

تهیه‌ی نانو پودرهای هسته-پوسته‌ی اکسیدهای آهن - روی (Fe_3O_4 - ZnO) و بررسی ویژگی‌های نوری و مغناطیسی آن

احمد حسن پور^۱، محمد نیایی فر^{۱*}، مریم آسان^۱، جمشید عمیقان^۲

۱- گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات خوزستان، اهواز

۲- گروه فیزیک، دانشگاه آزاد واحد نجف آباد

(دریافت مقاله: ۹۰/۳/۱۱، نسخه نهایی: ۹۰/۱۰/۱۹)

چکیده: در این پژوهش نخست با استفاده از اتیلن گلیکول و نیتрат آهن، نانو ذرات مگنتیت (Fe_3O_4) به روش سل-ژل تهیه و سپس با سیترات سدیم در اتمسفر آرگون بهینه سازی شد. نانو ذرات اکسید روی نیز به روش هم رسوبی با کربنات آمونیوم و استات روی تهیه و در دمای 350°C و به مدت ۳ ساعت برشته شد. سرانجام با داشتن نانوذرات Fe_3O_4 و ZnO اصلاح شده، سامانه هسته-پوسته Fe_3O_4 - ZnO تهیه شد. ویژگی‌های ساختاری و میانگین اندازه‌ی بلورک‌های پودرهای تهیه شده با پراش سنجی پرتو X مورد بررسی قرار گرفت. ریخت‌شناسی و اندازه‌ی میانگین ذرات با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تراکسیلی (TEM) تعیین و تفسیر شدند. بررسی بیناب‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری (FTIR) نشان از تشکیل پیوندهای آلی و معدنی در نمونه‌ها دارد به این صورت که ستیغ موجود در $443/81\text{ cm}^{-1}$ به نوسانات پیوندهای Zn-O و ستیغ واقع در $540/20\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات پیوند Fe-O وابسته است. برای تعیین طول موج بیشینه جذب، از بیناب‌سنجی دیدگانی-فرابنفش (UV-Vis) بهره‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار طول موج بیشینه‌ی جذب نانوپودرهای هسته-پوسته در مقایسه با نانوذرات خالص اکسید روی افزایش یافته است. ویژگی-های مغناطیسی نمونه‌های پودری با اندازه‌گیری تغییرات مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی با استفاده از یک مغناطش‌سنج لرزه‌ای (VSM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات مگنتیت ابرپارامغناطیس هستند. از سویی در نمونه‌ی هسته-پوسته، با افزایش نسبت مولی اکسید روی به مگنتیت، مقدار میدان وادارندگی تغییرات چندانی نداشته است.

واژه‌های کلیدی: مگنتیت؛ اکسید روی؛ سامانه هسته پوسته؛ نانو ذره؛ سل-ژل.

مقدمه

در سال‌های اخیر حضور نانوذراتی به‌صورت ساختار هسته-پوسته با توجه به قابلیت‌های بالا همچون افزایش پایداری شیمیایی و گرمایی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. این نانوذرات دارای پوسته‌ای هستند که ذره‌ای را به عنوان هسته در میان گرفته‌اند. اندازه‌ی این نانو ذرات در گستره‌ای از ۲۰ تا ۲۰۰ nm را شامل می‌شود و معمولاً متناسب با نوع هسته یا پوسته، می‌توان آن‌ها را در زمینه‌های گوناگون به کار گرفت

[۱]. از سامانه‌های جالب نانوذراتی که دارای ساختار هسته-پوسته‌اند می‌توان به ذراتی اشاره کرد که در آن یک پوسته‌ی نامغناطیسی یک هسته مغناطیسی را در بر گرفته باشد [۲]. به همین منظور با توجه به کاربردهای فراوان نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 در پزشکی، به‌عنوان حامل‌های دارو به منظور انتقال کنترل شده عوامل درمانی به موضع بیماری [۳]، به‌عنوان جاذب فلزهای سنگین و مواد آلاینده محیط زیست، در فرایند پالایش پساب‌های صنعتی و به‌عنوان رنگ‌دانه در صنعت،

* نویسنده مسئول، تلفن-نمبر: ۴۴۵۷۶۱۲ (۰۶۱۱)، پست الکترونیکی: hasanpour88@gmail.com

تهیه‌ی نانو ذرات مگنتیت (Fe_3O_4) اصلاح شده

نخست مخلوطی از ۱ گرم نانو ذرات مگنتیت تهیه شده، و ۵۰ میلی‌لیتر محلول سیترات سدیم نیم‌مولار که ۳۰ دقیقه زیر تابش فراصوتی قرار گرفته بود به مدت ۱۲ ساعت در دمای 60°C و در فضای آرگون هم زده شد. رسوب به‌دست آمده با یک آهن ربا جمع‌آوری و سرانجام چندین بار با استون شسته شد تا از هرگونه آلودگی و ناخالصی پاک شود. در این مرحله سیترات سدیم به‌عنوان یک پایدارساز عمل می‌کند و باعث جلوگیری از به‌هم‌چسبیدن ذرات شده و سطح نانوذرات مگنتیت را پاک‌سازی می‌کند.

تهیه نانوذرات اکسید روی (ZnO)

۱۲ گرم استات روی دو آبه و ۷/۶ گرم کربنات آمونیوم را جداگانه در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب حل کرده سپس دو محلول، قطره قطره درون یک فلاسک سه دهانه به همدیگر افزوده شدند. با ورود اولین قطره‌ها رسوب سفیدرنگی حاصل شد. رسوب به-دست آمده به‌ترتیب با آب، محلول آمونیاک آبدار با $\text{PH} = 9$ و اتانول شسته شد. سپس به مدت ۲ ساعت در خلا 10^{-4} پاسکل خشک و به پودر سفید رنگی تبدیل شد. محصول به-دست آمده در دمای 350°C و به مدت ۳ ساعت در کوره برشته شد.

فرایند ساخت هسته - پوسته‌ی مگنتیت - اکسید روی ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$)

در این مرحله تهیه‌ی نانو پودرهای هسته-پوسته با نسبت‌های مولی ۱۰ به ۱ (۰/۰۷ گرم مگنتیت و ۰/۲۵ گرم اکسید روی) و ۲۰ به ۱ (۰/۰۳۵ گرم مگنتیت و ۰/۲۵ گرم اکسید روی) مورد بررسی قرار گرفت. نخست به نانوذرات مگنتیت اصلاح شده در بخش پیش ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیر شده افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه زیر تابش امواج فراصوتی قرار داده شد. در مرحله‌ی بعد با یک آهن‌ربا ذرات درشت‌تر جدا شدند. سرانجام یک شاره‌ی مغناطیسی^۵ پایدار با پایداری نسبی بیش از ۵۰ ساعت به‌دست آمد. سپس نانوذرات اکسید روی پس از هم زدن با هم‌زن شیشه‌ای به مایع مغناطیسی افزوده شد. محصول به-دست آمده را در یک دستگاه چرخاننده و در دمای 90°C خشک کردیم.

در تهیه‌ی وسایل الکترونیکی، اپتوالکترونیکی، سرامیک‌ها [۴]، در این پژوهش نانو ذرات Fe_3O_4 به عنوان هسته‌ی مغناطیسی تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. از سوی دیگر نانوذرات اکسید روی از دسته مواد اکسیدهای رسانای شفاف^۱ (TCO) است که کاربردهای بسیاری در الکترونیک و الکترونیک نوری از جمله در حسگرهای گاز [۵]، الکترودهای رسانای شفاف [۶]، صفحه نمایشگرهای تخت (FPD)، نمایشگرهای بلور مایع (LCD)، دیودهای نور گسیل آلی (OLED)، سلول‌های خورشیدی [۷-۱۲] و پوشش‌های محافظتی روی پلیمرها دارند [۱۳]. بدین ترتیب بررسی ویژگی‌های نانوذرات اکسید روی به‌عنوان پوسته می‌تواند یک گزینش درست باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که نانوساختار هسته-پوسته مگنتیت-اکسید روی کاربردهای گسترده‌ای در پزشکی^۲، ابزارهای اسپینترونیک^۳، در حافظه‌ی جانبی رایانه به شکل مغناطونوری^۴ [۱۴] دارند. به همین منظور در این پژوهش تهیه این سامانه هسته-پوسته مورد بررسی قرار گرفته است.

روش بررسی

در این پژوهش برای تهیه‌ی نمونه‌ها نیترات آهن $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ ، دی اتیلن گلیکول $(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2)$ ، سدیم سیترات، آمونیوم کربنات $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ، استات روی دوآبه $(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ ، آمونیاک آبدار $(\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$ و اتانول با خلوص ۹۹٪ مورد استفاده قرار گرفتند که همه‌ی آن‌ها از شرکت مرک خریداری شدند.

روش ساخت نانو ذرات Fe_3O_4

نانوذرات مگنتیت را به روش سل-ژل تولید کردیم. بدین منظور نخست ترکیبی از ۵ میلی‌لیتر اتیلن گلیکول و ۴/۰۴ گرم نیترات آهن به مدت ۲ ساعت در دمای 40°C با یک هم زن مغناطیسی هم زده شد. با افزایش دما ژل موردنظر در دمای 80°C ژل تشکیل شد. ژل به‌دست آمده در آون در دمای 150°C به مدت ۲۰ ساعت خشک شد، و ژل خشک شده‌ی قهوه‌ای رنگ متخلخل به‌دست آمد پودر آن را در کوره‌ی خلا با دمای 400°C و به مدت ۲ ساعت برشته کردیم.

1- Transparent conductive oxide

2- Biomedical applications

3- Spintronic devices

4- Magneto optic

5- Magnetic fluid

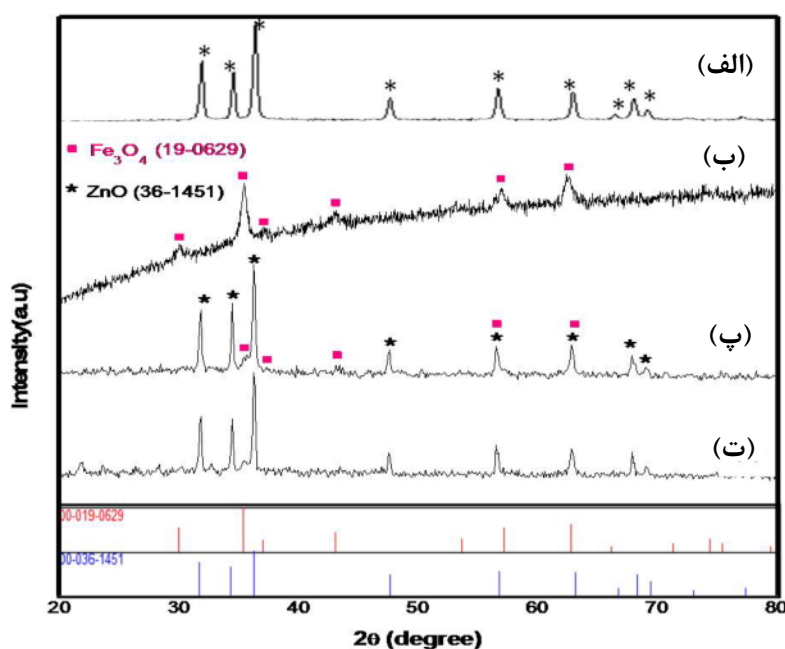
شناسایی و اندازه‌گیری

به‌منظور بررسی فازهای موجود در نانو پودرهای تولید شده، الگوی XRD با استفاده از پراش‌سنج پرتو X، مدل ۳۰۰۳ ID ساخت شرکت Seifert آلمان با لامپ مسی و طول موج $K\alpha = 1/54.056 \text{ \AA}$ و در گستره‌ی 2θ از ۲۰ تا ۸۰ درجه ترسیم شد. به‌منظور بررسی سطح نانوذرات و به دست آوردن اطلاعات ریخت و اندازه‌ی آن‌ها از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM) مدل ۳۰ XL ساخت شرکت Philips از کشور هلند و میکروسکوپ الکترونی تراکسیلی (TEM) مدل ۱۲۰ CM ساخت شرکت Philips از کشور هلند استفاده شد. از بیناب‌سنج (EDX) موجود در مرکز پژوهش رازی برای شناسایی عنصری نمونه‌ها بهره‌گیری شد. برای بررسی ساختار شیمیایی نمونه‌ها از بیناب‌سنج فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) ساخت شرکت Perkin Elmer مدل RXII در بازه‌ی طول موجی $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ استفاده شد. به‌منظور بررسی چگونگی تاثیر نوع ذرات بر طول موج بیشینه جذب پرتو فرابنفش (UV)، از پراش‌سنج نوری فرابنفش-دیدگانی (UV-visible) ساخت شرکت Perkin Elmer مدل Lambda35 استفاده شد. بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ای مگنتیت و ذرات هسته - پوسته، مغناطش‌سنج لرزه‌ای (VSM) ساخت شرکت مغناطیس کویر کاشان مورد استفاده قرار گرفت.

نتیجه‌ها و بحث

بررسی‌های ساختار

الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه‌ای Fe_3O_4 و ZnO سنتز شده در شکل (۱) با نرم افزار X Pert Plus به ترتیب با ستیغ‌های کارت‌های (۱۹-۰۶۲۹) JCPDS و (۳۶-۱۴۵۱) JCPDS مقایسه و علامت‌گذاری شد. در شکل ۱ (الف) ستیغ-های پراش پرتو ایکس، تشکیل فاز ZnO نمونه‌ی اکسید روی تهیه شده به روش هم‌رسوبی را نشان می‌دهد. شکل ۱ (ب) قله‌های پراش پرتو ایکس، تشکیل فاز Fe_3O_4 نمونه‌ی مگنتیت تهیه شده به روش سل-ژل را بدون حضور ناخالصی تایید می‌کند. چنانکه دیده می‌شود، ستیغ‌های وابسته به نانوذرات سیاه رنگ مگنتیت (Fe_3O_4)، مشابه نانوذرات مگهمایت ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) با رنگ قهوه‌ای تیره هستند، از این رو عوامل دیگری همچون رنگ نانوذرات و میزان دمای گرمادهی نیز در نظر گرفته شدند [۱۵]. در بخش‌های ۱ (ب) و (پ) قله‌های پراش پرتو ایکس، تشکیل فازهای ZnO و Fe_3O_4 در نمونه‌های هسته-پوسته مگنتیت-اکسید روی با نسبت‌های مولی ۱-۱۰ و ۱-۲۰ را نشان می‌دهد. میانگین اندازه‌ی بلورک‌های نانوذرات ZnO و Fe_3O_4 با رابطه شر $D = K\lambda/\beta \cos\theta$ که در آن D میانگین اندازه‌ی بلورک، λ طول موج پرتو ایکس، β پهنای قله در نیم بیشینه و θ زاویه‌ی براگ است محاسبه و در جدول (۱) آمده‌اند.



شکل ۱ الگوی پراش پرتو X: (الف) نانوذرات اکسید روی، (ب) نانوذرات مگنتیت، هسته-پوسته‌ی مگنتیت-اکسید روی (پ) با نسبت مولی ۱-۱۰ و (ت) با نسبت مولی ۱-۲۰.

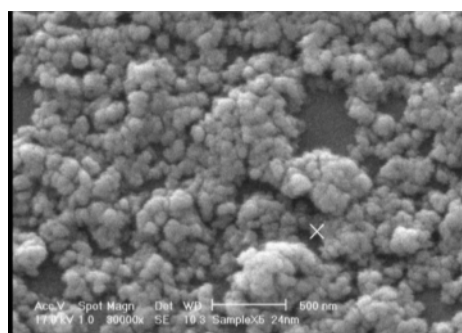
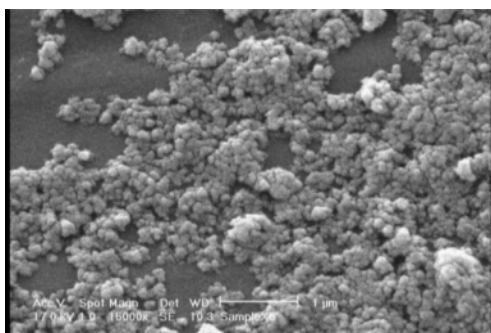
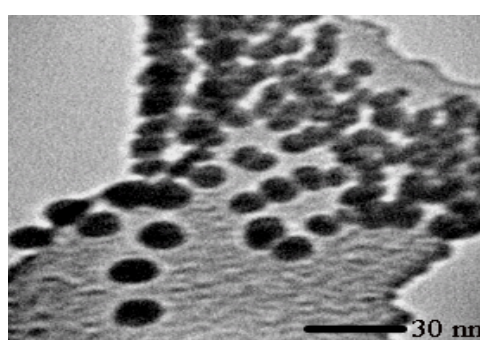
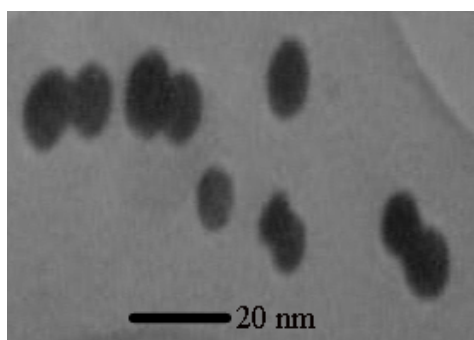
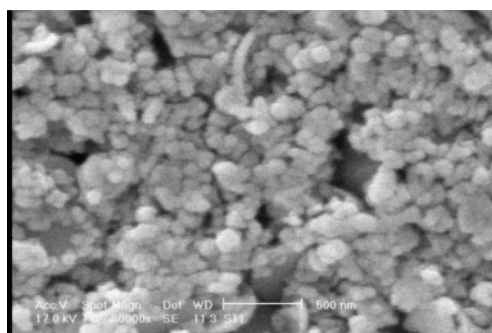
جدول ۱ محاسبه‌ی اندازه ریز بلورک‌های نانو ذرات مگنتیت واکسید روی با استفاده از رابطه‌ی شرر.

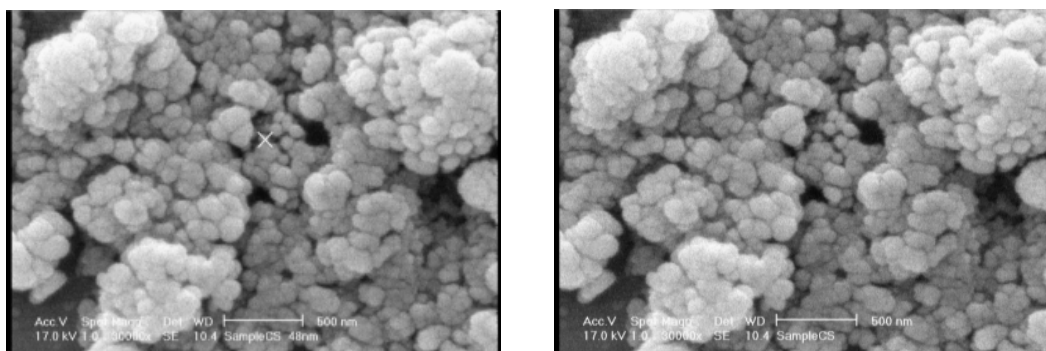
اکسیدروی برشته شده در دمای ۵۰ °C به مدت ۳ ساعت	مگنتیت برشته شده در دمای ۴۰۰ °C به مدت ۲ ساعت	نانو ذرات
۲۳ nm	۱۰ nm	اندازه بلورک

بررسی‌های ریز ساختاری و ریخت شناسی

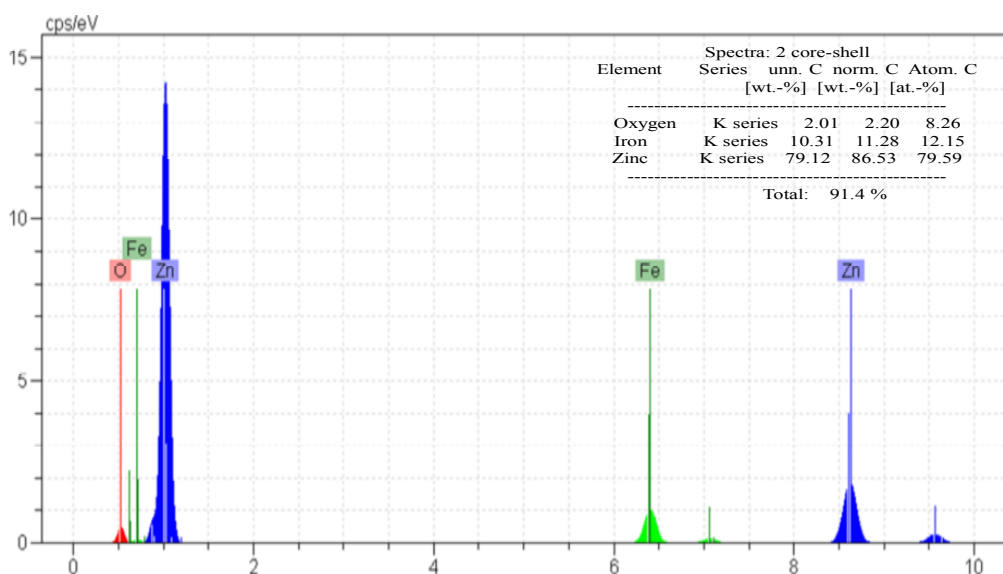
چنان که دیده می‌شود اندازه‌ی ذرات در گستره‌ی نانومتری است. در شکل‌های (۲) و (۳) تصویرهای SEM و TEM نانوذرات کروی Fe_3O_4 تهیه شده به روش سل ژل دیده می‌شوند. اندازه‌ی ذرات پیرامون ۱۰ nm است که قابل مقایسه با نتایج به دست آمده از رابطه‌ی شرر است. شکل (۴) تصویر SEM نانوذرات اکسید روی تهیه شده به روش هم-رسوبی است. با توجه به تصویر ذرات کروی شکل‌اند. در شکل

(۵) تصویر SEM نانو پودرهای کروی شکل هسته-پوسته‌ی مگنتیت-اکسید روی دیده می‌شوند. به منظور بررسی بیشتر ترکیب ذرات، نمونه‌ی هسته پوسته‌ی تهیه شده با نسبت مولی ۱-۱۰ بر پایه‌ی آنالیز EDX مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۶) درصد عناصر روی، آهن و اکسیژن به ترتیب ۷۹/۱۲٪، ۱۰/۳۱٪ و ۲/۰۱٪ دیده می‌شوند. چنانکه مشاهده می‌شود هیچ گونه ناخالصی در نمونه‌ی هسته-پوسته وجود ندارد که تاییدی است بر تشکیل ذرات هسته-پوسته مورد نظر.

شکل ۲ تصاویر (SEM) نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4).شکل ۳ تصاویر (TEM) نانو ذرات مگنتیت (Fe_3O_4).شکل ۴ تصاویر (SEM) نانوذرات اکسید روی (ZnO).



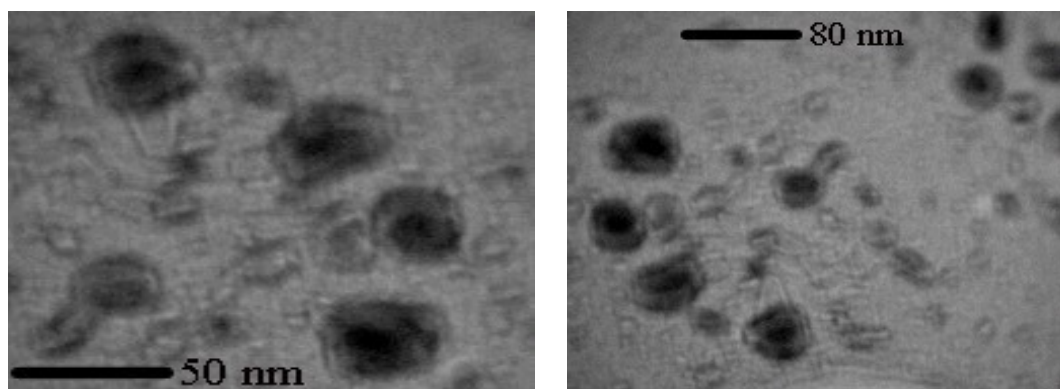
شکل ۵ تصویر (SEM) هسته-پوسته مگنتیت-اکسید روی با نسبت مولی ۱-۱۰.



شکل ۶ تصویر (EDX) هسته-پوسته مگنتیت-اکسید روی با نسبت مولی ۱-۱۰.

نانوذرات مگنتیت نسبت به نانوذرات اکسیدروی، تصویر هسته مغناطیسی (Fe_3O_4) تیره‌تر از پوسته دیده می‌شود. قطر این ذرات در بازه‌ی ۴۰ تا ۵۰ nm است.

شکل (۷) تصویر TEM هسته-پوسته با نسبت مولی ۱-۱۰ را نشان می‌دهد که به صورت نقاط تاریک و خاکستری که به ترتیب به هسته‌ی مغناطیسی اکسید آهن و پوسته‌ی اکسید روی وابسته است. به دلیل چگالتی بودن و جذب الکترونی بیشتر



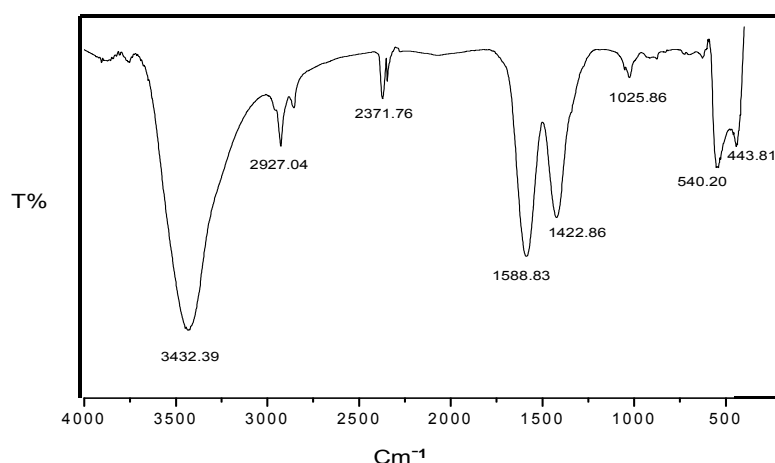
شکل ۷ تصاویر (TEM) هسته-پوسته‌ی مگنتیت-اکسید روی با نسبت مولی ۱-۱۰.

بررسی های بیناب سنجی نوری فرو سرخ تبدیل فوریه

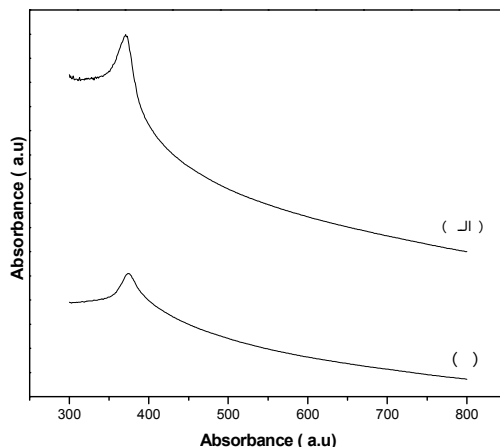
در شکل (۸)، بیناب فرو سرخ نانوپودرهای هسته- پوسته ZnO- Fe_3O_4 آمده است. نتایج بررسی های صورت گرفته با FTIR نشان از تشکیل پیوندهای شیمیایی دارد به این صورت که قله های موجود در بازه 3432.39 cm^{-1} و 2927.04 cm^{-1} را می توان به ارتعاش های کششی گروه هیدروکسیل O-H و قله های بین 1588.83 cm^{-1} و 1422.86 cm^{-1} به پیوندهای استات نسبت داد. قله های موجود در گستره 1025.86 cm^{-1} و 540.20 cm^{-1} به نوسان های پیوندهای Zn-O و قله موجود در 443.81 cm^{-1} می تواند به ارتعاش های پیوند Fe-O وابسته باشند [۱۶].

بررسی های بیناب دیدگانی - فرابنفش

بیشینه ی جذب (درآشامی) اکسید روی در حالت توده ای در



شکل ۸ بیناب تبدیل فوریه فرو سرخ نانو پودرهای هسته- پوسته مگنتیت- اکسید روی با نسبت مولی ۱-۱۰.

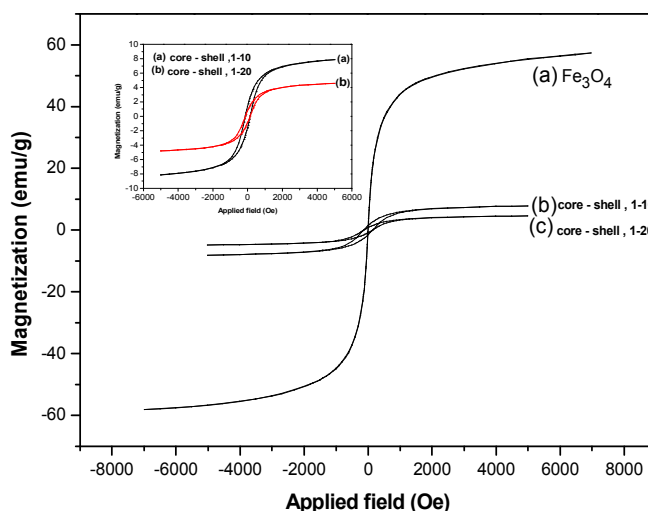


شکل ۹ بیناب دیدگانی - فرابنفش (الف) نانو پودرهای اکسید روی، (ب) هسته- پوسته مگنتیت- اکسید روی با نسبت مولی ۱-۱۰.

گستره ی طول موج 390 nm رخ می دهد. از پیامدهای ورود اجسام به گستره ی ابعاد نانو، گسستگی ترازهای انرژی و بزرگتر شدن گاف انرژی نسبت به ماده ی توده ای است. هر قدر اندازه ی ذرات کوچک تر باشد پهنای ترازها و گاف انرژی بزرگتر خواهد شد. بنابراین با کوچکتر شدن اندازه ذرات، جذب آن به سمت انرژی های بالاتر و طول موج های کمتر جابه جا می شود. چنان که از شکل (۹) پیداست، در بیناب وابسته به نمونه ی نانو ذره اکسید روی، بیشینه ی جذب در 371 nm و در بیناب های وابسته به هسته- پوسته با نسبت مولی ۱-۱۰ بیشینه ی جذب در طول موج 374 nm رخ داده است. به عبارتی طول موج بیشینه ی جذب به سمت مقادیر بیشتر جابه جا شده است که آن را می توان به اثر افزایش اندازه ذرات نسبت داد [۱۷].

بررسی‌های مغناطیسی

مغناطش نمونه‌های مگنتیت و مگنتیت-اکسید روی که از روی چرخه‌های پسماند در یک میدان بیشینه‌ی ۸ KOe در دمای اتاق تعیین شده‌اند، در شکل (۱۰) آمده است. مغناطش اشباعی نانوذرات مگنتیت به‌دست آمده ۵۸ emu/g است که نسبت به حالت توده‌ای آن (۹۸ emu/g) کاهش یافته است [۱۸]. علت این کاهش را می‌توان به بی‌نظمی گشتاورهای مغناطیسی اتم-های لایه‌ی سطحی (اثر اسپین شیشه) در نانوذرات نسبت داد [۱۹]. هر چه ذره کوچکتر می‌شود اثر این لایه‌ی مرده سطحی نسبت به حجم کل ذره که دارای نظم مغناطیسی است بزرگتر شده و در نتیجه مغناطش کاهش می‌یابد [۲۰]. مقدار میدان-های وادارندگی مغناطیسی برای نانوذرات مگنتیت خالص بسیار ناچیز است به‌طوری که می‌توان آن را در حد صفر گرفت که نشان می‌دهد ذرات مگنتیت ابرپارا مغناطیس‌اند.



شکل ۱۰ چرخه‌ی پسماند (الف) نانوذرات Fe_3O_4 ، هسته-پوسته $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ (ب) با نسبت مولی ۱-۱۰، (ج) با نسبت مولی ۱-۲۰.

جدول ۲ بررسی میزان مغناطش اشباع بر حسب میدان وادارندگی نمونه‌های نانو پودری اکسید آهن و هسته-پوسته‌ی اکسید آهن-اکسید روی.

میدان وادارندگی (Oe)	مغناطش اشباع (emu/g)	نانو ذرات مگنتیت
تقریباً صفر	۵۷,۳۳۰۰۲	نانو ذرات مگنتیت
۱۴۰	۷,۸۷۷۲۳	نانو ذرات مگنتیت-اکسیدروی نسبت مولی ۱-۱۰
۱۴۰	۴,۵۹۰۰۲	نانو ذرات مگنتیت-اکسیدروی نسبت مولی ۱-۲۰

برداشت

در این پژوهش تهیه‌ی نانوذرات مگنتیت با روش سل-ژل و نانوذرات اکسید روی به روش هم‌رسوبی با موفقیت انجام شد. سرانجام با اصلاح سطح نانوذرات مگنتیت با سترات سدیم با تشکیل یک مایع مغناطیسی پایدار و افزودن نانوذرات اکسید روی به آن، نانوپودرهای هسته-پوسته اکسید آهن-اکسید روی تهیه شد. از بررسی ستیغ‌های موجود در پراش پرتو

ایکس وابسته به نانوذرات هسته-پوسته می‌توان به حضور ساختارهای ZnO و Fe_3O_4 در این ماده پی برد. در تصاویر به-دست آمده از TEM نیز ساختار هسته-پوسته به‌صورت نقاط روشن و تاریک مشاهده می‌شود. بررسی مغناطش بر حسب میدان نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مولی اکسید روی به مگنتیت، میزان مغناطش تغییر یافته ولی مقادیر میدان‌های وادارندگی تغییرات قابل ملاحظه‌ای نداشته است.

قدردانی

مریم آسان لازم می‌داند از زحمات آقایان حامد احمدی و میثم دارابی پرسنل محترم آزمایشگاه مرکزی علوم و تحقیقات خوزستان به خاطر تهیه‌ی پراش پرتو ایکس و بیناب فرو سرخ تبدیل فوریه صمیمانه تشکر و قدردانی نماید.

مراجع

- solar cells*", Journal of Physical Chemistry 111 (2007) 8692–8698.
- [11] Zhang R., Kumar S., Zou S., Kerr L.L., "High-density vertically aligned ZnO rods with a multistage terrace structure and their improved solar cell efficiency", Crystal Growth and Design 8 (2007) 381–383.
- [12] Suliman A.E., Tang Y.W., Xu L., "Preparation of ZnO nanoparticles and nanosheets and their application to dye-sensitized solar cell", Solar Energy Materials and Solar Cells 91 (2007) 1658–1662.
- [13] Moustaghfir A., Tomasella E., Jacque M., Rivaton A., Mailhot B., Gardette J.L., Beche E., "ZnO/Al₂O₃ coatings for the photoprotection of polycarbonate", Journal of Thin Solid Film 515(2006)662–665.
- [14] Xiong H., Xu Y., Ren Q., Xia Y., "Stable aqueous ZnO@polymer core-shell nanoparticles with tunable photo luminescence and their application in cell imaging", Journal of the American Chemical Society 130 (2008) 7522 – 7523.
- [15] Jing X., Haibin Y., Wuyou F., Kai D., "Preparation and magnetic properties of magnetite nanoparticles by sol-gel method", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 39(2007)307–311.
- [16] Lavat A.E., Wagner C.C., Tasca J.E., "Interaction of Co-ZnO pigments with ceramic frits : A combined study by XRD, FTIR and UV-visible", Ceramics International 34 (2008) 2147–2153.
- [17] Zhang H., Yang D., Li S., Ma X., Ji Y., Xu J., Que D., "Controllable growth of ZnO nanostructures by citric acid assisted hydrothermal process", Journal of Materials Letters 59 (2005) 1696 - 1700.
- [18] Han D. H., Wang J.P., Luo H.L., "Crystallite size effect on saturation magnetization of fine ferrimagnetic particles", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 136 (1994) 176–182.
- [19] Lin C.R., Chu Y.M., Wang S.C., "Magnetic properties of magnetite nanoparticles prepared by mechanochemical reaction", Materials Letters 60 (2006) 447–450.
- [20] Curiale J., Granada M., Troiani H.E., Sanchez R.D., Leyva A.G., Levy P., Samwer K., "Magnetic dead layer in ferromagnetic manganite nanoparticles", Applied Physics Letters 95 (2009) 043106–043109.
- [1] Sounderya N., Zhang Y., "Use of Core-Shell Structured Nanoparticles for Biomedical Applications", Journal of Biomedical Engineering 1 (2008) 34–42.
- [2] Zeng H., Sun Sh., Li J., Wang Z.L., Liu J.P., "Tailoring magnetic properties of core/shell nanoparticles", Journal of Applied Physics Letters 85 (2004) 792–294.
- [3] Xinchao W., Viadero R., "Synthesis of magnetite nano particle with ferric iron recovered from acid mine drainage for : Implications environmental", Journal of Physicochemical and Engineering Aspects 294 (2007) 280–286.
- [4] Cabrera L., CUTieeeeeerrez S., Menendez N., Morales M.P., Herrasti P., "Magnetite nano particles: Electrochemical synthesis an characterization", Journal of Electrochemica Acta 53 (2008) 3436 - 3441.
- [5] Ashour A., Kaid M., "Physical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis", Journal of Applied Surface Science 252 (2006) 7844–7848.
- [6] Weifeng Liu., Guotong Du., Yanfeng S., Yibin Xu., Tianpeng Y., Xinsheng W., Yuchun Ch., Fabin Q., "Al-doped ZnO thin films deposited by reactive frequency magnetron sputtering : H₂ - induced property changes", Thin Solid Films 515(2007)3057–3060.
- [7] Wang Z.S., Huang C.H., Huang Y.Y., Hou Y.J., Xie P.H., Zhang B.W., Cheng H. M., "A highly efficient solar cell made from a dye-modified ZnO covered TiO₂ nanoporous electrode", Chemistry of Materials 13 (2001) 678–682.
- [8] Kluth O., Rech B., Houben L., Wieder S., Schope G., Beneking C., Wagner H., Löffl A., "ZnO:Al coated glass substrates for silicon based thin film solar cells", Thin Solid Films 351(1999) 247–253.
- [9] Choopun S., Tubtimtae A., Santhaveesuk T., Nilphai S., Wongrat E., Hongsith N., "Zinc oxide nanostructures for applications as ethanol sensors and dye- sensitized solar cells", Applied Surface Science 256 (2009) 998–1002.
- [10] Tornow J., Schwarzburg K., "Transient electrical response of dye-sensitized ZnO nanorod