



## بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت بیسموت با جانشانی دوگانه لانتانیوم و باریم

مرضیه رضایی، داود ثانوی خشنود\*، المیرا دهقان

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۴/۱۰/۷، نسخه نهایی: ۹۴/۱۱/۲۶)

**چکیده:** در این پژوهش نانو ذرات  $(BB_yL_xFO)$   $Bi_{1-x-y}Ba_yLa_xFeO_3$  با مقادیر  $x = 0.1, 0.05, 0.0$  و  $y = 0.1, 0.15$ ، به روش سل-ژل سنتز شده‌اند. ویژگی‌های ساختاری، میکروساختاری و مغناطیسی این نانو ذرات به ترتیب توسط پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی نشرمیدان (FE-SEM)، طیف سنجی تبدیل فوریه (FTIR) و مغناطش سنجی نمونه نوسانی (VSM) در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفته است. برازش الگوی پراش پرتو ایکس این ترکیبات نشان داد که یک گذار ساختاری از فاز لوزی رخ به فاز هم زیست لوزی رخ-چهارگوشی در این ترکیب‌ها رخ داده است. همچنین با برازش انجام شده ثابت‌های شبکه و حجم یاخته یکه این ترکیب‌ها تعیین شد. علاوه بر این، آنالیز FTIR، ساختار پروسکایت این ترکیبات را نیز تایید می‌کند. تصویرهای FE-SEM نشان می‌دهد که با افزایش غلظت لانتانیوم اندازه‌ی نانوذرات کاهش یافته است. حلقه‌ی پسماند نانوذره‌های  $BB_yL_xFO$  رفتار فرومغناطیسی از خود نشان می‌دهند که می‌تواند بخاطر از بین رفتن ساختار اسپین چرخان در اثر جانشانی باریم و لانتانیوم باشد. به علاوه مقدار مغناطش باقی مانده‌ی ترکیب  $BB_{0.15}L_{0.1}FO$  ( $M_r = 1/166 \text{ emu/g}$ )، نسبت به ترکیب  $BB_{0.15}L_0FO$  ( $M_r = 0.514 \text{ emu/g}$ ) تقریباً دو و نیم برابر شده است. افزایش خواص مغناطیسی در دمای اتاق می‌تواند نقش مهمی در کاربردهای عملی این ترکیبات ایفاء کند.

**واژه‌های کلیدی:** فریت بیسموت؛ سل-ژل؛ مغناطش؛ نانو ذرات.

### مقدمه

میدان مغناطیسی، قطبیده و با اعمال میدان الکتریکی، مغناطیده شوند. تعداد موادی که این خاصیت جفت شدگی (مگنتوالکتریک) را از خود نشان می‌دهند محدود است. این مواد به دلیل ویژگی‌های فیزیکی جالب، دارای گستره‌گسترده-ای از کاربردها در تجهیزات تشدید فرومغناطیسی، ذخیره‌ی اطلاعات، گیرنده‌ها، حافظه‌های مگنتوالکتریک و ... هستند [۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این خاصیت را می‌توان در ساختار بلوری پروسکایت با فرمول شیمیایی  $ABO_3$  یافت. فریت بیسموت ( $BiFeO_3$ ) با ساختار لوزی رخ و گروه فضایی  $R3c$  یکی از مهمترین مواد مولتی‌فروئیک است که در دهه‌های اخیر، به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی  $BiFeO_3$

مولتی‌فروئیک‌ها اولین بار توسط هانس اشمید در سال ۱۹۹۴ مورد بررسی قرار گرفتند [۱، ۲]. مولتی‌فروئیک حداقل با داشتن دو خاصیت فروئی همزمان مانند فروالکتریک (پاد فروالکتریک) و فرو مغناطیس (پاد فرو مغناطیس) در یک فاز توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده اند [۳، ۴]. از نظر فیزیکی، همزیستی همزمان دو نظم فروالکتریکی و فرومغناطیسی در تناقض هستند. به عبارتی نظم فروالکتریکی به مدارهای  $d$  خالی کاتیون‌ها وابسته است، در حالی که رفتار فرومغناطیس به مدارهای  $d$  نیمه پر آن‌ها، وابسته است. از طرف دیگر این امکان دارد که مواد مولتی‌فروئیک با اعمال

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۳-۳۱۵۳۳۲۴۵، نامبر: ۰۲۳-۳۳۶۴۰۸۱، پست الکترونیکی: dskhoshnoud@profs.semnan.ac.ir

نیترات بیسموت  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  بر اساس عنصرسنجی مناسب (نسبت مولی معین) در ۵۰ میلی لیتر آب حل شدند (جدول ۱). در فرایند انحلال از اتیلن گلیکول و اسید سیتریک ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) به ترتیب به عنوان عامل پلیمرساز و همبافت‌ساز استفاده شد. این محلول زرد رنگ در بازه‌ی ۴۰ تا ۵۰ درجه‌ی سانتیگراد برای پیشگیری از رسوب و ایجاد یک محلول همگن به مدت چند ساعت همزده شد. سپس با اضافه کردن آمونیاک pH محلول در ۳ تنظیم شد. در ادامه نخست محلول به حالت کلوئیدی در آمده و سپس ژل تشکیل شد. ژل حاصل به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتیگراد خشک شده و در نتیجه آب و گازهای  $\text{NO}_2$  و  $\text{CO}_2$  از ژل خارج و پیوندهای اولیه تشکیل شده و ماده‌ی اصلی حاصل می‌شود. در نهایت برای تشکیل ترکیب مورد نظر و از بین بردن تمام ناخالصی‌های محصول با اسید نیتریک رقیق شده شستشو داده شد و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه‌ی سانتی گراد کلسینه شد.

برای بررسی‌های ساختاری، نانوپودرهای تولید شده از پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD) با مشخصات (Bruker D8) Advance و تابش تکفام  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\lambda \sim 1.5406 \text{ \AA}$ ) در گستره‌ی  $2\theta$  بین ۱۰ تا ۸۰ درجه و با گام‌های  $0.05^\circ$  درجه در دمای اتاق استفاده شد. برای تحلیل سرشت ساختار الگوی پراش پرتو X نمونه‌ها، فازهای ناخالصی و محاسبه پارامترهای شبکه‌ای از نرم افزار Xpert و Fullprof استفاده شد. اندازه‌ی و ریخت‌شناسی نانوذرات به وسیله یک میکروسکوپ الکترونی روبشی (LEO 912 AB, Carl Zeiss SMT, Germany, 120 kV) و با اشکارساز EDS (Oxford Instruments England) مورد بررسی قرار گرفت. از طرف دیگر به منظور تأیید تشکیل ساختار پروسکایت، بررسی طیف سنجی تبدیل فوریه FT-IR به وسیله‌ی (FT-IR) SHIMADZU انجام گرفت. در پایان خواص مغناطیسی این نانوپودرها از مغناطیس سنج ارتعاشی (VSM) و با مشخصات (Lakeshore-7400) در دمای اتاق استفاده شد.

### بررسی‌های ساختاری

در این پژوهش نخست با استفاده از نرم افزار Xpert، به شناسایی فازهای ناخالص احتمالی موجود در نمونه‌ها پرداخته شد. در ادامه با استفاده از نرم افزار Fullprof و روش ریتولد محاسبات ساختاری بررسی شدند. روش ریتولد یک روش ریاضی در بدست آوردن الگوی XRD، شبیه سازی شده بر اساس الگوی XRD تجربی نمونه و ساختار بلورشناسی ماده است. اساس کار این روش کمینه کردن اختلاف مربعات الگوی

به عنوان یک مولتی فروئیک از سال ۱۹۶۰ توسط اسمولینسکی شروع شد و در سال ۲۰۰۳ ویژگی غیر منتظره‌ی الکتریکی و مغناطیسی آن در نمونه‌ی لایه نازک گزارش شد [۶]. این ماده بالاتر از دمای اتاق دارای فاز فروالکتریک با دمای کوری  $T_C = 1103 \text{ K}$  و فاز پادفرومغناطیس نوع G با دمای نیل  $T_N = 643 \text{ K}$  به طور همزمان هست. با وجود برتری‌هایی که برای این ماده اشاره شد، دو مشکل اساسی بر سر کاربرد وسیع و صنعتی آن وجود دارد. اولین مشکل دارا بودن نشت جریان بالاست که اندازه‌گیری خاصیت فروالکتریکی نمونه‌ها را به دلیل پایین بودن مقاومت با مشکل مواجه می‌کند. دومین مشکل ناشی از ساختار اسپین چرخان فاز پادفرومغناطیس با طول موج ۶۲ نانومتر است که، این منجر به صفرشدن مغناطش کل در این ساختار می‌شود و علت اصلی در ناکارآمدی این نمونه در برنامه‌های کاربردی است [۷]. از این رو بسیاری از پژوهش‌های در زمینه‌ی بالا بردن خواص مغناطیسی این ترکیب انجام شده است.

یکی از راه حل‌های رفع این مشکل، جانشانی یون‌های خاکی نادر نظیر (La, Ho, Er, ...) و یون‌های قلیایی خاکی نظیر (Ba, Ca...) به جای بیسموت و یون‌های فلزات واسط مانند (Mn, Co, Cr, ...) به جای آهن است [۸]. در سال‌های اخیر جانشانی یون  $\text{Ba}^{+2}$  به جای یون بیسموت موفقیت آمیز بوده و باعث بروز رفتار فرومغناطیسی در فریت بیسموت شده است [۱۰، ۹]. در پژوهش‌های قبلی بهبود خواص مغناطیسی در ترکیبات  $\text{Bi}_{1-y}\text{Ba}_y\text{FeO}_3$  به ازای  $y = 0.15$ ، گزارش شده است [۱۱]. در این پژوهش برای بهبود بیشتر خواص مغناطیسی، یون خاکی نادر  $\text{La}^{+3}$  علاوه بر یون  $\text{Ba}^{+2}$  به جای یون بیسموت در فریت بیسموت جانشین شده است، که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بدین منظور ویژگی‌های ساختاری، میکروساختاری و مغناطیسی نانوذرات ( $\text{Bi}_{1-x-y}\text{Ba}_y\text{La}_x\text{FeO}_3$ ) ( $\text{BB}_y\text{L}_y\text{FO}$ ) با مقادیر ۰/۱۰، ۰/۰۵، ۰/۱۵ و  $y = 0.10$ ، مورد بررسی قرار گرفته است.

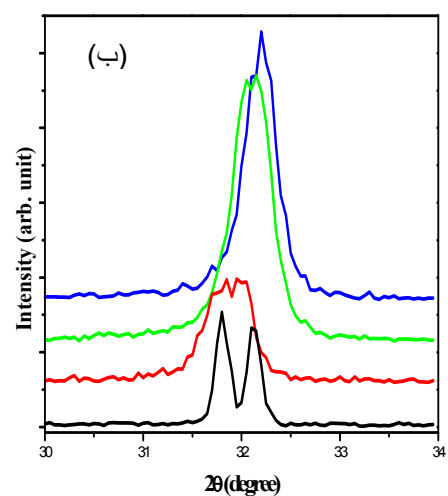
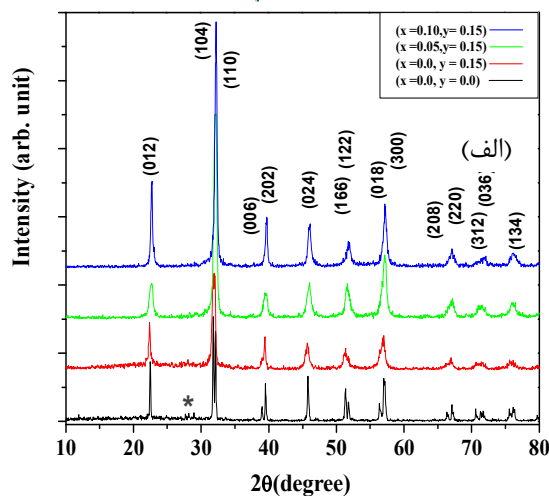
### روش کار

روش‌های متنوعی برای ساخت و آماده کردن نانو ذرات وجود دارد که از جمله‌ی آنها محلول جامد، گرماب، سل-ژل، آلیاژ ساز مکانیکی و...؛ که در این برنامه، نانوذرات  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ba}_y\text{La}_x\text{FeO}_3$  به روش سل-ژل ساخته شده‌اند. برای ساخت، مواد اولیه شامل نیترات آهن  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ، نیترات باریم  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، نیترات لانتانیم  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

همچنین همه‌ی قله‌هایی که به صورت ۲ شاخه و یا ۳ شاخه بودند در حال ادغام در یک قله هستند. این می‌تواند نشان دهنده‌ی انتقال فاز از ساختار لوزی رخ به چهار گوشه باشد که این نتیجه با گزارشات قبلی همخوانی خوبی دارد [۱۱]. در ادامه با جانشانی لاتانیوم در  $BB_{0.15}L_0FO$  مشخص می‌شود که قله‌ها نسبت به حالت عاری از لاتانیوم به سمت زوایای بزرگتر جابه‌جا شده‌اند. این جابه‌جایی در تمام قله‌ها مشاهده می‌شود و به عنوان نمونه در قله‌ی شاخص نمایش داده شده است. از آنجایی که شعاع یونی لاتانیوم و بیسموت تقریباً با هم برابر است، تغییرات زیادی در الگوی پراش پرتو ایکس آن‌ها ایجاد نشده است [۱۳]. در ادامه با استفاده از داده‌های خروجی نرم افزار Fullprof و پس از برازش مناسب، پارامترهای شبکه، حجم سلول واحد و نیم پهنا‌ی بیشینه این ترکیبات به دست آمدند. برای برازش ترکیب BFO از ساختار لوزی رخ با گروه فضایی R3c استفاده شد (شکل ۲). از طرف دیگر برای برازش ترکیب‌های دیگر از یک ساختار همزیست لوزی رخ- چارگوشی با گروه‌های فضایی R3c-P4mm استفاده شد (شکل ۳). از آنجا که گزارش‌های متفاوتی در مورد گروه فضایی وابسته به ساختار چارگوشی نیز دیده می‌شود، این فرایند با استفاده از گروه‌های فضایی R3c-I4cm تکرار شد (شکل ۴). نتایج این برازش‌ها و اندازه‌ی بلورک‌ها که با استفاده از رابطه‌ی دبی-شر (رابطه‌ی ۱) محاسبه شدند، در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده‌اند.

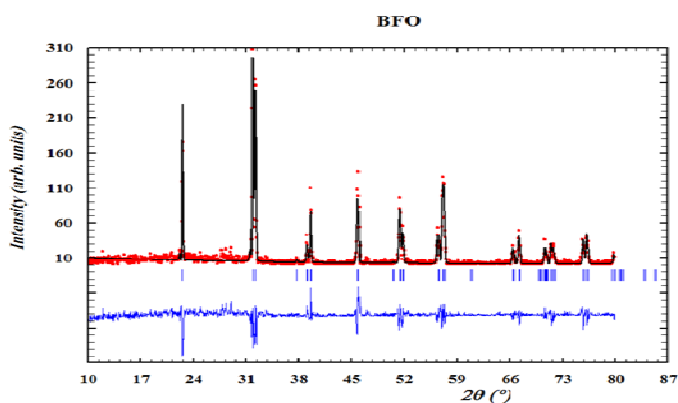
(۱)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta_p} \quad K \approx 1$$

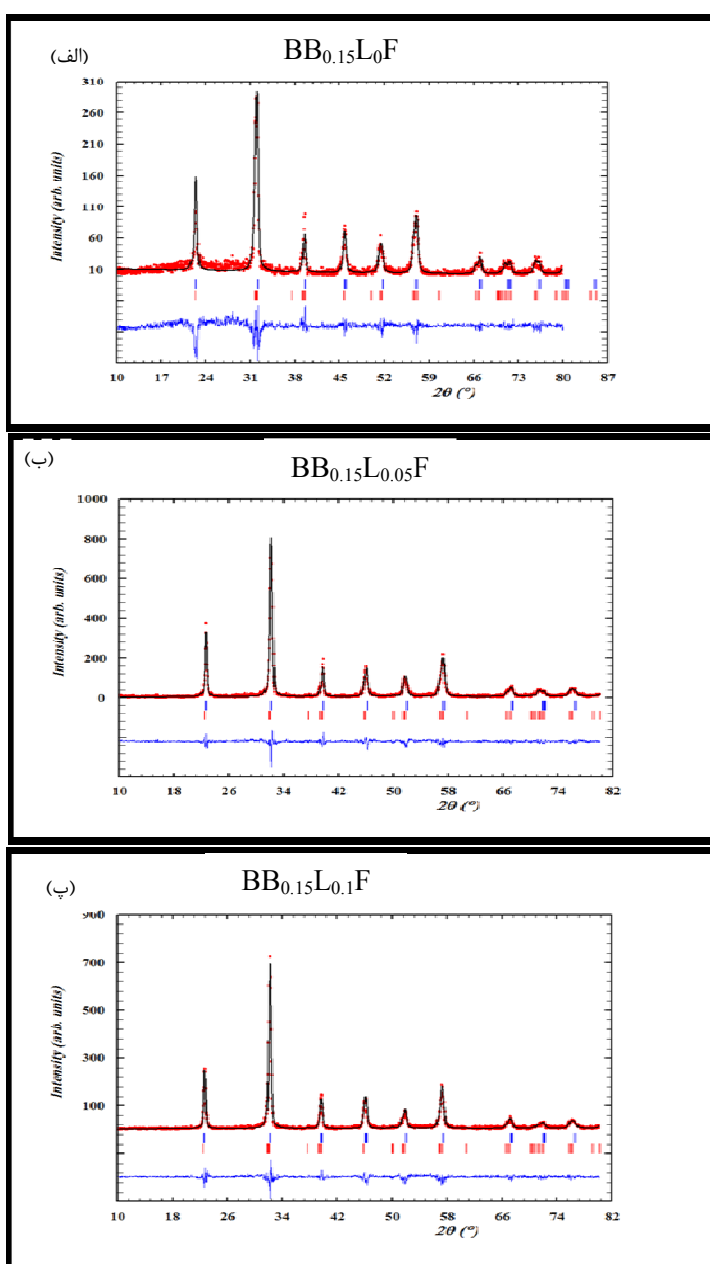


شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات  $BB_yL_xFO$  در دمای اتاق. الف) طیف در گستره‌ی زوایای  $20 \leq \theta \leq 80$ ، ب) بزرگنمایی طیف و جابجایی قله به سمت زوایای بزرگتر در  $20 \leq \theta \leq 33$ .

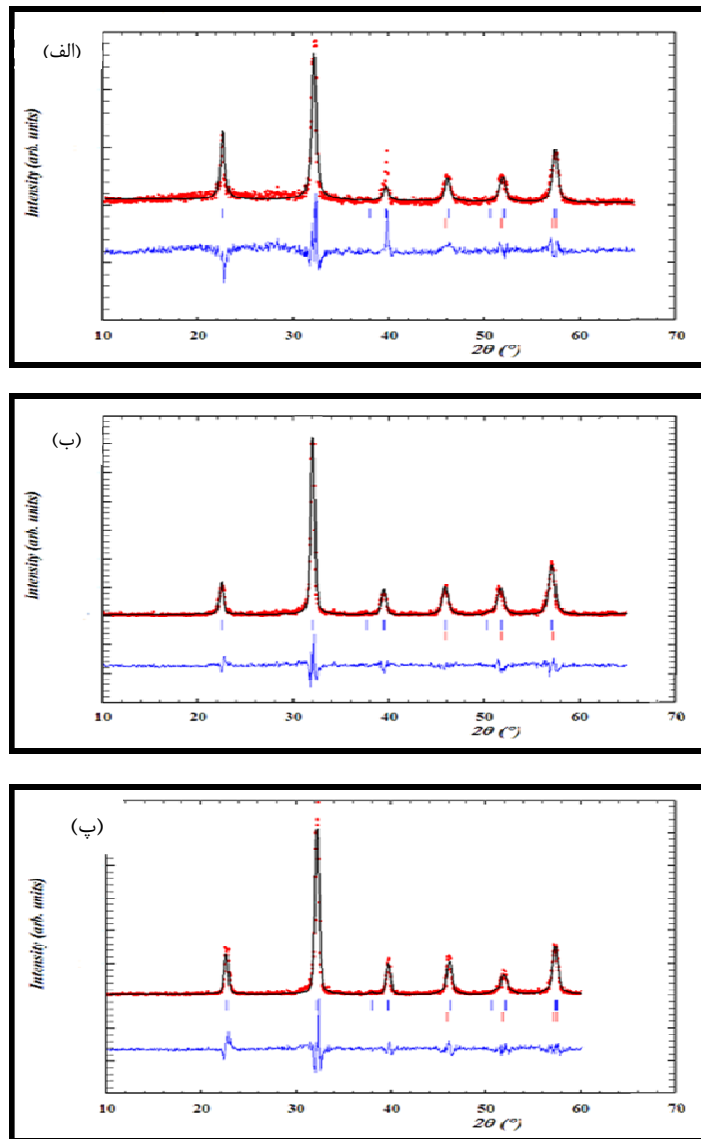
محاسباتی با الگوی تجربی XRD است. شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نانو ذرات  $BB_yL_xFO$  را نشان می‌دهد. در این پژوهش هر دو یون باریم و لاتانیوم به جای یون بیسموت وارد ترکیب شده و در واکنش شرکت کرده‌اند، که این برداشت براساس بیشتر بودن مقدار عددی نسبت شعاع‌های یونی باریم-بیسموت و لاتانیوم-بیسموت از ۰٫۵۹، که در معیار شانون به عنوان نسبت شعاعی مناسب برای جانشانی ذره در ساختار شناخته شده است، تأیید می‌شود [۱۲]. به این ترتیب می‌توان گفت که این دو آلاینده به درون ساختار BFO نفوذ کرده و جانشین  $Bi^{3+}$  شده‌اند و در فواصل بین اتمی درون شبکه بلوری قرار نگرفته‌اند. طیف حاصل از نمونه‌ها با طیف نمونه‌های دیگر ثبت شده، به یاری نرم‌افزار Xpert، مقایسه شد. بررسی‌ها نشان‌دهنده‌ی نبودن ناخالصی در نمونه‌های آلاییده شده با لاتانیوم و باریم بوده و تنها مقدار کمی فاز ناخالصی  $Bi_2Fe_4O_9$  در ترکیب BFO بنابر کارت استاندارد (JCPDS card No=74-1098) مشاهده شده که با علامت (x) در شکل ۱ نمایش داده شده است. در آغاز برای بررسی اثر یون  $Ba^{+2}$  به جای یون  $Bi^{+3}$ ، به طوری که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بر روی قله غالب در گستره‌ی  $20 \leq \theta \leq 33$  تمرکز یافته است. تصویر بزرگنمایی شده به خوبی نشان می‌دهد که قله‌های (۱۰۴) و (۱۱۰) به مقدار کمی به سمت زوایای کوچکتر جا به جا شده‌اند. بنابراین بنابر قانون براگ، ثابت‌های شبکه افزایش یافته‌اند. انبساط شبکه می‌تواند به بزرگتر بودن شعاع یونی باریم ( $r_{Ba} = 1,49 \text{ \AA}$ ) نسبت به شعاع یونی بیسموت ( $r_{Bi} = 1,17 \text{ \AA}$ ) نسبت داده شود.



شکل ۲. برازش نمودار پراش پرتو ایکس نمونه‌ی BFO با نرم افزار Fullprof در گروه فضایی R3c.



شکل ۳. برازش نمودار پراش پرتو ایکس نمونه‌ی  $BB_{0.15}L_xFO$  بوسیله‌ی نرم افزار Fullprof در گروه فضایی R3c+P4mm.



شکل ۴ برازش نمودار پراش پرتو ایکس نمونه‌ی  $BB_yL_xFO$  به‌وسیله‌ی نرم افزار Fullprof در گروه فضایی  $R3c+I4cm$  (الف)  $(y = 0.15, x = 0.10)$  و (ب)  $(y = 0.15, x = 0.05)$ ، (=

جدول ۱ استوکیومتری و مقدار مواد اولیه در هر کدام از نمونه‌ها

X	$x=0.10$	$x=0.10$	$x=0.05$	$x=0.10$
Y	$y=0.15$	$y=0.15$	$y=0.15$	$y=0.15$
$La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (گرم)	-----	-----	۰.۲۲۱۵	۰.۴۴۳۰
$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (گرم)	۴.۸۵۰۵	۴.۱۲۳۰	۳.۸۸۰۵	۳.۶۳۸۰
$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (گرم)	۰.۴/۴	۴.۰/۴	۰.۴/۴	۰.۴/۴
$Ba(NO_3)_2$ (گرم)	-----	۳۹۲۰/۰	۳۹۲۰/۰	۳۹۲۰/۰
اسید سیتریک (گرم)	۲۰.۲/۴	۲۰.۲/۴	۲۰.۲/۴	۲۰.۲/۴
اتیلن گلیکول (سی سی)	۹۶۵۶/۴	۹۶۵۶/۴	۹۶۵۶/۴	۹۶۵۶/۴

ی عددهای موجی ( $1350\text{ cm}^{-1}$  -  $1000$ ) و ( $1450\text{ cm}^{-1}$ ) از سرشتی‌های C-H و C-O هستند. قله‌های نشان‌دهنده‌ی  $\text{NH}_3$  و یون  $\text{NO}_3^{-1}$  در منحنی FT-IR در گستره‌ی نواری ( $\text{cm}^{-1}$ )  $1000^1$  -  $800$  مشاهده می‌شوند، همچنین قله پهن و ملایم موجود در حدود عدد موج ( $3425\text{ cm}^{-1}$ ) به حضور آب در نمونه مربوط است و پیوند O-H را نشان می‌دهد. عمق قله‌ها نیز نشان‌دهنده‌ی میزان وجود پیوندهای یادشده در ترکیب است. به همین دلیل می‌توان گفت که سهم بیشتر پیوندهای موجود در این ترکیب به پیوندهای اصلی ساختار پروسکایتی فریت بیسموت اختصاص دارد [۱۵، ۱۶].

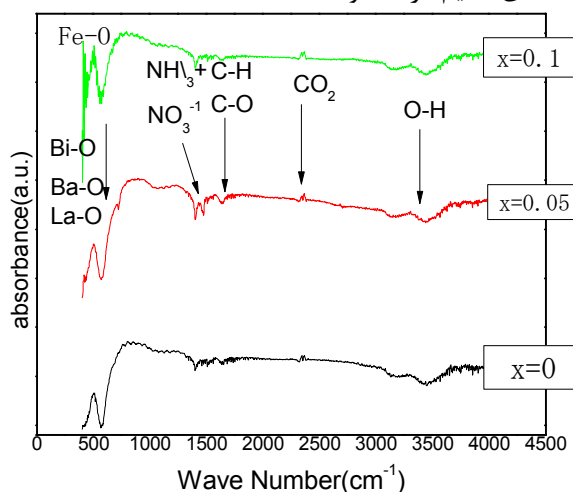
#### بررسی میکروسکوپ الکترونی نشر میدان

تصاویر FE-SEM برای بررسی ریخت‌شناسی ذرات و تشخیص ابعاد دانه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تصاویر نتایج حاصل از پهن‌شدگی قله‌های براگ را تأیید می‌کنند. تصاویر FE-SEM نانوپودرهای  $\text{BB}_y\text{L}_x\text{FO}$  در شکل ۶ دیده می‌شوند. اندازه‌ی دانه‌ها به کمتر از  $40 \times 50$  نانومتر رسیده است که با اندازه‌ی بلورک‌های محاسبه شده از رابطه دبا-ی-شرر که در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شد همخوانی دارد. این اندازه برای دانه‌ها از آن جهت مناسب به نظر می‌رسد که می‌تواند ساختار اسپین چرخان در فریت بیسموت را لغو و از تکمیل آن جلوگیری کند. کوچک شدن ابعاد دانه‌ها می‌تواند به دلیل استفاده از روش سل-ژل برای تولید نانو ذرات و پایین بودن دمای کلسینی شدن در فرایند سنتز باشد. از طرف دیگر دانه‌ها تقریباً توزیع یکنواختی دارند که این خود نشان‌دهنده خلوص بالای مواد است.

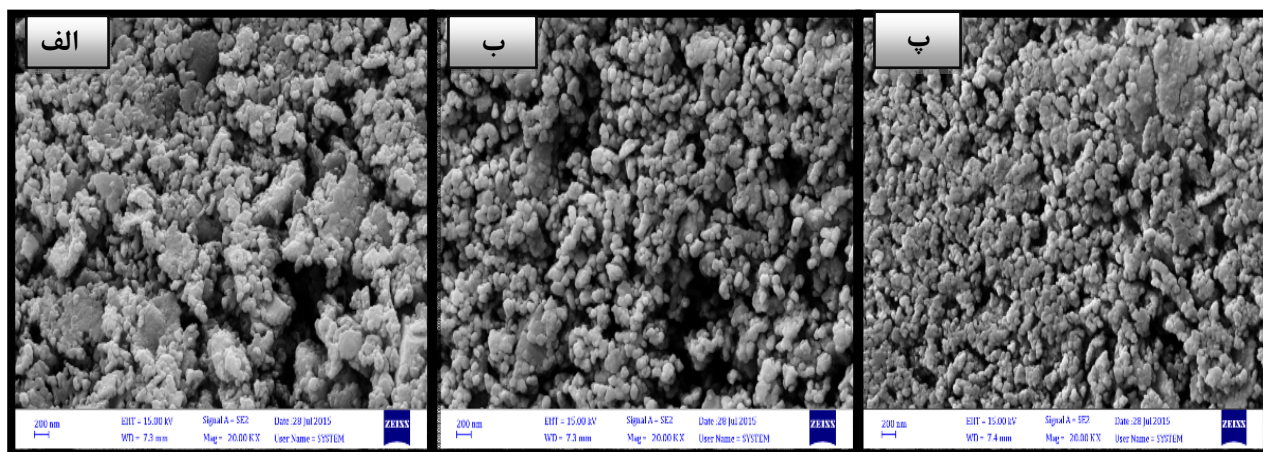
چنانکه مشاهده می‌شود، ثابت‌های شبکه با جانمایی باریم در ساختار  $\text{BiFeO}_3$  بزرگتر شده است و چنانکه در بالا اشاره شد، به خاطر بزرگتر بودن شعاع یونی باریم نسبت به بیسموت است، با جانمایی مضاعف لانتانیوم به خاطر شعاع یونی تقریباً نزدیک به بیسموت تغییرات زیادی مشاهده نشده است. میانگین اندازه‌ی ذرات محاسبه شده با افزایش میزان لانتانیوم کاهش می‌یابد که ممکن است به دلیل کاهش پیدایش فازهای ثانویه، در سطح و یا در درون ذرات باشد. به پیروی از کاهش تشکیل فازهای ثانویه، میزان تهی جاهای اکسیژنی نیز کم شده و این خود می‌تواند دلیل محکمی در کاهش اندازه‌ی ذرات باشد. باید یادآور شد که افزایش نواقص ساختاری و بهبود جداسازی سطحی، که با افزایش میزان لانتانیوم رخ می‌دهد را می‌توان از دیگر دلایل کاهش اندازه‌ی ذرات دانست [۱۴].

#### آنالیز تبدیل فوریه‌ی فروسرخ

آنالیز FT-IR می‌تواند تأییدی برای ساختار پروسکایت نمونه‌ها باشد. طیف FT-IR برای نانو ذرات  $\text{BB}_y\text{L}_x\text{FO}$  در دمای اتاق در شکل ۵ نشان داده شد. در طیف ترکیبات با ساختار پروسکایتی، همواره قله‌های تیز در محدوده‌ی بین  $700\text{ cm}^{-1}$  -  $400$  مشاهده می‌شوند، که این قله‌ها به پیوندهای موجود در اکسیدهای فلزی مربوط می‌شوند، و به علت سنگینی پیوندها معمولاً در گستره‌ی انرژی‌های بالا (طول موج کوتاه) مشاهده می‌شوند. یکی از این پیوندها، پیوند کششی پادمتقارن و پیوند خمشی Fe-O ( $600\text{ cm}^{-1}$  -  $400$ ) است که از مشخصات گروه‌های  $\text{FeO}_6$  در سیستم‌های پروسکایتی است. پیوندهای دیگر از جمله پیوندهای ارتعاشی Bi-O و پیوند کششی Ba-O و La-O به این ناحیه مربوط می‌شود. قله‌ی ملایم در محدوده-



شکل ۵ طیف تبدیل فوریه‌ی نانوذرات  $\text{BB}_y\text{L}_x\text{FO}$  در دمای اتاق.



شکل ۶ تصاویر FE-SEM برای نانوپودرهای  $BB_yL_xFO$  به ازای (الف)  $(y = 0.15, x = 0.0)$ ، (ب)  $(y = 0.15, x = 0.05)$ ، (پ)  $(y = 0.15, x = 0.10)$ .

جدول ۲ پارامترهای شبکه، حجم یاخته یکه و میانگین اندازه‌ی بلورک نانو پودرهای  $BB_yL_xFO$ .

Y X	گروه فضایی	پارامترهای شبکه (Å)		حجم یاخته یکه (Å)		میانگین اندازه بلورک (Å)
		R3C	P4mm	R3c	P4mm	
$y = 0.10$ $x = 0.10$	R3c	$a = 5.5692$ $b = 5.5692$ $c = 13.8474$	-----	371.95	-----	240.0
$y = 0.15$ $x = 0.10$	R3c+P4mm	$a = 5.6373$ $b = 5.6373$ $c = 13.6742$	$a = 2.7895$ $b = 2.7895$ $c = 3.9659$	376.33	30.859	256.7
$y = 0.15$ $x = 0.05$	R3c+P4mm	$a = 5.6239$ $b = 5.6239$ $c = 13.6548$	$a = 2.7847$ $b = 2.7847$ $c = 3.9524$	374.02	30.497	240.6
$y = 0.15$ $x = 0.10$	R3c+P4mm	$a = 5.6176$ $b = 5.6176$ $c = 13.6419$	$a = 2.7818$ $b = 2.7818$ $c = 3.9273$	372.83	30.391	233.6

جدول ۳ پارامترهای شبکه، حجم یاخته یکه و میانگین اندازه‌ی بلورک‌های نانو پودرهای  $BB_yL_xFO$ .

Y X	گروه فضایی	پارامترهای شبکه (Å)		حجم یاخته یکه (Å)		میانگین اندازه بلورک (Å)
		R3c	I4cm	R3c	I4cm	
$y = 0.15$ $x = 0.10$	R3c+I4cm	$a = 5.5922$ $b = 5.5922$ $c = 13.6966$	$a = 3.9610$ $b = 3.9610$ $c = 3.9342$	370.95	61.727	173.5
$y = 0.15$ $x = 0.05$	R3c+I4cm	$a = 5.5818$ $b = 5.5818$ $c = 13.6933$	$a = 3.9503$ $b = 3.9503$ $c = 3.9238$	369.49	61.231	172.7
$y = 0.15$ $x = 0.10$	R3c+I4cm	$a = 5.5679$ $b = 5.5679$ $c = 13.6640$	$a = 3.9496$ $b = 3.9496$ $c = 3.9174$	366.86	61.109	170.2

### خواص مغناطیسی

برای بررسی خواص مغناطیسی نانو پودرهای  $BB_yL_xFO$ ، منحنی پسماند آن‌ها در دمای اتاق و در میدان مغناطیسی  $T$  ۱/۹ اندازه‌گیری و در شکل ۸ ترسیم شده است.

بر خلاف BFO که یک پادفرمغناطیس بدون منحنی پسماند است [۲۰، ۲۱]، در اینجا با مقادیر غیر صفر مغناطش مانده ( $M_r$ ) و میدان وادارندگی ( $H_c$ ) روبرو هستیم. پارامترهای مغناطیسی حاصل از منحنی پسماند، در جدول ۴ آورده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها رفتار فرومغناطیسی دارند و تا میدان مغناطیسی  $1.9 T$ ، تقریباً به اشباع رسیده‌اند. تغییر در رفتار مغناطیسی این ترکیبات می‌تواند وابسته به سه فرایند مستقل باشد. (الف) هم‌نهشتی مواد در ابعاد نانو که منجر به کامل نشدن دوره تناوب ساختار مارپیچی می‌شود ( $nm$   $= 62$ ) و در نتیجه مقدار مغناطش غیر صفری در اثر این فرایند باقی می‌ماند و منجر به رفتار فرومغناطیسی در این ترکیبات می‌شوند (ب) فرونشانی و تخریب ساختار اسپین چرخان و تغییر ساختار اسپینی ناشی از واپیچش شبکه که باعث بالارفتن خاصیت مغناطیسی می‌شود (ج)، پس از تشکیل ساختار اسپینی جدید، تغییر در فاصله و زاویه پیوندهای  $Fe^{+3}-O-Fe^{+3}$  و  $Fe^{+4}-O-Fe^{+3}$  که به ترتیب برهمکنش های پادفرمغناطیس و فرومغناطیس هستند، می‌تواند در تضعیف و تقویت خواص مغناطیسی نقش داشته باشد [۲۲] افزایش مغناطش ناشی از سنتز مواد در ابعاد نانو، از مقایسه منحنی پسماند وابسته به نمونه‌ی  $Bi_{0.85}Ba_{0.15}FeO_3$  در این پژوهش که در ابعاد نانو تهیه شده است، و منحنی پسماند این ترکیب که در ابعاد میکرو سنتز شده است [۹]، قابل استنتاج است. اما افزایش خاصیت فرومغناطیسی ناشی از جانشانی باریم در BFO می‌تواند ناشی از تخریب ساختار اسپین چرخان و ایجاد برهمکنش فرومغناطیسی  $Fe^{+4}-O-Fe^{+3}$  در اثر تبدیل بعضی یون‌های  $Fe^{+3}$  به  $Fe^{+4}$  که ناشی از جانشانی یون دوظرفیتی  $Ba^{+2}$  به جای یون سه ظرفیتی  $Bi^{+3}$  است. در ادامه برای بالا بردن بیشتر خواص مغناطیسی، یون‌های لانتانیوم را به جای یون‌های بیسموت جانشانی کردیم. چنانکه از شکل ۸ برداشت می‌شود، با جانشانی لانتانیوم به میزان  $x = 0.1$ ، مقدار مانده مغناطش حدود دو ونیم برابر خواهد شد. از آنجا که لانتانیوم یک یون سه ظرفیتی است، بنابراین افزایش مغناطش می‌تواند ناشی از واپیچش شبکه در اثر ورود یون لانتانیوم و به پیروی از آن کاهش توان

توجه به این نکته جالب است که استفاده از اتیلن گلیکول به عنوان عامل همبافت ساز نیز باعث کاهش چشمگیر اندازه ذرات، یکنواختی بیشتر توزیع اندازه ذرات می‌شود. به عبارتی تفاوت در اندازه و ریخت‌شناسی به تفاوت به خواص فیزیکی حلال‌ها از جمله گرانیوی (چسبندگی)، ثابت دی الکتریک و رسانندگی الکتریکی آن وابسته است [۱۷]. افزایش ثابت دی الکتریک، رسانندگی الکتریکی و کاهش گرانیوی حلال، قابلیت حل شدن و نفوذپذیری یون‌ها در محلول را افزایش می‌دهد که باعث افزایش اندازه‌ی ذرات می‌شود. ثابت دی الکتریک آب در دمای اتاق  $80.1$  و گرانیوی آن  $0.89 mPa.S$  است، این در حالی است که ثابت دی الکتریک و گرانیوی اتیلن گلیکول به ترتیب  $37.7$  و  $20 mPa.S$  است، بنابراین انتظار می‌رود که نمونه‌های سنتز شده در آب دارای ذرات بزرگتری باشند. کاهش ثابت دی الکتریک منجر به کم شدن قابلیت حل شدن و درجه تجزیه‌ی نمک‌ها در محیط الکلی نسبت به محیط آبی می‌شود که این باعث غلظت کمتر لایه‌ی یونی و ضخیم‌تر شدن لایه الکتریکی حول ذرات می‌شود و نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین ذرات را افزایش داده و از هم‌نهشتی شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند و در نتیجه با افزودن اتیلن گلیکول می‌توان انتظار داشت که اندازه‌ی ذرات کوچکتر شوند [۱۸].

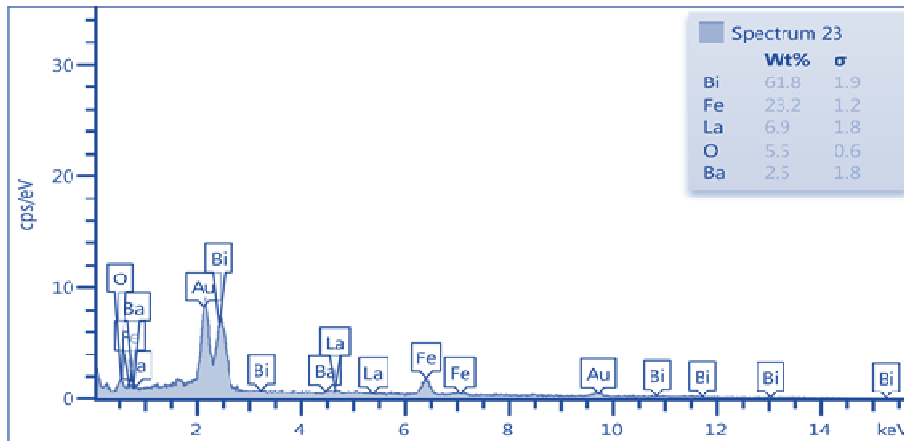
### بررسی EDAX

بررسی EDAX برای نانو پودر  $BB_{0.15}L_{0.1}FO$  در شکل ۷ به نمایش گذاشته شده است، هر یک از قله‌های نشان داده شده در این نمودار، به یک اتم خاص اختصاص دارد. قله‌های با ارتفاع بیشتر به معنی غلظت بیشتر عنصر مورد نظر در نمونه است و حضور لانتانیوم و باریم به خوبی در ساختار نمونه اثبات شده و نشان می‌دهد فرآورده‌ها از درجه‌ی خلوص بالایی برخوردارند و یک ترکیب تک فاز و بدون ناخالصی داریم که، با نتایج حاصل از آنالیز XRD همخوانی دارد. همچنین قله‌ی Au (طلا) به پوشش دهی نمونه برای بررسی میکروسکوپیکی FE-SEM در شکل مشخص است. تفاوت کمی که در درصد‌های وزنی گزارش شده در نمودار، با آنچه که در ترکیب داریم وجود دارد، با توجه به اینکه دستگاه مدرج نیست، قابل توجیه است. چون از این بررسی کیفی، نمی‌توان نتیجه کمی گرفت و فرمول شیمیایی را به‌دست آورد. این آنالیز تنها تاییدی بر حضور یون‌های شرکت کننده در ترکیب شیمیایی ماده‌ی مورد نظر است.

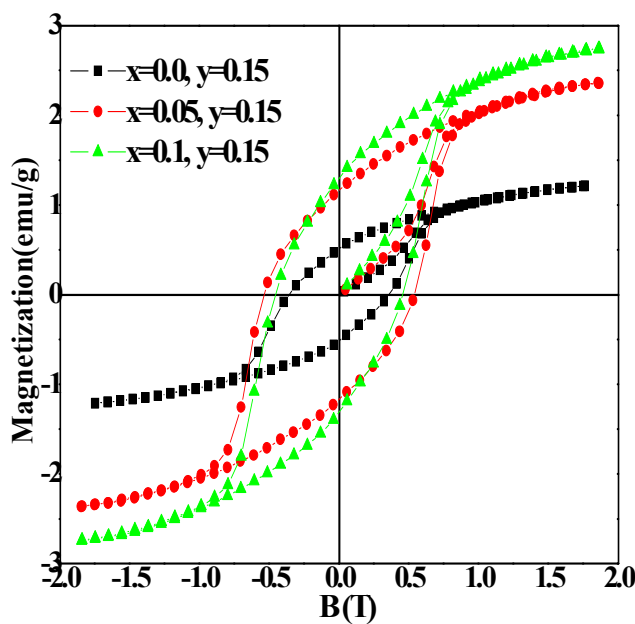


[۱۱]. در نهایت کاهش  $H_c$  می تواند ناشی از تغییر ساختار از لوزی رخ به چارگوشی در اثر جانشانی یون لانتانیم به جای یون بیسموت باشد.

برهمکنش پادفرومغناطیسی  $Fe^{3+}-O-Fe^{3+}$  و افزایش برهمکنش فرومغناطیسی  $Fe^{4+}-O-Fe^{3+}$  باشد. مشابه این رفتار در نانو پودرهای  $Bi_{0.85-x}Ba_{0.15}Er_xFeO_3$  مشاهده شده است



شکل ۷ آنالیز EDAX نانو پودرهای  $Bi_{0.75}Ba_{0.15}La_{0.1}FeO_3$



شکل ۸ منحنی پسماند مغناطیسی نانو ذرات  $BB_yL_xFO_3$  در دمای اتاق.

جدول ۴ پارامترهای مغناطیسی نانو ذرات  $BB_yL_xFO_3$  در دمای اتاق.

نمونه	$H_c$ (Oe)	$M_r$ (emu/g)	$M_s$ (emu/g)
$y=0.15$ $x=0.0$	۳۵۶۷.۱	۰.۵۱۴۵	۱.۲۱۳۹
$y=0.15$ $x=0.05$	۵۳۷۱.۹	۱.۱۶۶۰	۲.۳۶۱۷
$y=0.15$ $x=0.10$	۴۵۵۸.۹	۱.۳۰۷۶	۲.۷۴۵۴

## برداشت

[10] Wei W., Xuan H., Wang L., Zhang Y., Shen K., Wang D., Qiu T., Xu Q., *Physica B*. "Structural, Magnetic, Optical and Electrical Properties of Ba Substituted BiFeO<sub>3</sub>", 407 (2012) 2243.

[11] Naeimi A.S., Dehghan E., Sanavi Khoshnoud D., Gholizadeh A., "Enhancement of ferromagnetism in Ba and Er co-doped BiFeO<sub>3</sub> nanoparticles", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 393 (2015) 502–507.

[12] Wu Y. J., Zhang J., Chen X. K., Chen X. J., "Phase evolution and magnetic property of powders. *Solid State Communications*", 151 (2011) 1936.

[13] Priyadharsini P., Pradeep A., Sathyamoorthy B., Chandrasekaran G., "Enhanced multiferroic properties in La and Ce co-doped BiFeO<sub>3</sub> nanoparticles", 75(2014)797–802.

[14] Basiri M.H., Shokrollahi H., Isapour Gh., "Effects of La content on the magnetic, electric and structural properties of BiFeO<sub>3</sub>", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 354 (2014) 184–189.

[15] Andoulsi R., Horchani-Naifer K., Férid M., "Structural and electrical properties of calcium substituted lanthanum ferrite powders, *Powder Technology*", 230 (2012) 183-187.

[16] Cheng Z., Li A., Wang X., Dou S.X., Ozawa K., Kimura H., Zhang S., Shrout T.R., "Structure, ferroelectric properties, and magnetic properties of the La-doped bismuth ferrite", *Journal of Applied Physics*, 103 (2008) 07E507-507E507-503.

[17] H. L. Su Y. Xie, Li B., Liu X. M., Qian Y. T., "A novel one-step solvothermal route to nanocrystalline", Sn4P3, *Journal of Solid State Chemistry* 146(1999) 110-113.

[18] Yu Z., Wen W., Dechang J., Feng Y., "Synthesis of SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> nanocrystalline powder by a modified sol-gel materials *Chemistry and Physics*", 77 (2002) 60-64.

[19] Lide D. R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 83rd ed, CRC press, USA, 2002-2003

[20] Izabela Szafraniak-Wizaa, Bartłomiej Andrzejewskib, Bożena Hilczer, "Magnetic Properties of Bismuth Ferrite Nanopowder Obtained by Mechano chemical Synthesis", 5, PL-60965 Poznań, Poland.

[21] Pradhan S. k., Roul B.K., "Improvement of multiferroic and leakage property in monophasic BiFeO<sub>3</sub>", *Physical B*, 406 (2011) 3313.

[22] Dey K., Majumdar S., Giri S., "Structural correlation to magnetodielectricity and coercivity at room temperature in multiferroic Bi<sub>0.7</sub>Ba<sub>0.3-x</sub>Pb<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub>", *Acta Materialia* 61 (2013) 379.

نانوذرات Bi<sub>1-x-y</sub>Ba<sub>y</sub>La<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub> با استفاده از روش سل-ژل تهیه شدند. با جانشانی باریم یک گذار فاز ساختاری از لوزی رخ به لوزی رخ - چارگوشی در حال رخ دادن است و حجم یاخته‌ی واحد افزایش می‌یابد. در ادامه با جانشانی لانتانیوم در ترکیب BB<sub>0.15</sub>L<sub>0</sub>FO، ثابت‌های شبکه و حجم یاخته واحد کمی کاهش می‌یابد. آنالیز FTIR، ساختار پروسکایت این ترکیبات را تایید می‌کند. تصویرهای FE-SEM نشان می‌دهند که ترکیبات مورد بررسی در ابعاد نانومتری سنتز شده‌اند و با افزایش غلظت لانتانیوم اندازه نانوذرات کاهش یافته است. یک رفتار فرومغناطیسی با جانشانی باریم به جای بیسموت مشاهده می‌شود. در نهایت با جانشانی لانتانیوم تا مقدار  $x = 0.1$ ، افزایش قابل توجهی در خاصیت مغناطیسی ترکیبات BB<sub>0.15</sub>L<sub>x</sub>FO مشاهده می‌شود.

## مراجع

- [1] Schmid H., "Multi-ferroic magnetoelectrics", *Ferroelectrics*, 162, pp. 317–338 1994
- [2] Schmid H., "Some symmetry aspects of ferroics and single phase multiferroics", *J. Phys: Cond Matter*, 20, pp. 434201–434225, 2008.
- [3] Eerenstein W., Mathur N. D., Scott J. F., "Multiferroic and magnetoelectric materials", *Nature*, 442 (2006) 759.
- [4] Khomskii D. I., *J. Magn. Magn. Mater.* "Multiferroics: different ways to combine magnetism and ferroelectricity", 306 (2006) 1.
- [5] Catalan G., Scott J.F., "Physics and applications of bismuth Ferrite", *Advanced Materials*, 21 (2009) 2463-2485.
- [6] Smolensky G.A., Isupov V.A., Agronovskaya A.I., "New ferroelectrics of complex composition of the type,  $A_2^{+2}(B_I^{+2} B_{II}^{+5})O_6$ ", *Sov. Phys. Solid State*, 1 pp. 150-151 (1959).
- [7] Ruetter B., Zvyagin S., Pyatakov A.P., Bush A., Li J.F., Belotelov V.I., Zvezdin A.K., Viehland D., "Magnetic field-induced phase transition in BiFeO<sub>3</sub> observed by high-field electron spin", resonance: Cycloidal to homogeneous spin order, *Phys. Rev. B*. 69 (2004)064114-20.
- [8] Lotey G.S., Verma. N.K., "Multiferroism in rare earth metals-doped BiFeO<sub>3</sub> nanowires, Superlattices and Microstructures", 60(2013) 60-6.
- [9] Sunil Chauhan, Manisha Arora, Sati P.C., Sandeep Chhoker, Katyal S.C., Manoj Kumar, "Structural, vibrational, optical, magnetic and dielectric properties of Bi<sub>1-x</sub>Ba<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub> nanoparticles", 39 (2013) 6399–6405.