

## تأثیر افزودن یون کروم بر آنالیز فازی، ریزساختاری و خواص مغناطیسی بدنه‌های هگزا فريت استرانسیوم تهیه شده به روش حالت جامد

امیرعباس نوربخش<sup>۱\*</sup>، محسن نوربخش<sup>۲</sup>، مهرداد شایگان<sup>۳</sup> و سلین غریبان<sup>۴</sup>  
۱- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا  
۲- کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات شرکت گسترش مواد مغناطیسی تابان  
۳- کارشناس ارشد تحقیقات شرکت سرامیک نوین سپاهان  
۴- کارشناس، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا  
\*nourbakhsh@iaush.ac.ir  
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۹/۱۸)

### چکیده

بدنه‌های سخت مغناطیسی هگزا فريت استرانسیوم همچنان اهمیت خود را در صنایع میکروویو، ساخت موتورهای الکتریکی، صنایع کشاورزی (آبیاری بارانی) و غیره دارا می‌باشند. در تحقیق حاضر، نقش افزودن یون کروم بر آنالیز فازی، ریزساختاری و خواص مغناطیسی بدنه‌های هگزا فريت استرانسیوم تهیه شده به روش حالت جامد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد انتخاب نسبت مولی مناسب اکسید آهن و اکسید استرانسیوم ( $n = 6$ )، درجه حرارت پخت اول (۱۲۱۰ درجه سانتی‌گراد) به منظور تشکیل فاز مغناطیسی هگزا فريت استرانسیوم و درجه حرارت پخت دوم (۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) جهت ساخت بدنه با خواص مغناطیسی مناسب در حضور افزودنی کروم الزامی می‌باشد. بررسی الگوی تفرق اشعه X به همراه اندازه‌گیری مشخصات ریزساختاری (SEM) نشان داد که میزان بهینه افزودنی کروم ۰/۳ مول  $(\text{SrCr}_{0.3}\text{Fe}_{11.7}\text{O}_{19})$  بوده و نیروی وادارندگی مغناطیسی ۳۹۹۵ Oe، مغناطش باقی‌مانده ۳۷۱۹ Gs و میزان مربعی شدن ۸۳/۵ درصد گردید.

### واژه‌های کلیدی:

هگزا فريت استرانسیوم، افزودن کروم، خواص مغناطیسی، حالت جامد.

### ۱- مقدمه

همچون اندازه دانه‌ها، تخلخل، فازهای ثانویه و رشد انیزوتروپ دانه‌ها می‌باشد [۳]. در حالی که مغناطش باقی‌مانده<sup>۱</sup> مناسب ایجاب می‌کند که بدنه دانسیته بالایی به همراه رشد انیزوتروپ داشته باشد، لازم است جهت فراهم نمودن نیروی وادارندگی مغناطیسی<sup>۲</sup> بالا از رشد دانه‌ها جلوگیری نمود [۴]. جهت به دست آوردن شرایط فوق از فرآیندهای مختلفی در ساخت بدنه‌های

بدنه‌های سخت مغناطیسی هگزا فريت استرانسیوم با ساختار مگنتوپلمیت و فرمول عمومی  $\text{MeFe}_{12}\text{O}_{19}$  همچنان اهمیت خود را در صنایع میکروویو، ساخت موتورهای الکتریکی، صنایع کشاورزی (آبیاری بارانی) و غیره دارا می‌باشند [۱ و ۲]. خواص بدنه‌های سخت مغناطیسی شدیداً تابع مشخصات ریزساختاری

نتایج به دست آمده از بررسی‌های منحنی‌های هستیزیس مغناطیسی را نشان می‌دهد. در نهایت خواص مغناطیسی نمونه بهینه حاوی ۰/۳ مول کروم، نیروی وادارندگی مغناطیسی ۳۹۹۵ Oe، مغناطش باقی‌مانده ۳۷۱۹ Gs و میزان مربعی شدن<sup>۳</sup> ۸۳/۵ درصد به دست آمد.

## ۲- روش تحقیق

در تحقیق حاضر جهت سنتز پودر و بدنه هگزافریت استرانسیوم که در آن یون کروم وارد ساختار<sup>۴</sup> گردیده از مواد اولیه آورده شده در جدول (۱) استفاده گردید. لازم به ذکر است که به غیر از اکسید آهن که از لجن صنعتی شرکت فولاد مبارکه تأمین گردیده، در بقیه موارد از مواد با خلوص بالا استفاده شده است. آنالیز شیمیایی اکسید آهن مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است.

جهت ساخت نمونه‌ها، در ابتدا و با توجه به خلوص مواد اولیه مقادیر متناسبی از اکسید آهن و کربنات استرانسیوم و با توجه به نسبت مولی اکسید آهن به اکسید استرانسیوم ( $n = 6$ ) توزین گردیده و در جارمیل پلیمری مدل BP-403 و نسبت گلوله به مواد ۱۱ به ۱ و سرعت ۵۵۰ دور در دقیقه و به مدت یک ساعت مخلوط گردید. سپس جهت مشخص نمودن دمای بهینه تشکیل هگزافریت استرانسیوم پودرهای حاصل در کوره الکتریکی مدل LH30/14، با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و زمان نگهداری دو ساعت در دماهای متفاوت ۱۱۴۰-۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد با فاصله دمایی ۱۰ درجه برای هر پخت، تحت عملیات پخت اول قرار گرفتند. از پودرهای حاصله در این مرحله الگوی تفرق اشعه X توسط دستگاه بروکر مدل D8ADVANCE ساخت آلمان و با استفاده از تابش Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1/54.06 \text{ \AA}$ ) به همراه فیلتر نیکل تهیه گردید. همچنین شاخص‌های نسبی خواص مغناطیسی نمونه‌ها از منحنی هستیزیس (B-H curve) گرفته شده توسط دستگاه الکترومگنت شرکت گسترش مواد مغناطیسی مدل AMT-4 مورد بررسی قرار گرفت. سپس نمونه بهینه (بدون افزودنی

مغناطیسی استفاده گردیده است که از آن جمله می‌توان به رسوب‌دهی همزمان [۵]، سنتز هیدروترمال [۶]، شیشه-سرامیک [۷]، فرآیند سل-ژل [۸] و سنتز خوداحتراقی [۹] اشاره نمود.

از زمان کشف هگزافریت استرانسیوم در شرکت فیلیپس در سال ۱۹۵۴ تا کنون فعالیت‌های تحقیقاتی متعددی جهت بهینه‌سازی خواص این ماده استراتژیک صورت پذیرفته است [۱۰]. در میان تحقیقات صورت گرفته، مطالعات زیادی در زمینه جایگزینی کاتیون‌های مختلف در زیر شبکه‌های هگزافریت استرانسیوم به چشم می‌خورد [۱۱]. در هگزافریت‌های نوع M یون‌های آهن در پنج محل مختلف کریستالی شامل محل‌های هشت‌وجهی (۲a، ۱۲k و ۴f<sub>۲</sub>) و محل‌های چهار وجهی (۴f<sub>۱</sub> و ۲b) قرار می‌گیرند. یون‌های آهن در هگزافریت استرانسیوم در محل‌های ۱۲k، ۲a و ۲b دارای اسپین‌های موازی و در جهت (c) محور کریستالی بوده و این در حالی است که اسپین‌ها در محل‌های ۴f<sub>۲</sub> و ۴f<sub>۱</sub> به صورت موازی و در خلاف جهت سه موقعیت قبلی در کریستال گزارش شده است [۱۲]. تحقیقات بسیاری بر روی جایگزینی یون‌های مختلف همچون  $\text{Al}^{+3}$ ،  $\text{Ti}^{+4}$ ،  $\text{Ga}^{+3}$ ،  $\text{Zn}^{+2}$ ،  $\text{Co}^{+2}$ ،  $\text{La}^{+3}$ ،  $\text{Pr}^{+3}$ ،  $\text{Ce}^{+3}$  و  $\text{Zr}^{+4}$ - $\text{Mn}^{+2}$  در ساختار هگزافریت استرانسیوم و نقش آن بر بهینه‌سازی خواص مغناطیسی انجام گرفته است [۱۳-۱۶].

فنگ و همکارانش [۱۷]، اثر جایگزینی یون کروم بر خواص مغناطیسی نانوذرات هگزافریت استرانسیوم را بررسی کرده‌اند ولی اطلاعات مدونی در زمینه نقش یون کروم به عنوان افزودنی بر بدنه‌های هگزافریت استرانسیوم تهیه شده به روش حالت جامد در دسترس نمی‌باشد. در کار تحقیقاتی حاضر سعی گردید تا نقش افزودن یون کروم سه ظرفیتی بر ساختار، آنالیز فازی و مشخصات مغناطیسی بدنه هگزافریت استرانسیوم تهیه شده به روش حالت جامد مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد حد بهینه میزان افزودن مول کروم ۰/۳ بوده و بالاتر از آن فاز غیر مغناطیسی هماتیت ظاهر می‌گردد. همچنین بررسی‌های ریزساختاری (SEM) مشخص نمود که با افزودن یون کروم، ساختار نسبتاً ریزدانه‌تری حاصل می‌گردد که تطابق خوبی با

جدول (۱): مواد اولیه مورد استفاده.

ردیف	نام ماده	فرمول شیمیایی	جرم مولی (g/mol)	دانسیته (g/cm <sup>3</sup> )
۱	کربنات استرانسیم	SrCO <sub>3</sub>	۱۴۷/۶۳	۳/۵
۲	اکسید آهن	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵۹/۶۹	۵/۲۴۲
۳	اکسید کروم	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵۱/۹۹	۵/۲۲
۴	پلی‌وینیل الکل	(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O) <sub>x</sub>	۴۴	۱/۴۱ - ۱/۱۹
۵	اسید بوریک	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	۶۱/۸۳	۱/۴۳
۶	اکسید کلسیم	CaO	۵۶/۰۷	۳/۳۵
۷	سیلیس	SiO <sub>2</sub>	۶۰/۰۸	۲/۲
۸	آلومینا	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۰۱/۹۶	۴/۱ - ۳/۹۴

جدول (۲): آنالیز شیمیایی اکسید آهن مورد استفاده.

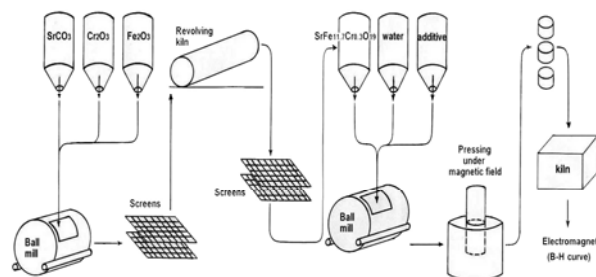
ترکیب	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	CuO	ZnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	LOI	Total
درصد وزنی	۹۳/۶۸	۱/۴۱	۱/۰۵	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۸۴	۰/۰۴۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹	۳/۱۰	۱۰۰/۱۶

نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر و پارامترهای در نظر گرفته شده جهت تولید آنها در جدول (۳) آورده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

با توجه به آنالیز اکسید آهن ارائه شده در جدول (۲) و با توجه به کمبود نسبی آهن و همچنین به دلیل خلوص نسبتاً پائین لجن صنعتی مورد مصرف، تصمیم گرفته شد که نسبت مولی اکسید آهن به اکسید استرانسیوم، شش انتخاب گردد. در تحقیقات دیگران مشاهده می‌گردد که نسبت فوق عمدتاً در محدوده (۵/۸ - ۵/۹) در نظر گرفته شده که به دلیل ایجاد جای خالی و بهبود فرآیند نفوذ و به دلیل استفاده از پودرهای خالص گزارش شده است [۱۸]. همان گونه که در شکل (۲) آورده شده است آنالیز حرارتی (DTA) بر روی پودر مخلوط شده نشان می‌دهد که دمای شروع تشکیل هگرافریت استرانسیوم در حدود ۸۰۰

کروم) با توجه به بررسی‌های فازی و خواص مغناطیسی انتخاب و با توجه به فرمول SrCr<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>O<sub>19</sub> مقادیر متناسبی از اکسید کروم محاسبه و پس از توزین با پودر بهینه و افزودنی‌های ردیف ۵ تا ۸ مندرج در جدول (۱) و با نسبت آب به مواد (سه به یک) در جارمیل فلزی ریخته شده و به مدت ۸ ساعت مخلوط گردید. سپس دوغاب حاصله توسط پرس تحت میدان مغناطیسی مدل C4520 تبدیل به قرص‌هایی با قطر ۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ سانتی‌متر گردید. نمونه‌های حاصله در دمای بین ۱۲۱۰ تا ۱۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و با فاصله دمایی ۱۰ درجه سانتی‌گراد و با شرایط مشابه با پخت اول تحت فرآیند پخت قرار گرفتند. از نمونه‌های حاصله الگوی تفرق اشعه X، منحنی هستیرزیس و همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی توسط دستگاه LEO 435 VP گرفته شد. کلیه مراحل ساخت قطعه در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): مراحل ساخت نمونه هگزا فريت استرانسیوم با افزودنی کروم.

جدول (۳): نمونه‌های مورد بررسی به همراه پارامترهای تولید.

شماره نمونه	نسبت مولی (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SrO)	نسبت مولی (Fe/ Sr)	درجه حرارت پخت اول (°C)	درجه حرارت پخت دوم (°C)	مول کروم
C <sub>1</sub>	۶	۱۲	۱۱۸۰	-	-
C <sub>2</sub>	۶	۱۲	۱۱۹۰	-	-
C <sub>3</sub>	۶	۱۲	۱۲۰۰	-	-
C <sub>4</sub>	۶	۱۲	۱۲۱۰	-	-
C <sub>5</sub>	۶	۱۲	۱۲۱۰	۱۲۱۰	-
C <sub>6</sub>	۶	۱۲	۱۲۱۰	۱۲۲۰	-
C <sub>7</sub>	۶	۱۲	۱۲۱۰	۱۲۴۰	-
C <sub>8</sub>	۶	۱۲	۱۲۱۰	۱۲۶۰	-
C <sub>9-i</sub>	۶	۱۱/۹	T*	۱۲۲۰	۰/۱
C <sub>10-i</sub>	۶	۱۱/۷	T*	۱۲۲۰	۰/۳
C <sub>11-i</sub>	۶	۱۱/۵	T*	۱۲۲۰	۰/۵

$$T^*: i=1 \rightarrow T^*=1210^\circ\text{C}, i=2 \rightarrow T^*=1220^\circ\text{C},$$

$$i=3 \rightarrow T^*=1240^\circ\text{C}, i=4 \rightarrow T^*=1260^\circ\text{C}$$

داشت.

نتایج بررسی‌های الگوی تفرق اشعه X، نمونه‌های (C<sub>4</sub> - C<sub>1</sub>) حاکی این مطلب است که هیچگونه تغییر در الگوی تفرق اشعه X با افزایش درجه حرارت پخت اول مشاهده نمی‌گردد. جهت انتخاب بهینه دمای کلسینه شدن (پخت اول)، خواص مغناطیسی پودرهای کلسینه شده (C<sub>4</sub> - C<sub>1</sub>) به دست آمده از منحنی‌های هیستروگراف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۴) آورده شده است.

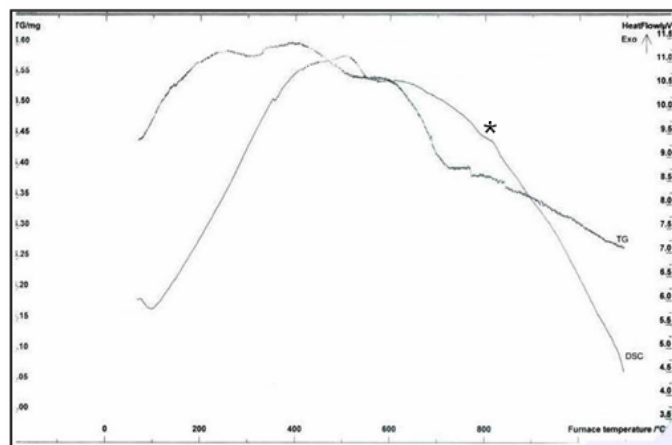
نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم ثابت بودن مقدار مغناطش

درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

### ۳-۱- انتخاب بهینه دمای پخت اول (دمای کلسینه شدن)

با توجه به تشکیل فاز هگزا فريت استرانسیوم در حین پخت اول، انتخاب دمای بهینه که به شرایط مواد اولیه همچون اندازه ذرات، سطح ویژه ذرات، نسبت مولی و نحوه اختلاط بستگی دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

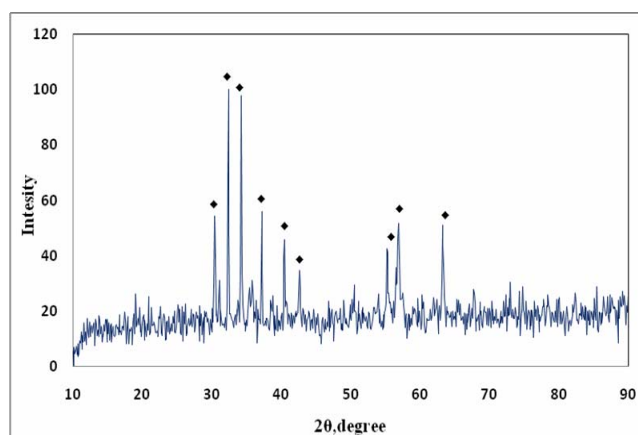
عدم تشکیل مقدار مناسب هگزا فريت استرانسیوم به دلیل تشکیل فازهای میانی بر روی سطح اکسید آهن و جلوگیری از فرآیند نفوذ و همچنین کامل نشدن انقباض پودر در این مرحله مشکلات اساسی در حین فرآیند زینترینگ را به همراه خواهد



شکل (۲): آنالیز حرارتی (DTA) پودر مخلوط شده.

جدول (۴): اطلاعات مربوط به منحنی‌های هیستریزس جهت تعیین دمای پخت اول.

شماره نمونه	دمای پخت اول (°C)	Br(Gs)	Hcj(Oe)	Hk/Hcj(%)
C <sub>1</sub>	۱۱۸۰	۳۷۹۷	۳۵۲۵	۸۸/۲
C <sub>2</sub>	۱۱۹۰	۳۶۴۳	۳۹۲۳	۹۰
C <sub>3</sub>	۱۲۰۰	۳۵۳۸	۳۹۸۷	۸۸/۷
C <sub>4</sub>	۱۲۱۰	۳۶۷۳	۴۰۴۸	۸۷/۱

شکل (۳): الگوی تفرق اشعه X نمونه C<sub>4</sub> در دمای ۱۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، ◆: هگرافریت استرانسیوم.

۱۲۱۰ درجه سانتی‌گراد برای پخت اول باشد. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که انجام عملیات پخت اول در دمای بالاتر از ۱۲۱۰ درجه سانتی‌گراد باعث تفجوشی جزئی به دلیل ناخالصی همراه آهن بوده که شرایط پخت پودر در مرحله تفجوشی را طولانی‌تر می‌نماید. در شکل (۳) الگوی تفرق اشعه X نمونه C<sub>4</sub> در دمای ۱۲۱۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده

باقی‌مانده در حدود ۳۶۰۰ گوس، نیروی وادارندگی مغناطیسی از حدود ۳۵۰۰ به حدود ۴۰۰۰ اورستد افزایش یافته است، این در حالی است که میزان مربعی شدن در حدود ۸۷ درصد گزارش شده است.

نتایج فوق که صرفاً و جهت مقایسه پودرهای کلسینه شده مورد استفاده قرار گرفته، می‌تواند دلیل مناسبی جهت انتخاب دمای

پخت دوم (تف جوشی) در جدول (۵) آورده شده است. همانگونه که از اطلاعات این جدول استنباط می‌گردد، با افزایش دمای پخت در مرحله تف جوشی، مغناطش باقی‌مانده (Br) افزایش نسبی یافته که دلیل آن تف جوشی بهتر بدنه و حذف تخلخل می‌باشد، همچنین نیروی وادارندگی مغناطیسی (Hcj) کاهش یافته که علت آن رشد دانه‌ها در حین تف جوشی در درجه حرارت‌های بالاتر می‌باشد. با توجه به اطلاعات مندرج در جدول (۴) و با توجه به نیاز به بالا بودن همزمان مغناطش باقی‌مانده، نیروی وادارندگی مغناطیسی و درصد مربعی، درجه حرارت پخت دوم ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و به منظور بررسی نقش افزودن یون کروم و بهبود خواص مغناطیسی در نظر گرفته شد.

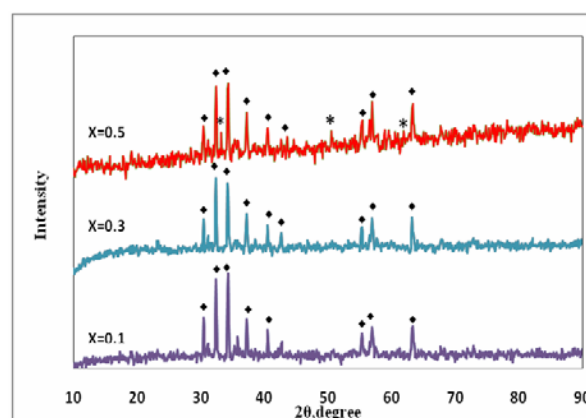
### ۳-۳- تعیین میزان بهینه افزودنی کروم

در این مرحله و جهت وارد کردن یون کروم، در ساختار هگزافریت استرانسیوم و با فرمول  $SrCr_xFe_{12-x}O_{19}$  و به میزان صفر تا ۰/۵ مول کروم، از اکسید کروم با خلوص آزمایشگاهی استفاده گردید. نتایج بررسی آنالیز تفرق اشعه X، از نمونه‌های پخته شده در ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد در شکل (۴) نمایش داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزودن کروم تا ۰/۳ مول هیچگونه تغییری در آنالیز فازی به وجود نیامد. این در حالی است که با افزودن ۰/۵ مول کروم به هگزافریت استرانسیوم فاز هماتیت که غیر مغناطیسی می‌باشد ظهور می‌نماید. نتایج بررسی‌های مس باثر<sup>۷</sup> توسط دیگر محققین ثابت نموده که یون  $Cr^{+3}$  در تمام موقعیت‌های  $Fe^{3+}$  به جز موقعیت تتراهدرال  $4f_1$ ، امکان حضور دارد [۲۰]. با توجه به تقریباً برابر بودن شعاع یونی  $Cr^{3+}$  (۶۴ پیکومتر) در برابر شعاع یونی  $Fe^{3+}$  (۶۳ پیکومتر) حضور فاز هماتیت نمی‌تواند به اندازه یونی ارتباط یابد و این موضوع به نظر می‌رسد در ارتباط با انرژی تبادل به دلیل جایگزینی یون  $Cr^{3+}$  به جای  $Fe^{3+}$  در شبکه هگزافریت استرانسیوم باشد [۱۷]. بررسی مشخصات مغناطیسی نمونه‌های (C<sub>9</sub>-C<sub>11</sub>) در شکل‌های (۵) و (۶) آورده شده است. نتایج مربوط به مغناطش باقیمانده در شکل

جدول (۵): اطلاعات مربوط به منحنی‌های هیستریزس جهت تعیین دمای پخت نهایی.

شماره نمونه	دمای پخت نهایی (°C)	Br(Gs)	Hcj(Oe)	Hk/Hcj(%)
C <sub>5</sub>	۱۲۱۰	۳۹۷۵	۳۵۱۸	۹۲/۵
C <sub>6</sub>	۱۲۲۰	۴۰۱۷	۳۴۱۴	۹۲/۹
C <sub>7</sub>	۱۲۴۰	۴۰۳۰	۳۳۹۶	۸۹/۶
C <sub>8</sub>	۱۲۶۰	۴۱۳۰	۲۸۸۶	۸۳/۹



شکل (۴): الگوی تفرق اشعه X نمونه‌ها  $(SrCr_xFe_{12-x}O_{19})$  در دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، ◆: هگزافریت استرانسیوم و \*: هماتیت.

است.

### ۳-۲- انتخاب دمای بهینه پخت دوم (دمای تف جوشی)

جهت بهینه‌سازی دمای پخت دوم، نمونه‌های C<sub>5</sub>-C<sub>8</sub> مندرج در جدول (۳) مورد استفاده قرار گرفت. هدف این مرحله انتخاب دمای مناسب زیترینگ جهت حصول خواص مغناطیسی مناسب که شدیداً تحت تأثیر متغیرهای ساختاری می‌باشد، بوده است. جهت بهبود فرآیند زیترینگ در کار تحقیقاتی حاضر از مخلوط  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$ ،  $B_2O_3$  و  $CaO$  و به میزان ۱/۵ درصد وزنی استفاده گردید. بر اساس گزارش آرندت [۱۹]، استفاده از مواد افزودنی در مرحله تف جوشی حتی برای پودرهای تجاری نیز که اغلب در حدود یک درصد ناخالصی دارند، با بهبود قابل ملاحظه‌ای به ویژه در مورد نیروی وادارندگی مغناطیسی (Hcj) همراه بوده است. نتایج بررسی‌های انجام گرفته در مورد دمای

دیگران به صورت زیر تبدیل می‌شود [۲۱]:

$$Ms = [6(XM_{12k}^{Fe^{3+}} + (1-X)M_{12k}^{Cr^{3+}})] - 2(X\{M_{4f_2}^{Fe^{3+}} + (1-X)M_{4f_2}^{Cr^{3+}}\}) - 2M_{4f_1}^{Fe^{3+}} + [(XM_{2b}^{Fe^{3+}} + (1-X)M_{2b}^{Cr^{3+}})] + [(XM_{2a}^{Fe^{3+}} + (1-X)M_{2a}^{Cr^{3+}})] \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $X$ ، کسر مولی اشغال شده توسط یون  $Fe^{3+}$  در مواضع پنج‌گانه می‌باشد. با حضور یون کروم با مغناطش کمتر، در کل مغناطش واحد شبکه و به دنبال آن مغناطش باقیمانده قطعه کاهش می‌یابد.

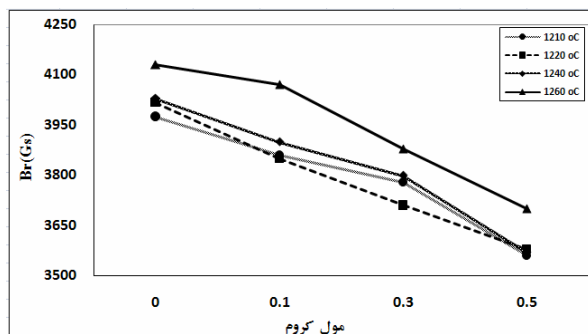
بررسی مقادیر نیروی وادارندگی مغناطیسی ( $H_{cj}$ ) در شکل (۶) نشان می‌دهد که با افزایش میزان مول کروم در ساختار از صفر تا ۰/۵ مول (۰/۵ - صفر =  $X$ ) میزان نیروی وادارندگی مغناطیسی افزایش می‌یابد. به طور کلی هر چه انرژی کل یک قطعه مغناطیسی کمتر باشد، میل سیستم جهت تغییر جهت ممان مغناطیسی کمتر می‌باشد. رابطه زیر توسط محققین در ارتباط با ثابت ناهمسانگردی و مغناطیس اشباع به اثبات رسیده است [۲۲].

$$H_{cj} = \alpha \left( \frac{\gamma_k}{Ms} - NMs \right) \quad (3)$$

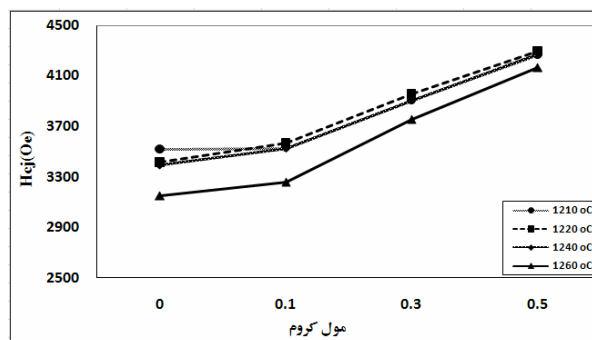
که در رابطه فوق  $Ms$  مغناطش اشباع،  $K$  ثابت ناهمسانگردی و  $N$  فاکتور وامغناطش می‌باشد. با توجه به رابطه اخیر و کاهش  $Ms$  ناشی از افزودن یون کروم در شبکه هگزافریت استرانسیوم و در نتیجه مغناطش باقی‌مانده ( $Br$ )، می‌توان انتظار افزایش ( $H_{cj}$ ) را داشت.

نتایج بررسی‌های ریزساختاری توسط SEM که در شکل (۷) نمایش داده شده است، مشخص نمود که با افزایش یون کروم اندازه دانه‌های هگزافریت به صورت نسبی کاهش یافته و می‌تواند دلیل افزایش نیروی وادارندگی مغناطیسی باشد، همچنین کاهش اندازه دانه‌ها می‌تواند به کاهش نفوذ بین دانه‌ای در حضور یون کروم ارتباط داشته باشد.

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته و نیاز به بالا بودن همزمان نیروی وادارندگی مغناطیسی، مغناطش باقی‌مانده و درصد مربعی شدن جهت یک قطعه مغناطیسی، نمونه شامل ۰/۳ مول کروم با شاخصه‌های مغناطیسی نیروی وادارندگی مغناطیسی ۳۹۹۵ Oe



شکل (۵): تغییرات مغناطش باقی‌مانده در نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف کروم در دماهای گوناگون.



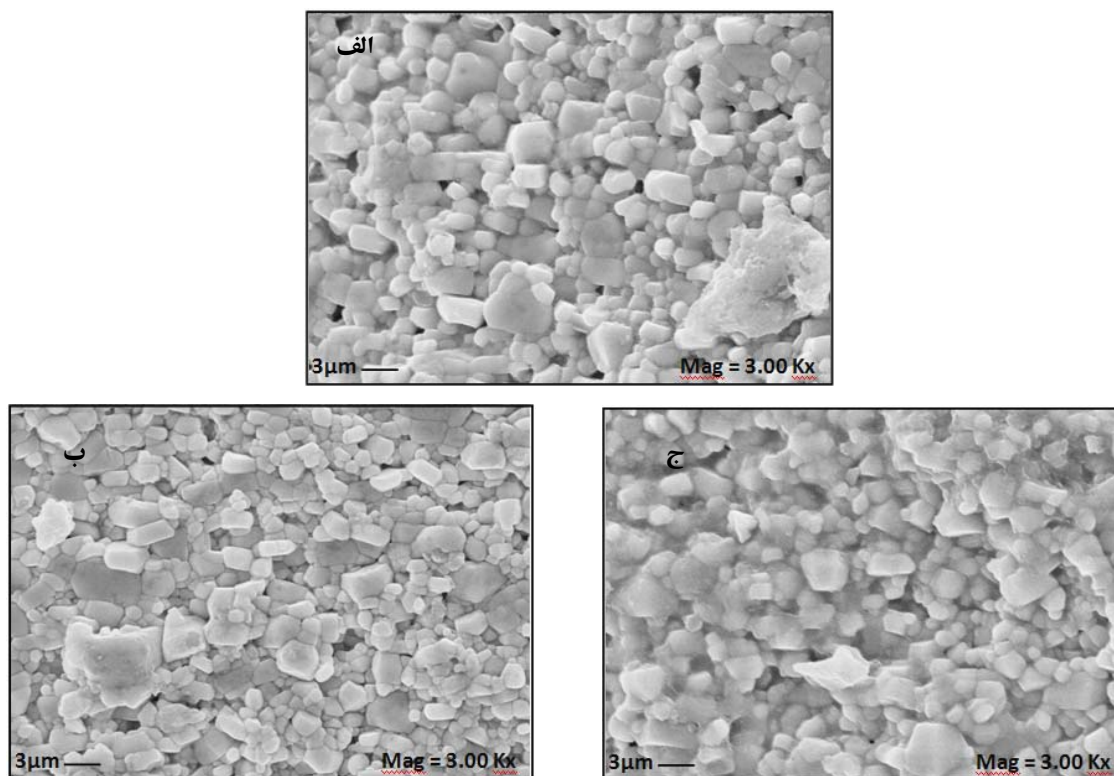
شکل (۶): تغییرات نیروی وادارندگی در نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف کروم در دماهای گوناگون.

(۵) نشان می‌دهد که با افزایش میزان مول کروم وارد ساختار شده مغناطش باقیمانده در تمام درجه حرارت‌های پخت کاهش یافته است. با توجه به آرایش الکترونی، میزان مغناطش یون کروم معادل ۳ مگنتون بور بوده و این در حالی است که میزان مغناطش یون آهن ۵ مگنتون بور برآورد می‌گردد.

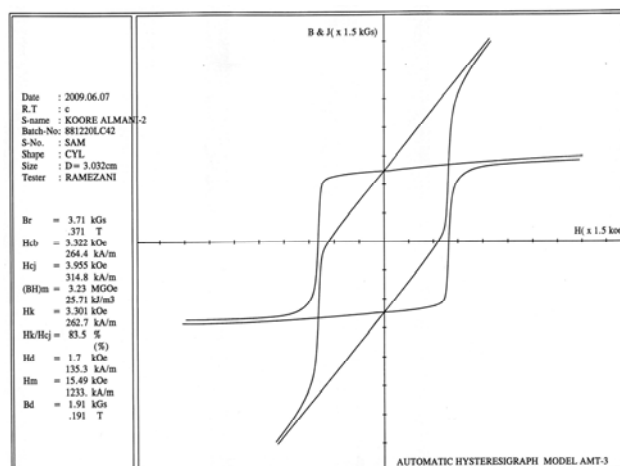
بررسی‌های انجام گرفته در مورد واحد شبکه هگزافریت استرانسیوم نشان داده که جهت‌گیری اسپین‌ها در موقعیت‌های پنج‌گانه به صورتی است که در کل، مقدار مغناطش ۲۰ مگنتون بور را جهت واحد شبکه هگزافریت استرانسیوم به همراه دارد، این موضوع با رابطه زیر نمایش داده می‌شود [۱۹].

$$Ms = 6M_{12k}^{Fe^{2+}} - 2M_{4f_1}^{Fe^{2+}} - 2M_{4f_1}^{Fe^{3+}} + M_{2b}^{Fe^{2+}} + M_{2a}^{Fe^{2+}} \quad (1)$$

این رابطه در مورد هگزافریت استرانسیوم جایگزین شده با عناصر دیگر و با توجه به بررسی‌های مس بائر انجام گرفته توسط



شکل (۷): تصاویر ریزساختار نمونه‌های پخته شده در  $1220^{\circ}\text{C}$ ،  
 (الف): ۱/۱ مول کروم، (ب): ۳/۳ مول کروم و (ج): ۵/۵ مول کروم.



شکل (۸): منحنی هیستریزس نمونه بهینه حاوی ۳/۳ مول کروم  
 $(\text{SrCr}_{0.3}\text{Fe}_{11.7}\text{O}_{19})$ .

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج بررسی‌های فوق نشان داد که انتخاب نسبت مولی مناسب  
 (۶ =  $\eta$ ) به همراه درجه حرارت پخت اول (کلکسیناسیون) و ۱۲۱۰

مغناطش باقی مانده  $3719 \text{ Gs}$  و میزان مربعی شدن  $83/5$  درصد به  
 عنوان نمونه بهینه انتخاب گردید که منحنی هیستریزس آن در  
 شکل (۸) آورده شده است.



- Strontium Hexaferrite Particles Prepared by Sol-Gel Method", *Phys. Stat. Sol.*, 193, No. 2, pp. 314-319, 2002.
- [4] S. Besebicar and M. Drfenik, "High Coercivity Sr Hexaferrites", *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, Vol. 101, pp. 307-309, 1991.
- [5] A. Ataei and S. Heshmati-Manesh, "Synthesis of Ultra-fine Particles of Strontium Hexaferrite by a Modified Co-Precipitation Method", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, pp. 1951-1955, 2001.
- [6] J. F. Wang, C. B. Paton, R. Ciossinger, I. R. Harris, "A Study of La-Substituted Strontium Hexaferrite by Hydrothermal Synthesis", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 369, pp. 170-177, 2004.
- [7] M. Mirkazemi, V. K. Marghushiam, A. Beitollahi, "Crystallization Behavior, Microstructure and Magnetic Properties of BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Glass Ceramic", *Ceramic International*, Vol. 32, pp. 43-51, 2006.
- [8] R. B. Jotania, R. B. Khomane, C. C. Chauhan, S. K. Menon, B. D. Kulkari, "Synthesis and Magnetic Properties of Barium-Calcium Hexaferrite Particles Prepared by Sol-Gel and Microemulsion Techniques", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 310, pp. 2477-2479, 2002.
- [9] L. Junliang, Z. Yanwei, C. Cuijing, Z. Wei, Y. Xiaowei, "One Step Synthesis of Barium Hexaferrite Nano-Powder Via Microwave Assisted Sol-Gel Auto Combustion", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 30, pp. 993-997, 2010.
- [10] R. J. Parker, "Advances in Permanent Magnet", John Wiley and Sons Inc, 1990.
- [11] K. S. Martirosyan, N. S. Martirosyan and A. E. Chalykh, "La<sup>+3</sup> and Ce<sup>+3</sup> Dopping of Hard-Magnetic Ferrite", *Inorganic Materials*, Vol. 40, pp. 611-616, 2004.
- [12] A. Goldman, "Modern Ferrite Technology", Newyork Nostrand Reinhold, 1990.
- [13] L. Q. You, J. Zheng, "The Magnetic Properties of Strontium Hexaferrite with La-Cu Substitution Prepared by SHS Method", *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, Vol. 318, pp. 74-78, 2007.
- [14] J. F. Wang, C. B. Ponton, J. R. Harris, "A Study of Pr-Substituted Hexaferrite by Hydrothermal Synthesis", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 403, pp. 104-109, 2005.
- [15] K. S. Martirosyan, N. M. Martirosyan, A. E. Chalykh, "La<sup>+3</sup> and Ce<sup>+3</sup> Doping of Hard Magnetic Ferrite", *Inorganic Material*, Vol. 40, No. 5, pp. 527-532, 2004.
- [16] M. J. Iqbal, M. N. Ashiiq, "Comparitive Studies of SrZr<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>O<sub>19</sub> Nanoparticles Synthesized by Co-Precipitation and Sol-Gel Combustion Method", *Scripta Materials*, Vol. 56, pp. 145-148, 2007.
- [17] Q. Fang, H. Cheng, K. Huang, J. Wang, R. I. Li, "Doping Effect on Crystal Structure and Magnetic Properties of Chromium-Substituted Strontium Hexaferrite Nanoparticles", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 294, Issue 3, pp. 281-286, 2005.
- درجه سانتی‌گراد و درجه حرارت پخت دوم (تف‌جوشی) ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد جهت ساخت بدنه با خواص مغناطیسی مناسب در حضور افزودنی کروم الزامی می‌باشد. همچنین بررسی‌های فازی مشخص نمود که حد بهینه افزودن یون کروم ۰/۳ مول بوده و در بالاتر از آن فاز غیر مغناطیسی هماتیت ظهور می‌یابد. میزان کاهش مغناطش باقی‌مانده در اثر افزایش میزان یون کروم در شبکه به مغناطش کمتر یون Cr<sup>+3</sup> نسبت داده می‌شود. در همین رابطه افزایش نیروی وادارندگی مغناطیسی نیز به دلیل کاهش مقدار Ms در اثر جانشینی یون Cr<sup>+3</sup> به جای Fe<sup>+3</sup> می‌باشد.
- بررسی‌های ریزساختاری SEM نشان داد که یون کروم احتمالاً به دلیل کاهش نفوذ بین دانه‌ای و به دلیل اندازه بزرگتر آن باعث جلوگیری از رشد دانه در مرحله تف‌جوشی شده و همین عامل باعث تشکیل ریزساختار ریزتر شده که افزایش نیروی وادارندگی مغناطیسی را به همراه دارد. این در حالی است که افزودن مقادیر بیشتر کروم باعث کاهش خواص مغناطیسی قطعه به دلیل خروج Fe<sup>+3</sup> به صورت هماتیت از شبکه هگزافریت استرانسیوم می‌باشد.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از زحمات پرسنل و مدیریت محترم شرکت گسترش مواد مغناطیسی تابان که نهایت همکاری را در راه انجام این تحقیق داشته‌اند، سپاسگزاری نموده و همچنین از ریاست و معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا که با حمایت‌های مالی زمینه انجام این فعالیت را به وجود آوردند، کمال تشکر و قدردانی را می‌نماید.

## ۶- مراجع

- [1] J. D. Liringgston, "The History of Permanent Magnetic Materials", *Jox*, Vol. 42, No. 2, pp. 30-34, 1990.
- [2] C. Gabrielli, R. Jaoullari, G. Maurine and M. Keddad, "Magnetic Water Treatment for Scale Prevention", *Water Reasearch*, Vol. 35, Issue 13, pp. 3249-3259, 2001.
- [3] X. Liu, W. Zhong, S. Yang, Z. Yu, B. Gu and Y. Ou, "Structure and Magnetic Preparation of La<sup>+3</sup>-Substituted

[22] Ch. Kittel, "Introduction to Solid State Physics", Willey Eastern Limited, Fifth Edition, 1983.

[18] H. Kajima, "Fundamental Properties of Hexaferrite with Magneto-Plumbite Structure", Edited by E. P. Wohlfarth, North-Holland, Amsterdam, pp. 305-391, 1982.

### ۷- پی نوشت

- 1- Remanence Magnetization
- 2- Magnetic Intrinsic Coercivity
- 3- Rectangularity Ratio
- 4- Doped
- 5- Calcination Temperature
- 6- Sintering
- 7- Mossbauer

[19] R. H. Arendtm, "Liquid-Phase Sintering of Magnetically Isotropic and Anisotropic Compacts of  $BaFe_{12}O_{19}$  and  $SrFe_{12}O_{19}$ ", Journal of Applied Physics, Vol. 44, pp. 3300-3305, 1973.

[20] P. M. Rao, A. Gerard and F. Grandjean, "Mossbauer Study of the Hexagonal Ferrite Series  $SrFe_{12-x}Cr_xO_{19}$ ", Journal of Magnetism and Magnetic Material, Vol. 15-18, pp. 645-646, 1980.

[21] P. M. Rao, A. Geraro, "A Mossbauer Study of the Effect of the Substitution of Fe by Cr in  $SrFe_{12}O_{19}$ ", Phys. Stat. Sol., Vol. 54, pp. 529-536, 1979.