

ارزیابی مقایسه‌ای خواص مغناطیسی هگزا فريت باريوم دوپ شده با کاتیون‌های پارامغناطیس و دیامغناطیس

صاحب‌لی منافی^{۱*}، محسن صالحی^۲، سید حسین بدیعی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی مواد، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، سمنان، ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، سمنان، ایران

*ali_manafi2005@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۲)

چکیده

در این پژوهش ابتدا پودرهای مغناطیسی $BaFe_{12}O_{19}$ ، $Ba(Mg,Ti)_xFe_{12-2x}O_{19}$ و $Ba(Zn,Cu)_xFe_{12-2x}O_{19}$ با مقدار $x=0/5$ با استفاده از فرآیند آلیاژسازی مکانیکی در یک آسیاب پر انرژی تهیه شد. در ادامه یک نمونه پودری به صورت خالص و دو نمونه پودر دوپ شده تولید شد. سپس به منظور بررسی فازی، مورفولوژیکی و خواص مغناطیسی به ترتیب از آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) و مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) استفاده شد. الگوهای اشعه ایکس در دمای $1000^\circ C$ مؤید تشکیل ترکیب تقریباً تک فاز هگزا فريت باريوم به همراه میزان محدودی فاز هماتیت بود. تصویر میکروسکوپ الکترونی در حالت خالص بیانگر تشکیل مورفولوژی چند وجهی و در حالت ورود افزودنی‌ها به ترکیب تشکیل مورفولوژی هگزاگونال صفحه‌ای به واسطه رشد ترجیحی ذرات در جهات ab کریستالوگرافی مشاهده شد. بررسی‌های مغناطیسی پودر در حالت خالص پارامترهای مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی را به ترتیب معادل (58/48 emu/g) و (5247/2 Oe) نشان داد. حضور یون‌های دیامغناطیس شامل روی و مس در ساختار هگزا فريت باريوم اثر بیشتری نسبت به کاتیون‌های پارامغناطیس منیزیم و تیتانیوم در کاهش پارامترهای مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی داشت. بعد از ورود افزودنی‌ها بالاترین مغناطش اشباع (53 emu/g) از نمونه با ترکیب $BaMg_{0.5}Ti_{0.5}Fe_{11}O_{19}$ و کمترین نیروی وادارندگی (50 Oe) از نمونه با ترکیب $BaZn_{0.5}Cu_{0.5}Fe_{11}O_{19}$ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی:

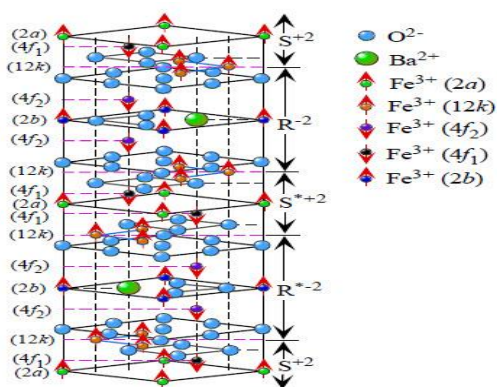
هگزا فريت باريوم، مغناطش، نیروی وادارندگی، پارامغناطیس، دیامغناطیس.

۱- مقدمه

یکی از شاخص‌ترین ترکیبات این گروه به واسطه دارا بودن خواص مطلوب مغناطیسی، پایداری شیمیایی عالی، خواص حرارتی مطلوب، آنیزوتروپی تک محور بالا و سختی مکانیکی

هگزا فريت‌ها دارای ساختار مگنتوپلامبیت بوده و با توجه به ترکیب شیمیایی به انواع مختلف شامل هگزا فريت‌های نوع Z، Y، W و M تقسیم می‌شوند. از این میان هگزا فريت باريوم نوع M

ترجیحا به واسطه چرخش در یک میدان خارجی در راستای یکدیگر قرار می‌گیرند هم‌راستا شدن الکترون‌ها با میدان، موجب تقویت و در نهایت بالا رفتن قابلیت نفوذ نسبی می‌شود این مواد به پارامغناطیس معروف هستند [۱، ۵-۶]. سلول واحد ابتدایی هگزا فريت های نوع M با ساختار مگنتوپلامیت شامل ده لایه اکسیژنی، پی در پی متشکل از بلوکهای R (هگزاگونال)، S (اسپینل)، S^* و R^* است. بلوکهای S^* و R^* یک نظم اتمی معادل و متناسب دارند اما یک چرخش 180° درجه با توجه به بلوک های R و S حول محور c دارند. بلوک های S و S^* شامل دو لایه از O^{2-} هستند در حالیکه بلوک های R و R^* شامل سه لایه از O^{2-} ، به همراه یک جایگاه اکسیژن در لایه میانی که توسط یک یون Ba^{2+} اشغال می‌شود [۱]. شکل ۱ بیانگر نحوه قرار گیری اتم‌ها در ساختار هگزا فريت باریوم نوع M است. هگزا فريت باریوم به صورت ذاتی فری مغناطیس و یکی از ترکیبات شاخص مغناطیسی محسوب می‌شود، با هدف تبدیل این ماده به حالت نرم مغناطیسی اخیرا پژوهش های زیادی با هدف جانمایی دوپنت های مختلف به جای Fe^{3+} و Ba^{2+} انجام شده است. از جمله این پژوهش ها می توان به جانمایی کاتیون های Eu^{2+} ، Er^{3+} ، Ni^{2+} ، Cr^{3+} ، Zn^{2+} ، Ce^{3+} ، Co^{2+} [۷]، Cr^{3+} ، Zn^{2+} [۸]، Er^{3+} ، Ni^{2+} [۹]، Eu^{2+} ، Ce^{3+} [۱۰]، Ni^{2+} ، Ti^{4+} [۱۱]، Ni^{2+} ، Zr^{4+} [۱۲] و Er^{3+} ، Zr^{4+} [۱۳] Sn^{4+} ، Mg^{2+} [۱۴] اشاره کرد.



شکل (۱): شماتیک ساختار هگزا فريت باریوم نوع M [۱]

کار حاضر یک بررسی مقایسه ای در مورد اثر طبیعت مغناطیسی

بالا به عنوان یک ماده مغناطیسی سخت، در وسایل میکروویو و محیط های ذخیره اطلاعات با ظرفیت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. این ماده به صورت ذاتی دارای نیروی وادارندگی بسته به شرایط تولید در محدوده 5000 Oe و مغناطش اشباع 60 emu/g است. برای کاربردهای خاص، ریز بودن پودرها در محدوده میکرونی با توزیع اندازه ذرات همگن و خواص مغناطیسی کنترل شده مهم است [۱-۲]. با توجه به اینکه در محیط های ذخیره اطلاعات باید دو ویژگی قابلیت ذخیره اطلاعات و پایداری اطلاعات بر روی محیط ضبط شده مطلوب باشد، لذا دو پارامتر اصلی این پودرها به ترتیب مغناطش اشباع (M_s) و نیروی وادارندگی مغناطیسی (H_c) از اهمیت بالایی برخوردار می باشند. در محیط های ذخیره اطلاعات، مهمترین پارامتر قابلیت ذخیره حداکثر اطلاعات در حداقل فضای ممکن است و این عملکرد دارای ارتباط زیادی با میزان مغناطش اشباع پودرها است همچنین قابلیت پایدار نگه داشتن اطلاعات در مقابل میدان و امغناطش با نیروی وادارندگی مغناطیسی در ارتباط می باشد [۱-۳]. ترکیب هگزا فريت باریوم به عنوان یک ماده سخت مغناطیسی در حالت خالص دارای حلقه مغناطیسی مسطح و دارای مغناطش اشباع بالا، نیروی وادارندگی مغناطیسی بالا، چگالی شار اشباع بالا و قابلیت نفوذ اولیه پایین می باشد. جانمایی کاتیون های فلزی و غیر فلزی مختلف با ساختار و طبیعت مغناطیسی متنوع از قبیل Zn^{2+} ، Cu^{2+} ، Mg^{2+} ، Ti^{4+} و غیره به جای Fe^{3+} موجب کاهش ناهمسانگردی مگنتو کریستالی و در نتیجه کاهش نیروی وادارندگی می‌شود. لذا با تغییر خواص ساختاری، مغناطیسی و الکتریکی ترکیب هگزا فريت باریوم این ماده از حالت سخت به یک ماده نرم مغناطیسی تبدیل می‌شود [۴، ۱۷]. الکترون‌ها در عناصر مس و روی به صورت جفت بوده و اتم‌ها دارای گشتاور مغناطیسی دائمی نیستند، همچنین نفوذ پذیری مغناطیسی منفی در محدوده 10^{-5} دارند و با قرار گیری تحت میدان مغناطیسی در آنها یک میدان مغناطیسی منفی القاء می‌شود این شاخصه ها این مواد را در دسته مواد دیامغناطیس قرار داده است. اما در تیتانیوم و منیزیم الکترون‌ها

جدول (۱): کدهای مربوط به نمونه‌های دوپ شده.

کد نمونه	ترکیب
Ba-M(Pure)	BaFe ₁₂ O ₁₉
BMTF	BaMg _{0.5} Ti _{0.5} Fe ₁₁ O ₁₉
BZCF	BaZn _{0.5} Cu _{0.5} Fe ₁₁ O ₁₉

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4(h^2 + hk + k^2)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

$$V_{\text{cell}} = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c \quad (2)$$

جدول (۲): پارامترهای (c, a) و حجم سلول واحد (V) برای نمونه‌های خالص و دوپ شده

نمونه	a=b (Å)	V(Å ³)	c (Å)	c/a
Ba-M(Pure)	۵/۸۷	۶۹۵	۲۳/۱۷	۳/۹۴
BMTF	۵/۸۱	۶۷۶/۴۷	۲۳/۱۵	۳/۹۸۵
BZCF	۵/۸۰	۶۷۳/۸۰	۲۳/۱۴	۳/۹۸۸

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نتایج XRD

شکل ۲ بیانگر الگوی پراش اشعه ایکس استاندارد، نمونه‌های خالص و دوپ شده ترکیب هگزافریت باریم با کدهای مربوطه می‌باشد. در هر حالت در بازه زاویه ای ۱۰° - ۷۰° قله‌های پراش به خوبی پیک‌های مربوطه را منعکس کرده و تمام پیک‌ها با الگوی استاندارد با شماره کارت (۰۰۷-۰۲۷۶) همخوانی دارند این در حالی است که جوانه‌های فاز هماتیت در ترکیب فازی نمونه‌های دوپ شده قابل مشاهده هستند. لذا تشکیل ترکیب هگزافریت باریم نوع M به عنوان فاز غالب با گروه فضایی P63/mmc به همراه مقدار محدودی فاز هماتیت تایید شد [۱۵]. با توجه به اختلاف شعاع یون‌های میهمان و یون‌های آهن به عنوان میزبان انحراف پیک‌ها به سمت زاویه‌های کمتر مشاهده می‌گردد [۱۶].

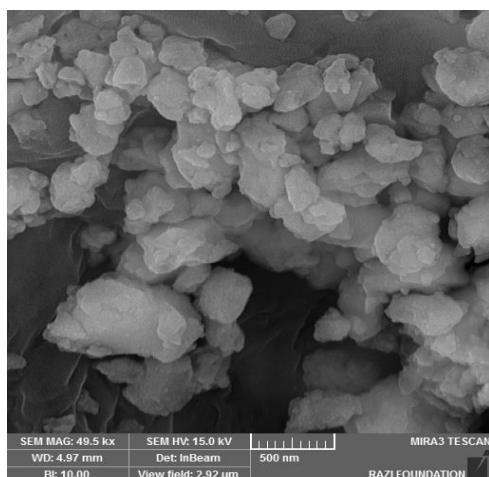
یون‌های دوپ شده بر خواص مغناطیسی ترکیب هگزافریت باریم نوع M می‌باشد.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

به این منظور توزین مواد اولیه بر مبنای فرمول BaFe₁₂O₁₉ در حالت خالص و سپس با هدف دستیابی به دو ترکیب دوپ شده با فرمول Ba(Zn,Cu)_xFe_{12-2x}O₁₉ و Ba(Mg,Ti)_xFe_{12-2x}O₁₉ (x=۰/۵) صورت پذیرفت. در نخستین گام کربنات باریم (BaCO₃) و اکسید آهن (Fe₂O₃) به عنوان مواد زمینه و از اکسید منیزیم (MgO) و اکسید تیتانیوم (TiO₂) و در گام بعدی از اکسید روی (ZnO) و اکسید مس (CuO) به عنوان افزودنی استفاده شد. مواد اولیه به صورت غیراستوکیومتری با نسبت گلوله به پودر ۱:۲۵ توزین شدند. مخلوط پودری به وزن ۷ g همراه ۲۰ cc آب مقطر به مدت ۱۲ ساعت در یک کاپ از جنس تفلن با گلوله‌های زیرکنیایی در اندازه‌های مختلف تحت آسیابکاری قرار داده شد.

سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در اتمسفر هوا خشک و در نهایت با نرخ ۵°C/min به مدت ۵ ساعت در دمای ۱۰۰۰°C عملیات حرارتی شدند. بررسی فازی و ساختاری پودر سنتز شده به ترتیب با استفاده از دستگاه XRD مدل XMD 300 با تابش طول موج Cu Kα صورت گرفت.

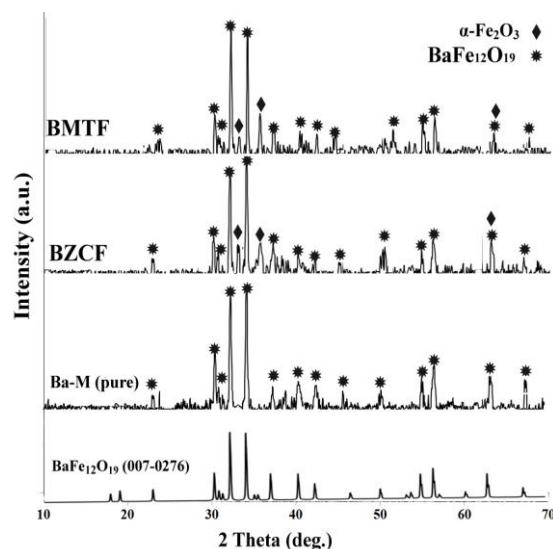
جهت بررسی مورفولوژی پودر از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل VEGA/TESCAN-LMU و با هدف مشخصه‌یابی مغناطیسی نمونه‌ها از دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) مدل BHM-525 در دمای اتاق استفاده شد. در نهایت کد گذاری نمونه‌ها مطابق جدول ۱ انجام شد. هر دو پارامتر شبکه a و c با استفاده از دو پیک اصلی در رابطه ۱ و تغییرات حجم سلول واحد از رابطه ۲ محاسبه شد که این مقادیر در جدول ۲ آورده شده است.



شکل (۳): تصویر SEM نشان دهنده ذرات چندوجهی برای نمونه خالص با

کد Ba-M(Pure)

با توجه به تصاویر در حالت خالص تشکیل چندوجهی هایی با ابعاد میکرونی با توزیع اندازه ذرات متنوع مشاهده می شود. نکته قابل توجه در حالت خالص پودر، عدم تشکیل هگزاگونال های صفحه ای و مسطح است. این در حالی است که در شکل ۴ و ۵ هگزاگونال های صفحه ای مشاهده می شود. با توجه به تصاویر شکل های ۴ و ۵ مرز دانه ها و تعداد دانه ها به همراه مورفولوژی هگزاگونال کاملاً مشخص می باشد. شکل خاص و زاویه دار هگزاگونال های صفحه ای به همراه آگلومره ها به مقدار محدود تایید کننده این واقعیت است که حضور افزودنی ها در ساختار هگزافریت باریم منجر به تغییر آنیزوتروپی محوری از جهت c به جهات ab و ایجاد یک مورفولوژی صفحه ای شده است [۲۳]. با توجه به تصویر شکل ۵ در نمونه BZCF به علت درشت تر بودن ذرات و تبدیل آنها به حالت چند حوزهای، انرژی لازم جهت تغییر گشتاورهای مغناطیسی ماده به علت تغییر مکانیزم این فرآیند کاهش یافته و این گشتاورها راحت تر در جهت میدان قرار گرفته و در نهایت منجر به کاهش نیروی وادارندگی مغناطیسی می شود [۲۴].



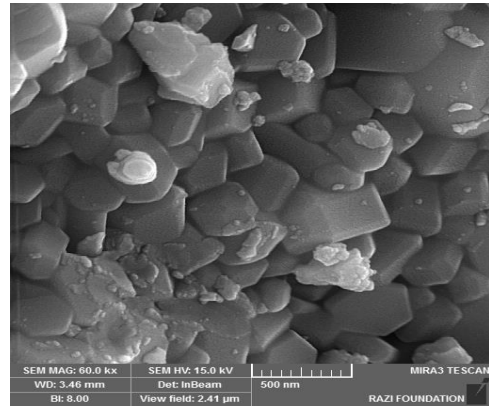
شکل (۲): الگوهای پراش اشعه ایکس مرجع و نمونه های دوپ شده

شعاع یونی کاتیون های مس و روی به عنوان عناصر دیامغناطیس به ترتیب 0.73 و 0.06 nm همچنین شعاع یونی کاتیون های پارامغناطیس تیتانیوم و منیزیم معادل 0.06 و 0.72 برآورد می شود. این در حالی است که شعاع یون های آهن در مکان های هشت وجهی و چهاروجهی به ترتیب 0.064 و 0.076 nm می باشد [۱۷-۱۹]. لذا میانگین شعاع عناصر دوپ شده در هر دو نمونه کمتر شعاع یون های میزبان (Fe^{3+}) می باشد بر این اساس مطابق جدول ۲ کاهش پارامترهای ساختاری a و c و در نهایت کاهش حجم سلول واحد نسبت به نمونه خالص مشاهده می شود. برای هگزافریت های نوع M پارامتر c/a کمتر یا مساوی با $3/98 \text{ \AA}$ است. با بررسی نمونه های تولید شده در کار حاضر مقدار این پارامتر در محدوده مورد انتظار بدست آمد و این موضوع تایید کننده تشکیل پودر مغناطیسی هگزافریت باریم نوع M می باشد [۲۰-۲۲].

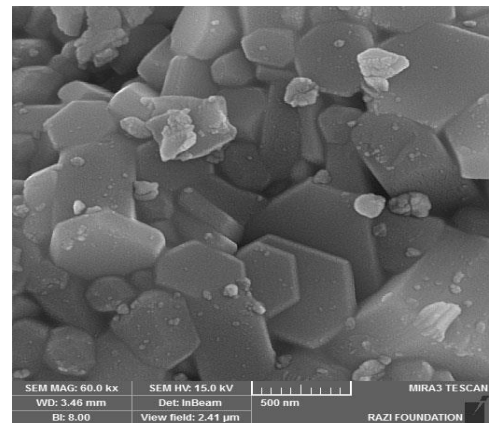
۳-۲- بررسی مورفولوژی

در شکل ۳، ۴ و ۵ مورفولوژی ذرات پودر هگزافریت باریم تهیه شده برای نمونه خالص و نمونه های همراه با افزودنی آورده شده است.

یون در موقعیت $4f_1$ و دو یون دیگر در موقعیت $4f_2$ قرار می‌گیرند [۲۶]. همانطور که ملاحظه می‌شود مطابق جدول ۳ هر سه مشخصه مغناطیسی (M_r ، M_s و H_c) نسبت به حالت خالص هگزافریت باریم کاهش داشته است. این در حالی است که شدت تغییرات در نمونه BZCF به مراتب بیشتر است. در هگزافریت‌های نوع M مکان $4f_1$ در موقعیت چهار وجهی قرار دارد، این در حالی است که موقعیت‌های هشت وجهی شامل مکان‌های $4f_2$ ، $2a$ و $12k$ و موقعیت باپیرامیدال تری گونال با مکان $2b$ به عنوان عمده مشارکت کننده‌ها در ایجاد آنیزوتروپی مگنتوگريستالین شناخته می‌شوند [۲۸]. عناصر Cu^{2+} و Zn^{2+} به ترتیب موقعیت‌های $4f_1$ و $4f_2$ را اشغال می‌کنند. جانشینی یون‌های Cu^{2+} با Fe^{3+} که اثری منفی بر آنیزوتروپی مگنتوگريستالین داشته که منجر به کاهش شدید نیروی وادارندگی خواهد شد. همچنین طبیعت مغناطیسی یون Zn^{2+} که جانشین Fe^{3+} خواهد شد برهمکنش‌های فوق تبادلی را تضعیف و ایجاد مکان‌های دارای اسپین‌هایی با جهت مخالف را به همراه دارد این موضوع باعث کاهش مغناطش اشباع در سراسر شبکه هگزافریت باریم می‌شود [۲۸-۲۹]. برای نمونه BTMF، حضور Mg^{2+} و Ti^{4+} در ترکیب هگزافریت باریم نوع M به ترتیب بیشترین اثر را بر موقعیت‌های هشت وجهی و چهاروجهی دارد. در این سطح از حضور افزودنی‌ها یون‌های پارامغناطیس Ti^{4+} اصولاً جایگزین یون‌های فرومغناطیس Fe^{3+} در مکان‌های $2a$ و $12k$ می‌شوند و این موضوع عمده دلیل کاهش مغناطش در این نمونه است. جانشینی یون‌های Mg^{2+} به جای Fe^{3+} و قرارگیری در مکان‌های $4f_1$ تاثیر چندانی بر مغناطش ندارد لذا بیشترین سهم در کاهش پارامترهای M_r و M_s در این نمونه مربوط به یون Ti^{4+} می‌باشد. در واقع حضور یون‌هایی با طبیعت پارامغناطیس به جای یون‌های Fe^{3+} با تضعیف واکنش‌های فوق تبادلی بین یون‌های O^{2-} و Fe^{3+} منجر به ایجاد طیف وسیعی از تغییرات در شبکه مغناطیسی هگزافریت باریم می‌شود [۳۰].



شکل (۴): تصویر SEM نشان دهنده ذرات هگزگونال برای نمونه دوپ شده با کد BMTF



شکل (۵): تصویر SEM نشان دهنده هگزگونال‌های بزرگتر و ذرات آگلومره کمتر نمونه دوپ شده با کد BZCF

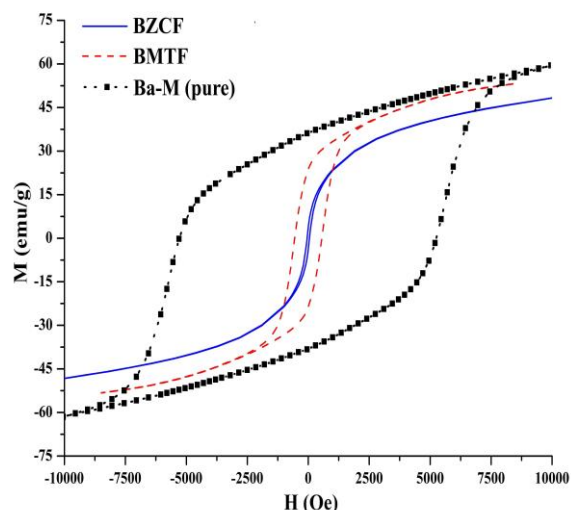
۳-۳- بررسی خواص مغناطیسی

به منظور بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها، مغناطش اشباع (M_s) نیروی وادارندگی (H_c) و مغناطش باقی مانده (M_r) در دمای اتاق از منحنی‌های ($M-H$) مطابق شکل ۴ بدست آمد و در جدول ۳ نشان داده شد. به طور کلی خواص مغناطیسی هگزافریت باریم دوپ شده عمدتاً به پیکربندی الکترونیکی کاتیون‌های دوپنت و میل قرارگیری آنها در موقعیت‌های زیر شبکه‌ای در ساختار مگنتوپلونیست وابسته است [۲۵]. در ساختار هگزافریت باریم 12 یون Fe^{3+} در پنج زیر شبکه متفاوت توزیع شده‌اند. از هشت یون Fe^{3+} با اسپین رو به بالا یک یون در موقعیت $2a$ ، یکی در $2b$ و شش یون دیگر در موقعیت $12k$ ، در حالیکه از چهار یون با اسپین رو به پایین دو

گردید. بررسی‌های مغناطیسی نشان داد حضور یون‌های دیامغناطیس شامل روی و مس در ساختار هگزافریت باریم اثر بیشتری نسبت به کاتیون‌های پارامغناطیس منیزیم و تیتانیوم در کاهش پارامترهای مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی داشته است. البته به روشنی ثابت شده است علاوه بر طبیعت مغناطیسی یون‌های افزودنی نحوه قرارگیری این یون‌ها به جای یون‌های آهن در ساختار کریستالی هگزافریت باریم و مکان‌های پنجگانه تاثیر بسزایی در تعیین خواص مغناطیسی دارد. بررسی‌های مغناطیسی پودر در حالت خالص پارامترهای مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی را به ترتیب معادل (۵۸/۴۸ emu/g) و (۵۲۴۷/۲) نشان داد که این مقادیر نشان دهنده یک ماده سخت مغناطیسی است. اگر هدف کلی از دوپ نمودن ترکیب هگزافریت باریم بدست آوردن همزمان بالاترین مغناطش اشباع و کمترین نیروی وادارندگی به عنوان یک ماده نرم مغناطیسی در نظر گرفته شود، بالاترین مغناطش اشباع (۵۳ emu/g) در نمونه با ترکیب $BaMg_{0.5}Ti_{0.5}Fe_{11}O_{19}$ و کمترین نیروی وادارندگی (۵۰ Oe) در نمونه با ترکیب $BaZn_{0.5}Cu_{0.5}Fe_{11}O_{19}$ مشاهده شد.

۵- مراجع

- [۱] الف. نوربخش، م. نوربخش، م. شایگان و س. غریبان، "تأثیر افزودن یون کروم بر آنالیز فازی ریزساختاری و خواص مغناطیسی بدنه‌های هگزافریت استرانسیوم تهیه شده به روش حالت جامد"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، شماره ۴، ۴، زمستان ۸۹.
- [۲] ه. گلپایگانی، ع. بیت الهی و م. نیایی فر، "بررسی مقایسه ای تحولات فازی و خواص فازی سیستم $Co/\alpha-Fe_2O_3$ سنتز شده به روش آلیاژسازی مکانیکی با نسبت‌های مولی متفاوت"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، شماره ۶، ۲، پاییز ۸۷.
- [3] S. Meng, Z. Yue, X. Zhang & L. Li, "Quasi-epitaxial barium hexaferrite thin films prepared by a topotactic reactive diffusion process", Applied Surface Science, Vol. 290, pp. 340-345. 2013.
- [4] G. H. An, T. Y. Hwang, J. Kim, J. B. Kim, N. Kang, J. W. Jeon, M. Kang & Y. H. Cho, "Novel method for low temperature sintering of barium hexaferrite with magnetic easy-axis alignment",



شکل (۴): منحنی‌های M-H برای نمونه‌های BZCF، BMTF، Ba-M(Pure)

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مغناطیسی نمونه‌های BZCF و BMTF

کد نمونه	مغناطش اشباع (emu/g)	مغناطش باقیمانده (emu/g)	نیروی وادارندگی (Oe)
Ba-M(Pure)	۵۶/۴۸	۳۴/۶۵	۵۲۴۷/۲
BZCF	۴۸/۷۵	۲۳/۲۵	۵۰
BMTF	۵۳	۳/۷۵	۵۶۸/۴۶

۴- نتیجه گیری

در کار حاضر از فرایند آلیاژسازی مکانیکی با شرایط ۱۲ ساعت آسیابکاری و خشک کردن نمونه‌ها در مدت ۲۴ ساعت سپس عملیات حرارتی در دمای $1000^{\circ}C$ برای تولید پودرهای مغناطیسی هگزافریت باریم استفاده شد. الگوهای پراش اشعه ایکس نشان دهنده تشکیل هگزافریت باریم نوع M با گروه فضایی P63/mmc بدون هیچ گونه فاز میانی ناشی از حضور افزودنی‌ها به همراه مقدار محدودی فاز هماتیت بود. با بررسی پارامترهای شبکه و حجم سلول واحد هگزافریت باریم دوپ شده کاهش این پارامترها نسبت به حالت خالص مشاهده شد که این موضوع بیانگر این واقعیت بود که یون‌های دوپ شده وارد ساختار هگزافریت باریم شده و با جانشینی این یون‌ها با شعاع یونی کوچکتر از یون‌های آهن کاهش این پارامترها مشاهده

- [14] Davoodi & B. Hashemi, "Magnetic properties of Sn-Mg substituted strontium hexaferrite nanoparticles synthesized via coprecipitation method", *J. Alloys. Compd.*, Vol. 231, pp. 509-518. 2012.
- [15] S. Kanagesan, S. Jesurani, R. Velmurugan, S. Prabu & T. Kalaivani, "Structural and magnetic properties of conventional and microwave treated Ni-Zr doped barium strontium hexaferrite", *Mater. Res. Bull.*, Vol. 47, pp. 188-193. 2012.
- [16] H. Sozeri, A. Baykal & B. Unal, "Low-temperature synthesis of single-domain Sr-hexaferrite particles by solid-state reaction route", *Phys. Status Solidi (A) Appl. Mater. Sci.*, Vol. 209, pp. 2002-2013, 2012.
- [17] Sözeri, H. Deligözb & H. Kavasc, "H3443-3547., Baykal, A, Magnetic, dielectric and microwave properties of M-Ti substituted barium hexaferrites (M= Mn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) ", *Ceramics International*, Vol. 37, pp. 234- 246. 2014.
- [18] D. Lisjak & M. Drogenik, "Synthesis and characterization of A-Sn-substituted ($A^{1/4}Zn$, Ni, Co) BaM-hexaferrite powders and ceramics", *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 24, pp. 1841-1845. 2004.
- [19] O. Akman, K. Kavas, A. Baykal, Z. Durmuş, B. Aktaş & H. Sözeri, "Microwave absorption properties of $BaFe_{12}O_{19}$ - TiO_2 composite coated with conducting polymer", *J. Supercond. Novel Magn.*, Vol. 26, pp. 1369-1373, 2013.
- [20] C. S. Wang, F. L. Wei, M. Lu, D. H. Han & Z. Yang, "Structure and magnetic properties of Zn-Ti-substituted Ba-ferrite particles for magnetic recording", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 183, pp. 241-250, 1998.
- [21] Z. Yang, C. S. Wang, X. H. Li & H. X. Zeng, "(Zn, Ni, Ti) substituted barium ferrite particles with improved temperature coefficient of coercivity", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 90B, pp. 142-145, 2002.
- [22] Dho, J. Y. Park & N. H. Hur, "Effects of the grain boundary on the coercivity of barium ferrite $BaFe_{12}O_{19}$ ", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 285, pp. 164-168, 2005.
- Journal of the European Ceramic Society, Vol. 34, pp. 1227-1233. 2014.
- [5] Q. Mohsen, "Barium hexaferrite synthesis by oxalate precursor route, *Journal of Alloys and Compounds*", Vol. 38, pp. 125-128. 2010.
- [6] M. Choi, S. Song, Y. Choi, D. Park & S. Kim, "Novel synthesizing method of $BaFe_{12}O_{19}$ microrod and its superior coercivity with shape anisotropy", *Materials Letters*, Vol. 139, pp. 292-295. 2015.
- [7] Z. Liu, Q. C. Dai & j. M. Sun, "Effect of Ce-Co substitution on the magnetic properties of M-type barium hexaferrite", *J solid state commun.*, Vol. 152, pp. 849-860. 2012.
- [8] G. Asghar & M. Anis-ur-Rehman, "Structural, dielectric and magnetic properties of Cr-Zn doped strontium hexa-ferrites for high frequency applications", *J. Alloys Compd.*, Vol. 526, pp. 85-90. 2012.
- [9] Bsoul, S. H. Mahmood & A. F. Lehlooh, "Structural and magnetic properties of $BaFe_{12}Ti_xRuxO_{19}$ ", *J. Alloys and Compd.*, Vol. 489, pp. 157-161. 2010.
- [10] G. Zhu, Q. Yang, X. B. Shi, W. Z. Zheng & Y. L. Liu, "Solvo thermal fabrication and luminescent properties of Eu^{2+}/Ce^{3+} doped barium lithium fluoride", *J. Rare Earths*, Vol. 30, pp. 985-993. 2012.
- [11] A. Francis & W. Daoush, "Synthesis and magnetic characteristics of crystallized ceramic in the BaO-NiO- TiO_2 - Fe_2O_3 system", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 181, pp. 213-218, 2007.
- [12] R. Manisha, V. Bahadur, D. Kulkarni & S. D. Date, "S K Magnetic properties of Ni-Zr substituted barium ferrite", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 19, pp. 256-533. 1999.
- [13] N. Muhammad, J. Muhammad, N. Muhammad, H. Pablo & M. Ashfaq, "Synthesis, magnetic and dielectric properties of Er-Ni doped Sr-hexaferrite nanomaterials for applications in high density recording media and microwave devices", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 324, pp. 15-30. 2012.

- [27] G. Turilli, F. Licci & S. Rinaldi, "Mn²⁺, Ti⁴⁺ substituted barium ferrite", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 59, pp. 127-135, 2005.
- [28] Ghasemi, A. Hossienpour, A. Morisako, X. Liu & A. Ashrafizadeh, "Investigation of the microwave absorptive behavior of doped barium ferrites", *Mater. Des.*, Vol. 29, pp. 112-117. 2008.
- [29] M. K. Tehrani, A. Ghasemi, M. Moradi & R. S. Alam, "Wideband electromagnetic wave absorber using doped barium hexaferrite in Ku-band", *J. Alloys Compd.*, Vol. 509, pp. 83-91. 2011.
- [30] P. Wartewig, M. K. Krause, P. Esquinazi, S. Rosler & S. Sonntag, "Magnetic properties of Zn- and Ti-substituted barium hexaferrite", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 192, pp. 83-90, 1992.
- [23] E. W. Gorter, "Ionic distribution deduced from the g-factor of a ferrimagnetic spinel: Ti⁴⁺ in fourfold co-ordination", *Nature*. Vol. 173, pp. 123-124, 1954.
- [24] H. Sozeri, I. Küçük & H. Özkan, "Improvement in magnetic properties of La substituted BaFe₁₂O₁₉ particles prepared with an unusually low Fe/Ba molar ratio", *J. Magn. Magn. Mater.* Vol. 323, pp. 1799-1804, 2011.
- [25] Haq & M. Anis-ur-Rehman, "Effect of Pb on structural and magnetic properties of Ba-hexaferrite", *Physica*, Vol. 407B, pp. 822-826, 2012.
- [26] R. N. Summergrad & E. Banks, "New hexagonal ferrimagnetic oxides", *J. Phys. Chem. Solids*, Vol. 2, pp. 312-316, 1957.