

ارتقاء خواص ساختاری، میکروساختاری و مغناطیسی در نانو ذرات فریت بیسموت

جانشانی شده با باریم و اربیم

المیرا دهقان و داود ثانوی خشنود*

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱۹

تاریخ تصحیح: ۹۳/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۸

چکیده:

در این پروژه نانو ذرات $Bi_{1-x}Ba_yEr_xFeO_3$ (BB_yE_xFeO) با مقادیر $0.17 \leq y \leq 0.13$ و $0.2 \leq x \leq 0.1$ به روش سل-ژل ساخته شده‌اند. خواص ساختاری، میکروساختاری و مغناطیسی این نانوذرات با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی نشر میدان (FE-SEM)، طیف سنجی تبدیل فوریه (FT-IR) و مغناطش سنجی ارتعاشی (VSM) در دمای اتاق مشخصه‌یابی شده‌اند. الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های BB_yE_xFeO انتقال فاز از ساختار رومبهدرال به ساختار تتراگونال، با افزایش مقدار باریم را نشان می‌دهد. همچنین تجزیه و تحلیل الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های $BB_{0.15}Er_xFeO_3$ نشان می‌دهد که با افزایش میزان غلظت اربیم انتقال ساختار بلوری از فاز رومبهدرال-تتراگونال به فاز رومبهدرال-اورتورومبیک اتفاق می‌افتد. تصاویر FE-SEM مربوط به نمونه‌ها کاهش اندازه دانه‌ها با افزایش غلظت اربیم را نشان می‌دهد، همچنین متوسط اندازه دانه‌ها ۱۰۰-۵۰ نانومتر است. با توجه به حلقه‌ی پسماند نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مغناطش باقی‌مانده مربوط به نمونه‌ی $BB_{0.15}Er_{0.1}FeO_3$ ($M_r=0.98 \text{ Rgu/gr}$) نسبت به BB_yE_xFeO ($M_r=0.51 \text{ Rgu/gr}$) حدود دو برابر شده است که دلیل این امر را می‌توان از بین رفتن ساختار اسپین چرخان با افزایش غلظت Er^{3+} دانست.

واژگان کلیدی: فریت بیسموت، سل-ژل، مغناطش، نانو ذرات

۱- مقدمه:

مواد مولتی‌فروئیک^۱ با داشتن سه خاصیت هم زمان فروئیکی (فرومغناطیس^۲، فروالکتریک^۳ و فروالاستیک^۴) در دهه‌های اخیر باعث جلب نظر زیادی از نظر کاربرد در ابزارهای چند منظوره شده‌اند [۱،۲]. ساختارهای پروسکایت^۵ (با فرمول عمومی ABO_3) مانند $BiFeO_3$ ، $REMnO_3$ و $RECrO_3$ (عناصر خاکی کمیاب RE) یکی از بزرگترین گروه‌ها از مواد مولتی-فروئیک را تشکیل می‌دهند [۳،۴]. در بین مواد مولتی‌فروئیک فریت بیسموت ($BiFeO_3$) به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. لایه‌ی نازک این ماده با پلاریزاسیون اشباع $90 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ، از نظر مغناطیسی یک پادفرومغناطیس ضعیف با مومنوم مغناطیسی $8-10 \text{ emu}/\text{cm}^3$ می‌باشد. توجه زیاد به این ماده به دلیل دمای کوری بالا ($T_c=1103\text{K}$) و دمای نیل ($T_N=643\text{K}$) بوده، که کاربردهای دمای بالای این ماده را امکان پذیر می‌سازد [۵]. از لحاظ ساختاری بلور BFO دارای

* نویسنده مسوول: استادیار فیزیک حالت جامد، دانشگاه سمنان

d_khoshnood@yahoo.com

¹ Multiferroic
² ferromagnetism
³ ferroelectricity
⁴ ferroelasticity
⁵ perovskite

ساختار پروسکایت رومبوهدرال، با گروه فضایی R3c است. BFO در زیر دمای نیل دارای ساختار اسپین چرخان با طول موج ۶۲ نانومتر در راستای محور $[110]_H$ است که این امر منجر به صفر شدن مغناطش کل در این ساختار می‌شود، و علت اصلی در ناکارآمدی این نمونه در برنامه‌های عملی است [۶]. از این رو بسیاری از تحقیقات در زمینه بالا بردن خواص مغناطیسی این ترکیبات انجام شده است. از جمله روش‌ها برای بالا بردن خواص مغناطیسی این ترکیبات از بین بردن ساختار اسپین چرخان است. یکی از روش‌ها برای از بین بردن این ساختار جانشانی عناصر خاکی نادر (Ho, Er, Y, ...) و فلزات گروه دوم جدول تناوبی (Ba, Ca, Sr, ...) به جای بیسموت و عناصر واسطه (Mn, Co, Cr, ...) به جای آهن است [۷، ۸]. در سال‌های اخیر جانشانی یون Ba^{2+} به جای یون بیسموت Bi^{3+} موفقیت‌آمیز بوده و رفتار فرومغناطیسی فریت بیسموت خالص را در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش داده است [۹، ۱۰].

بنابراین برای بهبود بیشتر خواص مغناطیسی، یک یون خاکی نادر به جای بیسموت در نمونه‌ها با فرمول شیمیایی $Bi_{1-y}Ba_yFeO_3$ جانشانی شده است. پژوهش‌های قبلی بهبود خواص مغناطیسی در ترکیبات $Bi_{1-y}Ba_yFeO_3$ را گذارش کرده‌اند [۱۱]. از این رو به منظور دست یابی به این هدف، ابتدا ترکیباتی با مقادیر $0/17 \leq y \leq 0/13$ آماده شد و سپس برای بهبود خواص مغناطیسی یون Er^{3+} با مقادیر متفاوت در ترکیبات $Bi_{1-y}Ba_yFeO_3$ جای یون بیسموت جانشانی شد. در این پژوهش خواص ساختاری، میکروساختاری و مغناطیسی نانو ذرات $(BB_yEr_xFeO) Bi_{1-x-y}Ba_yEr_xFeO_3$ با مقادیر $0/17 \leq y \leq 0/13$ و $0/2 \leq x \leq 0/0$ مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش آزمایش

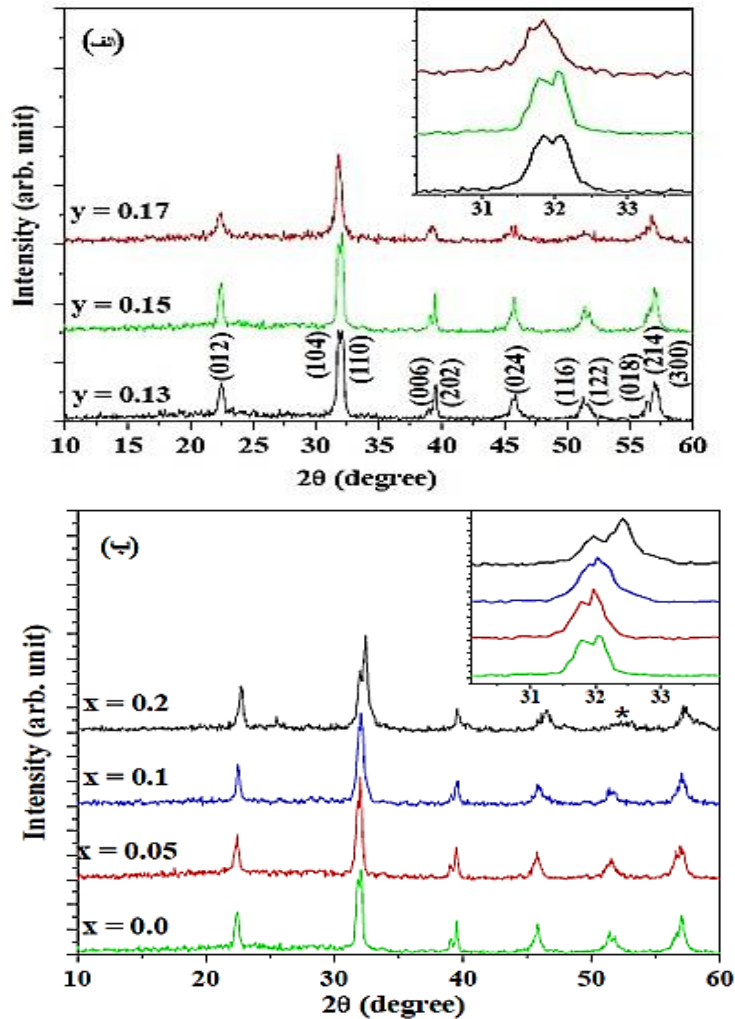
در این پروژه نانو ذرات $Bi_{1-x-y}Ba_yEr_xFeO_3$ به روش سل-ژل سنتز شده‌اند. برای سنتز مواد اولیه شامل، نترات بیسموت ($(Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O)$)، نترات آهن ($(Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O)$)، نترات باریم ($(Ba(NO_3)_2)$) و اکسید اربوم ((Er_2O_3)) بر اساس استکیومتری مناسب در محلول رقیق شده با اسید نیتریک و در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد حل شدند. پس از انحلال کامل اسید تارتاریک ($C_6H_6O_7$) را به عنوان کمپلکس ساز به محلول اضافه کردیم. این محلول زرد رنگ در بازه ۶۰-۵۰ درجه سانتی گراد برای جلوگیری از ایجاد رسوب و ایجاد یک محلول همگن به مدت چند ساعت هم زده شد. در ادامه با فرآیند حرارت‌دهی حلال شروع به تبخیر شدن می‌کند و ابتدا محلول به حالت کلوئیدی در می‌آید و سپس ژل شکل می‌گیرد. پس از آن ژل حاصل به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد خشک شده و در نتیجه این مرحله آب و گازهای NO_2 و CO_2 از ژل خارج و پیوندهای اولیه شکسته می‌شوند و ماده اصلی حاصل می‌شود. در ادامه، برای اطمینان از خشک شدن، ژل به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت، سپس برای اطمینان از خروج گازها به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت و در نهایت برای تشکیل ترکیب مورد نظر و از بین بردن تمام ناخالصی‌های محصول به وسیله‌ی اسید نیتریک رقیق شده شستشو و به مدت ۱ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد کلسینه گردید.

برای تجزیه و تحلیل ساختاری نانو پودرهای تولید شده از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) با مشخصات (Bruker D8 Advance) و تابش تک فام Cu Ka ($\lambda \sim 1.5406 \text{ \AA}$) در گستره 2θ بین ۹۰-۱۰ درجه و با گام‌های ۰/۰۵ درجه در دمای اتاق استفاده شد. اندازه‌ی ذرات و مورفولوژی نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی نشر میدان (FE-SEM) با مشخصات (LEO 912 AB, Carl Zeiss SMT, Germany, 120 kV) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور تایید تشکیل ساختار پروسکایت، آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه (FT-IR) دستگاه (FT-IR SHIMADZU) انجام گرفت. در پایان خواص مغناطیسی این نانو پودرها به وسیله دستگاه مغناطیس سنجی ارتعاشی (VSM) با مشخصات (Lakeshore 7400) در دمای اتاق انجام پذیرفت.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها و نتایج

۳-۱ تجزیه و تحلیل ساختاری

شکل ۱ نمایش الگوهای XRD نانوذرات $\text{Bi}_{1-y-x}\text{Ba}_y\text{Er}_x\text{FeO}_3$ با مقادیر $y = 0.15$ و $x = 0.2, 0.1, 0.05, 0.0$ در دمای اتاق پس از کلسینه شدن را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده شده است، عدم حضور فاز ناخالصی در الگوهای پراش حاکی از تولید نانو ذرات به طور کامل تک‌فاز می‌باشند. با این حال، مقدار ناچیزی فاز ناخالصی ErFeO_3 تنها در نمونه با 0.15 $x = 0.2$ و $y =$ دیده می‌شود. در مرحله‌ی اول اثر جاننشانی یون باریم (Ba^{2+}) در ساختار فریت بیسموت مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور قله غالب در محدوده‌ی $2\theta \leq 33$ در شکل (۱-الف) نشان داده شده است، با توجه به شکل روشن است که صفحات (۱۰۴) و (۱۱۰) با افزایش غلظت باریم به سمت زوایای پائین‌تر جابه‌جا شده‌اند. بنابراین بر اساس قانون براگ پارامترهای شبکه افزایش یافته است. انبساط شبکه را می‌توان به بزرگتر بودن شعاع یونی باریم (1.49 \AA) نسبت به شعاع یونی بیسموت (1.17 \AA) نسبت داد [۱۲]. علاوه بر این تمام قله‌های دو شاخه مانند $\{(104) \text{ و } (110)\}$ ، $\{(006) \text{ و } (202)\}$ ، $\{(116) \text{ و } (122)\}$ و قله‌ی سه شاخه $\{(018), (214) \text{ و } (003)\}$ در یک قله ادغام شده‌اند. این نشان می‌دهد که با جاننشانی باریم به جای بیسموت در فریت بیسموت یک انتقال فاز از ساختار رومبوهدرال به ساختار تتراگونال در حال وقوع است. این نتیجه در توافق خوبی با مقالات یاد شده است [۹،۱۰]. از سوی دیگر برای بررسی جاننشانی یون اربوم (Er^{3+}) در $\text{Bi}_{0.85}\text{Ba}_{0.15}\text{FeO}_3$ از روش مشابه استفاده شد. که می‌توان تغییرات جزئی را در شکل (۱-ب) مشاهده کرد. با توجه به کوچکتر بودن شعاع یونی اربوم (1.03 \AA) نسبت به شعاع یونی بیسموت (1.17 \AA) جابه‌جایی قله‌های اصلی پراش به سمت زوایای بزرگتر است [۱۳]. علاوه بر این با مقایسه قله‌های XRD در اطراف 57° و $39, 51 = 2\theta$ درمی‌یابیم که شدت قله‌های (006) ، (122) و (108) با افزایش غلظت اربوم کاهش می‌یابد. علاوه بر این قله‌ی جدیدی در $2\theta = 26^\circ$ در نمونه‌ی $x = 0.2$ ایجاد شده است که در (شکل ۱-ب) قابل مشاهده است. این روند نشان دهنده‌ی وقوع گذار بلوری است که در آن می‌توان به هم‌زیستی ساختار رومبوهدرال-تتراگونال و رومبوهدرال-اورتورومبیک اشاره کرد.



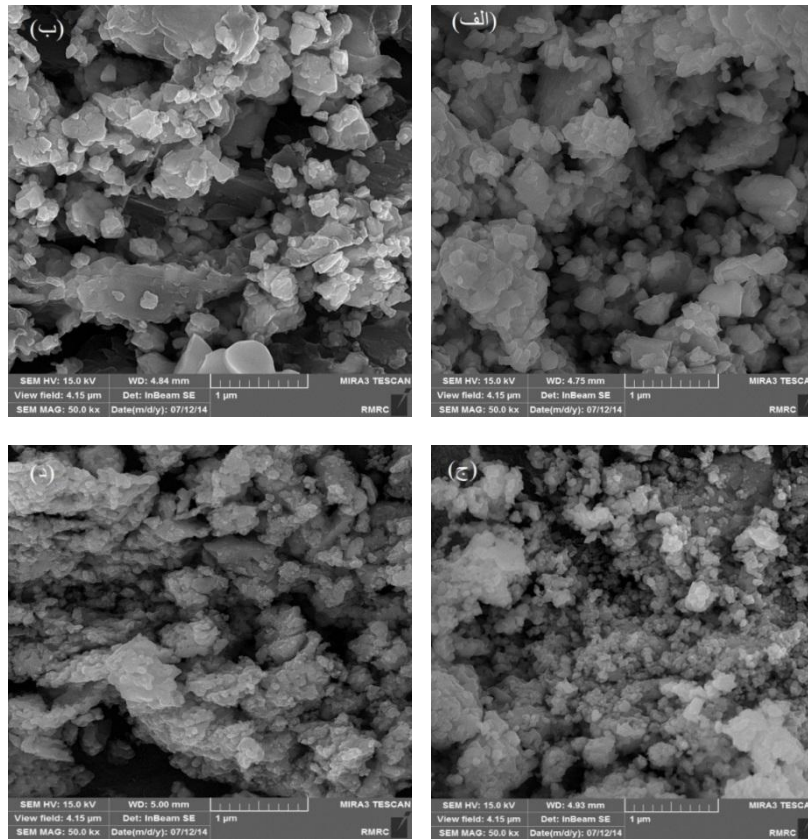
شکل ۱- نمودارهای پراش پرتو X نمونه‌های فریت بیسموت جانشانی شده با اربیم و باریوم

الف) $\text{Bi}_{1-y}\text{Ba}_y\text{FeO}_3$ ب) $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{FeO}_3$

و داخل شکل‌ها، بزرگنمایی جابه‌جایی قله اصلی پراش ترکیبات را نشان می‌دهد.

۳-۲ آنالیز میکروسکوپ الکترونی نشر میدان

تصاویر FE-SEM جهت بررسی مورفولوژی ذرات و تشخیص ابعاد دانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تصاویر نتایج حاصل از پهن‌شدگی قله‌های براگ را تأیید می‌کند. تصاویر FE-SEM که در ادامه می‌آیند، مربوط به ترکیب $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0.2, 0.1, 0.05, 0.0$) هستند. همان‌گونه که در (شکل ۲) مشخص است، اندازه دانه‌ها به کمتر از ۶۲ نانومتر (۴۰-۵۰ نانومتر) رسیده است. این اندازه برای دانه‌ها از آن جهت مناسب به نظر می‌رسد که می‌تواند ساختار اسپین چرخان در فریت بیسموت را لغو کند و از تکمیل شدن آن جلوگیری کند. این کوچک شدن ابعاد می‌تواند به دو دلیل باشد، (۱) استفاده از روش سل-ژل و دمای کلسیناسیون به نسبت پایین ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد (۲) جانشانی یون اربیم با شعاع یونی ($r_{\text{Er}} = 1.03 \text{ \AA}$) به جای یون بیسموت ($r_{\text{Bi}} = 1.17 \text{ \AA}$) در شبکه. همچنین تصاویر نشان می‌دهد دانه‌ها تقریباً یکدست هستند که این خود نشان‌دهنده خلوص مناسب ماده است.

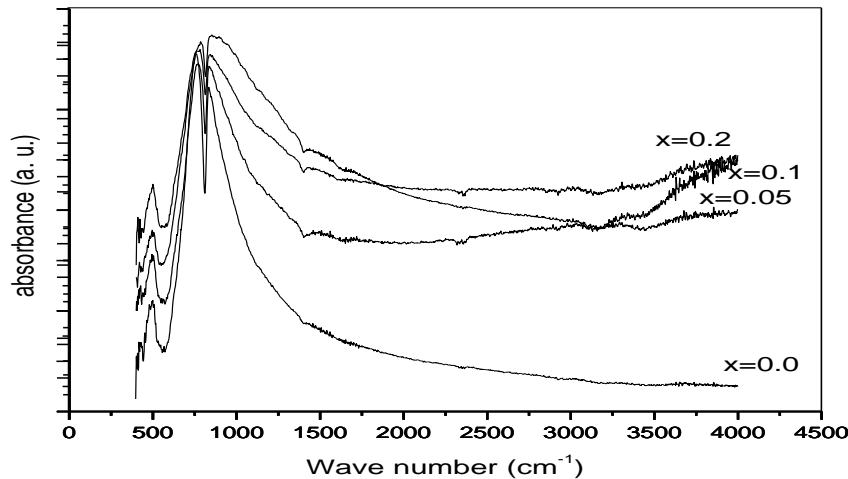


شکل ۲- تصاویر FE-SEM مربوط به نانوپودرهای $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{Fe}_x\text{FeO}_3$
 (الف) $x = 0.1$ (ب) $x = 0.15$ (ج) $x = 0.1$ (د) $x = 0.2$

۳-۳ آنالیز تبدیل فوریه

آنالیز FT-IR می‌تواند تاییدی برای ساختار پروسکایت نمونه‌ها باشد. به همین جهت طیف جذبی تبدیل فوریه برای تمام نمونه‌های $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{Fe}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0.1, 0.15, 0.1$ و 0.2) تهیه شده است. همان طور که ذکر شده است، نانو پودرهای تهیه شده در کار حاضر به روش سل-ژل و با استفاده از اسید تارتاریک به عنوان کمپلکس‌ساز سنتز شده‌اند. در طیف مربوط به نمونه‌ها (شکل ۳) همواره قله‌های تیز در محدوده بین ($400-700 \text{ cm}^{-1}$) مشاهده می‌شود، که این قله‌ها به پیوندهای موجود در اکسیدهای فلزی مربوط می‌شود، که به علت سنگینی پیوندها معمولاً در محدوده انرژی‌های بالا مشاهده می‌شود. یکی از این پیوندها، پیوند کششی پادمتقارن و پیوند خمشی Fe-O ($400-600 \text{ cm}^{-1}$) است که از مشخصات گروه‌های FeO_6 در سیستم‌های پروسکایتی است. پیوندهای دیگر از جمله پیوندهای ارتعاشی Er-O، Bi-O و پیوند کششی Ba-O به این ناحیه مربوط می‌شود. قله ملایم در محدوده عدد موج ($1000-1350 \text{ cm}^{-1}$) و (1450 cm^{-1}) مشخصه گروه‌های C-O و C-H می‌باشد. قله‌های نشان‌دهنده NH_3 و یون NO_3^- در منحنی FT-IR در گستره‌ی باندی ($800-1000 \text{ cm}^{-1}$) مشاهده می‌شوند، همچنین قله پهن و ملایم موجود در حدود عدد موج (3425 cm^{-1}) مربوط به حضور آب در نمونه است و پیوند O-H را نشان می‌دهد. که البته با توجه به دمای بکار رفته برای کلسیناسیون، در نمونه‌های سنتز شده دیده نمی‌شود. باید یادآوری

کرد، عمق این قله‌ها هم نشان‌دهنده میزان وجود پیوندهای یادشده در ترکیب است. به همین دلیل می‌توان در نظر داشت که سهم بیشتر پیوندهای موجود در این ترکیب به پیوندهای اصلی ساختار پروسکایتی فریت بیسموت اختصاص دارد. داده‌های مربوط به طیف نمونه‌ها در (جدول ۱) فهرست شده‌اند [۱۴].



شکل ۳ - طیف‌های تبدیل فوریه نمونه $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0/0, 0/0.5, 0/1$ و $0/2$) در دمای اتاق.

جدول ۱ - داده‌های طیف FT-IR مربوط به نمونه‌های $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0/0, 0/0.5, 0/1$ و $0/2$).

مدهای FT-IR	$x=0/0$	$x=0/0.5$	$x=0/1$	$x=0/2$
Fe-O	۵۵۷,۳۹	۵۷۰,۸۹	۵۶۵,۱۰	۵۵۹,۳۲
NO_3^-	۸۱۱,۹۸	۸۱۱,۹۸	۸۱۳,۹۰	۸۱۳,۹۰

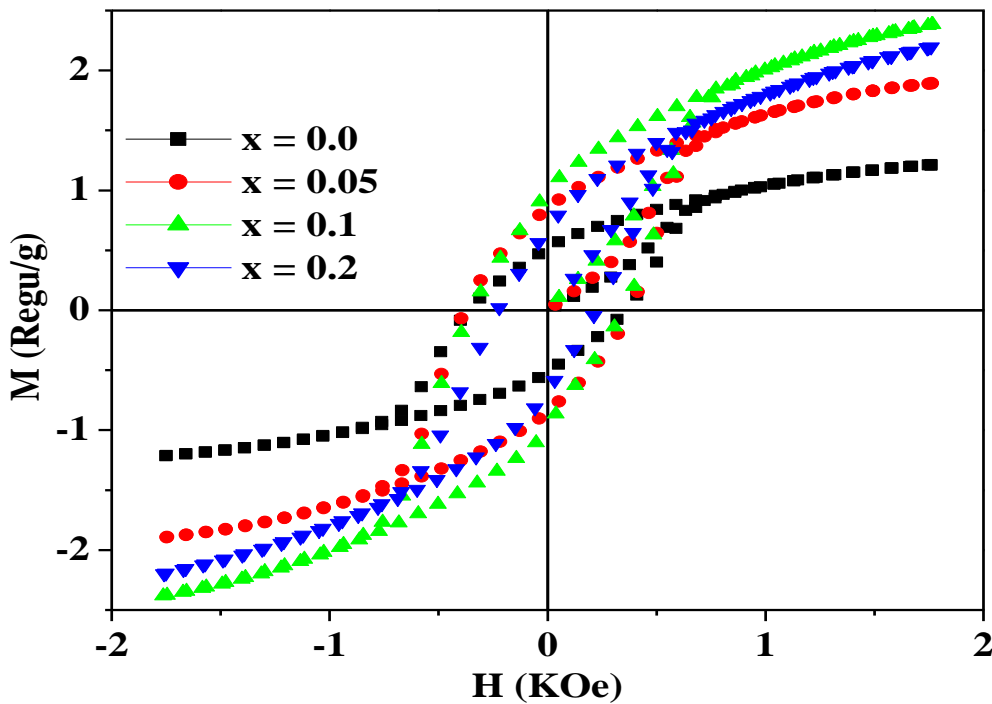
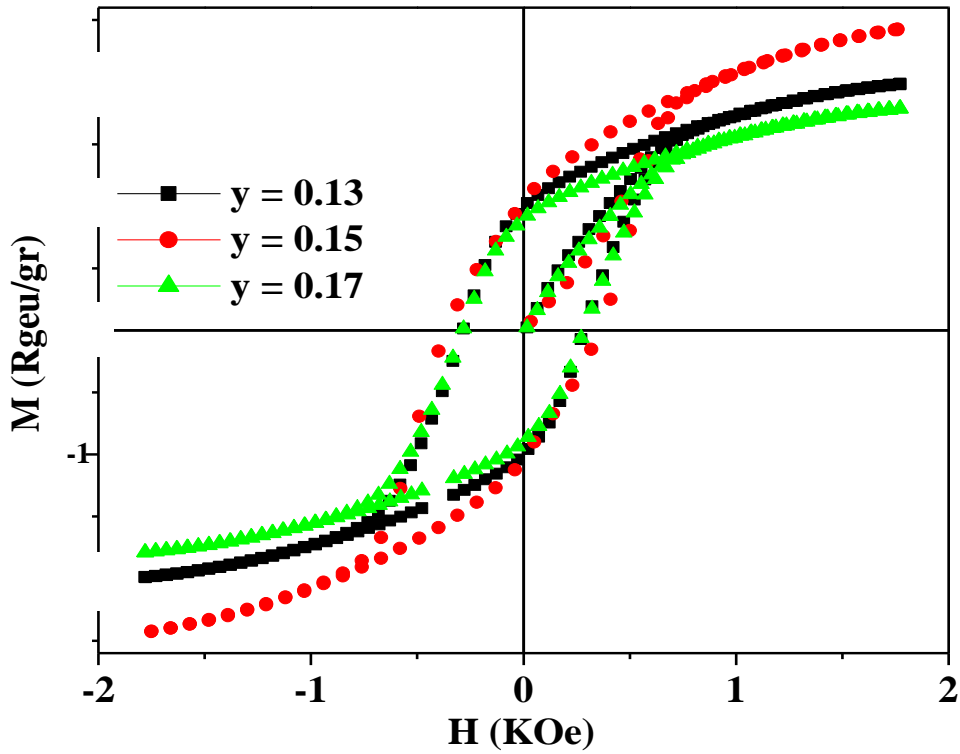
۳-۴ مغناطیس سنجی ارتعاشی

برای افزایش خواص مغناطیسی فریت بیسموت خالص ابتدا میزان تغییر خاصیت مغناطیسی این مواد را با جانشانی باریم (Ba^{2+}) با مقادیر (۱۳، ۱۵ و ۱۷ درصد) به جای یون بیسموت (Bi^{3+}) را بررسی می‌کنیم. (شکل ۴- الف) حلقه پسماند مغناطیسی (M-H) مربوط به نانو ذرات $\text{Bi}_{1-y}\text{Ba}_y\text{FeO}_3$ ($y = 0/13, 0/15$ و $0/17$) در دمای اتاق را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌بینیم که مقادیر ماکزیمم (H_c) و (M_r) مربوط به نمونه $y = 0/15$ است [۱۰]. این پدیده را می‌توان مرتبط با از بین رفتن ساختار اسپین چرخان با جانشانی باریم دانست. با افزایش بیشتر باریم از مقدار $y = 0/15$ ساختار اسپین چرخان از بین رفته و نمونه‌ها تبدیل به آنتی فرومغناطیس خطی شده و خاصیت مغناطیسی آن کاهش می‌یابد، از این رو به منظور افزایش بیشتر خواص مغناطیسی نمونه‌ها Er^{3+} به جای یون‌های Bi^{3+} در نمونه $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{FeO}_3$ جانشانی شده‌اند. حلقه‌ی پسماند مغناطیسی در دمای اتاق برای نانو ذرات $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0/0, 0/0.5, 0/1$ و $0/2$) در (شکل ۴- ب) نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم خاصیت مغناطیسی با افزایش غلظت اربوم افزایش می‌یابد و مغناطش اشباع

نمونه‌ی $\text{Bi}_{0.75}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_{0.1}\text{FeO}_3$ نسبت به $\text{Bi}_{0.85}\text{Ba}_{0.15}\text{FeO}_3$ حدود دو برابر بزرگتر است [۹،۱۰]. دلایل افزایش خاصیت مغناطیسی با جانشانی اربوم در $\text{Bi}_{0.85}\text{Ba}_{0.15}\text{FeO}_3$ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: آنچه به عنوان دلیل برای این تغییرات مغناطیسی می‌توان در نظر داشت، تغییراتی است که در پی ورود باریم و اربوم با مقادیر متفاوت در ساختار رخ داده است. به این صورت که ورود اولیه باریم با شعاع یونی بزرگتر نسبت به شعاع یونی بیسموت باعث تغییر در دوره چرخش اسپینی شده است. علاوه بر آن بهبود مغناطیسی بارزتر زمانی به وقوع پیوسته است که یون اربوم که اختلاف شعاعی زیادی با یون بیسموت دارد، وارد ساختار درونی ماده شده است و تنش را در ساختار نمونه‌ها بالاتر برده است، با تغییر یافتن بیشتر سلول‌ها و ساختار بلوری ماده کاملاً ساختار چرخشی اسپین‌ها بهم ریخته است و آن‌ها را تبدیل به فرومغناطیس زاویه‌دار^۱ کرده است. به نظر می‌رسد، حضور اربوم در ساختار که با تغییر گروه فضایی ماده نیز همراه بوده است، باعث تغییر در زاویه پیوند $\text{Fe}^{3+}-\text{O}-\text{Fe}^{3+}$ که عامل اصلی در برهم‌کنش پادفرومغناطیس فریت بیسموت است، شده است و ساختار اسپین چرخشی را از بین برده است. همانطور که در (شکل ۴-ب) مشاهده می‌شود خاصیت مغناطیسی $\text{Bi}_{0.65}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_{0.2}\text{FeO}_3$ کمی کاهش می‌یابد دلیل این امر را می‌توان به وجود فاز ناخالصی ErFeO_3 نسبت داد. البته با وجود، این کاهش مغناطش این ترکیب نسبت نمونه‌ی فاقد اربوم بیشتر است. بالا رفتن میزان مغناطش اشباع و باقیمانده نشان‌دهنده تأثیر مناسب و بهبود خاصیت مغناطیسی با افزودن این دو یون به فریت بیسموت خالص است [۱۵].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نانو ذرات $\text{Bi}_{1-x-y}\text{Ba}_y\text{Er}_x\text{FeO}_3$ با استفاده از اسید تارتاریک و به روش سل-ژل تهیه شده‌اند. با جانشانی در BFO بر اساس مشاهدات تغییر ساختار از رومبوهدرال به اورتورومبیک قابل مشاهده است. تجزیه و تحلیل الگوهای پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) تغییر ساختار بلوری از فاز رومبوهدرال-تتراگونال به رومبوهدرال-ارتورومبیک با افزایش غلظت اربوم در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در ترکیبات $\text{Bi}_{1-y}\text{Ba}_y\text{FeO}_3$ در نمونه‌ی $y=0.15$ مقدار مغناطش باقی‌مانده و میدان وادارنده دارای ماکزیمم مقدار است. علاوه بر این، افزایش قابل توجهی را در خاصیت مغناطیسی ترکیبات $\text{BB}_{0.15}\text{E}_x\text{FO}$ با افزایش غلظت اربوم تا $x=0.1$ را مشاهده می‌کنیم. با این حال خاصیت مغناطیسی با افزایش غلظت اربوم $x=0.2$ کمی کاهش می‌یابد.



شکل ۴: منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های فریت بیسموت جانشانی شده با اربیم و باریوم (الف) $\text{Bi}_{1-y}\text{Ba}_y\text{FeO}_3$ (ب) $\text{Bi}_{0.85-x}\text{Ba}_{0.15}\text{Er}_x\text{FeO}_3$ در دمای اتاق.

۵- منابع:

- [1] W. Eerenstein, N. D. Mathur, J. F. Scott, *Nature*, **442** (2006) 759.
- [2] D. I. Khomskii, *J. Magn. Magn. Mater.*, **306** (2006) 1.
- [3] D. Lebeugle, D. Colson, A. Forget, M. Viret, *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007) 022907.
- [4] H. Satoh, S. i. Koseki, M. Takagi, W. Y. Chung, N. Kamegashira, *J. Alloys Compd.*, **259** (1997)176.
- [5] J. Wang, H. Zheng, V. Nagarajan, B. Liu, S. B. Ogale, D. Viehland, V. Venugopalan, D. G. Schlom, M. Wutting, R. Ramesh, J. B. Neaton, U. V. Waghmare, N. A. Hill, K. M. Rabe, *Science*, **299** (2003) 1719.
- [6] B. Ruetter, S. Zvyagin, A. P. Pyatakov, A. Bush, J. F. Li, V. I. Belotelov, A. K. Zvezdin, D. Viehland, *Phys. Rev. B.*, **69** (2004) 064114.
- [7] G. S. Lotey, N. K. Verma, *Superlattices and Microstructures*, **60** (2013) 60.
- [8] J. Ray, A. K. Biswal, S. Acharya, V. Ganesan, D. K. Pradhan, P. N. Vishwakarma, *J. Magn. Magn. Mater.*, **324** (2012) 4084.
- [9] W. Wei, H. Xuan, L. Wang, Y. Zhang, K. Shen, D. Wang, T. Qiu, Q. Xu, *Physica B*, **407** (2012) 2243.
- [10] R. Das, K. Mandal, *J. Magn. Magn. Mater.*, **324** (2012) 1913.
- [11] H. Deng, M. Zhang, Z. Hu, Q. Xie, Q. Zhong, J. Wei, H. Yan, *J. Alloys Compd.*, **582** (2014) 273.
- [12] R. D. Shannon, *Acta Cryst. A*, **32** (1976) 751.
- [13] H. F. Zhou, Z. L. Hou, L. B. Kong, H. B. Jin, M. S. Cao, X. Qi, *Phys. Status Solidi A.*, **210** (2013) 809.
- [14] S. Chauhan, et al. *Ceramics International* **396** (2013): 639.
- [15] L. Xing'ao, W. Xiwang, L. Yongtao, M. Weiwei, L. Peng, Y. Tao, Y. Jianping, *Mater. Lett.*, **90** (2013) 152.

