

بررسی تأثیر زمان پخت بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم (SrFe_2O_4) ساخته شده به روش سل- ژل

سید ابراهیم موسوی فهفرخی*، الهام محمدزاده شعبه‌گر، مرتضی زرگر شوشتری

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

دریافت: 1396/04/18 ویرایش نهایی: 1396/12/19 پذیرش: 1397/02/03

چکیده

در این مقاله، نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم (SrFe_2O_4) به روش سل-ژل تهیه گردید. همچنین به منظور بررسی تأثیر زمان پخت بر روی خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم، ابتدا ژلی از نیترات‌های فلزی با نسبت مولی مشخص تهیه و سپس پودر حاصل در دمای 700°C در زمان‌های مختلف پخت گردید. برای بررسی خواص ساختاری از الگوی پراش پرتوی ایکس، طیف‌سنجی فرو سرخ-تبدیل فوریه، ریخت‌شناسی ذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، خواص مغناطیسی از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی و خواص دی‌الکتریکی از دستگاه LCR متر استفاده شد. نتایج حاصل از الگوهای پراش پرتوی ایکس، نشان‌دهنده تشکیل فاز اصلی فریت اسپینلی استرانسیوم با افزایش زمان پخت می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نشان داد که ذرات، نانو بوده اما به هم چسبیده‌اند. نتایج حاصل از طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه ساختار اسپینلی در نمونه‌ها را تأیید می‌کند. منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش زمان پخت، مغناطش اشباع و همچنین میدان وادارندگی افزایش می‌یابد که این به علت تغییر توزیع یون‌ها و ناهمسانگردی شکلی نانوذرات می‌باشد. همچنین اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریکی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک نمونه‌ها کاهش، درحالی‌که رسانندگی الکتریکی ac افزایش می‌یابد که نحوه این تغییرات توسط مدل ماکسول-وگنر مورد بررسی قرار گرفت.

کلیدواژگان: فریت اسپینلی استرانسیوم، سل-ژل، زمان پخت، خواص ساختاری، خواص مغناطیسی، خواص دی‌الکتریکی

مقدمه

(Fe_3O_4) و یا اکسیدهای سایر فلزات به دست می‌آیند. به همین لحاظ مانند بسیاری از سرامیک‌ها، سخت ولی شکننده‌اند. یاخته یک‌ساختار فریت‌های اسپینلی از هشت یکای فرمولی MFe_2O_4 تشکیل می‌شود و دارای فرمول کلی $\text{M}_3\text{Fe}_{16}\text{O}_{23}$ است. یون‌های اکسیژن، چارچوب اصلی اسپینلی را می‌سازند. در این ساختار یون‌های اکسیژن یک شبکه fcc به وجود آورده و کاتیون‌های M و Fe به صورت بین‌نشینی در دو زیر شبکه چهاروجهی (جایگاه A) و هشت‌وجهی (جایگاه

فریت‌ها به آن دسته از مواد مغناطیسی اطلاق می‌شود که جزء اصلی تشکیل دهنده آنها اکسید آهن است، و پارامترهای مغناطیسی مطلوبی نظیر نفوذپذیری مغناطیسی، چگالی میدان مغناطیسی و مقاومت ویژه الکتریکی بالا از جمله اصلی‌ترین خصیصه‌های آنها به‌شمار می‌رود [1]. فریت‌ها اغلب ترکیبات عایقی هستند که دارای خواص فری‌مغناطیس می‌باشند، و از اکسیدهای آهن نظیر هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)، یا مگنتیت

* نویسنده مسئول: musavi_ebrahim@yahoo.co.uk

سال 2002 واکنش بین استرانسیوم و نیترات آهن را با سه نسبت مولی 1:1، 1:2 و 2:1 در دماهای مختلف آزمایش کرد که بهترین نسبت مولی برای تشکیل فریت اسپینلی، نسبت 2:1 بود [17]. پردشی و همکاران در سال 2011 با تجزیه و تحلیل ساختاری به این نتیجه رسیدند که تشکیل تک فاز SrFe_2O_4 با مقدار اثری از SrCO_3 امکان پذیر است [18]. پس طبق بررسی های صورت گرفته تاکنون تأثیر زمان پخت بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی الکتریکی نانوذرات SrFe_2O_4 به روش سل-ژل در هیچ تحقیقی گزارش نشده است لذا هدف اصلی مقاله حاضر می باشد.

مواد و روش ها

برای ساخت نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم به روش سل-ژل، عنصرسنجی مواد اولیه با معلوم بودن مقادیر جرم مولی و نسبت های مولی اولیه، تعیین شدند. مواد اولیه مورد نیاز در این تحقیق، ساخت شرکت مرک آلمان و دارای درجه خلوص 99.9% می باشد. برای تهیه این نانوذرات از نیترات آهن $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ ، نیترات استرانسیوم $(\text{Sr}(\text{NO}_3)_2)$ ، اسید سیتریک $(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7)$ ، آمونیاک (NH_3) 25% و آب یون زدایی شده (H_2O) استفاده گردید. در این روش از نیترات های آهن و استرانسیوم به عنوان واکنش دهنده های معدنی، از اسیدسیتریک به عنوان عامل کمپلکس ساز و از آب یون زدایی شده به عنوان حلال و نیز از آمونیاک به منظور تنظیم pH محلول استفاده شد.

دستگاه های مورد استفاده

از ترازوی دیجیتالی مدل 124 pw با دقت 0,0001 g به منظور وزن کردن مواد، دستگاه pH متر مدل AZ86p3 برای تنظیم pH، کوره مافل، شرکت آذر کوره مدل PX-9 به منظور پخت نمونه ها و از دستگاه

می نشیند [2]. در صورتی که جایگاه های A با کاتیون های دوظرفیتی و جایگاه های B با کاتیون های سه ظرفیتی اشغال شوند، فریت ساختار اسپینلی عادی دارد و اگر جایگاه های A با کاتیون های سه ظرفیتی و جایگاه های B با کاتیون های دوظرفیتی اشغال شوند، فریت ساختار اسپینلی معکوس دارد [3]. همچنین فریت هایی که توزیع کاتیون ها در آنها بین حالت های عادی و معکوس است، فریت های جزئی معکوس نامیده می شوند. در این نوع اسپینل کاتیون های دوظرفیتی و سه ظرفیتی بین جایگاه های A و B توزیع می شوند و نحوه این توزیع به وسیله پارامتر α مشخص می شود [4]. کمیت α به روش تهیه و خواص ذاتی ترکیبات تشکیل دهنده فریت بستگی دارد. مقدار α در اسپینل جزئی معکوس بین 0 و 1 است [5,6]. در سال های اخیر، فریت استرانسیوم به علت دارا بودن مغناطش اشباع و میدان ناهمسانگردی زیاد، پایداری گرمایی و مقاومت به خوردگی مناسب، به عنوان ماده جاذب ریزموج مورد مطالعه قرار گرفته است [7]. فریت اسپینلی استرانسیوم نسبت به فریت اسپینلی سرب [8]، روی [9,10]، منیزیم [11,12]، کبالت [13] و کادمیوم [14] مغناطش اشباع و وادارندگی بالاتری دارد. فریت ها به دو دسته نرم و سخت تقسیم می شوند که ترکیب فریت استرانسیوم حاضر نیز جزء خانواده فریت های سخت محسوب می شود [15]. در سال 1979، وگل و ایوانز اقدام به انجام آزمایش بر روی نسبت های مولی مختلف دو ترکیب SrO و Fe_2O_3 نمودند و به این نتیجه رسیدند که به هنگام واکنش میان SrO و Fe_2O_3 در هوا، اجتماع فاز چند گانه SrFeO_{3-x} ، $\text{Sr}_4\text{Fe}_6\text{O}_{13}$ و $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ قابل مشاهده است که احتمال تشکیل هر یک از این فازها به دمای نهایی واکنش و نسبت دو بخش SrO و Fe_2O_3 وابسته است. اما متأسفانه موفق به ساخت ترکیب SrFe_2O_4 به صورت مجزا نشدند [16]. هشام ابراهیم صالح در

مغناطیسی به مدت یک ساعت در دمای اتاق به خوبی هم‌زده و با اضافه کردن تدریجی آمونیاک pH محلول به 7 رسانیده شد. در ادامه به منظور تبخیر محلول، سل در حمام آب در دمای 80°C به آرامی حرارت داده شد تا ژل حاصل شود. در طول حرارت‌دهی غیرمستقیم، کپلیت شدن بین یون‌های فلزی و اسیدسیتریک، به عنوان عامل کمپلکس ساز، افزایش می‌یابد، و این مرحله کمک می‌کند تا بدون نیاز به یک اتمسفر خاص، اندازه ذرات کنترل شده و استوکیومتری مناسبی حاصل شود. به علاوه این مرحله یکنواختی توزیع کاتیون‌ها را بهبود می‌بخشد. ژل حاصل در آون الکتریکی با دمای 90°C به مدت 48 ساعت حرارت دید تا کاملاً خشک شود. سپس ژل خشک را آسیا کرده و پودر تهیه شده در دمای 700°C با زمان‌های 1، 2، 3، 4 و 5 ساعت پخت گردید. کل فرآیند تهیه نمونه‌ها را می‌توان در شکل 1 مشاهده کرد.



شکل 1. فرآیند تهیه نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم.

بحث و نتایج

شکل 2 الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌های تهیه شده در دمای 700°C برای زمان‌های پخت مختلف را نشان می‌دهد. برای شناسایی فاز نمونه‌ها از آنالیز پرتوی ایکس و نرم افزار «xpert high score» استفاده گردید. همه نمونه‌ها با کارت‌های JCPDS به شماره‌های 00-01-1027 مربوط به فریت اسپینلی استرانسیوم،

(XRD) مدل PW-1840 ساخت شرکت فیلیپس با آند مسی و طول موج ($\lambda=1.54056\text{\AA}$) به منظور شناسایی فاز نمونه‌ها استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ساخت شرکت TESCAN کشور چک به منظور بررسی ریزساختار، ریخت‌شناسی و اندازه متوسط نانوذرات و از دستگاه (VSM) ساخت شرکت مغناطیس دقیق کویر به منظور بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها و از دستگاه (FT-IR) ساخت شرکت PerkinElmer مدل TWO استفاده شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های دی‌الکتریکی مانند ظرفیت موازی (C_p) و مقاومت موازی (R_p) نمونه‌های ساخته شده، از یک دستگاه LCR-meter مدل 8110 G بازه فرکانسی 20 هرتز تا 10 مگاهرتز، استفاده شد. با توجه به روابط زیر بخش‌های حقیقی و موهومی ضریب دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها محاسبه شد:

$$\epsilon' = \frac{Cd\epsilon_0}{A} \quad 1$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta \quad 2$$

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi R_p f C_p} \quad 3$$

$$\sigma_{ac} = 2\pi\epsilon'' f \quad 4$$

که در روابط بالا C_p ظرفیت نمونه قرصی شکل برحسب فاراد، d و A به ترتیب ضخامت و مساحت سطح نمونه، ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک خلأ، R مقاومت الکتریکی و f فرکانس می‌باشد.

ستز نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم

به‌روش سل-ژل

در این مقاله، برای تهیه نانوذرات SrFe_2O_4 نیترات‌های آهن و استرانسیوم با استوکیومتری مناسب و با نسبت مولی 2 به 1 در 100 میلی لیتر آب یون‌زدایی شده حل و بعد از 15 دقیقه اسیدسیتریک به محلول اضافه گردید، محلول حاصل توسط یک هم‌زن

شکل 2. الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌های تهیه شده در دمای 700 °C با زمان‌های پخت مختلف.

درصد تشکیل فازهای موجود در نمونه‌های تهیه شده در دمای 700 °C با زمان‌های پخت مختلف با استفاده از رابطه 8 محاسبه و نتایج در جدول 1 آورده شده است [19].

$$SrFe_2O_4 (\%) = \frac{\sum I(SrFe_2O_4)}{A} \times 100 \quad 8$$

$$SrCO_3 (\%) = \frac{\sum I(SrCO_3)}{A} \times 100$$

$$\alpha - Fe_2O_3 (\%) = \frac{\sum I(\alpha - Fe_2O_3)}{A} \times 100$$

$$A \equiv \sum I(SrFe_2O_4) + \sum I(SrCO_3) + \sum I(\alpha - Fe_2O_3)$$

جدول 1. درصد تشکیل فازها در دمای پخت 700 °C با زمان‌های پخت مختلف.

SrFe ₂ O ₄ (%)	SrCO ₃ (%)	α-Fe ₂ O ₃ (%)	زمان پخت (ساعت)
88	-	12	1
91	-	9	2
97	-	3	3
100	-	-	4
85	12	3	5

مقادیر ثابت شبکه، میانگین اندازه بلورکها و چگالی پرتوی ایکس در دمای 700 °C با زمان‌های پخت مختلف محاسبه و در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2. خواص ساختاری نمونه‌ها.

چگالی پرتوی ایکس (g / cm ³)	میانگین اندازه بلورکها (nm)	ثابت شبکه (Å)	زمان پخت (ساعت)
6,23	14	8,265	1
6,22	16	8,263	2
6,20	19	8,260	3
6,19	25	8,252	4
6,19	27	8,245	5

1778-084-01 استرانسیوم کربنات و 5034-001-98

هماتیت بوده، مورد آنالیز قرار گرفتند و نتایج حاصل از این آنالیز نشان می‌دهد که فریت اسپینلی تک‌فاز در دمای 700 °C و زمان پخت 4 ساعت به دست آمده است. همچنین میانگین اندازه تقریبی بلورکها با استفاده از رابطه شرر محاسبه شد:

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad 5$$

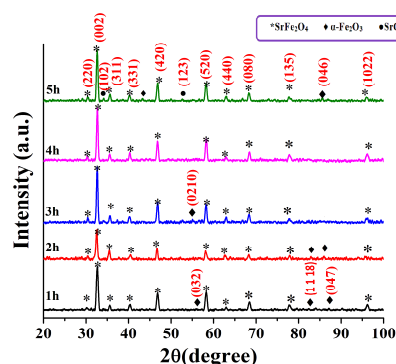
در رابطه 5، D میانگین اندازه بلورکها، β پهنای قله‌ها در نصف بیشینه شدت، λ طول موج پرتوی ایکس، θ زاویه براگ و K عدد ثابتی (0/89) است. برای اندازه‌گیری میانگین اندازه بلورکها از قله‌های پراش (220)، (002)، (311)، (331)، (420)، (520)، (440)، (080)، (135) و (1022) استفاده شد. با توجه به اینکه ساختار این فریت مکعبی است، لذا می‌توان ثابت شبکه را با استفاده از رابطه 6 به دست آورد:

$$a = d_{hkl} \times \sqrt{h^2 + l^2 + k^2} \quad 6$$

در رابطه 6، d فاصله بین صفحه‌های پراش و h, k, l اندیس‌های میلر هستند. چگالی پرتوی ایکس (d_{x-ray}) از رابطه 7 به دست می‌آید:

$$d_{x-ray} = \frac{8M}{N_A a^3} \quad 7$$

که در رابطه 7، M وزن مولکولی ترکیب، N_A عدد آووگادرو و a ثابت شبکه است.

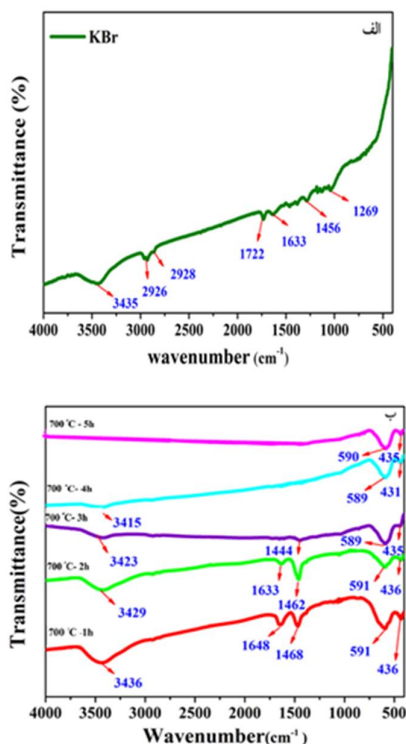


مربوط به ارتعاشات در جایگاه‌های هشت‌وجهی اکسیژن-فلز است [26 و 27]. همچنین در این شکل ارتعاشات کششی مربوط به O-H در اعداد موج 3415، 3423، 3429 و 3436 cm^{-1} نشان داده شده است و قله ظاهر شده در ناحیه 1633 cm^{-1} و 1648 cm^{-1} مربوط به مد خمشی گروه‌های کربوکسیل است. با افزایش زمان پخت، این پهنه کاهش داشته است که می‌توان آن را به تجزیه گروه‌های کربوکسیل و از بین رفتن آب باقی‌مانده در نمونه‌ها نسبت داد [28]. همچنین قله جذبی مشخص شده در 1462، 1444 و 1468 cm^{-1} مربوط به نوسان‌های گروه C-H می‌باشد، که با افزایش زمان پخت، از پهنای این نوارهای جذبی کاسته شده، به طوری که در زمان 4 و 5 ساعت این نوار جذبی به‌طور کامل از بین می‌رود [29].

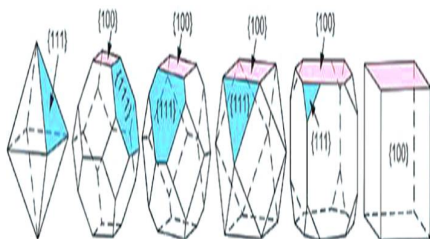
با توجه به جدول 2، کاهش ثابت شبکه می‌تواند به دلیل تغییر در توزیع کاتیون‌ها در ساختار اسپینلی و همچنین اثرات سطحی نانوذرات باشد [20، 21]. علاوه بر تغییر در توزیع کاتیون‌ها، ناکاملی‌های ساختاری و نواقص اکسیژن می‌تواند منجر به خمیدگی پیوندهای اکسیژن-فلز شده و ثابت شبکه را تغییر دهد [20]. قابل ذکر است در بعضی از مقالات نیز کاهش در پارامتر شبکه را به افزایش درجه وارونگی و افزایش انرژی سطحی نیز نسبت داده‌اند [22، 23]. همچنین با افزایش اندازه بلورک‌ها برهم‌کنش مدارهای الکترونی جفت نشده بر سطح نانوذرات کاهش می‌یابد، که منجر به کاهش ثابت شبکه می‌شود [24].

آنالیز FT-IR

آنالیز بیناب‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ روشی بسیار سودمند برای شناسایی، بررسی کیفی و تعیین مقادیر اجزای تشکیل دهنده یک ماده است. این آنالیز به تأیید تشکیل ساختار در نمونه‌های فریتی کمک می‌کند [8]. همچنین این روش بر اساس اندازه‌گیری فرکانس ارتعاشی باندهای شیمیایی بین اتم‌ها کار می‌کند. شکل 3 بیناب‌های الف (FT-IR) ب (KBr)، طیف‌های عبوری و ج (طیف‌های جذبی نمونه SrFe_2O_4 در دمای 0°C و 700 با زمان‌های پخت مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از قسمت (ب) و (ج) مشخص است در فاصله $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ دو قله پهن اصلی، پیوند اکسیژن-فلز در نمونه‌های تهیه شده دیده می‌شود [25]. قله بزرگتر در اعداد موج 590، 589 و 591 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی چهاروجهی پیوند اکسیژن-فلز و قله کوچکتر در اعداد موج 435، 431 و 436 cm^{-1}

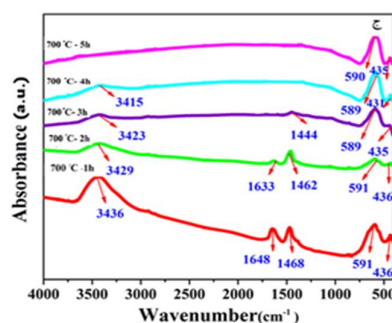


پیوند تنها به وسیله طول پیوند معین می شود و پایداری یک سطح، وابسته به دانسیته اتمی در آن سطح است، زیرا سطوح $\{111\}$ بیشترین فشردگی را دارا می باشند، پس این صفحات در بلورهای فلزی fcc، پایدارترند. در نتیجه ریخت شناسی این بلورها معمولاً هشت وجهی است. اما در نوع دیگری از بلورهای fcc، مانند NaCl صفحه $\{111\}$ صفحه ناپایداری است، چون که لایه های متناوب از کاتیون ها و آنیون ها باعث می شود این صفحات قطبشده و انرژی بالایی داشته باشند. بنابراین صفحات $\{111\}$ صفحات ناپایداری هستند که شکل بلور را از هشت وجهی دور کرده و به سمت مکعبی سوق می دهند [30].



شکل 4. تغییرات ریخت شناسی در بلورهای fcc [30].

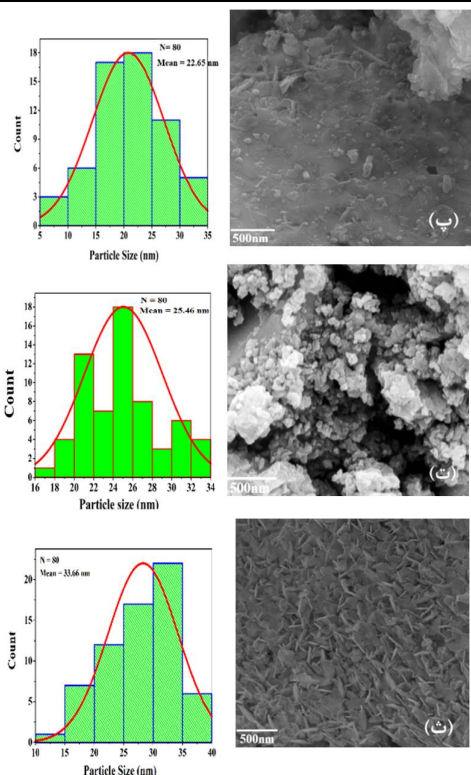
شکل 5 تصویر نمونه های پخت شده در دمای 700°C با زمان های مختلف با مقیاس 500 نانومتر به همراه نمودارهای توزیع فراوانی ذرات برحسب اندازه آنها را نشان می دهد. همان طور که از تصاویر مشاهده می شود، ذرات ریز پودر فریت به هم چسبیده و توده تشکیل داده اند، که دلیل آن ناشی از برهم کنش دو قطبی های مغناطیسی بین ذرات فریت است و نیز به دلیل ریز بودن ذرات در حد نانومتری بوده که سبب بالارفتن انرژی سطحی ذرات می شود [31]. و همچنین به دلیل خاصیت مغناطیسی این مواد یعنی روش ساخت، اندازه و ریخت شناسی ذرات است [32 و 33]. با توجه به شکل 5 با افزایش زمان پخت به طور میانگین، اندازه ذرات از 11nm به 33 nm افزایش یافته است [34]. همچنین نمودارهای هیستوگرام شکل 5 نشان می دهند که عمده



شکل 3. بیناب های FT-IR (الف) KBr، (ب) طیف های عبوری و (ج) طیف های جذبی نمونه SrFe_2O_4 در دمای 700°C با زمان های پخت مختلف.

تصاویر FESEM

ریخت شناسی یک بلور به وسیله فاکتورهای ساختاری ذاتی و بیرونی تعیین می شود. در شرایط تعادلی فاکتورهای ذاتی منجر به تشکیل بلوری با کمترین انرژی سطح می شود. شرایط بیرونی در طی فرآیندهای مختلف تولید، باعث می شود شکل بلوری از حالت تعادلی دور شده و ریخت شناسی متفاوتی به دست آید. سنتز احتراقی به دلیل نرخ واکنش و دمای نسبتاً بالا، یک فرآیند غیر تعادلی برای تولید ذرات سرامیکی است. بنابراین ریخت های مختلفی از ذرات تولیدی در این روش قابل مشاهده است. برای بلورهایی با ساختار fcc صفحات $\{111\}$ و $\{100\}$ سطوح پایداری هستند که می توانند اشکال بلوری مختلفی را تولید کنند. اگر صفحه $\{111\}$ به تنهایی پایدار باشد، ریخت هشت وجهی محدود شده با صفحات $\{111\}$ خواهد بود و اگر صفحه $\{100\}$ به تنهایی پایدار باشد، مکعبی از صفحات $\{100\}$ به وجود خواهد آمد. شکل 4 تغییرات ریخت را برای بلورهای fcc نشان می دهد. در این شکل از سمت چپ به راست، پایداری صفحات $\{100\}$ بیشتر شده و از پایداری صفحات $\{111\}$ کاسته می شود. در بلورهای فلزی fcc، پیوندهای اتمی تنها از نوع پیوند فلزی هستند و قدرت



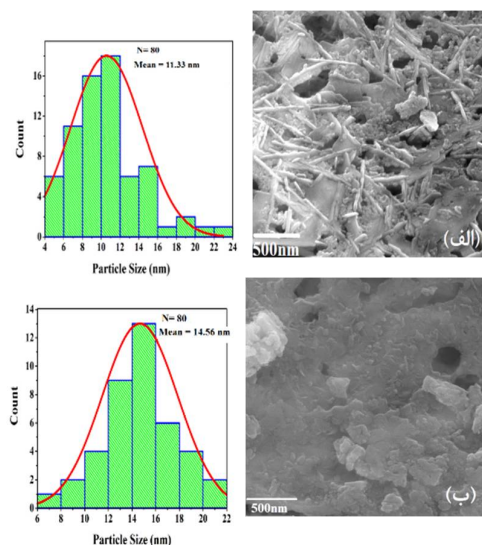
شکل 5. تصاویر FESEM نمونه‌های پخت شده در دمای 700°C با زمان‌های پخت (الف) 1، (ب) 2، (پ) 3 و (ت) 4 و 5 ساعت به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی ذرات برحسب اندازه آنها.

بررسی آنالیز VSM

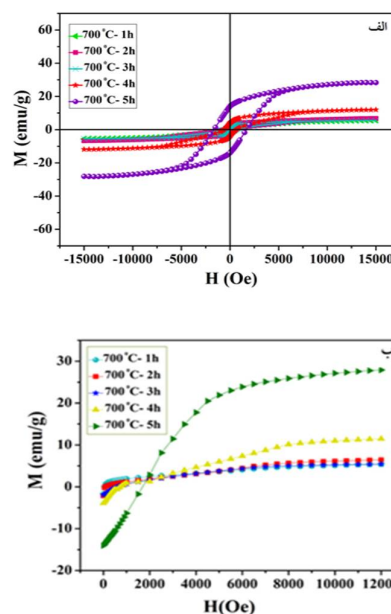
شکل 6 منحنی پسماند مربوط به نمونه‌های ساخته شده در دمای 700°C با زمان‌های پخت مختلف را نشان می‌دهد. خواص مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از حلقه‌های پسماند محاسبه گردید. مغناطش اشباع (M_s)، پسماند مغناطیسی (M_r)، وادارندگی مغناطیسی (H_c) از حلقه‌های پسماند به‌دست می‌آید و با استفاده از رابطه 9 ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورین (K) محاسبه گردید، که نتایج حاصل در جدول 3 آورده شده است. ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورین (K) از فرمول زیر به‌دست می‌آید [38]:

$$K = M_s \cdot \frac{H_c}{0.96} \quad 9$$

اندازه نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم پخت شده در دمای 700°C در زمان‌های یک ساعت در محدوده (10-12) نانومتر، دو ساعت در محدوده (14-16) نانومتر، سه ساعت در محدوده (20-25) نانومتر، چهار ساعت در محدوده (25-30) نانومتر و زمان پنج ساعت در محدوده (30-35) نانومتر قرار دارد، قابل ذکر است متوسط اندازه ذرات با شمارش 80 ذره از هر نمونه به‌طور تصادفی انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار Digimizer و خطای $\pm 4\text{nm}$ محاسبه گردید، که در نمونه 700°C با زمان پخت 5 ساعت، ریخت‌شناسی و اندازه ذرات تغییر یافته و نانو صفحه‌ای با ضخامت 33 نانومتر به‌دست آمد، این تغییر به‌سبب افزایش انرژی جنبشی نانوذرات کوچک به هم چسبیده و نفوذ آنها به درون یکدیگر می‌باشد. این افزایش اندازه نانوذرات می‌تواند تأثیر مهمی بر رفتار فیزیکی آنها داشته باشد [35]. پارامترهایی مانند اندازه نانوذرات، شکل، میکروساختار و فاز نیز به‌شدت تحت تأثیر خواص نانو بلور مانند رنگ، واکنش شیمیایی و رفتار کاتالیزوری قرار دارند [36]. همچنین کاهش یا افزایش سرعت واکنش با تغییر بر روی روند رشد نانوذرات، باعث تغییر در اندازه و شکل آنها می‌شود [37].



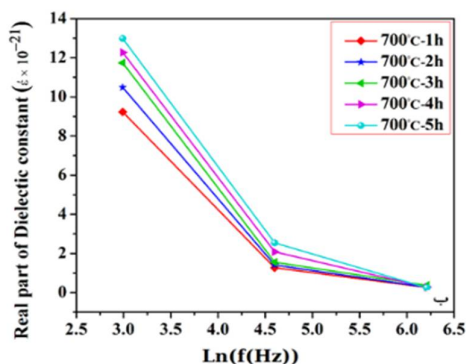
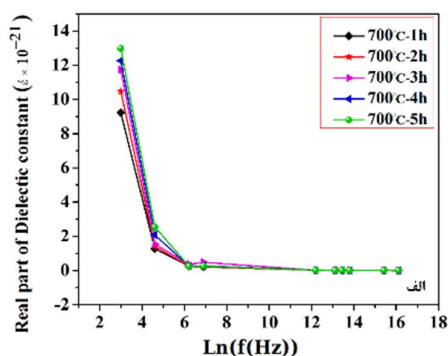
حوزه به راحتی در فرآیند مغناطیسی شدن نمونه حرکت کند. همچنین، مطابق با ریخت‌شناسی هسته-پوسته نانوذرات، حضور یک هسته بانظم فری مغناطیسی و یک لایه سطحی شبه اسپین-شیشه‌ای با مغناطش صفر، نسبت بالاتر هسته به پوسته در نانوذرات بزرگتر منجر به حذف اثرات سطحی می‌شود، در نتیجه مغناطش اشباع با افزایش زمان پخت و به تبع آن، اندازه ذرات افزایش می‌یابد. دلیل دیگری که می‌توان برای افزایش مغناطش با افزایش زمان پخت ذکر کرد توزیع یونهای Fe^{3+} در هر دو جایگاه چهار و هشت‌وجهی است. مغناطش فریت‌های اسپینلی به شدت به توزیع کاتیون‌های فلزی در هر دو جایگاه بستگی دارد. تغییر تعداد یونهای Fe^{3+} در جایگاه هشت‌وجهی به طور مستقیم بر گشتاور مغناطیسی به ازای هر واحد فرمول (n_B) که برابر با $n_B = M_B - M_A$ است اثر می‌گذارد. در واقع، M_A و M_B به ترتیب برابر با جمع گشتاورهای مغناطیسی موجود در جایگاه‌های چهار و هشت‌وجهی است [40]. به طور کلی می‌توان گفت که خواص مغناطیسی نتیجه رقابتی بین ناهمسانگردی مغناطوبلوری و شکلی، اثرات کج شدگی، توزیع کاتیون‌ها، درجه بلورینگی و اندازه نانوذرات است [41]. همچنین طبق شکل 6 و جدول 3 وادارندگی نمونه‌ها با افزایش زمان پخت، افزایش می‌یابد. همان‌گونه که نتایج FESEM نشان می‌دهد، اندازه ذرات هم با افزایش زمان پخت روند افزایشی دارد و با توجه به اینکه افزایش میدان وادارندگی با افزایش اندازه ذرات همراه است به نظر می‌رسد که ذرات در بازه تک‌حوزه قرار دارند [42]. براساس گزارش لی و همکاران [43] مواد با وادارندگی بالاتر از 1200Oe در ساخت محیط‌های ضبط مغناطیسی کاربرد دارند. طبق بررسی‌های کومار و همکاران، ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورین به اندازه ریز بلورک‌ها بستگی دارد. زیرا با افزایش زمان پخت، اندازه ریز بلورک‌ها بزرگ‌تر شده



شکل 6. الف) حلقه‌های پسماند مغناطیسی و ب) منحنی‌های مغناطش نمونه‌های تهیه‌شده در دمای $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ با زمان‌های پخت مختلف.

با توجه به جدول 3 و شکل 6 می‌توان گفت که با افزایش زمان پخت، مغناطش نمونه‌ها افزایش یافته است. این اثر می‌تواند با استفاده از سازوکار مغناطیسی شدن یک ماده مغناطیسی به شرح زیر توضیح داده شود: اعمال یک میدان مغناطیسی بر یک ماده مغناطیسی منجر به حرکت دیواره‌های حوزه‌ها در طول بلور شده تا اینکه با اعمال بیشتر میدان، ساختار چند حوزه ماده به ساختار تک حوزه (گشتاور مغناطیسی تمام حوزه‌ها هم‌جهت شده) تبدیل می‌شود. عوامل ذاتی شامل نقص‌ها و ناکاملی‌های شبکه، کرنش‌های شبکه و ناخالصی‌های شیمیایی، نقش مهمی در جابه‌جایی دیواره‌های حوزه‌ها دارند. میدان‌های خیلی قوی بر ناهمسانگردی غلبه می‌کنند و مغناطش به یک مقدار ثابت به نام مغناطش اشباع (M_s) می‌رسد [39]. رفتار مغناطیسی فریت‌ها به شدت تابع اندازه ذرات آنها است. به این علت که در نانوذرات بزرگتر، تبلور بالاتر و مقدار کم ناکاملی‌های میکروساختاری شبکه، اجازه می‌دهد که دیواره‌های

دی‌الکتریک حقیقی (ϵ') با تغییر فرکانس می‌باشد که نشان می‌دهد، با افزایش فرکانس، ثابت دی‌الکتریک حقیقی (ϵ') نمونه‌ها کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار طبیعی دی‌الکتریک در فریت‌ها است و می‌توان این امر را توسط مدل ماکسول-وگنر توجیه کرد. بنابر مدل ماکسول-وگنر، مواد دی‌الکتریک با ساختار ناهمگن را می‌توان این‌گونه تصور کرد که شامل دانه‌هایی با رسانش الکتریکی خوب می‌باشند که توسط لایه‌های نازک مقاومتی (مرزدانه‌ها) زیادی از هم جدا شده‌اند. در این مورد، ولتاژ اعمالی بر نمونه، به‌طور عمده در عبور از میان مرزدانه‌ها کاهش یافته و یک قطبش بار فضایی در مرزدانه‌ها ایجاد می‌کند. قطبش بار فضایی، توسط بارهای آزاد موجود در مرزدانه‌ها و رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها کنترل می‌شود [45]. بنابراین، وجود نقص و ساختار ریز ناهمگون تأثیر به‌سزایی در تغییرات ثابت دی‌الکتریک برحسب فرکانس خواهد داشت.



و ثابت ناهمسانگردی افزایش پیدا می‌کند و نیز با افزایش اندازه ریزبلورک‌ها نسبت حجم به سطح افزایش می‌یابد. در ثابت ناهمسانگردی مغناطیبولورین، سهم حجم بیشتر از سطح قابل توجه است، بنابراین با افزایش اندازه ریز بلورک‌ها، ثابت ناهمسانگردی مغناطیبولورین به‌علت افزایش جفت‌شدگی اسپین-مدار افزایش پیدا می‌کند [44] و نیز طبق رابطه 9 با افزایش مغناطش اشباع، k ثابت ناهمسانگردی نیز افزایش می‌یابد.

جدول 3. خواص مغناطیسی نمونه‌های تهیه‌شده در دمای 700°C با زمان‌های پخت مختلف.

زمان پخت (ساعت)	M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	H_c (Oe)	K (emu/g)O _e
1	4,96	2,53	92,18	476,39
2	5,53	2,74	99,62	574,62
3	5,91	1,73	590,03	3633,50
4	10,67	3,24	642,33	7139,89
5	24,11	13,77	1632,81	41009,21

خواص دی‌الکتریکی

الف) رفتار فرکانسی

الف-1) بررسی نمودار $\epsilon' - \text{Ln}f$

برای بررسی خواص دی‌الکتریکی نمونه‌ها، از قرص ساخته‌شده آنها به‌عنوان خازن استفاده گردید، سپس خواص دی‌الکتریکی مختلف نمونه‌ها از قبیل ثابت دی‌الکتریک حقیقی (ϵ')، ثابت دی‌الکتریک موهومی (ϵ'')، رسانندگی الکتریکی (σ_{ac}) با استفاده از دستگاه LCR متر در دمای اتاق در گستره فرکانسی 20 هرتز تا 10 مگاهرتز اندازه‌گیری شد. شکل 7 تغییر ثابت دی‌الکتریک حقیقی (ϵ') نمونه‌ها برحسب $\text{Ln}f$ در دمای 700°C با زمان‌های پخت مختلف را نشان می‌دهد. نکته قابل بررسی در این نمودار تغییر ثابت

شکل 8. نمودار بخش موهومی ثابت دی الکتریک (الف) از فرکانس 20Hz تا 10 MHz و (ب) در فرکانس های پایین در دمای 700 °C با زمان های پخت مختلف.

شکل 7. نمودار بخش حقیقی ثابت دی الکتریک (الف) از فرکانس 20Hz تا 10 MHz (ب) در فرکانس های پایین در دمای 700 °C با زمان های پخت مختلف.

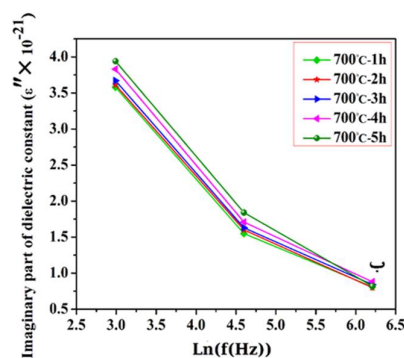
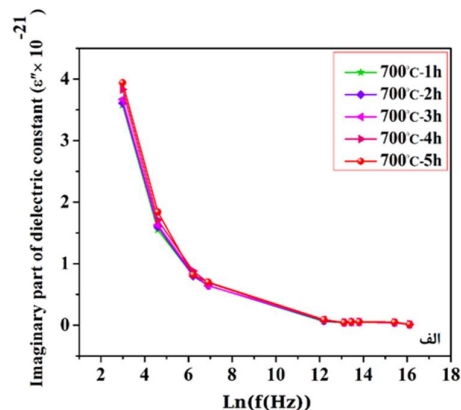
ب-2) بررسی نمودار ϵ'' -Ln f

با افزایش زمان پخت ضریب دی الکتریک (حقیقی و موهومی) روند افزایشی دارد. چنانکه در شکل های 7 و 8 دیده می شود، تفاوت در بخش های حقیقی و موهومی ضریب دی الکتریک در این است که بخش موهومی ضریب دی الکتریک در فرکانس های پایین سریع کاهش یافته و شیب تندتری نسبت به بخش حقیقی ضریب دی الکتریک دارد.

شکل 8 تغییر ثابت دی الکتریک موهومی (ϵ'') نمونه ها برحسب Ln f در دمای 700 °C با زمان های پخت مختلف را نشان می دهد. مطابق این شکل، برای همه نمونه های فریتی، کمیت ϵ'' ، با افزایش فرکانس به سرعت کاهش می یابد و زیر یک فرکانس معین، به یک مقدار ثابت می رسد، که این کاهش، نشان گر رفتار طبیعی دی الکتریکی فریت ها می باشد. بنابراین برای فریت ها، فرکانس های بالا مهم تر از فرکانس های پایین می باشد و می توان دلیل آن را با استفاده از مدل دولایه ای ماکسول-وگنر شرح داد [46، 47].

ج-3) بررسی نمودار σ_{ac} -Ln f

شکل 9 تغییرات رسانندگی الکتریکی (σ_{ac}) برحسب Ln f برای نمونه های ساخته شده در دمای 700 °C با زمان های پخت مختلف را نشان می دهد. تغییرات رسانندگی الکتریکی را می توان توسط سازوکار پرش و روی توضیح داد [48]. بنابر سازوکار پرش و روی، رسانندگی الکتریکی در فریت ها، به علت پرش الکترون ها بین یون هایی که بیش از یک حالت ظرفیت دارند و به طور کاتوره ای در جایگاه های شبکه توزیع شده اند. بنابراین می توان سازوکار رسانندگی الکتریکی براساس پرش الکترون بین یون های Fe^{2+} و Fe^{3+} در جایگاه های هشت وجهی B توصیف کرد [49، 50]. همچنین با توجه به شکل 9، با افزایش بسامد رسانندگی الکتریکی σ_{ac} نمونه ها افزایش می یابند. این تغییرات براساس مدل دولایه ای ماکسول-وگنر قابل توجیه است. با افزایش بسامد دانه های رسانا با استفاده از پرش الکترون ها بین یون های Fe^{2+} و Fe^{3+} بسیار فعال می شوند و در نتیجه با افزایش بسامد رسانندگی σ_{ac}



رشد اندازه بلورک‌ها، مغناطش اشباع و وادارندگی مغناطیسی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک نمونه‌ها نشان داد که با افزایش فرکانس، ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک کاهش یافته در حالی که رسانندگی الکتریکی افزایش پیدا کرده است که این رفتار را می‌توان با مدل دولایه‌ای ماکسول-وگنر توضیح داد. همچنین با افزایش زمان پخت ضریب دی‌الکتریک (حقیقی و موهومی) روند افزایشی دارد.

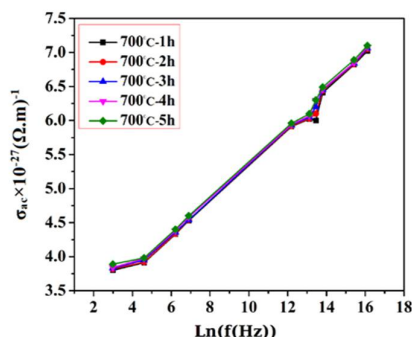
سپاس‌گزاری

از دانشگاه شهید چمران اهواز برای حمایت از این طرح پژوهشی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

مرجع‌ها

- [1] C.B. Carter, M.G. Norton, *Ceramic materials* Springer (2007).
- [2] B.D. Cullity, C.D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, 2nd Edition ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, (2009).
- [3] Z. Yue, J. Zhou, L. Li, H. Zhange, Z. Gui, Synthesis of nanocrystalline NiCuZn ferrite powders by Sol-Gel auto combustion method, *Journal of Magnetism and magnetic materials* 208 (2000) 55-60.
- [4] A.K. Bandyopadhyay, *Nano Materials*, New Age International Ltd (2008).
- [5] B. Issa, I.M. Obaidat, B.A. Albiss, Y. Haik, Magnetic Nanoparticles: Surface Effects and Properties Related to Biomedicine Applications, *Journal of Molecular Science* 14 (2013) 21266-21305.
- [6] D.S. Mathew, R.S. Juang, An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions, *Chemical Engineering Journal* 129 (2007) 51-65.

افزایش می‌یابد [51,52]. همچنین با افزایش زمان پخت، رسانندگی الکتریکی افزایش پیدا می‌کند.



شکل 9. تغییرات رسانندگی الکتریکی از بسامد 20Hz تا 10MHz در دمای 700 °C با زمان‌های پخت مختلف.

نتیجه‌گیری

نتایج الگوی پراش پرتوی ایکس نشان می‌دهد، با افزایش زمان پخت در دمای 700°C، فاز فریت اسپینلی استرانسیوم کامل‌تر شده، به طوری که در زمان پخت 4 ساعت، نمونه خالص و تک فاز SrFe₂O₄ به دست آمد ولی در زمان 5 ساعت ساختار نمونه پخت شده دست‌خوش کرنش شده و از حالت فریت اسپینلی استرانسیوم تک‌فاز خارج گردید. همچنین با افزایش زمان پخت، پارامتر شبکه کاهش یافته ولی میانگین اندازه ذرات و بلورک‌ها افزایش یافت. قله‌های شدید مشاهده شده در فاصله 400-600cm⁻¹ در طیف FT-IR نمونه‌ها، مربوط به پیوند فلز-اکسیژن و تشکیل فریت اسپینلی استرانسیوم می‌باشد. نتایج FESEM نشان داد که با افزایش زمان پخت تا 4 ساعت نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم تقریباً کروی بوده ولی در زمان 5 ساعت شکل این نانوذرات از حالت کروی خارج و تشکیل نانو صفحه دادند. نتایج VSM نشان داد که رفتار مغناطیسی نانوذرات فریت اسپینلی استرانسیوم به اندازه ذرات تهیه شده بستگی دارد و با

- nanoparticles, *Materials Research Express* 4 (2017) 075025.
- [15] S. Verme, J. Kerner, A. Patina, P.A. Joy, Low temperature synthesis of nanocrystalline powders of lithium ferrite by an auto combustion method using citric acid and glycine, *material letter* 59(2005) 2630-2633.
- [16] R. Vogel, B. Evans, Solid state-and magneto-chemistry of the SrO-Fe₂O₃ system: III. The non-existence of single-phase SrFe₂O₄, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 13 (1979) 294-300.
- [17] H.I. Saleh, Reaction mechanisms of strontium ferrites synthesis, *Journal of the Chinese Chemical Society* 49 (2002) 341-348.
- [18] S.K. Pardeshi, R.Y. Pawar, SrFe₂O₄ complex oxide an effective and environmentally benign catalyst for selective oxidation of styrene, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 334 (2011) 35-43.
- [19] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, A. Szalay, G. Pantazopoulos, processing of high temperature superconductors at high strain rates, *Technomic Publishing Company Inc* (2000).
- [20] A. Yang, C.N. Chinnasamy, J.M. Greneche, Y. Chen, S.D. Yoon, K. Hsu, C. Vittoria, V.G. Harris, *Applid Physics Letters* 94 (2009) 113109.
- [21] P.J. van der Zaag, V.A.M. Brabers, M.T. Johnson, A. Noordermeer, P.F. Bongers, *Physical Review B* 51 (1995) 12009.
- [22] M. Atif, S.K. Hasanian, Magnetization of sol-gel prepared Zinc ferrite nanoparticles: effects of inversion and particle size, *Solid State Communications* 138 (2006)416-421.
- [23] K.S. Lee, S.T. Myung, K. Amine, H. Yashiro, Y.K. Sun, Structural and electrochemical properties of layered Li [Ni_{1-2x}Co_x Mn_x] O₂ (x = 0.1-0.3) positive electrode materials for li- ion batteries, *Journal Electrochemical Society* 154 (2007) 971-977.
- [24] P. Vaqueiro, M. Lopez-Quintela, Influence of complexing Agents and pH on Yttrium- Iron Garnet Syntehesized by the Sol-gel method, *chemical materials* 9 (1997) 2836-2841.
- [25] J. Silva, W. Brito, N. Mohallem, Influence of heat treatment on cobalt ferrite ceramic [7] K. Jain, Microwave Ferrite Materials, Devices, *Invert is Journal of Science & Technology* 1 (2007)221-228.
- [8] ز. شریفی، س.ا. موسوی قهفرخی، م. زرگروشتری، بررسی تأثیر دمای پخت بر ویژگی‌های مغناطیسی ساختاری نانوذرات فریت اسپینلی سرب (PbFe₂O₄). مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، ویژه‌نامه اولین کنفرانس ملی فیزیک نانو و فرا مواد از شبیه سازی تا صنعت 6، (1394)، 51-43.
- [8] Z. Sharifi, S.E. Musavi Ghahfarokhi, M. Zargar Shushtari, Investigation the effect of annealing temperature on the structural and magnetic properties of lead spinel ferrite nanoparticles (PbFe₂O₄), *Journal of Research on Many-body Systems, First national conference of nanophysics and metamaterial from simulation to industry* 6 (2015) 43-51.
- [9] A. Manikandan, J. Judith Vijaya, M. Sundararajan, C. Meganathan, L. John Kennedy, M. Bououdina, Optical and magnetic properties of Mg-doped ZnFe₂O₄ nanoparticles prepared by rapid microwave combustion method, *Journal of Superlattices and Microstructures* 64 (2013) 118-131.
- [10] R. Tholkappiyan, K. Vishista, Structural, optical and magnetic properties of nanocrystalline zinc ferrite particles from glycine assisted combustion: Effect of Sr²⁺ dopant, *International Journal of Materials Research* 106 (2015) 127 - 136.
- [11] N. Kaur, M. Kaur, Comparative studies on impact of synthesis methods on structural and magnetic properties of magnesium ferrite nanoparticles, *Processing and Application of Ceramics* 8 (2014) 137-143.
- [12] M.M. Rashad, Magnetic properties of nanocrystalline magnesium ferrite by co-precipitation assisted with ultrasound irradiation, *Journal of Materials Sciences* 42 (2007) 5248-5255.
- [13] K. Shyam Gore, S. Santosh Jadhav, V. Vijaykumar Jadhav, S.M. Patange, Mu. Naushad, S. Rajaram Mane, Kwang Ho Kim, The structural and magnetic properties of dual phase cobalt ferrite, *in Scientific Reports* (2017).
- [14] S. Sagadevan, K. Pal, Z. Zaman Chowdhury, Md Enamul Hoque, Structural, optical and dielectric investigation of CdFe₂O₄

- nanoparticles, *Journal of Research on Many-body Systems* **6** (2017) 1-9.
- [34] م. اشراقی، م. روشن مهر، ب. کاملی، ف. خادمی، بررسی اثر دمای بازپخت بر روی ویژگی‌های ساختاری، الکتریکی و مغناطیسی منگنایت $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$ ، *مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای*، **2** (1392)، 35-41.
- [34] P. Kameli, M. Eshraghi, M. Roshanmehr, F. Khademi, The Effect of Annealing Temperature on Structural, Electrical and Magnetic Properties of $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$ Manganite, *Journal of Research on Many-body Systems* **2** (2013) 35-41.
- [35] آ. ذوالفقاری، ف. طالشی، ع. پهلوان، سنتز نانوذرات $\text{Cu}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ به روش رسوب دهی مستقیم و بررسی تأثیر آن بر کاهش مقاومت انتقال الکترون در سیستم‌های مبادله الکترون، *مجله علمی پژوهشی شیمی کاربردی*، **10** (1394)، 28-23.
- [35] F. Taleshi, A. Zolfaghari, A. Pahlavan, Synthesis of $\text{Cu}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticle by chemical precipitation method and its effect on reduction of charge transfer resistant in electron transfer systems, *Journal of Applied Chemistry* **10** (2015) 23-28.
- [36] A. Khataee, G.A. Mansoori, *nanostructured titanium dioxide materials properties preparation and applications*, (2012).
- [37] ع. سیمچی، آشنایی بانانوذرات: خواص، روش‌های تولید و کاربرد، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (1392).
- [37] A. Simchi, Introduction to Nanoparticles: Properties, Production Methods and Applications, Sharif University of Technology Scientific Publications, (2013).
- [38] P.A. Shaikh, R.C. Kambale, A.V. Rao, Y.D. Kolekar, Effect of Ni doping on structural and magnetic properties of $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Fe}_{1.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_4$, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **322** (2010) 718-726.
- [39] R.H. Kodama, A.E. Berkowitz, E.J. McNiff, S. Foner, Surface spin disorder in ferrite nanoparticles, *Journal of Applied Physics* **81** (1997) 5552-5557.
- [40] J.R. Hook, H.E. Hall, *Solid State Physics*: John Wiley & Sons, (1995).
- powders, *Materials Science and Engineering B* **112** (2004) 182-184.
- [26] R.D. Waldron, Infrared spectra of ferrites, *physical review* **99** (1955) 1727-1735.
- [27] B.K. Chougule, D.R. Patil, Effect of copper substitution on electrical and magnetic properties of NiFe_2O_4 ferrite, *Journal of materials chemistry and physics* **117** (2009) 35-40.
- [28] Z. Yue, W. Guo, J. Zhou, Z. Gui, L. Li, Synthesis of nanocrystalline ferrites by sol-gel combustion process: the influence of pH value of solution, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2004) 216-223.
- [29] A.G. Deviprasad, J. Komal kumar, M. ZAREI, Shubha gopal, FT-IR Spectroscopic studies on cleome gynandra comparative analysis of functional group before and after extraction, (2013).
- [30] S. Jin, A Common Regularity of Stoichiometry-Induced Morphology Evolution of Transition Metal Carbides, Nitrides, and Diborides during Self-Propagating High-Temperature Synthesis, *Journal of Crystal Growth* **12** (2012) 2814-2824.
- [31] P. Shankar, Bhavyashri, R.S. Raveendra, A. Jayasheelan, C.S. Prakash, B. M. Nagabhushana, H. Nagabhushana, B. Daruka Prasad, Synthesis, characterization and magnetic properties of CaFe_2O_4 nanoparticles by solution combustion method, *International journal of advanced scientific and technical research* **1** (2015) 2249-9954.
- [32] M. Hue Dang, V. Dung Trinh, D. Huan Bui, M. Huong Phan and Dang Chinh Huynh, Sol-gel hydrothermal synthesis of strontium hexaferrite nanoparticles and the relation between their crystal structure and high coercivity properties, *Advances in Natural Sciences: Nanosciences and Nanotechnology* **3** (2012) 025015.
- [33] ح. قربانی، م. اشراقی، بررسی اثر آلیاژ کروم بر روی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت MnFe_2O_4 ، *مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای*، **6** (1395)، 1-9.
- [33] H. Ghorbani, M. Eshraghi, Investigation of chromium doping effect on the structural and magnetic properties of $\text{MnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ ferrite

- ترکیب $\text{SrNi}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ، مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، 6، (1395)، 35-48.
- [47] N.Heidary, S.E. Mousavi Ghahfarokhi, M. Zargar Shoushtari, Investigating molar ratio of citric acid on the structural, magnetic and dielectric properties of $\text{SrNi}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ nanostructures, *Journal of Research on Many-body Systems* 6 (2016) 35-48.
- [48] E.J.W. Verwey, J.H. de Boer, Cation arrangement in a few oxides with crystal structures of the spinel type, *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas* 55 (1936) 531-540.
- [49] M. Anis-ur-Rehman, G. Asghar, Variation in structural and dielectric properties of co-precipitated nanoparticles strontium ferrites due to value of pH, *Journal of Alloys and Compounds* 509 (2011) 435-439.
- [50] M.J. Iqbal, M.N. Ashiq, I.H. Gul, Physical, electrical and dielectric properties of Ca substituted strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) nanoparticles synthesized by co-precipitation method, *Magnetism and Magnetic Materials* 322, (2010) 1720.
- [51] M.J. Iqbal, S. Farooq, Impact of Pr-Ni substitution on the electrical and magnetic properties of chemically derived nanosized strontium-barium hexaferrites, *Journal of Alloys and Compounds* 505 (2010) 560.
- [52] M.J. Iqbal, M.N. Ashiq, Physical and electrical properties of Zr-Cu substituted strontium hexaferrite nanoparticles synthesized by coprecipitation method, *Chemical Engineering Journal* 136 (2008) 38.
- [41] M. Rahimi, P. Kameli, M. Ranjbar, H. Salamati, The effect of sintering temperature on evolution of structural and magnetic properties of nanostructured $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite, *Journal of Nanoparticle Research* 15 (2013) 1865.
- [42] N. Poudyal, *Fabrication of superparamagnetic and ferromagnetic nanoparticles, the university of texas a arlington*, (2008).
- [43] Y. Li, R. Liu, Z. Zhang, C. Xiong, Synthesis and characterization of nanocrystalline $\text{BaFe}_{9.6}\text{Co}_{0.8}\text{Ti}_{0.8}\text{M}_{0.8}\text{O}_{19}$ particles, *Materials* 64 (2000) 256-259.
- [44] L. Kumar, M.Kar, Influence of Al^{3+} concentration on the crystal structure and magnetic anisotropy of nanocrystalline spinel cobalt ferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 323(2011)2042-2048.
- [45] C.C. Chauhan, R.B. Jotania, Microstructural, thermal, magnetic and dielectric properties of cobalt doped barium calcium hexaferrite prepared by a sol-gel route, *International Journal of Advanced Engineering Technology* 3 (2012) 135-139.
- [46] A.P. Ramirez, M.A. Subramanian, M. Gardel, G. Blumberg, D. Li, T. Vogt, S.M. Shapiro, Giant dielectric constant response in a copper-titanate, *Solid State Commun* 115 (2000) 217-220.
- [47] ن. حیدری، س.ا. موسوی قهفرخی، م. زرگرشوشتری، بررسی نسبت مولی اسید سیتریک بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوساختارهای هگزافریت نوع W با

Investigating the effect of sintering time on the structural, magnetic and dielectric properties of strontium spinel ferrite nanoparticles (SrFe_2O_4) fabricated by sol-gel method

Seyed Ebrahim Mousavi Ghahfarokhi*, Elham Mohammadzadeh Shobegar, Morteza Zargar Shoushtari

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

Received: 09.07.2017 Final revised: 10.03.2018 Accepted: 23.04.2018

Abstract

In this paper, strontium spinel ferrite nanoparticles (SrFe_2O_4) were synthesized by sol-gel method. Also, in order to investigate the effect of sintering time on the structural, magnetic and dielectric properties of strontium spinel ferrite nanoparticles a gel of metal nitrates with proper molar ratios was first prepared and then the powder was sintered at 700 °C at different times. To investigate structural properties from the X-ray diffraction pattern, Fourier transform infrared spectroscopy and field emission scanning electron microscopy were used. Furthermore, to investigate magnetic and dielectric properties from of the vibrating sample magnetometer and an LCR meter were used. The results of X-ray diffraction patterns indicated the formation of the main phase of spinel-strontium ferrite with increasing sintering time. The results of field emission scanning electron microscope showed that the particles size is nano, but particles are stacked together. The results of the Fourier transform infrared spectroscopy confirm the spinel structure in the samples. Hysteresis curve of the samples showed that with increasing sintering time, saturation magnetization and magnetic coercivity increased which is due to change in the distribution of ions and the anisotropy of nanoparticles. Also, the dielectric measurement of the samples shows that the dielectric constant and the dielectric loss decrease while ac electrical conductivity with increasing the frequency increases. These changes were studied by the Maxwell-Wagner model.

Keywords: Strontium spinel ferrite, Sol-gel, Sintering time, Structural properties, Magnetic properties, Dielectric properties

*Corresponding Author: musavi_ebrahim@yahoo.co.uk