فصل‌نامه علمی ـ پژوهشی
مواد پیشرفته در مهندسی

تأثیر دمای پخت بر خواص ساختاری، مغناطیسی و اپتیکی نانوساختار هگزافریت $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$

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

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۵/۶ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۵/۱۹)

چکیده- در این پژوهش، نانوساختارهای هگزافریت نوع W با فرمول $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ 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 سانتی‌گراد 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 فوریه استفاده شد. نتایج آنالیز مادون قرمز تبدیل فوریه تشکیل جایگاه‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی به‌عنوان ویژگی مهم هگزافریت‌ها را تأیید کرد. خواص مغناطیسی نمونه‌ها توسط مغناطیس‌سنج نمونهٔ ارتعاشی اندازه‌گیری شد و نشان داد که با افزایش دما، مغناطیس اشباع (M_s) افزایش می‌یابد. همچنین خواص اپتیکی نمونه‌ها توسط آزمایش طیف‌سنجی جذب مرئی– فرابنفش و طیف‌سنجی فوتولومینسانس مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج حاصل از هر دو طیف، اندازه شکاف انرژی تقریباً یکسان بوده و با افزایش دما تقریباً ثابت است.

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 $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ Hexaferrite Nanostructure

N. Alirezaei Varnosfaderani, S. E. Mousavi Ghahfarokhi* and M. Zargar Shoushtari

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

Abstract: ***In this paper, W-type $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ hexaferrite nanostructures were synthesized by sol-gel auto-combustion method. Effect of annealing temperature on the structural, magnetic and optical properties of these $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ 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 مکاتبات، پست الکترونیکی: musavi_ebrahim@yahoo.co.uk

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]

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 Properties, Optical Properties.***

فهرست علائم

A	جذب لایه	M_s	مغناطش اشباع
D	اندازه نانوبلورک	N_A	عدد آووگادرو
E_g	شکاف انرژی	V_{cell}	حجم سلول واحد
H_a	ناهمسانگردی بلوری	Z	عدد اتمی
H_c	وادارندگی مغناطیسی	z	ضخامت لایه
H_d	میدان مغناطیس‌زدا	$\alpha(\lambda)$	ضریب جذب
K	ثابت ناهمسانگردی	θ	زاویه براگ
M	جرم ملکولی	λ	طول موج پرتو ایکس
M_r	مغناطش پسماند	λg	طول موج شکاف انرژی

۱- مقدمه

به کلیه مواد مغناطیسی که اکسید آهن به‌عنوان اصلی‌ترین عضو ساختار بلوری آنها است، فریت گفته می‌شود و دارای خاصیت فری‌مغناطیس هستند [۱]. فریت‌ها از مهم‌ترین مواد مغناطیسی به‌شمار می‌روند و به‌دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به‌فرد، نظیر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، القای مغناطیسی، 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 داده‌اند [۳]. فریت های مغناطیسی به سه دسته با تقارن بلوری متفاوت تقسیم می‌شوند: ۱) فریت‌های مکعبی ۲) گارنت‌ها و ۳) فریت‌های هگزاگونال [۴]. فریت‌های هگزاگونال دارای ساختار بلوری شش وجهی هستند این فریت‌ها به‌هگزافریت‌های نوع M، Y، W، X، U و Z تقسیم می‌شوند (که از نظر فرمول شیمیایی و ساختاری با هم متفاوت هستند). فرمول عمومی هگزافریت‌های نوع w به‌صورت $AMe_2Fe_{16}O_{27}$ است (که در آن A عناصر Ba، Pb یا Sr است و Me یک یون دو ظرفیتی از قبیل Mn، Fe، Co و Ni است). در میان انواع مختلف هگزافریت‌ها، هگزافریت نوع W با کاتیون Co به‌دلیل ناهمسانگردی مغناطیسی بالا از نفوذپذیزی مغناطیسی به‌نسبت بالایی برخوردار است [۵]. سنگ معدن مگنتوپلمبیت برای اولین بار در سال ۱۹۲۵ استخراج شد [۱]. سپس ساختار بلوری $PbFe_{7.5}Mn_{3.5}Ti_{0.5}O_{19}$ به‌صورت شش‌وجهی، در سال ۱۹۳۸ میلادی کشف شد [۱]. پس از آن ساختار $PbFe_{12}O_{19}$ و تعدادی از بلورهای هم‌شکل مانند $BaFe_{12}O_{19}$ کشف شدند و ساختار شش وجهی آن توسط ونت و همکاران گزارش شد [۶]. ترکیبات بیشتری توسط جانکر، ویجن و براون به‌دست آمد [۷]. اولین گزارش ساخت هگزافریت نوع W به‌صورت $BaFe_2Fe_{16}O_{27}$ بوده است [۶]. در سال ۱۹۸۰ میلادی لوتجرینگ و همکاران به ساخت و اندازه‌گیری گشتاور اشباع فرومغناطیس و ثابت ناهمسانگردی برای $BaFe_2$-W و $SrFe_2$-W پرداختند [۸]. پس از آن در سال ۱۹۸۷ کلومب و میگنات $SrMn_2$-W و $BaMn_2$-W را ساختند و به بررسی دمای کوری و دمای کلسینه پرداختند [۹]. در ۱۹۸۹

[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]
[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]

میلادی کلومب و همکاران به مطالعه پراش نوترونی ساختار بلوری و ساختار مغناطیسی $SrZn_{23}Mn_{43}Fe_{16}O_{27}$ پرداختند [۱۰]. در سال ۱۹۸۹ میلادی لیتسارداکیس و همکاران ساخت و بررسی خواص مغناطیسی $Sr(Ba)Zn_xMn_{2-x}$-W را انجام دادند [۱۱]. در سال ۱۹۹۵ سورینگ و همکاران به‌ساخت $BaZn_{2-x}Co_x$-W پرداخته و آزمایش رزونانس مغناطیسی را در دماهای مختلف انجام دادند [۱۲]. پس از آن احمد و همکاران به‌ساخت $Ba_{1-Y}La_YZn_{0.5}Mg_{0.5}$Co-W به‌روش حالت جامدی پرداختند و خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. فایزا و همکاران به اثر جانشینی Ho^{+3} به‌جای Fe^{+3} روی خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی هگزافریت‌های باریم نوع W پرداختند [۱۴]. در سال ۲۰۱۱ میلادی خان و همکاران به نقش جانشینی Ce-Mn روی خواص ساختاری، مغناطیسی و دی الکتریکی $Sr_{1-X}Ce_XCo_2Mn_YFe_{16-Y}O_{27}$ پرداختند [۱۵]. در سال ۲۰۱۱ محمدجواد اقبالو همکاران ساخت هگزافریت با ترکیب $BaCoZnFe_{16-2Y}Al_YCe_YO_{27}$ به‌روش هم‌رسوبی شیمیایی پرداختند و فرکانس‌های میکروموج را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. در سال ۲۰۱۶ قاسمی به ساخت $SrCo_{2-X}Mn_X$-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 می‌توان از آنها در فرکانس‌های 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]. روش‌های تولید در تهیه نانوساختارها نقش بسزایی در تعیین اندازه، پایداری و ریخت‌شناسی مواد تولید شده دارند و باعث ایجاد خواص متفاوتی در آنها می‌شوند. روش‌های مختلفی برای ساخت هگزافریت‌ها از قبیل سل- ژل خود احتراقی ، آبی‌حرارتی، هم‌رسوبی و روش میکرو امولوسیون وجود دارد. در بین این روش‌ها، روش سل- ژل خود احتراقی، به‌دلیل تولید محصولی همگن با درجه خلوص بالا، دما و زمان پخت به‌نسبت پایین روش مناسب‌تری است. در این مقاله به ساخت نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ 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 $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ 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.

۲-۱- سنتز نانو ساختار $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$

برای تهیه نانوساختار $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ 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 به‌خوبی هم‌زده شد. با اضافه کردن تدریجی آمونیاک pH محلول به عدد سه رسانیده شد و برای انجام واکنش مورد نظر، دما در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. برای خشک کردن ژل تهیه شده از یک آون الکتریکی با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت 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 ۰/۰۰۰۱ 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[1] (XRD)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]

مدل PW-۱۸۴۰ ساخت شرکت فیلیپس با آند مسی و طول موج (λ=۱/۵۴۶۵ آنگستروم) به‌منظور شناسایی فاز نمونه‌ها استفاده شده است. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی[۲] (FESEM) ساخت شرکت TESCAN کشورچک به منظور بررسی ریزساختار، ریخت‌شناسی و اندازه نانوذرات و از دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی[۳] (VSM) به‌منظوربررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها و از دستگاه تبدیل فوریه مادون قرمز[۴] (FT-IR) ساخت شرکت ABB مدل BOMEN/MB10 استفاده شد. طیف جذبی با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (UV-visible)، مدل Photonix Ar 2015، ساخت شرکت Teifsanje P.P. Co. Ltd و طیف فوتولومینسانس با استفاده از دستگاه (PL)، مدل Thermo اندازه‌گیری شدند.

۳- نتایج و بحث

آزمایش‌های آنالیز حرارتی وزن‌سنجی و آنالیز حرارتی تفاضلی

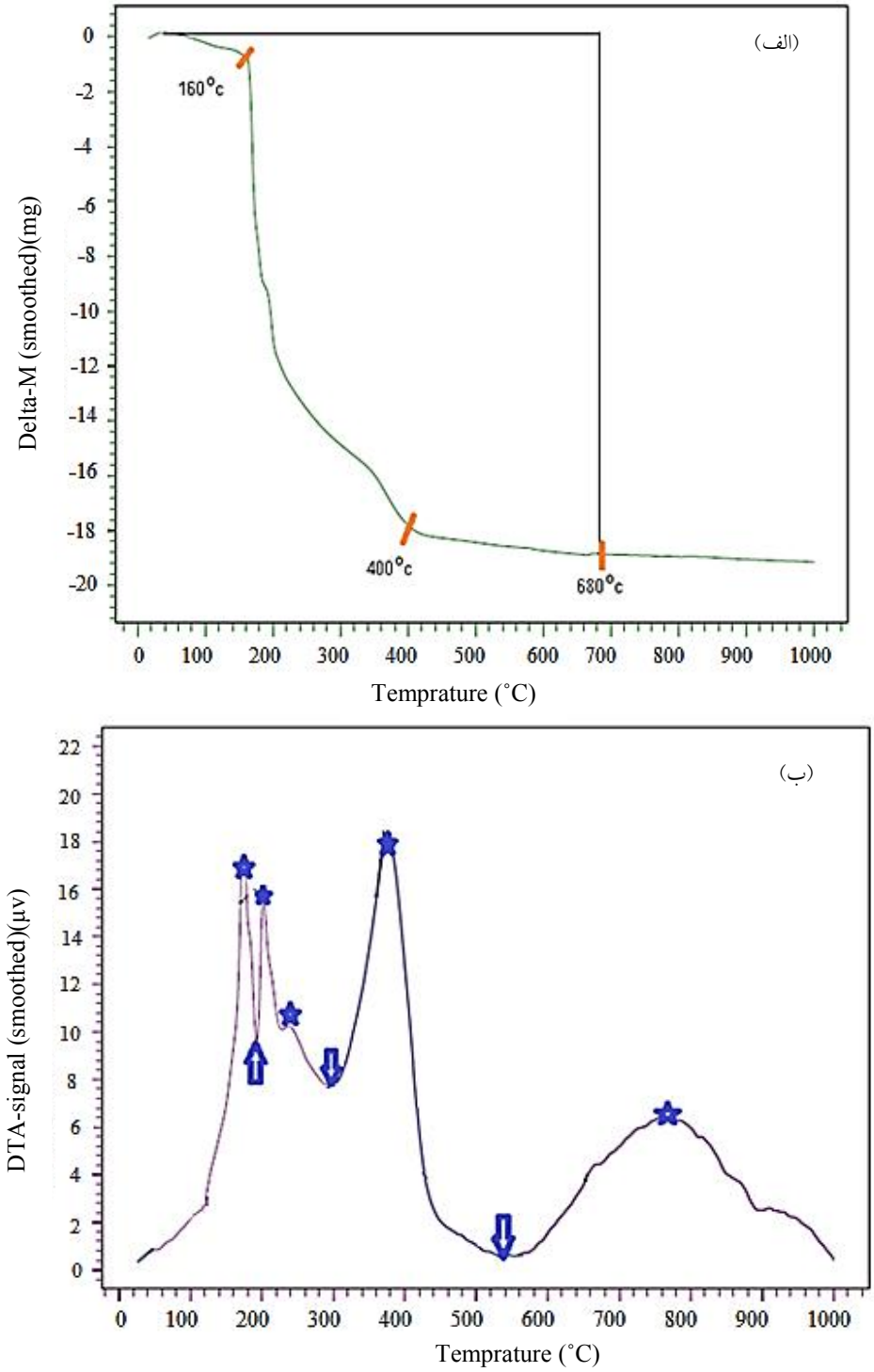
آنالیز حرارتی وزن‌سنجی[۵] (TGA) برای اندازه‌گیری جرم نمونه به‌عنوان تابعی از دما به‌کار می‌رود. اندازه‌گیری پیوسته افت وزنی در اثر تجزیه یا از دست دادن آب و افزایش وزن به‌دلیل جذب اکسیژن یا اکسید شدن با استفاده از این روش انجام می‌شود. همچنین در روش آنالیز حرارتی تفاضلی[۶] (DTA) وقتی نمونه‌ای با سرعت ثابت گرم می‌شود، سرعت افزایش دمای نمونه، با تغییر حرارتی به‌وجود آمده در نمونه، تغییر می‌کند. اگر یک ماده بی‌اثر (معمولاً آلومینیوم نوع α) به‌عنوان مرجع به‌کار برده شود، بین این دو، اختلاف دما به‌وجود می‌آید. این اختلاف دما به‌شکل قله گرماگیر، گرمازا یا جابه‌جایی خط پایه معادل و با مقدار تغییر گرمایی نمونه ظاهر می‌شود. در طول رفتار حرارتی مواد، چندین فرایند مانند تبخیر آب، تجزیه، خروج گازها، شکل‌گیری فازهای اصلی و ناخالصی مؤثر هستند. همان‌طور که در شکل (۱- الف) مشاهده می‌شود، منحنی TGA برای ژل خشک با pH = ۳ دارای ۴ مرحله مجزا برای کاهش وزن است. در اولین مرحله، تغییرات دمایی از ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا حدود ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد است که این کاهش وزنی به‌دلیل تبخیر آب و نیترات‌های باقی مانده در ژل است. دومین کاهش وزن از دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تا حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند به‌دلیل سوختن اسیدسیتریک و تبخیر موادآلی به‌صورت گازهای مونواکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن باشد. سومین کاهش وزن در بازه دمایی ۴۰۰ تا ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به تبخیر کامل مواد آلی است [۵]. چهارمین مرحله در بازه دمایی ۶۸۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است که وزن نمونه تقریباً ثابت باقی مانده است و کاهش وزن قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد پس در این مرحله، احتمال تشکیل فاز هگزافریت $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ وجود دارد [۵، ۲۰ و ۲۱].

در شکل (۱- ب) منحنی DTA ژل خشک با pH = ۳ 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 سانتی‌گراد و دره‌های گرماگیر در دماهای ۱۹۰، ۳۰۰، ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد هستند. قله گرماده در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد بیانگر تبخیر نیترات‌ها است. همچنین قله‌های گرماده در دماهای ۲۰۰ و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد به‌دلیل خروج گازهای مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن ناشی از تجزیه مواد آلی هستند. قله گرماده در ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد ناشی از شکل‌گیری فاز ناخالصی است که احتمال می‌رود که این فاز، در دمای ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد از بین رفته و یک دره گرماگیر را ایجاد کرده باشد. در دمای ۷۸۰ درجه سانتی‌گراد نیز با احتمال تشکیل فاز اصلی $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ قله دیگری را مشاهده می‌کنیم. دره‌های گرماگیر در دمای ۱۹۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 pH = ۳ در دماهای مختلف را

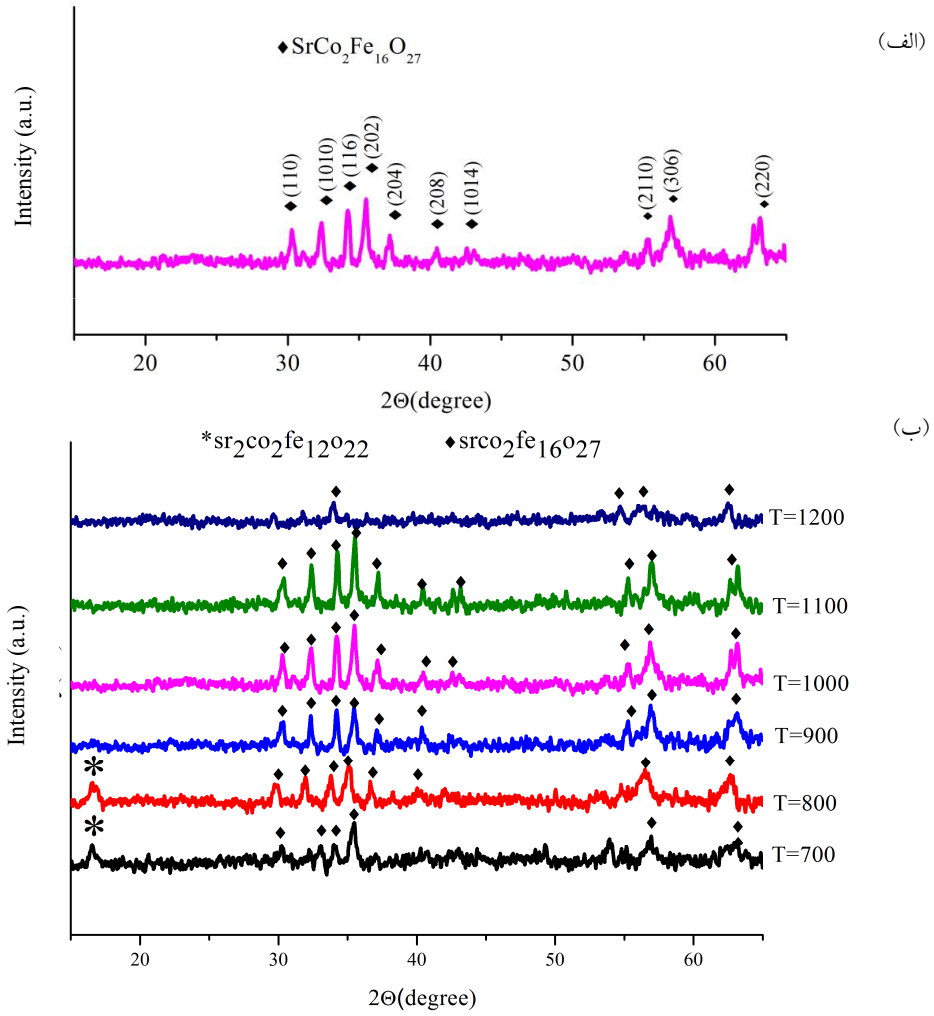
[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]



شکل ۱- منحنی‌های: الف) آنالیز حرارتی وزن‌سنجی و ب) آنالیز حرارتی تفاضلی ژل خشک نانو ساختار $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ با pH = ۳

نشان می‌دهد. برای شناسایی فاز نمونه‌ها از پراش پرتوی ایکس و نرم افزار x'pert high score استفاده شد. همه نمونه‌ها با کارت‌های[۷] JCPDS به‌شماره (۰۱۰۶- ۰۵۴-۰۰) که مربوط به $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ (♦) و (۰۰۶۹-۰۵۴-۰۰) ناخالصی $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$ (*) هستند؛ مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده از پراش پرتوی ایکس در دماهای مختلف در جدول (۱) آورده شده است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]



شکل ۲- الف) الگوی پراش پرتو ایکس نانو ساختار $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و ب) الگوی پراش پرتو ایکس نانوساختار $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ در دماهای مختلف

جدول ۱- درصد فاز و خواص ساختاری نانوساختاری $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ در دماهای مختلف

دما (سانتی‌گراد)	درصد تشکیل فاز اصلی	a (Å)	c (Å)	V_{cell}	D (nm)	d_x (g.cm^{-3})
۷۰۰	۷۲	۵٫۸۹	۳۲٫۳۶	۹۷۳٫۹۳	۳۴	۵٫۲۲
۸۰۰	۷۰	۵٫۸۸	۳۲٫۷۱	۹۸۱٫۸۰	۱۹	۵٫۱۷
۹۰۰	۹۰	۵٫۸۸	۳۲٫۷۳	۹۸۰٫۸۴	۳۲	۵٫۱۸
۱۰۰۰	۹۹	۵٫۸۷	۳۲٫۹۷	۹۸۵٫۵۶	۲۹	۵٫۱۶
۱۱۰۰	۸۲	۵٫۸۸	۳۲٫۷۲	۹۸۲٫۰۶	۳۷	۵٫۱۷
۱۲۰۰	۷۰	۵٫۹۱	۳۲٫۵۹	۹۸۶٫۱۵	۲۴	۵٫۱۵

همچنین مقادیر ثابت شبکه، حجم سلول، اندازه نانوبلورک‌ها و چگالی پرتوی ایکس در این جدول آورده شده است. از جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که در دمای پخت ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین درصد فاز اصلی تشکیل شده است. دمای پخت بهینه در

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]

این تحقیق برای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ (۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) است که نسبت به‌روش‌های دیگر از جمله روش هم‌رسوبی شیمیایی (۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و روش حالت جامدی (۱۲۰۰–۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) کاهش یافته است [۱۷ و ۲۲]. به‌کمک رابطه:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2}=\frac{4\sin^2\theta}{\lambda^2}=\frac{4}{3}\left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2}\right)+\frac{l^2}{c^2} \qquad (۱)$$

پارامترهای شبکه هگزاگونال (a ,c) را می‌توان تعیین کرد.

که در آن (k و l ، h) اندیس‌های میلر و d_{hkl} فاصله صفحات مربوط به آنها است. حجم سلول (v_{cell}) در ساختار هگزاگونال از رابطه:

$$v_{cell}=a^2c\sin 120=0/86a^2c \qquad (۲)$$

به‌دست می‌آید. همچنین میانگین اندازه نانوبلورک‌ها با استفاده از رابطه شرر:

$$D=\frac{k\lambda}{\beta\cos\theta} \qquad (۳)$$

محاسبه شد. در رابطه (۳)، D اندازه نانو بلورک‌ها، β پهنای قله در نصف بیشینه ارتفاع برحسب رادیان، λ طول موج پرتو ایکس، θ زاویه براگ و K عدد ثابت (۰/۸۹) است. چگالی نمونه با استفاده از داده‌های پرتوی ایکس ($d_{x\text{-}ray}$) از رابطه:

$$d_{x-ray}=\frac{ZM}{N_A V} \qquad (۴)$$

به‌دست می‌آید. در رابطه (۴)، M وزن مولکولی ترکیب، N_A عددآووگادرو، Z تعداد واحدهای فرمولی در سلول واحد و V حجم سلول واحد است [۱۵ و ۲۲].

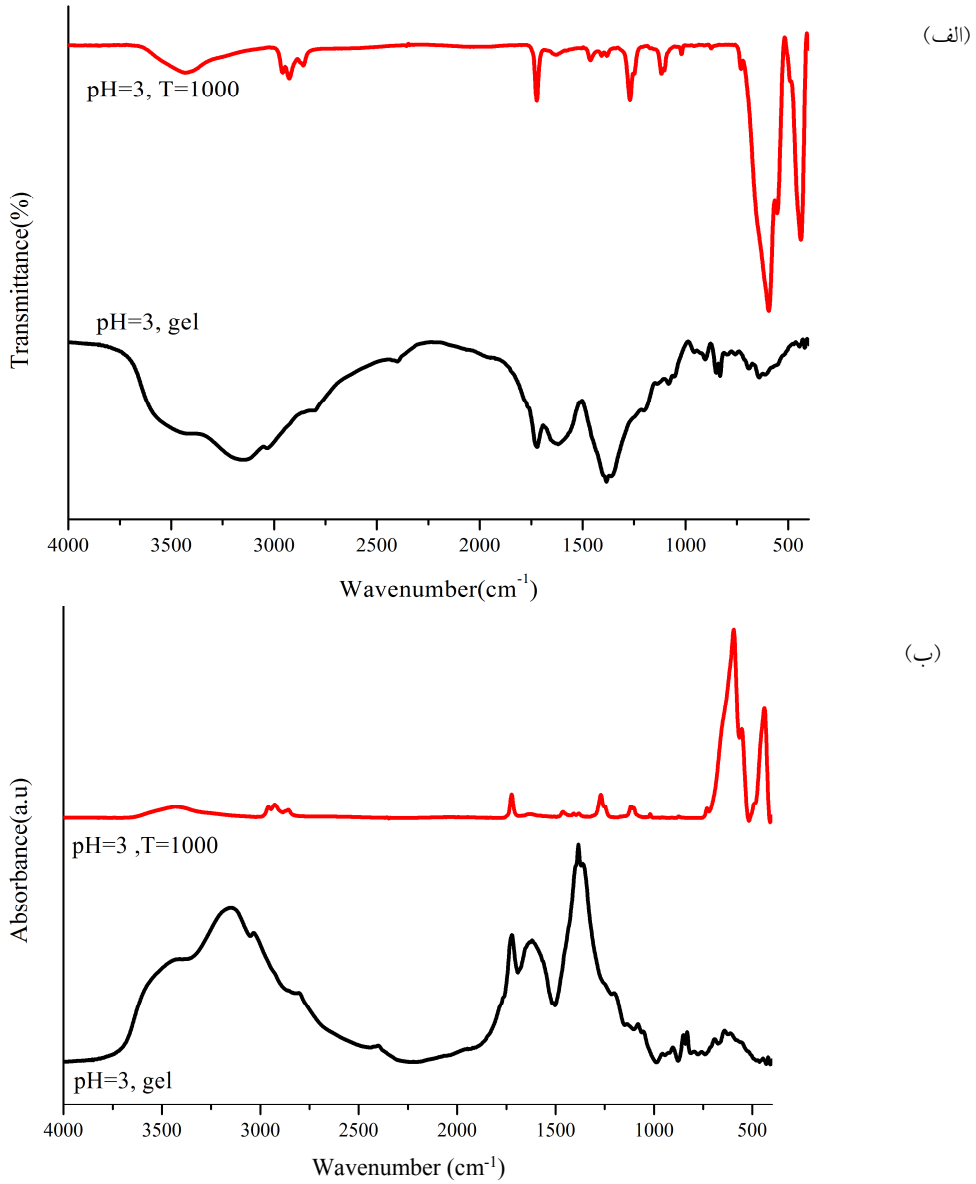
همان‌طور که از شکل (۲– ب) مشاهده می‌شود، نمونه تهیه شده در دماهای ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد علاوه بر $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ فاز (♦) دارای فاز $Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$ (*) است که این به‌دلیل کافی نبودن دمای پخت است؛ زیرا فاز هگزاگونال نوع W معمولاً در دمای بالا تشکیل می‌شود. وقتی دمای پخت به ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود، فاز ناخالصی ناپدید شده و شدت قله‌ها و درنتیجه میزان بلورینگی در ساختار هگزاگونال بیشتر می‌شود. هنگامی که دما به بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود، قله‌های فاز $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ کوتاه‌تر می‌شوند و بعضی از قله‌ها در حال 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 به‌طور کلی افزایش یافته است که علت افزایش حجم سلول واحد به کاهش 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، به‌طور کلی کاهش یافته است زیرا با افزایش دما، حجم سلول واحد بزرگ‌تر شده و در نتیجه با توجه به رابطه (۴) چگالی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۳-۲- آنالیز بیناب‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

آنالیز بیناب‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) روشی بسیار سودمند برای شناسایی، بررسی کیفی و تعیین مقادیر اجزای تشکیل دهنده یک ماده، بر اساس اندازه‌گیری فرکانس ارتعاشی باندهای شیمیایی بین اتم‌ها است. این آنالیز برای تأیید تشکیل ساختار در نمونه‌های فریتی کمک بسزایی می‌کند. در شکل (۳)، طیف به‌دست آمده در دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه نشان داده شده است. شکل‌های (۳– الف) و(۳– ب) به‌ترتیب طیف‌های عبور و جذب هگزافریت $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ را نشان می‌دهند. در فاصله عدد موجی ۴۰۰ – ۶۰۰ 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

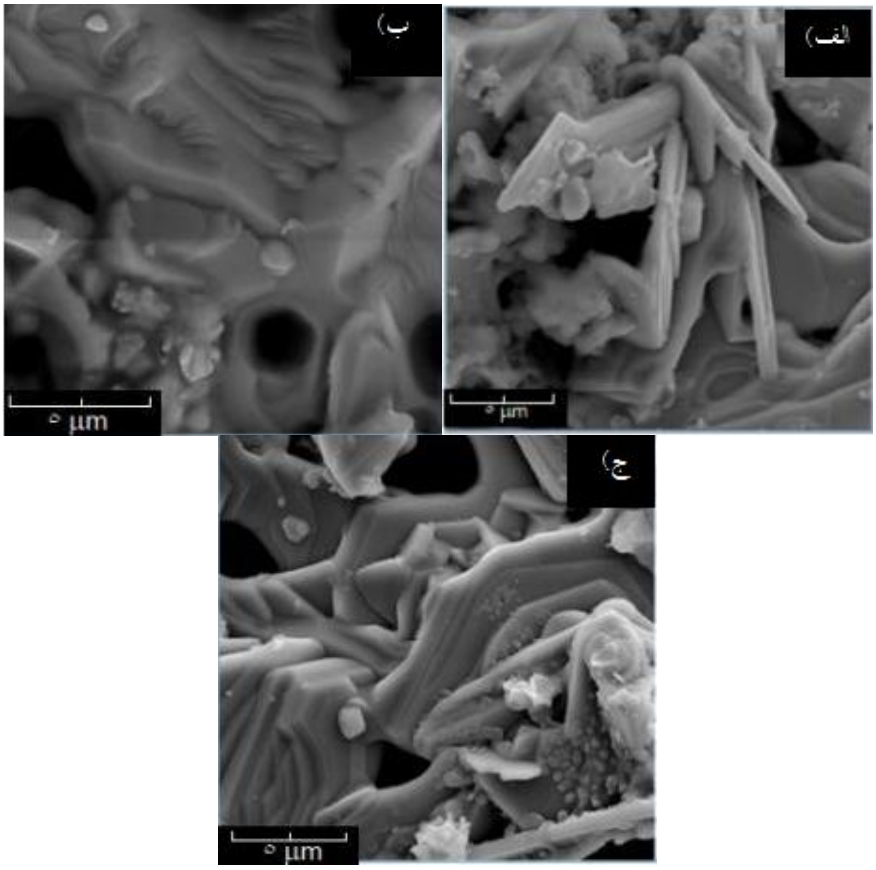
[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]



شکل ۳- بیناب‌های مادون قرمز با تبدیل فوریه: الف) طیف عبوری و ب) طیف جذبی ژل خشک و نانوساختار $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ تهیه شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد

در ۶۴۱ بر سانتی‌متر متناظر با جایگاه‌های چهاروجهی است که این قله‌ها در نمونه‌های پخت شده دارای ارتفاع بیشتری هستند که بیانگر تأثیر پخت، در کوتاه‌تر و مستحکم‌تر شدن این پیوندها است. همچنین پیوند جذبی در حوالی ۸۵۰،۱۰۶۱ و ۱۳۸۴ بر سانتی‌متر مربوط به پیوند ارتعاشات کششی NO_3^- مبنی بر حضور نیترات‌ها قبل از پخت است. پیوندهای جذبی در نواحی ۳۰۳۴ و ۳۱۴۹ بر سانتی‌متر را می توان به مولکول‌های آب جذب شده و ارتعاشات کششی O- H (آب) نسبت داد [۱۹]. با توجه به نمونه‌های بازپخت شده می‌توان دریافت که پیوندهای مربوط به ارتعاشات کششی NO_3^- 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 سانتی‌متر مربوط به گروه‌های کربوکسیل است. همچنین قله ظاهر شده در ۲۹۲۶

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ در دماهای: الف) ۷۰۰، ب) ۱۰۰۰ و ج) ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد

بر سانتی‌متر مربوط به ارتعاشات پیوند C-H است. در این شکل ارتعاشات کششی مربوط به O-H در عدد موجی ۳۴۳۱ بر سانتی‌متر قابل ملاحظه است. همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌شود مدهای ارتعاشی جایگاه‌های چهاروجهی در مقایسه با جایگاه‌های هشت‌وجهی بزرگ‌تر هستند که این ناشی از طول پیوند کوتاهتر جایگاه‌های چهاروجهی است.

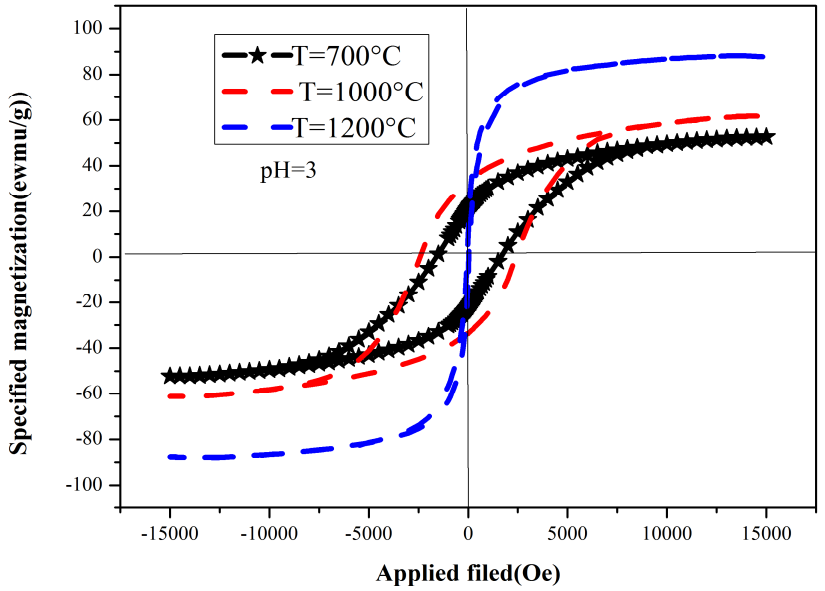
۳-۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی

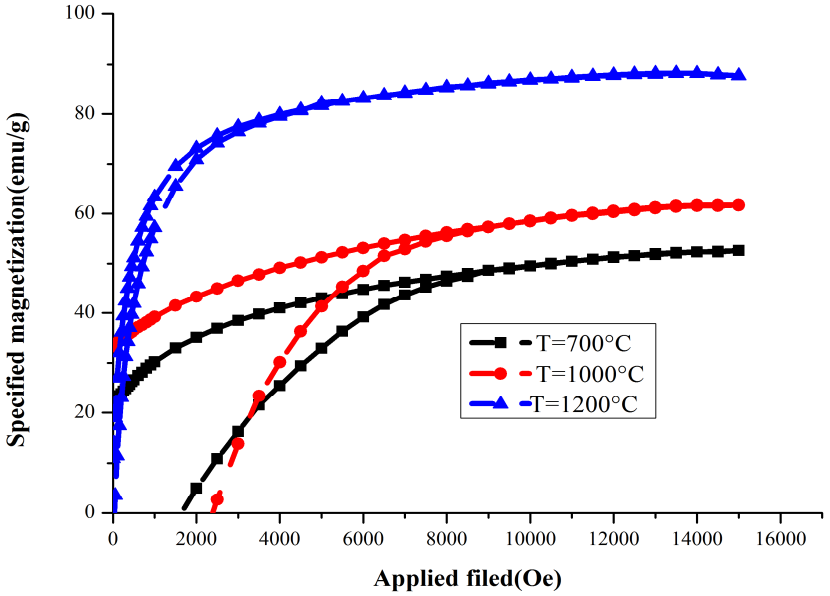
ریخت‌شناسی یک بلور به‌وسیله فاکتورهای ساختاری ذاتی و بیرونی تعیین می‌شود. در شرایط تعادلی فاکتورهای ذاتی منجر به تشکیل بلوری با کمترین انرژی سطح می‌شود. شرایط بیرونی طی فرایندهای مختلف تولید باعث می‌شود که شکل بلوری از حالت تعادلی دور شده و ریخت متفاوتی به‌دست آید. سنتز خوداحتراقی به‌دلیل نرخ واکنش و دمای به‌نسبت بالا، یک فرایند غیرتعادلی برای تولید ذرات سرامیکی است. بنابراین ریخت‌های مختلفی از ذرات تولیدی در این روش قابل مشاهده است. شکل‌های (۴- الف) تا (۴- ج) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نانوساختار $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. ریخت نمونه‌ها تقریباً صفحه‌ای است ولی از آنجایی که نمونه‌ها دارای خاصیت مغناطیسی هستند، باعث کلوخه‌ای شدن آنها شده است. با افزایش دما به دلیل پدیده ذوب‌شدگی، لایه‌ها درهم فرو رفته‌تر شده‌اند و فضاهای صحیح بین صفحات کمتر شده است.

۳-۴- بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها

شکل (۵) منحنی پسماند مربوط به نانوساختارهای

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]





شکل ۵- الف) حلقه‌های پسماند مغناطیسی و ب) منحنی‌های مغناطش نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ در دماهای مختلف

$SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ ساخته شده در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. خواص مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از حلقه‌های پسماند مغناطیس (VSM) محاسبه شد. مغناطش اشباع (M_s)، مغناطش پسماند (M_r) و وادارندگی مغناطیسی (H_c) از حلقه‌های پسماند به‌دست آمده و با استفاده از رابطه:

$$k = \frac{\sqrt{15}}{2} H_c M_s \qquad (۵)$$

ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورین (K) محاسبه شد.

همچنین H_a بیانگر ناهمسانگردی بلوری و H_d میدان مغناطیس‌زدا است که توسط رابطه‌های:

$$H_a = \sqrt{15} H_c \qquad (۶)$$

$$H_d = H_a - \frac{H_c}{0/48} \qquad (۷)$$

محاسبه می‌شوند.

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) می‌توان دریافت که با افزایش دما، M_s افزایش

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]

جدول ۲- خواص مغناطیسی نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ با دماهای مختلف

دما (سانتی‌گراد)	۷۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰
M_s(emu/g)	۵۲	۶۲	۸۸
M_r(emu/g)	۲۱	۳۳	۶
H_c(Oe)	۱۹۴۰	۲۵۸۰	۵۸
K(emu/g)Oe	۱۹۵۱۸۲	۳۰۹۵۰۴	۹۸۵۶
M_r/M_s	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۰۶
H_a(Oe)	۷۵۰۷	۹۹۸۴	۲۲۴
H_d(Oe)	۳۴۶۵	۴۶۰۹	۱۰۳

می‌یابد. افزایش M_s با افزایش دما تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به سبب تکامل فاز $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ و حذف فاز ناخالصی است. از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 M_s افزایش یافته است. نسبت چهاروجهی منحنی پسماند (M_r/M_s) برای مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ نشان‌دهنده آن است که نانوساختار تک حوزه مغناطیسی است و با توجه به نتایج جدول (۲) می‌توان نتیجه گرفت که نمونه ساخته شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 درصد تشکیل فاز اصلی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دماهای دیگر است. اما پارامترهای M_r، H_c، K، H_a و H_d در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای بهینه ساخت) بیشترین مقدار خود را دارند که به‌دلیل تک‌حوزه بودن ذرات در این دما است [۱۷ و ۲۶].

نمونه با دمای بهینه (۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) در این تحقیق در مقایسه با روش‌های ساخت دیگر با افزایش H_c و H_a همراه بوده است به‌طوری که $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ ساخته شده به‌روش حالت جامدی دارای H_a = ۲۸۰۰ (Oe) و $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ ساخته شده به‌روش هم‌رسوبی شیمیایی دارای H_c = ۱۳۶۰(Oe) است [۱۷، ۲۲ و ۲۷].

۳-۵- بررسی خواص اپتیکین

الف) طیف‌سنجی جذب مرئی – فرابنفش[۸]

طیف‌سنجی جذب مرئی – فرابنفش (UV/visible)، جذب امواج الکترومغناطیسی توسط ماده، در ناحیه مرئی – فرابنفش است. شکل (۶- الف) منحنی‌های جذب مرئی – فرابنفش برحسب طول موج، برای دماهای مختلف را نشان می‌دهد. در شکل (۶- ب) نمودار $dLn(A\lambda^{-1})/d(\lambda^{-1})$ برحسب λ^{-1} برای دماهای مختلف به‌روش DASF رسم شده است که در آن A بیانگر جذب لایه است و توسط رابطه:

$$\alpha(\lambda) = (\frac{2/303}{z})A \qquad (۸)$$

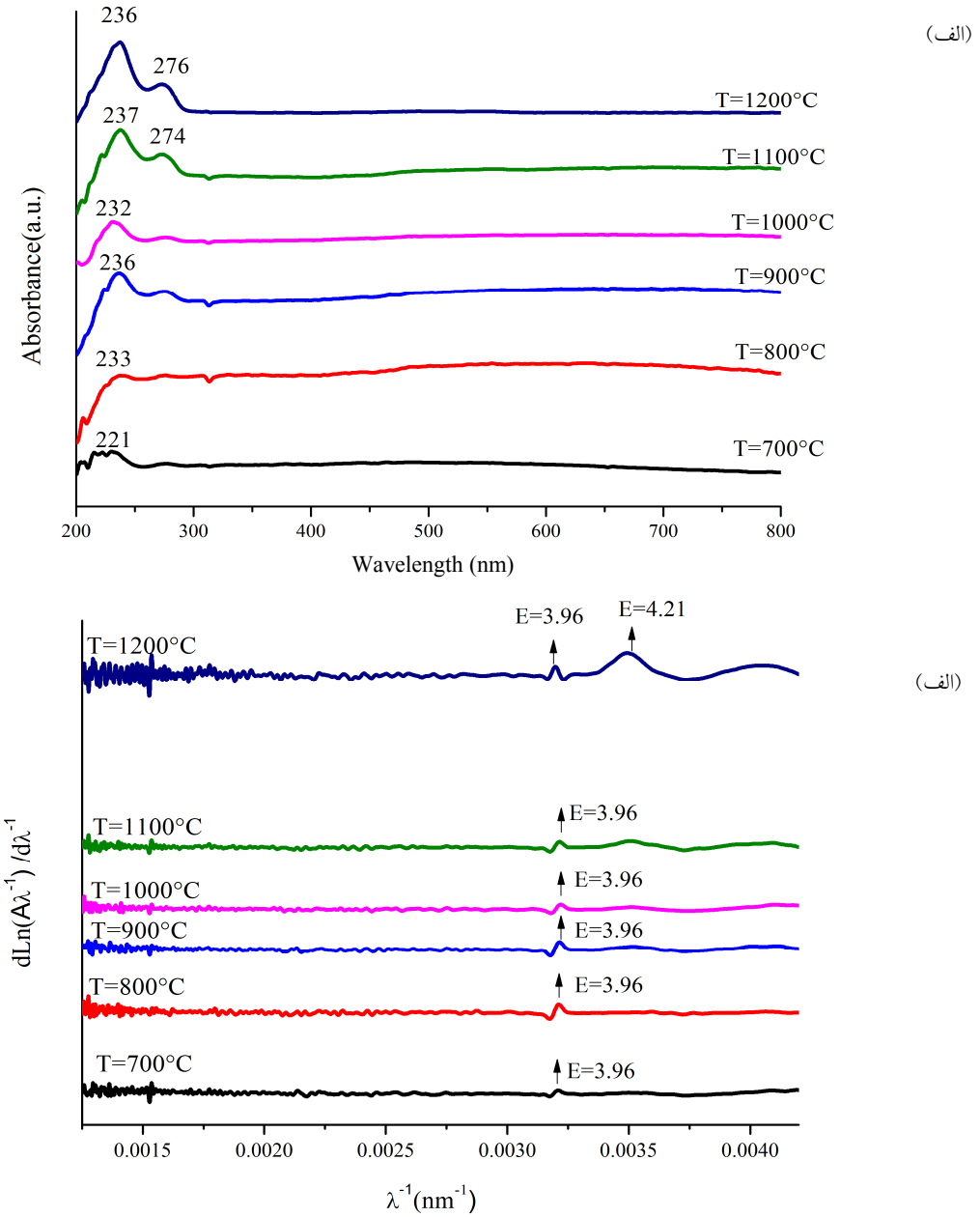
تعریف می‌شود، که در آن z ضخامت لایه و α ضریب جذب است. با استفاده از $1/\lambda=1/\lambda_g$ و رابطه:

$$E_g = \frac{1239/83}{\lambda_g} \qquad (۹)$$

می‌توان شکاف انرژی را محاسبه کرد [۲۸].

با توجه به نمودارهای (۶- الف) و (۶- ب) می‌توان 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 می‌توان 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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]

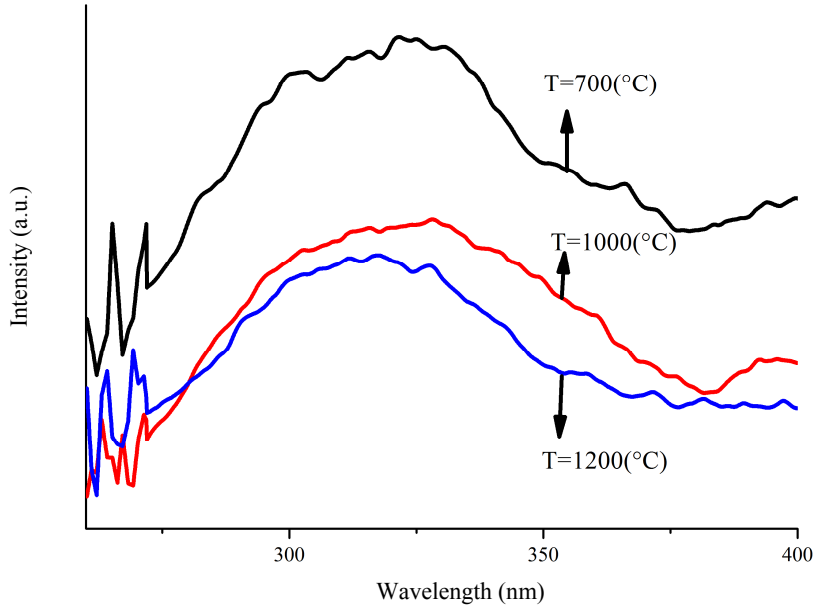


شکل ۶- الف) منحنی‌های جذب برحسب طول موج و ب) نمودار $dLn(A\lambda^{-1})/d\lambda^{-1}$ برحسب λ^{-1} برای نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ با دماهای مختلف

ب) طیف‌سنجی فوتولومینسانس

فوتولومینسانس (PL) ، یک روش بسیار مفید برای بررسی شکاف انرژی نیم‌رساناها است. یک ویژگی فیزیکی اساسی طیف فوتولومینسانس، گسیل همزمان فوتون از یک ماده تحت برانگیختگی نوری است. طیف‌سنجی فوتولومینسانس یک روش غیرمخرب و ابزاری فوق‌العاده حساس برای مطالعه و بررسی انتقالات الکترونی در نیم‌رساناها است. اندازه‌گیری‌های فوتولومینسانس اطلاعاتی مانند شکاف انرژی، حضور ناخالصی‌ها و کیفیت نوری ماده را در اختیار می‌گذارد. طیف فوتولومینسانس با استفاده از یک لامپ زنون به‌عنوان منبع تحریک با طول موج ۲۴۵ نانومترحاصل شد. به‌طور کلی یک قله مهم در طیف فوتولومینسانس نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ با دماهای مختلف ظاهر شده ، که این قله در ناحیه فرابنفش است. دلیل نشر در ناحیه فرابنفش، ناشی از بازترکیب اکسایتون‌های آزاد است که از یک

[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]
[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]



شکل ۷- منحنی‌های فوتولومینسانس برای نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ با دماهای مختلف

جدول ۳- طول موج قله و شکاف انرژی مربوط به نانوساختارهای $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ در دماهای مختلف

دما (سانتی‌گراد)	$\lambda_{g(nm)}$	$E_{g\ (ev)}$
۷۰۰	۳۲۱٫۶	۳٫۸۵
۱۰۰۰	۳۲۸٫۲	۳٫۷۷
۱۲۰۰	۳۱۷٫۵	۳٫۹۰

فرایند برخورد یا کسایتون-اکسایتون ظاهر می‌شوند و به‌عنوان نشر، نشر لبه نوار نزدیک (NBE) شناخته شده هستند [۲۹]. قله نشر فرابنفش در طیف فوتولومینسانس به کیفیت ساختارهای رشد داده شده بستگی دارد. به‌طوری 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 قله‌ها با افزایش دما کاهش یافته است. بالا بودن قله فوتولومینسانس در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند ناشی از فاز ناخالصی تشکیل شده در این دما باشد اما با مقایسه قله فوتولومینسانس در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان دریافت که در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد شدت قله گسیل فوتولومینسانس به‌دلیل بلوری شدن ذرات، قوی‌تر شده است که با نتایج حاصل از الگوی پراش پرتوی ایکس نیز مطابقت دارد. همچنین شدت فوتولومینسانس مواد، به توزیع و شکل ذرات وابسته است. به‌طور کلی، مشخصه لومینسانس برای ذرات یکسان به‌دلیل وجود ناخالصی‌های کمتر یا لایه‌های مرده کمتر در سطح مواد، مناسب‌تر هستند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از طیف نگاری‌های جذب مرئی-فرابنفش و فوتولومینسانس اندازه شکاف انرژی را تقریباً یکسان به‌دست می‌دهند و نتایج حاصل از آنها در توافق با یکدیگر است (جدول ۳).

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، هگزافریت $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ 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 نمونه‌ها نشان می‌دهد که در دمای

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]

پخت ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 ذوب‌شدگی، لایه‌ها در هم فرو رفته‌تر شده‌اند و فضاهای خالی بین صفحات کمتر شده است. با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی خواص مغناطیسی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد کلیه پارامترهای M_r، H_c، K، H_a و H_d در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای بهینه ساخت) بیشترین مقدار خود را دارند و همچنین نمونه ساخته شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تک‌حوزه مغناطیسی است. با بررسی طیف‌سنجی 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 PL در دماهای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۰۰، درجه سانتی‌گراد می‌توان دریافت که در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد شدت قله گسیل فوتولومینسانس به‌دلیل بلوری شدن ذرات، قوی‌تر شده است که با نتایج حاصل از الگوی پراش پرتو ایکس نیز مطابقت دارد. هگزافریت $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ ساخته شده به‌روش سل- ژل احتراقی در این تحقیق، نسبت به‌روش‌های ساخت دیگر از دمای بهینه پایین‌تر و خواص مغناطیسی بالاتری برخوردار است.

واژه‌نامه

1. X- ray Diffraction
2. field emission scanning electron microscopy
3. vibrating sample magnetometer
4. fourier-transform infrared spectroscopy
5. thermogravimetry analysis
6. differential thermal analysis
7. Joint committee on powder diffraction standards
8. Ultraviolet- visible spectroscopy
9. photoluminescence spectroscopy
10. near bond edge

مراجع

1. 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.
2. Nakamura, T., "Complex Permeability of Polycrystalline Hexagonal Ferrites", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, pp. 3415-3417, 2000.
3. 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.
4. Kianvash, A., and Seyed Ebrahimi, A.,"Optimization of MType Ferrite Strontium Ceramic Magnets Production Process for High Magnetic Properties", *2nd Iranian Ceramic Congress*, 1995.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Lotgering, F. K., Locher, P. R., and Vanstapele, R. P., "Anisotropy of Hexagonal Ferrites with M, W and Y Structures Containing Fe^{3+} and Fe^{2+} as Magnetic Ions", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 41, pp. 481-487, 1980.
9. Collomb, A., and Mignot, J. P., "$Ba(Sr)Mn_2Fe_{16}O_{27}$W-type Hexagonal Ferrites as Permanent Magnets", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 69, pp. 330-336, 1987.
10. Collomb, A., Litsardakis, G., Samaras, D., and Pannetier, J., "Neutron Diffraction Studies of the Cristalographic and Magnetic Structures of $SrZn_{23}Mn_{43}Fe_{16}O_{27}$", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 78, pp. 219-225, 1989.
11. Litsardakis, G., Samaras, D., and Collomb, A., "Magnetic Properties of the $Sr(Ba)Zn_xMn_{2-x}$-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.,

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]

[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]

"Investigations on $Zn_{2-x}Co_xW$-typehexaferrites Powder at Low Temperatures by Ferromagnetic Resonance", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 150, pp. 270-276, 1995.
13. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Ghasemi, A., "Stoner-Wohlfarth Rotation or Domain Wall Motion Mechanism in W-type Magnetic Hexaferrite Nanoparticles", *Ceramics International*, Vol. 42, pp. 4143-4149, 2016.
18. 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.
19. 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.
20. Mousavi Ghahfarokhi, S. E., Rostami, Z. A., and Kazeminezhad, I., "Fabrication of $PbFe_{12}O_{19}$ Nanoparticles and Study of Their Structural, Magnetic and Dielectric Properties", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 399, pp. 130-142, 2016.
21. 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.
22. Leccabue, F., Panizzieri, R., Albanese, G., Leo, G., and Almodovar, N. S., "Magnetic and Mössbauer Study of Coprecipitated $SrNi_2Fe_{16}O_{27}$ ($SrNi_2$- W) and $SrCo_2Fe_{16}O_{27}$ ($SrCo_2$- 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 $SrNi_2Fe_{16}O_{27}$ 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 $PbFe_{11.8}Ni_{0.2}O_{19}$ 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.
28. 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.
30. Wang, Y., Tao, J., Zhu, J., Zhou, X., Zhao, J., Xie, Z., Tian, H., "Morphology- Controlled Synthesis of $Cdwo_4$ Nanorods and Nanoparticles via a Molten Salt Method", *Materials Science and Engineering B*, Vol. 136, pp. 277-281, 2006.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.2.7]
[DOI: 10.47176/jame.38.3.15672]