

## مشخصه‌های ریزساختاری، مغناطیسی و جذب امواج مایکروویو هگزافریت باریم جانشین شده با یون‌های Co-Cr-Sn به روش مکانوشیمیایی

سید سلمان سید افقهی<sup>۱</sup>، مجتبی جعفریان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

jafarian\_67@yahoo.com

### چکیده:

در این پژوهش سنتز و بررسی خواص هگزافریت باریم آلیس شده با یون‌های کبالت، کروم و قلع با فرمول  $BaCo_xCr_xSn_xFe_{12-3x}O_{19}$  به روش مکانوشیمیایی صورت گرفت. برای این منظور دو نمونه با مقادیر  $x$  برابر ۰/۳ و ۰/۵ تهیه شد. بررسی‌های فازی و ساختاری به ترتیب با آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) تایید کننده تشکیل هگزافریت باریم به همراه مقدار جزئی فاز ثانویه هماتیت پس از ۵ ساعت عملیات حرارتی در دمای  $1000^\circ C$  بود. همچنین طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورفولوژی ذرات به صورت کاملاً هگزاگونال با میانگین اندازه ذرات  $650\text{nm}$  -  $600$  بود. بر اساس پارامتر مغناطیسی اندازه‌گیری شده توسط مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) هر دو نمونه بر مبنای مقدار نیروی وادارندگی، از نظر مغناطیسی نیمه سخت بوده و بیشترین میزان مغناطش اشباع در نمونه با ترکیب  $BaCo_{0.3}Cr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{11.1}O_{19}$  حاصل شد. مقادیر مغناطش اشباع (Ms) و نیروی وادارندگی (Hc) برای این ترکیب به ترتیب برابر  $42/21\text{ emu/g}$  و  $656\text{ Oe}$  اندازه‌گیری شد. پارامترهای الکترومغناطیسی هگزافریت باریم دوپ شده با استفاده از دستگاه تجزیه و تحلیل شبکه بردار (VNA) در محدوده فرکانسی  $1-12/5\text{GHz}$  مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج بیشترین میزان جذب مربوط به کامپوزیت  $BaCo_{0.5}Cr_{0.5}Sn_{0.5}Fe_{10.5}O_{19}$  / رزین اپوکسی با ضخامت  $5\text{ mm}$  در فرکانس  $12/2\text{ GHz}$  به میزان  $15\text{ dB}$  - بود.

### اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۲ فروردین ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۰ شهریور ۱۳۹۴

### کلید واژه:

هگزافریت باریم، مکانوشیمیایی، ریزساختار، خواص مغناطیسی، جذب امواج مایکروویو

### ۱- مقدمه

پیدا کرده است و همین مساله منجر به افزایش تقاضا برای مواد با خواص مغناطیسی نرم به‌منظور استفاده در دستگاه‌های القایی برای کاربرد در فرکانس‌های بسیار بالا (Very High Frequency= VHF) شده است [۷-۲]. فریت هگزاگونال نوع Z یکی از ترکیبات کاربردی در

فریت‌ها یکی از انواع مواد مغناطیسی کاربردی در صنعت الکترونیک هستند [۱]. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های صنعت الکترونیک به‌سمت استفاده از فرکانس‌های بالا سوق

آلایش پودر هگزافریت باریم با استفاده از لاتانیوم و کبالت به روش حالت جامد پرداختند. ترکیب مورد نظر آنها  $Ba(LaCo)_xFe_{12-2x}O_{19}$  بوده که مقادیر  $x$  بین صفر تا ۰/۵ است. طبق گزارشات آنها آلایش ترکیب به میزان  $x$  برابر ۰/۱ منجر به افزایش مغناطش اشباع ( $M_s$ ) و نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) شده و در صورت افزایش مقدار  $x$  هر دو پارامتر کاهش می‌یابند. تاکنون مطالعات مدونی در زمینه بررسی خواص ریزساختاری، مغناطیسی و جذب امواج میکروویو توسط هگزافریت باریم با جایگزینی یون‌های آهن توسط کاتیون‌های کبالت، کروم و قلع صورت نگرفته است. برای این منظور در این پژوهش، این ترکیب بوسیله کاتیون‌های کبالت، کروم و قلع به روش مکانوشیمیایی آلایش شد و خواص ریزساختاری، مغناطیسی و همچنین رفتار جذب امواج میکروویو این ترکیب در محدوده فرکانسی باند  $X$  پس از آلایش مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

هگزافریت باریم نوع  $M$  با فرمول شیمیایی  $BaCo_xCr_xSn_xFe_{12-3x}O_{19}$  به روش مکانوشیمیایی آلایش شد. برای دستیابی به این ترکیب، از مخلوطی حاوی مقادیر استوکیومتری از کربنات باریم ( $BaCO_3$ )، اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ )، اکسید کبالت ( $CoO$ )، اکسید کروم ( $Cr_2O_3$ ) و دی‌اکسید قلع ( $SnO_2$ ) استفاده شد. میزان آلایش ( $x$ ) برای شرایط مختلف مقادیر ۰/۳ و ۰/۵ در نظر گرفته شد. مخلوط مورد نظر با توجه به نسبت وزنی گلوله به پودر برابر با ۲۰:۱ در درون قندانی آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای مدل Retsch PM100 که حاوی ۲ محفظه فولادی و ۱۱ گلوله از جنس

فرکانس‌های محدوده گیگاهرتز است که به دلیل ناپایداری ترکیب فازی و دماهای بالاسنتز (بالتر از  $1300^\circ C$ ) کاربرد این ترکیب را به شکل چشمگیری کاهش داده است [۱۵-۱۸]. در این میان هگزافریت باریم نوع  $M$  یکی از بهترین و شناخته شده‌ترین ترکیبات خانواده هگزافریت‌ها است [۱۶، ۱۷]. هگزافریت باریم خالص به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین مواد مغناطیسی سخت با ناهمسانگردی مغناطوبلوری بالا در راستای محور  $c$  است که با جایگزینی کاتیون‌های مختلف با یون‌های  $Fe^{+3}$  در ساختار بلوری آن، همچون،  $Co^{2+}$  [۱۸]،  $Zn^{2+}-Ti^{4+}$  [۱۹]،  $Co^{2+}-La^{3+}$  [۲۰] و  $Ce^{4+}-Ti^{4+}$  [۲۱] می‌تواند به یک ماده مغناطیسی نرم بوسیله کاهش ناهمسانگردی مغناطوبلوری در راستای محور  $c$  و تغییر جهت آسان مغناطش از محور  $c$  به صفحه  $ab$  (بوسیله کاهش برهمکنش‌های فوق‌تبادلی یون‌های آهن و اکسیژن) تبدیل شود. هگزافریت باریم خالص و آلایش شده با کاتیون‌های مختلف، به‌صورت ساختار بلوری متقارن هگزاگونال با گروه فضایی  $P6_m/mmc$  است [۲۶-۲۲]. خواص مغناطیسی این ترکیب شدیداً تابع اندازه دانه‌ها، تخلخل، فازهای ثانویه و رشد ناهمسانگرد دانه‌ها است. دانگ و همکاران [۲۷] به آلایش پودر هگزافریت باریم با استفاده از تیتانیوم و کبالت به روش آلیاژسازی مکانیکی و بررسی خواص مغناطیسی آن پرداختند. آن‌ها گزارش نمودند که آلایش این ترکیب به میزان  $x$  برابر ۰/۳ منجر به افزایش مغناطش اشباع ( $M_s$ ) و نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) و در صورت افزایش مقدار  $x$  هر دو پارامتر کاهش می‌یابند. ترکیب مورد نظر آنها  $BaCo_xTi_xFe_{12-2x}O_{19}$  بوده که مقادیر  $x$  بین صفر تا ۰/۵ است. لی و همکاران [۲۸] نیز به



Agilent (VNA) استفاده شد. جدول ۱ نشان دهنده کدهای مربوط به نمونه‌های آلیش شده است.

جدول ۱- کدهای مربوط به نمونه‌های آلیش شده.

| کد نمونه | ترکیب                                       |
|----------|---|
| CCS03    | $BaCo_{0.3}Cr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{11.1}O_{19}$ |
| CCS05    | $BaCo_{0.5}Cr_{0.5}Sn_{0.5}Fe_{10.5}O_{19}$ |

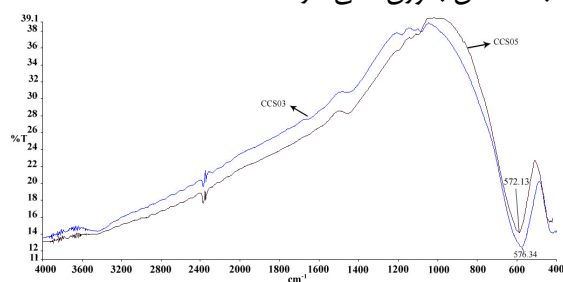
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی فازی (XRD)

شکل ۱، نشان دهنده نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس از نمونه‌های CCS03 و CCS05 است. همانطور که مشاهده می‌شود پیک‌های موجود در نمونه‌های آلیش شده دقیقاً در زوایای قرارگیری پیک‌های مربوط به هگزافریت باریم هستند و تنها تفاوت آنها در شدت پیک‌هاست که علت آن پر شدن برخی جاهای خالی ناشی از فقدان یون  $Fe^{3+}$  موجود در شبکه هگزاگونال فریت باریم توسط یون‌های مورد نظر است. تمامی پیک‌های موجود در زوایای  $37/30$ ،  $29/32$ ،  $19/34$ ،  $12/37$ ،  $41/40$ ،  $40/42$ ،  $08/55$ ،  $59/56$ ،  $06/63$  و  $36/67$  مربوط به ترکیب هگزافریت باریم هستند که کاملاً با الگوی مرجع به شماره کارت استاندارد ۰۲۷۶-۰۰۷ مطابقت دارند. همچنین حضور پیک‌های فاز هماتیت مربوط به آلودگی آهن ناشی از سایش گلوله‌ها و محفظه آسیاکاری با توجه به شرایط اعمال نیروی شدید به صورت موضعی که حین آسیاکاری وجود دارد نشان دهنده عدم امکان حذف کامل این آلودگی توسط شستشو با اسید است. با آلیش ترکیب هگزافریت باریم مشاهده می‌شود که پیک‌ها به سمت زوایای کمتر جابجا شده‌اند که علت آن

فولاد زنگ‌نزن با میانگین قطر  $15/75$  mm بود قرار گرفت و با سرعت  $300$  rpm به مدت  $20$  ساعت تحت اتمسفر هوا آسیاکاری شد. در تمام شرایط به میزان  $1$  cc اتانول به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند (Process Control Agent: PCA) به مخلوط پودری اضافه شد. به منظور جلوگیری از حرارت اضافی پس از هر  $1$  ساعت آسیاکاری، دستگاه به مدت  $15$  دقیقه خاموش شد. پس از انجام عملیات آسیاکاری، به منظور حذف آلودگی‌های  $Fe/Cr$  تا حد ممکن،  $30$  mL محلول حاوی  $2$  mL HCl،  $5$  mL  $H_2O_2$  و  $23$  mL آب مقطر تهیه شده و مخلوط پودری به مدت  $h$   $6$  در دمای اتاق در این محلول هم زده شد، سپس از محلول فوق خارج و شسته شد. در نهایت در دمای  $60$  °C به مدت  $2$  h به طور کامل خشک گردید. سپس نمونه‌ها به مدت  $5$  ساعت در دمای  $1000$  °C و با نرخ  $5$  °C/min عملیات حرارتی شدند. بررسی فازی و ساختاری پودرهای سنتز شده به ترتیب با استفاده از دستگاه XRD مدل XMD 300 در محدوده  $70-10$  °C با استفاده از تابش  $CuK_{\alpha}$  با طول موج  $1/54$  آنگستروم و دستگاه FT-IR مدل Bruker صورت گرفت. جهت بررسی مورفولوژی پودر از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA//TESCAN-LMU استفاده شد. در نهایت به منظور بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های آلیش شده از دستگاه مغناطیس سنج نمونه مرتعش (VSM) استفاده شد. به منظور بررسی میزان جذب امواج مایکروویو در باند  $X$  ( $8-12/5$ GHz)، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها در ابعاد  $25 \times 10 \times 5$  mm حاوی  $50\%$  پودر در زمینه رزین اپوکسی از دستگاه 8510C Vector Network Analyzer

می‌شود که متناظر با ارتعاش‌های کششی بواسطه واکنش بین اکسیژن و کاتیون‌های موجود در مکان‌های اکتاهدرال و تتراهدرال است. تفاوت بین این دو باند جذبی بواسطه تغییر طول باند  $Fe^{3+}-O^{2-}$  در مکان‌های تتراهدرال و اکتاهدرال است. همانطور که ملاحظه می‌شود مد ارتعاشی حاصل از خوشه‌های تتراهدرال نسبت به خوشه‌های اکتاهدرال بالاتر هستند. که این مساله بدلیل طول کوتاه‌تر باندهای موجود در خوشه‌های تتراهدرال است. اصولاً ارتعاشات اکسیدهای فلزی در کمتر از  $1000\text{ cm}^{-1}$  رخ می‌دهد. جذب پهنی در حوالی  $580\text{ cm}^{-1}$  بواسطه باند کششی Fe-O است. پیک موجود در  $412\text{ cm}^{-1}$  متعلق به باند خمشی  $(Fe-O_4)$  Fe-O و کششی  $(Fe-O_6)$  Fe-O است. این نتایج بیانگر قرارگیری یون‌های مهمان در درون جایگاه‌های شبکه بلوری هستند. به علاوه با افزایش میزان آلیش، فرکانس مربوط به پیک‌های جذبی به عدد موج‌های کمتری جابجا شده است که علت آن وزن اتمی بیشتر یون‌های جانشین شده ( $Sn^{+4}$ )  $(118/71)$ ،  $(58/93)$   $Co^{+2}$  و  $(51/99)$   $Cr^{+2}$  نسبت به وزن اتمی یون‌های  $Fe^{+3}$  ( $55/845$ ) است چرا که عدد موج نسبت عکس با وزن اتمی دارد.

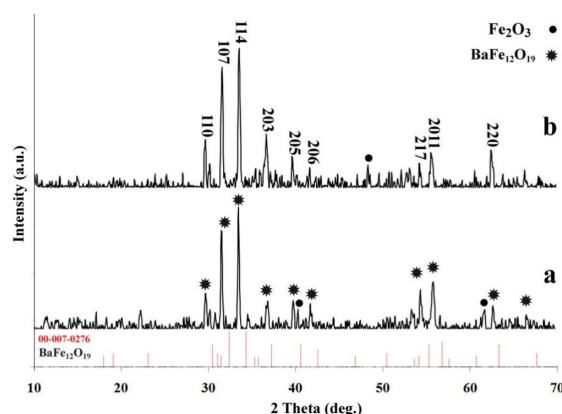


شکل ۲- نتایج آنالیز FT-IR از نمونه‌های CCS03 و CCS05.

### ۳-۳- بررسی ریزساختاری

شکل ۳ نشان دهنده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

افزایش ثابت شبکه به دلیل بیشتر بودن اندازه شعاع یونی یون‌های مهمان ( $Co^{+2}$ ،  $Cr^{+3}$  و  $Sn^{+4}$ ) به ترتیب  $0.172\text{ \AA}$ ،  $0.164\text{ \AA}$  و  $0.169\text{ \AA}$  نسبت به شعاع یونی یون‌های میزبان ( $Fe^{+3}=0.163\text{ \AA}$ ) است و این به معنای قرارگیری کاتیون‌های مورد نظر در جایگاه‌های بلوری هگزاقریت باریم است.



شکل ۱- الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های، CCS05 (b) و CCS03 (a).

### ۳-۲- بررسی نتایج FT-IR

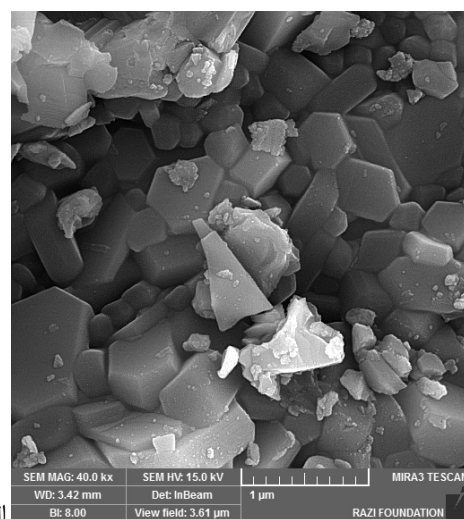
به منظور بررسی پیوندهای موجود در نمونه‌های آلیش شده با کاتیون‌های کبالت، کروم و قلع از آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه استفاده شد. شکل ۲ نشان دهنده نتایج آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز از نمونه‌های CCS03 و CCS05 است. طیف FT-IR نشان دهنده تشکیل باندهای کششی M-O در فریت‌ها است. طبق نتایج در محدوده  $1000-400\text{ cm}^{-1}$  دو باند جذبی غالب در حوالی  $580\text{ cm}^{-1}$  و  $417\text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌شود. باند فرکانس بالا در اطراف  $580\text{ cm}^{-1}$  مربوط به مکان‌های تتراهدرال و باند فرکانس پایین در حوالی  $412\text{ cm}^{-1}$  مربوط به مکان‌های اکتاهدرال است. در هر دو نمونه این ۲ باند جذبی مشاهده



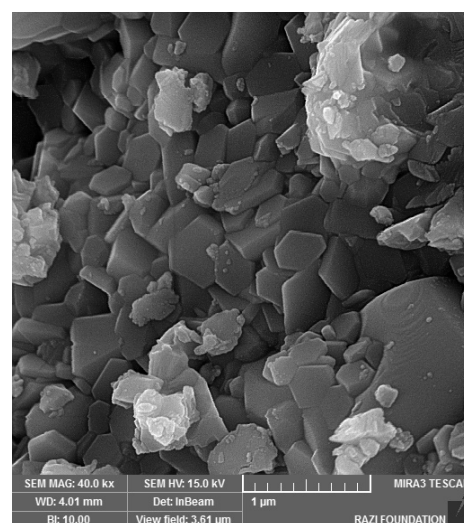
### ۴-۲- بررسی خواص مغناطیسی

به منظور بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌های آلیش شده از مغناطیس سنج نمونه مرتعش (VSM) استفاده شد. با جانشین‌سازی یون‌های مختلف در ساختار هگزافریت باریم، نیروی پسماندزدایی نسبت به نیروی پسماندزدایی هگزافریت باریم خالص که در حدود  $5300-5000$  Oe [۲۸] است، کاهش می‌یابد. کاهش میزان نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) در نمونه هگزافریت باریم آلیش شده، بدلیل افت ناهمسانگردی مغناطو-بلوری و تغییر جهت آسان مغناطش از محور c در ساختمان بلوری شش وجهی هگزافریت باریم به صفحه موازی با صفحه قاعده آن است. به طور کلی در ساختار هگزافریت باریم، یون‌های آهن با اسپین بالا در مکان‌های اکتاهدرا (۱۲k و ۲a) و بای پیرامید (۲b) توزیع شده‌اند، این در حالی است که یون‌های آهن با اسپین پایین در مکان‌های تتراهدرال ( $4f_1$ ) و اکتاهدرا ( $4f_2$ ) قرار گرفته‌اند. از ۱۲ یون  $Fe^{+3}$  در ساختار هگزافریت باریم نوع M، ۸ یون در جایگاه‌های شبکه ۱۲k، ۲a و ۲b با اسپین بالا و ۴ یون دیگر  $Fe^{+3}$  در جایگاه‌های  $4f_1$  و  $4f_2$  با اسپین پایین قرار می‌گیرند. بنابراین سه زیرشبکه (۱۲k، ۲a و ۲b) موازی و با دو زیرشبکه ( $4f_1$  و  $4f_2$ ) به صورت پادموازی قرار می‌گیرند که بواسطه برهمکنش‌های تبادلی، با یون‌های  $O^{2-}$  ساختار فری مغناطیس را تشکیل می‌دهند [۲۵-۲۰]. خواص هگزافریت باریم علاوه بر جانشینی، به ریزساختار، شرایط تولید، پیکربندی الکترونی، چگونگی اشغال جایگاه‌های بلوری  $Fe^{+3}$  بوسیله کاتیون‌های مختلف وابسته است. شکل ۴ نشان دهنده حلقه پسماند نمونه‌های CCS03 و CCS05 است. همانطور که ملاحظه می‌شود در هر دو حالت کاهش

از نمونه‌های CCS03 و CCS05 است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ذرات هگزافریت باریم نوع M، با توزیع یکنواخت و مورفولوژی هگزاگونال با رئوس کاملاً مشخص بوده که به‌طور میانگین دارای اندازه‌ای در حدود  $650\text{nm}$ - $600$  و توزیع نسبتاً باریکی در اندازه بلوری هستند. نفوذپذیری مغناطیسی مختلط ترکیب هگزافریت باریم نه تنها به ترکیب شیمیایی فریت بلکه به ریزساختار پودر حاصل شامل اندازه دانه نیز بستگی دارد.



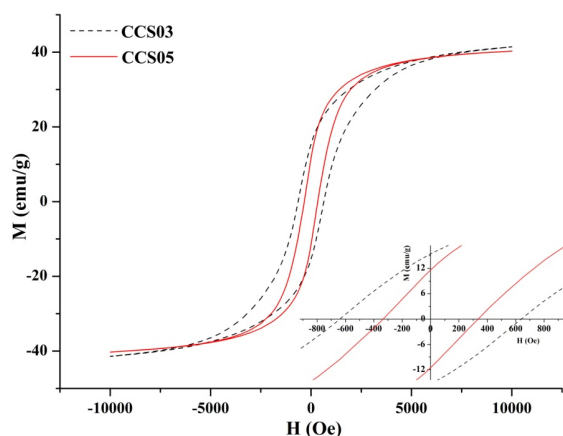
الف



ب

شکل ۳- تصاویر SEM از نمونه‌های،  
الف) CCS03 و ب) CCS05.

کاهش ناهمسانگردی است. با توجه به حلقه پسماند نمونه آرایش شده با کبالت، کروم و قلع مقادیر مربوط به مغناطش اشباع ( $M_s$ ) و نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) حاصل از آرایش در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴- حلقه پسماند نمونه هگزافریت باریم آرایش شده با کاتیون‌های کبالت، کروم و قلع با مقادیر آرایش ۰/۳ و ۰/۵.

جدول ۲- مقادیر مغناطش اشباع ( $M_s$ ) و نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) پس از آرایش.

| ترکیب                                       | مغناطش اشباع (emu/g) | نیروی وادارندگی (Oe) |
|---|----------------------|----------------------|
| $BaCo_{0.3}Cr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{11.1}O_{19}$ | ۴۲/۲۱                | ۶۵۶                  |
| $BaCo_{0.5}Cr_{0.5}Sn_{0.5}Fe_{10.5}O_{19}$ | ۴۰/۱۳                | ۳۴۳                  |

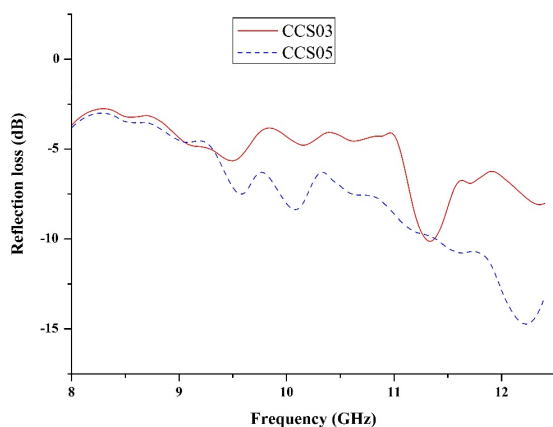
### ۳-۵- بررسی مشخصه جذب امواج مایکروویو

میزان تلفات انعکاسی یک ماده جاذب امواج الکترومغناطیس تحت برخورد عمودی، به صورت تک لایه و با پستی فلزی با توجه به مقدار امپدانس ورودی آن طبق نظریه خطوط انتقال با فرمول زیر مشخص می‌شود [۲۴]:

مغناطش اشباع ( $M_s$ ) نسبت به حالت خالص ( $60 \text{ emu/g}$ ) رخ داده است و نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) نسبت حالت خالص [۲۸] دارای کاهش بسیاری بوده است. طبق مطالعات انجام شده، بررسی‌ها نشان می‌دهد که یون‌های  $Sn^{+4}$  تمایل زیادی به جایگزینی با یون‌های آهن در مکان‌های بای پیرامید (۲b) و تتراهدرال ( $4f_1$ ) دارند [۳۱-۲۹] از طرفی طبق نتایج بررسی‌های آنالیز موزباور محققان ثابت نمودند که یون  $Cr^{+3}$  در تمام موقعیت‌های  $Fe^{+3}$  به جز موقعیت تتراهدرال  $4f_1$ ، امکان حضور دارد [۳۴-۳۲]. همچنین احتمال اشغال مکان‌های ۲b و  $4f_2$  توسط یون  $Co^{+2}$  وجود دارد [۲۰، ۲۱، ۲۷، ۲۸]. بنابراین می‌توان این چنین بیان نمود که با توجه به کاهش مغناطش اشباع ( $M_s$ ) هر دو نمونه احتمال اشغال مکان‌های اکتاهدرال توسط یون‌های مهمان وجود دارد و همین امر باعث کاهش مغناطش اشباع ( $M_s$ ) در هر دو نمونه شده است. منشا ناهمسانگردی مغناطو-بلوری بالای هگزافریت باریم نوع M حضور یون‌های آهن در مکان‌های ۲b با عدم تقارن بالا است [۲۸، ۲۷، ۲۱]. یون‌های کبالت با یون‌های آهن در مکان‌های ۲b و  $4f_2$  جانشین خواهند شد و بنابراین به‌طور موثر ناهمسانگردی مغناطو-بلوری کلی را کاهش می‌دهند. یون کبالت دارای ناهمسانگردی مغناطو-بلوری قوی در راستای صفحه ab است بنابراین آرایش ترکیب هگزافریت باریم با کاتیون کبالت منجر به کاهش ناهمسانگردی در راستای محور c یا اصلاح و تغییر ناهمسانگردی از محور c به صفحه ab می‌شود. از آنجایی که نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) ارتباط نزدیکی با ناهمسانگردی در هگزافریت باریم دارد، کاهش در میزان نیروی وادارندگی ( $H_c$ ) با افزایش میزان آرایش مربوط به



CCS05 در فرکانس ۱۲/۲GHz، بیشترین میزان تلفات انعکاس برابر ۱۵dB- حاصل شد. جذب بالای کامپوزیت CCS05 و رزین اپوکسی می‌تواند مربوط به کمتر بودن نیروی وادارندگی Hc و افزایش نفوذپذیری مغناطیسی ترکیب مورد نظر باشد. مکانیزم غالب جذب امواج الکترومغناطیس در نمونه‌های فریتی آلییده شده حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی است.



شکل ۵- منحنی‌های تغییرات جذب نسبت به بسامد در نمونه‌های CCS03 و CCS05.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص ساختاری و مغناطیسی پودر هگزا فریت باریم آلیش شده با یون‌های کبالت، کروم و قلع به روش مکانوشیمیایی بررسی شد. نتایج حاکی از تشکیل تک فاز هگزا فریت باریم پس عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۵h بود. همچنین حضور دو باند جذبی در طیف‌های FT-IR تایید کننده تشکیل خوشه‌های چهاروجهی و هشت وجهی اکسیدهای فلزی بود. طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات با مورفولوژی کاملاً هگزاگونال و توزیع باریک بودند.

$$R(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_{\text{in}} - 1}{Z_{\text{in}} + 1} \right| \quad (1)$$

که  $Z_{\text{in}}$  توسط معادله زیر به پارامترهای مغناطیسی ماده جذب ارتباط پیدا می‌کند [۲۴]:

$$Z_{\text{in}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ j \left( \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right) f \cdot d \right] \quad (2)$$

که در آن  $\mu_r$  و  $\epsilon_r$  به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی محیط جذب، C سرعت نور در هوای آزاد، f فرکانس و d ضخامت لایه جذب است. در یک ماده جذب ایده‌آل شرایط باید به‌گونه‌ای باشد که امیدانس ورودی برابر ۱ شود. باریم هگزا فریت خالص دارای رزونانس فرومغناطیسی در حدود ۴۷/۶ GHz است. زمانیکه فرکانس موج مایکروویو برخوردی برابر یا بیشتر از فرکانس رزونانس فرومغناطیس باشد در این صورت ترکیب باریم هگزا فریت بخش اعظمی از انرژی را به منظور چرخش دیواره‌های دامنه‌ها جذب خواهد کرد. فریت باریم خالص، به‌دلیل بالا بودن فرکانس تشدید در آن دارای جذب مناسبی در باند X نیست. آلیش این فریت با یون‌های مناسب، منجر به کاهش فرکانس تشدید و افزایش میزان جذب در محدوده باند X می‌شود. شکل ۵ نشان دهنده نمودارهای میزان تلفات انعکاسی با فرکانس در محدوده ۸-۱۲/۵ GHz برای نمونه‌های CCS03 و CCS05 است. در تمامی شرایط ضخامت نمونه‌ها برای مقایسه یکسان بین میزان جذب امواج ثابت و برابر ۵ mm در نظر گرفته شد. نمونه‌ها متشکل از ۵۰٪ وزنی پودر در زمینه رزینی بودند. با توجه به منحنی‌های جذب مشاهده می‌شود که در تمامی نمونه‌ها در محدوده باند X با افزایش فرکانس میزان جذب امواج افزایش می‌یابد. در نمونه CCS03 در فرکانس ۱۱/۳GHz بیشترین میزان تلفات انعکاس برابر ۱۰/۱dB- و در نمونه

- pp1799-1804, 2011.
- [2] L. Wang, J. Zhang, Q. Zhang, N. Xu, J. Song, "XAFS and XPS studies on site occupation of  $\text{Sm}^{3+}$  ions in Sm doped M-type  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol377, pp 362-367, 2015.
- [3] L. Zhao, X. Lv, Y. Wei, C. Ma, L. Zhao, "Hydrothermal synthesis of pure  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  hexafer ritenanoplatelets under high alkaline system", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol 332, pp 44-47, 2013.
- [4] X. Xu, J. Park, Y. K. Hong, A. M. Lane, "Synthesis and characterization of hollow mesoporous  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  spheres", Journal of Solid State Chemistry, Vol222, pp 84-89, 2015.
- [5] Y. Wang, Y. Huang, Q. Wang, "Preparation and magnetic properties of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanocomposite ferrite", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol324, pp 3024-3028, 2012.
- [6] M. Choi, S. Cho, Y. Song, D. Choi, S. Park, Y. Kim, "Novel synthesizing method of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  microrod and its superior coercivity with shape anisotropy", Materials Letters, Vol 139, pp 292-295, 2015.
- [7] L. Hongfei, W. Jianjiang, X. Baocai, W. Guoshun, H. Yongshen, G. Haitao, Y. Weimin, "Effects of Mg or Sr Doping on the Intrinsic Characteristics and Absorption Properties of Micro-nano  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  Hollow Multiphase Ceramic Microspheres", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol 374, pp 530-538, 2015.
- [8] W. Widanarto, M. Jandra, S. K. Ghoshal, M. Effendi, W. T. Cahyanto, " $\text{BaCO}_3$  mediated modifications in structural and magnetic properties of natural nanoferrites", Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol 79, pp 78-81, 2015.
- [9] M. J. Molaei, A. Ataie, S. Raygan, S. J. Picken, "Role of intensive milling in the processing of barium ferrite/ magnetite/ iron hybrid magnetic nano-composites

اندازه‌گیری پارامترهای مغناطیسی با مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش حاکی از تشکیل ماده‌ای نیمه سخت به واسطه آرایش با کاتیون‌های کبالت، کروم و قلع بود. بیشترین میزان مغناطش اشباع در نمونه‌ای با ترکیب  $\text{BaCo}_{0.3}\text{Cr}_{0.3}\text{Sn}_{0.3}\text{Fe}_{11.1}\text{O}_{19}$  ۴۲/۲۱ emu/g و به میزان ۰/۳ به ۰/۵ افزایش می‌گیرد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش میزان آرایش از ۰/۳ به ۰/۵ تاثیر چندانی در میزان مغناطش اشباع ندارد که این مساله می‌تواند ناشی از حضور یون‌های مورد نظر در مکان‌های تتراهدرال در اثر افزایش میزان آرایش باشد که در نتیجه منجر به تغییر نه چندان زیاد در میزان مغناطش اشباع شده است. از طرفی افزایش میزان آرایش از ۰/۳ به ۰/۵ منجر به کاهش چشمگیر در میزان نیروی وادارندگی هگزاferیت باریم آرایش شده می‌شود که به دلیل حضور یون‌های کبالت، کروم و قلع در مکان‌های ۲b و کاهش ناهمسانگردی مغناطو-بلوری است. نمونه فریتی دوپ شده با ترکیب  $\text{BaCo}_{0.5}\text{Cr}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{Fe}_{10.5}\text{O}_{19}$  عملکرد جذب نسبتاً خوبی در محدوده باند X نسبت به نمونه دیگر از خود نشان داد. کامپوزیت این نمونه با رزین اپوکسی در محدوده فرکانس ۸-۱۲/۵ GHz در ضخامت ۵ mm دارای حداقل میزان تلفات انعکاس ۱۵dB- در فرکانس ۱۲/۲GHz بود که این امر بواسطه کاهش فرکانس رزونانسی و ناهمسانگردی مغناطو بلوری رخ داد.

## مراجع

- [1] H. S. Ozeri, I. Kucuk, H. O. Zkan, "Improvement in magnetic properties of Las substituted  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  particles prepared with an unusually low Fe/Bamolar ratio", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol323,





- Vol20, pp 3425-3429, 2014.
- [17] S. Verma, O. P. Pandey, A. Paesano, P. Sharma, "Comparison of structural and magnetic properties of  $\text{La}^{3+}$  substituted  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  prepared by different substitution methods", *Physica B: Condensed Matter*, Vol 448, pp 57-59, 2014.
- [18] M. Kishimoto, S. Kitahata, M. Amemiya, Structural and Magnetic Properties of  $\text{BaCo}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  ( $x=0.2, 0.4, 0.6, 1$ ) Nanoferrites Synthesized via Citrate Sol-Gel Method, *J. Appl. Phys.*, Vol61, pp 101-104, 2011.
- [19] A. Xia, D. Du, P. Li, Y. Sun, Crystalline structures and intrinsic magnetic properties of ZnTi-substituted hexagonal M-type Ba ferrite powder, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, Vol 22, pp 223-227, 2011.
- [۲۰] T. Kaur, B. Kaur, B. Bhat, S. Kumar, A.K. Srivastava, Effect of calcinations temperature on microstructure, dielectric, magnetic and optical properties of  $\text{Ba}_{0.7}\text{La}_{0.3}\text{Fe}_{11.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_{19}$  hexaferrites, *Physica B*, Vol 456, pp 206-212, 2011.
- [21] Z. F. Zi, Q.C. Liu, J. M. Dai, Y. P. Sun, Effects of Ce-Co substitution on the magnetic properties of M-type barium hexaferrites, *Solid State Communications*, Vol 152, pp 894-897, 2012.
- [22] M. Choi, S. Cho, Y. Song, S. Baek, H. Kim, J. Jung, H. Lee, C. Park, S. Park, Y. kim, "Synthesis and characterization of hollow  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  submicron spheres for advance functional magnetic materials", *Current Applied Physics*, Vol 14, pp 1208-1211, 2014.
- [23] V. V. Soman, V. M. Nanoti, D. K. Kulkarni, "Effect of Substitution of Zn-Ti on Magnetic and Dielectric Properties of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ", *Physics Procedia*, Vol 54, pp 30-37, 2014.
- [24] M. Sharma, S. C. Kashyap, H. C. Gupta, "Effect of Mg-Zr substitution and microwave processing on magnetic properties of barium hexaferrite", *Physica* via partial reduction of barium ferrite", *Materials Characterization*, Vol 101, pp 78-82, 2015.
- [10] D. A. Vinnik, D. A. Zhrebtssov, L. S. Mashkovtseva, S. Nemrava, A. S. Semisalova, D. M. Galimov, S. A. Gudkova, I. V. Chumanov, L. I. Isaenko, R. Niewa, "Growth, structural and magnetic characterization of Co- and Ni-substituted barium hexaferrite single crystals", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol 628, pp 480-484, 2015.
- [11] J. Luo, Y. Xu, H. Mao, "Magnetic and microwave absorption properties of rare earth ions ( $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ) doped strontium ferrite and its nanocomposites with polypyrrole", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 381, pp 365-371, 2015.
- [12] W. S. Castro, R. R. Correa, P. I. PaulimFilho, J. M. Rivas Mercury, A. A. Cabral, "Dielectric and magnetic characterization of barium hexaferrite ceramics", *Ceramics International*, Vol 41, pp 241-246, 2015.
- [13] M. Liu, H. Yang, Y. Lin, Y. Yang, "One-step synthesis of homogeneous  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  composite powders", *Materials Research Bulletin*, Vol 60, pp 195-200, 2014.
- [14] D. Lisjak, "The influence of magnetic interactions and shape anisotropy on the alignment and assembly of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  and  $\text{Er}_2\text{O}_3$  nanoplates", *Materials Chemistry and Physics*, Vol 148, pp 311-318, 2014.
- [15] Y. Wang, Y. Huang, J. Ding, "Synthesis and electromagnetic absorption properties of polypyrrole/ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ - $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /multi-walled carbon nanotube composites", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol26, pp 632-641, 2014.
- [16] G. Nabiyouni, D. Ghanbari, A. Yousofnejad, M. Seraj, "A sonochemical-assisted method for synthesis of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles and hard magnetic nanocomposites", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*,

- substituted M-type barium hexaferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 295, pp 263-268, 2005.
- [33] M. N. Ashiq, M. J. Iqbal, I. Hussain-Gul, 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.
- [34] M. Awawdeh, I. Bsoul, S. H. Mahmood, Magnetic properties and Mössbauer spectroscopy on Ga, Al, and Cr substituted hexaferrites, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol 585, pp 465-473, 2014.
- B: *Condensed Matter*, Vol 448, pp 24-28, 2014.
- [25] M. Manikandan, C. Venkateswaran, "Effect of high energy milling on the synthesis temperature, magnetic and electrical properties of barium hexagonal ferrite", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 358-359, pp 82-86, 2014.
- [26] M. Zhang, Z. Zi, Q. Liu, X. Zhu, C. Liang, Y. Sun, J. Dai, "Solvothermal synthesis and magnetic properties of  $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{NiTi})_x\text{O}_{19}$  nanoparticles", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 369, pp 23-26, 2014.
- [27] C. Dong, X. Wang, P. Zhou, T. Liu, J. Xie, L. Deng, Microwave magnetic and absorption properties of M-type ferrite  $\text{BaCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$  in the K-band, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 354, pp 340-344, 2014.
- [28] J. Li, H. Zhang, Q. Li, Y. Li, G. Yu, Influence of La-Co substitution on the structure and magnetic properties of low-temperature sintered M-type barium ferrites, *Journal of Rare Earths*, Vol 31, pp 983-987, 2013.
- [29] M. Jamalian, An investigation of structural, magnetic and microwave properties of strontium hexaferrite nanoparticles prepared by a sol-gel process with doping Sn and Tb, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 378, pp 217-220, 2015.
- [30] A. Davoodi, B. Hashemi, Magnetic properties of Sn-Mg substituted strontium hexaferrite nanoparticles synthesized via coprecipitation method, *J. Alloys Compd.*, Vol 509, pp 5893-5896, 2011.
- [31] M. Jamalian, A. Ghasemi, E. Paimozd, Sol-gel synthesis of Mn-Sn-Ti substituted strontium hexaferrite nanoparticles: structural, magnetic and reflection loss properties, *J. Electron. Mater.*, Vol 43, pp 1076-1082, 2014.
- [32] J. Qiu, M. Gao, H. Shen, Microwave absorption properties of Al- and Cr-