

بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت نیکل تهیه شده به روش هیدروترمال

روزبه نیرهدی^{۱*}، فاطمه عسجدی^۲، پیام سیفی شیروان‌ده^۱ و مهدی سلیمی^۱
۱- گروه مواد و متالورژی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان
۲- پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۶/۱۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵)

چکیده - در این پژوهش، نانوذره فریت نیکل با ابعادی بین ۱۰ تا ۲۰ نانومتر به روش هیدروترمال و با استفاده از پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG) به عنوان سورفاکتانت در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۱۲ ساعت تولید، و اثر دمای واکنش، زمان و سورفاکتانت مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج آنالیز اشعه ایکس، تبدیل اکسید نیکل و فریت نیکل راهی برای NiFe_2O_4 در دما و زمان واکنش و سورفاکتانت بر ساختار ذرات بررسی شد. نشان داد که ذرات تشکیل شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد صورت کلوخه بوده شکل ندارند ولی در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد شکل کروی دارند. افزایش دما و زمان فرایند هیدروترمال افزایش واژگان کلیدی: نانوذره نیکل هیدروترمال، پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG)

Analysis of Structural and Magnetic Characteristics of Nickel Ferrite Nanoparticles Prepared by Hydrothermal Method

R. Nayerhoda^{1*}, F. Asjadi², P. Seifi¹ and M. Salimi¹

1. Materials and Metallurgy Group, Engineering Faculty, Zanjan Islamic Azad University
2. Ceramic Research Group, Materials and Energy Research Center

Abstract: In the present investigation, spherical nanoparticles of nickel ferrite with uniform structure were successfully produced by hydrothermal method in the presence of polyethylene glycol (PEG) as a polymeric surfactant at 180°C for 12 hour

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: roozbeh.nayerhoda@gmail.com

aging time and the effects of the synthesis time, temperature and surfactant were investigated. According to the X-ray analysis, conversion of nickel oxide and hematite to nickel ferrite was a way to produce NiFe_2O_4 . At 140°C , agglomerated particles without specific shape were formed, but at 180°C particles were homogenous with spherical shape. Saturation magnetization increased by increasing the hydrothermal process aging time.

Keywords: Magnetic nanoparticles, Nickel Ferrite, Hydrothermal, PEG

فهرست علائم

°C	سانتی‌گراد	آنگستروم
Ksp	حاصل ضرب انحلال	H_A (MA/m)
H_{CI} (cgs;Oe,SI:A/m)	نیروی پسماندزایی	ناهمسانگردی بلوری مغناطیسی

۱- مقدمه

نانوذرات مغناطیسی کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های پزشکی از جمله تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۱، گرمادرمانی مغناطیسی، ترمیم بافت‌های آسیب‌دیده، دارورسانی هدفمند، ایمنی شناختی و جداسازی سلول، و در صنعت مانند آنتن‌های جذب مایکروویو، ذخیره و بازیابی سریع اطلاعات، حسگرها و هسته ترانسفورماتورها دارند [۱-۳]. فریت نیکل (NiFe_2O_4) از جمله فریت‌های مغناطیسی نرم با فرمول عمومی MFe_2O_3 (که M می‌تواند Ni، Fe، Co و Zn باشد) است و ساختار اسپینلی دارد.

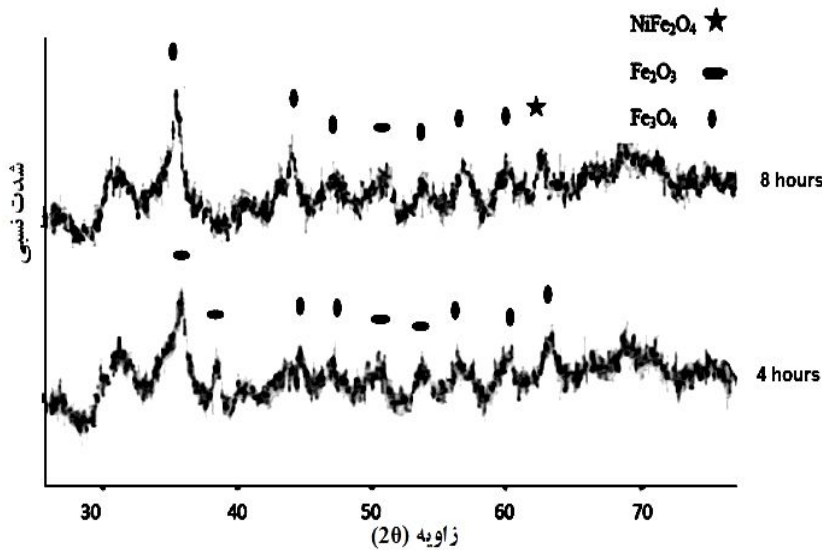
نانوذرات مغناطیسی برای کاربرد در زمینه‌های زیستی باید دارای ویژگی زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری باشند و از آنجایی‌که نانو ذرات کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر بوسیله کلیه‌ها دفع و نانوذرات بزرگ‌تر از ۲۰۰ نانومتر بوسیله سیستم دفاعی بدن از بین می‌روند اندازه‌ای مابین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر مقیاسی مطلوب محسوب می‌شود [۴]. ویژگی مغناطیسی نانوذرات به اندازه، شکل، میزان بلورینگی (کریستالینته)، ریخت (مورفولوژی) و پوشش اطراف نانوذرات وابسته است [۵]. فریت نیکل ساختار حجمی اسپینلی معکوسی دارد که در اثر کاهش اندازه ذرات و کرنش فشرده بین ذرات به ساختار اسپینلی جزئی معکوس تغییر می‌کند [۶ و ۷].

نانوذرات فریت نیکل به‌دلیل انرژی بالای سطوح و اندرکنش‌های دوقطبی-دوقطبی قوی تمایل زیادی به تجمع یا انباشتگی دارند. بنابراین پوشش سطوح نانوذرات با استفاده از مواد

آلی زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر امری الزامی به‌شمار می‌آید. در پژوهش‌های صورت گرفته موادی از قبیل نشاسته [۸]، کیتوسان [۸ و ۹]، پلی‌وینیل‌الکل [۴ و ۸]، پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG) [۸ و ۱۰]، اسیداولئیک [۱۱]، دکستران [۴ و ۸ و ۱۲] و اسید لوریک [۱۲]، به‌عنوان پوشش به‌کار گرفته شده است. در این میان پلی‌اتیلن‌گلیکول ماده‌ای غیرسمی است که پوشش نانوذرات به‌وسیله این ماده، سطحی محافظ و زیست‌سازگار را فراهم می‌آورد. در پژوهش حاضر نانو پودر فریت نیکل با ساختار کروی به‌روش هیدروترمال و با استفاده از پلی‌اتیلن‌گلیکول به‌عنوان پوشش سطحی آلی ساخته شد و تأثیر دما، زمان و حضور پلی‌اتیلن‌گلیکول به‌عنوان پوشش سطحی بر ساختار و ترکیب نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش پژوهش

ساخت نانو پودر NiFe_2O_4 با استفاده از مواد اولیه با خلوص بسیار بالا شامل نیترات آهن، نیترات نیکل، هیدروکسید سدیم و پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG) انجام گرفت. ابتدا ۰/۰۱ مول نیترات نیکل و ۰/۰۲ مول نیترات آهن در ۱۵ میلی‌لیتر آب مقطر با استفاده از همزن مغناطیسی در دمای محیط به‌مدت ۱۵ دقیقه هم‌زده و حل شد. در مرحله بعد ۱۰ میلی‌لیتر پلی‌اتیلن‌گلیکول به‌صورت قطره قطره در حین هم‌زدن به محلول اضافه شد. پس از ترکیب پلی‌اتیلن‌گلیکول، برای تنظیم pH هیدروکسید سدیم نیز به‌صورت قطره قطره به محلول که این‌بار به‌شدت در حال مخلوط شدن است اضافه می‌شود تا زمانی که pH محلول



شکل ۱- الگوهای پراش پرتو اشعه ایکس نمونه‌های تولید شده در ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۴ و ۸ ساعت

حضور فاز Fe_2O_3 و Fe_3O_4 است. در زمان ۸ ساعت از شدت قله هماتیت کاسته شده، قله‌های جدیدی شامل مگنتیت و فریت نیکل به وجود آمده‌اند. شایان ذکر است که به دلیل نزدیک بودن قله‌های مگنتیت و فریت نیکل در زاویه‌های کوچک تمایز قله این دو ماده مقدور نیست ولی با اندکی دقت به قله‌های زاویه‌های $35/5$ و $43/9$ ، می‌توان پی برد که این دو قله در واقع ترکیبی از دو قله بسیار نزدیک به هم هستند. در زاویه‌های بالاتر فاصله قله‌ها مشهودتر است. برای مثال در زمان ۴ ساعت قله زاویه $63/16$ مربوط به مگنتیت بوده و قله زاویه $62/61$ در زمان ۸ ساعت حضور فریت نیکل را نشان می‌دهد. پس در مجموع می‌توان گفت فرآورده‌های اولیه تشکیل شده هماتیت و مگنتیت هستند که با گذشت زمان به فریت نیکل تبدیل می‌شوند.

عدم مشاهده قله‌های واضح مربوط به فرآورده‌های شامل نیکل را می‌توان به دو دلیل زیر نسبت داد. با توجه به نسبت ۲ به ۱ آهن مقادیر فرآورده‌های حاوی نیکل کم‌تر از آهن است و به دلیل نزدیک بودن قله اکسید نیکل به هماتیت احتمال وجود این ماده البته به مقدار کم و عدم تشخیص آن وجود دارد. از سوی دیگر با توجه به بازی بودن محیط واکنش، وجود $Fe(OH)_2$ و $Ni(OH)_2$ در محلول قطعی است. مقدار K_{sp}

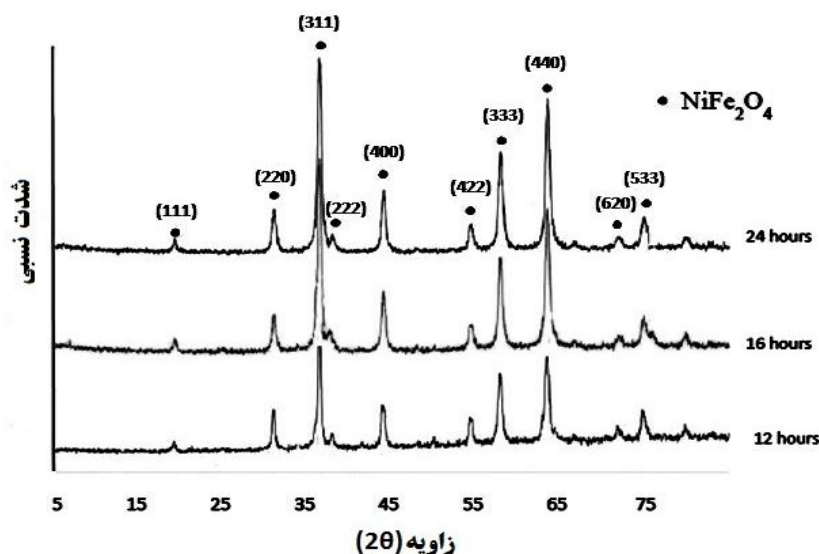
برابر $11/5$ گردد. پس از ۱ ساعت هم‌زدن شدید، مخلوط حاضر در اتوکلاو تا $0/75$ حجم آن ریخته شده، در دماهای 140 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت و در دمای 180 درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۴ ساعت در کوره قرار می‌گیرد. برای مشاهده اثر پلی‌اتیلن‌گلیکول، یکی از نمونه‌ها بدون حضور این ماده به مدت ۸ ساعت در دمای 180 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

ساختار فازی نمونه‌ها توسط دستگاه پراش پرتو اشعه ایکس (XRD) با طول موج $1/5469 \text{ \AA}$ و با چشمه CuK مدل (Intel EQUINOX 2000, USA) و مغناطش نمونه‌ها توسط مغناطش‌سنج نمونه‌ی ارتعاشی، (VSM Lakeshore USA) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ریخت سطحی و اندازه نانو ذرات به وسیله میکروسکوپ الکترونی مدل (KYKY-EM3200, China) بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی فازی

شکل ۱ نشان‌دهنده الگوهای پراش پرتو اشعه ایکس نمونه‌های تولید شده در 180 درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۴ و ۸ ساعت است. الگوی پراش پرتو ایکس برای ۴ ساعت نشان‌دهنده



شکل ۲- الگوهای پراش پرتو اشعه ایکس نمونه‌های تولید شده در 180° درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۱۲، ۱۶، و ۱۸ ساعت

اندازه بلورک با گذشت زمان است. به دلیل یکسان نبودن مواد موجود در نمونه‌های با زمان کم‌تر، محاسبات در مورد آنها انجام نشد ولی قله‌های پهن موجود در الگوی تفرق نمونه‌های با زمان کم نشانگر اندازه کوچک بلورک‌ها در این دو نمونه است.

الگوی پراش پرتو اشعه ایکس نمونه مربوط به ۱۲، ۱۶ و ۲۴ ساعت در شکل ۲ نشان داده شده است. در زمان واکنش ۱۲ ساعت فریت نیکل خالص قابل تشخیص است. با افزایش زمان به ۱۶ و ۲۴ ساعت بلورینگی به وضوح افزایش یافته و ترکیب تغییری نمی‌کند. الگوی تفرق اشعه ایکس حاصل از هر سه نمونه با فاز NiFe_2O_4 خالص با ساختار اسپینلی مکعبی و شماره کارت استاندارد ۲۰۸۱-۷۴ هماهنگی دارد.

۲-۳- ریخت‌شناسی

شکل‌های ۳ تا ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه تولید شده در دمای 180° درجه سانتی‌گراد، در حضور پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG) در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با تغییر مدت زمان واکنش، ساختارهای با اندازه و شکل‌های متفاوت به دست آمد.

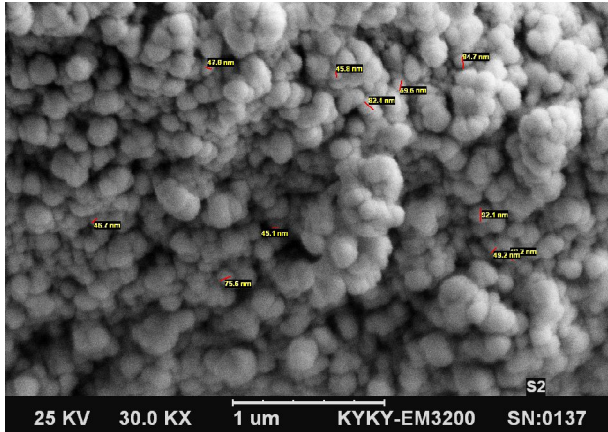
این دو ماده به ترتیب برابر با $5/47 \times 10^{-16}$ و $2/64 \times 10^{-39}$ است [۱۳]. بنابراین مقدار نیکل محلول در حدود 10^7 برابر آهن محلول است. با اینکه این محاسبات مربوط به فشار و دمای محیط است و در شرایط هیدروترمال صدق نمی‌کند ولی بیش‌تر بودن مقدار نیکل در محلول نسبت به آهن قابل تعمیم به این شرایط است. پس دلیل دیگر عدم مشاهده قله‌های مربوط به نیکل وجود آن در محلول است. بنابراین رسوبات اولیه ترکیب‌های آهن هستند و تبدیل این فرآورده‌ها به فریت نیکل با نفوذ یون‌های نیکل محلول به داخل ذرات مگنتیت و هماتیت انجام می‌شود.

با استفاده از پهنای قله به دست آمده در الگوی تفرق اشعه X می‌توان اندازه بلورک‌ها را به دست آورد. طول موج لامپ اشعه ایکس برابر $1/54$ آنگستروم است. اندازه تقریبی ذرات بر اساس معادله شرر (رابطه ۱) محاسبه می‌شود.

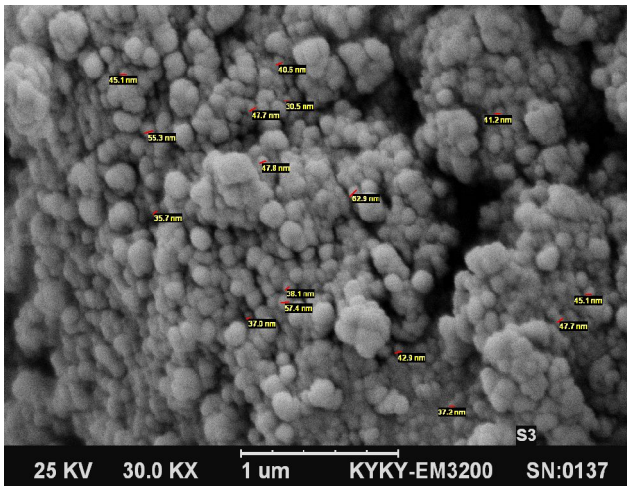
$$D = \frac{0.9\lambda}{S \cos \theta} \quad (1)$$

جایی که S پهنای نصف قله، D اندازه کریستالیت، λ طول موج اشعه X و θ زاویه (رادیان) است.

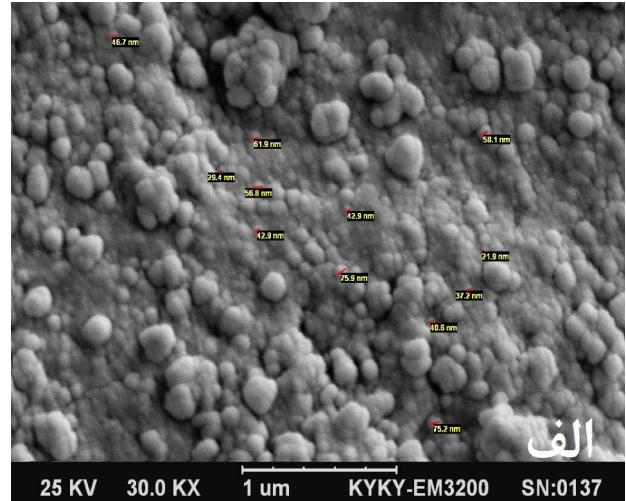
اندازه بلورک‌ها در زمان‌های ۱۲، ۱۶ و ۲۴ ساعت به ترتیب برابر با ۲۲، ۲۵ و ۳۲ نانومتر محاسبه شد که نشانگر افزایش



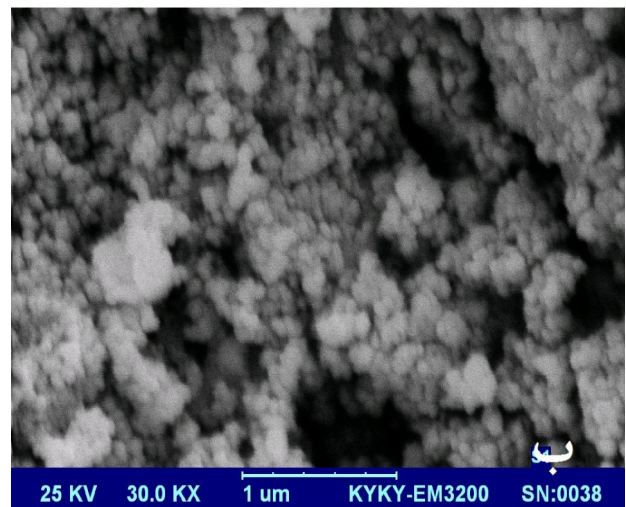
شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه تولید شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۸ ساعت



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه تولید شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲ ساعت



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه تولید شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد: الف) به مدت ۴ ساعت و ب) به مدت ۱۶ ساعت



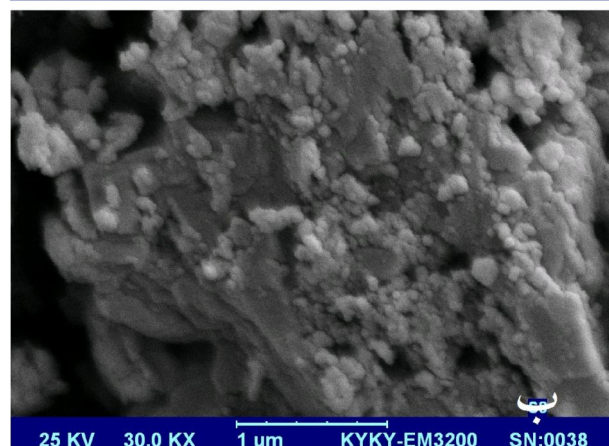
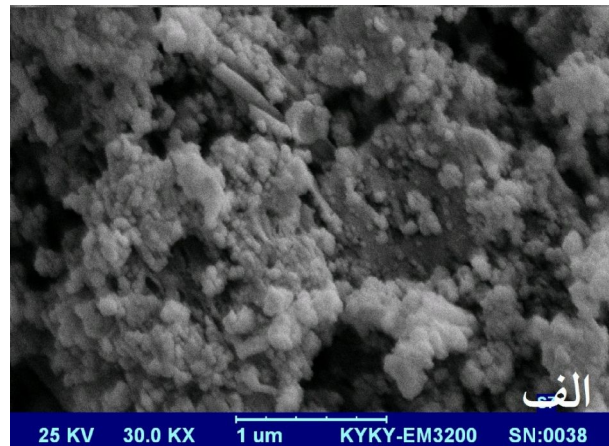
میانی را سریع تر کرده، اثر مثبتی بر سرعت فرایند دارد. با افزایش مدت زمان واکنش به ۸ ساعت در شکل ۴، سطح یکنواختی متشکل از نانو کره‌هایی با توزیع اندازه کوچک‌تر ایجاد شد. این نانو کره‌های به‌خوبی تمایز یافته، اندازه‌ای در حدود بین ۴۰ تا ۱۰۰ نانومتر دارند. دلیل شکل‌گیری این نانوکره‌ها می‌تواند رشد بلورینگی و پوشش سطحی ذرات بوسیله پلی‌اتیلن‌گلیکول باشد. نمونه تهیه شده در زمان ۱۲ ساعت (شکل ۵) تفاوت قابل‌توجهی با نمونه با زمان نگهداری ۸ ساعت ندارد. این نمونه به‌دلیل متمایز بودن ذرات

شکل ۳- الف مربوط به نمونه ۴ ساعت است. در این تصاویر شکل‌گیری نانوذره‌های اولیه در سطح ماده قابل مشاهده بوده، ولی سطح ماده فاقد ساختار همگن است. این شکل نشان می‌دهد که سرعت رسوب فرآورده میانی بیش از سرعت آرایش عامل سطحی بر روی ذرات است. پس از رسوب اولیه، پلی‌اتیلن‌گلیکول با قرار گرفتن بر روی ذرات و کاهش کشش سطحی، آنها را به کره‌هایی با نسبت سطح به حجم مناسب تبدیل کرده، منجر به تشکیل نانوذرات مجزا با قدرت شناور شدن می‌شود. این امر نفوذ یون‌های واکنشگر به داخل فرآورده

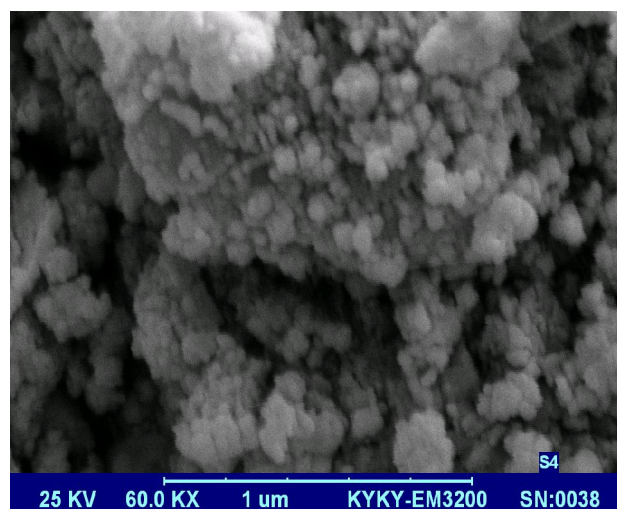
نانو ساختار و خالص بودن فریت نیکل، دارای شرایط بسیار مناسبی برای کاربرد در زمینه‌های زیستی است [۴]. تصویر شکل ۳- ب نشان‌دهنده افزایش انباشتگی و تراکم ذرات در مدت زمان ۱۶ ساعت در مقایسه با شرایط تصویر ۵ است. این انباشتگی را می‌توان با از بین رفتن یا کاهش مقدار پلی اتیلن گلیکول در این دما و زمان طولانی‌تر انجام واکنش توجیه نمود. زمانی که مولکول‌های آلی تمایل بالایی به پیوند با سطح نانو ذرات دارند، نانوذرات بسیار پایدار بوده و رشد بلورینگی مشکل‌تر می‌شود. با از بین رفتن بیش‌تر پوشش سطحی آلی و افزایش مدت زمان واکنش در نتیجه بالا بودن انرژی سینتیکی، ذرات براحتی می‌توانند به یکدیگر متصل شوند. با مقایسه تصویرهای ۶- الف و ۶- ب می‌توان مشاهده کرد که با افزایش زمان واکنش از ۱۶ ساعت به ۲۴ ساعت، فضاها و حفره‌های کوچک با انرژی سطحی بالا با به هم چسبیدن ذرات به فضاها و حفره‌های بزرگ‌تر با انرژی سطحی پایین تبدیل می‌شوند.

شکل ۷ نشان‌دهنده ساختار سطحی نانوذرات ساخته شده در دمای واکنش ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت و در غیاب پلی اتیلن گلیکول است. این تصویر نشان‌دهنده انباشتگی بالای ذرات همراه با حفره‌های نسبتاً بزرگ است. با مشاهده این تصویر نقش ماده فعال‌کننده سطح در افزایش انرژی سطحی و جلوگیری از جلوگیری از کلوخه شدن ذرات مشخص می‌شود.

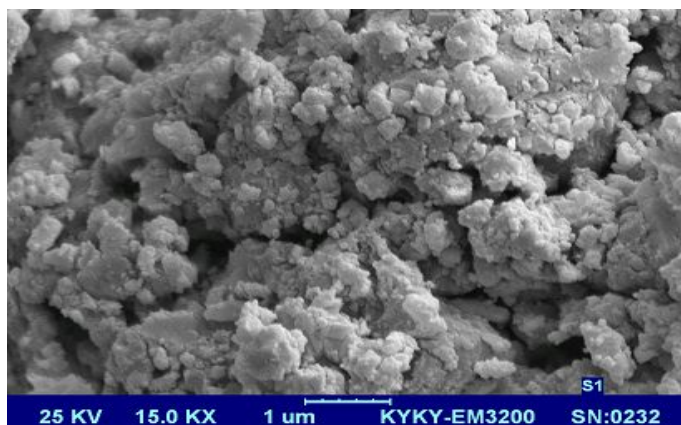
به منظور بررسی اثر دما بر ریخت نمونه‌های تهیه شده، تصویر نمونه تهیه شده در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد در مدت ۲۴ ساعت، در شکل ۸ نمایش داده شده است. ذرات به صورت مجزا در نمونه وجود ندارند و ساختاری با انباشتگی بالا مشاهده می‌شود. ذرات تشکیل‌دهنده این ساختار شکل کروی همگن ندارند. مقایسه تصاویر میکروسکوپی این نمونه با نمونه تهیه شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد نشان از تأثیر مهم دما در عملکرد این ماده علاوه بر حضور عامل سطحی دارد. در واقع دما تعیین‌کننده توانایی انتقال مولکول‌ها در محلول و پیوستن



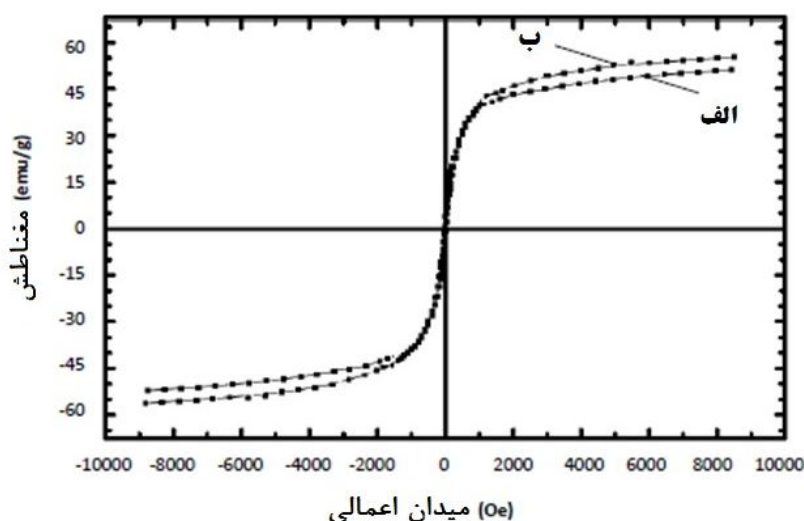
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه تولید شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت: الف) ۲۰ ساعت و ب) ۲۴ ساعت



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه تولید شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت بدون حضور پلی اتیلن گلیکول



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه تولید شده در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت



شکل ۹- منحنی مغناطش نمونه‌های تولید شده بر حسب میدان اعمالی اندازه‌گیری شده توسط VSM در دمای ۲۰°C: الف) ۱۲ ساعت و ب) ۲۴ ساعت.

آنها به سطح مواد است.

مواد مغناطیسی نرم است در این شکل دیده می‌شود. مشاهده می‌شود که مغناطش دو نمونه تفاوت بسیار اندکی با یکدیگر دارند. واکنش هیدروترمال است. مقدار M_s نمونه تولید شده در زمان ۱۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب برابر با ۵۱ و ۵۵ (emu/g) و مقدار H_c به ترتیب برابر با ۴۰ و ۶۸ Oe است. در نانوذرات به دلیل بالا بودن نسبت سطح به حجم و در نتیجه زیاد بودن ناهمسانگردی اسپین سطح، مقادیر مغناطش اشباع و مانده کم‌تر از ماده حجیم است و با کاهش اندازه ذرات مقدار مغناطش اشباع نیز کاهش می‌یابد. در نمونه‌های تولید شده نیز مقدار

۳-۳- خصوصیات مغناطیسی

در شکل ۹ نتایج اندازه‌گیری‌های VSM برای نمونه ۱۲ و ۲۴ ساعت آورده شده است. نمونه‌های تولید شده در زمان‌های پایین‌تر به دلیل وجود ناخالصی و در نتیجه افت خواص مغناطیسی مورد آزمایش قرار نگرفته‌اند. مغناطش نمونه‌ها به عنوان تابعی از میدان اعمالی خارجی در محدوده ± 8 (kOe) و در دمای محیط مطالعه شد. حلقه باریک پسمانده و ویژگی

۴- نتیجه گیری

نانوذرات NiFe_2O_4 در دمای 180°C درجه سانتی‌گراد به‌روش هیدروترمال با موفقیت تولید شد. تبدیل اکسید نیکل و هماتیت به فریت نیکل راهی برای تولید NiFe_2O_4 است. پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG) نقش مهمی را در جلوگیری از انباشتگی ذرات دارا است. در دمای 180°C درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان ۱۲ ساعت ساختار سطحی یکنواخت و یکدست از نانوذرات کروی نیکل فریت با اندازه‌ای بین ۴۰ تا ۱۰۰ نانومتر، ایده‌آل برای کاربردهای زیستی به‌دست آمد. حضور پلی‌اتیلن‌گلیکول، زمان و دمای هیدروترمال عوامل موثر بر ساختار و ریخت ذرات تهیه شده هستند. زمان ۱۲ ساعت و دمای 180°C درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دما و زمان بهینه برای تهیه نانوذرات خالص مغناطیسی فریت نیکل با ریخت مناسب معرفی شدند.

مغناطش اشباع و مانده کم‌تر از مقدار گزارش شده برای ماده حجیم هستند. از آنجا که اندازه نمونه‌ها در زمان واکنش ۱۲ ساعت کم‌تر از زمان ۲۴ ساعت است این نمونه مقدار مغناطش اشباع کم‌تری دارد. مقدار شعاع بحرانی برای فریت نیکل حدود صد نانومتر گزارش شده است که بیش‌تر از اندازه ذرات تهیه شده در این پژوهش است. بنابراین می‌توان گفت ذرات تهیه شده با این روش خاصیت سوپراپارامغناطیس دارند. البته با این اندازه ذرات، مقادیر مغناطش اشباع متفاوتی گزارش شده است که در برخی موارد پایین‌تر از مقادیر این پژوهش هستند [۱۶-۱۴]. بالا بودن مغناطش اشباع نسبت به برخی گزارش‌ها را می‌توان به‌دلیل تفاوت روش ساخت، شرایط آزمایش و نیز وجود ناخالصی‌ها شامل فرآورده‌های میانی یا مواد اولیه واکنش نداده که به‌دلیل درصد کم در الگوی تفرق اشعه ایکس قابل مشاهده نیستند، نسبت داد.

واژه‌نامه

1. Magnetic Resonance Imaging
2. fast mill
3. differential thermal analyse
4. X-Ray Diffraction
5. scanning electron microscopy
6. energy dispersive X-ray

مراجع

1. Esteves M.L., Cortes A., Lugo M.T. and Rinaldi C., "Synthesis and Characterization of Carboxymethyl Dextran-Coated Mn/Zn Ferrite for Biomedical Applications", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, pp. 3061-3066, 2009.
2. Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K. and Dobson J., "Applications of Magnetic Nanoparticles in Biomedicine", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, pp. R167-R181, 2003.
3. Darling S.B. and Bader S.D., "A Materials Chemistry Perspective on Nanomagnetism", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 15, pp. 4189-4195, 2005.
4. Gupta A.K. and Gupta M., "Synthesis and Surface Engineering of Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications", *Biomaterials*, Vol. 26, No 18, pp. 3995-4021, 2005.
5. Hwang, Y.H. and Lee, D.Y., "Recent Advances on Surface Engineering of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles and their Biomedical Applications", *Journal of Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, Vol. 2, pp. 23-39, 2007.
6. Jacob J. and Abdul Khadar M., "Investigation of Mixed Spinel Structure of Nanostructured Nickelferrite", *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, pp. 114310, 2010.
7. Ahlawat A., Sathe V.G., Reddy V.R. and Gupta A., "Mossbauer, Raman and X-ray Diffraction Studies of Superparamagnetic NiFe_2O_4 Nanoparticles Prepared by Sol-Gel Auto-Combustion Method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, pp. 2049-2054, 2011.
8. Mahmoudi M., Sant S., Wang B., Laurent S. and Sen T., "Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles (SPIONs): Development, Surface Modification and Applications in Chemotherapy", *Advanced Drug Delivery*, Vol. 63, pp. 24-26, 2011.
9. Dung D.T.K., Hai T.H., Phuc L.H., Long B.D., Vinh L.K. and Truc P.N., "Preparation and Characterization of Magnetic Nanoparticles with Chitosan Coating", *Journal of Physics*, Vol. 187,

- pp. 012036, 2009.
10. Thangaraja A., Savitha V. and Jegatheesan, K., "Preparation and Characterization of Polyethylene Glycol Coated Silica Nanoparticles for Drug Delivery Application", *International Journal of Nanotechnology Applications*, Vol. 1, pp. 31–38, 2010.
 11. Zhang L. and He R., "Oleic Acid Coating on the Monodisperse Magnetite Nanoparticles", *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 2611–2617, 2006.
 12. Pradhan P., Giri J., Banerjee R., Bellare J. and Bahadur D., "Cellular Interactions of Lauric Acid and Dextran-Coated Magnetite Nanoparticles", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 311, pp. 282–287, 2007.
 13. Xiangfeng C., Dongli J. and Chenmou Z., "The Preparation and Gas-Sensing Properties of NiFe₂O₄ Nanocubes and Nanorods", *Sensors and Actuators*, Vol. 123, pp. 793–797 2007.
 14. Maaz K., Karim S., Mumtaz A., Hasanain S.K., Liu J. and Duan J.L., "Synthesis and Magnetic Characterization of Nickel Ferrite Nanoparticles Prepared by Co-Precipitation Route", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, pp. 1838-1842, 2009.
 15. Umare S.S., Ningthoujam R.S., Sharma S.J., Shrivastava S., Kurian S. and Gajbhiye N.S., "Mössbauer and Magnetic Studies on Nanocrystalline NiFe₂O₄ Particles Prepared by Ethylene Glycol Route", *Hyperfine Interactions*, Vol. 184, pp. 235-243, 2008.
 16. Kooti M. and Naghdi Sedeh A., "Synthesis and Characterization of NiFe₂O₄ Magnetic Nanoparticles by Combustion Method", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 29, pp. 34-38, 2013.