فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۳۹۸

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 پرتوایکس (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 مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) در دمای اتاق بررسی شد و مشخص گردید که نانوذرات روی، رفتار سوپر پارامغناطیس و نانوذرات فریت روی–آهن و آهن رفتار فرو مغناطیس دارند. وجود مدهای ارتعاشی فلز–اکسید به وسیله‌ی طیف–سنج مادون قرمز (FT-IR) در نانوذرات روی–آهن تأیید شد. با به کارگیری طیف‌سنج فرابنفش مرئی (UV-visible) مقادیر گاف انرژی در محدوده ۱/۹۸ تا ۲/۳۰ الکترون–ولت تخمین زده شد.

۱– مقدمه

نانو مغناطیس شاخه‌ایی از فناوری نانو است که به بررسی رفتار مغناطیسی مواد در ابعاد نانو می‌پردازد. با گذار به ابعاد نانو، خواص مغناطیسی مواد به‌شدت تحت تأثیر اندازه‌ی نمونه قرار گرفته و ممکن است رفتاری کاملا 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 اپتیکی 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 [۶–۳]. 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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]

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 [۱۲-۸]. 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 $Zn(NO_3)_2.6H_2O$، نیترات آهن $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ و $Fe(NO_3)_2.9H_2O$ 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 λ=۱/۵۴ آنگستروم مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی ریخت‌شناسی و اندازه میانگین نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) 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)، ژل‌شدن (gelation)، خشک‌کردن (drying)، آسیاب‌کردن (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 نیترات‌های 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 پرتوایکس

برای بررسی ساختار و فازهای بلوری، پارامترهای شبکه،

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]

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.

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \qquad (۱$$

$$V = a^3 \qquad (۲$$

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. قلّه‌های به دست‌آمده از شکل (۱) مربوط به الگوهای پراش ایکس نمونه‌های کلسینه شده در دمای ۷۷۳ کلوین با نسبت (x=۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱) 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 (PDF:22-1012 ICDD گروه فضایی: Fd3m) و (PDF:00-039-0238 ICDD، گروه فضایی:Ie3m) مطابقت داشتند.

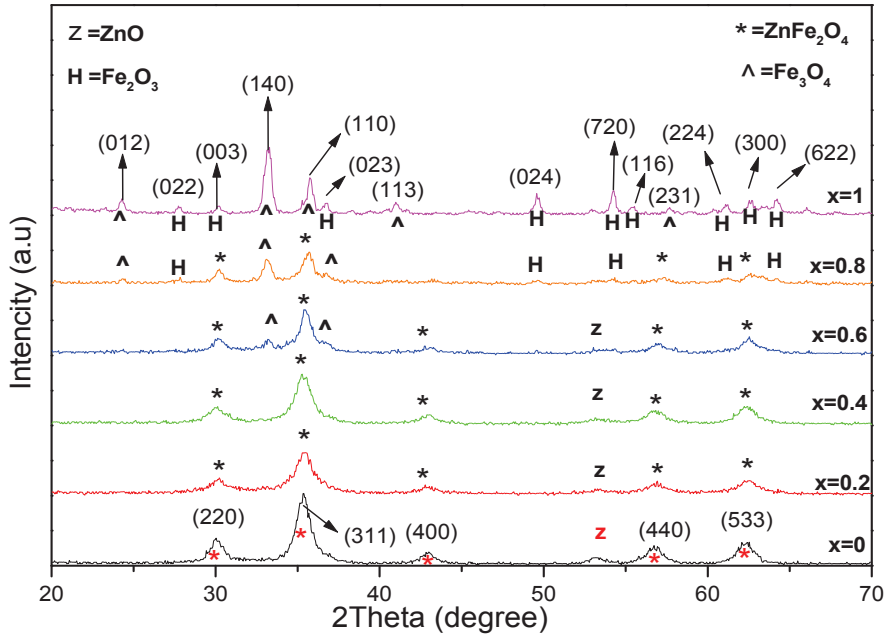
جدول ۱- شعاع مکان چهار وجهی و هشت وجهی

فرمول شیمیایی فریت	شعاع مکان چهار وجهی (A^o)	شعاع مکان هشت وجهی (A^o)
$ZnFe_2O_4$	۰/۶۵	۰/۷
Fe_3O_4	۰/۵۵	۰/۷۵

در ساختار بعضی از نمونه‌های کلسینه شده، صفحات براگ، فازهای ناخالصی α-Fe_2O_3 و ZnO وجود دارد. وجود فاز ناخالصی α-Fe_2O_3 با ساختار کوراندوم حاکی از آن است که در این فاز، تمامی کاتیون‌های Fe^{+3} در جایگاه هشت وجهی قرار گرفته‌اند این درحالی است که در فریت Fe_3O_4 با ساختار اسپینل معکوس، تمامی کاتیون‌های Fe^{+2} در جایگاه هشت وجهی و کاتیون‌های Fe^{+3} به طور یکسان در جایگاه‌های هشت وجهی وچهاروجهی توزیع شده‌اند. ترجیح کاتیون‌ها برای قرار گرفتن در جایگاه‌های چهاروجهی و هشت وجهی، به شعاع یونی کاتیون‌های آهن و روی (Fe^{+2} =۰/۸۳، Zn^{+2} =۰/۸۲ و Fe^{+3}=۰/۶۷)، 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[۱۴-۱۶].

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]



شکل ۱- الگوی پراش پرتوایکس نانو ساختارهای فریت روی-آهن $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$

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

نمونه	FWHM	2θ	Cos(θ)	a(A^0)	V(A^0)	Size(nm)
x=۰	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

۳-۲- بررسی نتایج طیف‌سنج مادون‌قرمز (FT-IR)

طیف‌سنجی مادون‌قرمز به منظور شناسایی ترکیب‌های آلی، گروه‌های عاملی و مدهای ارتعاشی موجود در ساختار نانوذرات به کار گرفته شده است. شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی طیف‌سنجی FT-IR با عدد موجی بین ۴۰۰ تا $4000cm^{-1}$ برای دو نمونه پالایش‌شده با (۰/۸ و x=۰/۲) می‌باشد. قلّه‌های وارون جذبی اصلی در محدوده‌ی ۶۰۲ تا $617cm^{-1}$ مربوط به مد ارتعاشی $O\leftrightarrow M_{tetra}$ و $O\leftrightarrow M_{octa}$ می‌باشد [۱۳]. قلّه وارون جذبی واقع در $2919\ cm^{-1}$ مربوط به مد ارتعاشی C-H از گروه‌های آلکیل است [۱۵]. قلّه وارون جذبی در۹۷۲، ۱۵۱۳، ۱۶۳۶ و $3735cm^{-1}$ به ترتیب مربوط به مد ارتعاشی C-O-C،

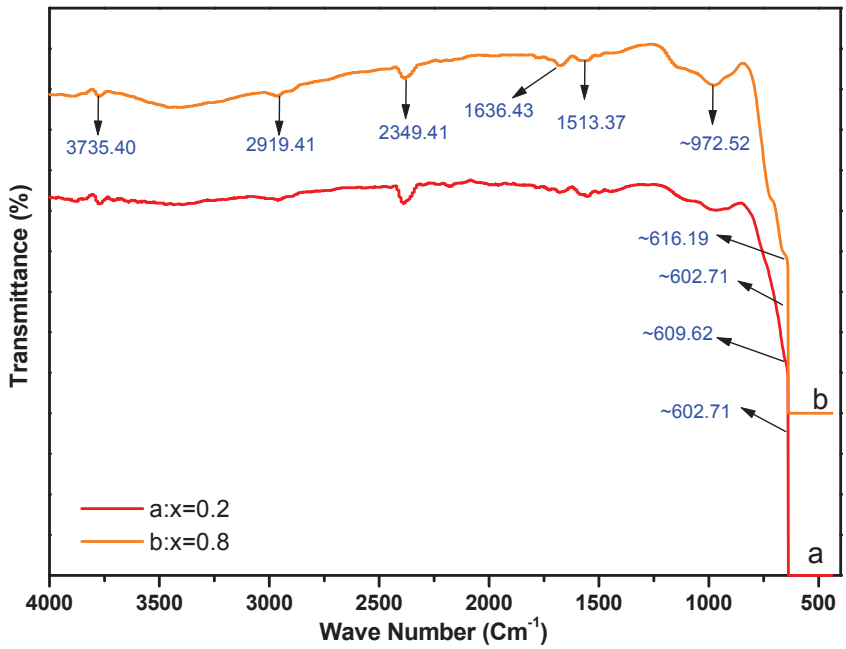
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]

H-C-H، C=O و O-H می‌باشد. قلّه وارون جذبی در حوالی $۲۳۴۹cm^{-1}$ به حضور دی‌اکسید کربن جذب‌شده روی سطح نانوذرات مربوط می‌شود [۱۸و۱۷،۴].

۳-۳- بررسی خواص مغناطیسی

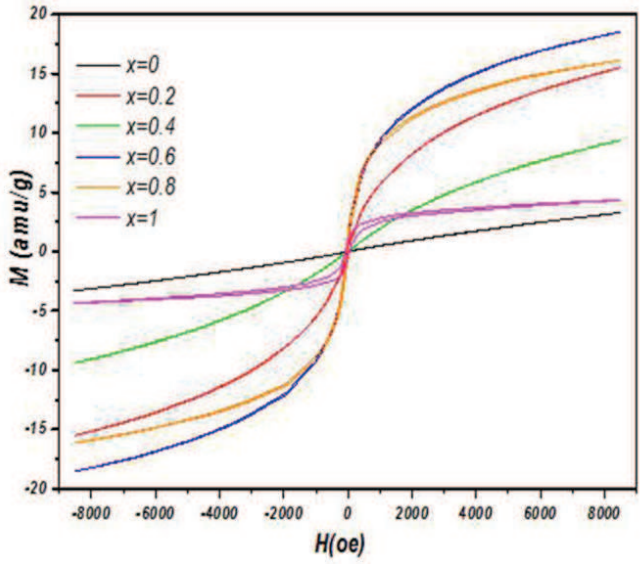
ویژگی‌های مغناطیسی نانوفریت‌های اسپینلی به عوامل متعددی مانند شرایط آماده‌سازی نمونه، مواد اولیه، دمای کلسینه و ... بستگی دارد که با تغییر هر یک از این عوامل، اندازه و نحوه‌ی توزیع یون‌ها در جایگاه‌های مختلف شبکه تغییر کرده و این مواد رفتار مغناطیسی متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۱۶]. با توجه به نمودار 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 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 حوزه‌ایی بودن ماده‌ی مغناطیسی و همچنین تغییر در نحوه‌ی توزیع یون‌ها در جایگاه‌های مختلف شبکه با تغییر مقدار x برابر ۰، ۲/.، ۴/.، ۶/.، 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].



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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]



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 نمونه‌ایی 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=۰/۲ و x=۰/۸ 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 [۲۱و۲۰].

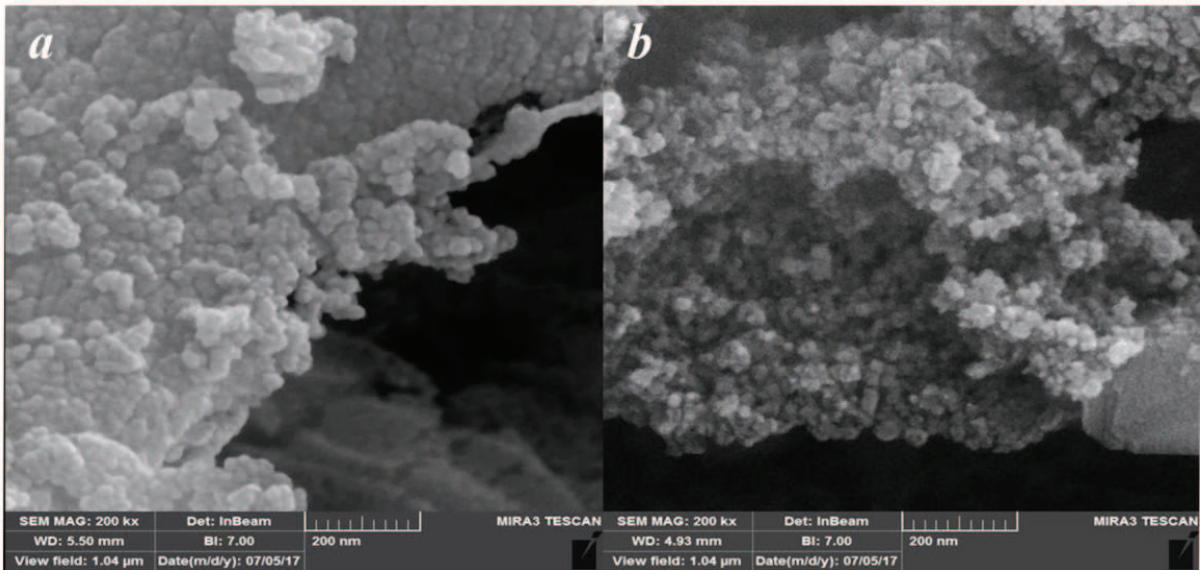
۳-۵- بررسی خواص اپتیکی

اساس کار طیف‌سنج جذبی مرئی-فرابنفش، اندازه‌گیری میزان جذب یک پرتو نوری توسط یک نمونه در محدوده‌ی طول موج ۲۰۰ تا۹۰۰ 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

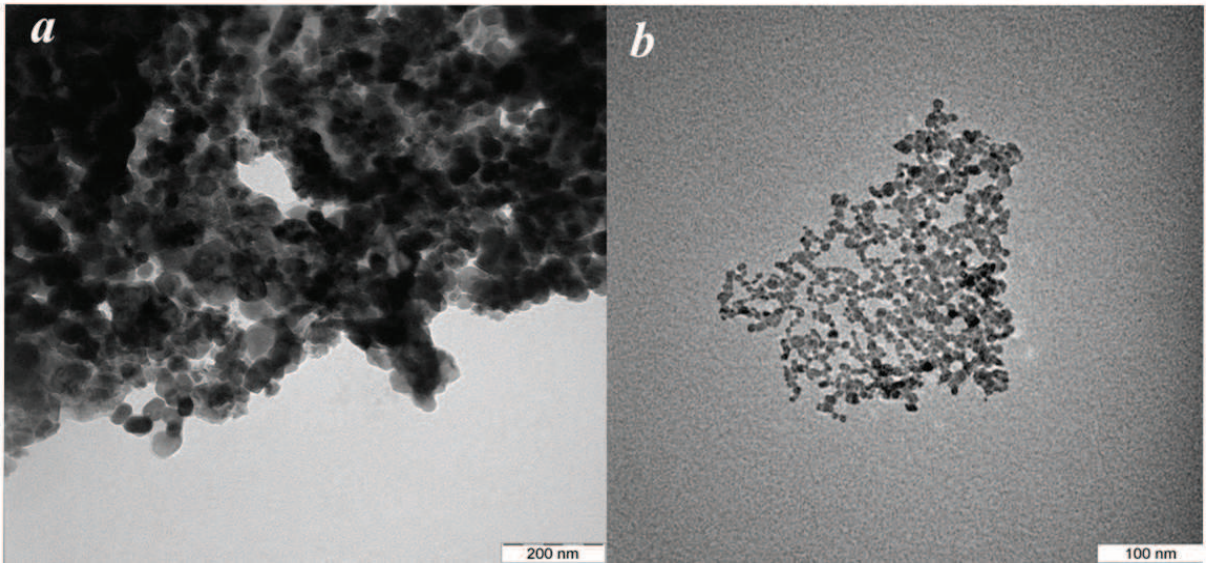
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]

مواد اهمیت بسیاری دارند. برای تعیین مقادیر گاف انـرژی (E_g) از رابطه‌ی مشهور تاک استفاده شد. همانطور که در شکل‌هـای (۶) نیز قابل مشاهده است با افزایش مقدار آهـن، مقـدار گـاف انرژی از ۲/۳۰ به ۱/۹۸ الکترون‌ولت کاهش یافـت (جـدول۳). کاهش گاف انرژی فریت آهن نسبت به فریت روی مـی‌توانـد ناشی از رسانایی الکتریکی بالای فریت آهن نـسبت بـه فریـت روی باشد همچنین با افزایش اندازه نانوذرات فضای بین اتمـی و دامنه ارتعاشات اتمی نیز افزایش یافته و پتانسیل الکتـرون‌هـا در ماده کاهش می‌یابد و در نتیجه اندازه گاف انرژی نیز کاهش می‌یابد [۲۳و۲۲].



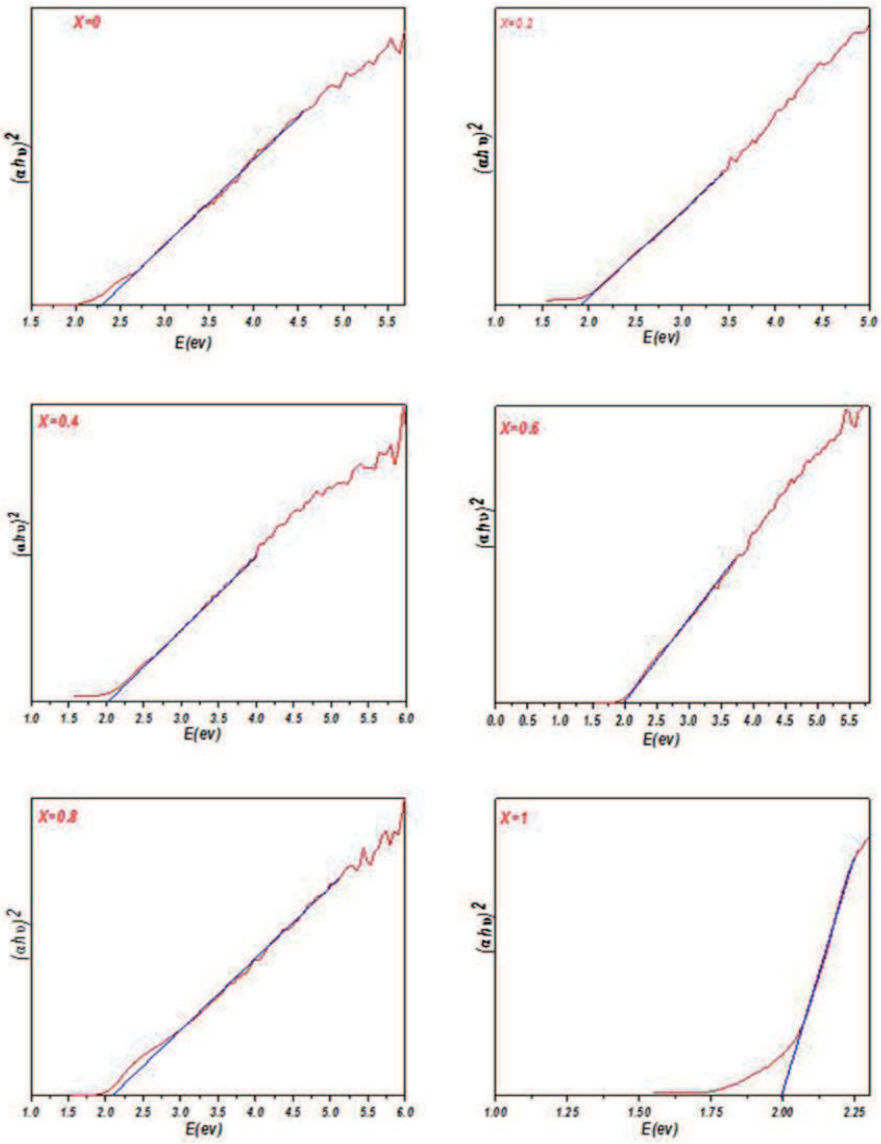
شکل ۴- تصاویر FESEM (a) $Zn_{0.8}Fe_{2.2}O_4$,(b) $Zn_{0.2}Fe_{2.8}O_4$



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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]



شکل ۶- نمودار مربوط به گاف انژی 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=۰	۳/۳	۱/۸۴	۱/۳۴	۰/۰۸	۲/۳۰۲
x=۰/۲	۱۵/۵۲	۱۲۳	۰/۳۸	۰/۰۴	۲/۱۹
x=۰/۴	۹/۳۸	۲۸/۸۳	۳/۳۷	۰/۱۸	۲/۱۷
x=۰/۶	۱۸/۵۴	۶۳/۹۹	۳/۷۳	۰/۲۳	۲/۱۵
x=۰/۸	۱۶/۱۳	۹۳/۷۳	۰/۱۱	۰/۰۳	۲/۱۲
x=۱	۴/۳۴	۱۰۲/۳۸	۱/۰۷	۰/۲۴	۱/۹۸

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانوبلورها $Zn_{1-x}Fe_xFe_2O_4$ با میزان آلایش (x=۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱) 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 می‌کند و در نتیجه روند ثابتی برای مغناطش اشباع و وادرندگی 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 می‌دهد این نانوذرات نیم‌رسانا هستند و گزینه‌ی مناسبی برای فرآیند فتوکاتالیستی به شمار می‌روند.

مراجع

[1] C. Murugesan, G. Chandrasekaran, "Structural and Magnetic Properties of $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ 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 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 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 $ZnFe_2O$ nanoparticles with enhanced performances as anode materials for lithium ion batteries Mater" Materials Research Bulletin, Vol. 57, pp. 127–134, 2014.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]

[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, "Co1−XZnxFe2O4 based nanocarriers for dual-targeted anticancer drug delivery: Synthesis, characterization and in vivo and in vitro biocompatibility study", Molocular 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 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 Fe_6 O8/Ba Fe_6 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 andblue 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.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.2.6.9]