

سنتز و ارزیابی خواص فیزیکی و مغناطیسی پودر هگزا فیریت باریم آلیاژ

با ترکیب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}X_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$ ($X=Ti,Ce,Sn$)

سید سلمان سید افقهی^۱ و مجتبی جعفریان^۲

۱. دانشگاه جامع امام حسین (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 فیریت باریم با ترکیب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}X_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$ ($X=Ti,Ce,Sn$) به روش فعال‌سازی مکانیکی سنتز و به وسیله آنالیزهای حرارتی همزمان (STA)، پراش پرتوی ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) و مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تمامی نمونه‌های سنتز شده به صورت تقریباً تک‌فاز و با میانگین اندازه ذرات در حدود ۴۵۰ nm و ۲۵۰ nm به ترتیب برای نمونه آلیاژ نشده و آلیاژ شده بودند. تغییرات قابل توجهی در خواص مغناطیسی هگزا فیریت باریم در اثر جانشینی یون‌های آهن مشاهده شد. طبق نتایج بیشترین میزان مغناطش اشباع (۳۳۱ emu/g) و کمترین نیروی پسماندزدا (۱۸۱۴ Oe) مربوط به ترتیب مربوط به نمونه با ترکیب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Ti_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$ و $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$ بود.

واژه‌های کلیدی: هگزا فیریت باریم، فعال‌سازی مکانیکی، ریزساختار، خواص مغناطیسی

۱. مقدمه

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 $Ba_0.6Fe_2O_7$ 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

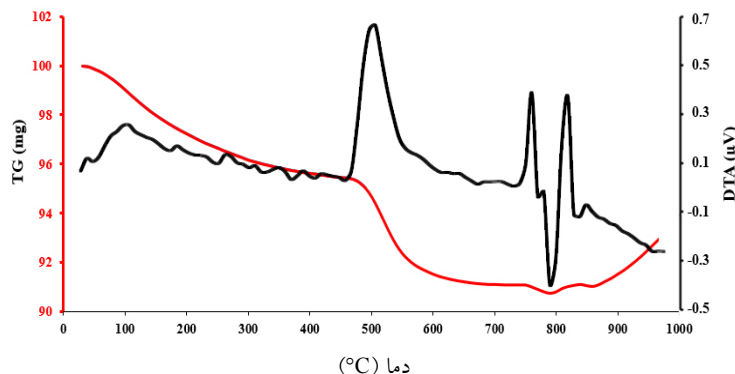
فیریت‌های هگزاگونال درصد بالایی از مغناطیس‌های دائمی جهان را شامل می‌شوند و دارای ساختار مگنتوپلمبیت $PbFe_{7/5}Mn_{3/5}Al_{0.5}Ti_{0.5}O_{19}$ هستند. یکی از انواع مهم فیریت‌های هگزاگونال، هگزا فیریت باریم می‌باشد. ترکیبات زیادی بین BaO و Fe_2O_3 وجود دارد، اما نسبت ۱:۶ از لحاظ مغناطیسی مهمترین ترکیب می‌باشد [۱]. هگزا فیریت باریم خالص دارای ساختار بلوری هگزاگونال می‌باشد، که کمیت

چهار ظرفیتی 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 $BaZn_{0.7}Zr_{0.3}X_{0.7}Fe_{1.0}O_{19}$ ($X=Ti, Ce, Sn$) سنتز شده به روش فعال‌سازی مکانیکی پرداخته شد. هدف از این کار مطالعه تأثیر آرایش 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 ($X=Ti, Ce, Sn$) $BaZn_{0.7}Zr_{0.3}X_{0.7}Fe_{1.0}O_{19}$ 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 PM۱۰۰) قرار گرفته و به مدت ۲۰ ساعت در اتمسفر هوا آسیابکاری و سپس به مدت ۵ ساعت در دمای $1000^\circ C$ و با نرخ $5^\circ C/min$ 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, BHR) به روش $5^\circ C/min$ تحت اتمسفر هوا با نرخ گرمایش $10^\circ C/min$ بر روی نمونه آسیاب شده بدون افزودنی انجام شد. بررسی فازی پودرهای سنتز شده با استفاده از دستگاه پراش پرتوی ایکس ($XRD, XMD 300$) در محدوده $70^\circ C-10^\circ C$ با استفاده از تابش $CuK\alpha$ با طول موج 1.54 آنگستروم 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 اکتاهدراک ($4f_1, 2a, 12k$)، تتراهدرال ($4f_1$) و بای پیرامید (۲b) 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 آسیابکاری 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 $Cr [20]$ و $La [21]$ یا ترکیب مناسبی از یون‌های دوظرفیتی و سه‌ظرفیتی همچون $La-Co [22]$ و $[23]$ یا ترکیبی از یون‌های دوظرفیتی و چهارظرفیتی همچون $Ni-Ti [24]$ 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.

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 46°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 74°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 80°C آغاز شده و در دمای 82°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 85°C مربوط به تشکیل هگزافریت باریم می باشد. بنابراین ضروری به نظر می رسد که نمونه های آلاینده در دماهای بالاتری از دمای 85°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.

جدول ۱. کدهای مربوط به نمونه های آلیش شده.

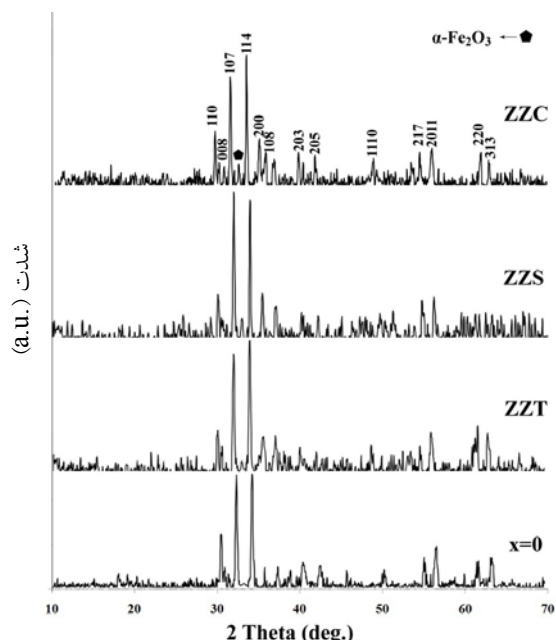
کد نمونه	ترکیب
ZZT	$\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Ti}_{0.3}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$
ZZC	$\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Ce}_{0.3}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$
ZZS	$\text{BaZn}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Sn}_{0.3}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_{19}$

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 باشند. با توجه به نمودار TG در محدوده دمایی 45°C - 100°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 45°C آغاز شده و در دمای 76°C خاتمه می یابد که این مقدار کاهش وزن با خروج گاز دی اکسید کربن حاصل از تجزیه کربنات باریم

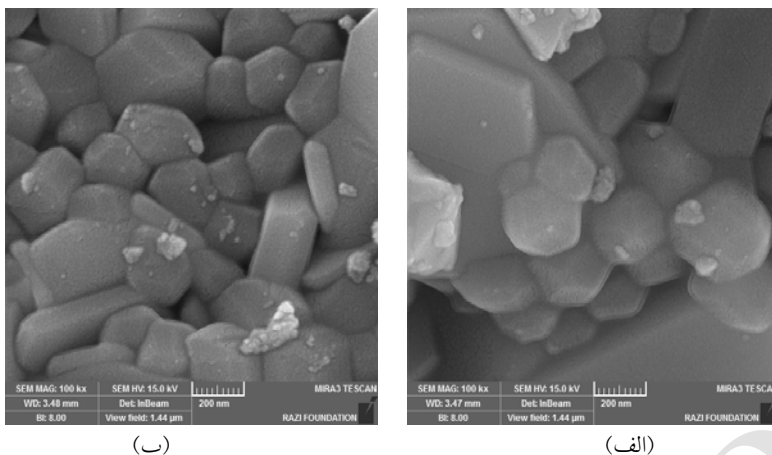


شکل ۲. الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های هگزافریت باریم خالص و آلیش شده.

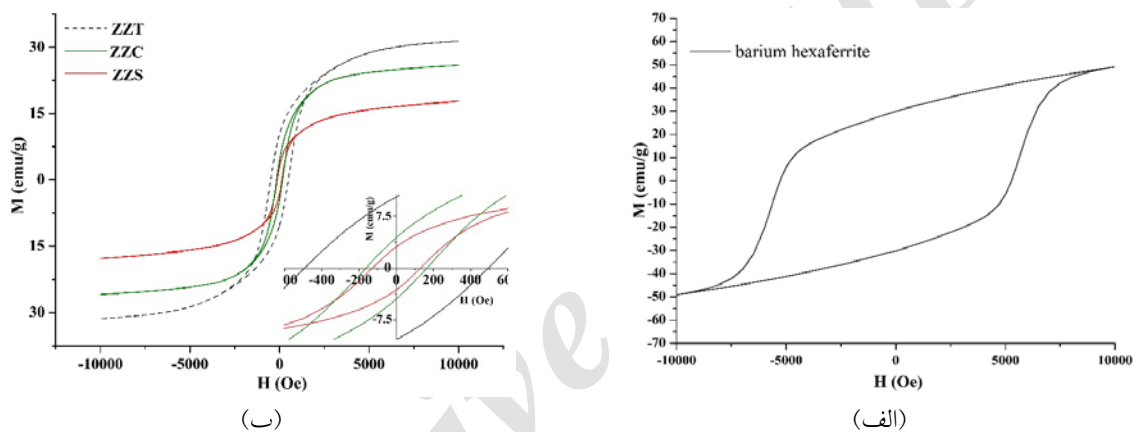
در نمونه بدون آلیش تمامی قله‌های الگوهای پراش پرتوی ایکس می‌تواند به ساختار مگنتوپلمبیت مربوط بوده و نشان‌دهنده حضور تک‌فاز هگزافریت باریم منطبق با الگوی استاندارد به شماره کارت ۰۲۷۶-۰۰۷ باشد. بررسی الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های آلییده نشان‌دهنده پهن‌شدگی و جابه‌جایی جزئی موقعیت قله‌ها به سمت مقادیر ۲۰ کمتر که به ترتیب نمونه‌های ZZC و ZZT دارای بیشترین و کمترین جابه‌جایی قله‌ها می‌باشند. بنابراین آلیش عناصر منجر به افزایش کمیت‌های شبکه هگزافریت باریم می‌شود. این اثر با در نظر گرفتن شعاع یونی کاتیون‌های جانشین‌شونده ($\text{Sn}^{2+}=0.069 \text{ nm}$, $\text{Ce}^{3+}=0.087 \text{ nm}$, $\text{Ti}^{2+}=0.06 \text{ nm}$) نسبت به شعاع یونی Fe^{3+} ($\text{Fe}^{3+}=0.064 \text{ nm}$) 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

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 هگزافریت 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 مرزخانه‌ای 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.

در نمونه بدون آلیش تمامی قله‌های الگوهای پراش پرتوی ایکس می‌تواند به ساختار مگنتوپلمبیت مربوط بوده و نشان‌دهنده حضور تک‌فاز هگزافریت 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 ۲۰ کمتر که به ترتیب نمونه‌های ZZC و ZZT دارای بیشترین و کمترین جابه‌جایی قله‌ها می‌باشند. بنابراین آلیش عناصر منجر به افزایش کمیت‌های شبکه هگزافریت باریم می‌شود. این اثر با در نظر گرفتن شعاع یونی کاتیون‌های جانشین‌شونده ($\text{Sn}^{2+}=0.069 \text{ nm}$, $\text{Ce}^{3+}=0.087 \text{ nm}$, $\text{Ti}^{2+}=0.06 \text{ nm}$) نسبت به شعاع یونی Fe^{3+} ($\text{Fe}^{3+}=0.064 \text{ nm}$) 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



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) آلییده.

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

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

در راستای محور c می‌باشد [۲۱-۲۶]. شکل ۴ نشان‌دهنده حلقه‌های هیستریزاس از نمونه خالص و نمونه‌های آلییده 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

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

ترجیحی مشخصی برای این یون وجود ندارد [۲۷]. در رابطه با یون‌های Ti^{4+} [۲۸]، Ce^{4+} [۲۸] و Sn^{4+} [۳۰] نیز بررسی‌های مزویار پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد یون‌های تیتانیوم به طور ترجیحی مکان‌های ۲b را اشغال می‌کنند ولی زمانی که روی و تیتانیوم همزمان با یکدیگر وارد ساختار می‌شوند به طور ترجیحی یون‌های تیتانیوم در مکان‌های $4f_1$ و $4f_2$ یون‌های Fe^{3+} با اسپین پایین جانشین می‌شوند [۲۶] و [۲۸]. همچنین یون‌های Sn^{4+} مکان‌های بای‌پیرامید (۲b) و یون‌های Ce^{4+} مکان‌های تتراهدرال ($4f_1$) را اشغال می‌کنند. به طور کلی جانشینی یون‌های آلایش شونده با گشتاورهای مغناطیسی ($Zr^{4+}=0 \mu_B$, $Ti^{4+}=2 \mu_B$, $Ce^{4+}=2 \mu_B$, $Sn^{4+}=2 \mu_B$) کمتر از یون آهن ($Fe^{3+}=5 \mu_B$) منجر به اختلال در آرایش مغناطیسی در مکان‌های خالی و عدم تعادل بین یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} شده که همین امر منجر به تغییر خواص مغناطیسی می‌شود. از طرفی همچنین کاهش کلی مغناطش اشباع ناشی از حضور فاز غیرمغناطیسی هماتیت در نمونه‌های آلاییده 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. نتیجه‌گیری

در این مقاله خواص فیزیکی و مغناطیسی پودر هگزافریت باریم آلاییده با ترکیب $(X=Ti, Ce, Sn)$ $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}X_{0.1}Fe_{1.8}O_{19}$ به روش فعال‌سازی مکانیکی بررسی شد. نتایج حاکی از تشکیل تقریباً تک‌فاز هگزافریت باریم پس عملیات حرارتی در دمای $1000^\circ C$ به مدت ۵ h در نمونه‌های آلایش شده بود. طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ذرات با مورفولوژی هگزگونال و اندازه‌ای در حدود ۴۵۰ nm و ۲۵۰ nm برای به ترتیب نمونه‌های آلایش نشده و آلایش شده بودند. اندازه‌گیری کمیت‌های مغناطیسی با مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش حاکی از تشکیل ماده‌ای نرم مغناطیس به واسطه آلایش با آلایش‌های دوظرفیتی و چهارظرفیتی بود که به واسطه افزایش

۷۲ emu/g می‌باشد [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 می‌تواند به دلیل چرخش اسپین‌ها و ناهمگن بودن نمونه ستر شده باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نمونه خالص در اثر میدان اعمالی به اشباع نمی‌رسد و این مسئله به دلیل مقدار بالای میدان ناهمسانگردی این ترکیب می‌باشد. طبق مطالعات انجام شده در رابطه با هگزافریت باریم این ترکیب به روش‌های مختلفی و با گستره وسیعی از یون‌ها آلایش شده و مقادیر متنوعی از کمیت‌های 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 آلایش 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 مکان‌های $12k$ ، $4f_2$ و $2b$ سهم عمده‌ای در ناهمسانگردی مغناطوبلوری این ساختار دارند. فرارگیری یون‌ها در این مکان‌ها تأثیر منفی بر ناهمسانگردی مغناطیسی - بلوری داشته و به دنبال آن نیروی وادارندگی کاهش می‌یابد. همچنین کاهش میزان نیروی وادارندگی در تمامی نمونه‌های آلاییده، به دلیل افت ناهمسانگردی مغناطیسی - بلوری و تغییر جهت آسان مغناطش از محور c در ساختمان بلوری شش‌وجهی هگزافریت باریم به صفحه موازی با صفحه قاعده آن (ناهمسانگردی صفحه‌ای) می‌باشد [۲۵-۳۰]. هگزافریت باریم خالص با دو زیرشبکه از یون‌های آهن می‌باشد که اسپین یون‌های آهن قرار گرفته در مکان‌های بلورشناسی $4f_1$ و $4f_2$ به صورت پادموازی با یون‌های آهن قرار گرفته در مکان‌های $2a$ ، $2b$ و $12k$ می‌باشد [۲۴-۲۸]. طبق مطالعات انجام شده یون‌های Zn^{2+} منحصراً مکان‌های $4f_1$ را اشغال می‌کنند که یکی از مکان‌های تتراهدرال با اسپین پایین محسوب می‌شود [۲۶]. همچنین یون‌های Zr^{4+} در بین مکان‌های اکتاهدرال و تتراهدرال توزیع می‌شوند و مکان

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

ناهمسانگردی صفحه‌ای C در ترکیب هگزافریت باریم بود. بیشترین میزان مغناطش اشباع در نمونه‌ای با ترکیب $BaZn_{0.76}Zr_{0.3}Ti_{0.3}Fe_{1.0/8}O_{19}$ و به میزان 33.1 emu/g اندازه‌گیری شد. همچنین نتایج نشان داد آرایش با یون‌های

مراجع

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
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 Henniscke, 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.