX40, OLYMPUS, Japan) برای به تصویر کشیدن نانوذرات استفاده شد. از مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (VSM) برای بررسی خاصیت مغناطیسی نمونه‌ها استفاده شد، بازه مورد بررسی برای میدان مغناطیسی اعمالی ۱۴ تا ۱۴ kOe می‌باشد. از طیف-نورسنج UV-1100 (220V, 60Hz) طیف‌های جذبی UV-Vis در طول موج ۴۰۰-۷۰۰ nm اندازه‌گیری و ثبت شد.

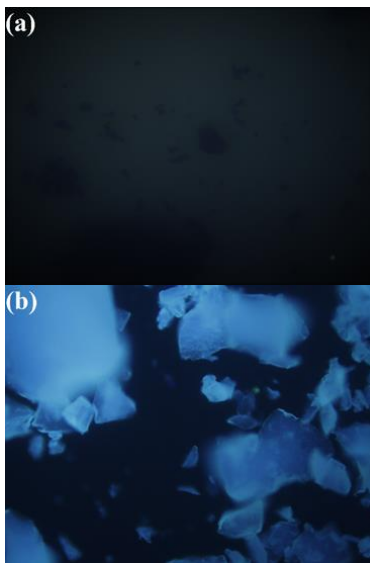
۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آنالیزها و بررسی کاربرد فتوکاتالیستی نمونه سنتز شده در حذف رنگ ردامین-بی در این بخش بررسی شد. الگوی پراش اشعه ایکس نانو کامپوزیت مگنتیت/سولفید روی به همراه نانوذرات مگنتیت خالص در شکل ۱ آمده است. شکل ۱a الگوهای پراش اکسید آهن مگنتیت با ساختار مکعبی (شماره کارت ICDD: 96-900-5842) می‌باشد. شکل ۱b (الگوی پراش نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی) پیک‌های پهن مربوط به فاز مکعبی ZnS (شماره کارت ICDD: 96-500-0089) را به همراه پیک‌های مگنتیت نشان می‌دهد. پیک‌های پراش پهن نانوذرات ZnS را با اندازه کریستالی کوچک نشان می‌دهد. نتایج تشکیل نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی را تایید می‌کند. اندازه میانگین کریستالی نانوذرات مگنتیت و نانو کامپوزیت مگنتیت/سولفید روی با استفاده از فرمول شرر به ترتیب حدود ۵۴ و ۲۰ nm محاسبه شد. این نتایج تشکیل نانو کامپوزیت با ابعاد نانو را نشان می‌دهد.



شکل ۱: الگوهای XRD (a) نانوذرات مگنتیت و (b) فتوکاتالیست مگنتیت/سولفید روی.

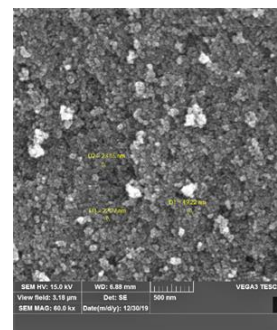
شکل ۳ آمده است. با توجه به شکل در می‌یابیم که Fe_3O_4 خالص تحت تابش نور UV نشر نوری ندارد (a). تحت شرایط یکسان، نور آبی روشن از نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی مشاهده شد (b)، که این مشخصه خاصیت فلوئورسنت فتوکاتالیست مگنتیت/سولفید روی است. نتایج مشابهی در کار تحقیقاتی یو (Yu) و همکارانش گزارش شد [۱۹،۲۰].



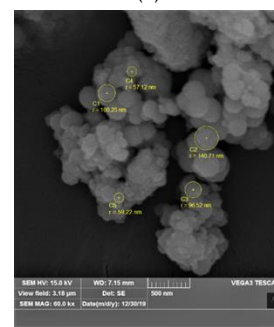
شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ فلوئورسانس (a) اکسید آهن خالص و (b) نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی تحت تابش نور UV.

شکل ۴ منحنی‌های مغناطیسی اکسید آهن و نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی را نشان می‌دهد. با مقایسه دو منحنی، اکسید آهن خالص مقدار مغناطیس اشباع بالاتری دارد. مقدار مغناطیس اشباع اکسید آهن خالص ۶۶/۴ بدست آمد، در حالی که بعد از تشکیل نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی مقدار مغناطیس اشباع کاهش یافته و به ۳۸/۸ رسیده است. همان‌طور که انتظار می‌رود نانو کامپوزیت خاصیت سوپراپارامگناطیس دارد [۲۱]. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های سنتز شده پاسخ مغناطیسی قوی داشته و به راحتی توسط نیروی مغناطیسی خارجی از محلول جدا می‌شوند. خاصیت سوپراپارامگناطیسی مشخصه مواد مغناطیسی با ساختار نانومتری است.

مورفولوژی سطح ذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. شکل ۲a تصویر SEM نانو ذرات Fe_3O_4 خالص می‌باشد. نانو ذرات تقریباً کروی شکل بوده و دارای سطح ناهمواری می‌باشد. قطر نانو ذرات بین ۲۰ تا ۵۰ nm متغیر است که توزیع هموزن اندازه ذرات را نشان می‌دهد. شکل ۲b تصویر میکروسکوپ SEM نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی را با مورفولوژی کروی نشان می‌دهد. سطح نانو کامپوزیت به دلیل پوشش ذرات ریز سولفید روی سطح نسبتاً صاف و همواری است، نتیجه مشابهی در کار تحقیقاتی لیو و همکارانش گزارش شد [۱۸]. بعد از تشکیل سولفید روی قطر نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی افزایش یافته و رنجی بین ۵۰ تا ۱۵۰ nm است. نتایج تصویربرداری SEM سنتز موفقیت‌آمیز نانو کامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی را با ابعاد نانومتری تایید می‌کند.



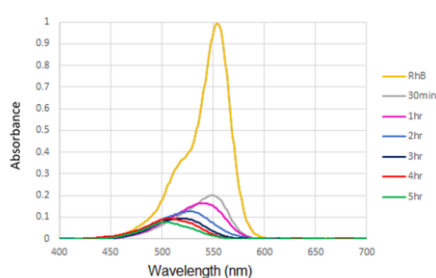
(a)



(b)

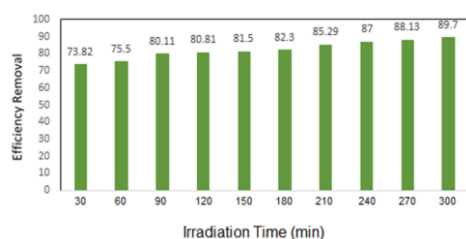
شکل ۲: تصاویر SEM (a) نانو ذرات اکسید آهن و (b) فتوکاتالیست اکسید آهن/سولفید روی.

خاصیت فلوئورسنت توسط میکروسکوپ فلوئورسنت بررسی شد. تصاویر میکروسکوپ فلوئورسانس نمونه‌ها در



شکل ۵: طیف‌های جذب UV-Vis رنگ ردامین-بی در زمان‌های مختلف تابش نور.

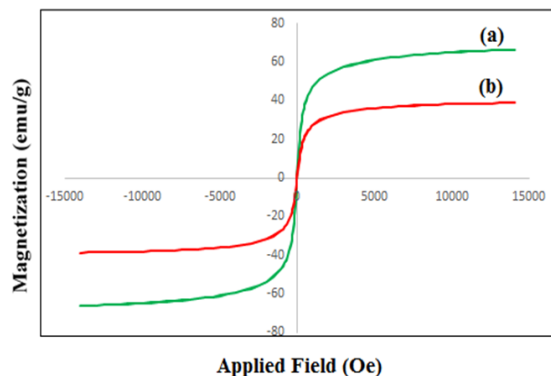
شکل ۶ تاثیر زمان تابش را بر درصد تخریب رنگ نشان می‌دهد، همان‌طور که در نمودار آمده است بعد از ۳۰ دقیقه تابش ۷۳٪ حذف انجام شده و به ترتیب با افزایش زمان تابش از ۶۰ دقیقه تا ۳۰۰ دقیقه درصد حذف از ۷۵٪ تا حدود ۹۰٪ افزایش یافت.



شکل ۶: تاثیر زمان تابش نور UV-C بر بازده فتوکاتالیستی.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، ابتدا نانوذرات اکسید آهن مگنتیت آماده شد، سپس نانوکامپوزیت مگنتیت/سولفید روی با روش هم‌رسوبی به کمک تیواستامید و استات روی سنتز شد. اندازه ذرات مگنتیت و نانوکامپوزیت مگنتیت/سولفید روی سنتز شده به ترتیب بین ۵۰-۲۰ nm و ۱۵۰-۵۰ nm بدست آمد. با بررسی عملکرد فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت مگنتیت/سولفید روی ۹۰٪ تخریب رنگ آلی ردامین-بی تحت تابش نور UV-C در مدت زمان ۵ h انجام شد و بدلیل حضور مگنتیت نانوکامپوزیت سنتز شده خاصیت مغناطیسی داشته و این خاصیت برای بازیابی نانوکامپوزیت از محلول بعد از حذف رنگ بسیار موثر است و مشکلات ناشی از عدم جدایش و یا افزودن آلاینده جدید به فاضلاب وجود ندارد.



شکل ۷: منحنی هیستریز مغناطیسی (a) نانوذرات اکسید آهن و (b) نانوکامپوزیت اکسید آهن/سولفید روی.

کاربرد فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت سنتز شده برای تخریب رنگ ردامین-بی ارزیابی شد. برای بررسی این عملکرد در ابتدا محلول رنگی با غلظت 10^{-5} مولار (۱۰۰ میلی‌لیتر) آماده شد و سپس ۰/۱ گرم از نانوکامپوزیت سنتز شده به محلول رنگی افزوده شد. محلول نهایی به مدت ۰/۵ h برای رسیدن به تعادل جذب-واجذب در تاریکی هم‌زده شد. در ادامه هم‌چنان که محلول هم‌زده می‌شد، به مدت ۵ h تحت لامپ UV-C (لامپ جیوه‌ای ۸ وات) قرار گرفت.

به فاصله هر ۰/۵ h نمونه‌برداری‌ها از محلول رنگی انجام شد و با استفاده از دستگاه طیف-نورسنج UV برای بررسی غلظت رنگ آنالیز انجام شد. طیف‌های جذب محلول رنگی ردامین-بی در زمان‌های مختلف در شکل ۵ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان تابش نور، شدت پیک جذب مشخصه رنگ ردامین-بی (۵۵۴ nm) کاهش یافت.

بازده تخریب فتوکاتالیستی با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد، حدود ۹۰٪ از رنگ ردامین-بی بعد از گذشت ۵ h تابش نور UV-C تخریب شد.

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100 \quad (1)$$

R نرخ تخریب (%)، C_0 غلظت اولیه رنگ (mg/L)، C_t غلظت رنگ بعد از t دقیقه تابش (mg/L) است [۲۲].

[10] P. Shah, K.S. Siddhapara, D.V. Shah, *Physics*, **15**, 2018, 1.
 [11] W. Tang, D.C. Cameron, *Thin Solid Films*, **280**, 1996, 221.
 [12] C. Falcony, M. Garcia, A. Ortiz, J.C. Alonso, *Journal of Applied Physics*, **72**, 1992, 1525.
 [13] K. Koc, B. Karakus, K. Rajar, E. Alveroglu, *Superlattices and Microstructures*, **110**, 2017, 198.
 [14] E. Liu, X. Zhou, Y. Zhai, J. Du, F. Xu, H. Zhai, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **29**, 2018, 8320.
 [15] S. Rashidi Dafeh, P. Iranmanesh, P. Salarizadeh, *Materials Science and Engineering: C*, **98**, 2019, 205.
 [16] D.K. Mondal, G. Phukan, N. Paul, J.P. Borah, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **528**, 2021, 167809.
 [17] Y. Hong, X. Shu, Y. Qin, J. Cui, Z. Yong, Y. Wu, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **29**, 2016, 2367.
 [18] E. Liu, H. Yuan, Z. Kou, X. Wu, Q. Xu, Y. Zhai, Y. Sui, B. You, J. Du, H. Zhai, *Scientific Reports*, **5**, 2015, 1.
 [19] X. Yu, Y. Shan, K. Chen, *Materials Chemistry and Physics*, **212**, 2018, 142.
 [20] X. Yu, J. Wan, Y. Shan, K. Chen, X. Han, *Chemistry of Materials*, **21**, 2009, 4892.
 [21] M. Stefan, C. Leostean, O. Pana, M.L. Soran, R.C. Suci, E. Gautron, *Applied Surface Science*, **288**, 2014, 180.
 [22] Q. Zhu, N. Liu, N. Zhang, Y. Song, M.S. Stanislaus, C. Zhao, Y. Yang, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**, 2018, 2724.

مراجع

[1] Y. Wang, N. Bi, H. Zhang, W. Tian, T. Zhang, P. Wu, W. Jiang, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **585**, 2020, 124105.
 [2] B. Ayesha, U. Jabeen, A. Naeem, P. Kasi, M.N.K. Malghani, S.U. Khan, J. Akhtar, M. Aamir, *Results in Chemistry*, **2**, 2020, 100023.
 [3] M. Algarin, M. Amaya, R. Solano, D. Patino-Ruiz, A. Herrera, *Nano-Structures & Nano-Objects*, **26**, 2021, 100730.
 [4] X. Li, Y.Y. Cui, Y.J. Chen, C.X. Yang, *Microporous and Mesoporous Materials*, **296**, 2020, 110013.
 [5] J. Diaz-Angulo, J. Lara-Ramos, M. Mueses, A. Hernandez-Ramirez, G.L. Puma, F. Machuca-Martinez, *Chemical Engineering Journal*, **381**, 2020, 122520.
 [6] V.S. Koseira, T.M. Cruz, E.S. Chaves, E.R.L. Tiburtius, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **344**, 2017, 184.
 [7] W. Wu, C. Jiang, V.A.L. Roy, *Nanoscale*, **7**, 2015, 38.
 [8] H.G. Manyar, P. Iliade, L. Bertinetti, S. Coluccia, *Journal of Colloid and Interface Science*, **354**, 2011, 511.
 [9] Y. Yu, G. Chen, Q. Wang, Y. Li, *Energy & Environmental Science*, **4**, 2011, 3652.