

# تأثیر دمای پخت بر خواص ساختاری، مغناطیسی و اپتیکی نانوساختار هگزافریت SrCoyFe<sub>۱۶</sub>O<sub>۲۷</sub>

نازنین علیرضایی ورنوسفادرانی، سید ابراهیم موسوی قهفرخی<sup>\*</sup> و مرتضی زرگر شوشتری گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۵/۶ – دریافت نسخه نهایی: ۱۹/۵/۱۹)

چکیده- در این پژوهش، نانوساختارهای هگزافریت نوع W با فرمول SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> بهروش سل – ژل خود احتراقی تهیه شدند. تأثیر دمای پخت بر خواص ساختاری، مغناطیسی و اپتیکی این نانوساختارها، بررسی شد. ریختشناسی و ساختار بلوری نمونهها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و پراش پرتوی ایکس مشخصهیابی شد. براساس نتایج حاصل از الگوهای پراش پرتو ایکس، مشاهده شد که در دمای پخت ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد بیشترین میزان فاز اصلی تشکیل شده است. بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان داد که ریختشناسی نمونههای ساخته شده، صفحهای است. برای تأیید تشکیل فاز اصلی از آزمون مادون قرمز تبدیل فوریـه استفاده شد. نتایج آنالیز مادون قرمز تبدیل فوریه تشکیل جایگاههای چهاروجهی و هشتوجهی بهعنوان ویژگی مهم هگزافریتها را تأییـد کرد. خواص مغناطیسی نمونهها توسط مغناطیس سنج نمونهٔ ارتعاشی اندازه گیری شد و نشان داد که با افزایش دما، مغناطیس ا افزایش می یابد. همچنین خواص اپتیکی نمونهها توسط آزمایش طیفسنجی جذب مرئی– فرابنفش و طیفسسنجی فوتولومینسانس مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج حاصل از هر دو طیف، اندازه شکاف انرژی تقریباً یکسان داد که با افزایش دما، مغناطیس ا

واژههای کلیدی: هگزافریت نوع W، سل- ژل خود احتراقی، دمای پخت، خواص ساختاری، خواص مغناطیسی، خواص اپتیکی.

# Effect of Annealing Temperature on the Structural, Magnetic and Optical Properties of SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> Hexaferrite Nanostructure

N. Alirezaei Varnosfaderani, S. E. Mousavi Ghahfarokhi<sup>\*</sup> and M. Zargar Shoushtari

Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

**Abstract:** In this paper, W-type SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> hexaferrite nanostructures were synthesized by sol-gel auto-combustion method. Effect of annealing temperature on the structural, magnetic and optical properties of these SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> nanostructures was investigated. In order to determine the annealing temperature of samples, the prepared gel was examined by thermo-gravimetric and differential-thermal analyses. Morphology and crystal structure of the prepared samples were characterized by field emission scanning electron microscopy and X-ray diffraction pattern. Based on X-ray diffraction results, at annealing temperature of 1000 °C, the maximum amount of main phase formed. A planar morphology was spectroscopy for the synthesized samples through scanning electron microscope images. Fourier transform infrared analysis was used to confirm the synthesis of the main

\* : مسئول مكاتبات، يست الكترونيكي: musavi\_ebrahim@yahoo.co.uk

phase. Results confirmed the formation of tetrahedral and octahedral sites as the important characteristic of hexaferrites. Magnetic properties obtained of samples were measured by the vibrating sample magnetometer and the results showed that by increasing temperature, magnetic saturation increases. Moreover, optical properties of samples were investigated by ultraviolet-visible absorption and photoluminescence spectroscopies. The result of measurements of the energy gap approximately is same in the ultraviolet- visible and photoluminescence spectroscopes and also the energy gap is constant with increasing temperature.

Keywords:	W-type	Hexaferrite,	Sol-gel	Auto-combustion,	Annealing	Temperature,	Structural	Properties,	Magnetic
	Propertie	es, Optical Pro	operties.						

			فهرست علائم
مغناطش اشباع	Ms	جذب لايه	А
عدد آووگادرو	NA	اندازه نانوبلورك	D
حجم سلول واحد	$\mathbf{V}_{cell}$	شكاف انرژى	$\mathrm{E}_{g}$
عدد اتمی	Z	ناهمسانگردی بلوری	Ha
ضخامت لايه	Z	وادارندگی مغناطیسی	Hc
ضريب جذب	α(λ)	ميدان مغناطيسزدا	$H_d$
زاویه براگ	θ	ثابت ناهمسانگردی	K
طول موج پرتو ایکس	λ	جرم ملكولي	М
طول موج شکاف انرژی	λg	مغناطش پسماند	Mr

#### ۱- مقدمه

وMe یک یون دو ظرفیتـی از قبیـل Nn، Fe، Me و Ni اسـت). در میان انواع مختلف هگزافریتها، هگزافریت نوع W با کاتیون Co بەدلیـل ناھمسـانگردی مغناطیسـی بـالا از نفوذپـذیزی مغناطیسـی بەنسبت بالايي برخوردار است [۵]. سنگ معدن مگنتوپلمبيت بـراي اولین بار در سال ۱۹۲۵ استخراج شد [۱]. سپس ساختار بلوری PbFe7.5Mn3.5Ti0.5O19 بالمصورت شاش وجهاي، در سال ۱۹۳۸ میلادی کشف شد [۱]. پس از آن ساختار PbFe12O19 و تعدادی از بلورهای همشکل مانند BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> کشف شدند و ساختار شش وجهبي أن توسط ونت و همكاران گزارش شد [۶]. تركيبات بيشتري توسط جانكر، ويجـن و بـراون بـهدسـت آمـد [٧]. اولـين گزارش ساخت هگزافریت نوع W بهصورت BaFe<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> بوده است [۶]. در سال ۱۹۸۰ میلادی لوتجرینگ و همکاران به ساخت و اندازه گیری گشتاور اشباع فرومغناطیس و ثابت ناهمسانگردی بـرای BaFe<sub>2-</sub>W و SrFe<sub>2</sub>-W پرداختنـد [۸]. پـس از آن در سـال ۱۹۸۷ کلومب و میگنات SrMn<sub>2</sub>-W و BaMn<sub>2</sub>-W را ساختند و به بررسے دمای کوری و دمای کلسینه پرداختند [۹]. در ۱۹۸۹

به کلیه مواد مغناطیسی که اکسید آهن بهعنـوان اصـلیتـرین عضـو ساختار بلوری آنها است، فریت گفته می شود و دارای خاصیت فرىمغناطيس هستند [١]. فريتها از مهمترين مواد مغناطيسي بهشمار میروند و بهدلیل داشتن ویژگیهای منحصر بهفرد، نظیر ضريب نفوذيذيري مغناطيسي، القاي مغناطيسي، مغناطش اشباع و مقاومت ویژه الکتریکی بالا، همواره مورد توجه پژوهشگران هستند [۲]. فریتها کاربردهای بسیار وسیعی را از قبیل صنایع برق، الکترونیک، مخابرات و رایانه بهخود اختصاص دادهانـد [۳]. فریـت های مغناطیسی به سه دسته با تقارن بلوری متفاوت تقسیم می-شوند: ۱) فریت های مکعبی ۲) گارنت ها و ۳) فریت های هگزاگونال [۴]. فریتهای هگزاگونال دارای ساختار بلوری شـش وجهی هستند این فریتها به هگزافریتهای نوع N، Y، W، Y اس و Z تقسیم میشوند (که از نظر فرمول شیمیایی و ساختاری با هم متفاوت هستند). فرمول عمومی هگزافریتهای نوع w بـهصـورت AMe2Fe16O27 است (کے در آن A عناصر Bb ،Ba یے Sr است بهنسبت پایین روش مناسبتری است. در این مقاله به ساخت نانوساختارهای SrCo2Fe<sub>16</sub>O27 از روش سل-ژل خود احتراقی پرداخته شده است و تأثیر دمای پخت بر خواص ساختاری، مغناطیسی و اپتیکی این هگزافریت مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲– مواد و روش تحقیق

برای تهیه نانوساختارهای SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> بهروش سل – ژل خود احتراقی از نیترات آهن نه آبه، نیترات کبالت شش آبه، نیترات استرانسیم، اسید سیتریک و آمونیاک با خلوص درصد از شرکت مرک آلمان استفاده شده است. در این روش از اسید سیتریک بهعنوان عامل احتراق، آمونیاک برای تنظیم pH و از آب یونزدایی شده بهعنوان حلال استفاده شده است.

#### SrCo2Fe16O27 سنتز نانو ساختار SrCo2Fe16O27

برای تهیه نانوس اختار SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> نیتراتهای آهن، استرانسیوم و کبالت بر اساس مقادیر استوکیومتری محاسبه و در ۱۲۰ میلیلیتر آب یونزدایی شده با همزن مغناطیسی حل شدند. بعد از ۱۵ دقیقه اسید سیتریک با نسبت مولی دو به یک در برابر نیتراتهای اولیه به محلول اضافه شد. محلول حاصل توسط یک همزن مغناطیسی بهمدت نیم ساعت در دمای اتاق به خوبی همزده شد. با اضافه کردن تدریجی آمونیاک PH محلول به عدد سه رسانیده شد و برای انجام واکنش مورد نظر، دما در ۱۰۰ درجه سانتی گراد تنظیم شد. برای خشک کردن ژل تهیه شده از یک آون الکتریکی با دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت استفاده شد. سپس ژل خشک را آسیا کرده و پودر تهیه شده در دماهای مختلف بهمدت چهار ساعت پخت شد [۱۹].

## ۲-۲- دستگاههای اندازهگیری

از ترازوی دیجیتالی مدل pw۱۲۴ با دقت ۸۰۰۰۰ گرم بهمنظور وزن کردن مواد، دستگاه pH متر مدل AZ86p3 برای تنظیم pH کوره مافل ساخت شرکت آذر کوره مدل PX-9 بهمنظور حرارت دادن نمونهها و از دستگاه پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> (XRD)

میلادی کلومب و همکاران به مطالعه پراش نوترونی ساختار بلوری و ساختار مغناطیسی SrZn<sub>23</sub>Mn<sub>43</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> پرداختند [۱۰]. در سال ۱۹۸۹ میلادی لیتسارداکیس و همکاران ساخت و بررسی خواص مغناطیسے Sr(Ba)Zn<sub>x</sub>Mn<sub>2-x</sub>-W را انجام دادند [۱۱]. در سال ۱۹۹۵ سورینگ و همکاران بهساخت BaZn<sub>2-x</sub>Co<sub>x</sub>-W پرداخته و آزمایش رزونانس مغناطیسی را در دماهای مختلف انجام دادند [۱۲]. پـس از آن احمـد و همكاران بـهساخت Bai-yLayZn<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Co-W بەروش حالت جامدى يرداختند و خواص مغناطیسی و دیالکتریکی را مورد بررسی قرار دادنـد [۱۳]. فایزا و همکاران به اثر جانشینی Ho<sup>+3</sup> بهجای Fe<sup>+3</sup> روی خواص مغناطیسے و دیالکتریکے ہگزافریتہےای باریم نوع W پرداختند [۱۴]. در سال ۲۰۱۱ میلادی خـان و همکـاران بـه نقـش جانشــينی Ce-Mn روی خــواص ســاختاری، مغناطیســی و دی الكتريكى Sr<sub>1-X</sub>Ce<sub>X</sub>Co<sub>2</sub>Mn<sub>Y</sub>Fe<sub>16-Y</sub>O<sub>27</sub> يرداختناد [10]. در سال ۲۰۱۱ محمدجواد اقبالو همكاران ساخت هگزافريت با تركيب BaCoZnFe16-2YAlyCeyO27 بەروش ھمرسوبى شىميايى پرداختند و فرکانس،های میکروموج را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. در سال ۲۰۱۶ قاسمی به ساخت SrCo<sub>2-x</sub>Mn<sub>x-</sub>W بهروش همرسوبی شیمیایی پرداخت و نقش جانشینی Mn روی دما، ساختار و خواص مغناطیسی را بررسی کرد [۱۷]. از خصوصیات منحصر به فرد فریتهای هگزاگونال، داشتن مقاومت ویژه بالای آنها است و بههمین دلیل، فریتهای هگزاگونال در معرض جریانهای گردابی قرار ندارند و می توان از آنها در فرکانس های بالا استفاده کرد. کاربرد فریتهای هگزاگونال در محیطهای ذخیرهسازی مغناطیسی با حجم بالا، وسایل ارتباطی ماهوارهای، مایکروویو و جذب عناصر سنگین است [۱ و ۱۸]. روش های تولید در تهیه نانوساختارها نقش بسزایی در تعیین اندازه، پایداری و ریختشناسی مواد تولید شده دارند و باعث ایجاد خواص متفاوتی در آنها می شوند. روش-های مختلفی برای ساخت هگزافریت ها از قبیل سل- ژل خود احتراقی ، آبیحرارتی، همرسوبی و روش میکرو امولوسیون وجـود دارد. در بین این روشها، روش سل- ژل خود احتراقی، بـهدلیـل تولید محصولی همگن با درجه خلوص بالا، دما و زمان پخت

مدل ۲۸۴۰–PW ساخت شرکت فیلیپس با آند مسی و طول موج (۸۴۶۵)=۸ آنگستروم) به منظور شناسایی فاز نمونه ها استفاده شده است. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۲</sup> (FESEM) ساخت شرکت TESCAN کشور چک به منظور بررسی ریزساختار، ریخت شناسی و اندازه نانوذرات و از دستگاه مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی<sup>۳</sup> (VSM) به منظور بررسی خواص مغناطیسی نمونه ها و از دستگاه تبدیل فوریه مادون قرمز<sup>۴</sup> (FT-IR) ساخت شرکت ABB مدل (VTB10) اسپکتروفو تو متر استفاده شد. طیف جذبی با استفاده از دستگاه اسپکتروفو تو متر (UV-visible)، مدل Teifsanje P.P. Co. Ltd، دستگاه (PL)، مدل Thermo اندازه گیری شدند.

٣- نتايج و بحث

آزمایشهای آنالیز حرارتی وزنسنجی و آنالیز حرارتـی تفاضـلی آنالیز حرارتی وزنسنجی<sup>۵</sup> (TGA) برای اندازهگیری جـرم نمونـه بهعنوان تابعی از دما بهکار میرود. اندازهگیری پیوسته افت وزنـی در اثر تجزیه یا از دست دادن آب و افزایش وزن بهدلیل جـذب اکسیژن یا اکسید شدن با استفاده از ایـن روش انجـام مـیشـود. همچنین در روش آنالیز حرارتی تفاضلی<sup>۶</sup> (DTA) وقتی نمونهای با سرعت ثابت گرم می شود، سرعت افزایش دمای نمونه، با تغییر حرارتی بهوجود آمده در نمونه، تغییر میکند. اگر یک ماده بیاثـر (معمولاً ألومينيوم نوع α) بهعنوان مرجع بهكار برده شود، بين ايـن دو، اختلاف دما بهوجود مي آيد. اين اختلاف دما به شكل قله گرماگیر، گرمازا یا جابهجایی خط پایـه معـادل و بـا مقـدار تغییـر گرمایی نمونه ظاهر میشود. در طول رفتار حرارتی مواد، چندین فرايند مانند تبخير آب، تجزيه، خروج گازها، شکل گیری فازهای اصلي و ناخالصي مؤثر هستند. همان طور كه در شكل (۱- الـف) مشاهده می شود، منحنی TGA برای ژل خشک با pH = ۳ دارای ۴ مرحله مجزا برای کاهش وزن است. در اولین مرحله، تغییرات دمایی از ۳۰ درجه سانتی گراد تا حدود ۱۶۰ درجه سانتی گراد

است که این کاهش وزنی به دلیل تبخیر آب و نیترات های باقی مانده در ژل است. دومین کاهش وزن از دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد تا حدود ۴۰۰ درجه سانتی گراد می تواند به دلیل سوختن اسید سیتریک و تبخیر موادآلی به صورت گازهای مونواکسید کربن و دی اکسید کربن باشد. سومین کاهش وزن در بازه دمایی ۴۰۰ تا ۶۸۰ درجه سانتی گراد مربوط به تبخیر کامل مواد آلی است [۵]. چهارمین مرحله در بازه دمایی ۶۸۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد است که وزن نمونه تقریباً ثابت باقی مانده است و کاهش وزن قابل ملاحظهای وجود ندارد پس در این مرحله، احتمال تشکیل فاز هگزافریت SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> وجود دارد [۵۰ ۲۶].

در شکل (۱– ب) منحنی DTA ژل خشک با ۳ = pH رسم شده است. بر اساس این نمودار قلههای گرماده و درههای گرماگیر قابل مشاهده است؛ بهطوری که قلههای گرماده در دماهای ۱۶۰، ۲۰۰، ۲۴۰، ۳۸۰ و ۷۸۰ درجه سانتی گراد و درههای گرماگیر در دماهای ۱۹۰، ۳۰۰، ۵۴۰ درجه سانتی گراد هستند. قله گرماده در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد بیانگر تبخیـر نیتراتها است. همچنین قلههای گرماده در دماهای ۲۰۰ و ۲۴۰ درجه سانتی گراد بهدلیـل خـروج گازهـای مونواکسـید کـربن و دىاكسيد كربن ناشى از تجزيه مواد آلى هستند. قلـه گرمـاده در ۳۸۰ درجه سانتی گراد ناشی از شکل گیری فاز ناخالصی است که احتمال میرود که این فاز، در دمای ۵۴۰ درجه سانتی گراد از بین رفته و یک دره گرماگیر را ایجاد کرده باشد. در دمای ۷۸۰ درجه سانتی گراد نیز با احتمال تشکیل فاز اصلی SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> قله دیگری را مشاهده میکنیم. درههای گرماگیر در دمای ۱۹۰ و ۳۰۰ درجه سانتی گراد بیانگر تبخیر آب باقی مانده در ژل هستند [۵، ۲۰ و ۲۱].

۳-۱- آنالیز پراش پرتو ایکس
شکل (۲- الف) و (۲- ب) الگوهای پراش پرتوی ایکس
(XRD) نمونههای تهیه شده با ۳ = PH در دماهای مختلف را



شکل ۱- منحنیهای: الف) آنالیز حرارتی وزنسنجی و ب) آنالیز حرارتی تفاضلی ژل خشک نانو ساختار SrCo2Fe16O27 با ۳ = ۳

Sr2Co<sub>2</sub>Fe<sub>12</sub>O<sub>22</sub> (♦) و (۹۰۹۰–۵۵۴–۰۰) ناخالصی Sr<sub>2</sub>Co<sub>2</sub>Fe<sub>12</sub>O<sub>22</sub> (\*) هستند؛ مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج بـهدست آمـده از پـراش پرتوی ایکس در دماهای مختلف در جـدول (۱) آورده شـده است. نشان میدهد. برای شناسایی فاز نمونـههـا از پـراش پرتـوی ایکـس و نــرم افــزار x'pert high score اســتفاده شــد. همــه نمونــههــا با کارتهای<sup>v</sup> JCPDS بهشـماره (۱۰۶ه-۵۴-۰۰) کـه مربـوط بـه



شکل ۲– الف) الگوی پراش پرتو ایکس نانو ساختار SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد و ب) الگوی پراش پرتو ایکس نانوساختار SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> در دماهای مختلف

جدول ۱- درصد فاز و خواص ساختاری نانوساختاری SrCo2Fe16O27 در دماهای مختلف

$d_x(g.cm^{-3})$	D (nm)	V <sub>cell</sub>	c (Å)	a (Å)	درصد تشکیل فاز اصلی	دما (سانتی گراد)
۵/۲۲	٣۴	٩٧٣/٩٣	۳۲,۳۶	۵٫۸۹	V۲	V o o
۵/۱۷	١٩	۹۸۱٬۸۰	۳۲٫۷۱	$\Delta/\Lambda\Lambda$	۷۰	٨٠٠
۵/۱۸	٣٢	٩٨٠٫٨۴	۳۲,۷۳	$\Delta/\Lambda\Lambda$	٩٥	٩٠٥
0,18	24	٩٨٥,۵۶	۳۲,۹۷	$\Delta/\Lambda V$	٩٩	1000
$\Delta/1V$	r	٩٨٢,0۶	۳۲,۷۲	$\Delta/\Lambda\Lambda$	٨٢	1100
۵٫۱۵	74	918/10	۳۲٬۵۹	۵/۹۱	٧٠	1700

می توان نتیجه گرفت که در دمای پخت ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد بیشترین درصد فاز اصلی تشکیل شده است. دمای پخت بهینه در همچنین مقادیر ثابت شـبکه، حجـم سـلول، انـدازه نـانوبلورکهـا و چگالی پرتوی ایکس در این جدول آورده شده است. از جـدول (۱)

این تحقیق برای SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> (۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) است که نسبت بهروشهای دیگر از جمله روش همرسوبی شیمیایی (۱۱۰۰ درجه سانتی گراد) و روش حالت جامدی (۱۲۰۰–۱۳۰۰ درجه سانتی گراد) کاهش یافته است [۱۷ و ۲۲]. بهکمک رابطه:

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

پارامترهای شبکه هگزاگونال (a ,c) را می توان تعیین کرد. که در آن (k و l ، h) اندیسهای میلـر و d<sub>hkl</sub> فاصـله صـفحات مربوط به آنها است. حجم سلول (v<sub>cell</sub>) در ساختار هگزاگونـال از رابطه:

$$v_{cell} = a^2 c \sin 120 = 0 / 86a^2 c$$
 (Y)

بهدست میآید. همچنین میانگین اندازه نانوبلورکها بـا اسـتفاده از رابطه شرر:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta\cos\theta} \tag{(7)}$$

محاسبه شد. در رابطه (۳)، D اندازه نانو بلورکها، β پهنای قلـه در نصف بیشینه ارتفـاع برحسـب رادیـان، λ طـول مـوج پرتـو ایکس، θ زاویه بـراگ و K عـدد ثابـت (۰/۸۹) اسـت. چگـالی نمونه با استفاده از دادههای پرتوی ایکس (d<sub>x-ray</sub>) از رابطه:

$$d_{x-ray} = \frac{ZM}{N_A V}$$
(4)

بهدست می آیـد. در رابطـه (۴)، M وزن مولکـولی ترکیـب،N عددآووگادرو، Z تعداد واحدهای فرمولی در سلول واحـد و V حجم سلول واحد است [۱۵ و ۲۲].

همان طور که از شکل (۲ – ب) مشاهده می شود، نمونه تهیه شده در دماهای ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد علاوه بر SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>12</sub>O<sub>27</sub> فاز (•) دارای فاز Sr<sub>2</sub>Co<sub>2</sub>Fe<sub>12</sub>O<sub>27</sub> (\*) است که این به دلیل کافی نبودن دمای پخت است؛ زیرا فاز هگزاگونال نوع W معمولاً در دمای بالا تشکیل می شود. وقتی دمای پخت به ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد افزایش داده می شود، فاز ناخالصی ناپدید شده و شدت قلهها و درنتیجه میزان به بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد افزایش داده می شود، قلههای به بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد افزایش داده می شود، قلههای

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

محو شدن هستند. دلیل کاهش شدت قلهها میتواند مربوط به بالا رفتن دما و درنتیجه خروج استرانسیم موجود در نمونه باشد.

نتایج موجود در جدول (۱)، نشان میدهند که با افزایش دما، ثابتهای شبکه a و c تغییر چندانی ندارند. حجم سلول واحد با افزایش دما، با وجود نوسانات زیاد به طور کلی افزایش یافته است که علت افزایش حجم سلول واحد به کهش تهی-جاهای اکسیژن در ساختار هگزافریت مربوط است [۲۳]. اندازه نانوبلورکها، با افزایش دما، کاهش مییابد چرا که با افزایش دما بهدلیل پدیده ذوبشدگی، لایهها در هم فرو رفتهتر شدهاند و فضاهای خالی مابین ذرات کمتر شده است. مقادیر چگالی بر مبنای پرتو ایکس نمونهها، با افزایش دما، به طور کلی کهش میافته است زیرا با افزایش دما، حجم سلول واحد بزرگتر شده یافته است زیرا با افزایش دما، حجم سلول واحد بزرگتر شده و در نتیجه با توجه به رابطه (۴) چگالی نمونهها کاهش مییابد.

### ٣-٢- آناليز بينابسنجي مادون قرمز تبديل فوريه

آناليز بيناب سنجي مادون قرمـز تبـديل فوريـه (FT-IR) روشـي بسیار سودمند برای شناسایی، بررسمی کیفمی و تعیمین مقادیر اجزای تشکیل دهنده یک ماده، بر اساس اندازه گیری فرکانس ارتعاشی باندهای شیمیایی بین اتمها است. این آنالیز برای تأیید تشکیل ساختار در نمونه های فریتی کمک بسزایی میکند. در شکل (۳)، طیف بهدست آمده در دستگاه طیفسنجی مادون قرمز تبديل فوريه نشان داده شده است. شكلهاى (٣- الـف) و(٣-ب) بهترتيب طيف هاي عبور و جذب هگزافريت SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> را نشان میدهند. در فاصله عـدد مـوجی ۴۰۰ – ۵۰ بر سانتیمتر دو قله پهن اصلی، پیوند اکسیژن – فلز در نمونههای تهیه شده دیده میشود [۵]. قله بزرگتر مربوط به ارتعاشات کششی چهاروجهی پیوند اکسیژن- فلز و قله کوچکتر مربوط به ارتعاشات در جایگاههای هشتوجهی اکسیژن – فلز است [۲۴]. همانگونه که در شکل (۳) مشخص است در نمونه قبل از پخت (ژل احتراقی)، پیوند جذبی در ۴۲۰ بر سانتیمتر بیانگر تشکیل جایگاههای هشتوجهی و پیوند



شکل ۳– بینابهای مادون قرمز با تبدیل فوریه: الف) طیف عبوری و ب) طیف جذبی ژل خشک و نانوساختار SrCo2Fe16O27 تهیه شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

توان به مولکولهای آب جذب شده و ارتعاشات کششی H -O (آب) نسبت داد [۱۹]. با توجه به نمونههای بازپخت شده می توان دریافت که پیوندهای مربوط به ارتعاشات کششی NO<sup>3-</sup> دNO تجزیه شده و همچنین قلههای بزرگ مربوط به آب در نمونههای بازپخت شده بسیار ناچیز شدهاند. در نمونههای پخت شده، قله ظاهرشده در ۱۷۲۲ بر سانتی متر مربوط به گروههای کربوکسیل است. همچنین قله ظاهر شده در ۲۹۲۶ در ۶۴۱ بر سانتی متر متناظر با جایگاه های چهاروجهی است که این قله ها در نمونه های پخت شده دارای ارتفاع بیشتری هستند که بیانگر تأثیر پخت، در کوتاه تر و مستحکم تر شدن این پیوندها است. همچنین پیوند جابی در حوالی ۱۹۶۱، ۵۵۰ و ۱۳۸۴ بر سانتی متر مربوط به پیوند ارتعاشات کششی <sup>- ۱</sup>۸۵ مبنی بر حضور نیترات ها قبل از پخت است. پیوندهای جذبی در نواحی ۳۰۳۴ و ۱۹۲۴ بر سانتی متر را می



شکل ۴– تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی نانوساختارهای SrCo2Fe16O27 در دماهای: الف) ۷۰۰، ب) ۱۰۰۰ و ج) ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد

خوداحتراقی بهدلیل نرخ واکنش و دمای بهنسبت بالا، یک فرایند غیر تعادلی برای تولید ذرات سرامیکی است. بنابراین ریخت های مختلفی از ذرات تولیدی در این روش قابل مشاهده است. شکلهای (۴- الف) تا (۴- ج) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نانوساختار SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> در دماهای مختلف را نشان میدهد. ریخت نمونهها تقریباً صفحهای است ولی از آنجایی که نمونه ها دارای خاصیت مغناطیسی هستند، باعث کلوخهای شدن آنها شده است. با افزایش دما به دلیل پدیده ذوب شدگی، لایه ها درهم فرو رفته تر شدهاند و فضاهای صحیح بین صفحات کمتر شده است.

۳-۴- بررسی خواص مغناطیسی نمونهها شکل (۵) منحنی پسماند مربوط به نانوساختارهای بر سانتی متر مربوط به ارتعاشات پیوند C-H است. در این شکل ارتعاشات کششی مربوط به H-O در عدد موجی ۳۴۳۱ بر سانتی متر قابل ملاحظه است. همان طور که از نمودارها مشاهده می شود مدهای ارتعاشی جایگاه های چهاروجهی در مقایسه با جایگاه های هشت وجهی بزرگتر هستند که این ناشی از طول پیوند کوتاهتر جایگاه های چهاروجهی است.

۳–۳– تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی ریختشناسی یک بلور بهوسیله فاکتورهای ساختاری ذاتی و بیرونی تعیین میشود. در شرایط تعادلی فاکتورهای ذاتی منجر به تشکیل بلوری با کمترین انرژی سطح میشود. شرایط بیرونی طی فرایندهای مختلف تولید باعث میشود که شکل بلوری از حالت تعادلی دور شده و ریخت متفاوتی بهدست آید. سنتز

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

49



شکل ۵- الف) حلقههای پسماند مغناطیسی و ب) منحنیهای مغناطش نانوساختارهای SrCo2Fe16O27 در دماهای مختلف

SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> ساخته شده در دماهای مختلف را نشان میدهد. خواص مغناطیسی نمونه ها با استفاده از حلقه های پسماند مغناطیس (VSM) محاسبه شد. مغناطش اشباع (M<sub>s</sub>)، مغناطش پسماند (M<sub>r</sub>) و وادارندگی مغناطیسی (H<sub>c</sub>) از حلقه های پسماند بهدست آمده و با استفاده از رابطه:

$$k = \frac{\sqrt{15}}{2} H_c M_s \tag{(a)}$$

ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورین (K) محاسبه شد.

همچنـین Ha بیـانگر ناهمسـانگردی بلـوری و Hd میـدان

مغناطیسزدا است که توسط رابطههای: (۶)

$$H_{d} = H_{a} - \frac{H_{c}}{0/48}$$
(V)

محاسبه مي شوند.

نتایج حاصل در جدول (۲) آورده شده است [۱۷]. شکل و پهنای حلقه پسماند مغناطیسی به عواملی چون ترکیب شیمیایی، شرایط ساخت، تخلخل و اندازه ذرات وابسته است [۲۵]. از جدول (۲) می توان دریافت که با افزایش دما، Ms افزایش

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7 ]

 $H_a = \sqrt{15}H_c$ 

170	• \•••	۷۰۰	دما (سانتی گراد)
٨٨	. 97	۵۲	M <sub>s</sub> (emu/g)
۶	بربد	۲۱	Mr(emu/g)
۵۸	۲۵۸۰	1940	H <sub>c</sub> (Oe)
٩٨۵	09 moqQof	190177	K(emu/g)Oe
• / •	۶ •/۵۳	۰٬۴۰	$M_r/M_s$
77	4974	V۵°V	H <sub>a</sub> (Oe)
١٠١	* ***•9	3480	H <sub>d</sub> (Oe)
-			

جدول ۲- خواص مغناطیسی نانوساختارهای SrCo2Fe16O27 با دماهای مختلف

$$\alpha(\lambda) = \left(\frac{2/303}{z}\right) A \tag{(A)}$$

تعریف میشود، که در آن z ضخامت لایه و α ضـریب جـذب است. با استفاده از 1/λ=1/λ و رابطه:

$$E_{g} = \frac{1239/83}{\lambda_{g}} \tag{4}$$

می توان شکاف انرژی را محاسبه کرد [۲۸].

با توجه به نمودارهای (۶- الف) و (۶- ب) می توان نتیجه گرفت که تمام قلههای جذبی در ناحیه فرابنفش است و جذب ثابت در ناحیه مرئی رخ داده است. اندازه شکاف اپتیکی انرژی با افزایش دما تقریباً ثابت است؛ یعنی می توان نتیجه گرفت که در دماهای پایین، وجود فاز ناچیز ناخالصی و در دماهای بالا، شروع به تبخیر شدن استرانسیم، تأثیر چندانی بر فاصله بین نوار رسانش و ظرفیت نداشتهاند و ساختار اصلی همچنان پا بر جا است که بهدلیل استحکام ساختار نوری نمونه در برابر تغییر دما است.

می یابد. افزایش Ms با افزایش دما تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به سبب تكامل فاز SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> و حذف فاز ناخالصی است. از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به بالا با شروع تبخیر استرانسیم و خارج شدن جایگاه آن توسط Co یا Fe اشغال می شود که هر دو دارای خاصیت مغناطیسی بالایی هستند؛ درنتیجه Ms افزایش یافته است. نسبت چهاروجهی منحنبی یسماند ( (Mr/Ms) برای مقادیر بزرگتر از ۵/۰ نشاندهنده آن است که نانوساختار تک حوزه مغناطیسی است و با توجه به نتایج جدول (۲) می توان نتیجه گرفت که نمونه ساخته شده در دمای •••• درجه سانتی گراد دارای نانوساختار تک حوزه مغناطیسی است درحالی که نمونههای ساخته شده در دمای بالاتر و پایین تر تک حوزه مغناطیسی نیستند و این بهدلیل بالاتر بودن درصـد تشکیل فاز اصلی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به دماهای دیگر است. اما پارامترهای H<sub>a</sub> ،K ،H<sub>c</sub> ،M<sub>r</sub> و H<sub>d</sub> در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد (دمای بهینه ساخت) بیشترین مقدار خود را دارند که بهدلیل تک حوزه بودن ذرات در این دما است [۱۷ و ۲۶].

نمونه با دمای بهینه ( ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) در این  $H_a$  مهرنه با دمای بهینه ( ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) در این  $H_a$  - RC02Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> دیگر با افزایش SrC02Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub>  $m_{-}$  ده است به طوری که SrC02Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> ساخته  $H_a$  = ۲۸۰۰ (Oe) ساخته شده بهروش همرسوبی شیمیایی SrC02Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> دارای H<sub>a</sub> = ۱۳۶۰(Oe)



شکل β- الف) منحنی های جذب برحسب طول موج و ب) نمودار 'hLn(Aλ<sup>-1</sup>)/dλ<sup>-1</sup> برحسب'<sup>-</sup>λ برای نانوساختار های SrCo2Fe16O27 با دماهای مختلف

## ب) طيفسنجي فوتولومينسانس

فوتولومینسانس (PL) ، یک روش بسیار مفید برای بررسی شکاف انرژی نیمرساناها است. یک ویژگی فیزیکی اساسی طیف فوتولومينسانس، گسيل همزمان فوتون از يک ماده تحت برانگیختگی نوری است. طیفسنجی فوتولومینسانس یک روش غیر مخرب و ابزاری فرق العاده حساس برای مطالعه و بررسی انتقالات الکترونی در نیمرساناها است. اندازه گیری های

فوتولومينسانس اطلاعاتي مانند شكاف انرژي، حضور ناخالصيها و کیفیت نوری ماده را در اختیار می گذارد. طیف فوتولومینسانس بـا استفاده از یک لامپ زنون بهعنوان منبع تحریک با طول موج ۲۴۵ نانومترحاصل شد. بـهطور کلـی يـک قلـه مهـم در طيـف فوتولومینسانس نانوساختارهای SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> با دماهای مختلف ظاهر شده ، که این قله در ناحیه فرابنفش است. دلیل نشر در ناحیه فرابنفش، ناشی از بازترکیب اکسایتون، ای آزاد است که از یک

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7 ]



شکل ۷- منحنی های فو تولومینسانس برای نانوساختار های SrCo2Fe16O27 با دماهای مختلف

جدول ۳- طول موج قله و شکاف انرژی مربوط به نانوساختارهای SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> در دماهای مختلف

Eg (ev)	$\lambda_{g(nm)}$	دما (سانتیگراد)
٣/٨٥	۳۲۱,۶	<u>۷</u> ۰۰
٣ <sub>/</sub> vv	٣٢٨,٢	1000
٣/٩ •	riv,a	١٢٠٠

فوتولومینسانس مواد، به توزیع و شکل ذرات وابسته است. به طور کلی، مشخصه لومینسانس برای ذرات یکسان بهدلیل وجود ناخالصی های کمتر یا لایه های مرده کمتر در سطح مواد، مناسبتر هستند. همان طور که ملاحظه می شود، نتایج حاصل از طیف نگاری های جذب مرئی فرابنفش و فوتولومینسانس اندازه شکاف انرژی را تقریباً یکسان به دست می دهند و نتایج حاصل از آنها در توافق با یکدیگر است (جدول ۳).

# ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، هگزافریت SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> بهروش سل – ژل خود احتراقی ساخته و اثر دما روی خواص ساختاری، مغناطیسی و اپتیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش پراش پرتو ایکس نمونه ها نشان می دهد که در دمای فرایند برخورد یا کسایتون اکسایتون ظاهر می شوند و به عنوان نشر، نشر لبه نوار نزدیک (NBE) شناخته شده هستند [۲۹]. قله نشر فرابنفش در طیف فوتولومینسانس به کیفیت ساختارهای رشد داده شده بستگی دارد. به طوری که اگر کیفیت بلوری نانوساختارهای رشد داده شده بهبود یابد، شدت قله فرابنفش نیز افزایش مییابد [۳۰]. با توجه به شکل (۷)، میتوان دریافت که شدت قله ها با افزایش دما کاهش یافته است. بالا بودن قله فوتولومینسانس در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد میتواند ناشی از فاز ناخالصی تشکیل شده در این دما باشد اما با مقایسه قله فوتولومینسانس در دمای مودا درجه سانتی گراد شدت قله گسیل فوتولومینسانس بهدلیل مودا درجه سانتی گراد شدت قله گسیل فوتولومینسانس بهدلیل مودا درجه سانتی گراد شدت قله گسیل فوتولومینسانس بهدلیل باوری شدن ذرات، قویتر شده است که با نتایج حاصل از الگوی پراش پرتوی ایکس نیز مطابقت دارد. همچناین شد

بیشترین مقدار خود را دارند و همچنین نمونه ساخته شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد تک حوزه مغناطیسی است. با بررسی طیف سنجی جذب مرئی – فرابنفش نتیجه گرفته شد که تمام قلههای جذبی در ناحیه فرابنفش است و اندازه شکاف اپتیکی با افزایش دما تقریباً ثابت است، این نتایج توسط طیف سنجی فوتولومینسانس نیز مورد تأیید قرار گرفت. با مقایسه قله مانتی گراد می توان دریافت که در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد شدت قله گسیل فوتولومینسانس بهدلیل بلوری شدن ذرات، شدت قله گسیل فوتولومینسانس بهدلیل بلوری شدن ذرات، ایکس نیز مطابقت دارد. هگزافریت SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> ساخته شده ماخت دیگر از دمای بهینه پایین تر و خواص مغناطیسی بالاتری ساختی باروش بالاتری

- 1. X- ray Diffraction
- 2. field emission scanning electron microscopy
- 3. vibrating sample magnetometer
- 4. fourier-transform infrared spectroscopy
- 5. thermogravimetry analysis
- Pullar, R. C., "Hexagonal Ferrites: A Review of the Synthesis, Properties and Application of Hexaferrite Ceramics", *Progress in Material Science*, Vol. 57, pp. 1191-1334, 2012.
- Nakamura, T., "Complex Permeability of Polycrystalline Hexagonal Ferrites", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, pp. 3415-3417, 2000.
- Anis-ur-Rehman, M. S., and Asghar, G., "Variation in Structural and Dielectric Properties of Co-precipited Nanoparticles Strontium Ferrites Due to Value of pH", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 435-439, 2011.
- Kianvash, A., and Seyed Ebrahimi, A., "Optimization of MType Ferrite Strontium Ceramic Magnets Production Process for High Magnetic Properties", 2nd Iranian Ceramic Congress, 1995.
- Silva, J., Brito, W., and Mohallem, N., "Influence of Heat Treatment on Cobalt Ferrite Ceramic Powders", Materials Science and Engineering, Vol. 112, pp. 182-184, 2004.
- Went, J. J., Rathenau, G. W., Gorter, E. W., and Van Oosterhout, G. W., "Hexagonal Iron-oxide Compounds as Permanent-Magnet Materials", *Physical Review*, Vol. 13, p. 194, 1952.

پخت ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد بیشترین درصد تشکیل فاز اصلی تشکیل شده است. چگالی برحسب پرتو ایکس نمونهها و همچنین اندازه نانوبلورکها، با افزایش دما، کاهش یافتهاند. نتایج آزمایش مادون قرمز تبدیل فوریه تشکیل ساختار هگزافریت مورد نظر در نمونهها را مورد تأیید قرار داد. با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی مشخص شد که ریخت نمونهها تقریباً صفحهای است ولی از آنجایی که نمونهها دارای خاصیت مغناطیسی هستند، باعث کلوخهای شدن آنها شده است. با افزایش دما بهدلیل پدیده فوبشدگی، لایهها در هم فرو رفتهتر شدهاند و فضاهای خالی مغناطیسسنج نمونه ارتعاشی خواص مغناطیسی نمونهها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد کلیه پارامترهای بهینه ساخت) براه له در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد (دمای بهینه ساخت)

#### واژەنامە

- 6. differential thermal analysis
- 7. Joint committee on powder diffraction standards
- 8. Ultraviolet- visible spectroscopy
- 9. photoluminescence spectroscopy

10. near bond edge

مراجع

- Jonker, G., Wijn, H., and Braun, P. B., "A New Class of Oxidic Ferromagnetic Materials with Hexagonal Crystal Structures", *Proceedings of the IEE-Part B: Radio and Electronic Engineering*, Vol. 18, p. 145, 1956.
- Lotgering, F. K., Locher, P. R., and Vanstapele, R. P., "Anisotropy of Hexagonal Ferrites with M, W and Y Structures Containing Fe<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup> as Magnetic Ions", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 41, pp. 481-487, 1980.
- Collomb, A., and Mignot, J. P., "Ba(Sr)Mn<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub>W-type Hexagonal Ferrites as Permanent Magnets", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 69, pp. 330-336, 1987.
- Collomb, A., Litsardakis, G., Samaras, D., and Pannetier, J., "Neutron Diffraction Studies of the Cristalographic and Magnetic Structures of SrZn<sub>23</sub>Mn<sub>43</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub>", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 78, pp. 219-225, 1989.
- Litsardakis, G., Samaras, D., and Collomb, A., "Magnetic Properties of the Sr(Ba)Zn<sub>x</sub>Mn<sub>2-x</sub>-W Hexagonal Ferrites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 81, pp. 184-188, 1989.
- 12. Suring, C., Hempel, K. A., Muller, R., and Gornert, P.,

"Investigations on Zn<sub>2-x</sub>Co<sub>x</sub>W-typehexaferrites Powder at Low Temperatures by Ferromagnetic Resonance", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 150, pp. 270-276, 1995.

- Ahmed, M. A., Okasha, N., and Kershi, R. M., "Dramatic Effect of Rare Earth Ion on the Electrical and Magnetic Properties of W-type Barium Hexaferrites", *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 405, pp. 3223-3233, 2010.
- 14. Faiza, A., "Effect of Holmium on the Magnetic and Electrical Properties of Barium Based W-type Hexagonal Ferrites", *Ceramics Internationa*, Vol. 37, pp. 1725-1729, 2011.
- Khan, I., Sadiq, I., Ashig, M. N., and Rana, M., "Role of Ce-Mn Substitution on Structural, Electrical and Magnetic Properties of W Type Strontium Hexaferrites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 8043-8046, 2011.
- Iqbal, M. J., "W-Type Hexaferritenanoparticles:A Consideration for Microwave Attenuation at Wide Frequency Band of 0.5-10 GHz", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 7618-7624, 2008.
- Ghasemi, A., "Stoner-Wohlfarth Rotation or Domain Wall Motion Mechanism in W-type Magnetic Hexaferrite Nanoparticles", *Ceramics International*, Vol. 42, pp. 4143-4149, 2016.
- Patel, H. A., Byun, J., and Yavuz. C. T., "Arsenic Removal by Magnetic Nanocrystalline Barium Hexaferrite", *Journal* of Nanoparticle Research, Vol. 14, pp 163-169, 2012.
- Trif, L., Tolnai, G., Sajo, I., and Kalman, E., "Preparation and Characterization of Hexagonal W-Type Barium Ferrite Nanoparticles", *Progress in Colloid & Polymer Science*, Vol. 135, pp. 38-43, 2008.
- Mousavi Ghahfarokhi, S. E., Rostami, Z. A., and Kazeminezhad, I., "Fabrication of PbFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> Nanoparticles and Study of Their Structural, Magnetic and Dielectric Properties", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 399, pp. 130-142, 2016.
- Mali, A., and Ataei, A., "Mechanism of the Formation of Nano-Crystalline Barium Hexaferrite in the Sol-Gel Combustion Method", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 16, pp. 111-116, 2005.
- Leccabue, F., Panizzieri, R., Albanese, G., Leo, G., and Almodovar, N. S., "Magnetic and Mössbauer Study of Coprecipitated SrNi<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> (SrNi<sub>2</sub>- W) and SrCo<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub>

(SrCo<sub>2</sub>- W) Hexagonal Ferrites", *Materials Research Bulletin*, Vol. 23, pp. 263-275, 1988.

- 23. Mousavi Ghahfarokhi, S. A., Heidari, N., Zargar and Shoushtari, M., "An Investigation of Molar ratio Acid Citric on the Structure, Magnetic and Dielectric Properties SrNi<sub>2</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> Nanostructure", *Journal of Research on Many-body Systems*, Vol. 6, pp. 35-48, 2016.
- 24. Ketov, S. V., Yagodkin, Y. D., Lebed, A. L., Chernopyatova, Y. V., and Khlopkov, K., "Structure and Magnetic Properties of Nanocrystalline SrFe12O19 Alloy Produced by High-energy Ball Milling and Annealing", Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 300, pp. 479-481, 2006.
- 25. Mousavi Ghahfarokhi, S. A., Bazdar, F., and Kazeminezhad, I., "The Effect of Annealing Temperature on the Structural, Magnetic and Dielectric Properties of PbFe<sub>11.8</sub>Ni<sub>0.2</sub>O<sub>19</sub> Nanoparticles", *Journal of Advanced Materials in Engineering*, Vol. 36, pp. 67-81, 2017.
- 26. Ahmad, M., Ali, I., Aen, F., Islam, M., and Ashiq, M. N., "Effect of Sintering Temperature on Magnetic and Electrical Properties of Nanosized Co2 W Hexaferrites", *Ceramics International*, Vol. 38, pp. 1267-1273, 2012.
- 27. Salehzade, M., Ghasemi, A., and Gardani, Gh., "Fabrication of Strontium W-Type Hexaferrite Nanoparticles by Cohesive Method and the Influence of Temperature on Its Structural and Magnetic Properties", *The Second International and the Seventh Joint Conference of Iranian Metallurgical Engineering and Iranian Foundaryman Scintific Societies*, 2013.
- Souri, D., and EsmaeilinTahan, Z., "A New Method for the Determination of Optical Band Gap and the Nature of Optical Transitions in Semiconductors", *Applied Physics B*, Vol. 119, pp. 273-279, 2015.
- 29. Umar, A., Suh, E. K., and Hahn, Y. B., "Non-Catalytic Growth of High Aspect-Ratio ZnO Nanowires by Thermal Evaporation", *Solid State Communications*, Vol. 139, pp. 447-451, 2006.
- Wang, Y., Tao, J., Zhu, J., Zhou, X., Zhao, J., Xie, Z., Tian, H., "Morphology- Controlled Synthesis of Cdwo4 Nanorods and Nanoparticles via a Molten Salt Method", *Materials Science and Engineering B*, Vol. 136, pp. 277-281, 2006.