



ساخت و بررسی خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوذرات هگزافریت استرانسیوم نوع M

سید ابراهیم موسوی قهفرخی*، شهاب حسینی، مرتضی زرگر شوشتری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانش

گاه شهید چمران اهواز

(دریافت مقاله: ۹۳/۱/۱۶، نسخه نهایی: ۹۳/۵/۲۵)

چکیده: در این مقاله، نانوذرات هگزافریت استرانسیوم نوع M ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) به روش سل-ژل احتراقی تهیه شدند. برای به دست آوردن دمای پخت بهینه، از آنالیز توزین گرمایی (DTA/TG) استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده از این آنالیز، ژل خشک پودری هگزافریت استرانسیوم در دماهای 750°C تا 1050°C و در زمان‌های پخت ۴ تا ۷ ساعت پخت صورت گرفت. خواص ساختاری و ریخت‌شناسی نمونه‌ها به وسیله طیف پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف فروسرخ-تبدیل فوریه (FT-IR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شدند. همچنین خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی نمونه‌ها، به وسیله مغناطیس ارتعاشی (VSM) و دستگاه LCR متر، در دمای اتاق اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مغناطیسی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در پذیرفتاری مغناطیسی هر نمونه، تنها یک قله وجود داشت که با نتایج به دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، مبنی بر تک‌فاز بودن نمونه‌ها همخوانی داشت. همچنین اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریکی نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریکی و اتلاف دی‌الکتریکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. که این روند کاهش نشان دهنده‌ی رفتار طبیعی فریت‌هاست. نتایج XRD نشان داد که نمونه‌ی با دما و زمان پخت حدود 950°C و ۴ ساعت تک‌فاز است. طیف FT-IR نشان داد که وجود قله‌های جذبی در گستره‌ی 580 cm^{-1} - 560 cm^{-1} و 470 cm^{-1} - 430 cm^{-1} در همه‌ی نمونه‌ها، به ترتیب بیانگر تشکیل خوشه‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی اکسیدهای فلزی در فریت‌ها هستند. همچنین اندازه‌ی نانوذرات بر اساس تصاویر SEM در حدود ۷۰ نانومتر است.

واژه‌های کلیدی: هگزافریت استرانسیوم؛ نانوذرات؛ روش سل-ژل احتراقی؛ خواص مغناطیسی؛ خواص دی‌الکتریکی.

مقدمه

تقریباً به‌طور هم‌زمان توسط فحلنبراخ و هیسلا، ساخته شد. فریت‌های شش‌گوش نوع M، دارای فرمول عمومی $\text{MO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، بوده که (M= Ba, Sr, Pb) است. این فریت‌ها، وابسته به گروه فضایی ($P6_3/mmc$) بوده و دارای ساختار مغناطوپلمبیت هستند. ساختار فریت‌های شش‌گوش نوع M، شبیه به ساختار بلوری سنگ معدنی مغناطوپلمبیت $\text{PbFe}_{7.5}\text{Mn}_{3.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_{19}$ است [۱، ۲]. سلول واحد مغناطوپلمبیت ($\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$) شامل دو واحد فرمولی با ۶۴ یون

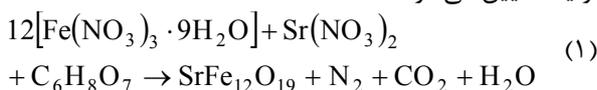
پژوهش‌های علمی روی فریت‌های مغناطیسی، از اواسط قرن ۱۹ آغاز شد. پس از آن، و در سال ۱۹۴۸ آن پژوهش‌ها به‌طور جدی توسط دو دانشمند ژاپنی در راستای کاربردی کردن آن‌ها دنبال شد. در آن سال، نظریه‌ای توسط دو پژوهنده‌ی به نام‌های استونر و ولفارس، تأثیر زیادی در پیشرفت‌های بعدی تولید هگزافریت نوع M به‌وجود آورد. اولین فریت سخت از نوع M با فرمول شیمیایی $\text{BaO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، در سال ۱۹۵۲ توسط ونت و

* نویسنده مسئول، تلفن-نمبر: ۰۶۱۳-۳۳۳۱۰۴۰، پست الکترونیکی: Musavi_ebrahim@yahoo.co.uk

آنجا که زیر یک بسامد خاص میدان الکتریکی خارجی، تبادل الکترونی بین Fe^{+2} و Fe^{+3} نمی‌تواند از میدان متناوب پیروی کند بنابراین، هر سه کمیت ثابت دی‌الکتریک (ϵ'')، فاکتور اتلاف دی‌الکتریک ($\tan \delta$) و اتلاف دی‌الکتریک نمونه ($\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$)، کاهش می‌یابند. علت این کاهش، تهی-جاها، در رفتگی‌ها، ناخالصی‌ها و ناراستی‌های ساختاری است. ثابت‌های دی‌الکتریک بالا، به‌واسطه‌ی افزایش اثر پوسته، باعث کاهش عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس می‌شود. فریت‌ها، به-علت کوچک بودن ثابت‌های دی‌الکتریک‌شان، در بسامدهای بالا کاربرد دارند. یکی از مهم‌ترین مواد در گروه فریت‌های ششگوش، فریت استرانسیوم ششگوشی ($SrFe_{12}O_{19}$) است که اولین بار در سال ۱۹۳۸ میلادی توسط آدلسکولد به‌روش هم-رسوبی گرمایی از محلول‌های نیترا، تهیه شد [۹-۱۳]. در این مقاله، به‌منظور تعیین دما و زمان بازیخت بهینه برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز، نخست نمونه‌هایی با دماهای بازیخت مختلف و سپس نمونه‌هایی با زمان‌های بازیخت متفاوت تهیه شدند و خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

چگونگی بررسی و اندازه‌گیری‌ها

برای ساخت نانوذرات $SrFe_{12}O_{19}$ به روش سل-ژل احتراقی، عنصرسنجی مواد اولیه با استفاده از واکنش شیمیایی رابطه‌ی (۱)، با معلوم بودن مقادیر جرم مولی و نسبت‌های مولی مواد اولیه، تعیین می‌شود [۱۴].



نخست نیترا آهن ۹ آبه‌ی $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ و نیترا استرانسیوم $Sr(NO_3)_2$ را با نسبت مولی ۱۱ به ۱، در ۱۲۰ ml آب دوبار یونیده حل کرده و سپس محلول به‌دست-آمده در حمام آب، به‌منظور گرما دادن غیر مستقیم برای تشکیل ژل، قرار می‌گیرد. برای همگن ساختن، محلول را روی هم‌زن مغناطیسی در دمای $30^\circ C$ قرار داده و پس از آن که مواد اولیه به‌طور کامل حل شدند، اسید سیتریک ($C_6H_8O_7$) با نسبت مولی ۱ به ۱/۵ به محلول اضافه می‌شود. برای این که محلول اسیدی در محیطی خنثی به ژل تبدیل شود، از بازی که توانایی اکسایش مواد اولیه مورد نظر را داشته باشد استفاده می‌شود. از آن‌جا که آمونیاک ($NH_3 \cdot H_2O$) برای واکنش-هایی که بین نیترا‌ها و اسید سیتریک صورت می‌گیرد باز

در واحد سلول، در ۱۱ جایگاه متقارن مختلف است و حاوی ۱۰ لایه‌ی اکسیژنی تنگ‌پکیده است که به‌طور شش‌گوشی در راستای محور c قرار گرفته‌اند. یون دوظرفیتی M^{2+} ، در هر پنجمین لایه، جانشین یک اتم اکسیژن می‌شود. آنیون‌های اکسیژن، جایگاه‌های ششگوشی و یون‌های فلزی کوچک‌تر، فضای بین آن‌ها را اشغال می‌کنند. جایگاه‌های بین اکسیژنی دو نوعند: یکی چهار وجهی (A)، که در این جایگاه یون فلزی به وسیله چهار یون اکسیژن و هشت وجهی (B) که در این جایگاه یون فلزی به وسیله‌ی هشت یون اکسیژن احاطه شده است. [۳، ۴]. بنابر نظریه فری مغناطیس، مغناطش در فریت از گشتاور مغناطیسی خالص یون‌های با اسپین بالا و اسپین پایین در جایگاه‌های مختلف زیرشبکه ناشی می‌شود. بنابراین، مغناطش اشباع یک فریت را می‌توان در دمای صفر کلوین با داشتن گشتاور مغناطیسی هر یون، توزیع یون‌ها بین جایگاه-های A و B، و برهم‌کنش تبدالی بین جایگاه‌های A و B به دست آورد. مغناطش اشباع و دمای کوری به‌ترتیب Ba, Sr, Pb، کوچک‌تر می‌شود. نیروی وادارنده‌ی مغناطیسی (H_c) هگزافریت‌ها بیشتر به اندازه‌ی ذره وابسته است. H_c هگزافریت‌های نوع M خالص، خیلی بزرگ بوده و وادارندگی مغناطیسی در هگزافریت‌های نوع M با افزایش دما (تا دمایی بیشتر از دمای اتاق)، برخلاف مواد آهن‌ربایی شناخته شده‌ی دیگر، افزایش می‌یابد. بنابراین، این مواد نسبت به مواد دیگر برای کاربردهای دمای بالا مناسب‌اند. ثابت دی‌الکتریک (ϵ'') یک ماده، تعیین‌کننده‌ی سرعت نسبی سیگنال الکترومغناطیسی است که می‌تواند در آن ماده حرکت کند. وقتی که میکروامواج وارد یک ماده‌ی دی‌الکتریک می‌شوند، سرعت آن‌ها با ریشه دوم ثابت دی‌الکتریک (ϵ'') کاهش می‌یابد که می‌توان این کاهش را با مدل ماکسول-ویگنر توضیح داد. بنابراین مدل، ساختار دی‌الکتریک فریت‌ها شامل دو لایه است، لایه‌ی اول شامل تعداد زیادی دانه است که به‌عنوان لایه‌ی رسانشی در بسامدهای بالا فعالیت می‌کنند. لایه‌ی دیگر شامل مرزدانه‌هایی است که به‌عنوان محیط مقاومتی، در بسامدهای پایین فعالیت می‌کنند. [۵-۸]. بنابر نظریه‌ی رابین کینو نوویکاوا، قطبش در فریت‌ها دارای سازوکاری شبیه فرایند رسانش الکتریکی است که به‌واسطه‌ی تبادل الکترون بین یون-های Fe^{+2} و Fe^{+3} است. با افزایش بسامد میدان الکتریکی اعمالی، قطبش کاهش یافته و به یک مقدار ثابت می‌رسد. از

آب‌زدایی، تجزیه، سوختن و متراکم شدن ذرات رخ می‌دهند. بنابر شکل ۱، در منحنی DTA دو قله‌ی گرماگیر و در منحنی TG چهار کاهش وزن مشاهده می‌شوند. کاهش وزن اولیه‌ای که در منحنی TG در گستره‌ی دمایی ۹۴ تا 341°C مشاهده می‌شود، به علت خروج اکسیژن و رطوبت جذب شده است. مرحله‌ی دوم در منحنی TG کاهش وزن در گستره‌ی دمایی 341 تا 650°C مشاهده می‌شود که حاصل تجزیه‌ی اسید سیتریک و تجزیه کامل نیترات و ترکیبات آن‌هاست، و خروج گاز CO_2 در حدود ۵ درصد است. از 650°C تا 880°C تشکیل فاز هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) و آغاز تشکیل فاز استرانسیوم است. در منحنی TG پس از دمای در حدود 880°C ، کاهش وزنی مشاهده نمی‌شود که احتمالاً به تشکیل مونوفریت استرانسیوم، حذف هماتیت، و تشکیل فاز هگزافریت استرانسیوم است. قله‌ی گرماگیر اول در منحنی DTA در دمای 440°C و قله گرماگیر دوم در دمای 827°C مشاهده می‌شود. با بررسی نتایج حاصل از آنالیز توزین گرمایی دماهای 800 ، 850 ، 900 ، 950 و 1000°C به منظور تعیین دمای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز انتخاب شدند.

شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بازیخت شده در دماهای 800 ، 850 ، 900 ، 950 و 1000°C را نشان می‌دهد. زمان بازیخت همه نمونه‌ها ۵ ساعت است. در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی بازیخت شده در دمای 800°C (شکل ۲ الف)، قله‌های پراش متناظر با مقادیر 2θ ی 33.28 ، 35.74 ، 40.97 ، 54.23 مربوط به فاز هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) مشاهده می‌شوند که نشان می‌دهد، این نمونه دارای مقدار قابل توجهی فاز هماتیت باقی مانده است. همچنین شدت کم و پهنای قله‌های مربوط به هگزافریت استرانسیوم در این نمونه، نشان می‌دهد که در دمای 800°C هگزافریت استرانسیوم به‌طور کامل تشکیل نشده است. در الگوی پراش نمونه کلسینه شده در دمای 850°C ، فقط دو قله‌ی ضعیف مربوط به فاز هماتیت مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی کاهش درصد فاز هماتیت‌اند. در الگوی پراش نمونه‌ی کلسینه شده در دمای 900°C قله‌های وابسته به فاز هماتیت به‌طور کامل حذف شده‌اند و در $2\theta = 49.27$ قله‌ای مشاهده می‌شود که مربوط به فاز واسطه مونوفریت استرانسیوم (SrFe_2O_4) است. این قله در دماهای 950°C و 1000°C مشاهده نمی‌شود. الگوی پراش نمونه‌ی کلسینه شده در دمای 950 و 1000°C ، تشکیل هگزافریت

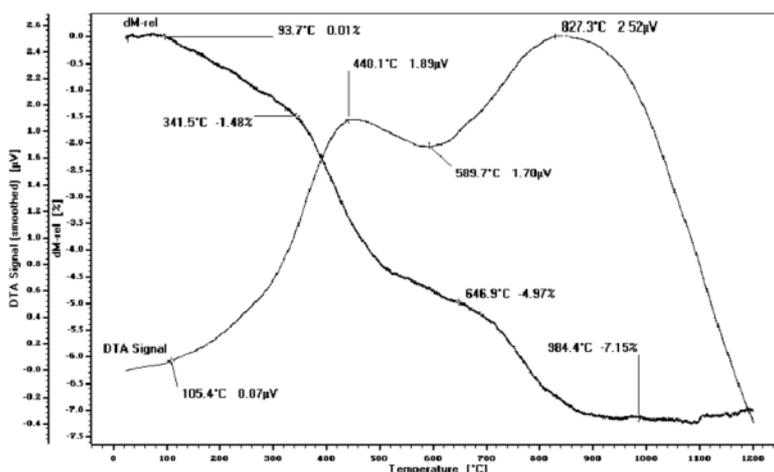
مناسبی است، بنابراین با اضافه کردن تدریجی آمونیاک، مقدار pH محلول روی عدد ۷ تنظیم شد. این محلول در حمام آب 100°C قرار گرفت تا ژلی با چسبندگی بالا شکل بگیرد. ژل حاصل را تا دمای 300°C درون کوره خشک کرده که حین خشک شدن، احتراق صورت می‌گیرد. شاخصه‌های ساختاری نمونه‌های تهیه شده در دمای 900°C در زمان‌های ۶ و ۷ ساعت و در دمای 950°C با زمان‌های ۴، ۵ و ۶، از قبیل پارامترهای شبکه (a, c)، حجم سلول واحد، چگالی نمونه بر مبنای داده‌های پرتو ایکس، اندازه‌گیری بلورک‌ها با استفاده از رابطه‌ی دبای- شرر و درصد فازهای موجود، با استفاده از داده‌های الگوی پراش پرتو ایکس مدل PW1840 ساخت شرکت فیلیپس با طول موج $\lambda = 1.54$ و رابطه‌های مرجع [۴] مشخص شدند. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل S-4160/Hitachi استفاده شد. برای شناسایی نوع گروه‌های عامل و پیوندهای موجود در نمونه‌های تهیه شده، از طیف‌سنج فرسرخ- تبدیل فوریه (FT-IR) مدل BOMEN/MB102 در گستره‌ی عدد موج $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$ استفاده شد. برای بررسی رفتار مغناطیسی نمونه‌ها، از یک مغناطیس نمونه ارتعاشی (VSM) و خواص دی‌الکتریکی مختلف از قبیل ثابت دی‌الکتریک (ϵ')، سازهی اتلاف دی‌الکتریک ($\tan \delta$)، اتلاف دی‌الکتریک ($\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$)، رسانندگی الکتریکی ac (σ_{ac})، نفوذپذیری مغناطیسی (μ) و ضریب القای مغناطیسی سیم‌پیچ (L) با استفاده از داده‌های به‌دست آمده به وسیله دستگاه LCR متر، در دمای اتاق در گستره فرکانسی ۱۲Hz تا ۰.۲MHz اندازه‌گیری می‌شوند، استفاده شد.

بحث و برداشت

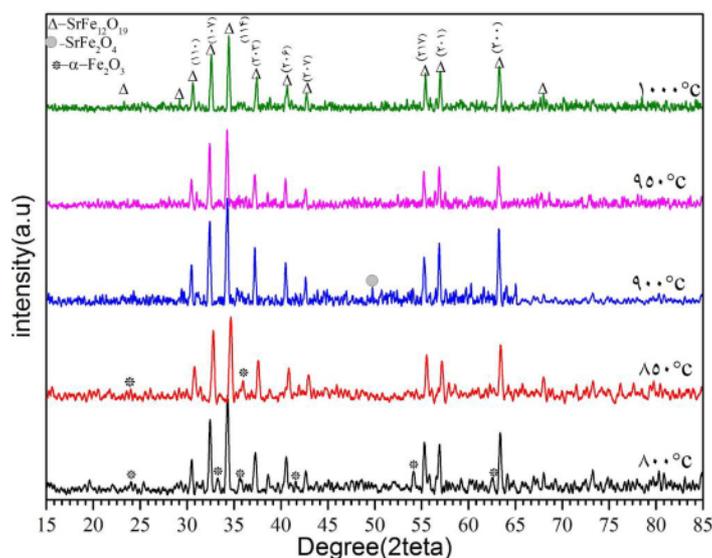
برای ارزیابی سازوکار انتقال فاز ژل خشک و تشکیل فاز هگزافریت، لازم است تا دماهای گرمازا-گرماگیر، چگونگی تجزیه در اثر گرما، کاهش وزن ماده و اثر گرما بر تغییرات ساختاری نمونه‌های ساخته شده صورت گیرد [۱۵]. شکل ۱ نمودار (DTA/TG) خاکستر حاصل از سوختن را نشان می‌دهد. بررسی توزین گرمایی (TG) و تفاضلی گرمایی (DTA) با استفاده از 20 mg ژل خشک افروخته‌ی هگزافریت استرانسیوم، در فشار جو و با نرخ گرمایش $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ ، در گستره دمای 50 تا 1200°C از DTA/TG مدل STA-503/Bahr2010 استفاده شد. طی بررسی گرمایش نمونه، چندین فرآیند از قبیل

سیس با افزایش دما به دماهای 1000°C و بالاتر ساختار نمونه‌های بازیخت شده دستخوش کرنش شده و از حالت استاندارد هگزافریت استرانسیوم خارج می‌شود. لذا به نظر می‌رسد دمای 950°C برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز مناسب باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از مرحله‌ی قبل، به نظر می‌رسد دماهای بازیخت بالاتر از 950°C باعث بهبود خواص ریزساختاری نمی‌شوند. بنابراین با انتخاب دماهای 900°C و 950°C و تغییر زمان بازیخت، خواص ریزساختاری نمونه‌های هگزافریت استرانسیوم بررسی شدند. به این منظور بازیخت در دمای 900°C در زمان‌های ۶ و ۷ ساعت و در دمای 950°C با زمان‌های ۴، ۵ و ۶ ساعت تکرار شدند.

استرانسیوم را نشان می‌دهد. شدت قله‌ها در این دو نمونه افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی افزایش بلورینگی است. قله‌های پراش متناظر با مقادیر 2θ ی ۳۰/۳۹، ۳۲/۳۰، ۳۴/۱۹، ۳۷/۱۴، ۴۰/۳۷، ۵۵/۱۷، ۵۶/۸۲ و ۶۳/۲۵ درجه که به ترتیب به صفحات پراش (۱۱۰)، (۱۰۷)، (۱۱۴)، (۲۰۳)، (۲۰۶)، (۲۰۷)، (۲۱۷)، (۲۰۱) و (۲۰۰) مربوط می‌شوند، همخوانی دارند. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بازیخت شده با نرم‌افزار X-pert با کارت استاندارد شماره (۱۲۰۷)-ICDD#۰۲۴ مربوط به هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز مقایسه شدند که نتیجه‌ی این مقایسه نشان می‌دهد که بیشترین همخوانی مربوط به نمونه‌ی با دمای پخت حدود 950°C است.



شکل ۱ منحنی DTA/TG نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بازیخت شده در دماهای الف) 800°C ، ب) 850°C ، پ) 900°C ، ت) 950°C و ث) 1000°C با زمان ۵ ساعت.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵، λ طول موج پرتو x ، β نصف پهنای قله‌ی بیشینه و θ نصف زاویه‌ی قله بیشینه است.

$$\beta \cos \theta = 0.9\lambda / D + 2\varepsilon \sin \theta \quad (6)$$

در رابطه‌ی ۶، ε کرنش است.

بنابر جدول ۱، در هر دو دمای 900°C و 950°C با افزایش زمان بازپخت اندازه‌ی ثابت‌های شبکه و حجم سلول واحد افزایش می‌یابد. بنابر نظریه ورسنگن و استیولس، با بررسی نسبت

پارامترهای $(\frac{c}{a})$ ، می‌توان نوع ساختار را تعیین کرد. بنابراین

نظریه، اگر مقدار $\frac{c}{a}$ کمتر از $3/98$ باشد آن‌گاه ساختار موردنظر یک ساختار ششگوشی نوع M است [۱۶]. از آن-

جایی که مقادیر $\frac{c}{a}$ برای همه‌ی نمونه‌های ساخته شده در این

پژوهش کمتر از $3/98$ به دست آمدند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختار همه‌ی نمونه‌ها، ششگوش و از نوع M است.

همچنین چگالی پرتو ایکس نمونه‌ها با افزایش زمان بازپخت و

به دلیل افزایش حجم سلول واحد کاهش یافته است و با

افزایش دما، اندازه‌ی میانگین بلورک‌ها افزایش یافته است در

نهایت کرنش ساختار نمونه‌ها با افزایش دما و زمان بازپخت افزایش می‌یابد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که دمای بهینه برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز 950°C و زمان ۴ ساعت است.

شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های در دمای 900°C

در زمان‌های، ۶ و ۷ ساعت و در دمای 950°C با زمان-

های ۴، ۵ و ۶ ساعت را نشان می‌دهد. در الگوی پراش نمونه‌ی بازپخت شده در دمای 900°C و زمان ۶ ساعت، قله‌هایی در

۲۰، ۲۳/۴۲، ۲۶/۵۱ و ۴۵/۰ مربوط به فاز مگنتیت (Fe_3O_4) مشاهده می‌شوند. در الگوی پراش نمونه بازپخت شده

در دمای 900°C و زمان ۷ ساعت قله‌هایی در ۲۰، ۲۳/۴۵

یک قله. وابسته به مگنتیت دیده می‌شود. الگوی پراش نمونه بازپخت شده در دمای 950°C و زمان ۴، ۵ و ۶ ساعت این

قله‌ها حذف شده و قله‌های مشاهده شده کاملاً بر کارت استاندارد (ICDD#-۰۲۴-۱۲۰۷) برازیده‌اند. با استفاده از

داده‌های الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، اطلاعات ریزساختاری شامل اندازه‌ی بردارهای شبکه a و c (رابطه‌ی

۲)، حجم سلول واحد (رابطه ۳)، چگالی پرتو ایکس (رابطه ۴)، میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها و کرنش با رابطه‌ی ویلیامسون-هال (رابطه ۶) محاسبه شدند که نتایج حاصل در جدول ۱ آمده‌اند.

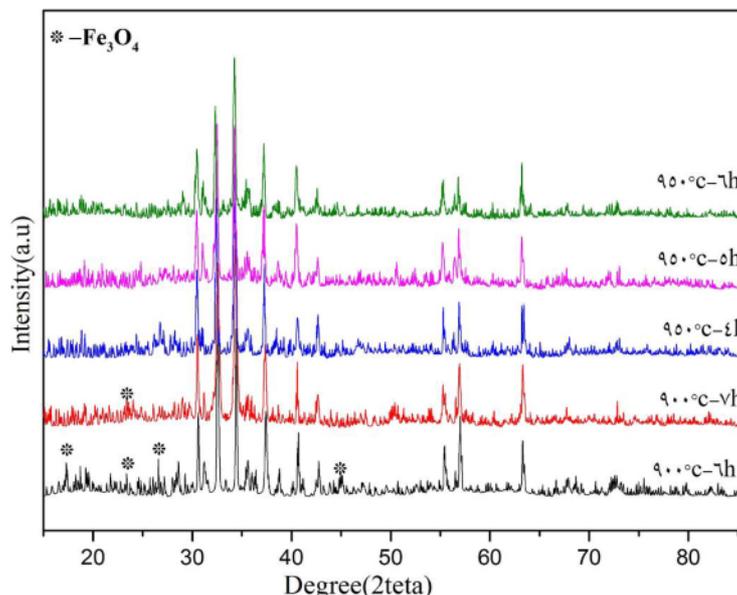
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4\sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2)$$

$$V_{\text{cell}} = a^2 c \sin 120 = 0.8666 a^2 c \quad (3)$$

$$d_x = \frac{ZM}{N_A V_{\text{cell}}} \quad (4)$$

در رابطه‌ی ۴، Z تعداد واحد فرمولی در یک سلول واحد (که در این‌جا مساوی ۲ است)، M جرم مولکولی، N_A عدد آوگادرو و

V_{cell} حجم سلول واحد است.



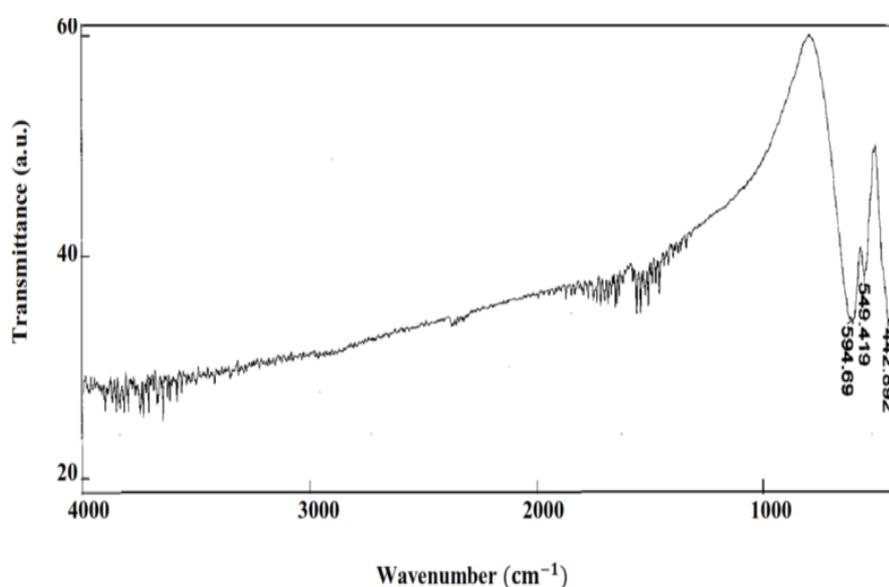
شکل ۳ الگوی پراش نمونه‌های بازپخت شده در دماهای 900°C و 950°C با زمان‌های مختلف.

جدول ۱ خصوصیات ریزساختاری هگزاریت استرانسیوم با دما و زمان پخت متفاوت.

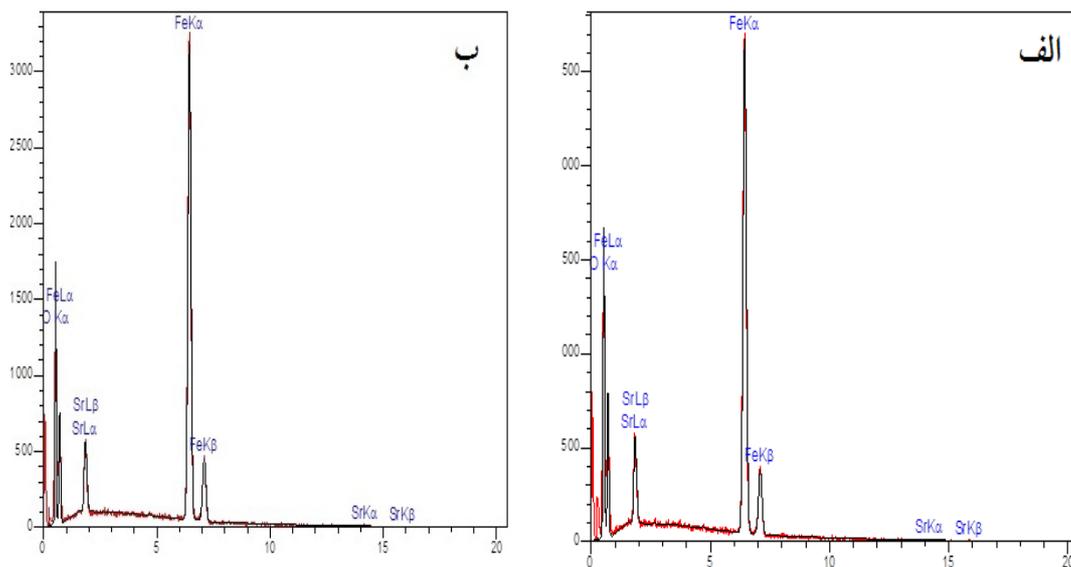
۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۰۰	۹۰۰	دمای بازپخت (°C)
۶	۵	۴	۷	۶	زمان بازپخت (h)
۵,۸۹۸	۵,۸۷۵	۵,۸۷۵	۵,۸۸۳	۵,۸۷۵	a(Å)
۲۳,۰۰۲	۲۲,۹۳۰	۲۲,۸۰۷	۲۱,۱۱۴	۲۱,۹۴۴	c(Å)
۶۸۹,۴۲	۶۸۷,۴۸	۶۸۷,۰۵	۶۸۸,۳۵	۶۸۷,۱۷	V _{cell} (۱۰ ^۶ pm ^۳)
۳۴	۳۰	۲۹	۳۳	۳۲	D(nm)
۵,۱۱۲	۵,۱۳۷	۵,۱۴۲	۵,۱۱۲	۵,۱۳۷	d _x (g/cm ^۳)
۰,۱۲۶	۰,۰۱۲	۰,۰۰۳	۰,۰۲۶	۰,۰۱۳	ε

[۱۸]. سرشتی‌های جذب FT-IR نمونه‌ها نشان‌دهنده‌ی تشکیل هگزاریت استرانسیوم در دماهای فوق‌الحد قرار می‌گیرند. ترکیب عناصر موجود در نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) بررسی شد. شکل ۵ منحنی XRF نمونه‌های بازپخت شده در دماهای ۹۵۰ و ۱۰۰۰°C را نشان می‌دهد. منحنی XRF نمونه‌ها نشان‌دهنده‌ی وجود عناصر استرانسیوم، آهن و اکسیژن با نسبت‌های جرمی متناسب با فرمول شیمیایی هگزاریت استرانسیوم همخوانی دارد و ناخالصی در نمونه دیده نمی‌شود.

شکل ۴ بیناب FT-IR نانوذرات هگزاریت استرانسیوم در دمای ۹۵۰°C و زمان ۵ ساعت، گستره‌ی طول موج $400-4000\text{ cm}^{-1}$ را نشان می‌دهد [۱۷]. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود طیف FT-IR نانو ذرات هگزاریت استرانسیوم شامل سه پیوند جذبی است که به پیوندهای فلز-اکسیژن در فریت‌ها وابسته‌اند. پیوندهای جذبی در گستره $550-580\text{ cm}^{-1}$ مربوط به تشکیل خوشه‌های چهاروجهی و $430-470\text{ cm}^{-1}$ متناظر با خوشه‌های هشت‌وجهی هستند که حضور پیوند کششی فلز-اکسیژن را در هگزاریت استرانسیوم تأیید می‌کند



شکل ۴ بیناب FT-IR نانوذرات هگزاریت استرانسیوم بازپخت شده در دمای ۹۵۰°C و مدت ۵ ساعت.



شکل ۵ منحنی XRF نمونه‌های هگزافریت استرانسیوم بازیخت شده در دماهای الف) ۹۵۰ °C و ب) ۱۰۰۰ °C.

با استفاده از منحنی پسماند محاسبه شدند و نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده‌اند. داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهند که با افزایش دمای بازیخت مغناطش اشباعی افزایش یافته و در ۹۵۰ °C به بیشینه می‌رسد و سپس با افزایش دمای بازیخت کاهش می‌یابد. همچنین کاهش زمان بازیخت در دمای ۹۵۰ °C منجر به افزایش مغناطش اشباعی شده است و تغییرات مغناطش پسماند مشابه تغییرات مغناطش اشباعی است [۱۸]. میدان وادارندگی مغناطیسی نمونه‌ها با افزایش دمای بازیخت کاهش می‌یابد. بالاتر بودن مقدار میدان وادارندگی نمونه‌ی بازیخت شده در دمای ۹۰۰ °C می‌تواند به دلیل وجود فاز هماتیت ($\alpha-Fe_2O_3$) باشد که دارای وادارندگی بالایی است. با افزایش دمای بازیخت به دلیل حذف فاز هماتیت و افزایش اندازه‌ی نانوذرات، میدان وادارندگی کاهش می‌یابد [۱۹].

چهارگوشی منحنی پسماند ($\frac{M_r}{M_s}$) برای مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵

نشان می‌دهد که ذرات تک‌حوزه‌ی مغناطیسی‌اند. در این پژوهش، نسبت چهارگوشی منحنی پسماند برای نمونه‌ها در گستره ۰/۶۲۸-۰/۶۴۳ به دست آمد که نشان دهنده تک حوزه مغناطیسی بودن همه نمونه‌ها است [۲۰].

نمودار پذیرفتاری مغناطیسی (χ) بر حسب شدت میدان

مغناطیسی (H)، بر اساس رابطه ($\chi = \frac{dM}{dH}$) با مشتق‌گیری

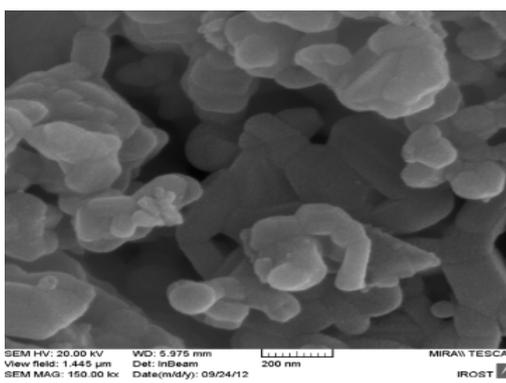
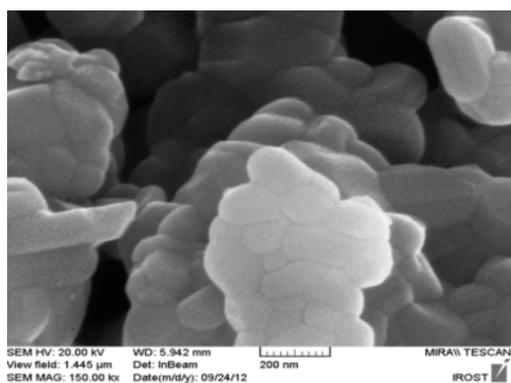
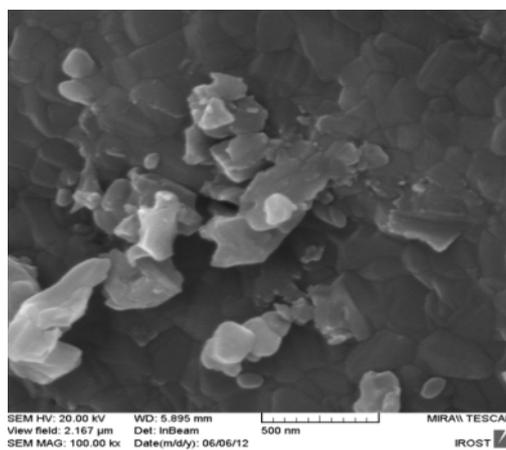
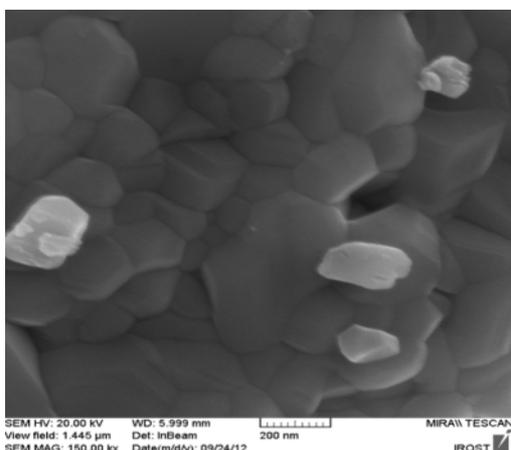
از شاخه‌ی بالای منحنی پسماند شکل ۷ محاسبه شد که نتایج در شکل ۸ نمایش داده شده است. منحنی پذیرفتاری

ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. شکل ۶ تصاویر SEM نمونه‌های بازیخت شده در دماهای ۸۵۰، ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰ °C را نمایش می‌دهد. چنان‌که تصاویر نشان می‌دهند، با افزایش دما، اندازه و شکل نانوذرات یک‌دست شده و در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰ °C درجه‌ی سانتی‌گراد نانوذرات عموماً دارای قاعده‌ی شش‌گوشی هستند. با افزایش دما تا بالاتر از ۹۵۰ °C نانوذرات غالباً از حالت شش‌گوش خارج شده و شکل ورقه‌ای آن‌ها وضوح بیشتری پیدا می‌کند. این تغییر شکل با نتایج به‌دست آمده از الگوی پراش نمونه‌ها که نشان دهنده‌ی افزایش کرنش با افزایش دماست، همخوان است. اندازه‌ی نانوذرات براساس تصاویر SEM در گستره‌ی ۷۰ نانومتر است. چنانکه در تصاویر مشاهده می‌شود نانوذرات به‌دلیل خاصیت مغناطیسی، تجمع می‌کنند و هر دانه مشاهده شده در شکل از چند نانوذره با مزر مشخص تشکیل شده است.

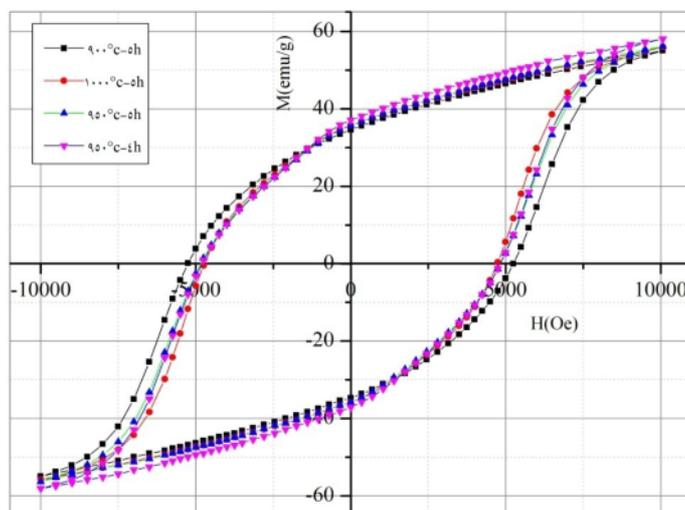
به‌منظور بررسی اثر دما و مدت پخت بر خواص مغناطیسی هگزافریت استرانسیوم، نمونه‌هایی با دمای بازیخت ۹۰۰ و ۱۰۰۰ °C به مدت ۵ ساعت و نیز دمای بازیخت ۹۵۰ °C و مدت‌های ۴ و ۵ ساعت انتخاب شدند. منحنی پسماند نمونه‌ها با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی VSM تهیه شد. شکل ۷ منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. خواص مغناطیسی از قبیل مغناطش اشباعی (M_s)، پسماند مغناطیسی (M_r)، وادارندگی مغناطیسی (H_c)، پذیرفتاری مغناطیسی (χ)، نسبت چهارگوشی و مساحت حلقه‌ی پسماند

افزایش دمای بازپخت، افزایش یافته و در دمای 1000°C به بالاترین مقدار ($2/50 \times 10^{-2}$) در $H = 5507$ (Oe) رسیده است.

مغناطیسی همه‌ی نمونه‌ها تنها یک قله برای مغناطش وجود دارد که با نتایج به‌دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، مبنی بر تک‌فاز بودن نمونه‌ها همخوانی دارد. همچنین شکل ۸ نشان می‌دهد که پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها با



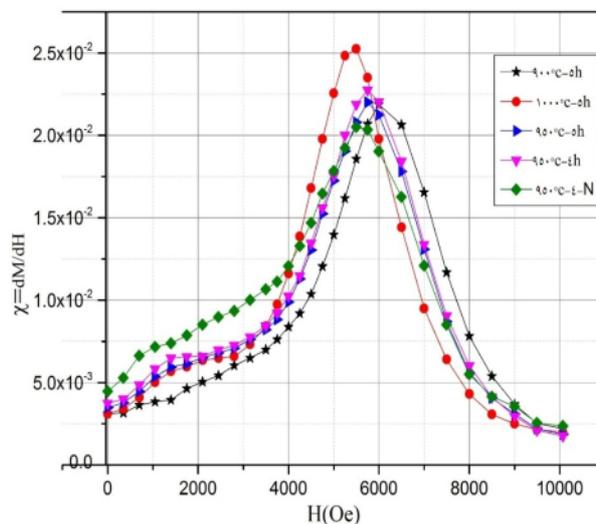
شکل ۶ تصاویر SEM نانوذرات هگزافریت استرانسیوم با دمای پخت الف) ۸۵۰، ب) ۹۰۰، ج) ۹۵۰ و د) 1000°C به مدت ۵ ساعت.



شکل ۷ منحنی پسماند مغناطیسی نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.

جدول ۲ خواص مغناطیسی نمونه‌های هگزافریت استرانسیوم با دما و مدت پخت متفاوت.

۱۰۰۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۰۰	دمای بازپخت (°C)
۵	۴	۵	۵	زمان بازپخت (h)
۵۵٫۹۶	۵۸٫۰۳	۵۶٫۰۹	۵۴٫۹۸	M_s (emu/g)
۳۵٫۷۲	۳۷٫۰۳	۳۵٫۶۷	۳۴٫۵۶	M_r (emu/g)
۴۷۲۳٫۷۷	۴۸۰۲٫۰۳	۴۸۳۷٫۸۱	۵۲۵۴٫۱۲	H_c (Oe)
۰٫۶۳۸	۰٫۶۳۸	۰٫۶۳۵	۰٫۶۲۸	M_r/M_s
۲٫۵۰	۲٫۲۴	۲٫۱۸	۲٫۱۹	$\chi/10^{-2}$
۷٫۲۶	۷٫۷۶	۷٫۵۲	۷٫۹۵	مساحت حلقه پسماند ($A=1/10^5$)



شکل ۸ نمودار پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.

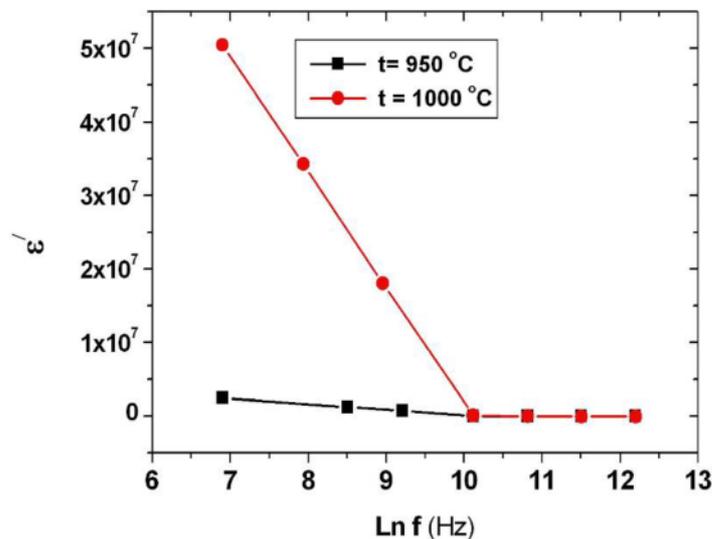
دو لایه‌ای ماکسول-ویگنر و نظریه‌ی کوپ تشریح کرد [۲۱]، [۲۲]. بنابراین مدل ماکسول-ویگنر، مواد دی‌الکتریک با ساختار ناهمگن را می‌توان شامل دانه‌هایی با رسانندگی بالا که به وسیله‌ی لایه‌های نازک مقاومتی (مرزدانه‌ها) از هم جدا شده در نظر گرفت. ولتاژ اعمالی بر نمونه بیشتر در عبور از مرزدانه‌ها کاهش یافته و یک قطبش بارفضایی در مرزدانه‌ها ایجاد می‌کند [۸]. بنابراین نظریه کوپ، ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای پایین از مرزدانه‌ها ناشی می‌شود. به علت مقاومت الکتریکی بالا در مرزدانه‌ها ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای پایین دارای مقادیر بالایی است. ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای بالاتر از دانه‌ها ناشی می‌شود. به علت مقاومت الکتریکی پایین در دانه‌ها، ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای بالا دارای مقادیر کوچکی است. اتلاف دی‌الکتریک، بخش مهمی از کل اتلاف هسته در فریت-های مغناطیسی است. بنابراین، برای داشتن اتلاف هسته پایین، اتلاف دی‌الکتریک کم مطلوب است. چنانکه گفته شد، این رفتار را می‌توان براساس این فرض که سازوکار قطبش دی-

خواص دی‌الکتریکی مختلف از قبیل ثابت دی‌الکتریک، سازه‌ی اتلاف دی‌الکتریک، رسانندگی الکتریکی ac، نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب القای مغناطیسی سیم‌پیچ با استفاده از داده‌های به دست آمده به وسیله‌ی دستگاه LCR متر، در دمای اتاق در گستره بسامدی ۱ KHz تا ۲۰۰ KHz اندازه‌گیری - شدند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک نمونه‌های تهیه شده در دمای‌های بازپخت ۹۵۰ و ۱۰۰۰°C به مدت ۵ ساعت در جو و با بسامدهای مختلف در شکل‌های ۹ تا ۱۳ نشان داده شده‌اند.

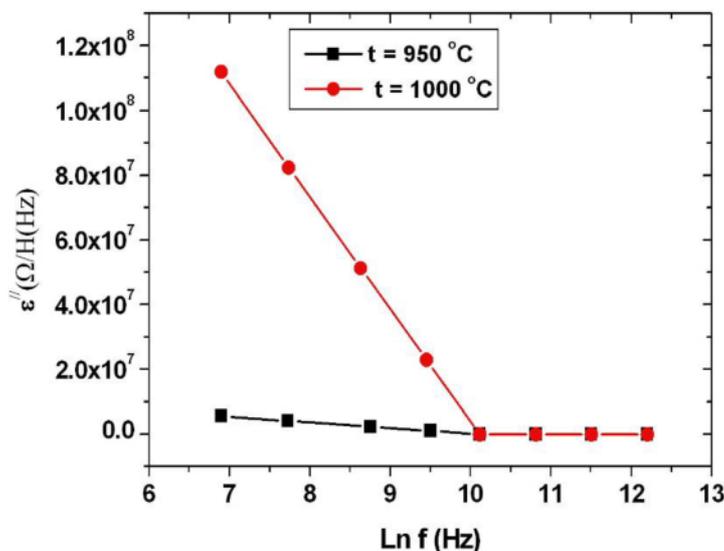
از شکل‌های ۹ و ۱۱ پیداست که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک (ϵ')، اتلاف دی‌الکتریک (ϵ'') و رسانش الکتریکی σ_{ac} نمونه‌ها کاهش می‌یابند. آهنگ کاهش در بسامدهای پایین سریع و در بسامدهای بالا آهسته است که این روند کاهش نشان دهنده‌ی رفتار دی‌الکتریک طبیعی فریت-هاست. رفتار دی‌الکتریک فریت‌ها را می‌توان با استفاده از مدل

[۲۳،۸]. نمودار نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب القای مغناطیسی سیم‌پیچ هسته، که معیاری برای تعیین تلفات هسته هستند، بر حسب بسامد و با حضور نانوذرات هگزافریت استرانسیوم ($SrFe_{12}O_{19}$) به‌عنوان هسته‌ی سیم‌پیچ، به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده‌اند. چنانکه از این شکل‌ها پیداست، با توجه به اعداد مندرج بر روی محور ω ، نمودار نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب القای مغناطیسی بر حسب بسامد تغییر قابل توجهی ندارد و به‌نظر می‌رسد که این کمیت‌ها تقریباً ثابت‌اند، زیرا بیشتر تغییرات نفوذپذیری و ضریب القای مغناطیسی به‌نوع فریت و ناخالصی بستگی دارد.

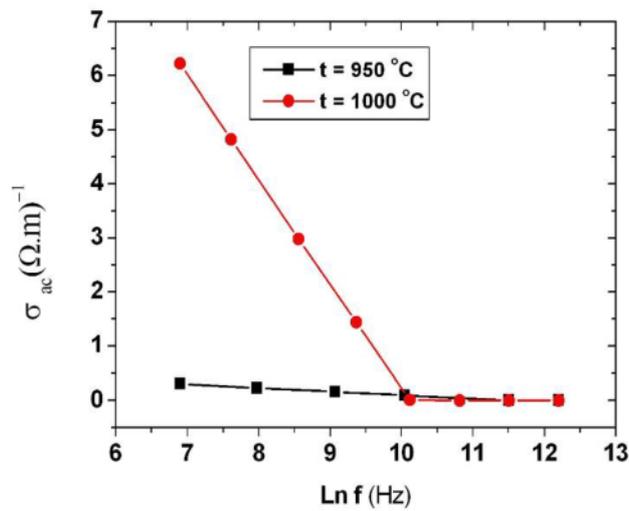
الکتريک در فریت‌ها، شبیه فرایند رسانش الکتريکی است، شرح داد. بنابر سازوکار پرش وروی، رسانش الکتريکی در فریت‌ها، به‌علت پرش الکترون‌ها بین یون‌هایی که بیش از یک حالت ظرفیت دارند و به‌طور کتره‌ای است که در جایگاه‌های شبکه توزیع شده‌اند. بنابراین، سازوکار رسانش الکتريکی در هگزافریت‌های نوع M را می‌توان براساس پرش الکترون بین یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} در جایگاه‌های هشت وجهی (B)، توصیف کرد. مقاومت الکتريکی در فریت‌ها با افزایش بسامد، به‌علت افزایش انرژی جنبشی و احتمال برخورد الکترون‌ها، افزایش می‌یابد و در نتیجه رساندگی الکتريکی کاهش می‌یابد



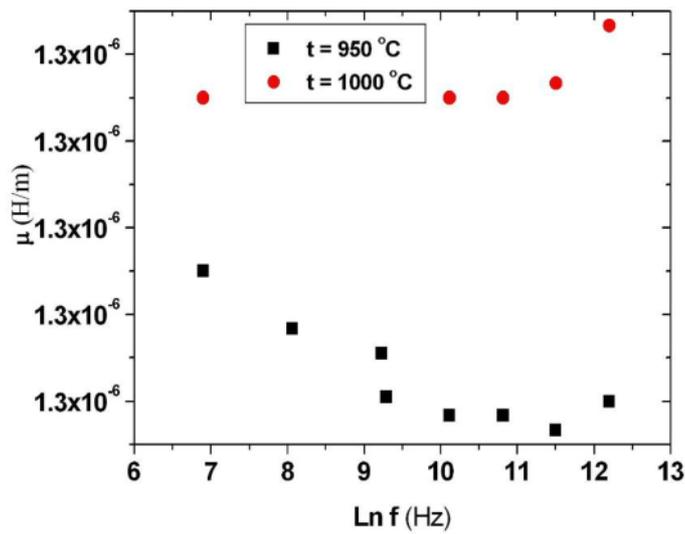
شکل ۹ نمودار ثابت دی‌الکتريک نسبی برحسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



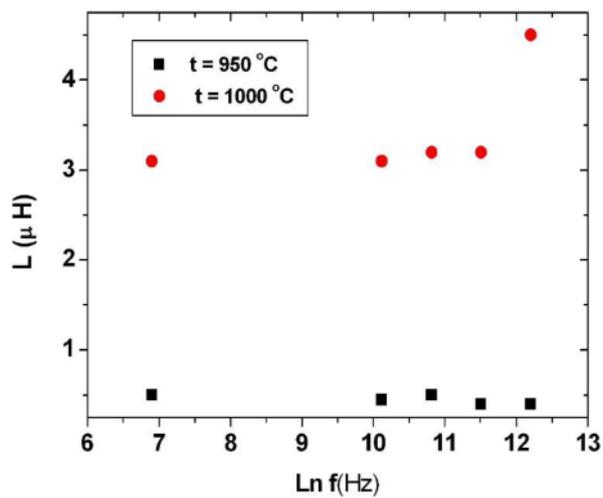
شکل ۱۰ نمودار اتلاف دی‌الکتريک برحسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۱۱ نمودار رسانش الکتریکی بر حسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۱۲ نمودار نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۱۳ نمودار ضریب القای مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.

برداشت

نخست هگزافریت استرانسیوم به روش سل-ژل احتراقی تهیه و سپس تأثیر دما و زمان بازیخت بر روی ریزساختار، خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی آن مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور تعیین دما و زمان بهینه بازیخت برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز، ابتدا نمونه‌هایی با دماهای بازیخت مختلف و سپس نمونه‌هایی با زمان‌های بازیخت متفاوت تهیه شدند. الگوی پراش نمونه‌های بازیخت شده در دمای‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دمای بازیخت، درصد همخوانی ساختار بلوری با کارت استاندارد افزایش یافته و در حدود 950°C به بیشینه می‌رسد. سپس با افزایش دما ساختار نمونه‌های بازیخت شده دستخوش کرنش شده و از حالت هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز خارج می‌شود. لذا به نظر می‌رسد دمای 950°C و مدت ۴ ساعت برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز مناسب باشد. طیف FT-IR نانوذرات هگزافریت استرانسیوم در گستره‌ی طول موج $4000-400\text{ cm}^{-1}$ نشان می‌دهد که نانو ذرات هگزافریت استرانسیوم شامل سه پیوند جذبی است که به پیوندهای فلز-اکسیژن در فریت‌ها وابسته‌اند. پیوندهای جذبی در گستره‌ی $580-550\text{ cm}^{-1}$ مربوط به تشکیل خوشه‌های چهاروجهی و $470-430\text{ cm}^{-1}$ متناظر با خوشه‌های هشت-وجهی هستند که حضور پیوند کششی فلز-اکسیژن را در هگزافریت استرانسیوم تأیید می‌کند. منحنی XRF نمونه‌ها، وجود عناصر استرانسیوم، آهن و اکسیژن را با نسبت‌های جرمی متناسب که با فرمول شیمیایی هگزافریت استرانسیوم همخوانی دارد نشان می‌دهد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد، چنانکه از تصاویر پیداست با افزایش دما اندازه و شکل نانوذرات یک‌دست شده و در دماهای 900°C و 950°C نانوذرات عموماً دارای قاعده‌ی شش‌گوشی هستند. با افزایش دما تا بالاتر از 950°C نانوذرات غالباً از حالت شش‌گوش خارج شده و شکل ورقه‌ای آن‌ها وضوح بیشتری پیدا می‌کند. این تغییر شکل با نتایج به دست

آمده از الگوی پراش نمونه‌ها که نشان دهنده‌ی افزایش کرنش با افزایش دماست، در توافق است. اندازه‌ی نانوذرات براساس تصاویر SEM در گستره‌ی $100-50$ نانومتر است. بررسی اثر دما و زمان پخت بر خواص مغناطیسی هگزافریت استرانسیوم، نشان می‌دهد. که مغناطش اشباعی و مغناطش پسماند با افزایش دما افزایش یافته و در 950°C به بیشینه می‌رسد. میدان وادارندگی نمونه‌ها با افزایش دمای بازیخت کاهش می‌یابد. در این پژوهش نسبت چهارگوشی منحنی پسماند برای نمونه‌ها در گستره‌ی $0.643-0.628$ به دست آمده که نشان دهنده‌ی تک حوزه مغناطیسی بودن همه نمونه‌ها است. منحنی پذیرفتاری مغناطیسی همه‌ی نمونه‌ها تنها یک قله برای مغناطش وجود دارد که با نتایج به دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها مبنی بر تک‌فاز بودن نمونه‌ها همخوانی دارد. اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریکی نمونه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک نمونه‌ها کاهش می‌یابد به طوری که کاهش در بسامدهای پایین سریع و در بسامدهای بالا آهسته است که این روند کاهش نشان دهنده‌ی رفتار دی‌الکتریک طبیعی فریت‌ها است.

مراجع

- [1] Valenzuela R., *Magnetic ceramics*, (Cambridge University Press, 1994).
- [2] Fang C. M., Kools F., Metselaar R., de G., and de Groot R. A., "Magnetic and electronic properties of strontium hexaferrite $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ from first-principles calculations," *Physics: Condensed Matter* 15, (2003) 6229.
- [3] Iqbal M. J., Ashiq M. N., Hernandez-Gomez P., Munoz J. M. M., and Cabrera C. T., "Influence of annealing temperature and doping rate on the magnetic properties of Zr-Mn substituted Sr-hexaferrite nanoparticles," *Alloys and Compounds* 500, (2010) 113.
- [4] مرتضی زرگر شوشتری، فرشته رنجبر، سید ابراهیم موسوی قهفرخی، "ساخت و بررسی خواص ساختاری نانوذرات هگزافریت استرانسیوم نوع M آلانئیده شده با کبالت"، مجله

- [13] Harris A. IR., and Ponton CB., "Magnetic properties of hydrothermally synthesized strontium hexaferrite as a function of synthesis conditions", *Journal of Materials Science* 30, (1995) 1429.
- [14] Yongfei W., Qiaoling L., Cunrui Z., and Hongxia J., "Preparation and magnetic properties of different morphology nano- $SrFe_{12}O_{19}$ particles prepared by sol-gel method," *Alloys and Compounds* 467, (2009) 284.
- [15] Sachin T., Ramesh C. A., and Vijaya A., "Reaction kinetic, magnetic and microwave absorption studies of $SrFe_{11.2}Ni_{0.8}O_{19}$ hexaferrite nanoparticles", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 22, (2011) 1085.
- [16] Teh G. B., Wong Y. C., and Tilley R. D., "Effect of annealing temperature on the structural, photoluminescence and magnetic properties of sol-gel derived Magnetoplumbite-type (M-type) hexagonal strontium ferrite," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 323, (2011) 2318.
- [17] Pavia D. L., Lampman G. M., Krize G. S., and Vyvyan J. R., "Introduction to Spectroscopy", (Brooks/ColeCengage Learning, 4th ed (2009).
- [18] Iqbal M. J., Ashiq M. N., Hernandez-Gomez P., Munoz J. M., "Magnetic, physical and electrical properties of Zr-Ni-substituted co-precipitated strontium hexaferrite nanoparticles", *Scripta Materialia* 57, (2007) 1093.
- [19] Sachin T., Ramesh C. A., and Agarwala V., "Reaction kinetic, magnetic and microwave absorption studies of $SrFe_{11.2}Ni_{0.8}O_{19}$ hexaferrite nanoparticles", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 22, (2011) 1085.
- [20] Ashiq M. N., Iqbal M. J., Najam-ul-Haq M., Hernandez G. P., Qureshi A.M., "Synthesis, magnetic and dielectric properties of Er-Ni doped Sr-hexaferrite nanomaterials for applications in High density recording media and microwave devices", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 324, (2012) 15.
- [21] Iqbal M. J., and Farooq S., "Enhancement of electrical resistivity of $Sr_{0.5}Ba_{0.5}Fe_{12}O_{19}$ بلورشناسی و کانی شناسی ایران، سال بیست و یکم، شماره ۱، بهار ۹۲، از صفحه ۱۶۷ تا ۱۷۸.
- [5] Goldman A., *Modern Ferrite Technology*, (Springer Science+Business Media, Inc, 2nd Ed (2006).
- [6] Wohlfarth E.P., *Handbook of Magnetic Materials*, Volume 3, (North-Holland Publishing Company, (1982).
- [7] Hussain S., Shah N. A., Maqsood A., Ali A., Naeem M., and Ahmad Ail Seyed W., "Characterization of Pb-doped Sr-Ferrites at Room Temperature," *Superconductivity and Novel Magnetism* 24, (2011) 1245.
- [8] Iqbal M. J., Ashiq M. N., Gul I. H., "Physical, electrical and dielectric properties of Ca-substituted strontium hexaferrite ($SrFe_{12}O_{19}$) nanoparticles synthesized by co-precipitation method," *Magnetism and Magnetic Materials* 322, (2010) 1720.
- [9] Koohdar H. R., Seyyed Ebrahimi S. A., Yourdkhani A., Dehghan R., and Zajkaniha F., "Optimization of hydrogen dynamic heat treatment and re-calcination for preparation of strontium hexaferrite nanocrystalline powder", *Alloys and Compounds* 479, (2009) 638.
- [10] Ketov SV., Yagodkin Y.D., Lebed AL, Chernopyatova Y.V., and Khlopkov K., "Structure and magnetic properties of nanocrystalline $SrFe_{12}O_{19}$ alloy produced by high-energy ball milling and annealing", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 300, (2006) 479.
- [11] Guo Z.B., Ding W.P., Zhong W., Zhang J.R., and Du Y.W., "Preparation and magnetic properties of $SrFe_{12}O_{19}$ particles prepared by the salt-melt method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 175, (1997) 333.
- [12] Kazin P. E., Trusov L. A., Zaitsev D. D., and Tret'yakov Yu. D., "GlassCrystallization Synthesis of UltrafineHexagonal M-Type Ferrites: Particle Morphology and Magnetic Characteristics", *Russian Journal of Inorganic Chemistry* 54, (2009) 2081.

co-precipitation method," Chemical Engineering Journal 136, (2008) 383.

[23] M. Anis-ur-Rehman, G. Asghar, "*Variation in structural and dielectric properties of co-precipitated nanoparticles strontium ferrites due to value of pH*," Alloys and Compounds 509, 435-439 (2011).

nanomaterials by doping with lanthanum and nickel", Materials chemistry and physics 118, (2009) 308.

[22] Iqbal M. J., Ashiq M. N., "*Physical and electrical properties of Zr-Cu substituted strontium hexaferrite nanoparticles synthesized by*