

## سنتر، مشخصه‌یابی و فعالیت فتوکاتالیزوری نانوکامپوزیت $ZnS/MoS_2$ پوشش داده شده با $Fe_3O_4$ نانوذرات

ندا خراسانی پور<sup>۱</sup>، پروانه ایرانمنش<sup>\*</sup><sup>۱</sup>، سمیرا سعیدنیا<sup>۲</sup>

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

۲- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۹، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۷/۲۰)

چکیده: در این پژوهش، نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  به روش گرمابی و نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  به روش هم‌رسوبی سنتر شدند. نخست نانوذرات  $ZnS$  سنتر شده و سپس با نانوساختار  $MoS_2$  بارگذاری شدند. در ادامه،  $ZnS/MoS_2$  به دست آمده با نانوذرات مگنتایت  $Fe_3O_4$  پوشش داده شدند و فرآورده پایانی به صورت نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  تهیه گردید. برای شناسایی و مشخصه‌یابی نمونه‌ها از آنالیزهای پراش سنج پرتوی ایکس (XRD)، طیف‌سنج‌های تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) و رaman، میکروسکوپ الکترونی تراگسیلی (TEM)، آزمون جذب و واجدب نیتروژن (BET) استفاده شد. با استفاده از طیف‌سنجی نورتابی (PL) ویژگی‌های نورتابی هر دو نانوکامپوزیت بررسی گردید. طیف تبدیل فوریه فروسرخ به خوبی تشکیل پیوندهای Fe-O، Zn-S و Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> را نشان داد. الگوی پراش پرتو ایکس حضور ساختار مکعبی  $MoS_2$  و  $ZnS$  و ساختار شش‌گوشی  $Fe_3O_4$  را به خوبی تأیید کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی به خوبی تشکیل نانوساختارها را نشان دادند. در طیف PL، شدت قله‌ی نورتابی کاهش یافته نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  می‌تواند ناشی از کاهش بازده بازترکیب الکترون-حفره نمونه‌ی سه‌تایی در مقایسه با نمونه‌ی دوتایی باشد. فعالیت فتوکاتالیزوری  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  بر تخریب رنگ متیل نارنجی (MO) و اسید براون (AB) با استفاده از تابش نور فرابنفش بررسی شد. نمونه فعالیت فتوکاتالیزوری خوبی از خود نشان داد و همچنین به دلیل ویژگی مغناطیسی به راحتی قابل بازیافت است که می‌تواند به عنوان فتوکاتالیزور در واکنش‌های دیگر به کار رود.

واژه‌های کلیدی: هم‌رسوبی؛ گرمابی؛ نانوکامپوزیت؛ فعالیت فتوکاتالیزوری؛  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$

پساب و فاضلاب تولید شده از مواد شیمیایی، نساجی، رنگ، دارویی و غیره وجود دارند. تخریب فتوکاتالیزوری آلاینده‌ها در فاضلاب‌ها و پساب‌ها از مؤثرترین روش‌های فرآیندهای پیشرفته اکسایش است که در آن به دلیل تابش امواج الکترومغناطیسی به سطح محلول آبی، مجموعه‌ای از واکنش‌های کاهش - اکسایش روی می‌دهند که سرانجام منجر به تخریب آلاینده‌ها می‌شوند [۲]. ویژگی فتوکاتالیزوری قابل ملاحظه نیمرسانها منجر به استفاده از آنها در تخریب مولکول‌های آلی زیر تابش نور فرابنفش در تخریب فتوکاتالیزوری شده است. با قرارگیری

مقدمه از شروع تمدن بشری، آلودگی محیط زیست با انسان همراه بوده و هم‌زمان با رشد جوامع شهری و تغییر در سبک زندگی، آلاینده‌ها و پساب‌ها ضمن تغییر افزایش یافته‌اند. امروزه آلودگی منابع آب و فاضلاب به دلیل آزاد شدن فلزهای سنگین، رنگ‌های آلی، نشت نفت و غیره موضوع داغی است. اگرچه صنایع موظف هستند که با روش‌های مختلف، پساب‌های خود را بی ضرر کنند، اما آلودگی آب به طور مداوم در حال افزایش است [۱]. روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی برای تصفیه

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۵۱۱۷۵۸۴، نامبر: ۰۳۴۳۱۳۱۲۴۲۸، پست الکترونیکی: p.iranmanesh@gmail.com

چون دیودهای نورگسیل، آشکارسازهای UV و لیزرهای نیمرسانا استفاده کرد [۸]. ZnS ویژگی‌های بسیار خوبی چون گاف نواری مستقیم پهن ۳/۷ الکترون ولت، واکنش‌پذیری بالا و ویژگی‌های تراپری عالی دارد [۹]. افزون بر این ویژگی‌ها، پایداری گرمابی خوب و انتقال بالا در ناحیه IR، آن را یک نامزد مناسب برای اپتوالکترونیک می‌سازد [۱۰]. MoS<sub>2</sub> یک ماده نیمرسانای دو بعدی با ساختار بی‌مانند و ویژگی‌هایی چون واکنش‌پذیری، رسانایی الکتریکی، سطح مقطع بالا و پایداری شیمیایی است [۱۱]. MoS<sub>2</sub> به دلیل حساسیت زیاد به نور باریک حالت توده‌ای آن (بین ۱/۳ و ۱/۸ الکترون ولت) نسبت داد [۱۲]. با وجود ویژگی‌های قابل توجه MoS<sub>2</sub>، اشکال‌هایی چون سرعت پایین انتقال الکترون و ترکیب سریع جفت الکترون‌حفره دارد. هیبرید یا کامپوزیت MoS<sub>2</sub> با نیمرساناهای دیگر می‌تواند این ویژگی‌ها را بهبود بخشیده و گستره کاربردهای آن را گسترش دهد [۱۳]. ZnS یک نیمرسانای برپایه گوگرد با ثابت‌های شبکه نزدیک به MoS<sub>2</sub> است. رشد ZnS با MoS<sub>2</sub> بسیار مطلوب است. ویژگی‌های الکترونیکی و اپتوالکترونیک ساختار کامپوزیتی ZnS/MoS<sub>2</sub> با ZnS/MoS<sub>2</sub> خالص بهبود می‌یابد. نسبت به MoS<sub>2</sub> و ZnS رسانایی خوب، سرعت انتقال الکترون بالا و فعالیت الکتروشیمیایی بالا، با موفقیت برای تشخیص ویژگی‌های فوتوكاتالیزوری استفاده می‌شود [۱۴]. نانوذرات مغناطیسی کاربردهای گسترهای در صنعت، پزشکی، صنایع غذایی، محیط زیست و غیره دارند. یکی از این نانوذراتات مغناطیسی مگنتایت (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) با ساختار بلوری اسپینلی معکوس، و رنگ سیاه یا قهوه‌ای تیره است. این ماده زیست سازگار و غیر سمی است و در موارد متعددی چون کاربردهای مغناطیسی اشباع بالا برای انتقال ذرات با میدان مغناطیسی متناوب و کاربردهای پزشکی به کار می‌رود. هم‌چنین، این ماده در نانوذرات هسته-پوسته یا نانوکامپوزیت‌های دیگر استفاده می‌شود تا به صورت هدفمند ویژگی مغناطیسی را برای نانوذرات همراه، فراهم سازد [۱۵].

در این پژوهش، نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> با روش‌های ساده سنتز و به روش ترکیبی گرمابی و همروسوبی تهییه شد و سپس فعالیت فوتوكاتالیزوری آن در فرآیند حذف

نیمرسانا در معرض نور فرابنفش، الکترون‌ها و حفره‌ها ایجاد می‌شوند. الکترون‌ها و حفره‌ها که اجزای ضروری واکنش فتوکاتالیزوری هستند، تنها در صورتی ایجاد می‌شوند که انرژی تابشی از پهنهای گاف نواری نیمرسانا فراتر برود [۳]. با کاهش اندازه ذرات پهنهای گاف نواری نیمرسانا بیشتر شده و طول موج جذب آن‌ها را کاهش می‌دهد. افزایش پهنهای گاف نواری نیمرسانا باعث می‌شود که نوار رسانش به انرژی بالاتر و نوار ظرفیت به انرژی پایین‌تری منتقل شود و در نتیجه حفره‌های نوار ظرفیت و الکترون‌های نوار رسانش با کاهش اندازه ذرات نیمرسانا، وجود می‌آیند. از سوی دیگر با کاهش اندازه ذرات نیمرسانا، مساحت سطح ذرات در واحد حجم افزایش می‌یابد که این اثر قابل توجهی بر افزایش فعالیت فتوکاتالیزوری دارد [۴].

در سال‌های اخیر، مواد کامپوزیتی کاربردهای در زمینه‌های مختلف چون الکترونیک، زیست‌پزشکی، نوری و شیمی تجزیه دارند. نانوذرات کامپوزیتی مواد با کیفیت بالا، عملکرد بالا و ویژگی‌های اصلاح شده هستند. در صورت ترکیب آنها با مواد دیگر، ویژگی‌های ماده‌ی میزان چون واکنش‌پذیری یا پایداری گرمابی، می‌تواند بهبود یابد. به طور کلی مواد مختلفی که با هم ترکیب می‌شوند، ویژگی‌های متمایزی را نشان می‌دهند. هدف از ترکیب چند ماده‌ی کامپوزیتی اغلب افزایش عملکرد، افزایش پایداری، کاهش مصرف مواد گران‌بها و غیره است [۵]. نیمرساناهای مرکب در بردارنده عناصر مختلف دارای طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی هستند. در میان این ترکیب‌ها، نیمرساناهای گروه II-VI همواره از اهمیت زیادی داشته‌اند. در بیش از یک دهه گذشته، نیمرساناهای II-VI به دلیل امکان کاربرد در دستگاه‌های اپتوالکترونیک بررسی شده‌اند. با توجه به پهنهای گاف نواری، این گروه از نیمرساناهای گسیل مؤثر در ناحیه آبی نور می‌دارند [۶]. همچنین این ترکیب‌ها انتخاب خوبی برای جایگزینی با موادی چون GaN برای ساخت دیودهای لیزری نور گسیل هستند. با وجود ویژگی‌های مشابه، هر یک از ترکیب‌های نیمرسانای گروه VI ویژگی-های فیزیکی ویژه خود را دارند. این ترکیب‌ها اغلب دارای ساختارهای بلوری مکعبی (زینک بلند) یا شش گوشی (ورتسایت) هستند. نوع گاف نواری می‌تواند اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های ترکیب‌های نیمرسانای چون جذب نوری و رسانایی الکتریکی داشته باشد. ترکیب‌های گروه II-VI دارای یک گاف نواری پهنه هستند که از آن‌ها می‌توان برای ساخت اجزایی

و برای ۲۱ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد گرمادهی شد. پس از آن و سرد شدن اتوکلاو، مواد خارج شده قرار داده شد، شستشو و در دمای اتاق خشک گردید. فرآورده نهایی مشخصه‌یابی شد.

#### سنتر نانوکامپوزیت $\text{ZnS/MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$

نخست ۰/۰ مول از نانوکامپوزیت  $\text{ZnS/MoS}_2$  در ۲۰ میلی لیتر آب دوبار یون‌زدایی شده در حمام فرا صوت قرار داده شد. پس از خروج از حمام فرا صوت، محلول به درون ظرف پارافین منتقل شد. سپس به مقدار ۱/۰ مول از  $\text{FeCl}_3$  و  $\text{FeCl}_2$  حل شده در ۲۵ میلی لیتر آب دوبار یون‌زدایی شده به محلول پیشین اضافه گردید و کاملاً همزدگ شد. سپس محلول از ظرف پارافین خارج و روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. pH محلول به ۹ رسانده شد. سرانجام رسوب به دست آمده چند بار با آب دوبار یون‌زدایی شده شستشو و به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای خشک‌سازی و انجام بررسی‌ها در کوره خشک شد.

#### تهیه نمونه‌ها برای بررسی ویژگی فتوکاتالیزوری

نخست محلول رنگ با غلظت ۱۰۰ ppm از رنگ‌های متیل نارنجی و اسید قهقهه‌ای به طور جداگانه تهیه گردید و سپس فتوکاتالیزور  $\text{ZnS/MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  با مقدار ۱۰ mg به آنها افروده شد محلول‌های دارای فتوکاتالیزور با pH خنثای ۷ به مدت یک ساعت در تاریکی به طور پیوسته هم زده شدند. پس از طی شدن این زمان یعنی پس از تخریب رنگ‌ها به دلیل جذب و واجذب‌های سطحی نانوکامپوزیت‌ها، محلول‌ها زیر تابش لامپ فرابنفش (توان ۴۶۰ وات و ولتاژ ۲۳۰ ولت) قرار گرفتند و هر ۱۵ دقیقه، ۶ میلی‌لیتر از آنها برداشته شد. این فرآیند برای ۱۲۰ دقیقه ادامه یافت. سرانجام با استفاده از آهنربا همه فتوکاتالیزور از رنگ جدا شده و محلول باقی‌مانده رنگ برای تهیه طیف جذب و بررسی درصد تخریب آمده شد.

#### مشخصه‌یابی

ویژگی‌های ساختاری، ریخت‌شناسی، نوری و در آخر فتوکاتالیزوری نمونه‌های سنتر شده بررسی شد. مشخصه‌یابی ساختاری و ریخت‌شناسی آن‌ها با پراش‌سنجد پرتو ایکس (XRD) مدل X'pertpro از شرکت Panalytical، طیف‌سنجد تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) مدل Nicoletis 10 از شرکت Nicoletis، میکروسکوپ الکترونی تراگسیلی Thermoscientific (TEM) مدل EM10C-100 kV شرکت زایس، طیف‌سنجد

شیمیایی دو رنگ صنعتی رایج و پرکاربرد متیل نارنجی و اسید قهقهه‌ای موجود در محلول آبی زیر تابش نور فرابنفش بررسی گردید.

#### روش آزمایش و مشخصه‌یابی مواد

مواد مورد استفاده برای سنتر نانوکامپوزیت‌های  $\text{ZnS/MoS}_2$  و  $\text{ZnS/MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  عبارتند از استات روی،  $(\text{Na}_2\text{S}) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ،  $(\text{Zn}(\text{O}_2\text{CCH}_3)_2)$ ، اسید اتیلن دی‌آمین تترالستیک  $(\text{EDTA} - \text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8)$ ، محلول آمونیاک  $(\text{NH}_3\text{OH})$ ، مولیبدات آمونیوم  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ، اسید نیتریک  $(\text{HNO}_3)$ ، کلرید آهن دو ظرفیتی  $(\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ ، کلرید آهن سه ظرفیتی  $(\text{FeCl}_3)$ ، آب مقطر، آب دو بار یون-زدایی شده و اتانول برای بررسی فعالیت فتوکاتالیزوری نیز از رنگ‌های متیل نارنجی (MO) و اسید براون (AB) استفاده شد. گفتنی است که همه مواد یاد شده با درصد خلوص بالا از شرکت‌های معترض تهیه شدند.

#### سنتر نانوذرارات تری اکسید مولیبدن

به منظور تهیه دی‌سولفید مولیبدن نخست باید تری‌اکسید مولیبدن،  $\text{MoO}_3$  سنتر شود. برای تشکیل ساختار تری‌اکسید مولیبدن، سنتر با روش گرمابی انجام شد. به این صورت که مقدار ۰/۰۱ مول هپتامولیبدات آمونیوم در ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر با هم زدن همگنسازی و حل شد، سپس با اسیدنیتریک، pH محلول در ۱ تنظیم شد. پس از آن، محلول به اتوکلاو منتقل شده و در دمای ۱۸۰°C به مدت ۲۴ ساعت گرمادهی شد. فرآورده سفیدرنگ برای ۳۰ دقیقه در دستگاه فرامرزک‌گریزی با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت و سپس با آب مقطر شستشو داده شده و سرانجام در دمای اتاق خشک گردید.

#### سنتر نانوکامپوزیت $\text{ZnS/MoS}_2$

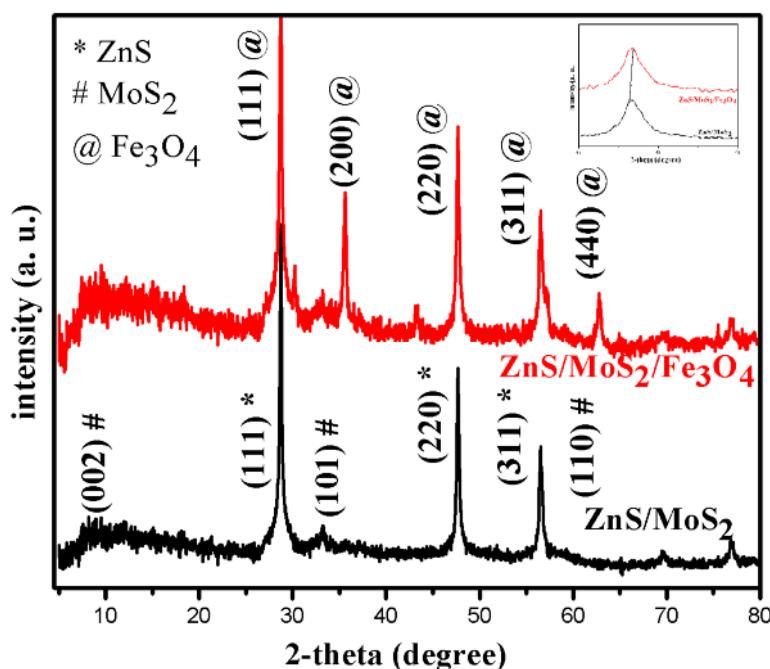
نخست ۰/۰۱ مول از پودر سولفید روی از پیش تهیه شده [۱۶] در ۱۵ میلی‌لیتر آب دوبار یون‌زدایی شده ریخته شد و در حمام فرا صوت قرار داده شد. پس از خارج کردن محلول از حمام فرا صوت، ۱۰ مولاتری اکسید مولیبدن حل شده در ۳۰ میلی‌لیتر آب دوبار یون‌زدایی به آن اضافه گردید. سپس، ۰/۰۱ مول از محلول تیوره به این محلول اضافه شد تا محلول همگن به دست آید. پس از گذشت مدتی، محلول نهایی به اتوکلاو منتقل

[۱۷]. سولفید مولیبدن ساختار لایه‌ای مانند دارد که با نانویی شدن ساختار، تعداد لایه‌های آن کاهش می‌یابد و با کاهش تعداد لایه‌ها، پهن شدن قله‌ها و کاهش شدت قله (۰۰۲) بارزتر می‌شود [۱۸]؛ در ساختار بلوری سنتز شده این ویژگی دیده می‌شود. نمونه‌های کامپوزیت شده دارای قله‌های مربوط به  $\text{MoS}_2$  و  $\text{ZnS}$  هستند که نشان‌دهنده فاز شش گوشی  $\text{MoS}_2$  و  $\text{ZnS}$  و فاز مکعبی بلندروی  $\text{ZnS}$  و تاییدی بر حضور آن‌ها در کامپوزیت است. وجود هر دو فاز  $\text{MoS}_2$  و  $\text{ZnS}$  به صورت کامپوزیت اثری بر ساختار بلوری آن‌ها نداشته است. قله‌های  $\text{ZnS}$  مربوط به  $\text{MoS}_2$  به دلیل نزدیک بودن ثابت شبکه آن با همپوشی دارند و شدت آن‌ها کم شده است. با بارگذاری  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  قله‌های جدید ظاهر شده در زوایای  $30^\circ$ ،  $35^\circ$ ،  $56^\circ$ ،  $62^\circ$ ،  $78^\circ$  و  $57^\circ$  به ترتیب مربوط به صفحه‌های بلوری (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۳۱۱)، (۴۲۲) و (۴۴۰) ساختار رخ مکعبی رخ مرکزدار (FCC) مگنتایت با گروه فضایی  $\text{Fd}3\text{M}$  و همخوان با کارت استاندارد JCPDS 5-0566 هستند [۱۹]. قله‌های مربوط به نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$  پس از بارگذاری مگنتایت کمی جایه‌جایی به سمت زوایای بزرگتر دارند که نشان‌دهنده تنفس وارد شده ناشی از ساختار بارگذاری شده  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  است.

رامان مدل XploRA Plus شرکت HORIBA و آزمون جذب BELSORP Mini (BET) با دستگاه مدل Microtrac Bel Crop شرکت Varian (PL) با دستگاه مدل CARY ECLIPSE شرکت گردید.

#### نتایج و بحث الگوهای پراش پرتو ایکس

شکل ۱ الگوی پراش پرتو X را برای دو نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$  مشخص و ظاهر شده ساختار بلوری خوب نمونه‌ها را تأیید می‌کند و هیچ قله‌ای مربوط به ناخالصی‌ها نشد که نشان‌دهنده خلوص بالای نمونه‌های سنتز شده است. سه قله در زوایای  $28^\circ$ ،  $47^\circ$ ،  $66^\circ$  و  $56^\circ$  به ترتیب مربوط به صفحه‌های بلوری (۱۱۱)، (۲۲۰) و (۳۱۱) از ساختار مکعبی بلندروی سولفید روی با گروه فضایی F-43M و همخوان با کارت استاندارد JCPDS 5-0566 هستند [۱۶]. قله‌های ظاهر شده در زوایای  $14^\circ$ ،  $38^\circ$ ،  $58^\circ$ ،  $68^\circ$  و  $79^\circ$  به ترتیب مربوط به صفحه‌های بلوری (۰۰۲)، (۱۰۰)، (۱۰۱) و (۱۱۰) ساختار شش گوشی  $\text{MoS}_2$  با گروه فضایی P6 $_3$ /mmc و همخوان با کارت استاندارد JCPDS 37-1429 نتایج دیگران هستند



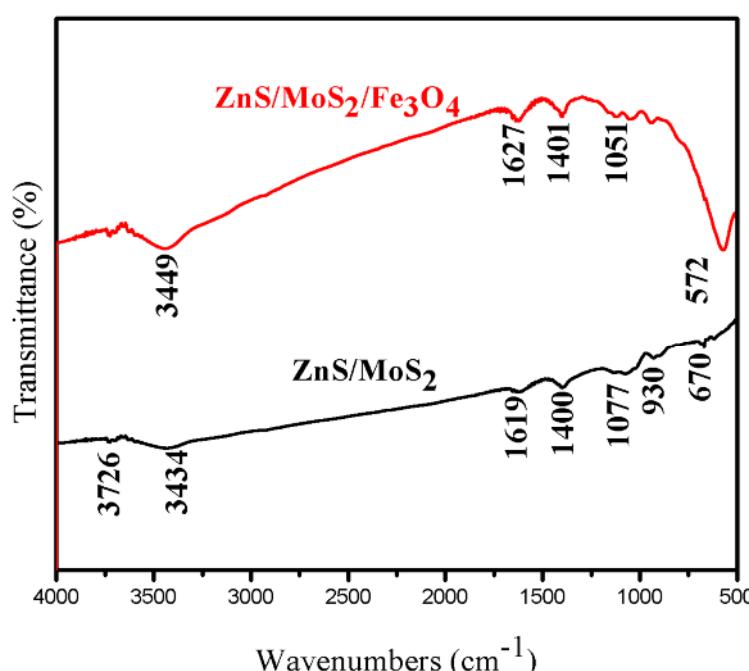
شکل ۱ طرح پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت‌های  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$  به همراه شاخص‌های میلر. تصویر کوچک درون شکل قله (۱۱۱) را نشان می‌دهد.

ها حذف شده‌اند که نشان‌دهندهٔ تشکیل نانوکامپوزیت  $\text{ZnS/MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  است.

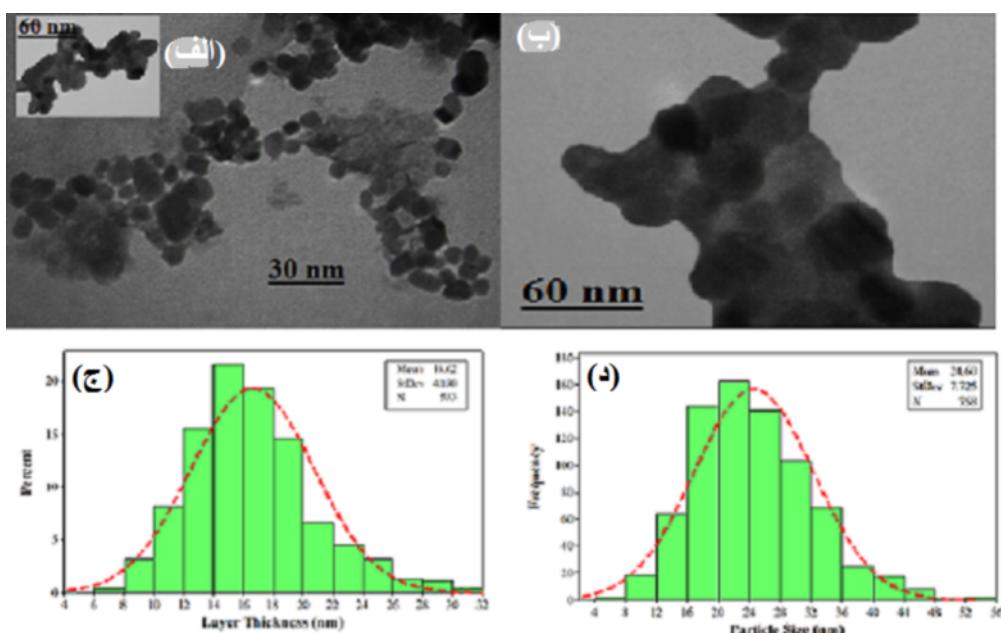
تصاویر میکروسکوپ الکترونی تراگسیلی برای بررسی ساختار و ریختار همه نمونه‌ها و تعیین بهتر اندازه از میکروسکوپ الکترونی تراگسیلی استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوکامپوزیت‌ها در شکل ۳ آورده شده است، شکل ۳ الف نانوکامپوزیت  $\text{ZnS/MoS}_2$  که شامل نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن با ساختار لایه‌ای به همراه نانوذرات سولفید روی است را نشان می‌دهد و بخش‌های روش تک‌لایه‌های  $\text{MoS}_2$  هستند که این در همخوانی با نتایج دیگران است [۲۲]؛ نانوذرات سولفید روی کروی شکل و منظم بوده که به صورت کامپوزیتی به همراه سولفید مولیبدن هستند. با توجه به شکل ۳ ب، نانوذرات کروی  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  روی نمونه‌ی دوتایی قرار گرفته و آن را پوشش داده‌اند. اندازه دانه‌ها نسبت به نمونه‌ی دوتایی افزایش یافته است. نمودار توزیع اندازه ذرات به خوبی با یکتابع گاوسی برازش می‌شود که نشان می‌دهد که ذرات توزیع اندازه یکنواختی دارند. میانگین ضخامت لایه و اندازه ذرات برای نانوکامپوزیت  $\text{ZnS/MoS}_2$  حدود ۱۶ نانومتر و برای  $\text{ZnS/MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  حدود ۲۴ نانومتر است.

### طیف‌های تبدیل فوریه فروسرخ

برای شناسایی کیفی و کمی ترکیب‌ها، تشخیص پیوندهای شیمیایی موجود در ترکیب شیمیایی نمونه‌ها و تعیین نوع گروه عاملی از طیف تبدیل فوریه فروسرخ استفاده شد. شکل ۲ طیف تبدیل فوریه فروسرخ را برای دو نانوکامپوزیت  $\text{ZnS/MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{ZnS/MoS}_2$  نشان می‌دهد. در این طیف، قله‌های  $3449$  و  $1627\text{cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به مدهای کششی و خمی H-O-H آب جذب شده سطحی این ترکیب‌ها و تأییدی بر نسبت بالای سطح به حجم و جذب سطحی این نمونه‌ها هستند [۱۶]. قله‌های در گستره  $670\text{--}930\text{cm}^{-1}$  مشخصه پیوندهای کووالانسی (درین صفحه‌ای) دی سولفید مولیبدن و قله‌های در گستره  $1400\text{--}1619\text{cm}^{-1}$  مربوط به مدهای ارتعاشی پیوندهای واندروالسی (برون صفحه‌ای) دی سولفید مولیبدن هستند که با نتایج دیگران همخوانی خوبی دارند [۲۰]. قله‌ی  $1077\text{cm}^{-1}$  مربوط به مدهای ارتعاشی-خمی نانوذرات سولفید روی بوده [۲۱] که نشان‌دهندهٔ تشکیل  $\text{Zn-S}$  نانوکامپوزیت  $\text{ZnS/MoS}_2$  است. با بارگذاری نانوذرات  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و تشکیل ساختار جدید، قله‌ی جدیدی در  $572\text{cm}^{-1}$  ظاهر شده که مربوط به مدهای ارتعاشی-خمی  $\text{Fe}-\text{O}$  نانوذرات مگنتیات است [۱۹]. همچنین به دلیل همپوشی، بعضی از قله-



شکل ۲ طیف تبدیل فوریه فروسرخ دو نانوکامپوزیت  $\text{ZnS/MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{ZnS/MoS}_2$



شکل ۳ تصاویر میکروسکپ الکترونی تراگسیلی (الف) نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  و (ب) نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2$  به همراه نمودار ستونی توزیع اندازه ذرات آنها.

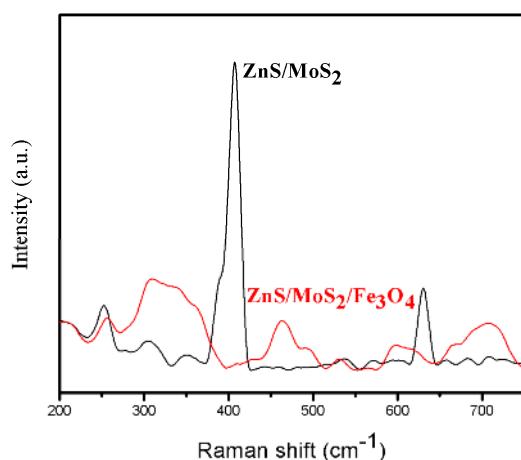
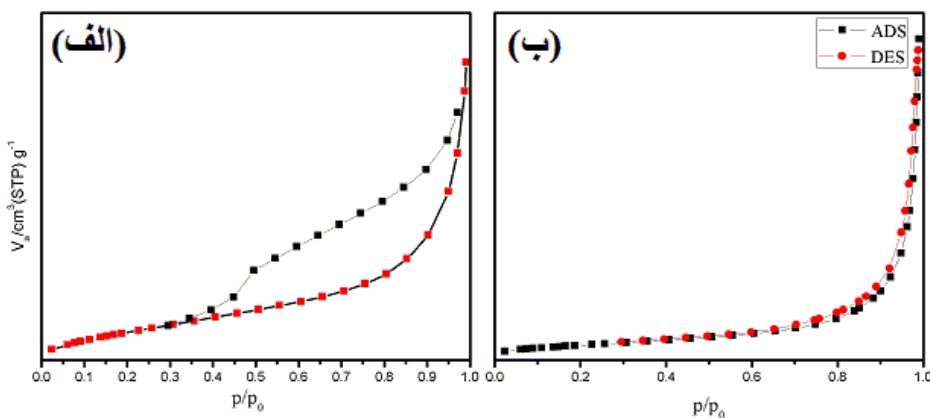
سطح جامد و همچنین برای محاسبه سطح ویژه، میزان تخلخل، حجم و اندازه، نوع و شکل حفره‌ها آزمون جذب-واجدب سطحی نیتروژن (BET) انجام شد. شکل ۵ نتایج آزمون BET را برای دو نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2$  و  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  بین المللی شیمی خالص و کاربردی (IUPAC)، همدماز جذب و واجدب نیتروژن برای نانوکامپوزیت‌های موردنظر از نوع IV است. وجود زانوی نشان‌دهنده مکان تقریبی تکلایه‌ها و بخش کم شیب در میانه همدمای نشانگر تشکیل نخستین چندلایه‌های است. وجود حلقه پسماند نوع  $H_3$  نشان‌دهنده تراکم مویینه در مزو و ماکروحفره‌است. بسته شدن حلقه پسماند در فشار نسبی حدود ۰/۴ بیانگر حضور مزو‌حفره‌های کوچک است. سطح ویژه BET، اندازه و حجم حفره‌ها برای نانوکامپوزیت‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند. بر این اساس، مساحت تقریبی برای نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2$  برابر با  $۳/۵۸$  مترمربع برگرم و برای نانوکامپوزیت  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  برابر با  $۲۲/۵۶$  مترمربع برگرم بدست آمد که نشان می‌دهد که با بارگذاری مگنتایت، مساحت سطح ویژه افزایش یافته است. این خود می‌تواند در فرایندهای فوتولیتالیزوری به بازده بالاتری منجر شود.

#### طیف‌های رامان

برای تعیین ویژگی‌های مواد، تشخیص مولکول‌های متقارن حتی در صورت نداشتن دوقطبی دائمی، غیرمغرب و عمومی بودن و برای اثبات یکنواختی نمونه‌ها طیفسنجی رامان انجام می‌گیرد. شکل ۴ طیف رامان دو نمونه نانوکامپوزیتی  $ZnS/MoS_2/Fe_3O_4$  و  $ZnS/MoS_2$  را نشان می‌دهد. در نمونه نانوکامپوزیتی دو قله ظاهر شده در حدود  $۳۸۹$  و  $۴۰۸\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به حالت‌های ارتعاشی درون صفحه ( $E_{2g}^1$ ) پیوندهای کووالانسی و بیرون از صفحه ( $A_{1g}$ ) پیوند واندروالسی دی‌سولفید مولیبدن هستند [۲۳]. قله‌های  $۲۵۳$ ،  $۳۵۰$  و  $۶۳۰\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به حالت‌های ( $E_2(\text{TO})$ ،  $\text{E}_2$  و  $\text{SO}$ ) سولفید روی هستند. پس از بارگذاری  $Fe_3O_4$  قله‌های مشخصه دی‌سولفید مولیبدن و سولفید روی با جایه‌جایی کمی دیده شدن و قله‌ی ظاهر شده در  $۶۶۰\text{ cm}^{-1}$  مربوط به حالت ارتعاشی  $A_{1g}$  از  $Fe_3O_4$  است؛ و شدت قله‌ها در نمونه سه‌تایی کاهش یافته است. قله‌های ظاهر شده دیگر مربوط به پیوندهای Mo-O<sub>3</sub> و Mo-O<sub>2</sub> هستند [۲۴-۲۶]. نتایج رامان کامپوزیت شدن خوب و تشکیل ساختارهای نانوکامپوزیت‌ها را تأیید می‌کند.

#### جذب و واجدب سطحی نیتروژن

برای توضیح رفتار مولکول‌های گاز در پدیده جذب سطحی بر

شکل ۴ طیف رامان نانوکامپوزیت‌های  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$ شکل ۵ آزمون BET نانوکامپوزیت‌های (الف)  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  و (ب)  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$ جدول ۱ مساحت سطح ویژه، حجم و اندازه حفره‌ها برای دو نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$ 

نمونه	مساحت سطح ویژه ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	حجم حفره‌ها ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	توزیع اندازه حفره‌ها (nm)
$\text{ZnS}/\text{MoS}_2$	۳۵۸۲	۰.۱۲۷	۱۴/۱۸۸
$\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$	۲۲۵۵۶	۰.۱۹۲۶	۳۴/۱۴۸

نورتابی هر دو نانوکامپوزیت دارای دو قله مشخصه و متفاوت در حدود ۳۷۰ و ۵۶۰ نانومتر است که قله نخست در ناحیه فرابینفس پس از بارگذاری نانوذرات مگنتیات به شدت ضعیف شده است. کاهش شدت قله در ناحیه فرابینفس نشان می‌دهد که شدت نورتابی نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  در مقایسه با نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$  کمتر بوده که ناشی از کاهش مؤثر بازترکیب جفت الکترون-حفره و در نتیجه افزایش نیمه عمر الکترون-حفره‌ها است که به نوبه خود منجر به

PL طیف‌های نورتابی می‌توان به بعضی از ویژگی‌های ذاتی ماده چون ترازهای سطحی، گاف نواری و ناخالصی ساختار و همچنین سرعت بازترکیب الکترون حفره در نیمرسانها بی‌برد. به طور کلی، شدت کمتر PL، بازده کمتر بازترکیب الکترون-حفره را نشان می‌دهد که یک نیمرسان با نرخ پایین بازترکیب الکترون-حفره فعالیت فتوکاتالیزوری بالایی دارد [۲۷، ۲۶]. طیف نورتابی نانوکامپوزیت‌ها در شکل ۶ آورده شده است. طیف

Vis، غلظت محلول باقیمانده MO در هر گستره زمانی به دست می‌آید. چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود، کاهش شدت قله جذبی رنگ MO توسط نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> درصد تخریب نهایی پس از ۹۰ دقیقه توسط نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> برابر با ۸۵٪ درصد است.

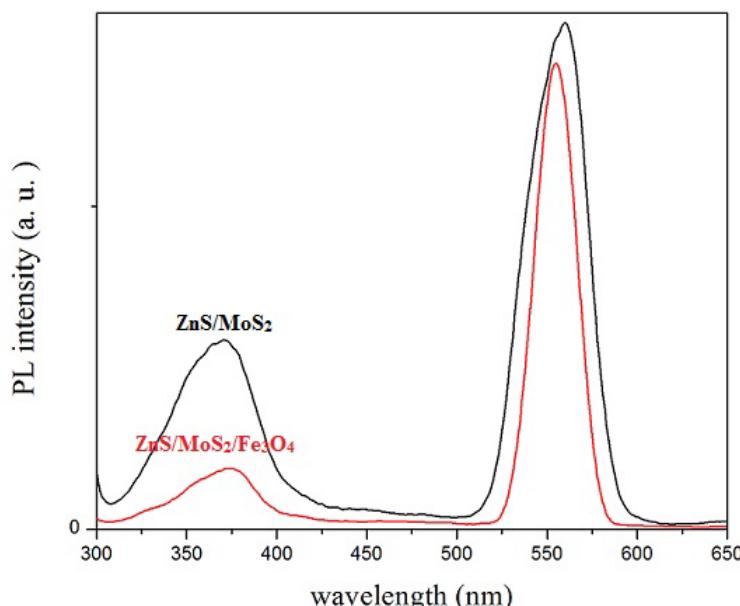
#### تخریب رنگ اسید قهومای (AB)

شکل ۸ طیف جذب تخریب رنگ AB توسط نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> را نشان می‌دهد. شدت قله مشخصه جذب رنگ AB در طول موج ۴۹۰ نانومتر با حضور نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> و با تحریک نور فرابنفش کاهش یافته که نشانی از تخریب رنگ است. پس از گذشت زمان‌های موردنظر، فتوکاتالیزور (پودر نانوبلورها) مانند آزمایش تخریب رنگ MO با آهنربا جدا و با اندازه‌گیری میزان جذب محلول باقیمانده با طیفسنج UV-Vis، غلظت محلول باقیمانده AB در هر گستره رمانی به دست می‌آید. درصد تخریب نهایی پس از ۹۰ دقیقه توسط نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> برابر با ۸۰٪ درصد است.

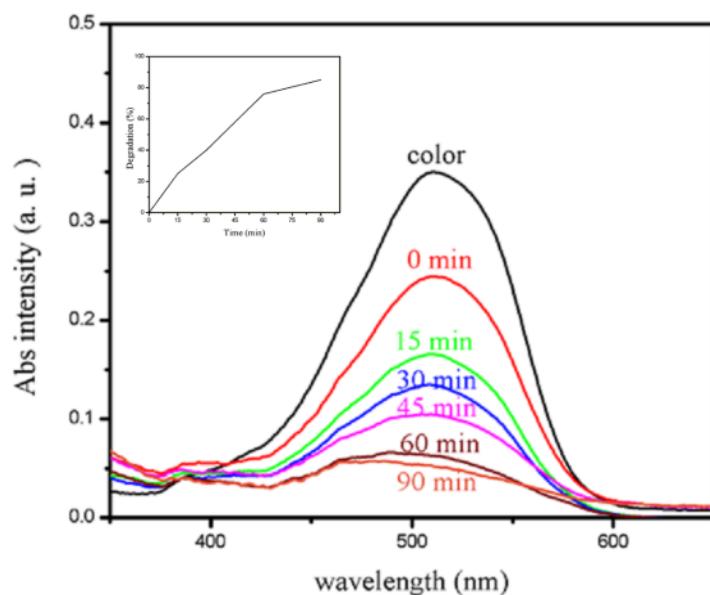
افزایش فعالیت فتوکاتالیزوری نمونه ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> می-شود [۲۸].

**ویژگی فتوکاتالیزوری نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**  
تخریب رنگ زیر تابش نور فرابنفش با ثبت طیف جذب UV-Vis بررسی شد. با افزایش زمان تابش، شدت قله جذب کاهش می‌یابد که باعث کاهش غلظت رنگ یا به بیانی تخریب رنگ  $\frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\%$  می‌شود. برای تعیین درصد تخریب رنگ از رابطه  $(C_0 - C_t)/C_0$  استفاده شد که  $C_0$  و  $C_t$  به ترتیب جذب اولیه در زمان شروع فعالیت فتوکاتالیزوری و نهایی بر پایه شدت جذب از نمونه پس از گذشت مدت زمان  $t$  از شروع واکنش هستند [۳۰، ۲۹].

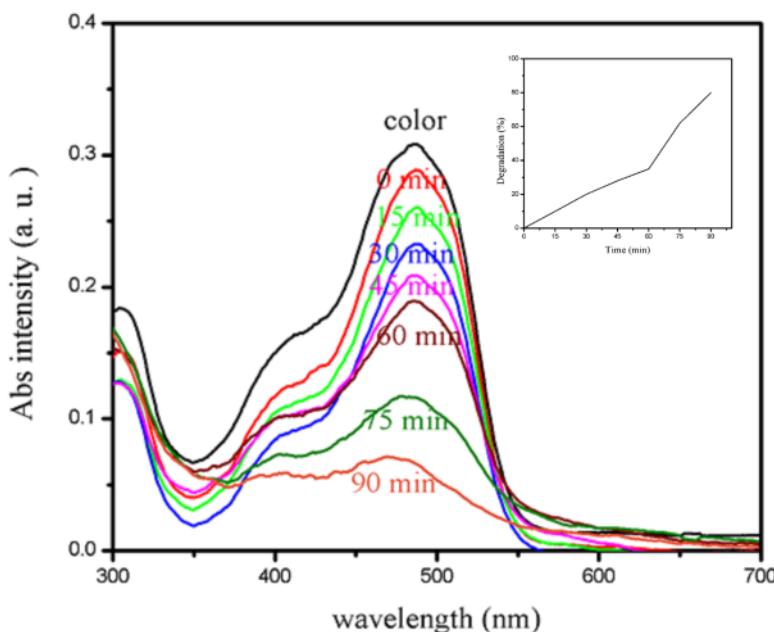
**تخریب رنگ متیل نارنجی (MO)**  
شکل ۷ طیف جذبی مربوط به تخریب رنگ MO توسط نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> را نشان می‌دهد. قله مشخصه طیف جذبی MO در حدود ۵۱۰ نانومتر در بررسی تخریب آن طی فرآیند فتوکاتالیزوری استفاده می‌شود. پس از گذشت زمان‌های موردنظر، فتوکاتالیزور (پودر نانوبلورها) آهنربا جدا و با اندازه‌گیری میزان جذب محلول باقیمانده با طیفسنج UV-



شکل ۶ طیف نورتابی نانوکامپوزیت‌های ZnS/MoS<sub>2</sub> و ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>



شکل ۷ طیف جذب تخریب رنگ متیل نارنجی توسط نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  با تابش نور فرابنفش تصویر کوچک درون شکل درصد تخریب رنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۸ طیف جذب تخریب رنگ اسید براون توسط نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  با تابش نور فرابنفش تصویر کوچک درون شکل درصد تخریب رنگ را نشان می‌دهد.

نقش مخرب‌های رنگ‌های صنعتی را ایفا می‌کنند. از آنجا که این نانوفوتوكاتالیزور یک کامپوزیت است که از دو بخش نانوذرات  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2$  با گاف‌های نواری متفاوت تشکیل شده است، به جای آن که پس تولید

نانوکامپوزیت  $\text{ZnS}/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  زیر تابش نور با تولید الکترون-حفره و واکنش این حامل‌های بار با آب، رادیکال  $\text{OH}^-$  آزاد می‌کند و پتانسیل به قدری است که مولکول‌های اکسیژن نیز به صورت  $\text{O}_2^-$  احیا شوند. رادیکال‌های  $\text{OH}^-$  و  $\text{O}_2^-$

دهنده‌های بیشتری میل به تخریب رنگ داشته باشد و واکنش فوتوكاتالیزوری سریع‌تر انجام شود. کاهش شدت طیف PL در ناحیه فرابینفس نمونه‌ی سه‌تایی در واقع نشانگر کاهش بازترکیب الکترون-حفره و در نتیجه فعالیت فوتوكاتالیزوری بهتر است. همچنین نمونه‌ی سه‌تایی به دلیل ویژگی مغناطیسی به راحتی از محلول رنگ جدا شده و امکان استفاده دوباره فوتوكاتالیزور در تخریب رنگ فراهم می‌شود. با بازیافت مخلوط واکنش فوتوكاتالیزور می‌تواند دوباره استفاده شود. فعالیت فوتوكاتالیزوری نانوکامپوزیت‌ها در تخریب رنگ‌های MO و AB بررسی شد. نانوکامپوزیت سنتز شده ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> در زمان صفر حتی بدون تابش نور فرابینفس منجر به تخریب رنگ شد در نتیجه این نانوکامپوزیت می‌تواند یک فوتوكاتالیزور ایمن و قابل بازیافت برای حذف رنگ‌های صنعتی در محیط آبی باشد.

#### قدرتانی

نویسنده‌گان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان در انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی نمایند.

#### مراجع

- [1] Ameta R., Punjabi P.B., Ameta S.C., "Photodegradation of Naphthol green B in the presence of semiconducting antimony trisulphide", J. Serb. Chem. Soc. 76 (7) (2011) 1049–1055.
- [2] Li H., Li F., Wang G., Sun H., "One-step synthesis of fluorescent carbon nanoparticles for degradation of naphthol green under visible light", J. Lumin. 156 (2014) 36–40.
- [3] Feng X., Guo H., Patel K., Zhou H., Lou X., "High performance, recoverable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZnO nanoparticles for enhanced photocatalytic degradation of phenol", J. Chem. Eng. 244 (2014) 327–334.
- [4] Eskandarloo H., Badie A., Tavakoli A.R., Behnjajady M.A., Ziarani G.M., "Simple and safe educational experiments for demonstration of environmental application of heterogeneous photocatalysis process using the example of natural fruit juice dye degradation", J. Mater. Educ. 36 (2014) 111–116.

زوج الکترون و حفره به سبب تابش نور فرایнд بازترکیب رخدده، انتقال الکترون بین این دو بخش رخ داده و منجر به کاهش بازده بازترکیب الکترون-حفره در نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> می‌شود؛ که کاهش شدت نورتایی نانوکامپوزیت سه‌تایی قله نخست در (شکل ۶) تاییدی بر آن است. از سویی از آنجا که این دو بخش دارای سطوح انرژی متفاوتی هستند، سرعت تولید الکترون-حفره در آنها متفاوت است و امکان تعداد الکترون و حفره‌های قابل دسترس بیشتر می‌شود. افزون بر این، چنان که از نتایج BET مشخص است در نانوکامپوزیت سه‌تایی مساحت سطح ویژه تقریباً ۷ برابر نانوکامپوزیت دو‌تایی بوده (جدول ۱) که این خود عامل موثری در تخریب رنگ است. در نتیجه فرآیند فوتوكاتالیزوری و درصد تخریب نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> نسبت به ZnS/MoS<sub>2</sub> افزایش یافته که این نتایج در تصاویر کوچک درون شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

از آنجا که همه پارامترهای موثر در فرایند فوتوكاتالیزوری دو رنگ MO و AB از جمله pH (خنثی) و مقدار وزنی کاتالیزور ثابت در نظر گرفته شده‌اند، می‌توان تفاوت در میزان تخریب این دو رنگ را به طول پیوندهای آروماتیکی و تقارن-های فضایی این دو رنگ نسبت داد. با بالاتر بودن تقارن و طول پیوند (رنگ AB)، شکستن و تخریب آنها سخت‌تر و نیازمند انرژی بیشتر است.

#### برداشت

در این پژوهش، نخست به روش گرمابی نانوذرات ZnS توسط MoS<sub>2</sub> بارگذاری شدن و در ادامه به روش هم‌رسوبی شیمیایی، نانوذرات Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> روی ساختار ZnS/MoS<sub>2</sub> پوشش داده شدند و سرانجام نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> به دست آمد. الگوی پراش پرتو ایکس ساختار مکعبی را برای ZnS و Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> و ساختار شش‌گوشی را برای MoS<sub>2</sub> به خوبی نشان داد. طیف تبدیل فوریه فروسرخ به خوبی ساختار این ترکیب‌ها را تأیید کرد. تصاویر TEM بارگذاری ZnS توسط MoS<sub>2</sub> و هم‌چنین پوشش نانوذرات Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> بر نانوکامپوزیت‌ها را نشان داد. براساس آزمون آنالیز BET، مساحت سطح ویژه‌ی بالاتر نانوکامپوزیت ZnS/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> باعث می‌شود که واکنش-

- [17] Li Z., Zhang Y., Zhang W., "Controlled synthesis of CNTs/MoS<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> for high-performance Supercapacitors", *J.Mater. Res. Express* 4 (2017) 055018.
- [18] Panigrahi P.K., Pathak A., "Aqueous medium synthesis route for randomly stacked molybdenum disulfide", *J. Nanopart.*, (2013) 671214-671224.
- [19] Rashidi Dafeh S., Iranmanesh P., salarizadeh P., "Fabrication, optimization, and characterization of ultra-small superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and biocompatible Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnS core/shell magnetic nanoparticles: Ready for biomedicine application", *J. Mater. Sci. Eng. C* 98 (2019) 205-212.
- [20] Osim W., Stojanovic A., Akbarzadeh J., Peterlik H., Wolfgang Binder H., "Surface modification of MoS<sub>2</sub> nanoparticles with ionic liquid ligands: Towards highly dispersed nanoparticles", *Chem.Commun* 49(81) (2013) 9311-9313.
- [21] Liu L., Jiang W., Yao L., Yang X.W., Chen B.H., Wu S.X., Li F.S., "Fabrication of Fluorescent Magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnS Nanocomposites", *J. Nanosci. Nanotechnol.* 14 (2014) 5047–5053.
- [22] Vattikuti V.P., Byon C., Jeon S., "Enhanced photocatalytic activity of ZnS nanoparticles loaded with MoS<sub>2</sub> nanoflakes by self-assembly approach", *Phy.* 502 (2016) 103–112
- [23] Kneipp K., Kneipp H., Itzkan I., Dasari R.R., Feld M.S., "Ultrasensitive chemical analysis by Raman spectroscopy", *Chem. rev.* 99(10) (1999) 2957-2976.
- [24] Gomathi P.T., Sahatiya P., Badhulika S., "Solution processed ZnS-MoS<sub>2</sub> for optoelectronic applications", International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO) (2017) 355-357.
- [25] Cheng J., Han L., Wei Y., Chen Q., "Enhancement of photocatalytic property on ZnS/MoS<sub>2</sub> composite under visible light irradiation", In MATEC Web of Conferences 108 (2017) 01008.
- [26] Eda G., Yamaguchi H., Voiry D., Fujita T., Chen M., Chhowalla M., "Photoluminescence from chemically exfoliated MoS<sub>2</sub>", *Nano Lett.* 11(12) (2011) 5111-5116.
- [5] Ghosh Chaudhuri R., Paria S., "Core/shell nanoparticles: classes, properties, synthesis mechanisms, characterization, and applications", *Chem. Rev* 112 (2012) 2373-2433.
- [6] Rumberg A., "ZnSe thin films grown by chemical vapourdeposition for application as buffer layer in CIGSS solar cells", *Thin Solid Films* (2000) 361-362.
- [7] Yoo J.B., Fahrenbruch A.L., Bube R.H., "Effect of a thin intermediate zinc selenide layer on the properties of CuInSe<sub>2</sub> solar cells", *Solar Cells.* 31(2) (1991) 171-180.
- [8] Haslinda J., Hamid A., "Fabrication, Structural and Electrical Characteristics of Zinc Oxide (ZnO) Thin Films by Direct Current Sputtering", Universiti Sains Malaysia (2009) 1- 4.
- [9] Prabhakar V., Byon C., Jeon S., "Enhanced photocatalytic activity of ZnS nanoparticles loaded with MoS<sub>2</sub> nanoflakes by self-assembly approach", *Phy.* 502 (2016) 103–112.
- [10] Fang X., Wu L., Hu L., "ZnS nanostructure arrays: a developing material star", *Adv. Mate.* 23 (2010) 585–598.
- [11] Li C., Li J., Wang Z., Zhang S., Wei G., Zhang J., Wang H., An C., "The synthesis ofollow MoS<sub>2</sub> nanospheres assembled by ultrathin nanosheets for an enhanced energy storage", *Performance* 22 (2016) 4059–4063.
- [12] Qin S., Lei W., Liu D., Chen Y., "In-situ and tunable nitrogen-doping of MoS<sub>2</sub> nanosheets", *Sci. Rep.* 4 (2014) 7582.
- [13] Wang L., Jie, Shao Z., Zhang Q., Zhang X., Wang Y., Sun Z., Lee Sh., "MoS<sub>2</sub>/Si Heterojunction with Vertically Standing Layered Structure for Ultrafast, High Detectivity, SelfDriven Visible Near Infrared Photodetectors", *Adv. Funct. Mater.* 25 (2015) 2910–2919.
- [14] Shahid H., Liu T., Sufyan M., Aslam N., Zeng W., "Highly reactive 0D ZnS nanospheres and nanoparticles for formaldehyde gas-sensing properties", *Sens. Actuators, B* 239 (2016) 1243–1250.
- [15] COEY J. M. D., "Magnetism and magnetic materials", Cambridge University Press 1(2010).
- [16] Khorasanipoor N., Iranmanesh P., TabatabaiYazdi Sh., Saeednia S., "Synthesis and characterization of EDTA-assisted ZnS:Hg nanoparticles", *J. Lumin.* 219 (2020) 116948.

- [29] Hosseiny Davarani S.S., Moazami H.R., Yousefi T., Abrari M., "The flexible route for the electrosynthesis of visible light active  $Cd_xZn_{1-x}O$  nanostructures by sequential anodic dissolution of metallic electrodes", *J. Water Environ. Nanotechnol.* 3 (2018) 235–242.
- [30] Amdeha E., R.A. El-Salamony R.A., Al-Sabagh A.M., "Enhancing the photocatalytic activity of  $Ga_2O_3-TiO_2$  nanocomposites using sonication amplitudes for the degradation of Rhodamine B dye", *Appl. Organomet. Chem.* 34 (2020) 1–11.
- [27] Vijayalakshmi S., Elaiyappillai E., Johnson P.M., Lydia I.S., "Multifunctional magnetic  $CoFe_2O_4$  nanoparticles for the photocatalytic discoloration of aqueous methyl violet dye and energy storage applications", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 31 (13) (2020) 10738–10749.
- [28] Shahi S., Saeednia S., Iranmanesh P., Hatefi Ardakani M., "Influence of synthesis parameters on the optical and photocatalytic properties of solvo/hydrothermal CuS and ZnS nanoparticles", *Luminescence* 36 (1) (2021) 180–191.