

سنتز و ارزیابی خواص فیزیکی و مغناطیسی پودر هگزا فريت باريوم با آلايده

با تركيب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}X_{0.1}Fe_{10}O_{19}$ ($X=Ti, Ce, Sn$)

سيد سلمان سيد افقي^۱ و مجتبی جعفریان^۲

۱. دانشگاه جامع امام حسين (ع)، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مواد، تهران

۲. گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران

پست الکترونیکی: mojtaba.jafarian@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۹/۱۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۸/۲۵)

چکیده

در این پژوهش نمونه‌های هگزا فريت باريوم با تركيب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}X_{0.1}Fe_{10}O_{19}$ ($X=Ti, Ce, Sn$) به روش فعال سازی مکانیکی سنتز و به وسیله آنالیزهای حرارتی همزمان (STA)، پراش پرتوی ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) و مغناطیس سنج نمونه مرتعش (VSM) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تمامی نمونه‌های سنتز شده به صورت تقریباً تک فاز و با میانگین اندازه ذرات در حدود ۴۵۰ nm و ۲۵۰ nm به ترتیب برای نمونه آلايش نشده و آلايش شده بودند. تغییرات قابل توجهی در خواص مغناطیسی هگزا فريت باريوم در اثر جانشینی یون‌های آهن مشاهده شد. طبق نتایج بیشترین میزان مغناطش اشباع (۳۳/۱ emu/g) و کمترین نیروی پسماندزدا (۱۸/۱۴ Oe) مربوط به ترتیب مربوط به نمونه با تركيب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Ti_{0.1}Fe_{10}O_{19}$ و $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Sn_{0.1}Fe_{10}O_{19}$ بود.

واژه‌های کلیدی: هگزا فريت باريوم، فعال سازی مکانیکی، ریز ساختار، خواص مغناطیسی

۱. مقدمه

فريت‌های هگزاگونال درصد بالایی از مغناطیس‌های دائمی جهان را شامل می‌شوند و دارای ساختار مگنتوپلمییت $PbFe_{1/3}Mn_{2/3}Al_{1/3}Ti_{1/3}O_{19}$ هستند. یکی از انواع مهم فريت‌های هگزاگونال، هگزا فريت باريوم می‌باشد. ترکیبات زیادی بین BaO و Fe_2O_3 وجود دارد، اما نسبت ۱:۶ از لحاظ مغناطیسی مهمترین ترکیب می‌باشد [۱]. هگزا فريت باريوم خالص دارای ساختار بلوری هگزاگونال می‌باشد، که کمیت

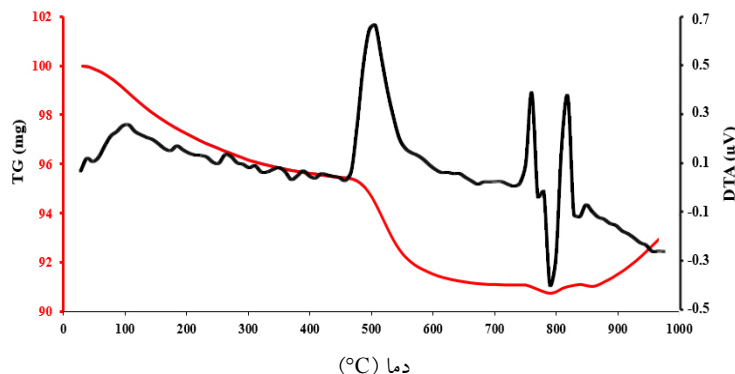
شبکه آن $a=5.89$ و $c=23.20$ آنگستروم و حجم سلول واحد 694.7 آنگستروم مکعب می‌باشد. در هر سلول واحد دو مولکول $Ba_{0.6}Fe_2O_{19}$ وجود دارد. از جمله دلایل استفاده از این ترکیب به عنوان آهنرباهای دائم و دستگاه‌های ذخیره اطلاعات، دارا بودن نیروی وادارندگی و مغناطش باقیمانده بالا به علاوه پایداری شیمیایی، دمای کوری بالا و هزینه تولید پایین این ترکیب می‌باشد. از دیگر مزیت‌های این ترکیب می‌توان به امکان تغییر خواص فیزیکی آن به وسیله جانشینی یون‌های مختلف در

چهارظرفیتی در گستره وسیعی تغییر می‌نماید و کارایی این ترکیب را برای استفاده در دستگاه‌ها و وسایل مختلف افزایش می‌دهد [۲۵-۳۰]. در این مقاله به مطالعه هگزافریت باریم با ترکیب $\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{X}_{0.7}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$ ($\text{X}=\text{Ti}, \text{Ce}, \text{Sn}$) سنتز شده به روش فعال‌سازی مکانیکی پرداخته شد. هدف از این کار مطالعه تأثیر آلاینش سه تایی با کاتیون‌های روی و زیرکونیوم به همراه کاتیون‌های تیتانیوم، سریوم و قلع بر خواص فیزیکی و مغناطیسی نمونه‌های سنتز شده بود.

۲. مواد و روش انجام کار

پودر مغناطیسی با ترکیب ($\text{X}=\text{Ti}, \text{Ce}, \text{Sn}$) $\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{X}_{0.7}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$ از مواد اولیه شامل کربنات باریم (BaCO_3)، اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسید روی (ZnO)، اکسید زیرکونیوم (ZrO_2)، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، دی‌اکسید سریوم (CeO_2) و دی‌اکسید قلع (SnO_2) به روش فعال‌سازی مکانیکی تهیه شد. مواد اولیه با توجه به نسبت استوکیومتری و نسبت وزنی گلوله به پودر (۳۰:۱) در قندان‌های آسیاب سیاره‌ای (Retsch PM100) قرار گرفته و به مدت ۲۰ ساعت در اتمسفر هوا آسیاکاری و سپس به مدت ۵ ساعت در دمای 1000°C و با نرخ $5^\circ\text{C}/\text{min}$ عملیات حرارتی شدند. در تمام شرایط به میزان ۱ cc اتانول به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند (Process Control Agent: PCA) به مخلوط پودری اضافه شد. به منظور بررسی دمای استحاله و کاهش وزنی مربوط به انجام واکنش، آنالیز توزین حرارتی (TGA) و آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) به وسیله دستگاه آنالیز حرارتی همزمان (STA, Bahr) 503°C تحت اتمسفر هوا با نرخ گرمایش $10^\circ\text{C}/\text{min}$ بر روی نمونه آسیا شده بدون افزودنی انجام شد. بررسی فازی پودرهای سنتز شده با استفاده از دستگاه پراش پرتوی ایکس (XRD , XMD 3000) در محدوده $10-70^\circ\text{C}$ با استفاده از تابش $\text{CuK}\alpha$ با طول موج 1.54 آنکستروم صورت گرفت. جهت بررسی مورفولوژی پودر از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM , TESCAN MIRA3 LMU) استفاده شد. اندازه ذرات نمونه‌ها به وسیله تصاویر FE-SEM

ساختار بلوری آن اشاره نمود. ساختار بلوری هگزافریت باریم حاوی ۶۴ یون در هر سلول واحد می‌باشد. یکی از این یون‌ها مربوط به کاتیون دوظرفیتی Ba^{2+} ، Sr^{2+} یا Pb^{2+} می‌باشد، ۳۸ یون مربوط به آنیون‌های O^{2-} و ۲۴ کاتیون Fe^{3+} بوده که یون‌های آهن در مکان‌های اکتاهدرال ($4f_7, 2a, 12k$)، تتراهدرال ($4f_1$) و بای پیرامید ($2b$) توزیع شده‌اند. اصلاح خواص مغناطیسی هگزافریت باریم با جانشینی کاتیون‌های مختلف با یون‌های آهن تغییرات عمده‌ای در مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی این ترکیب از جمله ناهمسانگردی مغناطیسی-بلوری، نیروی پسماندزدا و دمای کوری ایجاد می‌کند. خواص مغناطیسی هگزافریت باریم جانشین شده به شدت تابع شرایط سنتز، دما و زمان سینترینگ، ترکیب شیمیایی و یون‌های جانشین شونده است [۲-۴]. روش‌های متعددی به منظور سنتز و جانشینی کاتیون‌های مختلف در ساختار هگزافریت باریم همچون سل-ژل [۵ و ۶]، هیدروترمال [۷ و ۸]، هم رسوبی [۹ و ۱۰]، میکرومولسیون [۱۱ و ۱۲]، آلیاژسازی مکانیکی [۱۳ و ۱۴] و غیره به کار گرفته شده است. در میان این روش‌ها روش آلیاژسازی مکانیکی به عنوان یکی از ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود، چرا که اصولاً مواد اولیه مورد نیاز در این روش در دسترس و ارزان می‌باشند. در روش آلیاژسازی مکانیکی به واسطه کنترل عواملی همچون میزان انرژی وارده، زمان آسیا کاری و به تبع آن دمای سینترینگ پودر نهایی، یکی از روش‌های مناسب برای تولید گستره وسیعی از پودرهای مغناطیسی و مواد نانو ساختار محسوب می‌شود. یکی از مهمترین ویژگی‌های این روش فعال‌سازی واکنش با انرژی مکانیکی به جای انرژی حرارتی که مورد نیاز فرآیندهای واکنش حالت جامد می‌باشد، است [۱۵-۱۹]. پژوهش‌های اخیر به منظور اصلاح خواص مغناطیسی و الکتریکی هگزافریت باریم از یون‌های فلزی سه‌ظرفیتی همچون Cr^{2+} [۲۰] و La^{2+} [۲۱] یا ترکیب مناسبی از یون‌های دوظرفیتی و سه‌ظرفیتی همچون La-Co [۲۲ و ۲۳] یا ترکیبی از یون‌های دوظرفیتی و چهارظرفیتی همچون Ni-Ti [۲۴] استفاده نموده‌اند. خواص مغناطیسی هگزافریت باریم با جانشینی یون‌های دوظرفیتی و



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی های TG-DTA از نمونه آلیش نشده آسیا شده به مدت ۲۰ ساعت.

جدول ۱. کدهای مربوط به نمونه های آلیش شده.

ترکیب	کد نمونه
$\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Ti}_{0.3}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$	ZZT
$\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Ce}_{0.3}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$	ZZC
$\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Sn}_{0.3}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$	ZZS

متناسب است. در نهایت افزایش وزن در منحنی TG نشان دهنده تشکیل فاز هگزافریت باریم می باشد. در منحنی DTA واکنش گرمای انجام شده در دمای 460°C می تواند مربوط به واکنش اکسیداسیون آهن باشد. آهن در اثر سایش محفظه آسیا در طول آسیاکاری وارد دستگاه شده و احتمالاً به دلیل حضور اتانول به عنوان عامل فعال کننده سطح، امکان انجام واکنش اکسیداسیون آن فراهم شده است. قله بعدی در دمای 740°C اتفاق افتاده که به صورت گرمازا بوده و نشان دهنده شکل گیری و انتقال از فاز بلوری است. قله گرماگیر مربوط به واکنش تشکیل مونوفریت باریم است که از دمای 800°C آغاز شده و در دمای 820°C به پایان می رسد. واکنش تشکیل مونوفریت باریم واکنشی گرماگیر بوده و کاهش وزن اندکی در نمونه رخ داده است. واکنش گرمای انجام شده در دمای 850°C مربوط به تشکیل هگزافریت باریم می باشد. بنابراین ضروری به نظر می رسد که نمونه های آلاینده در دماهای بالاتری از دمای 850°C سینتر شوند. بنابراین نمونه ها در دمای 1000°C به مدت ۵ ساعت سینتر شدند.

۱.۳. آنالیز فازی و بررسی مورفولوژی با FE-SEM

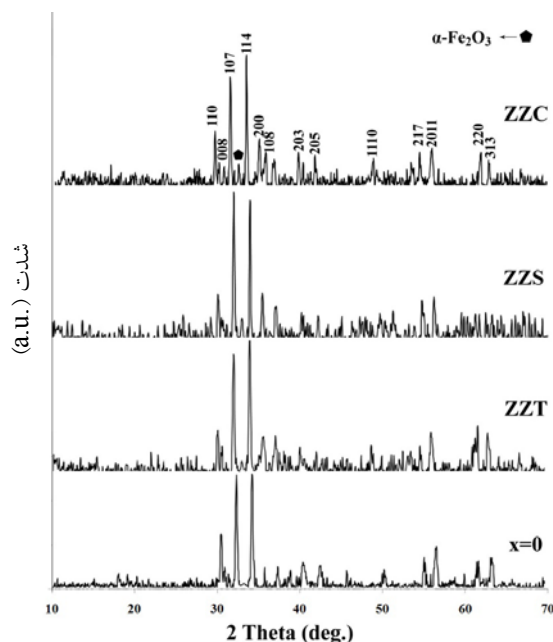
آنالیز پراش پرتوی ایکس به منظور بررسی ساختار بلوری نمونه های سنتز شده انجام شد. شکل ۲ نشان دهنده الگوهای پراش پرتوی ایکس از تمامی نمونه های تهیه شده می باشد. نتایج نشان می دهد.

تعیین شد. حلقه های M-H و منحنی مغناطش اولیه نمونه های پودری تهیه شده، در دمای ۲۹۸ K با استفاده از دستگاه مغناطیس سنج نمونه مرتعش (VSM) اندازه گیری شد. میدان پسماندزدا و مغناطش باقیمانده به طور مستقیم از حلقه های هیستریزس به دست آمد. جدول ۱ نشان دهنده کدهای مربوط به نمونه های آلیش شده می باشد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. آنالیز حرارتی

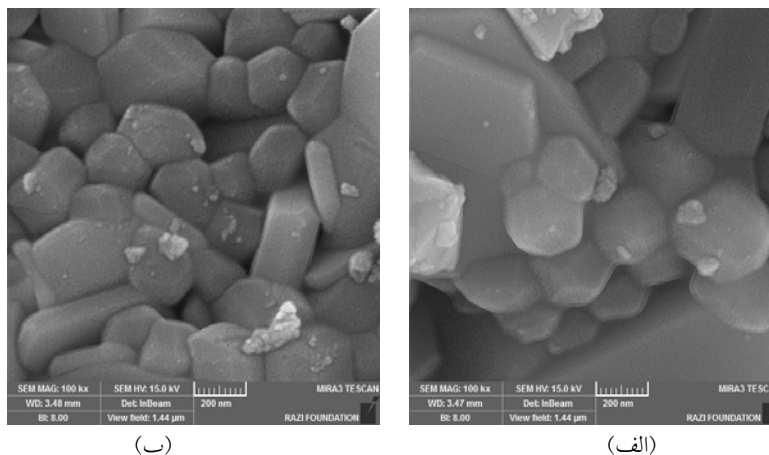
شکل ۱ نشان دهنده منحنی های TG-DTA از نمونه آلیش نشده و آسیا شده به مدت ۲۰ ساعت می باشد. منحنی توزین حرارتی نشان دهنده چند مرحله پیوسته کاهش وزن می باشد. با توجه به نمودار TG در محدوده دمایی $450-1000^{\circ}\text{C}$ کاهش وزن ۴/۶ درصدی مشاهده می شود که می تواند مربوط به خروج رطوبت از دستگاه و تشکیل اکسیدهای فلزی باشد. کاهش وزن بعدی معادل ۴/۳ درصد وزنی می باشد که در دمای 450°C آغاز شده و در دمای 760°C خاتمه می یابد که این مقدار کاهش وزن با خروج گاز دی اکسید کربن حاصل از تجزیه کربنات باریم



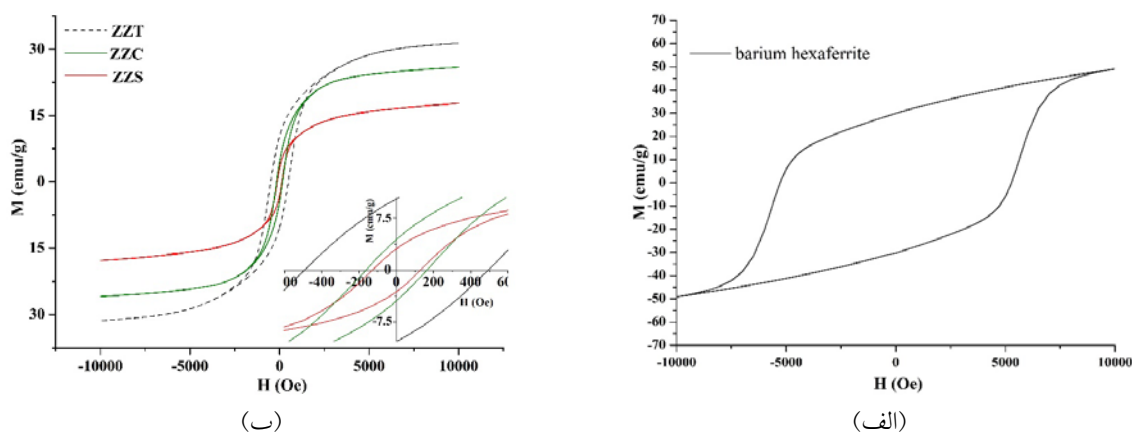
شکل ۲. الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های هگزاریت باریم خالص و آلیش شده.

در نمونه بدون آلیش تمامی قله‌های الگوهای پراش پرتوی ایکس می‌تواند به ساختار مگنتوپلمبیت مربوط بوده و نشان‌دهنده حضور تک‌فاز هگزاریت باریم منطبق با الگوی استاندارد به شماره کارت ۰۲۷۶-۰۰۷ باشد. بررسی الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های آلییده نشان‌دهنده پهن‌شدگی و جابه‌جایی جزئی موقعیت قله‌ها به سمت مقادیر ۲θ کمتر که به ترتیب نمونه‌های ZZC و ZZT دارای بیشترین و کمترین جابه‌جایی قله‌ها می‌باشند. بنابراین آلیش عناصر منجر به افزایش کمیت‌های شبکه هگزاریت باریم می‌شود. این اثر با در نظر گرفتن شعاع یونی کاتیون‌های جانشین‌شونده ($\text{Sn}^{4+}=0.69 \text{ nm}$, $\text{Ce}^{4+}=0.87 \text{ nm}$, نسبت به شعاع یونی $\text{Fe}^{3+}=0.64 \text{ nm}$) $\text{Ti}^{4+}=0.6$ در فریت قابل توجه می‌باشد. به علاوه نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های آلیش شده کسر کوچکی از فاز ثانویه ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) وجود دارد. همچنین به واسطه حد تشخیص پرتوی ایکس حضور فازهای مربوط به اکسیدهای آلیشی نیز در الگوهای پراش مشاهده نمی‌شود. تصاویر FE-SEM مربوط به نمونه‌های خالص و نمونه آلییده با ترکیب

در شکل ۳ آورده شده است. ساختار صفحه‌ای و هگزاگونال ذرات در هر دو حالت مشاهده می‌شود. متوسط اندازه ذرات در نمونه خالص و آلییده به ترتیب برابر ۴۵۰ nm و ۲۵۰ nm است و همان‌طور که به نظر می‌رسد اندازه ذرات نمونه خالص نسبت به نمونه آلییده تا حدودی بزرگتر می‌باشد. این مسئله به دلیل حضور یون‌های جانشین‌شونده در ترکیب هگزاریت باریم می‌باشد که به عنوان موانع رشد دانه عمل می‌کنند [۲۰-۲۳]. با توجه به شعاع یونی متفاوت کاتیون‌های جانشین‌شونده نسبت به یون‌های Fe^{3+} ممکن است اعوجاج شبکه منجر به عیوب مرزانه‌ای و نابه‌جایی سطحی شده که همین امر باعث جلوگیری از رشد دانه‌ها می‌شود که این مسئله در توافق خوبی با سایر پژوهش‌های صورت گرفته می‌باشد [۲۰-۲۳]. در هر دو حالت خالص و آلیش شده ملاحظه می‌شود که نمونه‌ها به صورت تک‌دامنه هستند. چرا که قطر بحرانی تعیین شده برای حالت تک‌دامنه در حدود ۴۵۰ nm [۲۵] بوده که در حالت آلییده کمتر و در حالت خالص برابر با این مقدار است.



شکل ۳. تصاویر FE-SEM از نمونه‌های، (الف) هگزافریت باریم خالص و (ب) ZZS



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) حلقه پسماند نمونه هگزافریت باریم، (الف) خالص و (ب) آلائیده.

جدول ۲. مقادیر مغناطش اشباع (M_s) و نیروی وادارندگی (H_c) نمونه‌های هگزافریت باریم خالص و آلائیده.

ترکیب	مغناطش اشباع (emu/g)	مغناطش باقیمانده (emu/g)	نیروی وادارندگی (Oe)
$BaFe_{12}O_{19}$	۴۹٫۲	۲۹٫۹۴	۵۲۴۷
$BaZn_{0.7}Zr_{0.3}Ti_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$	۳۳٫۱	۱۰٫۱	۴۸۵
$BaZn_{0.7}Zr_{0.3}Ce_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$	۲۷٫۲۴	۴٫۳۱	۱۷۴
$BaZn_{0.7}Zr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$	۱۸٫۱۴	۲٫۹	۱۱۸

۲.۳. بررسی خواص مغناطیسی

طبق پیشینه تحقیقات انجام شده، مغناطش اشباع و نیروی پسماندزدا هگزافریت باریم خالص به ترتیب در محدوده ۷۲-۹۴ emu/g و ۱٫۹۸-۳٫۲ kOe متغیر می‌باشد. این ماده همچنین دارای ثابت ناهمسانگردی بالا، $k_1 = 3.3 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ و ناهمسانگردی مغناطیسی- بلوری نسبتاً بالا در حدود ۱۷ kOe

در راستای محور c می‌باشد [۲۱-۲۶]. شکل ۴ نشان‌دهنده حلقه‌های هیستریزاس از نمونه خالص و نمونه‌های آلائیده است که در دمای اتاق تهیه شده‌اند. کمیت‌های مغناطیسی کاربردی همچون مغناطش اشباع، نیروی وادارندگی و مغناطش باقیمانده نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. تاکنون بیشترین مقدار مغناطش اشباع گزارش شده برای هگزافریت باریم خالص

۷۲ emu/g می باشد [۱۵]. در تحقیق حاضر میزان این کمیت برابر ۴۹/۲ emu/g به دست آمد. مقدار مغناطش اشباع کمتر به دست آمده در این تحقیق می تواند به دلیل چرخش اسپین ها و ناهمگن بودن نمونه ستر شده باشد. همان طور که ملاحظه می شود نمونه خالص در اثر میدان اعمالی به اشباع نمی رسد و این مسئله به دلیل مقدار بالای میدان ناهمسانگردی این ترکیب می باشد. طبق مطالعات انجام شده در رابطه با هگزافریت باریم این ترکیب به روش های مختلفی و با گستره وسیعی از یون ها آرایش شده و مقادیر متنوعی از کمیت های مغناطیسی (مغناطش اشباع، نیروی پسماندزدا و مغناطش باقیمانده) برای این ترکیب گزارش شده است [۲۴-۳۰].

آنچه که در این مطالعه حاصل شد کاهش هر سه مشخصه مغناطیسی در هر سه حالت آرایش بوده که این کاهش در رابطه با نیروی وادارندگی به مقدار بسیار چشمگیری بود. بیشترین تغییرات نیروی وادارندگی مربوط به نمونه با ترکیب ZZS بود که میزان کاهش نیروی وادارندگی نسبت به نمونه خالص تهیه شده برابر ۹۷/۷۵٪ کاهش بود. در هگزافریت باریم مکان های ۱۲k، ۴f_۲ و ۲b سهم عمده ای در ناهمسانگردی مغناطوبلوری این ساختار دارند. قرارگیری یون ها در این مکان ها تأثیر منفی بر ناهمسانگردی مغناطیسی - بلوری داشته و به دنبال آن نیروی وادارندگی کاهش می یابد. همچنین کاهش میزان نیروی وادارندگی در تمامی نمونه های آلییده، به دلیل افت ناهمسانگردی مغناطیسی - بلوری و تغییر جهت آسان مغناطش از محور c در ساختمان بلوری شش وجهی هگزافریت باریم به صفحه موازی با صفحه قاعده آن (ناهمسانگردی صفحه ای) می باشد [۲۵-۳۰]. هگزافریت باریم خالص با دو زیرشبکه از یون های آهن می باشد که اسپین یون های آهن قرار گرفته در مکان های بلورشناسی ۴f_۱ و ۴f_۲ به صورت پادموازی با یون های آهن قرار گرفته در مکان های ۲a، ۲b و ۱۲k می باشد [۲۴-۲۸]. طبق مطالعات انجام شده یون های Zn^{۲+} منحصراً مکان های ۴f_۱ را اشغال می کنند که یکی از مکان های تتراهدراال با اسپین پایین محسوب می شود [۲۶]. همچنین یون های Zr^{۴+} در بین مکان های اکتاهدراال و تتراهدراال توزیع می شوند و مکان

ترجیحی مشخصی برای این یون وجود ندارد [۲۷]. در رابطه با یون های Ti^{۴+} [۲۸]، Ce^{۴+} [۲۸] و Sn^{۴+} [۳۰] نیز بررسی های مزویار پژوهش های صورت گرفته نشان می دهد یون های تیتانیوم به طور ترجیحی مکان های ۲b را اشغال می کنند ولی زمانی که روی و تیتانیوم همزمان با یکدیگر وارد ساختار می شوند به طور ترجیحی یون های تیتانیوم در مکان های ۴f_۱ و ۴f_۲ با یون های Fe^{۳+} با اسپین پایین جانشین می شوند [۲۶] و [۲۸]. همچنین یون های Sn^{۴+} مکان های بای پیرامید (۲b) و یون های Ce^{۴+} مکان های تتراهدراال (۴f_۱) را اشغال می کنند. به طور کلی جانشینی یون های آرایش شونده با گشتاورهای مغناطیسی (Zn^{۲+}=۰ μ_B, Ti^{۴+}=۲ μ_B, Ce^{۴+}=۲ μ_B, Sn^{۴+}=۲ μ_B, Zr^{۴+}=۰ μ_B) کمتر از یون آهن (Fe^{۳+}=۵ μ_B) منجر به اختلال در آرایش مغناطیسی در مکان های خالی و عدم تعادل بین یون های Fe^{۳+} و Fe^{۲+} شده که همین امر منجر به تغییر خواص مغناطیسی می شود. از طرفی همچنین کاهش کلی مغناطش اشباع ناشی از حضور فاز غیرمغناطیسی هماتیت در نمونه های آلییده است، که منجر به افت خواص مغناطیسی نمونه شده است. در این تحقیق بیشترین میزان کاهش مغناطش اشباع و نیروی پسماندزدا در نمونه با ترکیب ZZS رخ داد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله خواص فیزیکی و مغناطیسی پودر هگزافریت باریم آلییده با ترکیب (X=Ti,Ce,Sn) BaZn_{۰.۶}Zr_{۰.۳}X_{۰.۱}Fe_{۱.۰}O_{۱۹} به روش فعال سازی مکانیکی بررسی شد. نتایج حاکی از تشکیل تقریباً تک فاز هگزافریت باریم پس عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۵ h در نمونه های آرایش شده بود. طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ذرات با مورفولوژی هگزگونال و اندازه ای در حدود ۴۵۰ nm و ۲۵۰ nm برای به ترتیب نمونه های آرایش نشده و آرایش شده بودند. اندازه گیری کمیت های مغناطیسی با مغناطیس سنج نمونه مرتعش حاکی از تشکیل ماده ای نرم مغناطیس به واسطه آرایش با آرایش های دوظرفیتی و چهارظرفیتی بود که به واسطه افزایش

روی، زیرکونیوم و قلع منجر به تبدیل شدن ترکیب به پودری با خواص نرم مغناطیس می‌شود که این مسئله به دلیل نحوه قرارگیری یون‌های مذکور در مکان‌های پنج‌گانه یون‌های آهن و کاهش برهم‌کنش‌های فوق تبادلی توجیه شد.

ناهمسانگردي صفحه‌ای c در ترکیب هگزا فريت باریم بود. بیشترین میزان مغناطش اشباع در نمونه‌ای با ترکیب $\text{BaZn}_{0.6}\text{Zr}_{0.3}\text{Ti}_{0.3}\text{Fe}_{1.8}\text{O}_{19}$ و به میزان 33.1 emu/g اندازه‌گیری شد. همچنین نتایج نشان داد آلايش با یون‌های

مراجع

- Pires, R Ribeiro Correa, and CW de-Araujo Paschoal, *Ceram. Int.* **35** (2009) 2443.
17. P G Berco, and H R Bertorello, High-energy ball milling of Ba-hexaferrite/Fe magnetic composite, *J. Magn. Magn. Mater.* **187** (1998) 169.
18. A M Gadaila and H W Hennicke, Formation of Barium Hexaferrite, *J. Magn. Magn. Mater.* **1** (1975) 144.
19. O Acher, *J. Magn. Magn. Mater.* **321** (2009) 2033.
20. M Awawdeh, I Bsoul, and S H Mahmood, *J. Alloy Compd.* **585** (2014) 465.
21. S Verma, O P Pandey, A Paesano, and P Sharma, *Phys. B: Condens. Matter.* **448** (2014) 57.
22. J Li, H Zhang, Q Li, Y Li, and G Yu, *J. Rare Earth* **31** (2013) 983.
23. T Kaur, B Kaur, B Bhat, S Kumar, and A K Srivastava, *Phys. B* **456** (2015) 206.
24. M Zhang, Z Zi, Q Liu, X Zhu, C Liang, Y Sun, and J Dai, *J. Magn. Magn. Mater.* **369** (2014) 23.
25. M Kishimoto, S Kitahata, and M Amemiya, *J. Appl. Phys.* **61** (2011) 101.
26. A Xia, D Du, P Li, and Y Sun, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **22** (2011) 223.
27. M Sharma, S C Kashyap, and H C Gupta, *Phys. B: Condens. Matter.* **448** (2014) 24.
28. Z F Zi, Q C Liu, J M Dai, and Y P Sun, *Solid State Communications* **152** (2012) 894.
29. V V Soman, V M Nanoti, and D K Kulkarni, *Phys. Procedia.* **54** (2014) 30.
30. M Jamalian, *J. Magn. Magn. Mater.* **378** (2015) 217.
1. L Zhao, X Lv, Y Wei, C Ma, and L Zhao, *J. Magn. Magn. Mater.* **332** (2013) 44.
2. X Xu, J Park, Y K Hong, and A M Lane, *J. Solid State Chem.* **222** (2015) 84.
3. Y Wang, Y Huang, and Q Wang, *J. Magn. Magn. Mater.* **324** (2012) 3024.
4. M J Molaei, A Ataie, S Raygan, and S J Picken, *Mater. Character.* **101** (2015) 78.
5. S S Fortes, J G S Duque, and M A Macedo, *Phys. B: Condens. Matter* **384** (2006) 88.
6. G Xu, H Ma, M Zhong, J Zhou, Y Yue, and Z He, *J. Magn. Magn. Mater.* **301** (2006) 383.
7. L Zhao, X Lv, Y Wei, C Ma, and L Zhao, *J. Magn. Magn. Mater.* **332** (2013) 44.
8. X Xu, J Park, Y K Hong, and A M Lane, *J. Solid State Chem.* **222** (2015) 84.
9. H F Yu, *J. Magn. Magn. Mater.* **341** (2013) 79.
10. M M Rashad and I A Ibrahim, *J. Magn. Magn. Mater.* **323** (2011) 2158.
11. V Pillai, P Kumar, M S Multani, and D O Shah, *Coll. Surf. A: Phys. Eng. Asp.* **80** (1993) 69.
12. G. Nabyouni, D. Ghanbari, A. Yousofnejad, M. Seraj, *J. Ind. Eng. Chem.* **20** (2014) 3425.
13. K V P M Shafi and A Gedanken, *Nanostruct. Mater.* **12** (1999) 29.
14. J Qiu, H Shen, and M Gu, *Powder Technol.* **154** (2005) 116.
15. S Dursun, R Topkaya, N Akdogan, and S Alkoy, *Ceram. Int.* **38** (2012) 3801.
16. R Mendonca Almeida, W Paraguassu, D Soares