

تأثیر دمای سنتز بر ویژگی‌های نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن در روش هم‌رسوبی

مژده محمدعلیزاده هنجانی^۱، ابراهیم قاسمی^{۲*}، احمد منشی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ، گروه پژوهشی رنگدانه‌های معدنی و لعاب، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی، اصفهان، ایران.

*eghasemi@icrc.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۲۴)

چکیده:

در این تحقیق، نانوذرات اکسید آهن نوع مگنتیت (Fe_3O_4) با استفاده از روش هم‌رسوبی تهیه و تأثیر دمای سنتز، بر اندازه ذرات و خواص مغناطیسی آن‌ها بررسی شد. جهت بررسی اثر دما، سنتز در محدوده دمایی $25^{\circ}C$ تا $80^{\circ}C$ در اتمسفر هوای معمولی انجام گردید. از میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM)، و پراش اشعه ایکس (XRD) برای بررسی ریزساختاری و فازی استفاده شد. خواص مغناطیسی از روش VSM بررسی و اندازه بلورک‌ها با استفاده از روش اصلاح شده شرر، محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان داد که اندازه بلورک‌ها و اندازه ذرات پودر سنتز شده با افزایش دمای سنتز افزایش می‌یابد. ویژگی‌های مغناطیسی مشخص کرد که مقادیر اشباع مغناطیسی با دما از محدوده 31 emu/g تا 66 emu/g افزایش یافته و در عین حال خاصیت ابرپارامغناطیسی دچار افت می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

نانو ذرات، مغناطیسی، هم‌رسوبی، مگنتیت، اکسید آهن.

۱- مقدمه

مطالعات و بررسی‌ها بر روی آن‌ها معطوف شده است. این مواد از دسته فریت‌های مغناطیسی هستند که دارای ساختار اسپینل می‌باشند [۱]. خواص فیزیکی و ساختاری مگنتیت^۱ و مگهمیت^۲ تا حد زیادی مشابه یکدیگر می‌باشد با این تفاوت که مگنتیت از نظر خواص مغناطیسی تا حدودی قوی‌تر است. هر دوی این مواد در مقیاس نانو دارای خاصیت ابرپارامغناطیسی هستند. این

رنگدانه‌های اکسید آهن به دلیل داشتن خواص متنوعی مانند غیر سمی بودن، پایداری شیمیایی، تنوع رنگی (زرد، نارنجی، قرمز، قهوه‌ای تا سیاه)، خواص مغناطیسی و قیمت پایین تا حد زیادی مورد توجه قرار دارند. در این بین، ترکیباتی مانند مگنتیت (Fe_3O_4) و مگهمیت ($\gamma\text{-}Fe_2O_3$) به دلیل داشتن خواص فری مغناطیسی از جمله موادی هستند که حجم زیادی از

کلیه مواد استفاده شده دارای خلوص بالایی بودند.

۲-۲- سنتز پودر مگنتیت

در این روش به منظور تهیه نانو ذرات مغناطیسی، ابتدا با حل کردن هر یک از نمک‌های آهن (II) و (III) در آب، محلول‌های ۰/۵ مولار از هر یک تهیه شد، این محلول‌ها با نسبت وزنی ۲:۱ از آهن (II) : آهن (III)، به هم افزوده و با استفاده از همزن مکانیکی هم زده شد. سپس با تنظیم دما برای هر آزمون (۸۰-۲۵°C)، با استفاده از محلول ۲۵٪ بازی هیدروکسید آمونیوم و سورفکتانت، pH محلول به ۱۱ رسانیده شد، به محض افزودن باز، رسوبی به رنگ سیاه تشکیل گردید. عمل بهم زدن محلول تا ۳۰ دقیقه ادامه یافت. سپس هم زدن متوقف و رسوب حاصل، به کمک یک آهنربای معمولی از محلول جدا شد. برای جدا کردن مواد محلول، عملیات شستشو با استفاده از آب مقطر چندین بار تکرار شد و پودر به دست آمده در خشک کن خلاء خشک گردید. نمونه های سنتز شده در اتمسفر هوا بر حسب دمای سنتز به شرح جدول (۱) کد گذاری شدند.

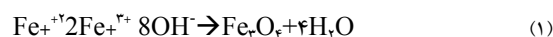
جدول (۱): کد نمونه‌های سنتز شده

کد نمونه	دمای سنتز (°C)
A ₁	۲۵
A ₂	۴۰
A ₃	۶۰
A ₄	۸۰

۲-۳- بررسی ویژگی‌ها

برای بررسی نوع فازهای تشکیل شده از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شد. برای این کار از دستگاه فیلیپس مدل PW3710 با لامپ u-Kα بهره برداری و برای کاهش اثر جذب و خطا از سیستم تکفام‌ساز^۴ استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی عبوری انجام شد. این کار با استفاده از دستگاه مدل فیلیپس FE/CM 200 انجام شد. خواص مغناطیسی پودر با استفاده از روش VSM مدل Lake-Shore 7400 بررسی گردید. برای این کار ابتدا از نمونه

خاصیت کاربردهای متنوعی را برای آن‌ها به وجود آورده است که از جمله می‌توان به مواردی مانند تصویربرداری MRI [۲]، انتقال دارو [۳]، معالجه غده‌های سرطانی [۴]، حسگرهای زیستی [۵]، کاربردهای نوری [۶]، کاربردهای الکترونیکی [۷] و شیمیایی [۸] اشاره کرد. رایج‌ترین روش سنتز این ذرات، روش هم‌رسوبی^۳ یون‌های نمک آهن هیدراته دو و سه ظرفیتی در حضور یک باز قوی می‌باشد و واکنش شیمیایی تشکیل آن بصورت زیر است [۹-۱۳]:



طبق این واکنش، برای تولید مگنتیت، نسبت مولی اولیه ۲:۱، از $\text{Fe}^{3+}:\text{Fe}^{2+}$ نیاز است. اما در صورتیکه آماده سازی در هوا انجام شود، Fe^{2+} به Fe^{3+} اکسید می‌شود. بنابراین، بهره‌گیری از اتمسفر خنثی روش مناسبی برای این کار است [۱۴].

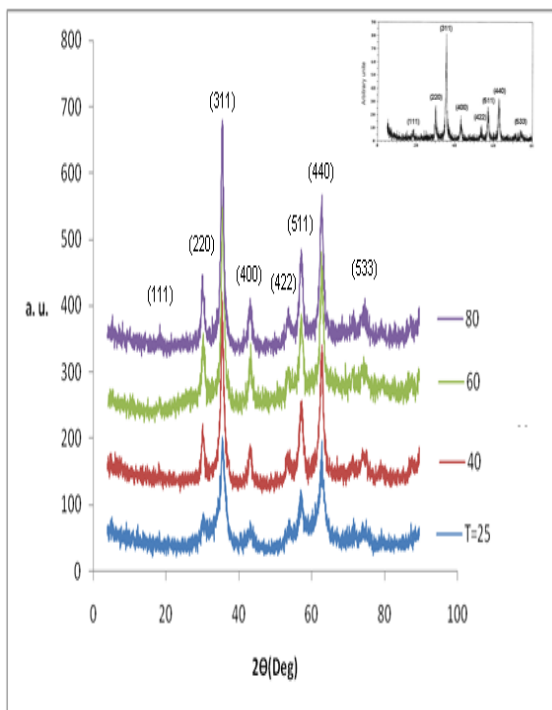
کنترل اندازه دقیق، شکل و سطح ذرات بطور کلی موضوعی چالش‌انگیز است. جهت کنترل اندازه و ماهیت ساختاری ذرات از نظر تبلور و نوع فاز، عوامل محیطی مانند اتمسفر، شرایط آماده سازی، دمای واکنش، سرعت مخلوط کردن، شدت یونی محیط، و همچنین نوع نمک‌های مورد استفاده (کلریدها، نیترات‌ها و سولفات‌ها) در خواص نهایی می‌تواند موثر باشد. در این تحقیق، تاثیر دمای واکنش بر اندازه ذرات و خواص مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن در روش هم‌رسوبی تحت اتمسفر هوای آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که در منابع مطالعاتی به این اثر کمتر پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- انتخاب مواد اولیه

کلریدهای آبدار آهن دو ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) و سه ظرفیتی ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، هیدروکسید آمونیوم (NH_4OH)، استن و آب مقطر متعلق به شرکت مرک بود. از ماده سی‌تب (CTAB) متعلق به شرکت آلد ریچ به عنوان اصلاح کننده سطحی استفاده شد.

دهنده تاثیر دما بر بهبود تبلور فاز مگنتیت است. علت این تاثیر را می‌توان به تاثیر دما بر شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی انجام واکنش دانست.



شکل (۱): طیف XRD پودرهای سنتز شده در دماهای مختلف و مقایسه آن با نمونه شاهد. نمونه شاهد طیف نانوذرات مگنتیت با خلوص بالا را نشان می‌دهد.

از طرفی علت را می‌توان چنین تشریح کرد که وجود اکسیژن بخشی از یون‌های آهن را با تشکیل فازهای فرعی Fe_2O_3 و $Fe(OH)_2$ از واکنش اصلی تشکیل Fe_3O_4 خارج می‌کند به این معنی که استوکیومتری اولیه ۱:۲ بین Fe^{+2} و Fe^{+3} به هم خورده، در نتیجه احتمال وجود فاز آمورف در کنار فاز اصلی تقویت می‌شود. با افزایش دما دو اتفاق رخ می‌دهد: اول اینکه غلظت اکسیژن حل شده در محلول کاهش می‌یابد. دوم اینکه سورفکتانت بر روی سطح ذرات بهتر نشسته و در ادامه واکنش از تاثیر اکسیژن بر سطح می‌کاهد، نتیجه‌ی هر دوی این عوامل، تبلور بهتر Fe_3O_4 خواهد بود.

نمونه‌ای از تصویر ریزساختاری حاصل از میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه سنتز شده در دمای $40^\circ C$ در شکل (۲)

پودری، منحنی هیستریزس مغناطیسی را تهیه کرده و با استفاده از روابطی که در ادامه توضیح داده خواهد شد مقادیر کمیت‌های مغناطیسی محاسبه شد. برای سنجش اندازه بلورک‌ها از روش اصلاح شده شرر^۵ [۱۵] استفاده شد. برای این کار فرمول شرر در نظر گرفته شد:

$$L = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2)$$

که در آن β عرض پیک اصلی در نصف ارتفاع بر حسب رادیان، λ طول موج بر حسب نانومتر، L عدد متوسط اندازه بلورک بر حسب نانومتر و θ زاویه تفرق بر حسب رادیان است. از طرفین رابطه (۲) به شرح زیر لگاریتم گرفته می‌شود:

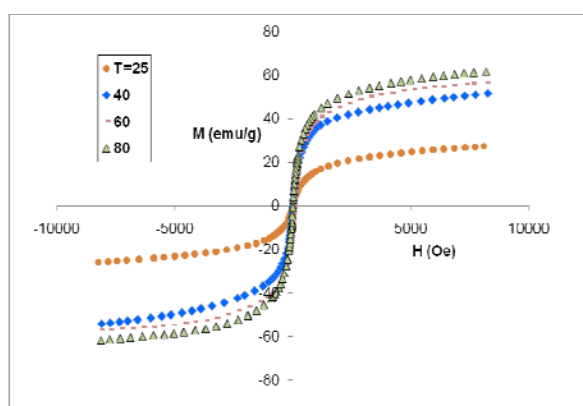
$$\ln\beta = \ln(0.94\lambda/L) + \ln(1/\cos\theta) \quad (3)$$

سپس، پارامتر β را برای تمام پیک‌های طیف XRD به دست آورده و $\ln\beta$ بر حسب $\ln(1/\cos\theta)$ رسم شد. عرض از مبدا بهترین خط عبور داده شده از بین نقاط این نمودار، با کم‌ترین مربعات خطا برابر با $(0.94\lambda/L)$ می‌باشد که از روی آن، مقدار L بدست می‌آید.

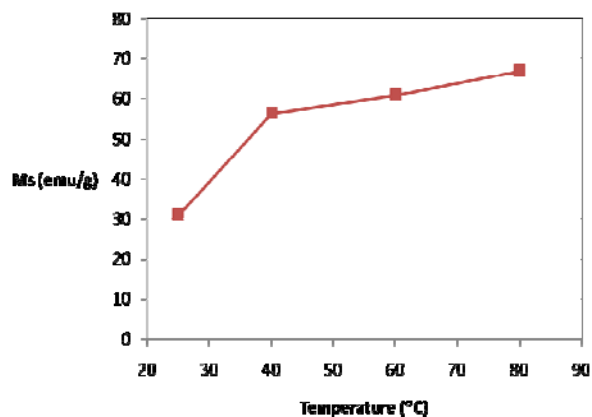
۳- نتایج و بحث

نتایج آزمون‌های XRD برای نمونه‌های سنتز شده در دماهای مختلف در شکل ۱ آورده شده است. برای مقایسه، از الگوی پراش اشعه ایکس یک نمونه مرجع (که مربوط به نانوپودر مگنتیت با میانگین اندازه ذرات ۱۰nm است) نیز استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تمام نمونه‌ها با الگوی پراش اشعه ایکس ماده مگنتیت (Fe_3O_4) تطابق داشته و فاز جانبی دیگری مشاهده نمی‌شود. با توجه به شباهت بسیار زیاد الگوی XRD مگنتیت و مگهمیت، تمایز این دو فاز از یکدیگر بسیار مشکل می‌باشد. وجود اکسیژن می‌تواند موجب اکسید شدن فاز مگنتیت به مگهمیت شود [۱۶]. بنابراین در نمونه‌های سنتز شده این تحقیق، احتمال زیادی برای وجود فاز مگهمیت در کنار مگنتیت وجود دارد. از روی این شکل مشخص است که با افزایش دما بر شدت پیک‌ها افزوده می‌شود. این موضوع نشان

$\frac{1}{H}$ رسم کرده و محل برخورد امتداد منحنی با محور M به عنوان اشباع مغناطیسی در نظر گرفته شد [۲۰]. این مقدار با نتایج مرجع [۱۶] هم‌خوانی دارد. ولی در قیاس با مقدار اشباع مغناطیسی بدنه مگنتیت (حالت بالک) که حدود ۹۲ emu/g است [۲۱-۲۲]، کمتر می‌باشد. علت این تفاوت به عواملی مانند اندازه ذرات، غلظت، و وجود اکسیدهای جذب شده بر روی سطح نانوذرات نسبت داده شده است [۱۷].



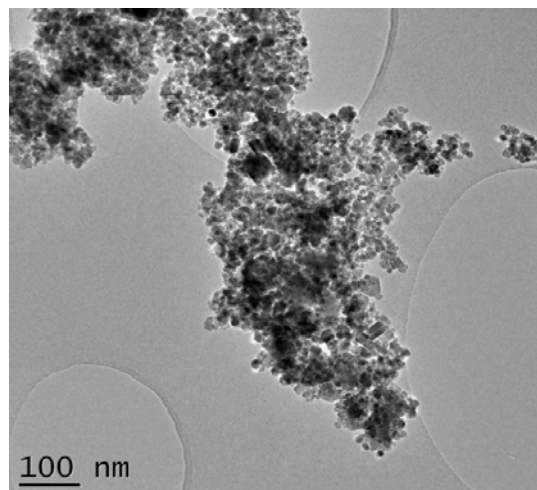
شکل (۳): منحنی هیستریز مغناطیسی پودرهای سنتز شده در دماهای مختلف



شکل (۴): تغییرات اشباع مغناطیسی بر اساس دمای سنتز

برای محاسبه مقدار پذیرفتاری مغناطیسی، از منحنی هیستریز در شدت‌های میدان کم استفاده شد. با توجه به رابطه (۱) می‌توان شیب خط را در شکل (۳) معادل χ_i دانست [۱۶-۲۱].

دیده می‌شود. همان‌طور که مشخص است اندازه ذرات به دست آمده کمتر از ۲۰ nm است. با استفاده از روش شمارش تعداد حداقل ۲۰۰ ذره و اندازه‌گیری میانگین حاصل مشخص شد که میانگین اندازه ذرات معادل 13 ± 1.5 nm است. این اندازه با مقدار محاسبه شده اندازه بلورک با روش اصلاح شده شرر که ۱۴ nm است مطابقت دارد.



شکل (۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانو ذرات سنتز شده در دمای ۴۰°C

منحنی هیستریز مغناطیسی در شکل (۳) قابل رویت است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که هیستریز تقریباً ناچیز و میدان زدایش و پسماند مغناطیسی بسیار کوچک است. منحنی هیستریز مغناطیسی، از نظر تغییرات آهنربایی، رفتاری مشابه رفتار مواد ابرپارامغناطیس را نشان می‌دهد [۱۶-۱۷]. محاسبه اندازه ذره مغناطیسی جهت برآورد برهمکنش‌های مغناطیسی ذرات اهمیت خاصی دارد. که برای محاسبه آن، از رابطه زیر استفاده شد [۱۸-۱۹]:

$$D_m = \left(\frac{18kT}{\pi\mu_0} \frac{\chi_i}{M_s^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

در این رابطه، k ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، χ_i پذیرفتاری مغناطیسی در شدت میدان ضعیف و Ms اشباع مغناطیسی است. برای به دست آوردن اشباع مغناطیسی، تغییرات M را برحسب

رابطه (۳) اندازه مغناطیسی ذرات (Dm) محاسبه شد. نتایج محاسبات فوق در جدول (۲) آورده شده است.

$$\chi_i = \left(\frac{dM}{dH} \right)_{M \rightarrow 0} \quad (5)$$

در ادامه، با قرار دادن مقادیر اشباع و پذیرفتاری مغناطیسی در

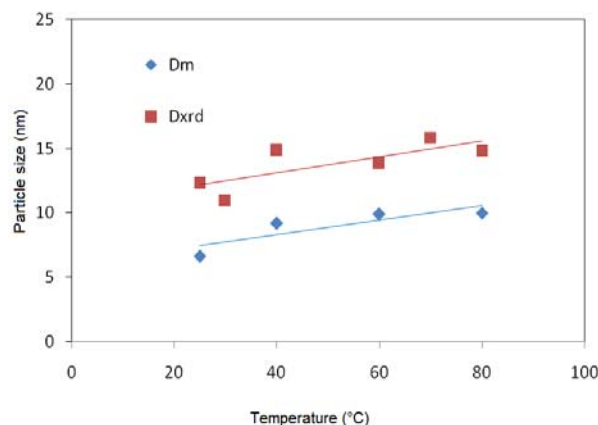
جدول (۲): مشخصات مغناطیسی پودرهای سنتز شده

اندازه مغناطیسی ذره D _m (nm)	پذیرفتاری مغناطیسی (χ _i)	پسماند مغناطیسی Mr(emu)	میدان زداینده Hc(Oe)	اشباع مغناطیسی Ms (emu/g)	نمونه
۶/۶	۳/۱۷	۰/۵	۱	۳۰/۹۲	A ₁
۹/۲	۸/۵۰	۰/۲	۱/۷	۵۶/۴۰	A ₂
۹/۹	۱۰/۶۵	۰/۵	۲/۸	۶۰/۸۸	A ₃
۱۰/۲	۱۰/۷۶	۰/۶	۳	۶۶/۸۸	A ₄

سطحی ذرات کاهش می‌یابد. از طرفی بهبود تبلور ذرات با دما عاملی برای تشکیل مقدار بیشتر فاز مگنتیت و در نتیجه افزایش خاصیت مغناطیسی است.

همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، اندازه بلورک‌ها و اندازه مغناطیسی با دما افزایش می‌یابند. نکته قابل توجه این است که نرخ افزایش برای هر دو تقریباً مشابه است. این نشان می‌دهد که بهبود تبلور بلورهای مگنتیت، با رشد نانوذرات همراه است. با افزایش دما، اندازه مغناطیسی و اندازه بلورک‌ها هر دو افزایش یافته است، بالاتر بودن اندازه بلورک‌ها نسبت به اندازه هسته مغناطیسی ذرات در منابع دیگر نیز مورد اشاره قرار گرفته است [۱۸]. یک دلیل عمده برای این موضوع، وجود ضخامت لایه غیرمغناطیسی روی سطح ذرات است که به لایه مرده معروف است. این لایه ناشی از اکسیداسیون سطحی، عدم تبلور و غیر هم‌راستایی اسپین‌های الکترونی بوده و دارای خاصیت مغناطیسی نیست.

می‌توان گفت که با افزایش دما، میزان انحلال اکسیژن در محلول کاهش می‌یابد، این کاهش غلظت، فرایند اکسیداسیون را کند کرده و ضخامت لایه مرده را کاهش می‌دهد، در نتیجه اندازه مغناطیسی ذرات (هسته مغناطیسی) بزرگ‌تر می‌شود.



شکل (۵): مقایسه تغییرات اندازه مغناطیسی (Dm) ذرات و اندازه بلورک‌ها (D_{XRD}) با دمای سنتز

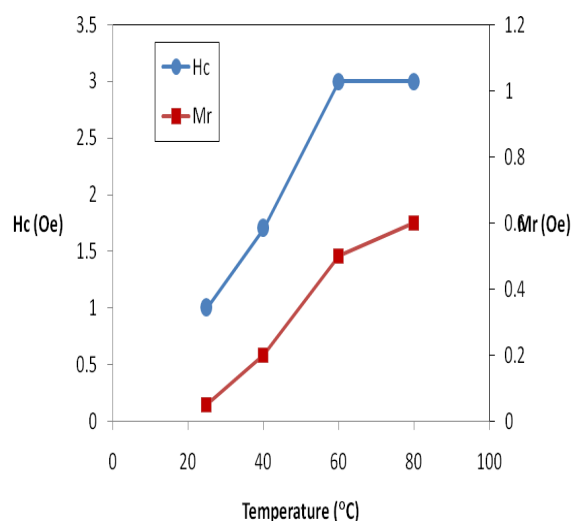
با توجه به داده‌های جدول (۱) اشباع مغناطیسی و پذیرفتاری مغناطیسی از دمای ۲۵°C تا ۸۰°C به ترتیب بیش از دو و سه برابر رشد را نشان می‌دهند. تغییرات اشباع مغناطیسی با دما در شکل (۴) آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که اشباع مغناطیسی با دمای سنتز افزایش می‌یابد و نرخ افزایش شدت آن از دمای اتاق تا ۴۰°C بیش از سایر دماها می‌باشد علت این افزایش را می‌توان چنین توجیه کرد که با افزایش دما انحلال اکسیژن در محلول کاهش یافته و در نتیجه میزان اکسیداسیون

گرفت. نتایج مشخص کرد که با تغییر دما از 25°C تا 80°C اندازه بلورک‌های حاصل از روش اصلاح شده فرمول شرر در محدوده 12nm - 15nm تغییر می‌کند. اندازه مغناطیسی ذرات کمتر از این مقدار است و علت آن به وجود لایه مرده در سطح ذرات مغناطیسی مربوط است. مشخص شد که با افزایش دما، تبلور ذرات مگنتیت بهبود یافته و همین عامل موجب رشد اندازه ذرات و بهبود خواص مغناطیسی می‌شود. همچنین نتایج مغناطیسی نشان داد که دما بر خاصیت ابر پارامغناطیسی ذرات تاثیر منفی گذاشته و پسماند مغناطیسی را افزایش می‌دهد.

۵- مراجع:

- [1] R.M. Cornell, U. Schwertmann. The Iron Oxides, Wiley-VCH, 2003.
- [2] R.Y.Hong, B.Feng, L.L.Chen, G.H.Liu, H.Z.Li, Y.Zheng, D.G.Wei, Synthesis, characterization and MRI application of dextran-coated Fe_3O_4 magnetic nanoparticles, Biochemical Engineering Journal, Vol.42, No.3, pp. 290-300, 2008.
- [3] B.Chertoka, B.A. Moffatab, A.E.David, Iron oxide nanoparticles as a drug delivery vehicle for MRI monitored magnetic targeting of brain tumors, Biomaterials, vol.29, pp.487-496, 2008.
- [4] A.P. Astalan, F.Ahrentorp, C.Johansson, K.Larsson, A. krozer, Biomolecular reactions studied using changes in Brownian rotation dynamics of magnetic particles, Biosens, Bioelectron, Vol.19, pp.945-951, 2004.
- [5] J. Philip, T. Jayakumar, P. K. Sundarman, B. Raj, A tunable optical filter, Meas. Sci. Technol, Vol.14, No.3, pp.1289, 2003.
- [6] S. Ban, V. Korenivski, Pattern storage and recognition using ferrofluids J. Appl. Phys. 99, pp 08R907, 2006.
- [7] R. L. Vander wal, T. M. Ticich, Comparative flame and furnace synthesis of single-walled carbon nanotubes Chem. Phys. lett. Vol.336, pp.24, 2001.
- [8] S. Odenbach, Ferrofluids, In the book of: Handbook of Magnetic materials, edited by K.H.J. Buschow, Vol. 16. Hardbound, 2006.
- [9] T. Sato, T. Iijima, M. Sekin, N. Inagaki, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol.65, pp.252, 1987
- [10] E. Blum, A. Cebers, M. M. Maiorov, Magnetic Fluids, Walter de Gruyter, Berlin, 1997.
- [11] R.M. Cornell, U. Schertmann, Iron oxides in the Laboratory: Preparation and Characterization, VCH Publishers, Weinheim, 1991.

شکل (۶) تغییرات پسماند مغناطیسی (H_c) و میدان زداینده را با دمای سنتز نشان می‌دهد. یکسان بودن روند افزایش برای دو اندازه محاسبه شده در شکل ثابت می‌کند که ضخامت لایه مرده با دما تغییر محسوسی نمی‌کند.



شکل (۶): تغییرات پسماند مغناطیسی (H_c) و میدان زداینده (M_r)

افزایش H_c و M_r با دما دارای روندی مشابه است که نشان‌دهنده افزایش سطح هیستریزس در منحنی مغناطیسی است. علت افزایش این پسماند مغناطیسی، رشد ذرات است [۲۱]. در خصوص ذرات سوپر پارا مغناطیسی، این پسماند صفر است و برای ماده مگنتیت، با افزایش اندازه ذرات به بیش از 10nm ، پسماند افزایش می‌یابد. با توجه به آنچه گفته شد باید توجه داشت که گرچه افزایش دمای سنتز، مقدار اشباع مغناطیسی را افزایش می‌دهد ولی بر خاصیت ابر پارامغناطیسی تاثیر منفی نشان می‌دهد.

۴- نتیجه گیری:

نانوپودر مگنتیت با استفاده از روش هم‌رسوبی شیمیایی در محیط اتمسفر معمولی و با استفاده از روش هم‌رسوبی سنتز شد. تاثیر دمای سنتز بر خواص بلوری و مغناطیسی مورد بررسی قرار

- [21] K. O'Grady, A. Bradbury, Particle size analysis in ferrofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.39, pp. 91-94, 1983.
- [22] B. D. Cullity, *Introduction to magnetic materials*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1972.
- [23] L. Jian , H. Yan, L. Xiaodong, L. Yueqing, B. Lang, L. Qiang, Effect of aggregates on the magnetization property of ferrofluids: A model of gaslike compression, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol.8, pp. 448-454, 2007.
- [12] F.A. Cotton, G. Wilkinson, *Advanced Inorganic Chemistry*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1988, 1455 p.
- [13] T. Tsuchiya, Y. Miyake, T. Shigehisa, A. Tomita, M. Watanabe, "Kinetics of magnetite formation.
- [14] in a three-phase system", *J. Chem. Eng. Jpn.* vol.38 pp.509, (2005).
- [15] R. Massart, V. Cabuil, *J. Phys. Chem.* 84, pp.967, 1987.
- [۱۶] منشی، احمد ، سلطان عطار، سینا، بکارگیری روشی نوین در اندازه گیری نانو ذرات با استفاده از رابطه شرر و پراش پرتو ایکس، مجله علمی پژوهشی دانشگاه آزاد علامه مجلسی، سال دوم، شماره ششم، ۱۳۸۷، صفحه ۹-۱۸
- [17] M. T. Lopez-Lopez, J. D. G. Duran, A. V. Delgado, F. Gonzalez-Caballero, Stability and magnetic characterization of oleate-covered magnetite ferrofluids in different nonpolar carriers, *J. Colloid and Interface Science*, Vol.291, pp. 144-151, 2005.
- [18] P. Guardia, B. Batlle-Brugal, A. G. Roca, O. Iglesias, M. P. Morales, C. J. Serna, A. Labarta, X. Batlle, Surfactant effects in magnetite nanoparticles of controlled size, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol.316, pp. 756-759, 2007.
- [19] D. Bika, L. Vekas, M. J. Rasa, Preparation and magnetic properties of concentrated magnetic fluids on alcohol and water carrier liquids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.252, pp.10-12, 2002.
- [20] L. Y. Zhang, H. Chen, X. M. Wang, Magnetite ferrofluid with high specific absorption rate for application in hyperthermia, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 311, pp. 228-233, 2007.

۶- پی نوشت

- 1- Magnetite
- 2- Maghemite
- 3- coprecipitation
- 4- Monochromator
- 5- Scherrer