

ساخت کامپوزیت فوتوکاتالیستی $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ با نانوساختار هسته/پوسته/پوسته و

مشخصه یابی آن

فردین قاسمی پیرانلو^۱، فاطمه باورسی‌ها^{۲*}، سعیده داداشیان^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۳۱، ش.ص ۱۹۰-۱۷۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰)

چکیده

فوتوکاتالیست مغناطیسی $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ به روش سل-ژل سنتز شد. بدین منظور، در مرحله اول ذرات Fe_3O_4 به عنوان هسته مغناطیسی این کامپوزیت و با به کارگیری از روش احیای کربن تهیه گردید. در مرحله دوم، پوشش‌دهی پوسته SiO_2 با استفاده از پیش ماده تترا اتیل اورتو سیلیکات (TEOS) انجام شد. در پایان پوسته اکسید روی با استفاده از پیش ماده نیترات روی هیدراته بر روی کامپوزیت Fe_3O_4/SiO_2 قرار گرفت. نانوساختارهای تهیه شده با استفاده از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی (FESEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز خواص مغناطیسی (VSM) و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) مشخصه یابی شد. نتایج FESEM و TEM، پوشش‌دهی سیلیس و اکسید روی را بر روی ذرات هسته تایید کرد و فوتوکاتالیست مغناطیسی $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ با موفقیت تهیه شد. میانگین اندازه ذرات Fe_3O_4 به طور تقریبی ۳۰۰ نانومتر به دست آمد. ضخامت پوسته سیلیس به طور تقریبی ۲۵ نانومتر و ضخامت پوسته اکسید روی در حد چند نانومتر حاصل شد. نتایج VSM نشان داد که پوشش‌دهی پوسته سیلیس و اکسید روی، سبب کاهش مغناطیس اشباع (M_s) پودر Fe_3O_4 شده است به طوری که مغناطش اشباع از emu/g ۸۰ به emu/g ۴۸/۸ کاهش یافته است که این مقدار جهت بازیابی مغناطیسی مناسب است. خواص فوتوکاتالیستی کامپوزیت $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ تحت تابش نور UV و بر روی تخریب متیلن نارنجی مورد بررسی قرار گرفت. تخریب متیلن نارنجی ۷۰٪ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اکسید روی، مغناطیس، فوتوکاتالیست، سیلیکا، ساختار هسته/پوسته/پوسته.

^۱ - مدیر و ریاست بخش پژوهش آزمایشگاه معتمد محیط زیست، شرکت فن آوران زیست کره، ابهر، زنجان، ایران

^۲ - کارشناس تحقیق آزمایشگاه معتمد محیط زیست، شرکت فن آوران زیست کره، ابهر، زنجان، ایران

^۳ - کارشناس آموزش آزمایشگاه معتمد محیط زیست، شرکت فن آوران زیست کره، ابهر، زنجان، ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: Info@btlab.ir

پیشگفتار

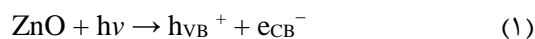
جداسازی معمولاً به روش سانترفیوژ و یا با استفاده از فیلتر انجام می‌شود، هزینه لازم برای جداسازی از حجم وسیعی از آب‌های تصفیه شده بسیار بالا می‌گردد. از طرفی ممکن است جداسازی ذرات اکسید روی به طور کامل صورت نگیرد که این خود، سبب آلودگی ثانویه می‌شود. لذا تلاش‌های فراوانی جهت بهبود فرایند جداسازی با بهره‌گیری از هسته‌های مغناطیسی در جریان است [۱۵-۱۲].

در سال‌های اخیر مواد با ساختار هسته/پوسته کاربردهای متنوعی در حوزه‌های مختلف از قبیل الکترونیک، بیوپزشکی، نوری، شیمی تجزیه و غیره دارند. نانوذرات هسته/پوسته موادی پرکاربرد، با عملکرد بالا و خواص اصلاح شده هستند. به دلیل پوشش‌دهی با مواد پوسته، خواص ذرات هسته مانند میزان واکنش‌پذیری یا پایداری حرارتی می‌تواند اصلاح شود؛ به گونه‌ای که در مجموع، پایداری ذرات و پراکندگی افزایش می‌یابد. در نهایت، ذرات نسبت به مواد مختلف که با هم به کار برده می‌شوند، خواص متمایزی نشان می‌دهند. هدف از پوشش بر روی ذرات هسته معمولاً اصلاح سطح، افزایش قابلیت عملکرد، افزایش پایداری، کاهش مصرف مواد گرانبها و غیره است [۱۶، ۸].

اخیراً گزارش شده است که ذرات اکسید روی به صورت ساختار هسته/پوسته/پوسته به کار برده شده‌اند. ذرات Fe_3O_4 یکی از مهم‌ترین اسپینل‌های نوع فریت است که به طور گسترده در جداسازی مغناطیسی، کاربردهای انتقال گرما، الکتروفوتوگرافی و غیره استفاده می‌شود [۵]. بنابراین از ذرات Fe_3O_4 به عنوان هسته مغناطیسی و اکسید روی به عنوان این پوسته فوتوکاتالیستی این نانوساختارها استفاده شد تا با استفاده میدان مغناطیسی خارجی به راحتی از محیط‌های آبی جدا شوند [۷]. جهت جلوگیری از پدیده انحلال هسته که در اثر تابش نور UV ایجاد می‌شود و سبب کاهش فعالیت فوتوکاتالیستی اکسید روی می‌گردد، وجود یک لایه سیلیکای بی اثر میان ذرات ZnO و Fe_3O_4 ضروری است، از این سوی، ذرات ZnO بر روی کامپوزیت اکسید آهن/سیلیس (سیلیس پوشش داده شده بر روی اکسید آهن) پوشش داده شد [۱۷، ۱۸]. ونگ و همکارانش به سنتز $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ و $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO-Ag$

در طی سال‌های اخیر با افزایش نگرانی‌های محیط-زیستی ناشی از پیشرفت‌های فناوری و صنعت، تلاش‌های بسیاری در سراسر جهان برای به دست آوردن مواد و فرایندهای مؤثر جهت تصفیه آب‌های آلوده انجام شده است [۱۲، ۱]. از این رو فرایندهای تصفیه آلاینده‌های آلی با استفاده از نانوذرات نیمه هادی مانند: TiO_2 , ZnS , ZnO و SnO_2 و غیره مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است [۴، ۳]. اکسید روی در جاذب‌های شیمیایی، سنسورهای گاز، سلول‌های خورشیدی، ابزارهای الکترونیکی و نوری، در تخریب فوتوکاتالیستی به عنوان کاتالیزور و غیره کاربردهای فراوانی پیدا کرده است [۶، ۵].

خواص فوتوکاتالیستی بالای نیمه هادی‌ها از جمله اکسید روی، موجب شده است که در تجزیه فوتوکاتالیستی مولکول‌های آلی تحت تابش اشعه‌های ماورا بنفش به کار برده شوند. اکسید روی با پهنای باند 3.37 eV ، وقتی تحت تابش نور ماورابنفش (UV) قرار می‌گیرد e^- و h^+ ایجاد می‌شود. الکترون و حفره‌ها که جزء اساسی عملکرد فوتوکاتالیست‌ها هستند تنها در صورتی به وجود می‌آیند که انرژی تابشی بیش‌تر از عرض باند انرژی به نیمه‌هادی برسد:



در این واکنش، h و e به ترتیب عوامل اکسیدکننده و احیاکننده قوی هستند. واکنش‌های اکسیداسیون و احیا به ترتیب به صورت زیر می‌باشد:



از این پدیده می‌توان در تخریب آلاینده‌های آلی در حجم زیادی از آب بهره گرفت [۱۱-۷].

با توجه به مصرف مقادیر بالای آب در صنایع مختلف و تولید مقدار قابل توجهی آلاینده‌های آلی، تصفیه آن‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است [۱۲]. یکی از مشکلات اصلی در فرایندهای تصفیه آب‌های آلوده، جداسازی ذرات اکسید روی از آب‌های تصفیه شده است. از آن‌جا که مرحله

میلی‌لیتر اتانول و ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر در حمام آلتراسونیک پراکنده شدند. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر تترا اتیل اورتوسیلیکات و ۴ میلی‌لیتر آمونیا (۲۵٪ وزنی) به آن اضافه شد و تحت هم‌زن مکانیکی قرار گرفت. ذرات با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی از محلول جدا شد. سپس با استفاده از آب مقطر شسته و به مدت ۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد.

سنتر ذرات با ساختار $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$

جهت تهیه نانوساختارهای $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ ۰/۵ گرم پودر Fe_3O_4/SiO_2 تهیه شده در مرحله قبل در ۵۰ میلی‌لیتر DMF با استفاده از حمام آلتراسونیک پراکنده شد. ۰/۶ گرم $ZnNO_3 \cdot 6H_2O$ در ۵۰ میلی‌لیتر DMF حل شد و به محلول قبلی اضافه شد. محلول به دست آمده تحت هم‌زن مکانیکی قرار گرفت. سپس محلول ۰/۰۲ مولار سود به آرامی به محلول اولیه اضافه شد. در ادامه به مدت ۶ ساعت تحت هم‌زن مکانیکی قرار گرفت. ذرات به دست آمده با استفاده از جدایش مغناطیسی از محلول جدا شده و با آب مقطر و اتانول چند بار شسته شد. سپس در خشک‌کن در دمای ۶۰ درجه و به مدت ۶ ساعت خشک شد. در پایان در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲ ساعت کلسینه شد و نانو ساختارهای $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ به دست آمد.

بررسی فوتوکاتالیستی

جهت بررسی فوتوکاتالیستی، تخریب متیلن نارنجی با استفاده از نانوکامپوزیت‌های $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ مورد سنجش قرار گرفت. پودر فوتوکاتالیستی تهیه شده در محلول متیلن نارنجی (۱۰ mg/L) به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریکی هم زده شد و سپس تحت نور UV قرار گرفت و در بازه‌های زمانی مشخص نمونه‌برداری انجام شد. تغییرات جذب متیلن نارنجی با استفاده از اسپکتروفوتومتر UV-Vis بررسی شد.

پرداختند که ذرات اولیه Fe_3O_4 استفاده شده کروی بود [۱۸]. در این پژوهش در راستای حل مشکلات مرتبط با جدایش ذرات فوتوکاتالیستی از آب تصفیه‌شده و امکان استفاده‌ی مجدد از آن‌ها، ابتدا ذرات چند ضلعی منظم Fe_3O_4 به عنوان هسته مغناطیسی تهیه شد و در مرحله بعد ساخت نانوساختارهای فوتوکاتالیستی $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ انجام شد. در ادامه مشخصه‌یابی این فوتوکاتالیست کامپوزیتی انجام شد. شکل ۱ شماتیکی از روند تشکیل کامپوزیت $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی

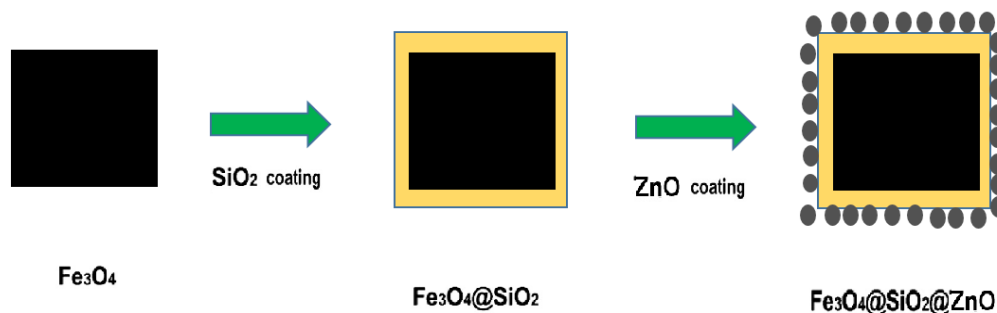
دی متیل فرمامید ($DMF > 99.8\%$)، سدیم هیدروکسید (۹۶٪ $NaOH$)، تترا اتیل اورتوسیلیکات (۹۹٪ $TEOS$)، نیترات روی ($ZnNO_3 \cdot 6H_2O > 99.9\%$)، آب مقطر، اتانول ($C_2H_5OH > 99.9\%$)، آمونیوم هیدروکسید (۲۵٪ $NH_3 \cdot H_2O$)، آهن کلرید (III) شش آبه (۹۹٪ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$)، کتان چربی زدایی شده، تمامی مواد اولیه استفاده شده تهیه شده از شرکت مرک بوده است.

سنتر ذرات Fe_3O_4

ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 به روش احیای کربن تهیه شد. ابتدا ۸۰ گرم آهن کلرید (III) شش آبه در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۱۵ دقیقه هم‌زده شد. ۷ گرم پارچه کربن چربی زدایی شده درون محلول قرار داده شد و به مدت ۱۰ دقیقه تحت حمام آلتراسونیک قرار گرفت. سپس جمع آوری شده و تحت دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت سنتز شد.

سنتر ذرات با ساختار Fe_3O_4/SiO_2

جهت تهیه نانوساختارهای Fe_3O_4/SiO_2 ابتدا ۰/۵ گرم پودر Fe_3O_4 تهیه شده در بخش قبلی به همراه ۱۲۰



شکل ۱- شماتیکی از روند تشکیل کامپوزیت های $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ با ساختار هسته/پوسته/پوسته

مشخصه یابی

ساختار و مرفولوژی نانوساختار تهیه شده با استفاده از الگوی پراش ایکس XRD (شرکت PRO MPD PANalytical و ساخت کشور هلند) مورد بررسی قرار گرفت. طیف جذب UV- مرئی، با استفاده از طیف مادون قرمز (FTIR, Bruker, Tensor 27) بررسی شد. این کامپوزیت ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی (FESEM و شرکت TE-SCAN مدل MIRA3) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM و leo 906, zeiss, 100 kv) مشخصه یابی شدند.

خواص مغناطیسی آن ها نیز با استفاده از آنالیز خواص مغناطیسی (VSM, کویر کاشان Co.MDK6) انجام شد. تصاویر TEM در شکل ۵ (الف و ب)، به ترتیب تشکیل ساختار هسته/پوسته/پوسته را برای کامپوزیت های $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ و $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ نشان می دهد. در تصویر TEM شکل ۵ (الف) پوششی نازک و نسبتاً شفاف سیلیس نسبت به ذرات هسته کامل مشخص است [۱۹]؛ اما همان گونه که از تصاویر TEM و FESEM مشاهده می شود؛ پوشش دهی باعث کلوخه ای شدن ذرات شده است که می توان آن را به پراکنده سازی ضعیف ذرات نسبت داد، استفاده از دستگاه حمام آلتراسونیک با توان بیشتر می تواند در پوشش دهی یکنواخت ذرات هسته موثر باشد [۲۰، ۲۱]. کاهش کلوخه ای شدن، خاصیت فوتوکاتالیستی این کامپوزیت ها را افزایش می دهد. همچنین ضخامت پوسته ی SiO_2 ، جهت جلوگیری از پدیده تجزیه و انحلال اثر نور و از طرفی تهیه کامپوزیت با بیشترین خاصیت مغناطیسی جهت بازیابی بهتر اهمیت دارد. در واقع بالاتر بودن باند ظرفیت هسته مغناطیسی از باند ظرفیت اکسیدروی و پایین تر بودن باند هدایت هسته مغناطیسی از باند هدایت اکسید روی، باعث انتقال حامل های بار از اکسید روی به هسته مغناطیسی و دو مرتبه ترکیب زوج الکترون- حفره می شود و طول عمر الکترون- حفره تولید شده کاهش می یابد. بنابراین با کاهش بیش از حد پوشش میانی سیلیس، بازده فوتوکاتالیستی این کامپوزیت کاهش می یابد. افزایش بیش

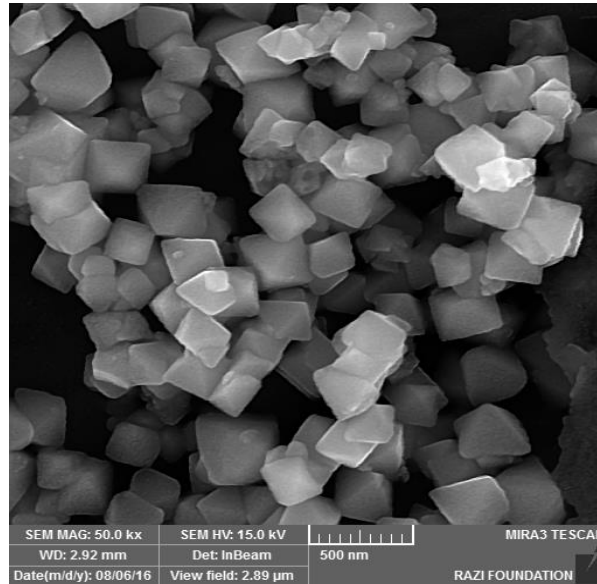
ساختار و مرفولوژی نانوساختار تهیه شده با استفاده از الگوی پراش ایکس XRD (شرکت PRO MPD PANalytical و ساخت کشور هلند) مورد بررسی قرار گرفت. طیف جذب UV- مرئی، با استفاده از طیف مادون قرمز (FTIR, Bruker, Tensor 27) بررسی شد. این کامپوزیت ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی (FESEM و شرکت TE-SCAN مدل MIRA3) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM و leo 906, zeiss, 100 kv) مشخصه یابی شدند. خواص مغناطیسی آن ها نیز با استفاده از آنالیز خواص مغناطیسی (VSM, کویر کاشان Co.MDK6) انجام شد.

نتایج و بحث

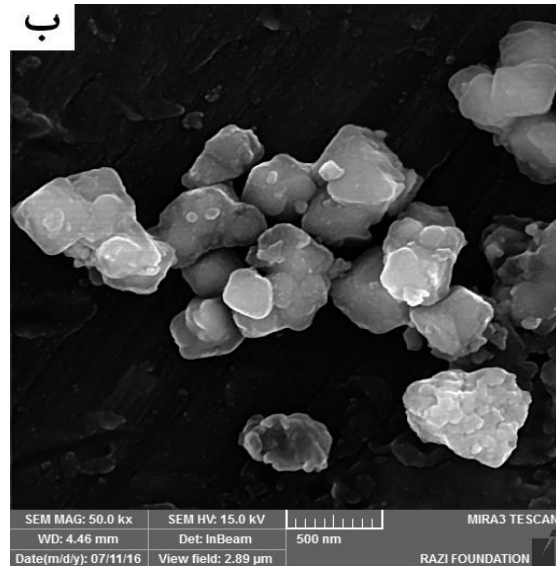
شکل ۲ تصاویر FESEM ذرات Fe_3O_4 سنتز شده را نشان می دهد. در شکل ۲ مشاهده می شود که ذرات به صورت چند ضلعی های منظم می باشند. میانگین اندازه ذرات به طور تقریبی ۳۰۰ نانومتر است. شکل ۳ (الف) تصویر FESEM کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ با ساختار هسته/ پوسته را نشان می دهد. پوشش هموار اطراف ذرات Fe_3O_4 تشکیل پوسته SiO_2 را تایید می کند. بنابراین، لایه نشانی لایه ی سیلیس بر روی ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با استفاده از روش سل-ژل به خوبی انجام شده است. شکل ۳ (ب) پوشش دهی پوسته ZnO بر روی کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ نشان می دهد که پوشش ZnO ناهموار بوده و کاملاً با پوشش سیلیس متفاوت است [۱۸]. همچنین طیف EDX کامپوزیت

کنترل ضخامت پوشش اعمالی می‌باشد [۲۰]. در تصویر TEM شکل ۵ (ب) پوشش نازکی از اکسید روی مشاهده می‌شود که با شکل ۵ (الف) متفاوت است. ضخامت پوسته ZnO در حد چند نانومتر است.

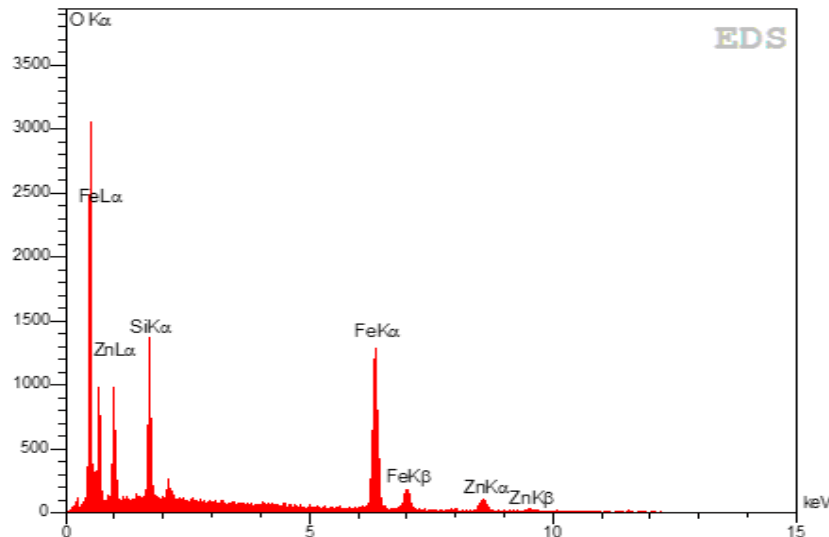
از حد پوشش میانی سیلیس نیز منجر به کاهش مغناطیس اشباع و به تبع آن کاهش بازیابی راحت تر ذرات فوتوکاتالیستی می‌گردد [۲۲، ۲۳]. ضخامت پوسته سیلیس به طور تقریبی ۲۵ نانومتر به دست آمد. غلظت TEOS، آب، الکل، دما و زمان انجام واکنش پنج عامل مهم در



شکل ۲- تصاویر FESEM ذرات Fe_3O_4 سنتز شده به روش احیای کربن



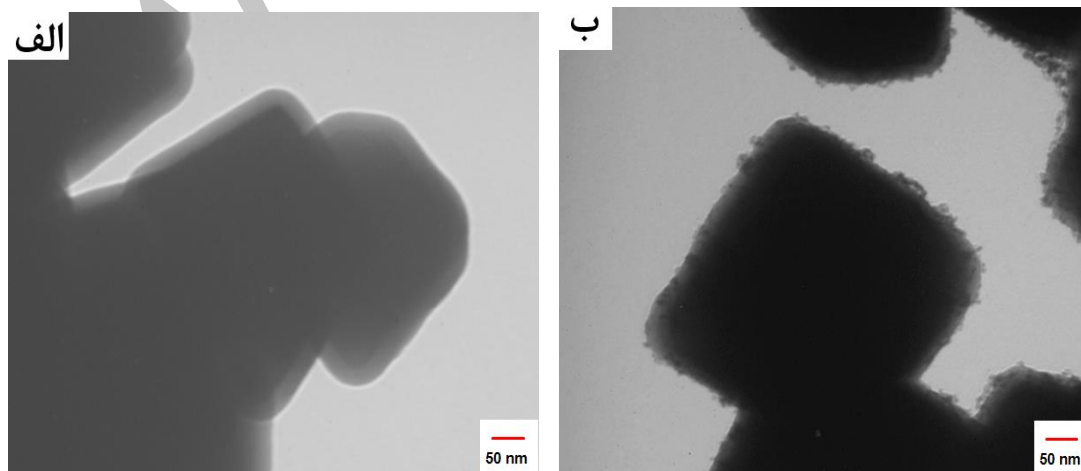
شکل ۳- تصاویر FESEM (الف) کامپوزیت‌های Fe_3O_4/SiO_2 و (ب) کامپوزیت‌های $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$



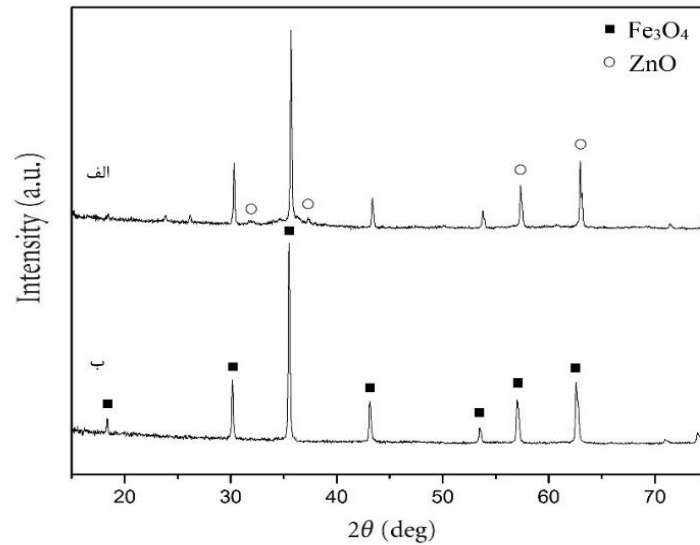
شکل ۴ - طیف EDX کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$

آن جا که فاز سیلیکا آمورف می باشد، انتظار می رفت پهنای پیکی برای فاز سیلیکای آمورف مشاهده نشود [۲۴]. پیک های پراش مشخص شده با (○) در شکل ۱ فاز ZnO (شماره کارت ۱۱۳۶-۰۱) را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، شدت پیک های فاز ZnO ضعیف بوده است که با توجه به تصاویر TEM، مرتبط به پوشش دهی با ضخامت چند نانو می باشد.

شکل ۶ (الف و ب) به ترتیب الگوی تفرق اشعه ای ایکس (XRD) پودر Fe_3O_4 سنتز شده و نانو ساختارهای $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ را نشان می دهد. با توجه به طیف پراش اشعه ایکس مشاهده می شود که ذرات Fe_3O_4 تهیه شده ساختار مکعبی دارند و با طیف استاندارد با شماره کارت ۱۹-۰۶۲۹ تطابق دارد. پیک های پراش مشخص شده با (■) در شکل ۱ فاز Fe_3O_4 را نشان می دهد. از



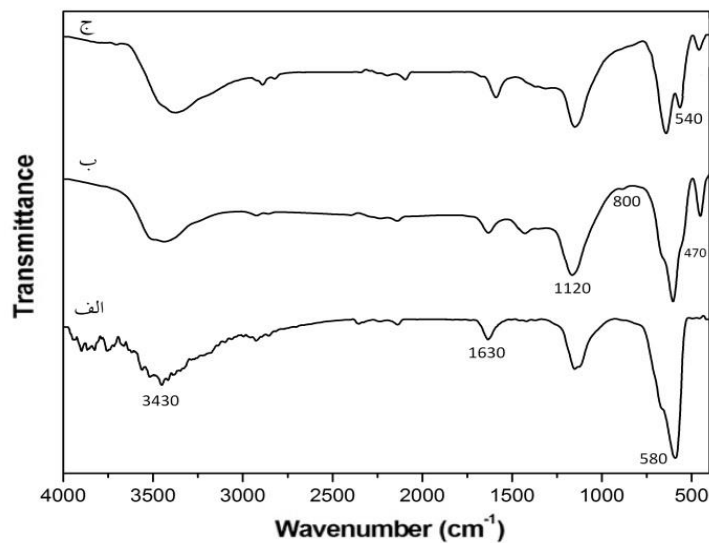
شکل ۵ - تصاویر TEM نانو ساختارهای الف) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ و ب) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ با ساختار هسته / پوسته / پوسته



شکل ۶- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) ذرات Fe_3O_4 سنتز شده و نانوساختارهای $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$

است. طیف باند 580 cm^{-1} مدهای کششی Fe-O را نشان می‌دهد (شکل ۷- الف) [۲۰]. مدهای ارتعاشی کششی متقارن و کششی نامتقارن Si-O-Si در 800 cm^{-1} و 1120 cm^{-1} ظاهر شده است (شکل ۷- ب). جذب باند Zn-O در طول موج 540 cm^{-1} مشاهده می‌شود (شکل ۷- ج) [۲۵].

جهت شناسایی بهتر کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ ، طیف FTIR آن تهیه شد. شکل ۷ طیف FTIR پودر $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ و کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ تهیه شده را نشان می‌دهد. در این طیف باندهای 3430 cm^{-1} و 1630 cm^{-1} به ترتیب مدهای ارتعاشی خمشی و کششی H-O-H است و مرتبط به حضور آب



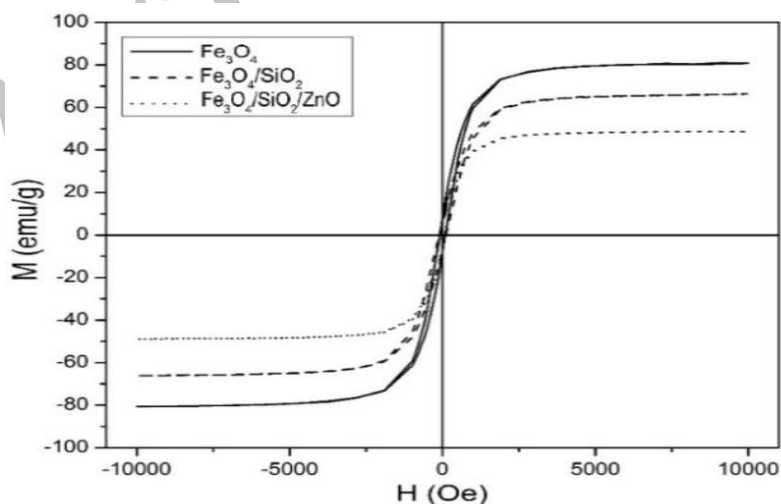
شکل ۷- طیف‌های FTIR (الف) پودر Fe_3O_4 ، (ب) نانوساختارهای $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ و (ج) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$

شکل ۱۰ اثر پودر فوتوکاتالیستی $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ بر روی تغییرات جذب متیلن نارنجی در بازه‌های زمانی را مشخص نشان می‌دهد. با بررسی تغییرات جذب در طول موج بیشینه (۴۶۵ نانومتر)، مقدار تخریب متیلن نارنجی با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

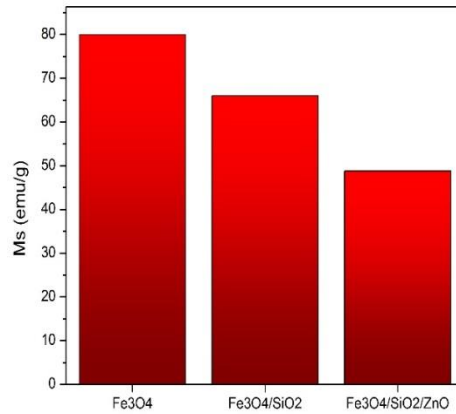
$$D(\%) = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن D درصد تخریب و A_0 و A_t جذب در زمان‌های صفر و t می‌باشد. تخریب در طول موج ۴۶۵ نانومتر تحت تابش نور UV، در اثر افزودن پودر فوتوکاتالیستی $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ به محلول میتلن نارنجی (۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) در مدت زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه، به ترتیب ۱۷٪، ۴۹٪، ۵۴٪ و ۶۷٪ به دست آمد. بیشینه تخریب میتلن نارنجی ۷۰٪ و در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه تحت تابش نور UV به دست آمد. تخریب تدریجی میتلن نارنجی، حضور و پوشش‌دهی ZnO را بر روی کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ تایید می‌کند. کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ تهیه شده توسط ونگ و همکارانش ۶۵/۲٪، رودامین B را در مدت زمان ۹۰ دقیقه تخریب کرد.

تصاویر تغییرات خواص مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده در میدان مغناطیسی ۱۰ kOe تا -۱۰ kOe در دمای اتاق در شکل ۸ آورده شده است. مشاهده می‌شود که با ایجاد پوشش‌های SiO_2 و ZnO بر روی ذرات Fe_3O_4 ، مغناطش اشباع کاهش یافته است که پوشش‌دهی پوسته‌های SiO_2 و ZnO را تایید می‌کند. شکل ۹ روند کاهش خاصیت مغناطیسی اشباع (M_s) را برای پودر Fe_3O_4 سنتز شده و نانوساختارهای $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ و $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ نشان می‌دهد. مغناطیس اشباع پودر Fe_3O_4 در اثر پوشش‌دهی‌های SiO_2 و ZnO صورت گرفته از ۸۰ emu/g، به ترتیب به ۶۶ emu/g و ۴۸/۸ emu/g رسیده است. مقدار مغناطش اشباع پودر نهایی ۴۸/۸ emu/g به دست آمده است که جهت جداسازی مغناطیسی و بازیابی مجدد قابل قبول است. این خاصیت موجب می‌شود، این مواد در فرآیندهای تصفیه آب با کم‌ترین آلودگی‌های ثانویه قابل استفاده باشند. هوانگ و همکارانش کامپوزیت مغناطیسی با پوشش تیتانیا تهیه کردند. مغناطش اشباع کامپوزیت فوتوکاتالیستی ۳۲ emu/g به دست آمد و بیان کردند این مقدار جهت جداسازی مغناطیسی مناسب است [۲۶].



شکل ۸- منحنی ویژگی‌های مغناطیسی برای ذرات Fe_3O_4 و نانوساختارهای $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ و $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ در دمای اتاق

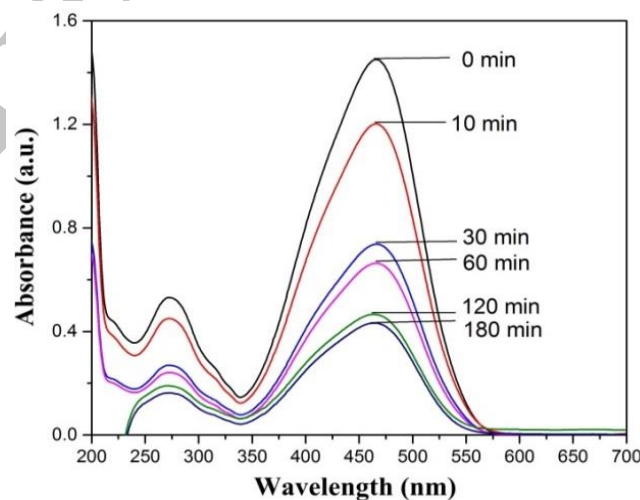


شکل ۹- خاصیت مغناطیسی اشباع (M_s) برای ذرات Fe_3O_4 و نانوساختارهای Fe_3O_4/SiO_2 و $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$

نسبت به نانوساختارهای Fe_3O_4/SiO_2 و $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ تهیه شده براساس نتایج تست VSM به ترتیب از ۸۰ emu/g به ۶۶ emu/g و ۴۸/۸ emu/g کاهش یافته است. با این حال این مقدار از خاصیت مغناطیسی برای بازیابی مغناطیسی اکسید روی مناسب است و جداسازی راحت ذرات اکسید روی را فراهم می‌کند. میزان تخریب متیلن نارنجی برای کامپوزیت $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ تهیه شده ۷۰٪ به دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت فوتوکاتالیستی $Fe_3O_4/SiO_2/ZnO$ با ساختار هسته/پوسته/پوسته با موفقیت تهیه شد. هسته مورد استفاده در این نانوساختار، ذرات چندضلعی منظم Fe_3O_4 در نظر گرفته شد. لایه میانی سیلیس بدون استفاده از دما و سورفکتانت بر روی ذرات هسته پوشش‌دهی شد و لایه فوتوکاتالیستی ZnO با استفاده از پیش ماده نیترات روی هیدراته به دست آمد. میزان مغناطیس اشباع هسته مغناطیسی غیرکروی



شکل ۱۰- منحنی‌های جذب محلول متیلن نارنجی (با غلظت اولیه ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) در زمان‌های متفاوت، تحت تابش نور

UV

References:

- 1- C. Berberidou, I. Pouliso, N.P Xekoukoulotakis, D. Mantavirinos, "Photocatalytic and sonophotocatalytic degradation of malachite green in aqueous solutions", *Catalysis B: Environmental*, 74, 63–72, 2007.
- 2- T. Sauer, G. Cesconeto Neto, H. J. José, "Kinetics of photocatalytic degradation of reactive dyes in a TiO₂ slurry reactor", *Photochem. Photobiol. A.*, 149, 147–154, 2002.
- 3- B. Cui, H. Peng, H. Xia, X. Guo and H. Guo, "Magnetically recoverable core-shell nanocomposites γ -Fe₂O₃@SiO₂@TiO₂-Ag with enhanced photocatalytic activity and antibacterial activity", *Separation and Purification Technology*, 103, pp.251-257, 2013.
- 4- Y. Chi, Q. Yuan, Y. Li, L. Zhao, N. Li, X. Li, and W. Yan, "Magnetically separable Fe₃O₄@SiO₂@TiO₂-Ag microspheres with well-designed nanostructure and enhanced photocatalytic activity", *Journal of hazardous materials*, 262, pp.404-411, 2013.
- 5- R. Y. Hong, S. Z. Zhang, G. Q. Di, H. Z. Li, Y. Zheng, J. Ding and D. G. Wei, "Preparation, characterization and application of Fe₃O₄/ZnO core/shell magnetic nanoparticles", *Materials Research Bulletin*, 43(8), pp.2457-2468, 2008.
- 6- A. Sáenz-Trevizo, P. Amézaga-Madrid, P. Pizá-Ruiz, W. Antúnez-Flores, C. Ornelas-Gutiérrez and M. Miki-Yoshida, "Efficient and durable ZnO core-shell structures for photocatalytic applications in aqueous media", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 45, pp.57-68, 2016.
- 7- X. Feng, H. Guo, K. Patel, H. Zhou, and X. Lou, "High performance, recoverable Fe₃O₄ ZnO nanoparticles for enhanced photocatalytic degradation of phenol", *Chemical Engineering Journal*, 244, pp.327-334, 2014.
- 8- J. Wan, H. Li and K. Chen, "Synthesis and characterization of Fe₃O₄@ ZnO core-shell structured nanoparticles", *Materials Chemistry and Physics*, 114(1), pp.30-32, 2009.
- 9- W. Li, G. Wang, C. Chen, J. Liao and Z. Li, "Enhanced visible light photocatalytic activity of ZnO nanowires doped with Mn²⁺ and Co²⁺ ions", *Nanomaterials*, 7(1), p.20, 2017.
- 10- P. Boule, D. W. Bahnemann, P. K. J. Roberlsom, "The Handbook of environment chemistry, environmental photochemistry part II", part M, springer-verlag, Berlin Heidelberg, Germany 2, 2005.
- ۱۱- ع. دوستی، ب. شایق بروجنی و ر. ابراهیمی کهریزسنگی، "اثر افزایش اکسید تنگستن بر خواص حفاظت فوتوکاتدی پوشش‌های تیتانیایی تهیه شده به روش سل-ژل"، *مجله مواد نوین*، جلد ۵، شماره ۳، ص ۱۳۴-۱۲۳، بهار ۱۳۹۴.
- 12- M. Salehi, H. Hashemipour, M. Mirzaee, "Experimental study of influencing factors and kinetics in catalytic removal of methylene blue with TiO₂ nanopowder", *American journal of environmental engineering* 2, 1-7, 2012.
- 13- J. A. Byrne, B. R. Eiggins, N. M. D. Brown, B. McKinney, M. Rouse, "Immobilisation of TiO₂ powder for the treatment of polluted water", *Environmental* 17, 25-36, 1998.
- 14- X. Chen, C. Li, J. Wang, J. Li, X. Luan, Y. Li, R. Xu, B. Wang, "Investigation on

solar photocatalytic activity of TiO₂ loaded composite: TiO₂/Eggshell, TiO₂/Clamshell and TiO₂/CaCO₃", *Materials Letters* 64 , 1437–1440, 2010.

15- A .Haarstrick , O. M. Kut , and E . Heinzle , "TiO₂-Assisted Degradation of Environmentally Relevant Organic Compounds in Wastewater Using a Novel Fluidized Bed Photoreactor", *Environ. Sci. Technol.*, 30, 817-824, 1996.

16- R. Ghosh Chaudhuri, S. Paria, "Core/shell nanoparticles: classes, properties, synthesis mechanisms, characterization, and applications", *Chem Rev* 112, 2373-2433, 2012.

17- D. Beydoun and R. Amal, " Novel Photocatalyst: Titania-Coated Magnetite. Activity and Photodissolution", *J. Phys. Chem. B*, 104, 4387-4396, 2000.

18- J. Wang, J. Yang, X. Li , B. Wei, D. Wang, H. Song, H. Zhai, X. Li, "Synthesis of Fe₃O₄@SiO₂@ZnO–Ag core–shell microspheres for the repeated photocatalytic degradation of rhodamine B under UV irradiation", *Molecular Catalysis A: Chemical* 406 97–105, 2015.

19- J-W. Lee, K. Hong, W-S. Kim, J. Kim, "Effect of HPC concentration and ultrasonic dispersion on the morphology of titania-coated silica particles", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 11, 609-614, 2005.

20- J. Zou, Y. G. Peng, and Y. Y. Tang, "A facile bi-phase synthesis of Fe₃O₄@SiO₂

core–shell nanoparticles with tunable film thicknesses", *RSC Advances*, 4(19), pp.9693-9700, 2014.

21- Y. Deng, D. Qi, C. Deng, X. Zhang and D. Zhao, "Superparamagnetic high-magnetization microspheres with an Fe₃O₄@ SiO₂ core and perpendicularly aligned mesoporous SiO₂ shell for removal of microcystins", *Journal of the American Chemical Society*, 130(1), pp.28-29, 2008.

22- Z. Wang, L. Shen, S. Zhu, "Synthesis of Core-Shell@ Microspheres and Their Application as Recyclable Photocatalysts", *International Journal of Photoenergy*, 2012.

23- D. Beydoun, R. Amal, G. Low and S. McEvoy, "Occurrence and prevention of photodissolution at the phase junction of magnetite and titanium dioxide", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 180(1), pp.193-200, 2002.

24- J. Li, L. Gao, Q. Zhang, R. Feng, H. Xu, J. Wang, D. Sun, and C. Xue, "Photocatalytic Property of Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ Core-Shell Nanoparticle with Different Functional Layer Thicknesses", 10.1155/986809, 2014.

25- H. Osman, Z. Su, X. Ma, S. Liu, X. Liu, D. Abduwayit, "Synthesis of ZnO/C nanocomposites with enhanced visible light photocatalytic activity", *Ceram. Int.*, 42, 10237–10241, 2016.

26- X. Huang, G. Wang, M. Yang, W. Guo, H. Gao, "Synthesis of polyaniline-modified Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ composite microspheres and their photocatalytic application", *Materials Letters* 65, 2887-2890, 2011.