



## تأثیر نسبت مولی اسید سیتریک بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوساختار هگزا فریت استرانسیوم نوع - Y ( $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ )

سید ابراهیم موسوی قهفرخی\*، فاطمه حمل‌زاده احمدی، مرتضی زرگروشتری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۱۱، نسخه نهایی: ۹۶/۲/۲۵)

**چکیده:** در این پژوهش، نانو ساختارهای هگزا فریت استرانسیوم نوع - Y ( $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ) با نسبت مولی اسید سیتریک به نیترات‌های فلزی ۰/۵، ۱، ۱/۱، ۱/۵ و ۲ به روش سل-ژل خوداحتراقی تهیه و پودر حاصل در دمای  $1000^\circ\text{C}$  به مدت ۳ ساعت پخته شد. خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوساختارهای  $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  با استفاده از آنالیز پراش سنج پرتو X (XRD)، طیف‌سنج فرسرخ-تبدیل فوریه (FT-IR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) و LCR متر بررسی شدند. نتایج به‌دست آمده از الگوهای پراش نشان داد که در نسبت‌های مولی ۱/۵ و ۲، فریت شش‌گوشی نوع - Y ( $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ) به‌طور کامل تشکیل شده است به‌طوری‌که در نسبت مولی ۱/۵ قله‌ها و شدت آن‌ها با کارت استاندارد همخوانی بهتری دارد. همچنین نتایج خواص دی‌الکتریکی نشان داد که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک کاهش می‌یابند، که بیانگر این است که این نمونه‌ها برای کاربرد در تجهیزات ریزموج می‌توانند مناسب باشند. نتایج نشان داد که بهترین نمونه با دمای  $1000^\circ\text{C}$ ، زمان ۳ ساعت با نسبت مولی اسید سیتریک ۱/۵ تهیه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** هگزا فریت استرانسیوم نوع - Y؛ خواص ساختاری؛ خواص مغناطیسی؛ نسبت مولی اسید سیتریک.

### مقدمه

مواد مغناطیسی گروه بزرگی از مواد هستند که به‌طور وسیع در دستگاه‌های مختلف مغناطیسی استفاده می‌شوند [۱]. فریت‌ها گروه مهمی از مواد مغناطیسی و شامل: فریت‌های نرم، فریت‌های سخت و گارنت‌ها هستند. فریت‌های سخت به ویژه شش‌گوشی‌ها، خواص مهمی از قبیل مقاومت الکتریکی و خواص مکانیکی بالا و خواص مغناطیسی مطلوب دارند [۲]. هگزا فریت‌ها شامل ۶ نوع مختلف M، X، Y، Z و U هستند [۳]. در میان آن‌ها فریت نوع - Y با فرمول کلی  $\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ، که به‌جای Ba می‌توان از کاتیون‌های دوظرفیتی  $\text{Sr}^{2+}$  و  $\text{Pb}^{2+}$  استفاده کرد و Me نیز یک کاتیون دوظرفیتی از قبیل  $\text{Co}^{2+}$ ،  $\text{Zn}^{2+}$ ،  $\text{Cu}^{2+}$  است [۴]. ساختار مولکولی هگزا فریت نوع - Y شامل یک بلوک S و یک بلوک T که سلول واحد آن (ST) ۳ و گروه فضایی  $R_3m$  است [۴، ۵].

بیشتر فریت‌های نوع Y در دمای اتاق مغناطش عمود بر محور c دارند [۶]. خواص هگزا فریت نوع Y به عوامل مختلفی از قبیل روش آماده‌سازی، نوع و مقدار آلاینش بستگی دارد. موضوع اصلی این مقاله، ساخت و بررسی تأثیر نسبت مولی اسید سیتریک بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوساختار  $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  تهیه شده به روش سل-ژل است.

### شرح آزمایش و اندازه‌گیری‌ها

هگزا فریت استرانسیوم نوع - Y به روش سل-ژل خوداحتراقی تهیه شد. به این منظور مقدار استوکیومتری از نیترات‌های  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  را در آب یون‌زدایی حل شده و محلول به‌دست آمده در حمام آب قرار داده شد. برای همگن ساختن محلول، آن را روی هم‌زن مغناطیسی در دمای  $30^\circ\text{C}$  قرار داده تا به‌طور کامل حل شود. سپس اسید سیتریک با نسبت‌های مولی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲،

که در اینجا  $C_p(F)$ ,  $R_p(\Omega)$ ,  $f(H_z)$ ,  $\delta$  به ترتیب زاویه اتلاف، بسامد، مقاومت معادل موازی مدار و ظرفیت موازی معادل هستند. اتلاف دی‌الکتریک  $(\epsilon''(\Omega F H_z)^{-1})$  توسط رابطه زیر به عامل اتلاف بستگی دارد [۹، ۱۰]:

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta \quad (۷)$$

رسانندگی  $ac(\Omega.m)^{-1}$  و نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) به ترتیب از روابط زیر محاسبه شدند [۱۱، ۱۲]:

$$\sigma_{ac} = \epsilon' \epsilon_0 \omega \tan \delta \quad (۸)$$

$$\mu = \mu_0 L_s / L_0 \quad (۹)$$

که  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی خلا،  $L_0$  القای مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته و  $L_s$  القای مغناطیسی سیم‌پیچ در حضور هسته است. برای محاسبه اتلاف نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu''$ )، ابتدا باید عامل اتلاف ( $\tan \delta$ ) (رابطه ۱۰) که متفاوت از عامل اتلاف دی‌الکتریک (رابطه ۶) است را تعیین کرد.

$$\tan \delta = \frac{R_s}{\omega L_s} \quad (۱۰)$$

در این رابطه،  $\delta$ ،  $R_s$ ،  $\omega$  و  $L_s$  به ترتیب زاویه اتلاف، مقاومت معادل سری مدار، بسامد زاویه‌ای و القای مغناطیسی سیم‌پیچ در حضور هسته می‌باشد. بنابراین اتلاف نفوذپذیری مغناطیسی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$\mu'' = \mu' \tan \delta \quad (۱۱)$$

ریخت‌شناسی و ضخامت صفحات با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) بررسی شد. طیف FT-IR ژل خشک نمونه‌های پخته شده با نسبت‌های مولی اسید سیتریک ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در گستره  $4000 \text{ cm}^{-1}$  -  $400 \text{ cm}^{-1}$  به دست آمد.

### نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی XRD نمونه‌های با مقادیر مختلف اسید سیتریک را نشان می‌دهد. طیف‌های پراش با نرم‌افزار "Pert High Score X" و کارت استاندارد (۰۰۶۹-۰۵۴-۰۰) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده حضور فریت شش‌گوشی نوع- $M(\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19})$  را در کنار فریت شش-گوشی نوع- $Y$  در نسبت‌های مولی ۰/۵ و ۱ نشان می‌دهد. در نسبت‌های مولی ۱/۵ و ۲ فریت شش‌گوشی نوع- $Y$  ( $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ) به‌طور کامل تشکیل شده است. در نسبت مولی ۱/۵ قله‌ها و شدت آن‌ها با کارت استاندارد همخوانی بهتری دارند، در نتیجه بهترین نسبت اسید سیتریک به

در هر مرحله به‌طور جداگانه به محلول اضافه شد. با اضافه کردن تدریجی آمونیاک، مقدار pH محلول بر مقدار  $\gamma$  تنظیم شد. این محلول در حمام آب در دمای  $100^\circ\text{C}$  تبخیر شد تا زمانی که ژلی با چسبندگی بالا شکل گرفت. ژل حاصل به مدت ۳۰ دقیقه درون کوره با دمای  $300^\circ\text{C}$  قرار داده شد تا عمل احتراق صورت بگیرد. در نهایت ژل خشک چهار نمونه با نسبت‌های مولی مختلف اسید سیتریک در دمای  $1000^\circ\text{C}$  به مدت ۳ ساعت پخته شد. مشخصه‌های ساختاری نمونه‌ها و بررسی فازی آن‌ها شامل ثابت‌های شبکه شش‌گوشی ( $a$ ,  $c$ )، حجم یاخته یک ( $V_{\text{cell}}$ )، متوسط اندازه‌ی بلورک‌ها ( $D$ ) و درصد تشکیل فاز ( $P$ ) با استفاده از داده‌های به دست آمده توسط دستگاه پراش سنخ پرتو ایکس و روابط زیر تعیین شد.

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{3a^2} (h^2 + hk + k^2) + \left( \frac{\lambda^2}{4C^2} \right) l^2 \quad (۱)$$

$$V_{\text{cell}} = a^2 c \sin 120 = 0.8666 a^2 c \quad (۲)$$

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (۳)$$

$$P\% = \frac{\sum I_x}{\sum I_x + \sum I_y + \dots} \times 100 \quad (۴)$$

در این روابط،  $h$ ،  $k$  و  $l$  شاخص‌های میلر،  $\lambda$  طول موج پرتو  $X$ ،  $\beta$  و  $\theta$  به ترتیب پهنای قله بیشینه و زاویه براگ، و  $I_x$  شدت فاز اصلی و  $I_y$  شدت فاز ناخالصی است [۷، ۸]. خواص مغناطیسی نمونه‌ها شامل مغناطش اشباع ( $M_s$ )، مغناطش مانده ( $M_r$ )، وادارندگی مغناطیسی ( $H_c$ ) و نسبت چارگوشی حلقه پسماند ( $\frac{M_r}{M_s}$ ) از حلقه‌های پسماند  $M-H$  به دست آمده

در دمای اتاق با میدان اعمالی ۱۲ kOe تعیین شد. ویژگی‌های دی‌الکتریک در گستره بسامدی ۱ KHz تا ۱ MHz در دمای اتاق با استفاده از دستگاه LCR متر (مدل تایوان ۸۲۱) به دست آمد. ثابت دی‌الکتریک با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

$$\epsilon' = Cd / \epsilon_0 A \quad (۵)$$

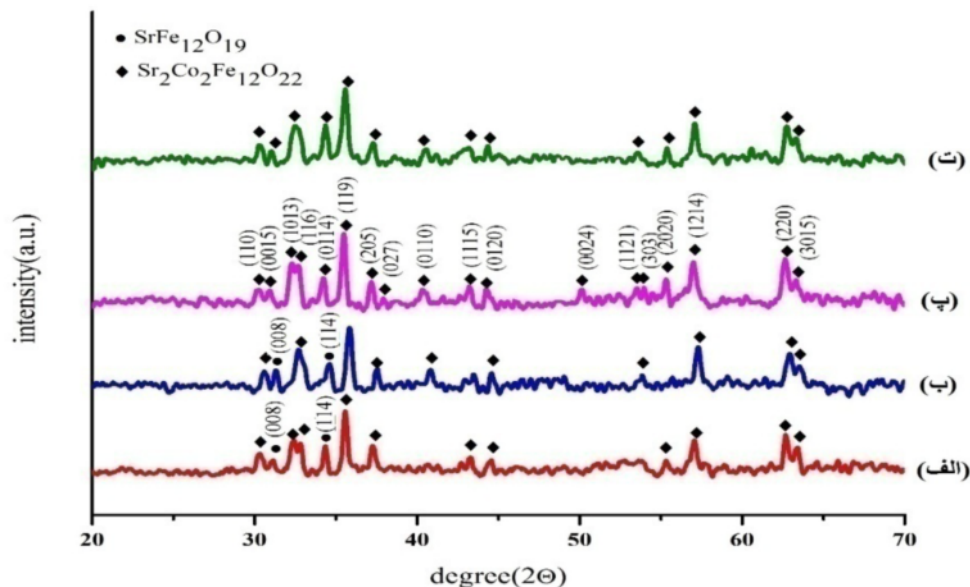
که در این رابطه،  $C$ ،  $d$ ،  $A$  و  $\epsilon_0$  به ترتیب ظرفیت قرص بر حسب فاراد، ضخامت قرص بر حسب متر، سطح مقطع قرص بر حسب مترمربع ( $A = \pi r^2$ ) و ثابت دی‌الکتریکي خلأ هستند. عامل اتلاف دی‌الکتریک با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\tan \delta = 1 / 2\pi f R_p C_p \quad (۶)$$

کششی ( $\text{NO}_3^-$ ) هستند [۷]. در شکل ۳ الف و ۳ ت نوارهای در  $434,771 \text{ cm}^{-1}$ ،  $554,246 \text{ cm}^{-1}$  و  $594,071 \text{ cm}^{-1}$  و همچنین دو نوار در  $1377,3 \text{ cm}^{-1}$  و  $1456,95 \text{ cm}^{-1}$  ناشی از حضور مد ارتعاش کششی  $(\text{NO}_3)^{-2}$  است. شکل ۳ ب نوارهای در  $438,089 \text{ cm}^{-1}$  و  $594,071 \text{ cm}^{-1}$  و همچنین  $816,427 \text{ cm}^{-1}$  ناشی از  $(\text{NO}_3)^{-2}$  هستند. شکل ۳ پ طیف FT-IR نمونه پخت شده با نسبت مولی اسید سیتریک ۱/۵ است که نوارهای مشاهده شده در حدود  $438,089 \text{ cm}^{-1}$  و  $590,752 \text{ cm}^{-1}$  مشخصه همه فریت‌هاست. در طیف FT-IR همه نمونه‌های پخت شده در  $1000^\circ \text{C}$  برای ۳ ساعت، نوارهایی در گستره  $550-590 \text{ cm}^{-1}$  و  $430-470 \text{ cm}^{-1}$  دیده می‌شود که متناظر با تشکیل خوشه‌های چاروجهی و هشت‌وجهی هستند که خود حضور مد کششی پیوند فلز-اکسیژن را در هگزا فریت تأیید می‌نمایند [۸، ۱۳].

نیترا ت‌های فلزی ۱/۵ است. با استفاده از داده‌های الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، اطلاعات ریزساختاری شامل ثابت‌های شبکه a و c، حجم یاخته یک، درصد تشکیل فاز در نمونه‌ها و اندازه متوسط بلورک‌ها محاسبه شد که در جدول ۱ آورده شده‌اند.

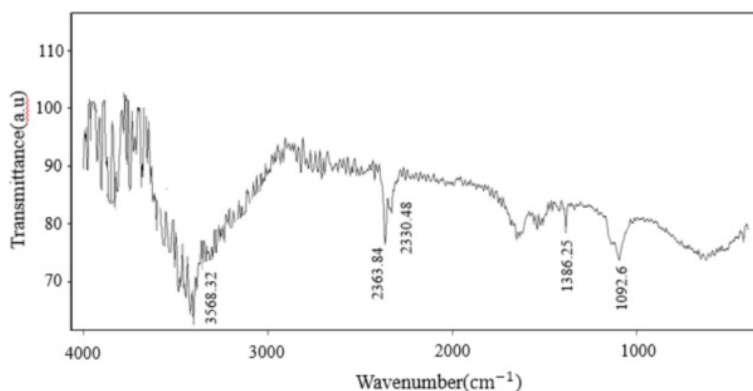
شکل‌های ۲ و ۳، به ترتیب طیف FT-IR ژل خشک و نانوساختار  $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  تهیه شده در دمای  $1000^\circ \text{C}$  با نسبت‌های مولی اسید سیتریک ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در گستره عددموج  $400-4000 \text{ cm}^{-1}$  را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۲، در نمونه‌ی پیش از پخت، نوارهای جذبی موجود در  $2363,84 \text{ cm}^{-1}$  و  $3568,32 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به مولکول‌های آب جذب شده و ارتعاشات کششی O-H آب و اسید سیتریک هستند، نوار در  $1653,1 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن گروه  $-\text{COOH}$  و نوارهای جذبی در حدود  $1386,25 \text{ cm}^{-1}$  و  $1092,6 \text{ cm}^{-1}$



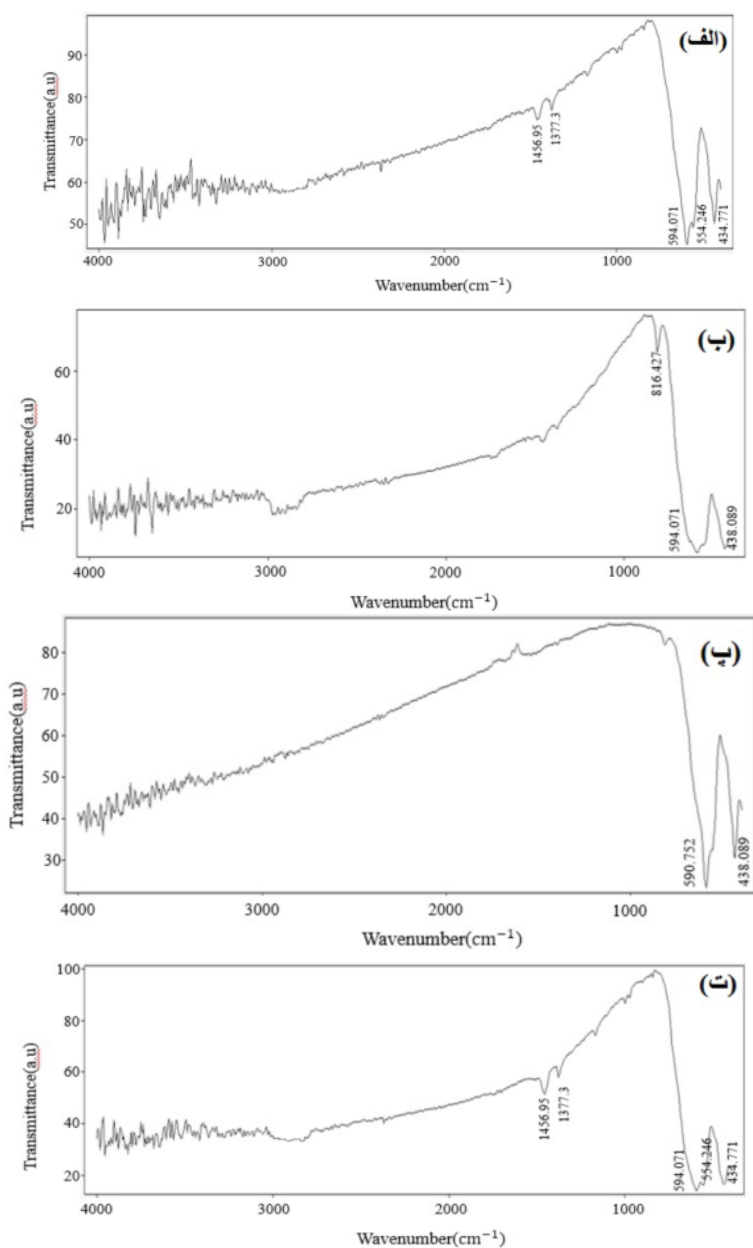
شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های تهیه شده با نسبت‌های مختلف اسید سیتریک، (الف) ۰/۵، (ب) ۱، (پ) ۱/۵ و (ت) ۲.

جدول ۱ ثابت‌های شبکه شش‌گوشی (a,c)، حجم یاخته یک ( $V_{cell}$ )، درصد فازهای موجود در نمونه ( $P(\%)$ ) و متوسط اندازه‌ی بلورک‌ها (D) نمونه‌های  $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  تهیه شده با نسبت‌های مولی اسید سیتریک ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲.

D (nm)	P(%)	$V_{cell}(\text{Å}^3)$	c(Å)	a(Å)	نسبت مولی
۲۷	۱۱٫۵٪ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ و ۸۸٫۵٪ $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$	۱۲۹۳٫۶۴۱	۴۳٫۴۹۳	۵٫۸۵۸	۰٫۵
۲۵	۹٫۷٪ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ و ۹۰٫۳٪ $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$	۱۲۹۴٫۳۴۹	۴۳٫۴۸۷	۵٫۸۶۰	۱
۲۵	۱۰۰٪ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ و ۰٪ $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$	۱۲۹۳٫۸۱۳	۴۳٫۵۰۷	۵٫۸۵۸	۱٫۵
۲۴	۱۰۰٪ $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ و ۰٪ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	۱۲۹۴٫۷۷۴	۴۳٫۵۱۸	۵٫۸۵۹	۲



شکل ۲ طیف FT-IR ژل- خشک نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$ .

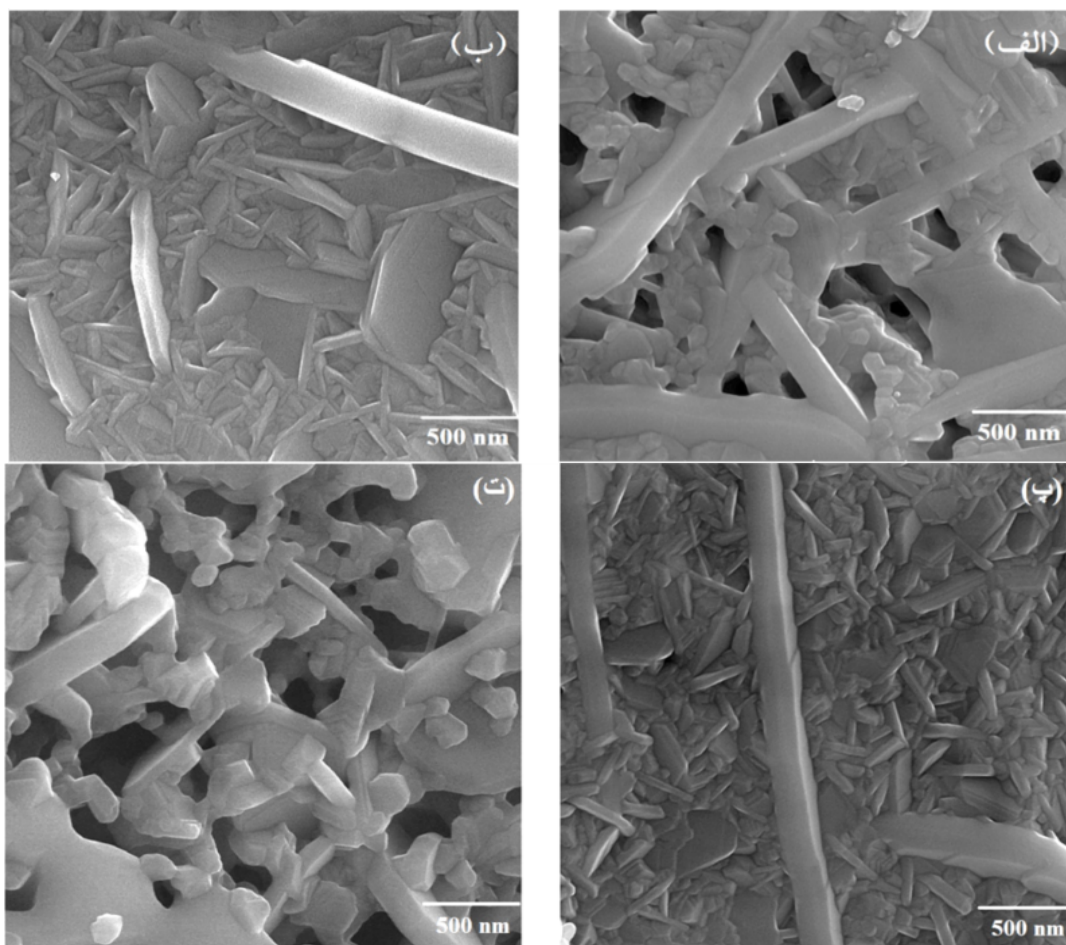


شکل ۳ طیف FT-IR نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$  تهیه شده با نسبت مولی اسید سیتریک الف) ۰٫۵، ب) ۱، پ) ۱٫۵ و ت) ۲.

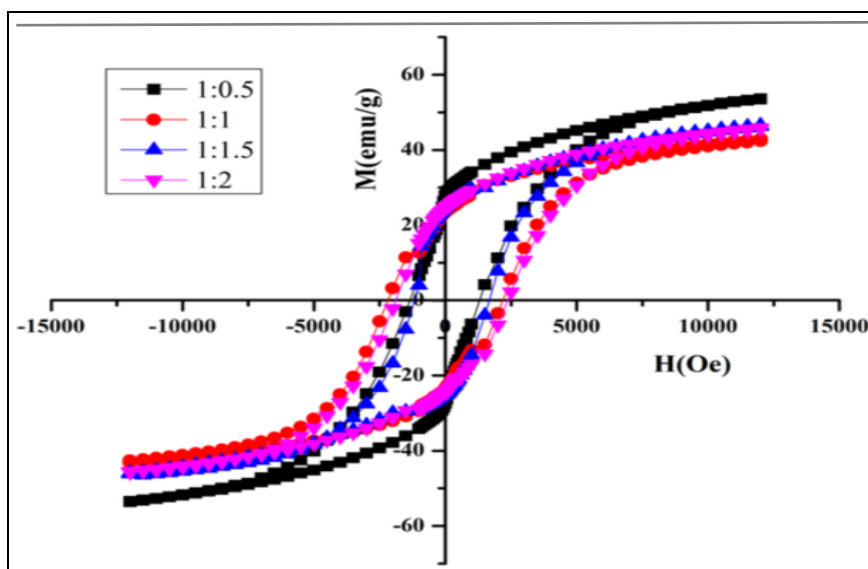
مشخصه‌های مغناطیسی شامل وادارندگی مغناطیسی ( $H_c$ )، مغناطش اشباع ( $M_s$ )، مغناطش مانده ( $M_r$ ) و نسبت چارگوشی منحنی پسماند ( $\frac{M_r}{M_s}$ )، نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. دیده می‌شود که با تغییر نسبت مولی اسید سیتریک مشخصه‌های مغناطیسی نمونه‌ها تغییر کرده‌اند. بنابراین گزارش‌های پیشین نسبت چارگوشی بزرگتر یا مساوی ۰٫۵، بیانگر این است که مواد دارای تک حوزه‌های مغناطیسی هستند ولی مقدار کمتر از ۰٫۵ را می‌توان به تشکیل ساختار مغناطیسی چند حوزه‌ای نسبت داد [۱۵]. با توجه به جدول ۲ نسبت چارگوشی منحنی پسماند همه نمونه‌ها بزرگتر از ۰٫۵ است پس همه نمونه‌های ساخته شده دارای ساختار مغناطیسی تک حوزه‌ای هستند.

شکل ۴ تصاویر FESEM نمونه‌ها با نسبت‌های مولی مختلف اسیدسیتریک را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که نمونه‌ها صفحه‌ای هستند و صفحه‌ها به‌طور نامنظم قرار گرفته‌اند (همچون نمونه‌ها در مراجع [۱، ۱۴]). میانگین ضخامت صفحات حدود ۸۴nm است. با افزایش نسبت مولی تا ۱٫۵ ضخامت صفحات کاهش یافته در حالی که برای نمونه نسبت مولی بالاتر (۲) ضخامت صفحات افزایش یافته است. تصاویر FESEM نشان می‌دهد که میزان سوخت در فریت شش‌گوشی نوع-Y بر ریخت‌شناسی نمونه‌ها تأثیر گذاشته است.

شکل ۵ منحنی‌های پسماند نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$  تهیه شده در دمای پخت  $1000^\circ C$  برای زمان ۳ ساعت با نسبت‌های مولی اسید سیتریک متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۴ تصاویر FESEM نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$  تهیه شده با نسبت‌های مولی اسید سیتریک مختلف، الف) ۰٫۵، ب) ۱، پ) ۱٫۵ و ت) ۲.



شکل ۵ منحنی‌های پسماند مغناطیسی نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$  تهیه شده با نسبت‌های مولی اسید سیتریک مختلف.

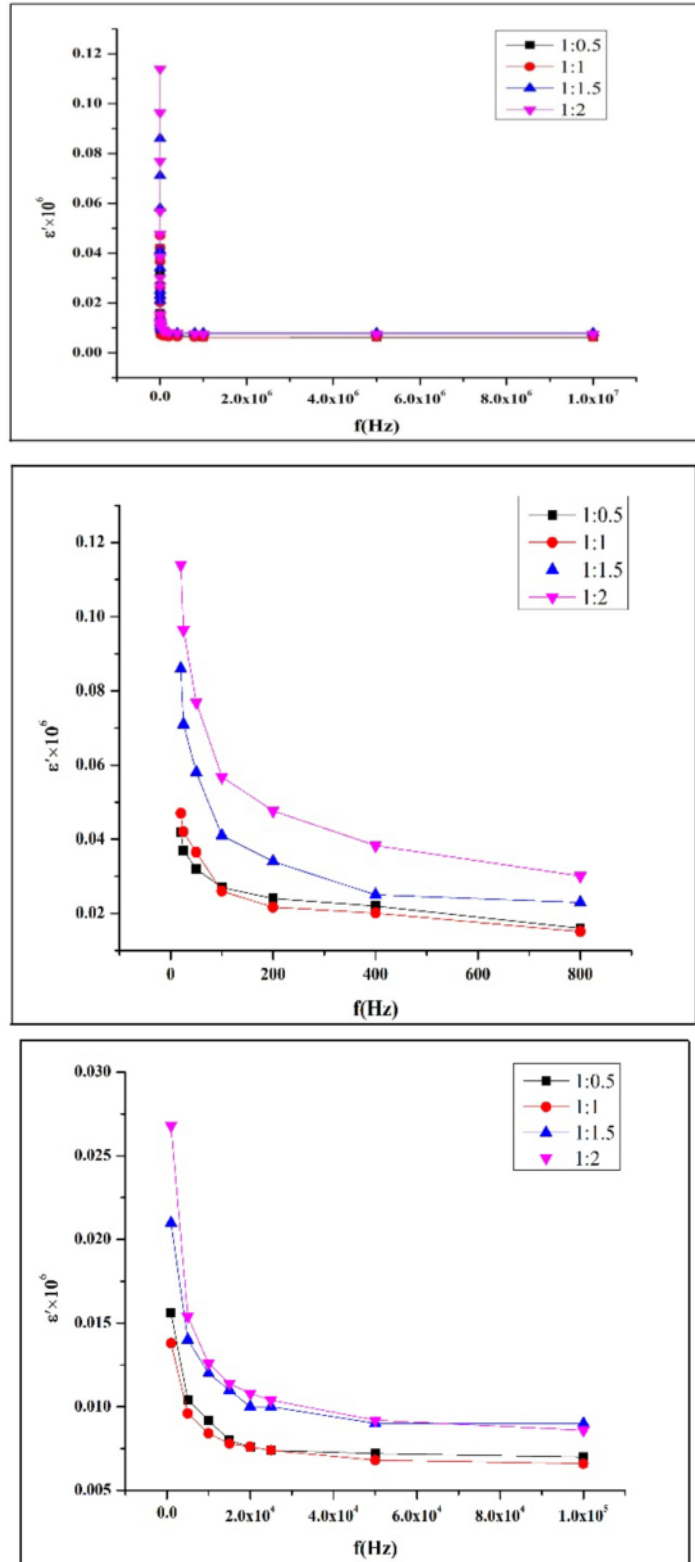
جدول ۲ خواص مغناطیسی نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$  تهیه شده با نسبت‌های مولی اسید سیتریک ۰٫۵، ۱، ۱٫۵، ۲.

نسبت مولی	$M_s (\frac{emu}{g})$	$M_r (\frac{emu}{g})$	$H_c (Oe)$	$\frac{M_r}{M_s}$
۰٫۵	۵۳٫۵۰۵	۲۷٫۸۳۲	۱۵۰۰	۰٫۵۲
۱	۴۲٫۶۵۹	۲۳٫۱۹۴	۲۰۰۰	۰٫۵۴
۱٫۵	۴۷٫۵۳۶	۲۵٫۱۸۴	۱۵۰۰	۰٫۵۴
۲	۴۵٫۹۵۷	۲۴٫۴۷۹	۲۰۰۰	۰٫۵۳

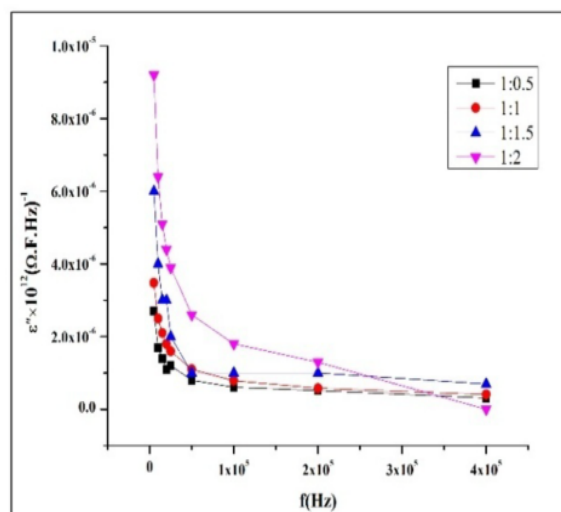
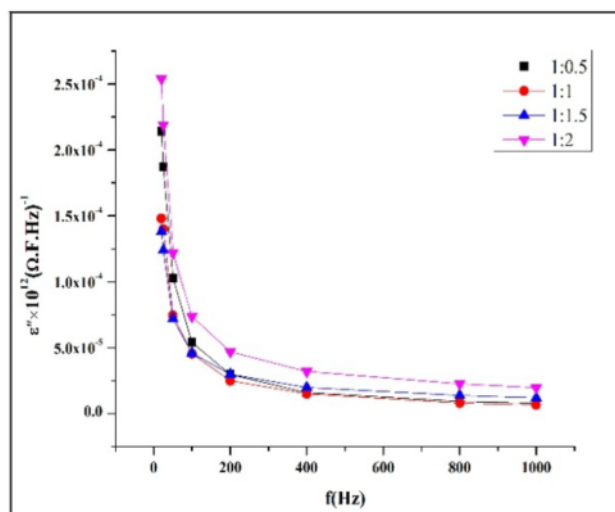
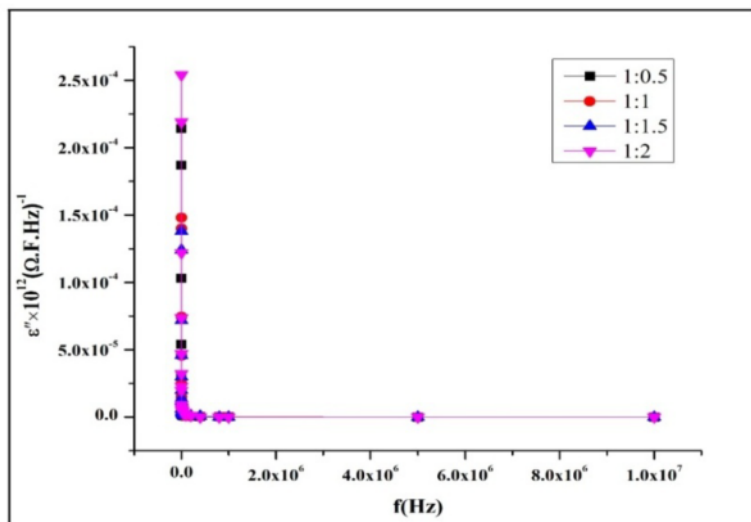
رفتار دی‌الکتریک یکی از مشخصه‌های فریت‌هاست که به شرایط آماده سازی، دما و زمان پخت و نوع و مقدار آلاینش بستگی دارد [۱]. در این پژوهش، مشخصه‌های دی‌الکتریک شامل قسمت حقیقی ثابت دی‌الکتریک ( $\epsilon'$ )، اتلاف دی‌الکتریک ( $\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$ )، رسانندگی ( $\sigma_{ac} (\Omega.m)^{-1}$ )، قسمت حقیقی نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu'$ )، اتلاف نفوذپذیری ( $\mu''$ ) و ضریب خودالقایی (L) در گستره بسامدی ۲۰ Hz تا ۱۰ MHz اندازه‌گیری شده است. شکل‌های ۶ و ۷ منحنی ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک را به صورت تابعی از بسامد اعمالی برای نمونه‌های تهیه شده با نسبت‌های مولی مختلف اسید سیتریک (۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲) نشان می‌دهند. دیده می‌شود که  $\epsilon'$  و  $\epsilon''$  با افزایش بسامد، کاهش می‌یابند و در بسامدهای بالاتر به یک مقدار ثابت می‌رسند. این رفتار فریت‌ها را می‌توان با مدل دولایه‌ای ماکسول-وگنر و نظریه‌ی کوپ توضیح داد. طبق این مدل مواد دی‌الکتریک با ساختار ناهمگن را می‌توان شامل دانه‌هایی با رسانندگی بالا که توسط لایه‌های نازک مقاومتی (مرزدانه‌ها) از هم جدا شده در نظر گرفت. ولتاژ اعمالی بر نمونه به‌طور عمده در عبور از مرزدانه‌ها کاهش یافته

و یک قطبش بارفضایی در مرزدانه‌ها ایجاد می‌کند. بنابراین ثابت دی‌الکتریک در فرکانس‌های پایین از مرزدانه‌ها ناشی می‌شود در حالی‌که در فرکانس‌های بالا از دانه‌ها ناشی می‌شود. بنابر سازوکار پرش وروی، رسانش الکتریکی در فریت‌ها، به‌علت پرش الکترون‌ها بین یون‌هایی که بیش از یک حالت ظرفیت دارند و به‌طور کاتوره‌ای در جایگاه‌های شبکه توزیع شده‌اند، می‌باشد. [۱۶-۱۸]. شکل ۸ رسانندگی الکتریکی ac را بر حسب بسامد نشان می‌دهد که دیده می‌شود با افزایش بسامد رسانندگی الکتریکی افزایش یافته است. این امر را نیز می‌توان با مدل ماکسول-وگنر و نظریه کوپ توضیح داد. این دو مدل براساس رسانندگی ac در بسامدهای پایین توسط رفتار مرزدانه‌ها توصیف می‌شود در حالی‌که رسانندگی در بسامدهای بالا ممکن است به پراکندگی دانه‌ها نسبت داده شود [۱۹، ۲۰]. با افزایش بسامد میدان اعمالی، لایه رسانا فعال‌تر شده و از این‌رو انتقال الکترون بین یون‌های  $Fe^{2+}$  و  $Fe^{3+}$  را داریم، در نتیجه رسانندگی افزایش یافته است. از شکل ۸، مشخص است که در بسامدهای بالا قله‌ای ظاهر شده است که به دلیل بستگی

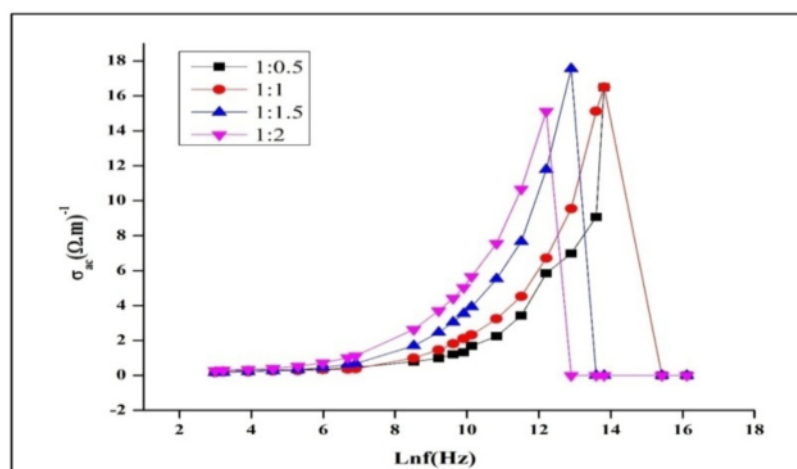
قوی بین رفتارهای الکتریکی و دی‌الکتریکی در فریت‌ها است. است بین یون‌ها با ظرفیت شیمیایی مختلف تشدید می‌شود زیرا در فرکانس‌های نسبتاً بالا پخش الکترون که عامل رسانایی [۱۷].



شکل ۶ نمودار قسمت حقیقی ثابت دی‌الکتریک نانوساختار  $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  برحسب بسامد در نسبت‌های مولی مختلف اسید سیتریک.



شکل ۷ نمودار اتلاف دی‌الکتریک نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$  برحسب بسامد در نسبت‌های مولی مختلف اسیدسیتریک.



شکل ۸ نمودار رسانندگی الکتریکی ac نانوساختار  $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$  برحسب بسامد در نسبت‌های مولی مختلف اسید سیتریک.



## نتایج

نانوساختار هگزافریت نوع - Y ( $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ) به روش سل-ژل خوداحتراقی تهیه و تأثیر سوخت اسید سیتریک با نسبت‌های مولی ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی آن بررسی شد. الگوهای XRD نشان داد که بهترین نمونه برای تشکیل نانوساختار هگزافریت نوع - Y تک فاز، نسبت مولی اسید سیتریک ۱٫۵ است. نتایج اندازه‌گیری مغناطیسی نمونه‌ها نشان داد که همه نمونه‌ها دارای ساختار مغناطیسی تک حوزه‌ای هستند. تصاویر FESEM نشان داد که نمونه‌های تهیه شده با نسبت‌های مولی ۰٫۵ و ۲ بیشترین ضخامت صفحات را دارند. نتایج اندازه‌گیری دی‌الکتریکی همه نمونه‌ها نشان داد که با افزایش بسامد میدان اعمالی، قسمت حقیقی ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک کاهش ولی رسانندگی افزایش یافته است که این رفتار را می‌توان با مدل دو لایه‌ای ماکسول و گنر و نظریه کوپ توضیح داد.

## مراجع

- hexaferrites prepared by sol-gel method*”, *Ceramics International*, 40, 5231 (2014).
- [5] Ali I., Islam M.U., Ashiq M.N., Khan H.M., Iqbal M.A., Najam-Ul-Haq M., “*Effect of Eu-Ni substitution on electrical and dielectric properties of Co-Sr-Y-type hexagonal ferrite*”, *Mater. Res. Bull.*, 49, 338 (2014).
- [6] Pullar R.C., “*A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics*”, *Journal of Progress in Materials Science*, 57, 1191 (2012).
- [7] Shoushtari M.Z., Ghahfarokhi S.M., Ranjbar F., “*A Study of the Morphological Properties of  $\text{SrFe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x= 0, 0.1, 0.2$ ) Hexaferrite Nanoparticles*”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 28, 1601 (2015).
- [8] Ali I., Shakoor A., Islam M.U., Saeed M., Ashiq M.N., Awan M.S., “*Synthesis and characterization of hexagonal ferrite  $\text{Co}_2\text{Sr}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  with doped polypyrrole composites*”, *Current Applied Physics*, 13, 1090 (2013).
- [9] Iqbal M.J., Ashiq M.N., Gul I.H., “*Physical, electrical and dielectric properties of Ca-substituted strontium hexaferrite ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) nanoparticles synthesized by co-precipitation method*”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322, 1720 (2010).
- [10] Ashiq M.N., Iqbal M.J., 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*, 487, 341 (2009).
- [11] Ghahfarokhi S.M., Rostami Z.A., Kazeminezhad I., “*Fabrication of  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles and study of their structural, magnetic and dielectric properties*”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 399, 130 (2016).
- [12] Ghahfarokhi S.M., Ranjbar F., Shoushtari M.Z., “*A study of the properties of  $\text{SrFe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  nanoparticles*”, *Journal of*
- [1] Elahi A., Ahmad M., Ali I., Rana M. U., “*Preparation and properties of sol-gel synthesized Mg-substituted Ni 2 Y hexagonal ferrites*”, *Ceramics International*, 39, 983 (2013).
- [2] Farzin Y.A., Mirzaee O., Ghasemi A., “*Influence of Mg and Ni substitution on structural, microstructural and magnetic properties of  $\text{Sr}_2\text{Co}_{2-x}\text{Mg}_{x/2}\text{Ni}_{x/2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}(\text{Co}_2\text{Y})$  hexaferrite*”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 371, 14 (2014).
- [3] Ali, I., Ahmad, M., Islam, M.U., Awan, M.S., “*Substitution effects of  $\text{La}^{3+}$  ions on the structural and magnetic properties of  $\text{Co}_2\text{Y}$  hexaferrites synthesized by sol-gel autocombustion method*”, *Journal of sol-gel science and technology*, 68, 141 (2013).
- [4] Mahmood S.H., Jaradat F.S., Lehlooh A.F., Hammoudeh A., “*Structural properties and hyperfine interactions in Co-Zn Y-type*

- [17] Aslam A., Islam M.U., Ali I., Awan M.S., Irfan M., Iftikhar A., "High frequency electrical transport properties of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  and  $\text{Sr}_2\text{NiMnFe}_{12}\text{O}_{22}$  composite ferrites", *Ceramics International*, 40, 155 (2014).
- [18] Ali I., Islam M.U., Ashiq M.N., Iqbal M.A., Khan H.M., Murtaza G., "Role of grain boundaries in the conduction of Eu–Ni substituted Y-type hexaferrites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 362, 115 (2014).
- [19] Sharma J., Sharma N., Parashar J., Saxena V.K., Bhatnagar D., Sharma K.B., "Dielectric properties of nanocrystalline Co-Mg ferrites," *Journal of Alloys and Compounds*, 649, 362 (2015).
- [20] Irfan M., Islam M.U., Ali I., "Effect of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  doping on the electrical transport properties of  $\text{Sr}_2\text{MnNiFe}_{12}\text{O}_{22}$  Y-type hexaferrite", *Current Applied Physics*, 14, 112 (2014).
- Magnetism and Magnetic Materials, 349, 80 (2014).
- [13] Iqbal M.J., Ashiq M.N., "Physical and electrical properties of Zr–Cu substituted strontium hexaferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method", *Chemical Engineering*, 136, 383 (2008).
- [14] Ali I., Islam M.U., Ashiq M.N., Iqbal M.A., Awan M.S., Naseem S., "Role of Tb–Mn substitution on the magnetic properties of Y-type hexaferrites", *Journal of Alloys and Compounds*, 599, 131 (2014).
- [15] Iqbal M.J., Farooq S., "Impact of Pr-Ni substitution on the electrical and magnetic properties of chemically derived nanosized strontium- barium hexaferrites", *Journal of Alloys and Compounds* 505, 560 (2010).
- [16] Chauhan C.C., Jotania R.B., Jotania K.R., "Conductivity and dielectric properties of M-type barium magnesium hexaferrite powder", *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies* 1, 25 (2012).