

تأثیر افزایش غلظت آهن بر خواص فیزیکی نانوذرات فریت روی-آهن

سیده اعظم هاشمی، محمود ناصری*، احسان نادری

دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

* mahmoud.naseri55@gmail.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۸ فروردین ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۳۹۸

کلید واژه:

عملیات گرمایی، مغناطش اشباع،
گاف انرژی

چکیده:

در این پژوهش نانو ساختارهای اسپینلی $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$ به روش عملیات گرمایی سنتز و حضور فازهای بلوری توسط پراش پرتو ایکس (XRD) تأیید شد. اندازه و شکل نانوذرات، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مشخص گردید. ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات مانند مغناطش اشباع (M_s)، وادارندگی مغناطیسی (H_c) و پسماند مغناطیسی (M_r) توسط دستگاه مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (VSM) در دمای اتاق بررسی شد و مشخص گردید که نانوذرات روی، رفتار سوپر پارامغناطیس و نانوذرات فریت روی-آهن رفتار فرو مغناطیس دارند. وجود مدهای ارتعاشی فلز-اکسید به وسیله طیف-سنج مادون قرمز (FT-IR) در نانوذرات روی-آهن تأیید شد. با به کارگیری طیف-سنج فرابنفش مرئی (UV-visible) مقادیر گاف انرژی در محدوده $1/98$ تا $2/30$ الکترون-ولت تخمین زده شد.

۱- مقدمه

نانو مغناطیس شاخه‌ای از فناوری نانو است که به بررسی رفتار مغناطیسی مواد در ابعاد نانو می‌پردازد. با گذار به ابعاد نانو، خواص مغناطیسی مواد به شدت تحت تأثیر اندازه‌ی نمونه قرار گرفته و ممکن است رفتاری کاملاً متفاوت با حالت حجمی از خود نشان دهند [۱]. در چند دهه‌ی گذشته به دلیل جذابیت و کاربردهای گسترده‌ی نانوذرات، پژوهش‌های زیادی بر روی ساخت و بررسی این مواد صورت گرفته است [۲]. نانوفریت‌های اسپینلی با فرمول MFe_2O_4 (M شامل یون‌هایی مانند Fe, Zn, Mn, Ni و

Co) از جمله‌ی این نانوذرات‌اند که با کوچکترین تغییر در اندازه این نانوذرات، خواص مغناطیسی و ایتیکی این مواد تغییر می‌کند. برای ساخت نانو فریت‌های اسپینلی روش‌های مختلفی مانند سل-ژل، مایسل معکوس، فرایند میکرو امولسیون، هم‌رسوبی و... به کار گرفته شده است که از معایب این روش‌ها می‌توان به زمان واکنش طولانی، دماهای بالا، هزینه زیاد و تولید مواد سمی اشاره کرد [۳-۶]. توزیع کاتیون‌ها در ساختار اسپینل به سه صورت عادی، وارون و ترکیبی می‌باشند. جانشینی یون‌های مختلف در جایگاه‌های شبکه می‌تواند سبب تغییر در مغناطش کل ماده



استفاده شد. از طیف‌سنج تبدیل فوریه (FT-IR) برای تعیین ساختار مولکولی و شناسایی گروه‌های عاملی و دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه لرزان (VSM) جهت اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی به‌کار گرفته شد و از طیف‌سنج فرابنفش-مرئی (UV-visble) برای تعیین گاف انرژی استفاده شد.

۲-۲- روش انجام آزمایش

نانوذرات فریت روی-آهن با استفاده از روش عملیات گرمایی که شامل مراحل مختلف: مخلوط کردن پیش ماده‌ها (mixing)، ژل شدن (gelation)، خشک کردن (drying)، آسیاب کردن (comminute)، کلسینه کردن (calcination) می‌شود با غلظت‌های مختلفی از آهن سنتز شدند. در ابتدا یک محلول آبی با حل ۳/۵ گرم PVP در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر در دمای ۳۶۳ کلوین روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و سپس نیتрат‌های آهن و روی با مقدارهای متفاوتی در فاصله اندکی از هم به محلول آبی اضافه شد. محلول حاصل به مدت ۲۴ ساعت داخل آون با دمای ۳۷۳ کلوین قرار داده شد و در ادامه به مدت ۲۰ دقیقه آسیاب شد تا پودری صاف و یک دست بدست آید. در نهایت پودر حاصل به منظور کلسینه‌شدن و شکل‌گیری نانوبلور در دمای ۷۷۳ کلوین برای سه ساعت در کوره قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نتایج طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس

برای بررسی ساختار و فازهای بلوری، پارامترهای شبکه،

شود. در چنین شرایطی نحوه‌ی چیدمان یون‌ها نقش مهمی در برهم‌کنش مغناطیسی و خواص مغناطیسی ماده خواهد داشت [۷]. نانوذرات فریت روی-آهن دارای یک ساختار اسپینلی نرمال هستند که در آن کاتیون‌های Zn^{2+} با توجه به ویژگی خاص خود می‌توانند در جایگاه‌های چهاروجهی قرار بگیرند. این نانوذرات گزینه مناسبی برای استفاده در زمینه‌های مختلفی مانند دارو سازی، پزشکی، حسگرهای زیستی، فتوکاتالیست، تصویر برداری MRI، تشخیص باکتری‌های بیماری‌زا و به عنوان آند برای باتری‌های لیتیوم هستند [۸-۱۲]. در این مقاله نحوه‌ی ساخت و بررسی خواص ساختاری، اپتیکی و مغناطیسی نانوذرات فریت روی-آهن که به روش عملیات گرمایی سنتز شده گزارش می‌شود.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

در این پژوهش از آب مقطر به عنوان حلال و از پلی وینیل پیرولیدون (PVP) برای جلوگیری از کلوخه‌شدن ذرات و عاملی برای پایدارسازی این نانوذرات استفاده شد. نیترات روی $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ، نیترات آهن $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ و $Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ با درصد خلوص بالای ۹۹ درصد از شرکت Sigma Aldrich خریداری و مورد استفاده قرار گرفت. ساختار نانوذرات فریت روی-آهن با استفاده از پراش اشعه ایکس با طول موج $\lambda = 1.54$ آنگستروم مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی ریخت‌شناسی و اندازه میانگین نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)



جدول ۱- شعاع مکان چهار وجهی و هشت وجهی

فرمول شیمیایی	شعاع مکان چهار وجهی (Å°)	شعاع مکان هشت وجهی (Å°)
ZnFe ₂ O ₄	۰/۶۵	۰/۷
Fe ₃ O ₄	۰/۵۵	۰/۷۵

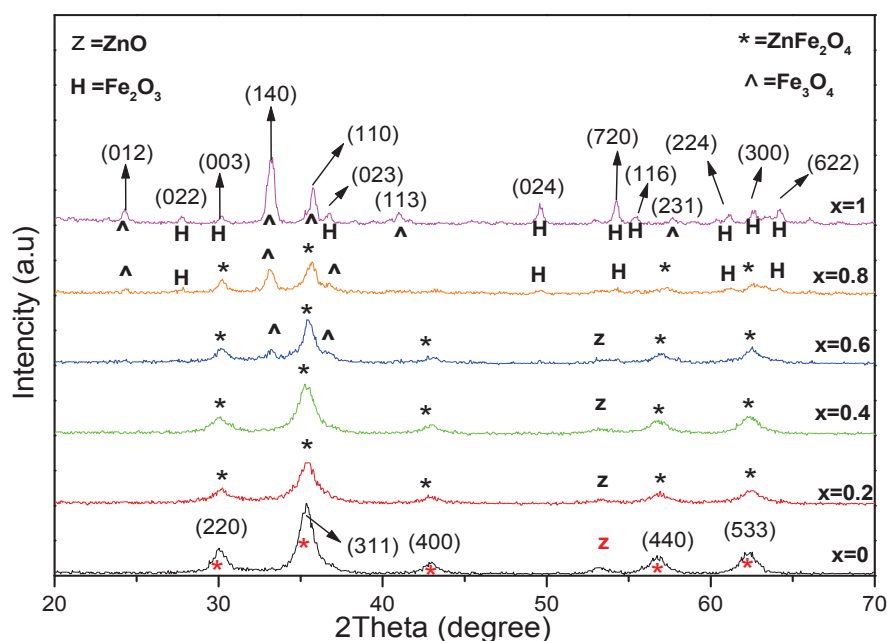
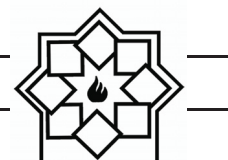
در ساختار بعضی از نمونه‌های کلسینه شده، صفحات براگ، فازهای ناخالصی ZnO و α -Fe₂O₃ وجود دارد. وجود فاز ناخالصی α -Fe₂O₃ با ساختار کوراندوم حاکی از آن است که در این فاز، تمامی کاتیون‌های Fe³⁺ در جایگاه هشت وجهی قرار گرفته‌اند این درحالی است که در فریت Fe₃O₄ با ساختار اسپینل معکوس، تمامی کاتیون‌های Fe²⁺ در جایگاه هشت وجهی و کاتیون‌های Fe³⁺ به طور یکسان در جایگاه‌های هشت وجهی و چهاروجهی توزیع شده‌اند. ترجیح کاتیون‌ها برای قرار گرفتن در جایگاه‌های چهاروجهی و هشت وجهی، به شعاع یونی کاتیون‌های آهن و روی (Fe³⁺=۰/۶۷ و Zn²⁺=۰/۸۲، Fe²⁺=۰/۸۳) شعاع بین‌نشین مکان‌ها و دما بستگی دارد. اندازه نسبی یون در مقایسه با اندازه مکان بین‌نشینی، مهمترین عامل در قرارگیری کاتیون‌ها در جایگاه‌های چهار وجهی و هشت وجهی است (جدول ۱). در دمای ۷۷۳ کلوین، اکسیژن در بعضی از نمونه‌ها به طور کامل حذف نشد و به همین دلیل حضور اکسید ناخالصی ZnO در بعضی از نمونه‌های قابل مشاهده است [۱۶-۱۴].

حضور ناخالصی و اندازه‌ی بلورها از طیف‌سنجی پراش پرتو X استفاده می‌شود. برای تعیین اندازه‌ی بلور با استفاده از رابطه شرر [۱۳] از پیک شاخص در هر طیف استفاده شد. برای مثال برای فریت روی از پیک مربوط به صفحه پراش (۳۱۱) و برای فریت آهن از پیک مربوط به صفحه پراش (۱۰۴) استفاده شده است. ثابت شبکه و حجم واحد سلول نمونه‌ها به ترتیب از رابطه (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

$$V = a^3 \quad (2)$$

که در این دو رابطه a ثابت شبکه، d فاصله‌ی صفحات براگ، (hkl) اندیس‌های میلر مربوط به صفحات براگ و V حجم واحد سلول می‌باشند. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود با افزایش آهن در ترکیب، اندازه نانوذرات فریت روی-آهن افزایش و ثابت شبکه کاهش می‌یابد. قله‌های به دست آمده از شکل (۱) مربوط به الگوهای پراش ایکس نمونه‌های کلسینه شده در دمای ۷۷۳ کلوین با نسبت (۱، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۴، ۰/۲، ۰) می‌باشند. برخی از صفحات پراش (۳۱۱)، (۲۲۰)، (۵۱۱)، (۴۴۰)، (۴۲۲) و (۴۰۰) در نمونه‌ها دیده می‌شود [۱۴]. ساختار اسپینل مکعبی برای نمونه فریت روی و آهن به ترتیب با الگوهای استاندارد (ICDD PDF:22-1012 گروه فضایی: Fd3m) و (ICDD PDF:00-039-0238، گروه فضایی: Fe3m) مطابقت داشتند.



شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات ساختارهای فریت روی-آهن $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$

جدول ۲- نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس برای $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$

نمونه	FWHM	2θ	Cos(θ)	a(Å)	V(Å ³)	Size(nm)
x=0	۱/۱۹	۳۵/۳۵	۰/۹۵۲	۸/۴۱۹	۵۹۶/۷۳	۱۲
x=۰/۲	۱/۰۰۲	۳۵/۴۳	۰/۹۵۲	۸/۴۰۳	۵۹۳/۳۳	۱۴
x=۰/۴	۰/۸۳	۳۵/۲۷	۰/۹۵۳	۸/۴۳۷	۶۰۰/۵۷	۱۷
x=۰/۶	۰/۶۶	۳۵/۴۸	۰/۹۵۲	۸/۳۹۲	۹۵۱/۰۱	۲۲
x=۰/۸	۰/۶۳	۳۵/۶۹	۰/۹۵۱	۸/۳۴۶	۵۰۸/۷۱	۲۳
x=۱	۰/۶۲	۳۳/۲۳	۰/۹۵۸	۷/۹۸۸	۵۰۹/۶۹	۲۴

پالایش شده با (۰/۸ و ۰/۲) می باشد. قله های وارون جذبی اصلی در محدوده ی ۶۰۲ تا 617cm^{-1} مربوط به مد ارتعاشی $O \leftrightarrow M_{\text{octa}}$ و $O \leftrightarrow M_{\text{tetra}}$ می باشد [۱۳]. قله وارون جذبی واقع در 2919cm^{-1} مربوط به مد ارتعاشی C-H از گروه های آلکیل است [۱۵]. قله وارون جذبی در ۹۷۲، ۱۵۱۳، ۱۶۳۶ و 3735cm^{-1} به ترتیب مربوط به مد ارتعاشی C-O-C،

۳-۲- بررسی نتایج طیف سنج مادون قرمز (FT-IR)

طیف سنجی مادون قرمز به منظور شناسایی ترکیب های آلی، گروه های عاملی و مدهای ارتعاشی موجود در ساختار نانوذرات به کار گرفته شده است. شکل (۲) نشان دهنده ی طیف سنجی FT-IR با عدد موجی بین ۴۰۰ تا 4000cm^{-1} برای دو نمونه

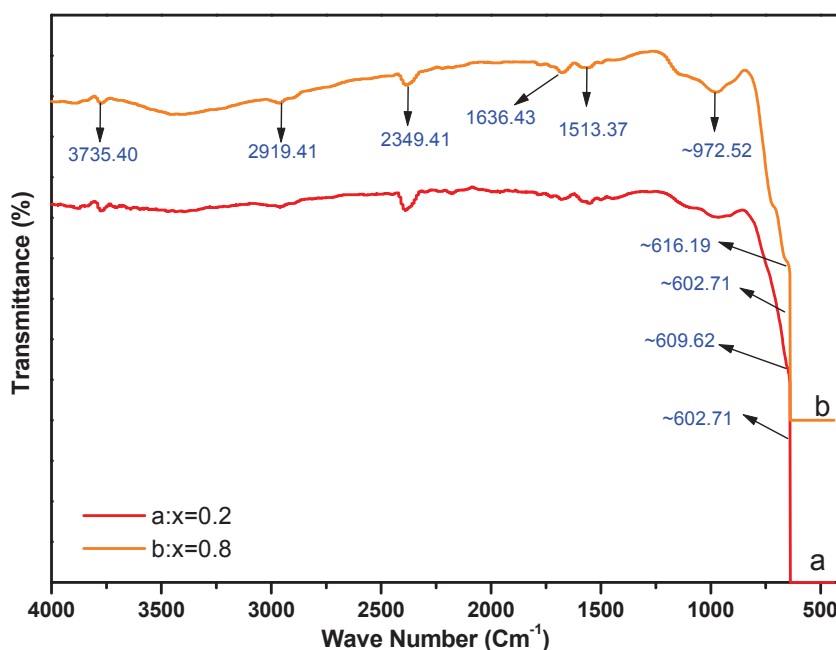


اشباع (M_s)، مغناطش پسماند (M_r) و وادارندگی مغناطیسی (H_c) نانوذرات $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$ که در جدول (۲) آمده است، نشان می‌دهد با افزایش مقدار Fe مقادیر مربوط به M_s ، M_r و H_c روند خاصی را طی نمی‌کند. این موضوع می‌تواند ناشی از چند حوزه‌ای بودن ماده‌ی مغناطیسی و همچنین تغییر در نحوه‌ی توزیع یون‌ها در جایگاه‌های مختلف شبکه با تغییر مقدار x برابر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ باشد. با تغییر مقدار Fe در ترکیب، برهم کنش یون‌ها در جایگاه‌ها مختلف شبکه نیز تغییر کرده و در نتیجه مغناطش اشباع نیز تغییر می‌کند. بنابراین چون حضور Fe در یک جایگاه خاص برای همه‌ی ترکیبات نامشخص است لذا مقایسه مغناطش‌های اشباع برای ترکیب‌های مختلف نیز کار دشواری است. مقادیر مختلف وادارندگی مغناطیسی (H_c) در X‌های مختلف به ساختار حوزه‌ها، اندازه بحرانی و نیز ناهمسانگردی بلور بستگی دارد [۱۹].

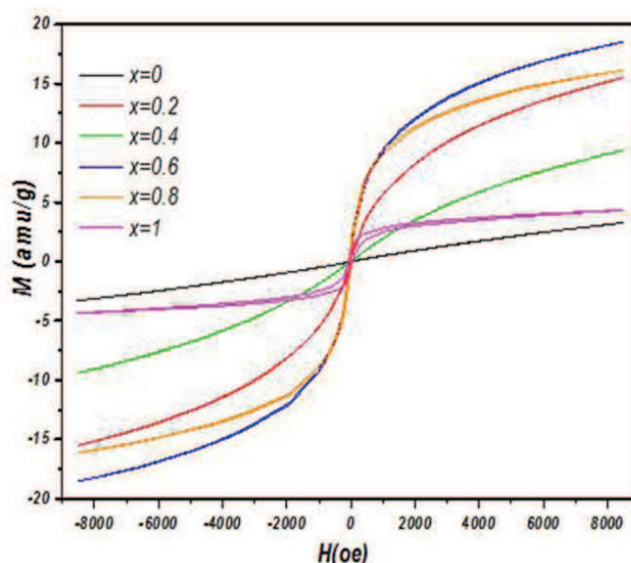
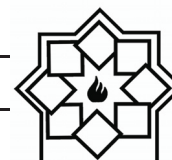
$H-C-H$ ، $C=O$ و $O-H$ می‌باشد. قله وارون جذبی در حوالی 2349 cm^{-1} به حضور دی‌اکسید کربن جذب شده روی سطح نانوذرات مربوط می‌شود [۱۷، ۱۸].

۳-۳- بررسی خواص مغناطیسی

ویژگی‌های مغناطیسی نانوفریت‌های اسپینلی به عوامل متعددی مانند شرایط آماده‌سازی نمونه، مواد اولیه، دمای کلسینه و ... بستگی دارد که با تغییر هر یک از این عوامل، اندازه و نحوه‌ی توزیع یون‌ها در جایگاه‌های مختلف شبکه تغییر کرده و این مواد رفتار مغناطیسی متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۱۶]. با توجه به نمودار حلقه پسماند مغناطیسی شکل (۳) نانو فریت روی رفتار سوپر پارامغناطیس و نانو ترکیب فریت روی- آهن و فریت آهن رفتار فرومغناطیس دارند. اگر چه Fe یک ماده مغناطیسی بوده و با افزایش آن در نانو ترکیب مورد نظر انتظار داریم سبب افزایش مغناطش اشباع شود ولی نتایج مربوط به مقادیر مختلف مغناطش



شکل ۲- طیف FT-IR نمونه $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$

شکل ۳- نمودار حلقه پسماند مغناطیسی نمونه $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$

۳-۴- بررسی ریخت‌شناسی و اندازه نانوذرات

شکل (۴) و (۵) به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) برای نانوذرات فریت روی-آهن را نشان می‌دهد. در شکل (۴) تصویر a مربوط به نمونه‌ای با x برابر ۰/۲ و تصویر b مربوط به نمونه‌ای با x برابر ۰/۸ است. همانطور که مشاهده می‌شود نانو ذرات دارای ابعاد نانومتر بوده و به صورت مجزا از یکدیگر تشکیل شده و دارای توزیع و اندازه یکنواختی هستند. اندازه میانگین نانوذرات از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) برای دو نمونه‌ی $x=0/2$ و $x=0/8$ به ترتیب برابر ۱۵ و ۱۸/۵ نانومتر بدست آمد همچنین میانگین اندازه نانوذرات با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، برای فریت روی (شکل a) ۱۸ و برای نانو ذرات فریت آهن (شکل b) ۲۵ نانومتر به دست آمد. همانطوری

که در تصاویر نیز مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آهن، توزیع نانوذرات به طور یکنواخت صورت گرفته و اندازه‌ی نانوذرات نیز رو به افزایش است که با نتایج حاصل از طیف پراش پرتو ایکس مطابقت خوبی دارد. برخی از این نانو ذرات دارای انباشتگی هستند که می‌توان آن را به برهمکنش مگنتو استاتیک بین ذرات نسبت داد. دلیل دیگر این انباشتگی ناشی از این امر است که در هنگام کلسینه کردن در دمای بالا، سطوح ذرات ذوب‌شده و ذرات همسایه در هم آمیخته شده و اصطلاحاً کلوخه می‌شود [۲۰ و ۲۱].

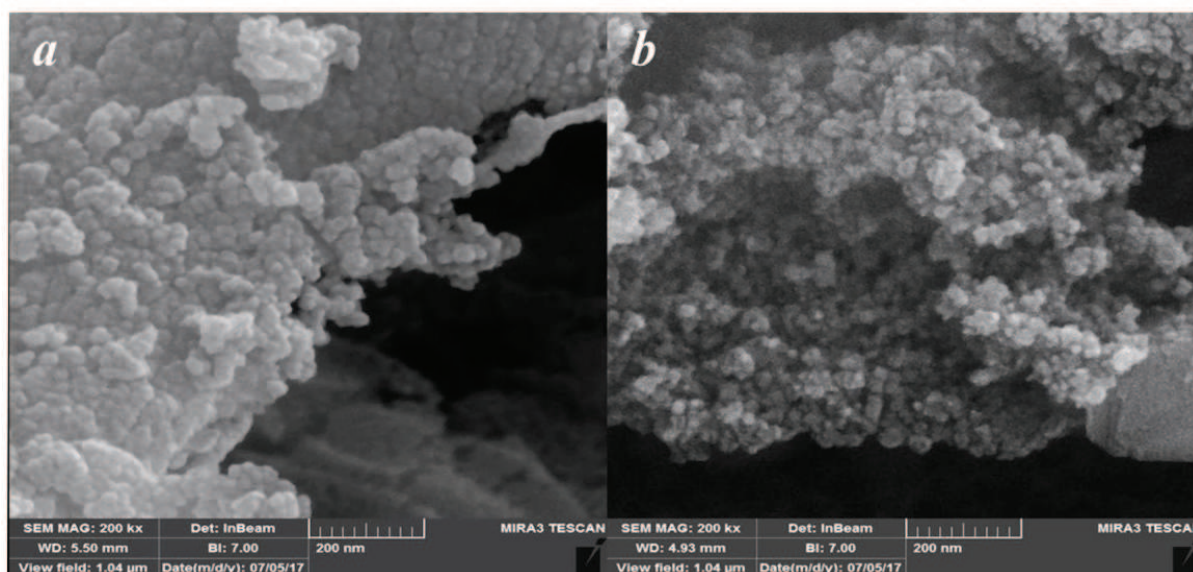
۳-۵- بررسی خواص اپتیکی

اساس کار طیف‌سنج جذبی مرئی-فرابنفش، اندازه‌گیری میزان جذب یک پرتو نوری توسط یک نمونه در محدوده‌ی طول موج ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر است. جذب نور در ناحیه مرئی-فرابنفش با توجه به اینکه الکترون‌های لایه ظرفیت را تحریک می‌کند، می‌تواند منجر به تعیین ضریب جذب نوری (α) و گاف انرژی (E_g) شده که این پارامترها در بررسی کاربردهای اپتیکی

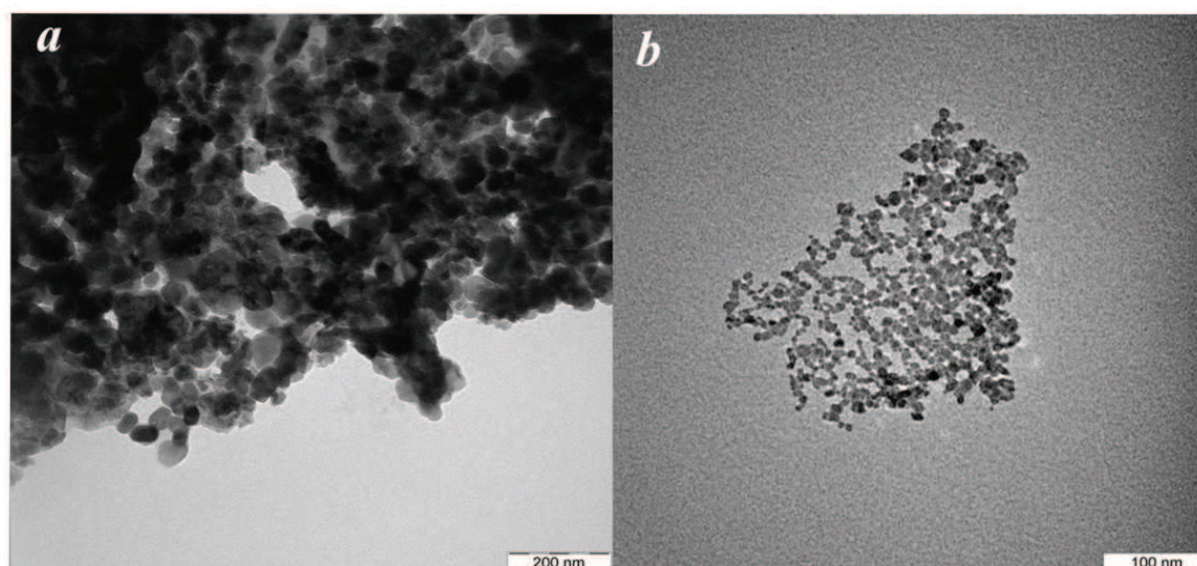


ناشی از رسانایی الکتریکی بالای فریت آهن نسبت به فریت روی باشد همچنین با افزایش اندازه نانوذرات فضای بین اتمی و دامنه ارتعاشات اتمی نیز افزایش یافته و پتانسیل الکترون‌ها در ماده کاهش می‌یابد و در نتیجه اندازه گاف انرژی نیز کاهش می‌یابد [۲۲ و ۲۳].

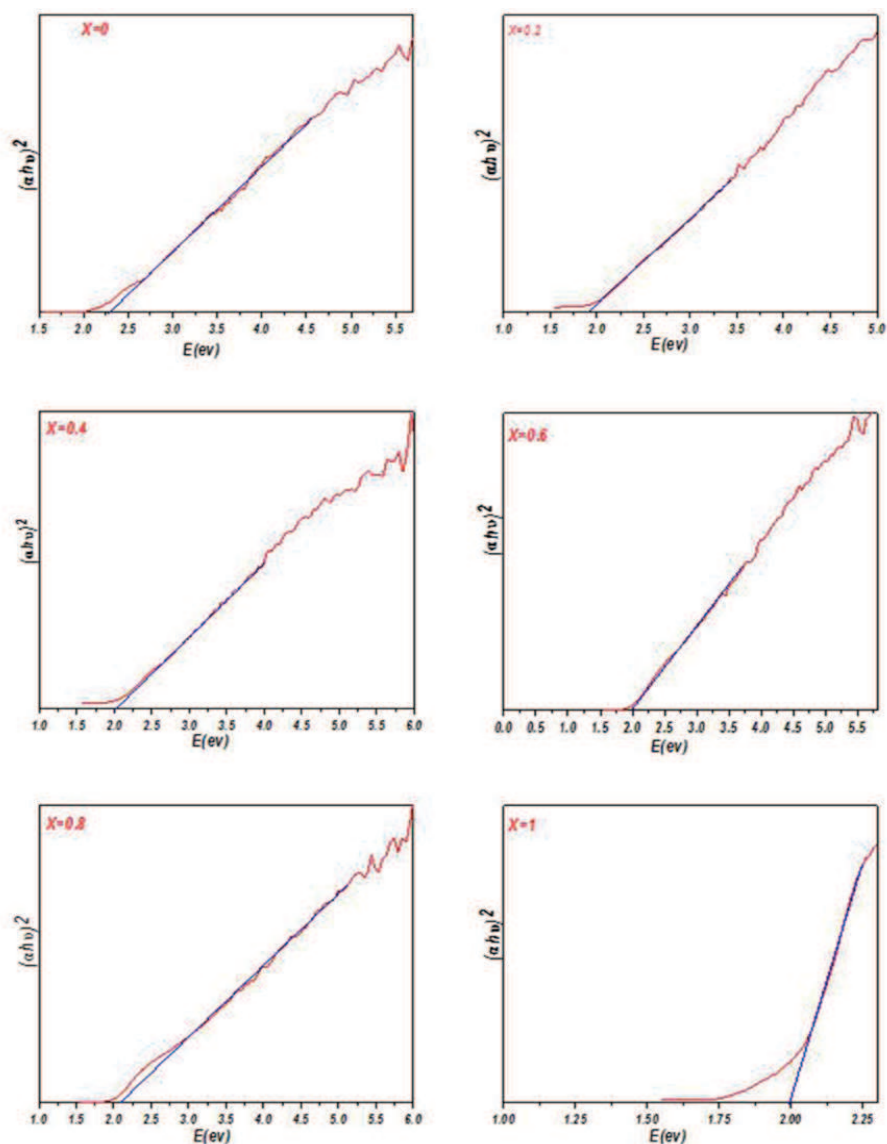
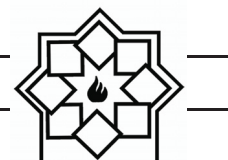
مواد اهمیت بسیاری دارند. برای تعیین مقادیر گاف انرژی (E_g) از رابطه‌ی مشهور تاک استفاده شد. همانطور که در شکل‌های (۶) نیز قابل مشاهده است با افزایش مقدار آهن، مقدار گاف انرژی از $2/30$ به $1/98$ الکترون‌ولت کاهش یافت (جدول ۳). کاهش گاف انرژی فریت آهن نسبت به فریت روی می‌تواند



شکل ۴- تصاویر FESEM $Zn_{0.2}Fe_{2.8}O_4$ (b), $Zn_{0.8}Fe_{2.2}O_4$ (a)



شکل ۵- تصاویر TEM Fe_3O_4 (b), $ZnFe_2O_4$ (a)



شکل ۶- نمودار مربوط به گاف انرژی نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$

جدول ۳- پارامترهای مغناطیسی و گاف انرژی نانو ترکیب $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$

نمونه	M_s (emu/g)	H_c (Oe)	M_r (emu/g)	$R = \frac{M_r}{M_s}$	E_g
$x=0$	۳/۳	۱/۸۴	۱/۳۴	۰/۰۸	۲/۳۰۲
$x=0/۲$	۱۵/۵۲	۱۲۳	۰/۳۸	۰/۰۴	۲/۱۹
$x=0/۴$	۹/۳۸	۲۸/۸۳	۳/۳۷	۰/۱۸	۲/۱۷
$x=0/۶$	۱۸/۵۴	۶۳/۹۹	۳/۷۳	۰/۲۳	۲/۱۵
$x=0/۸$	۱۶/۱۳	۹۳/۷۳	۰/۱۱	۰/۰۳	۲/۱۲
$x=1$	۴/۳۴	۱۰۲/۳۸	۱/۰۷	۰/۲۴	۱/۹۸



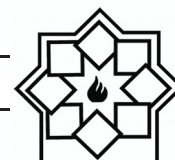
- of Cobalt Ferrite Nanoparticles by a Thermal Treatment Method”, *Nanomaterials*, Vol. 2010, pp. 75-83, 2010.
- [4] M. Naseri, E. B. Saion, H. Abbastabar Ahangar, M. Hashim, A. H. Shaari, “Simple preparation and characterization of nickel ferrite nanocrystals by a thermal treatment method”, *Powder Technology*, Vol. 212, pp. 80–88, 2012.
- [5] M. Naseri, M. K. Halimah, A. Dehzangi, A. Kamalianfar, E. B. Saion, B. Y. Majlis, “A comprehensive overview on the structure and comparison of magnetic properties of nanocrystalline synthesized by a thermal treatment method”, *Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 75, pp. 315-327, 2014.
- [6] Y. Wei, B. Han, X. Hu, Y. Lin, X. Wang, X. Deng, “Synthesis of Fe_3O_4 Nanoparticles and their Magnetic Properties”, *Procedia Engineering*, Vol. 27, pp. 632-637, 2012.
- [7] D. S. Mathew, R. Sh. Juang, “An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions”, *Chemical Engineering*, Vol. 129, pp. 51-65, 2007.
- [8] R. Y. Hong, B. Feng, L. L. Chen, G. H. Liu, H. Z. Li, Y. Zheng, D. G. Wei, “Synthesis, characterization and MRI application of dextran-coated Fe_3O_4 magnetic nanoparticles”, *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 42, pp. 290-300, 2008.
- [9] M. Pal, S. Lee, D. Kwon, J. Hwang, H. Lee, S. Hwang, and S. Jeon, “Direct immobilization of antibodies on Zn-doped Fe_3O_4 nanoclusters for detection of pathogenic bacteria Ana”, *Chimica Acta*, Vol. 952, pp. 81–87, 2017.
- [10] X. Tang, X. Hou, L. Yao, S. Hu, X. Liu, and L. Xiang, “Mn-doped ZnFe_2O_4 nanoparticles with enhanced performances as anode materials for lithium ion batteries Mater” *Materials Research Bulletin*, Vol. 57, pp. 127–134, 2014.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش نانوبلورها $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ با میزان آلایش (۱، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۴، ۰/۲، ۰، x) به روش عملیات گرمایی سنتز شدند. اندازه بلورکها با استفاده از رابطه شرر در گستره ۱۲–۲۴ نانومتر به دست آمد. با افزایش میزان آلایش Fe^{2+} ، اندازه نانوذرات افزایش و ثابت شبکه کاهش یافت. نتایج حاصل نشان داد که با تغییر مقدار Fe در ترکیب، برهم کنش یونها در جایگاهها مختلف شبکه نیز تغییر کرده و مغناطش اشباع نیز برای ترکیبهای مختلف، تغییر می کند و در نتیجه روند ثابتی برای مغناطش اشباع و وادرندهی مغناطیسی نداشته باشیم. همچنین مشخص شد که نانو فریت روی رفتار سوپرپارامغناطیس و فریت آهن و ترکیبهای فریت روی-آهن رفتار فرومغناطیس دارند. گاف انرژی این نانوذرات گستره ۱/۹۸–۲/۳۰ الکترون ولت به دست آمد که نشان می دهد این نانوذرات نیم رسانا هستند و گزینهی مناسبی برای فرآیند فتوکاتالیستی به شمار می روند.

مراجع

- [1] C. Murugesan, G. Chandrasekaran, “Structural and Magnetic Properties of $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ Ferrite Nanoparticles”, *Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 29, pp. 2887–2897, 2016.
- [2] A. Hajalilu, S. A. Mazalan, “A review on preparation techniques for synthesis of nanocrystalline soft magnetic ferrites and investigation on the effects of microstructure features on magnetic properties combustion Synthesis”, *Applied Physics A*, Vol. 6, pp. 122-280, 2016.
- [3] M. Naseri, E. B. Saion, H. Abbastabar Ahangar, A. H. Sharri, M. Hashim, “Simple Synthesis and Characterization



- adsorbent of Fe_3O_4 /PVA/spent coffee grounds”, Separation Science and Technology, 2019.
- [18] M. Naseri, E. B Saion, M. Hashim, A. H. Shaari, & H. A. Ahangar, “Synthesis and characterization of zinc ferrite nanoparticles by a thermal treatment method”, Solid State Communications, Vol. 151, pp. 1031-1035, 2011.
- [19] S. M Hoque, M. S. Hossain, S. Choudhury, S. Akhter, F. Hyder, “Synthesis and characterization of ZnFe_2O_4 nanoparticles and its biomedical applications”, Materials letters, Vol. 162, pp. 60-63, 2016.
- [20] M. Chireh, M. Naseri, “Effect of calcination temperature on the physical properties of LiFe_5O_8 nanostructures”, Advanced Powder Technology, Vol. 30, pp. 952-960, 2019.
- [21] M. G. Naseri, R. Ghasemi, “Structure and physical properties of $\text{Fe}_6\text{O}_8/\text{Ba Fe}_6\text{O}_{11}$ nano structure”, J Magn Magn Mater, Vol. 406, pp. 200–206, 2016.
- [22] N. Kislov, S. S. Srinivasan, Y. Emirov, & E. K. Stefanakos, “Optical absorption red and blue shifts in ZnFe_2O_4 nanoparticles”, Materials Science and Engineering: B, Vol. 153, pp. 70-77, 2008.
- [23] A. Sutka, G. Mezinskis, D. Jakovlevs, and V. Korsaks, “Sol-gel combustion synthesis of CdFe_2O_4 ferrite by using various reducing agents”, Australian Ceramic Society, Vol. 49, pp. 136, 2013.
- [11] M. P. Pileni, “Magnetic Fluids: Fabrication, Magnetic Properties, and Organization of Nanocrystals”, Advanced Functional Materials, Vol. 11, pp. 323, 2001.
- [12] M. Zamani, E. Naderi, M. Aghajanzadeh, M. Naseri, A. Sharafi, H. Danafar, “ $\text{Co}_1\text{-XZn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ based nanocarriers for dual-targeted anticancer drug delivery: Synthesis, characterization and in vivo and in vitro biocompatibility study”, Molecular Liquid, Vol. 274, pp. 60–67, 2019.
- [13] H. P. Klug, & L. E. Alexander, “X-ray diffraction procedures: for polycrystalline and amorphous materials. X-Ray Diffraction Procedures: For Polycrystalline and Amorphous Materials, 2nd Edition”, X-ray spectrometry, Vol. 4, pp. 992, 1975.
- [14] P. Mohn, “Magnetism in the solid state: an introduction”, Springer Science & Business Media, 2006.
- [۱۵] م. ناصری، الف. نادری، الف. سایون، "مطالعه خواص نانوذرات فریت سنتز شده به روش عملیات گرمایی"، نانومقیاس، شماره یک بهار ۱۳۹۵
- [16] A. Goldman, “Modern ferrite technology”, Springer Science & Business Media, 2006.
- [17] V. T. Le, T. M. Pham, D. V. Dat, O. Lebedeva, “Removal of Pb(II) ions from aqueous solution using a novel composite