

# اثر کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم بر خواص مغناطیسی و ریزموجی نانو ذرات فریت استرانسیم تهیه شده به روش هم‌رسوبی

غلامرضا گردانی<sup>۱\*</sup>، علی قاسمی<sup>۱</sup> و علی سعیدی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۴/۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵)

**چکیده** – در این پژوهش اثر جانشانی مقادیر مختلفی از کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم بر خواص ساختاری، مغناطیسی و ریزموجی نانو ذرات فریت استرانسیم با ترکیب شیمیایی  $SrFe_{12-x}(MgCo)_{0.5x}Ti_xO_{19}$  (x=۰، ۰.۵، ۱، ۱.۵، ۲، ۲.۵) تولید شده به روش هم‌رسوبی مورد مطالعه قرار گرفت. برای ارزیابی‌های ساختاری، مغناطیسی و ریزموجی نمونه‌ها، از آزمون‌های پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی عبوری، تحلیل گرمایی، مغناطومتر ارتعاشی، طیف سنجی موزبائی و تحلیلگر شبکه برداری استفاده شد. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نشان داد که در تمامی نمونه‌ها فاز فریت استرانسیم با خلوص بالا تشکیل شده است. اما با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده، فاز  $Fe_2O_3$  ظاهر می‌شود. هم‌چنین با افزایش میزان آ-قلله‌های الگوی پراش به زوایای پایین تر منتقل می‌شوند. مطابق با نتایج تحلیل گرمایی نیز مشخص شد که با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده (x=۰-۲)، دمای تشکیل فاز فریت استرانسیم از ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. نتایج آزمون مغناطومتر ارتعاشی نشان داد که با افزایش میزان کاتیون‌های جانشینی، مغناطش اشباع فریت استرانسیم از حدود ۱۹ emu/g به ۴۰ emu/g بروز کاهش می‌یابد. براساس نتایج طیفسنجی موزبائی، کاتیون‌های جانشینی، مکان‌های ۱۲k در ساختار مگنتوپلومبیت را اشغال کرده‌اند. بیشترین پهنه‌ی باند جذب در گستره فرکانسی باند A، در نمونه جانشانی شده با ۲=x و برابر با ۴ گیگاهرتز (در زیر ۱۰dB-) به دست آمد. این نمونه می‌تواند به عنوان یک ماده جاذب ریزموج مناسب در گستره باند A عمل نماید.

**واژگان کلیدی:** فریت استرانسیم، خواص مغناطیسی، تلفات انعکاس، هم‌رسوبی

## Effect of Mg, Co and Ti Cations on Magnetic and Microwave Properties of $SrFe_{12}O_{19}$ Nanoparticles

G. Gordani<sup>1\*</sup>, A. Ghasemi<sup>1</sup> and A. Saidi<sup>2</sup>

1- Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran  
2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: gordani@gmail.com

**Abstract:** Nanoparticles of Mg–Co–Ti substituted strontium hexaferrite with nominal composition of  $\text{SrFe}_{12-2x}(\text{Mg},\text{Co})_{0.5x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  ( $x=0-2.5$ ) were synthesized by a co-precipitation method. The structural, magnetic and electromagnetic properties of samples were studied as a function of  $x$  by thermal gravimetric (TG), X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), vibrating sample magnetometer (VSM) and vector network analysis. It was found that the synthesis temperature increases with an increase in Mg–Co–Ti substitution and hence the particle size decreases. The XRD results showed that whole samples had good crystallinity and with an increase in  $x$ , the impurity phase of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  appears. The results of hysteresis loops indicated that the saturation of magnetization of ferrite decreases from 40 emu/g to 19 emu/g with an increase in  $x$ . The Mössbauer spectroscopy showed that the cations are substituted in the 12k site of magnetoplumbite structure. Vector network measurements showed that the doped samples had much more effective reflection loss values than those of undoped ferrites. As a result, Mg–Co–Ti doped Sr-hexaferrites with  $x=2$  can be proposed as suitable absorbers for applications in microwave technology with a good deal of consistency.

**Keywords:** Strontium hexaferrite, Magnetic properties, Reflection loss, Co-precipitation

سل-ژل [۹، ۱۰]، روش هیدروترمال [۱۱]، روش سنتز با ریزموج [۱۲] و روش هم رسوی [۱۳] اشاره نمود. از آنجایی که برای اکثر کاربردها، تهیه ماده‌ای با خلوص بیشتر و با اندازه ذرات یکنواخت‌تر از اهمیت بالایی برخوردار شده است، انتخاب روش تولید، نقش بهسازی در این مورد خواهد داشت. در بین این روش‌ها، روش هم رسوی، به علت امکان کنترل بهتر ترکیب شیمیایی و برخورداری از دمای ساخت پایین‌تر، روشی مناسب برای دست‌یابی به این مهم است [۱۴].

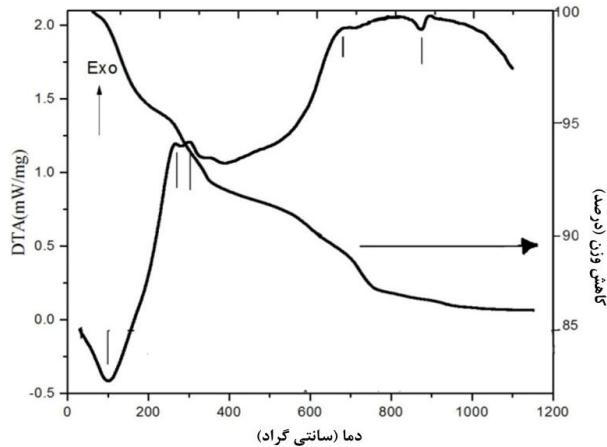
هدف از این پژوهش بررسی اثر هم‌زمان کاتیون‌های منیزیم، کبات و تیتانیم بر خواص ساختاری، مغناطیسی و ریزموجی نانو ذرات فریت استرانسیم است. در مقایسه با سایر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، کاتیون‌های یاد شده نقش قابل توجهی در تغییر مشخصات بلوری و هم‌چنین بهبود خواص ریزموجی نانو ذرات فریت استرانسیم دارند، به طوری که قابلیت استفاده از این ماده را در کاربردهای ریزموجی افزایش می‌دهد.

## ۲- روش و مراحل پژوهش

در این پژوهش، نانو ذرات فریت استرانسیم آلاییده شده با مقادیر مختلفی از کاتیون‌های منیزیم، کبات و تیتانیم با فرمول کلی  $\text{SrFe}_{12-2x}(\text{Mg},\text{Co})_{0.5x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  با استفاده از روش هم رسوی تهیه شد. مقادیر مختلف  $x$  (در گستره صفر تا ۰.۵) میزان جانشینی را در فریت استرانسیم بیان می‌کند. به این منظور مقادیر استوکیومتری از ترکیبات کلریدی  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ،

## ۱- مقدمه

محیط زندگی پیشرفت‌ه امروزی، به علت حضور تجهیزات الکترونیکی و وسائل ارتباطی زیادی که در آن وجود دارد، با انبوهی از امواج الکترومغناطیس احاطه شده است. تابش این امواج می‌تواند صدماتی را به انسان وارد نماید. هم‌چنین تداخل این امواج عملکرد سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی را مختل می‌نماید. از این‌رو توسعه مواد جاذب امواج الکترومغناطیس توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در سال‌های اخیر، فریت استرانسیم به علت دارا بودن مغناطش اشبع و میدان ناهمسان‌گردی زیاد، پایداری گرمایی و مقاومت به خوردگی مناسب به عنوان ماده جاذب ریزموج مورد مطالعه قرار گرفته است [۱]. فرکانس تشکیل فرومغناطیس این ماده حدود ۴۸ گیگاهرتز است که برای استفاده از آن در گستره فرکانسی رادارهای بلند برد بایستی کاهش داده شود [۲]. این کار می‌تواند از طریق آلاییدن فریت با عناصر دیگر صورت پذیرد. گزارش‌های متعددی بر روی اثر یون‌های دو ظرفیتی و چهار ظرفیتی (نظیر  $\text{Cr}^{3+}$  و  $\text{Al}^{3+}$  [۷]،  $\text{Zn}^{2+}$ - $\text{Sn}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Zr}^{4+}$  [۶-۳] و  $\text{Co}^{2+}$ - $\text{Ti}^{4+}$  [۶] و هم‌چنین یون‌های فلزی سه ظرفیتی (نظیر  $\text{Cr}^{3+}$  و  $\text{Al}^{3+}$  [۷] بر خواص جذب ریزموج هگزافریت استرانسیم ارائه شده است. نتایج گویای آن است که جانشین سازی یون‌های  $\text{Fe}^{2+}$  و  $\text{Sr}^{2+}$  توسط عناصر دیگر، خواص جذب فریت استرانسیم در گستره ریزموجی را بهبود می‌بخشد. تاکنون روش‌های مختلفی در تهیه هگزافریت استرانسیم به کار گرفته شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش



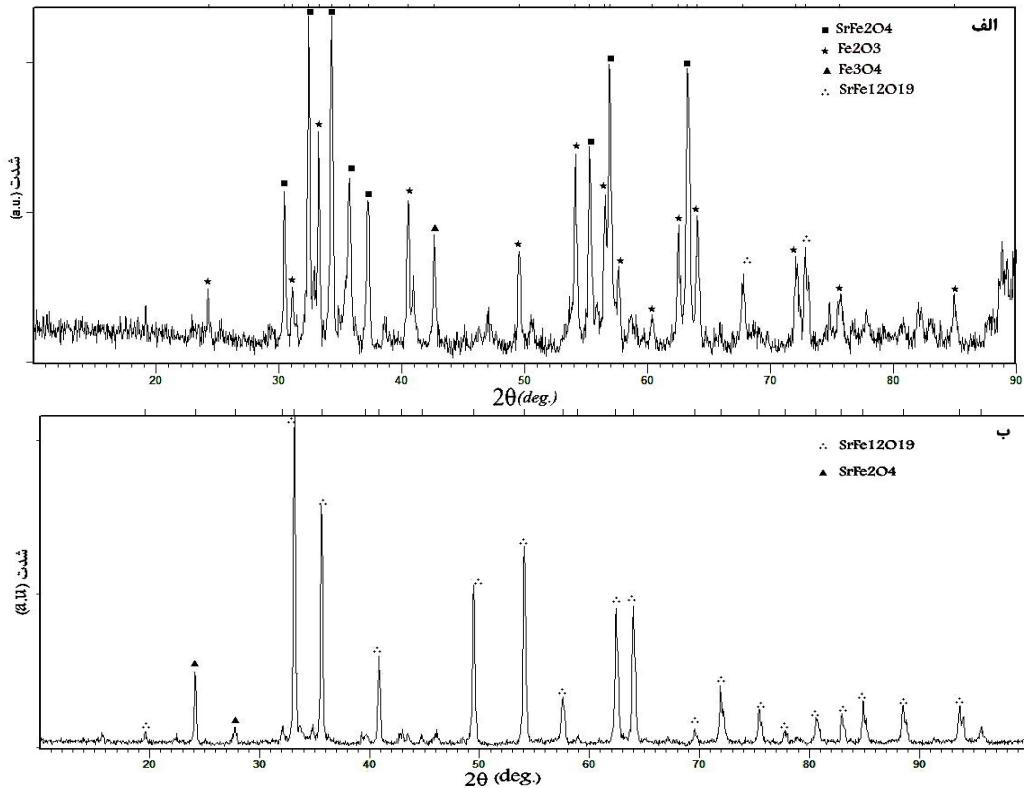
شکل ۱- نمودار تحلیل گرمایی محصول به دست آمده از روش هم رسوی

انعکاس با استفاده از آزمون تحلیلگر شبکه برداری و با کمک دستگاه مدل HP8722ET در دمای اتاق انجام شد. برای این کار نانو ذرات فریت استرانسیم با یک پلیمر از جنس پلی آنیلین به میزان ۷۰ درصد پودر و ۳۰ درصد پلیمر مخلوط شد و سپس به صورت یک دیسک درآمد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد خشک شد. ضخامت نهایی نمونه برابر ۱/۸ میلی متر انتخاب شد.

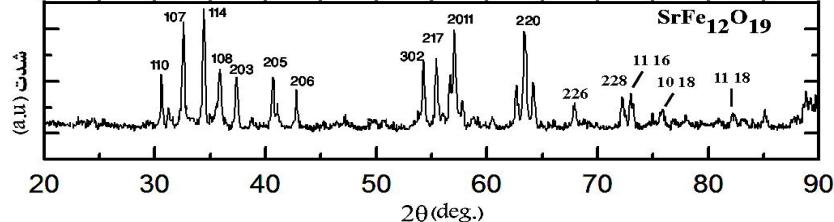
### ۳- نتایج و بحث

**۳-۱- تحلیل گرمایی نانو ذرات فریت استرانسیم**  
نمودار تحلیل گرمایی محصول به دست آمده از فرایند هم رسوی با نسبت استوکیومتری از مواد اولیه  $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، با نرخ گرما دهی ۱۰ درجه سانتی گراد در دقیقه و در اتمسفر هوا در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس این شکل دیده می شود که کاهش وزن محصول اولیه در طی تحلیل گرمایی در گستره دمایی مورد بررسی، در گستره های مشخصی از دما رخ می دهد که به ترتیب، ۱۰۰-۲۵۰ و ۳۰۰-۴۵۰ و ۶۰۰-۷۰۰ و بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی گراد هستند. منحنی DTA در شکل ۱ حاوی قله های گرمایگر و گرمایاز در دمای های مختلف است. قله گرمایگر در گستره

مقطعرا دمای ۷۰ درجه سانتی گراد حل شد تا یک محلول کاملً یکنواخت به دست آید. سپس محلول ۱ مولار هیدروکسید سدیم (NaOH) به صورت قطره قطره به آن افزوده شد تا pH محلول به حدود ۱۳ رسد و یک سوسپانسیون حاوی رسوبات هیبریدی به دست آید. رسوب به دست آمده چندین بار توسط آب مقطع شستشو داده شد تا ترکیبات نمکی آن حذف شود و اسیدیته آن به حدود ۷ بررسد. محصول ژل مانند به دست آمده، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد خشک شد. به منظور تعیین دمای تشکیل نانو ذرات فریت استرانسیم در حین گرمادهی از آزمون تحلیل گرمایی استفاده شد. به کمک نتایج به دست آمده از این آزمون دمای تشکیل فریت استرانسیم تعیین شد. به منظور تجزیه و تحلیل فازهای شکل گرفته در حین فرایند سنتز در نانوذرات فریت استرانسیم آلائیده شده با منیزیم، کبالت و تیتانیم، آزمون پراش سنجی پرتوی ایکس (XRD) با استفاده از یک دستگاه پرتو ایکس Philips مدل XPERT (۴۰ kV و ۴۰ ms) انجام شد. در تمام آزمایش ها از پرتو تک موج  $\text{CuK}\alpha$  با طول موج ۱/۵۴۲ آنگstrom بهره گرفته شد. زمان هر گام یک ثانیه، اندازه گام ۱۰۰ درجه و گستره مورد بررسی ۲۰ تا ۱۰۰ درجه انتخاب شد. موقعیت قرارگیری کاتیون های جانشینی در مکان های فرعی شبکه بلوری فریت استرانسیم آلائیده شده با منیزیم، کبالت و تیتانیم، به کمک آزمون طیف سنجی موزبائر با استفاده از دستگاه مدل Cryovac mbH & Co KG, Germany تعیین شد. گفتنی است که از  $^{57}\text{Co}/\text{Rh}$  به عنوان منبع تولید اشعه کاما در این آزمون استفاده شد. برای مطالعه مورفولوژی نانو ذرات از میکروسکوپ الکترونی عبوری با ولتاژ کاری ۲۰۰ کیلوولت بهره گرفته شد. خواص مغناطیسی نانو ذرات فریت استرانسیم آلائیده شده، شامل مغناطش اشباع و نیروی پسماندزدا با استفاده از دستگاه مغناطومتر ارتعاشی نمونه مدل Kavirmagnet، با بیشینه میدان اعمالی ۱۰ kOe و طول گام ۱۰۰ Oe اندازه گیری شد. تمامی آزمون ها در دمای اتاق صورت پذیرفت. رفتار جذب ریز موج نمونه ها نیز با آزمون تلفات



شکل ۲- الگوهای پرتو ایکس فریت استرانسیم ساخته شده در دمای (الف) ۷۰۰ و (ب) ۸۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت



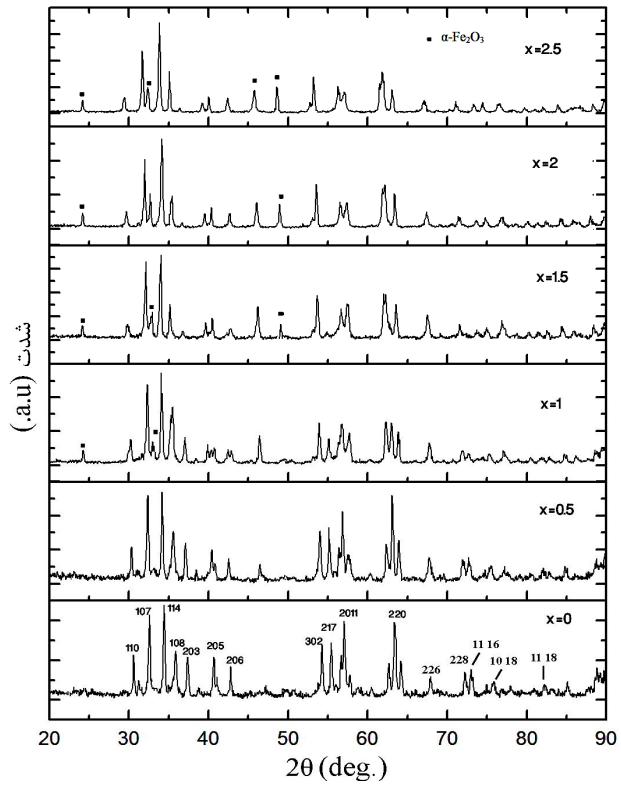
شکل ۳- الگوی پرتو ایکس نمونه فریت استرانسیم در دمای ۸۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت

فاز فریت استرانسیم است. مطابق با شکل ۲-الف دیده می‌شود که در دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتی گراد تشکیل فاز فریت استرانسیم شروع شده است اما در این دما به دلیل عدم وجود انرژی فعال‌سازی لازم، واکنش تشکیل فریت استرانسیم کامل نمی‌شود. مطابق با شکل ۲-ب در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد فاز فریت استرانسیم به میزان زیادی تشکیل شده است. با این حال بر اساس نمودار تحلیل گرمایی و همچنین الگوی پراش اشعه ایکس در دمای ۸۷۰ درجه سانتی گراد (شکل ۳) می‌توان گفت که تشکیل فاز فریت استرانسیم در این

۱۰۰-۲۰۰ درجه سانتی گراد مربوط به حذف آب است که با توجه به نمودار وزن‌سنجی گرمایی TG<sup>1</sup> در این مرحله حدود ۵٪ کاهش وزن مشاهده می‌شود. دو قله گرمایی در گستره دمایی ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد نیز مشاهده می‌شود که مربوط به تبدیل هیدروکسیدها به اکسید است. با افزایش بیشتر دما، کاهش وزن ادامه یافته و این روند تا دماهای حدود ۸۰۰ درجه سانتی گراد ادامه می‌یابد. نتایج پراش اشعه ایکس نمونه در دماهای ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد در شکل ۲ نشان داده شده است که حاکی از حضور مقداری فاز ناخالصی به همراه

به ساختار مگنتوپلیمیت هگزافریت استرانسیم است. دیده می شود که جانشین سازی کاتیون های منیزیم، تیتانیم و کبالت به جای کاتیون های آهن در فریت استرانسیم موجب تغییرات اندکی در رفتار تشکیل نانو ذرات فریت استرانسیم می شود، به طوری که هرچه میزان کاتیون های آلاینده در ساختار فریت با ترکیب شیمیایی  $SrFe_{12-2x}(MgCo)_{x/2}Ti_xO_{19}$  بیشتر می شود، علاوه بر فاز فریت استرانسیم آلاید شده، مقداری ناخالصی نیز در ماده نهایی ظاهر می شود. این موضوع تطابق خوبی با نتایج برکاف و همکارانش [۱۴] دارد به طوری که در این وضعیت با جانشینی کاتیون های آلاینده به جای کاتیون آهن در ساختار مگنتوپلومیت فریت استرانسیم، کاتیون های آهن خارج شده از ساختار، با اکسیژن هوا وارد واکنش می شوند و فاز ثانویه  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  را به وجود می آورند (مطابق با کارت XRD به شماره ICSD 00-034-0664). دیده می شود که با افزایش میزان کاتیون های آلاینده بر شدت قله های نام برده افزوده می شود. بر این اساس نمونه آلاید شده با  $x=2/5$  دارای بیشترین مقدار فاز ناخالصی است. به عبارت دیگر می توان گفت که میزان کاتیون های جانشینی منیزیم، تیتانیم و کبالت، تاثیر زیادی بر تشکیل فازهای ثانویه (در شرایط یکسان ساخت) دارد. در هر حال با تغییر شرایط ساخت نظیر افزایش دما یا زمان عملیات حرارتی امکان کنترل فازهای ثانویه به دست آمده وجود دارد. در این ارتباط در شکل ۵ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه فریت استرانسیم آلاید شده با منیزیم، کبالت و تیتانیم به ازای  $x=2/5$  در دمای  $105^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد ارائه شده است. دیده می شود که برخلاف نمونه مشابه ساخته شده در دمای  $90^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد، این نمونه از خلوص قابل توجهی برخوردار است. البته، چنین شرایطی باعث افزایش اندازه ذرات فریت استرانسیم می شود.

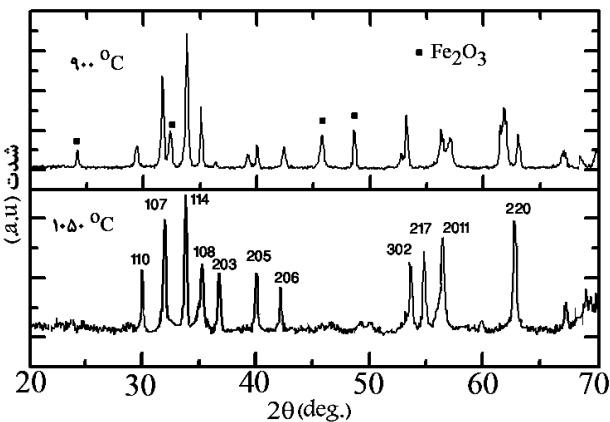
به عنوان یکی دیگر از نکات قابل توجه در شکل ۴ می توان به جایه جایی قله های مربوط به فریت به دست آمده با افزایش میزان کاتیون های آلاینده اشاره نمود. در این ارتباط در شکل ۶ چگونگی جایه جایی قله (۱۱۴) مربوط به فریت استرانسیم با



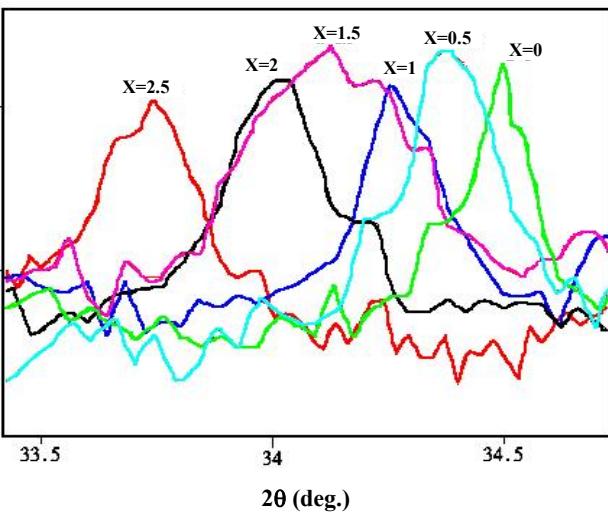
شکل ۴- الگوهای پراش پرتو ایکس نانو ذرات فریت استرانسیم با ترکیب  $SrFe_{12-2x}(MgCo)_{0.5x}Ti_xO_{19}$  به ازای مقادیر مختلفی از  $x$ ، ساخته شده در دمای  $90^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت

دما کامل می شود. در این شکل اندیس صفحات متناظر با قله های ظاهر شده در زوایای مختلف براساس کارت XRD به شماره ICSD 00-033-1340 مشخص شده است که مربوط به ساختار مگنتوپلومیت هگزافریت استرانسیم است. از روی قله های تیز می توان به بلوری شدن مطلوب نمونه نیز پی برد. با توجه به شکل ۱ ملاحظه می شود که پس از این دما ( $87^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد)، تغییر مشهودی در کاهش وزن نمونه رخ نمی دهد.

شکل ۴ الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه های جانشانی شده با مقادیر مختلفی از کاتیون های منیزیم، کبالت و تیتانیم را نشان می دهد. در این شکل نیز اندیس صفحات متناظر با قله های ظاهر شده در زوایای مختلف براساس کارت XRD به شماره ICSD 00-033-1340 مشخص شده است که مربوط



شکل ۵- مقایسه الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه فریت استرانسیم آلاینده شده بمیزان  $x=2/5$  ساخته شده در دمای ۹۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد، هر کدام به مدت ۱ ساعت

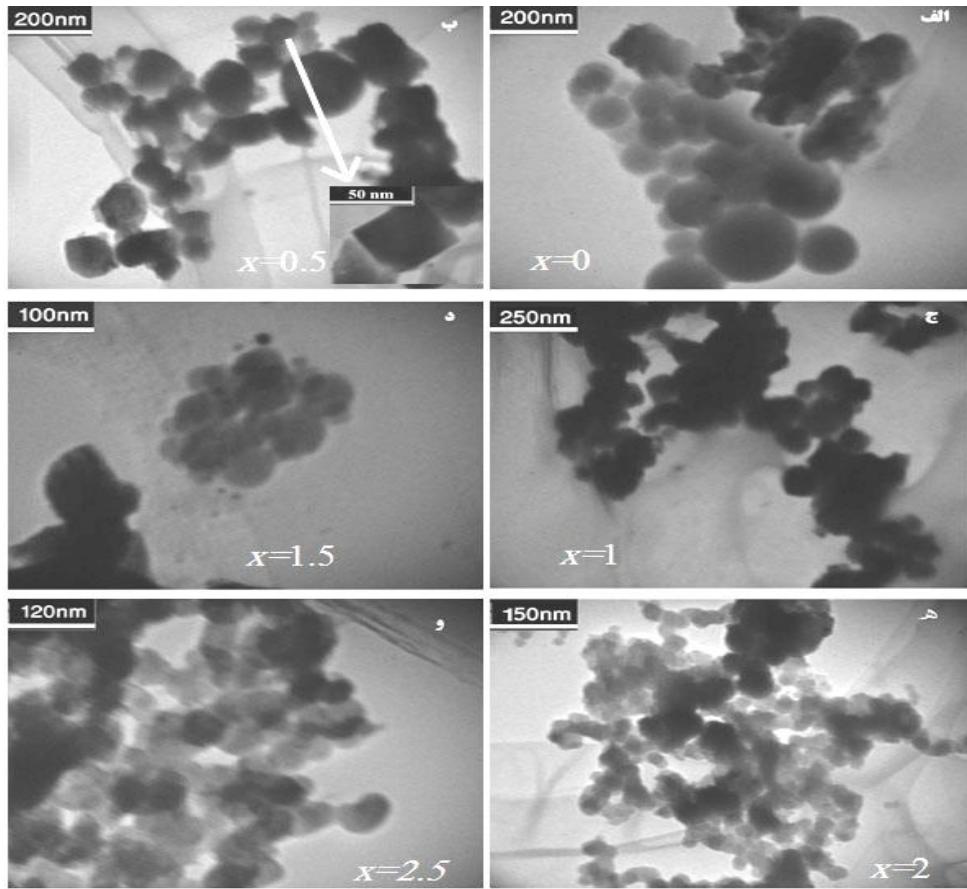


شکل ۶- جابه جایی قله (۱۱۴) در اثر افزودن مقادیر مختلفی از کاتیون‌های جانشینی منیزیم، کبالت و تیتانیم به ترکیب فریت استرانسیم

در تصاویر مشاهده می‌شود. می‌توان گفت با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده، رشد ذرات، در برخی صفحات با اندیس کوچک، متوقف می‌شود. در سرامیک‌ها، صفحات با اندیس کوچک، در مقایسه با صفحات با اندیس بزرگ، از چگالی اتمی پایین‌تری برخوردارند و بنابراین در هنگام رشد، مکان‌های

تغییر در صد آلاینده‌ها ارائه شده است. دیده می‌شود که با افزایش کاتیون‌های آلاینده در ساختار فریت استرانسیم، قله‌های به دست آمده به زوایای کمتر منتقل شده است. این موضوع ناشی از افزایش فاصله بین صفحات بلوری در اثر جانشینی کاتیون‌های منیزیم و کبالت به جای کاتیون‌های آهن است. در واقع شعاع یونی کاتیون‌های منیزیم (۰/۷۲ نانومتر) و کبالت (۰/۷۴۵ نانومتر) بزرگ‌تر از شعاع یونی کاتیون‌های آهن (۰/۰۶۴۵ نانومتر) است و جانشینی این کاتیون‌ها به جای کاتیون‌های آهن، افزایش حجم شبکه و جابه جایی قله‌ها به زوایای کمتر را موجب می‌شود. گفتنی است که با افزایش میزان کاتیون‌های جانشینی، پارامترهای ساختاری مانند ثوابت شبکه بلوری (a و c) و حجم سلول واحد نانو ذرات فریت استرانسیم تغییر می‌کند که جزئیات این مطلب در گزارش قبلی نویسنده‌گان ارائه شده است [۱۵].

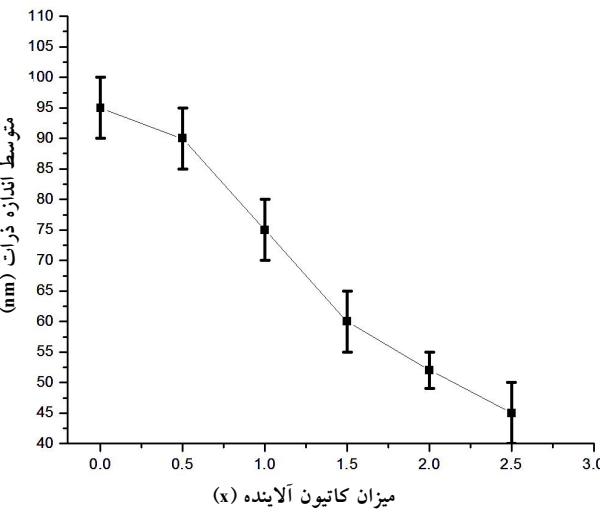
۲-۳- بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری نانو ذرات فریت استرانسیم آلاینده شده با منیزیم، کبالت و تیتانیم تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از نانو ذرات فریت استرانسیم با ترکیب  $SrFe_{12-2x}(MgCo)_{0.5x}Ti_xO_{19}$  به ازای مقادیر  $x=0/5, 1/5, 1, 2, 2/5$  تولید شده از روش همرسوبی و سنتز شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت در شکل‌های ۷-الف تا ۷-و نشان داده شده است. نکته‌ای که در این تصاویر به چشم می‌خورد این است که در تمامی نمونه‌ها، توزیع اندازه ذره تقریباً یکنواخت و میانگین اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر است و این بدان معنی است که جوانهزنی ذرات، هم‌زمان بوده، از رشد آن‌ها ممانعت به عمل آمده است. در واقع در صورتی که جوانهزنی ذرات هم‌زمان رخ دهد، رشد ذرات نیز هم‌زمان است و رشد غیر نرمال در آن‌ها به وجود نمی‌آید. در غیر این صورت برخی از ذرات در مرحله رشد، از سرعت رشد بیش‌تری برخوردارند و درشت‌تر می‌شوند. هم‌چنین شکل ذرات به طور غالب، کروی هستند که بیان کننده رشد در سه جهت است. البته ذرات با شکل‌های منظم و بی‌منظم دیگری نیز



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری نانو ذرات فریت استرانسیم با ترکیب شیمیایی  $\text{SrFe}_{12-2x}(\text{MgCo})_{0.5x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  به ازاء (الف)  $x=0$ ، (ب)  $x=0.5$ ، (ج)  $x=1$ ، (د)  $x=1.5$ ، (ه)  $x=2$  و (و)  $x=2.5$

که ذرات در هر نمونه، به صورت کلوخه شده ظاهر شده‌اند که ناشی از اثرات سطحی در مقیاس نانو و دمای ساخت نسبتاً بالا ( $900^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد) است. با توجه به این تصاویر مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت کاتیون‌های آلائینده از صفر تا  $2/5$  درصد (افزایش میزان  $x$ )، اندازه ذره از نمونه (الف) تا نمونه (و) کاهش یافته است. به عبارت دیگر رشد ذرات فریت استرانسیم با افزایش کاتیون‌های آلائینده، کند یا متوقف شده است. با افزایش میزان کاتیون‌ها، انرژی فعال‌سازی لازم برای تشکیل فاز فریت استرانسیم خالص، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر این فاز به صورت کاملاً خالص، در دمای بالاتری تشکیل خواهد شد. بنابراین در شرایط این پژوهش (دمای  $900^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد) هنوز دمای لازم برای تشکیل فاز فریت استرانسیم فراهم نشده است. بنابراین با افزایش میزان کاتیون‌ها، مرحله رشد

ترجیحی کمتری برای قرار گیری اتم‌ها در این صفحات وجود دارد. از این رو سرعت رشد آن‌ها نسبت به صفحات با اندیس بزرگ، کنتر است. در اثر این پدیده ممکن است برخی از ذرات از حالت کروی خارج شوند. از سوی دیگر، افزایش انرژی فعال‌سازی لازم برای تشکیل ذرات فریت، ناشی از افزایش میزان کاتیون‌ها، نیز می‌تواند از جمله دلایل این موضوع باشد. در این وضعیت در برخی مناطق به صورت موضعی رشد غیرنرمال اتفاق می‌افتد و امکان رشد در برخی جهات را از ذرات اطراف خود می‌گیرد. تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری یکی از این ذرات با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۷-ب نشان داده شده است. این در حالی است که در نمونه خالص (شکل ۷-الف) تقریباً تمامی ذرات به صورت کروی و رشد در سه جهت کامل بوده است. هم‌چنین در شکل ۷ مشاهده می‌شود



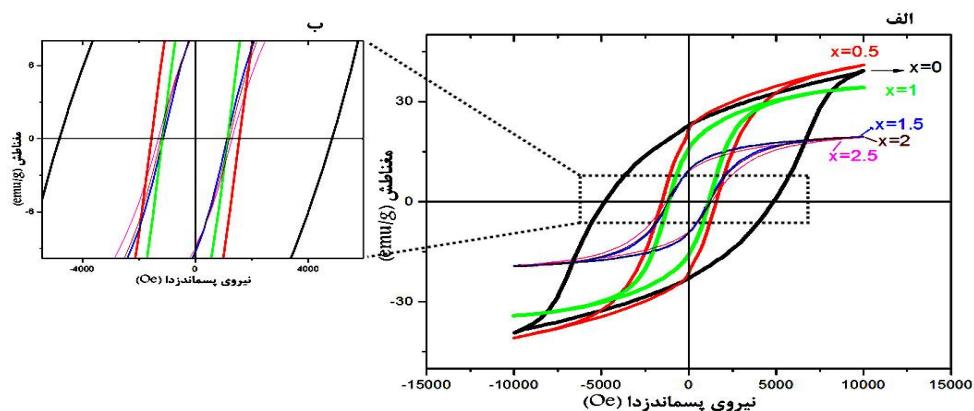
شکل ۸- تغییرات متوسط اندازه ذرات  $\text{SrFe}_{12-2x}(\text{MgCo})_{0.5x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  ساخته شده در دمای  $900^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت نسبت به تغییرات میزان کاتیون های آلاینده (x)

کاهش تعداد اسپین های هم جهت شده در واحد حجم آن است. از جمله دلایل این رفتار می توان به حضور فاز های ناخالصی در فریت اشاره کرد. مطابق با نتایج آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) (شکل ۱۰) ملاحظه شد که با افزایش میزان x در ترکیب شیمیایی فریت استرانسیم  $(\text{SrFe}_{12-2x}(\text{MgCo})_{x/2}\text{Ti}_x\text{O}_{19})$  بر میزان فاز ناخالصی ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) در نمونه ها افزوده می شود. این ناخالصی، یک فاز غیر مغناطیسی است و خواص مغناطیسی فریت استرانسیم را تضعیف می کند. با توجه به این مطلب انتظار می رود که بیشترین مغناطش اشباع مربوط به نمونه فریت استرانسیم خالص ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) باشد، به این دلیل که در این نمونه هیچ گونه فاز ناخالصی مشاهده نمی شود و مطابق با نتایج پراش پرتو ایکس تمامی قله های ظاهر شده در الگوی پراش مربوط به فریت استرانسیم است. برخلاف انتظار بر اساس شکل ۹، بیشترین مقدار مغناطش اشباع مربوط به نمونه با  $x=0.5$  است. در حقیقت در مورد این نمونه کاتیون های غیر مغناطیسی منیزیم و تیتانیم و همچنین کاتیون کبالت با گشتاور مغناطیسی کمتر نسبت به آهن ( $3/7 \mu\text{B}$ )، در مقادیر کم، تمایل به قرار گیری در مکان  $4f_1$  دارند و باعث افزایش تعداد اسپین های بالا در ساختار مگنتوپولومبیت شده است و بنابراین

ذرات به طور کامل صورت نمی گیرد و ذرات ریزتر ظاهر می شوند. بر اساس آن چه بیان شد می توان افزایش دمای لازم برای ساخت نمونه های حاوی مقادیر بیشتری از آلاینده ها را از جمله دلایل کاهش اندازه ذره در دمای  $900^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد بیان نمود. در این مورد بزرگترین اندازه ذره مربوط به نمونه فریت استرانسیم خالص ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) با اندازه ذره متوسط  $90-100$  نانومتر است و اندازه میانگین ذره با افزایش میزان کاتیون های آلاینده از  $0/5$  درصد تا  $2/5$  درصد به ترتیب به گستره های  $85-95$ ,  $80-85$ ,  $55-65$ ,  $50-55$ ,  $40-50$  نانومتر، در فریت آلاینده شده می رسد. شکل ۸ تغییرات اندازه متوسط ذرات را نسبت به میزان کاتیون های آلاینده (x) نشان می دهد. البته با افزایش میزان کاتیون ها، از یکنواختی اندازه ذرات نیز کاسته می شود. به عبارت دیگر در حالتی که ذرات درشت هستند (مانند نمونه با  $x=0$  در تصویر الف)، اندازه ذرات به یکدیگر نزدیک ترند. اما هنگامی که اندازه ذرات، کوچک تر می شوند (مانند نمونه با  $x=2/5$  در تصویر و)، اختلاف اندازه آنها بیشتر می شود.

### ۳-۳- خواص مغناطیسی نانو ذرات فریت استرانسیم آلاینده شده با منیزیم، کبالت و تیتانیم

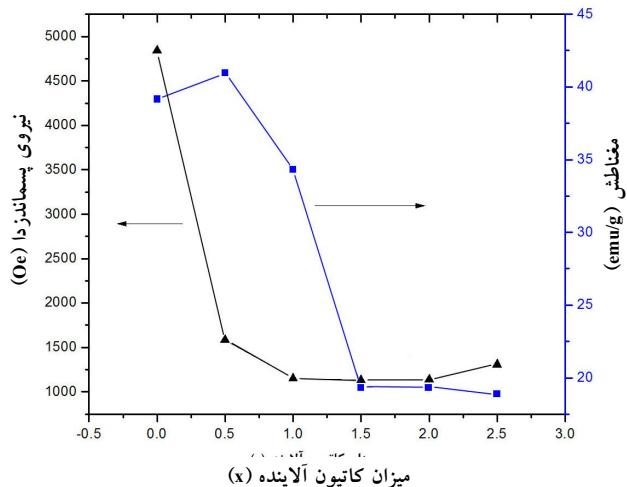
شکل ۹ حلقه های پسماند نانو ذرات فریت استرانسیم خالص و آلاینده شده با کاتیون های منیزیم، کبالت و تیتانیم ( $\text{SrFe}_{12-2x}(\text{MgCo})_{x/2}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ ) تهیه شده به روش هم ررسوبی در دمای  $900^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد را به ازای مقادیر مختلف x نشان می دهد. تغییرات مغناطش اشباع ( $M_s$ ) و نیروی پسماند زدا ( $H_c$ ) توسط این حلقه ها برای تمامی نمونه ها اندازه گیری و تغییرات آنها بر حسب میزان کاتیون های آلاینده موجود در فریت استرانسیم در شکل ۱۰ ترسیم شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش میزان کاتیون های آلاینده در فریت استرانسیم، بیشترین مقدار مغناطش ( $M_s$ ) از  $39/55$  emu/g تا  $19/27$  emu/g کاهش یافته است. رفتار کاهشی مغناطش اشباع با افزایش میزان کاتیون های منیزیم، کبالت و تیتانیم در فریت استرانسیم به منزله



شکل ۹- الف) حلقه‌های پسماند نانو ذرات فریت استرانسیم با ترکیب  $SrFe_{12-2x}(MgCo)_{0.5x}Ti_xO_{19}$  به ازاء  $x=0-2/5$  ساخته شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  در ۱ ساعت و ب) نمایش تغییرات نیروی پسماندزدا در بزرگنمایی بیشتر

شکل ۱۱ نشان داده شده است. طیف الف در این شکل مربوط به فریت استرانسیم خالص است. با توجه به طیف‌های موزبائیر ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان کاتیون‌های آلائیده از  $x=0$  تا  $x=2/5$  در فریت استرانسیم، از شدت قله‌های طیف موزبائیر مربوط به مکان فرعی  $12k$  کاسته می‌شود. این موضوع بیانگر قرارگیری کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم در مکان  $12k$  به جای کاتیون آهن است.

مغناطیش و ناهمسان‌گردی مغناطوبلوری به توزیع کاتیون‌ها در پنج مکان بلوری غیر هم ارز در ساختار هگزاگونال فریت استرانسیم ارتباط بسیار زیادی دارد. مکان فرعی  $12k$  در ساختمان مگتوپلیمیت، دارای اسپین بالا است [۱۷]. بنابراین با قرارگیری این کاتیون‌ها در مکان  $12k$ ، از تعداد اسپین‌های بالا کاسته می‌شود و در نهایت با کاهش گشتاور مغناطیسی کل شبکه، مغناطیش اشباع کاهش می‌یابد. همچنین در ساختار مگتوپلیمیت، کاتیون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  در مکان‌های پنج گانه یاد شده با یون‌های اکسیژن برهم کنش تبادلی دارند. با جانشینی کاتیون‌های غیر مغناطیسی (یا کاتیون‌های با گشتاور مغناطیسی کم تر نسبت به آهن) در این مکان‌ها، برهم کنش‌های تبادلی بین یون‌های فریک و اکسیژن کاهش می‌یابد و بنابراین منجر به کاهش مغناطیش اشباع فریت استرانسیم آلائیده شده با کاتیون‌های  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  و  $\text{Co}^{2+}$  با اسپین پایین، توسط کاتیون‌ها کاتیون‌های آلائیده، مکان  $4f$  با اسپین پایین،



شکل ۱۰- تغییرات مغناطیش ( $M$ ) و نیروی پسماندزدا ( $H_c$ ) نانو ذرات فریت استرانسیم  $SrFe_{12-2x}(MgCo)_{0.5x}Ti_xO_{19}$  بر حسب تغییرات میزان  $x$

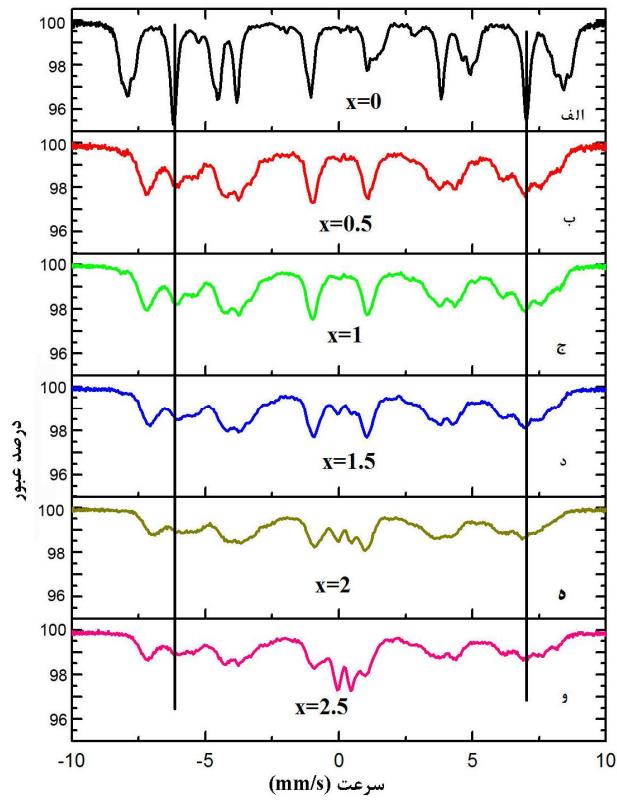
مغناطیش اشباع افزایش یافته است [۱۶]. همان‌طور که از شکل ۱۰ دیده می‌شود، در بیشتر از  $x=0/5$ ، تغییرات  $M_s$  نمونه‌های آلائیده شده، با افزایش میزان کاتیون‌های جانشینی، روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. کاهش مقدار  $M_s$  علاوه بر حضور فازهای ناخالصی به جانشینی کاتیون‌های آلائیده به جای کاتیون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  در ساختمان بلوری هگزاگرافیت استرانسیم نیز مربوط است.

نتایج آزمون موزبائیر نانوذرات فریت استرانسیم آلائیده شده با مقادیر مختلفی از کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم در

ذرات با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده نیز می‌تواند پدیده پراکندگی اسپینی را مطرح کند. این امر نیز منجر به کاهش مغناطش اشباع می‌شود [۱۹]. جانشینی کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم به جای کاتیون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  در ساختار فریت استرانسیم تاثیر به سزایی نیز بر نیروی پسماندزدا دارد [۲۰]. همان‌گونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، نیروی پسماندزدا در نمونه‌ها، با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده به‌طور ناگهانی از مقدار  $H_c = 4/8 \text{ kOe}$  برای نمونه فریت خالص ( $x=0$ ) تا میزان  $H_c = 1/5 \text{ kOe}$  برای نمونه با  $x=0.5$  کاهش می‌یابد و سپس به تدریج تا مقدار  $H_c = 1/1 \text{ kOe}$  برای نمونه با  $x=2$  کاهش نشان می‌دهد. نیروی پسماندزدا از یک طرف وابسته به اندازه ذره است و از طرف دیگر به ناهمسان‌گردی مغناطوبلوری بستگی دارد [۲۱]. ذرات با اندازه‌های به نسبت بزرگ (بزرگ‌تر از حد بحرانی)، چند حوزه‌ای هستند که در این حالت ممکن است حرکت دیواره حوزه بر چرخش بردار مغناطش، در مکانیزم مغناطش غالب باشد. با کاهش اندازه ذرات، مناطق مرز دانه‌ای گسترش یافته است که به عنوان موادی بر سر راه حرکت دیواره حوزه‌ها عمل می‌کنند. از این رو نیروی پسماندزدا افزایش می‌یابد. در حالتی که اندازه ذرات کم‌تر از حد بحرانی باشد (تا قبل از گستره سوپرپارامغناطیس)، ذرات تک حوزه‌ای شده و در این حالت مکانیزم چرخش بردار مغناطش بر حرکت دیواره حوزه غلبه دارد و منجر به ایجاد نیروی پسماندزدای بیشتر می‌شود [۲۲]. اما از آنجا که اندازه بحرانی ذرات سوپرپارامغناطیس در اینجا کاملاً مشخص نیست، کاهش نیروی پسماندزدا را می‌توان به کاهش ثابت ناهمسان‌گردی مغناطوبلوری نسبت داد. ارتباط بین نیروی پسماندزدا و ثابت ناهمسان‌گردی به صورت معادله ۱ نشان داده شده است [۲۳]:

$$H_c = (2K_1/M_s) - NM_s \quad (1)$$

در این رابطه،  $K_1$  ثابت ناهمسان‌گردی مغناطوبلوری،  $M_s$  مغناطش اشباع و  $N$  فاکتور وامغناطش است. فریت استرانسیم دارای ناهمسان‌گردی تک محوره زیادی است. با جانشین شدن



شکل ۱۱- طیف‌های موزبائور نانو ذرات فریت استرانسیم خالص و آلاید شده با مقادیر مختلفی از کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم

اشغال شده است و بنابراین مغناطش اشباع افزایش یافته است. هم‌چنین در ساختار مگنتولیمیت، کاتیون‌های آهن در موقعیت‌های بین‌نشینی مختلف، از طریق یون‌های اکسیژن با یکدیگر برهمنش ابر تبادلی دارند. این امر از جمله دلایل بالا بودن مغناطش اشباع فریت استرانسیم است. اما کاهش ناگهانی مغناطش اشباع ( $M_s$ ) با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده بیش از  $x=1$  به حضور مقدار زیادی از یون‌های غیرمغناطیسی  $\text{Ti}^{4+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  و یون‌های مغناطیسی ( $\text{Co}^{2+}$ ) با گشتاور مغناطیسی کم‌تر از  $\text{Fe}^{3+}$  نسبت داده می‌شود [۱۸، ۱۹]. همه این یون‌ها باعث کاهش بر هم کنش‌های ابرتبادلی بین مکانهای  $4f_1-12k$  و  $4f_2-12k$  شده که کاهش مغناطش اشباع را به دنبال دارد [۱۷، ۳].

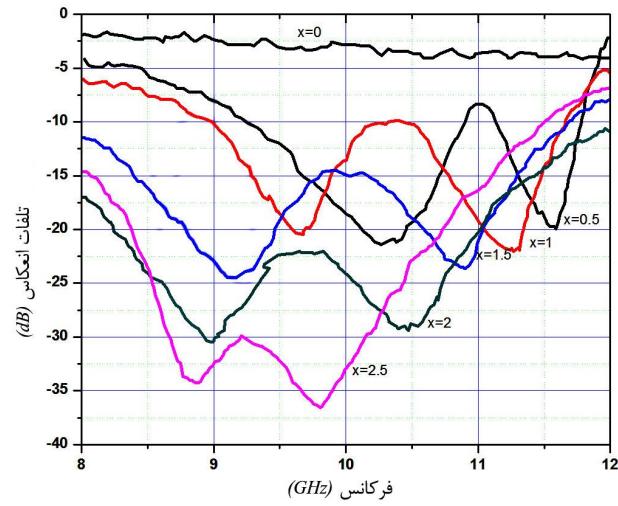
بر اساس تصاویر میکروسکوپی الکترونی، کاهش اندازه

جدول ۱- مقادیر اولین ثابت ناهمسان‌گردی نانو ذرات فریت استرانسیم آلائیده شده با مقادیر مختلفی از کاتیون‌های  $Mg^{+2}$ ,  $Co^{+4}$  و  $Ti^{+4}$

$x=0$	$x=0/5$	$x=1$	$x=1/5$	$x=2$	$x=2/5$
$K_I$ ( $\times 10^5$ erg/g)	۵/۳۶	۳/۶۵	۱/۹۸	۰/۵۳	-۰/۹۵

SrFe<sub>12-2x</sub>(MgCo)<sub>x/2</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ساخته شده به روش هم‌رسوبی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت در گستره فرکانس باند X (۱۲-۸ گیگاهرتز) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود تمامی نمونه‌ها به جز نمونه خالص ( $x=0$ ), دارای دو قله تشیدی هستند. بیشترین تلفات انعکاس موج الکترومغناطیس ورودی در قله‌های تشیدی رخ می‌دهد. فرکانس تشیدی فریمغناطیس هگزافریت استرانسیم حدود ۴۸ گیگاهرتز است که بسیار بالاتر از گستره فرکانسی باند X (۸-۱۲ گیگاهرتز) است. این امر به دلیل ناهمسان‌گردی مغناطوبولوری بزرگ این فریت است [۲۴]. بنابراین نمونه خالص ( $x=0$ ) هیچ‌گونه قله تشیدی در گستره فرکانسی باند X ندارد و بهمین دلیل تلفات انعکاس آن در این گستره فرکانس همواره ثابت است. با افزایش میزان کاتیون‌های آلائینده در نانو ذرات فریت استرانسیم ( $x > 0$ )، فرکانس‌های تشیدی، به فرکانس‌های کمتر منتقل می‌شوند. کمترین تلفات انعکاس نیز از لحاظ عددی از ۲۱/۶ dB-۲۱/۶ dB برای  $x=0/5$  تا  $-36/78$  dB برای  $x=2/5$  کاهش یافته است و به این مفهوم است که با افزایش میزان کاتیون‌های جانشینی منیزیم، کبالت و تیتانیم در ساختار مگنتوپلیمیت هگزا فریت استرانسیم، خواص تلفات انعکاس نانو ذرات فریت استرانسیم در گستره پنهانی باند X (۸-۱۲ گیگاهرتز) بهبود یافته است.

براساس گزارش چن و همکارانش [۲۵] یک ماده جاذب امواج ریزموچ مطلوب، بایستی تلفات انعکاس بیشتری (از لحاظ عددی منفی‌تر) داشته باشد و پنهانی فرکانس وسیعی در مقادیر عددی کمتر از  $-10$  dB را پوشش دهد. همان‌گونه که از شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود با اضافه کردن میزان کاتیون‌های آلائینده تا بیشینه  $x=2$ ، پنهانی باند جذب از کاتیون‌های آلائینده تا  $x=0/5$  تا  $-4$  گیگاهرتز برای  $x=2$  افزایش ۲/۲۷



شکل ۱۲- تغییرات تلفات انعکاس بر حسب فرکانس نانو ذرات فریت استرانسیم آلائیده شده با منیزیم، کبالت و تیتانیم به‌ازاء مقادیر مختلفی از  $x$

کاتیون‌های آلائینده، ناهمسان‌گردی مغناطوبولوری آن از حالت تکمحوری به صفحه‌ای متمایل خواهد شد. بنابراین ثابت ناهمسان‌گردی آن کاهش می‌یابد. از این‌رو بر اساس رابطه ۱، با افزایش میزان آلائینده‌ها، از نیروی پسماندزدای نانو ذرات فریت استرانسیم کاسته می‌شود. اولین ثابت ناهمسان‌گردی ( $K_I$ ) نانو ذرات فریت استرانسیم آلائیده شده با کاتیون‌های منیزیم، تیتانیم و کبالت، در جدول ۱ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش مقدار  $x$  ثابت ناهمسان‌گردی ( $K_I$ ) کاهش یافته است. بنابراین با توجه به رابطه (۱) با کاهش ثابت ناهمسان‌گردی، نیروی پسماندزدا نیز کاهش می‌یابد.

۴-۳- خواص جذب ریزموچی نانو ذرات فریت استرانسیم آلائیده شده با منیزیم، کبالت و تیتانیم رفتار تلفات انعکاس نانو ذرات فریت استرانسیم آلائیده شده با کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم با ترکیب

مغناطیسی نانو ذرات  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  تغییر می‌کند. با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده، اندازه نانو ذرات فریت استرانسیم از گستره ۴۰-۴۵ نانومتر برای فریت خالص ( $x=0$ ) به گستره  $x=2/5$  کاهش می‌یابد. در این نانومتر برای فریت استرانسیم با  $x=2/5$  کاهش می‌یابد. در این شرایط، ریخت نانو ذرات از حالت کروی اندکی فاصله می‌گیرد و شکل‌های غیر کروی از ذرات نیز در نمونه‌ها ظاهر می‌شود. با افزایش میزان  $x$  دمای تشکیل فاز فریت استرانسیم افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده، میزان فاز ناخالصی همراه با ترکیب فریت استرانسیم افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به کاهش خواص مغناطیسی شود. مغناطش اشباع نانو ذرات فریت استرانسیم با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده از حدود  $40 \text{ emu/g}$  برای فریت استرانسیم خالص تا  $19 \text{ emu/g}$  برای نمونه با  $x=2/5$  کاهش می‌یابد. تغییرات تلفات انعکاس با افزایش میزان کاتیون‌های آلاینده تا  $x=2$  روند افزایشی دارد به طوری که برای نمونه با  $x=2$  پهنای باند جذب برابر  $4 \text{ گیگاهرتز}$  به دست آمد. در بیشتر از آن، قابلیت تلفات انعکاس نانو ذرات فریت استرانسیم آلایده شده کاهش می‌یابد. بنابراین نمونه نانو ذرات فریت استرانسیم آلایده شده با کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم در مقدار  $x=2$  می‌تواند به عنوان یک ماده جاذب ریزموج مناسب در گستره فرکانسی باند X (۸-۱۲ گیگاهرتز) عمل نماید.

## واژه‌نامه

### 1. thermal gravimetry

یافته است؛ به‌طوری‌که نمونه با ترکیب شیمیائی  $\text{SrFe}_8\text{MgCoTi}_2\text{O}_{19}$  بیشترین پهنای باند جذب را در بین سایر نمونه‌ها از خود نشان می‌دهد. بیشترین تلفات انعکاس این باند در  $30-64 \text{ dB}$  در فرکانس تطبیق  $8/99 \text{ گیگاهرتز}$  است. با افزایش بیشتر میزان کاتیون‌های جانشینی ( $x > 2$ ) در فریت استرانسیم پهنای باند جذب کاهش نشان می‌دهد. با این حال بیشترین تلفات انعکاس مربوط به نمونه فریت با مقدار  $x=2/5$  است که برابر با  $36-78 \text{ dB}$  است و در فرکانس  $8/8 \text{ گیگاهرتز}$  رخ داده است. مطالعات قبلی در این زمینه، بیشترین تلفات انعکاس را  $44 \text{ dB}$  و پهنای باند  $1/8 \text{ گیگاهرتز}$  گزارش کرده‌اند [۵]. در پژوهش حاضر نشان داده شده است که استفاده از مقدار مناسبی از کاتیون‌های جانشینی منیزیم، کبالت و تیتانیم در هگزافریت استرانسیم توانسته است بهبود قابل توجهی در خواص جذب ریزموج نانو ذرات فریت استرانسیم ایجاد نماید، به‌طوری که کل گستره فرکانسی باند X (پهنای باند  $4 \text{ گیگاهرتز}$ ) را در پایین‌تر از  $10 \text{ dB}$  پوشش دهد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانو ذرات فریت استرانسیم خالص و آلایده شده با کاتیون‌های منیزیم، کبالت و تیتانیم از روش هم‌رسوبی تهیه شد. نتایج به دست آمده از آزمون‌های انجام شده بر روی اثر کاتیون‌های جانشینی  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  بر خواص ساختاری و مغناطیسی هگزافریت استرانسیم همگی بیانگر آن است که با افزایش میزان کاتیون‌ها، خواص ساختاری و

## مراجع

1. Jain, K., "Microwave Ferrite Materials and Devices", *Invertis Journal of Science & Technology*, Vol. 1, No.3, pp. 221-228, 2007.
2. Baden, F.A.J., *Ferrites at Microwave Frequencies*, Peter Pregrinus Ltd., London, 1987.
3. Batlle, X., Obradors, X., Rodriguez, C.J., Pernet, M., Cabanas, M.V. and Vallet, M., "Cation Distribution and Intrinsic Magnetic Properties of Co-Ti-Doped M-Type Barium Ferrite", *Journal of Applied Physics*, Vol. 70, pp. 4420-4423, 1991.
4. Ghasemi, A., Šepelák, V., Liu, X. and Morisako, A., "The Role of Cations Distribution on Magnetic and Reflection Loss Properties of Ferrimagnetic  $\text{SrFe}_{12-x}\text{Sn}_{0.5x}\text{O}_{19}$ ", *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, pp. 709-734, 2010.
5. Sharbati, A., Choopani, S., Mousavi, A. and Senna, M., "Structure and Electromagnetic Behavior of Nanocrystalline  $\text{SrMg}_x\text{Zr}_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$  in the 8-12 GHz

- Frequency Range”, *Solid State Communication*, Vol. 150, pp. 2218–2222, 2010.
6. Li, Z.W., Feng C.L. and Ong, C.K., “Studies of Static and High-Frequency Magnetic Properties for M-Type Ferrite  $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Zr}_x\text{O}_{19}$ ”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, pp. 3902-3907, 2002.
  7. Ashiq, M.N., Iqbal, M.J. and Gul, I.H., “Effect of Al-Cr Doping on the Structural, Magnetic and Dielectric Properties of Strontium Hexaferrite Nanomaterials”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, pp. 259-263, 2011.
  8. Fang, Q., Liu, Y., Yin, P. and Li, X., “Magnetic Properties and Formation of Sr-Ferrite Nanoparticle and Zn, Ti/Ir substituted phases”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 234, pp. 366–370, 2001.
  9. Hasab, M.G., Ebrahimi, S.A.S. and Badiei, A., “An Investigation on Physical Properties of Strontium Hexaferrite Nanopowder Synthesized by a Sol-Gel Auto-Combustion Process with Addition of Cationic surfactant”, *Journal of European Ceramic Society*, Vol. 27, pp. 3637–3640, 2007.
  10. Malick, J., Virginie, N., Julien, B. and Le Breton, J.M., “Synthesis and Characterization of  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  Powder Obtained by Hydrothermal Process”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 496, pp. 306–312, 2010.
  11. Fu, Y.P. and Lin, C.H., “Fe/Sr Ratio Effect on Magnetic Properties of Strontium Ferrite Powders Synthesized by Microwave Induced Combustion Processed”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 386, pp. 222–227, 2005.
  12. Ashiq M.N., Iqbal M.J. and Gul I.H., “Structural, Magnetic and Dielectric Properties of Zr–Cd Substituted Strontium Hexaferrite ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) Nanoparticles”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 487, pp. 341–345, 2009.
  13. Ashiq M.N., Iqbal M.J. and Gul I.H., "Physical, Electrical and Dielectric Properties of Ca-Doped Sr-Hexaferrite ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) Nanoparticles Synthesized by Co-Precipitation Method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, pp. 1720-1726, 2010.
  14. Bercoff, P.G., Hermeb, C. and Jacobo, S.E., “The Influence of NdCo Substitution on the Magnetic Properties of Non-Stoichiometric Strontium Hexaferrite Nanoparticles”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, pp. 2245–2250, 2009.
  15. Gordani, G.R., Ghasemi, A. and Saidi A., “Enhanced Magnetic Properties of Substituted Sr-Hexaferrite Nanoparticles Synthesized by Co-Precipitation Method”, *Ceramics International*, Vol. 40, pp. 4945–4952, 2014.
  16. Le Breton, J.M., Teillet, J., Wiesinger, G., Morel, A., Kools, F. and Tenaud, P., “Mossbauer Investigation of Sr-Fe-O Hexaferrites with La-Co Addition”, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 38, No.5, pp. 2952-2956, 2002.
  17. Evans, B., Grandjean, F., Lilot, A., Vogel, R. and Gerard, A., “Fe Hyperfine Interaction Parameters and Selected Magnetic Properties of High Purity  $\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$  ( $\text{M} = \text{Sr}, \text{Ba}$ )”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 67, pp. 123-129, 1987.
  18. Sims, Z., Logo, S., Gerber, R. and Pollert, E., “Cation Distribution in Co-Ti- Substituted Barium Hexaferrites: A consistent Model”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 140-144, 2013.
  19. Williams, J.M., Adetunji, J. and Gregori, M., “Mössbauer Spectroscopic Determination of Magnetic Moments of  $\text{Fe}^{+3}$  and  $\text{Co}^{+2}$  in Substituted Barium Hexaferrite,  $\text{Ba}(\text{Co},\text{Ti})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ ”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 220, pp. 124-128, 2000.
  20. Gruskova, A., Slama, J., Dosoudil, R., Kevicka, D., Jancarik, V. and Toth, I., “Influence of Co–Ti Substitution on Coercivity in Baferrites”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 423, pp. 242-245, 2002.
  21. Doroftei, C., Rezlescu, E., Popa, P.D. and Rezlescu, N., “The Influence of the Technological Factors on Strontium Hexaferrites with Lanthanum Substitution Prepared by Self-Combustion Method”, *Journal of Optoelectronic Advanced Materials*, Vol. 8, pp. 1023-1027, 2006.
  22. Ghasemi, A., Sepelak, V., Liu, X. and Morisako, A., “First Study on the Formation of Strontium Ferrite Thin Films on Functionalized multi-walled carbon nanotube”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, pp. 2800-2803, 2011.
  23. Kazin, P.E., Trusov, L.A., Zaitsev, D.D., Tretyakov, Yu.D. and Jansen, M., “Formation of Submicron-Sized  $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  with Very High Coercivity”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, pp. 1068-1072, 2008.
  24. Ghasemi, A. and Sepelak, V., “Correlation between Site Preference and Magnetic Properties of Substituted Strontium Ferrite Thin Films”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, pp.1727-1733, 2011.
  25. Chen, N., Yang, K. and Gu, M., “Microwave Absorption Properties of La-Substituted M-Type Strontium Ferrites”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.490, pp. 609-612, 2010.