



تهیه‌ی نانوذرات فریت کبالت-روی و بررسی تغییرات دمای بستن با جانشانی روی به جای کبالت در میدان مغناطیسی متناوب با بسامدهای گوناگون

سهراب منوچهری^{۱*}، جمشید عمیقیان^۲، مرتضی مظفری^۳، محمد حسن یوسفی^۱

۱- گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد

۳- گروه فیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(دریافت مقاله: ۸۹/۶/۱، نسخه نهایی: ۹۰/۲/۱۶)

چکیده: نانوذرات مغناطیسی فریت کبالت-روی $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در آن $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ است، به روش هم رسوبی با نمک‌های محلول در آب کبالت، روی و آهن در هیدروکسید سدیم و در دمای 80°C تهیه شدند. ساختار فازی با پراش پرتو ایکس تعیین و میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با رابطه‌ی شرر محاسبه شد. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که همه‌ی نمونه‌ها تک فاز هستند و با افزایش x از مقدار 0 تا 0.8 ، میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها از حدود 13 nm به حدود 8 nm کاهش می‌یابد. ریخت‌شناسی و اندازه‌ی ذرات با میکروسکوپ الکترون عبوری بررسی شد. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که ذرات شکل کروی دارند و میانگین اندازه‌ی ذرات پیرامون 13.5 nm است که با میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها هم‌خوانی دارد. بستگی دمای بستن T_B به بسامد و رفتار ابرپارامغناطیسی نمونه‌ها از نمودار پذیرفتاری بر حسب دما در گستره‌ی 300 Hz تا 100 kHz به دست آمد و با قانون وگل-فولچر برازش شد.

واژه‌های کلیدی: روش هم رسوبی؛ نانوذرات؛ ابرپارامغناطیس؛ قانون وگل-فولچر.

مقدمه

نانوذرات مغناطیسی به خاطر ویژگی‌های یکتایشان هم از دیدگاه نظری و هم از دیدگاه آزمایشگاهی و صنعتی موضوع مورد علاقه‌ی پژوهشگران، دانشمندان و مهندسان است. فریت اسپینلی CoFe_2O_4 به دلیل ساختار و ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی جالب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است [۱-۳]. این ویژگی‌ها به همراه پایداری بالای فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، نانوذرات پایه‌ی فریت کبالت را برای کاربردهای گوناگون، مانند فروشاره‌ها، ضبط مغناطیسی و دارورسانی هدفمند مناسب کرده است [۱، ۴، ۵]. فریت کبالت ساختار اسپینل وارون پاره‌ای دارد و درجه‌ی وارونی آن به روش تهیه

بستگی دارد [۲]. یاخته‌ی یکه‌ی ساختار اسپینلی از هشت یکای فرمولی $M\text{Fe}_2\text{O}_4$ تشکیل می‌شود و دارای فرمول کلی $M_8\text{Fe}_{16}\text{O}_{32}$ است. چارچوب اسپینلی را یون‌های اکسیژن می‌سازند. در این ساختار یون‌های اکسیژن یک شبکه‌ی FCC به وجود آورده و کاتیون‌های M و Fe به صورت بین‌نشینی در دو زیرشبکه‌ی چهار وجهی (که آن‌ها را جایگاه-های A می‌نامند) و هشت وجهی (که آن‌ها را جایگاه‌های B می‌نامند) می‌نشینند [۶]. جانشانی روی در فریت‌های اسپینلی بسیار مورد علاقه است، زیرا پارامترهای مغناطیسی آن‌ها مانند دمای کوری، مغناطش، وادارندگی و غیره را در گستره‌ی بزرگی از مقادارها تغییر می‌دهد [۱، ۲، ۷، ۸].

همچنین تغییرات دمای بستن با جانشانی روی به جای کبالت در یک میدان مغناطیسی متناوب با بسامدهای گوناگون و برازش این تغییرات با قانون وگل- فولچر مورد بررسی قرار گرفته است.

روش کار

نانوذرات فریت کبالت-روی $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در آن x از صفر تا ۰/۸ با گام های ۰/۲ برگزیده شدند، به روش هم رسوبی تهیه شدند. مواد اولیه شامل کلریدهای آهن، کبالت و روی و هیدروکسید سدیم از شرکت مرک آلمان بودند. محلول های شیمیایی این مواد با آب دوبار یون زدایی شده تهیه شدند. برای تهیهی فریت کبالت-روی ۲۶۰ ml محلول ۰/۶۴ M سود با pH حدود ۱۲ با آهنک ثابت در دمای 80°C هم زده شد. در همین حال ۲۰(۱- x) ml از محلول ۰/۵ M کلرید کبالت، ۲۰x ml از محلول ۰/۵ M کلرید روی و ۲۰ ml از محلول ۱ M کلرید آهن در یک بشر در دمای 80°C با یکدیگر مخلوط شدند. این مخلوط سپس به یکباره به محلول سود اضافه شد تا رسوب تشکیل شود. برای اطمینان از تشکیل فاز کامل و همگن فریت کبالت-روی کار هم زدن این رسوب در $\text{pH}=12$ و با یک آهنک هم زدن ثابت در دمای 80°C به مدت یک ساعت ادامه داشت. رسوب های به دست آمده از واکنش پس از ته نشینی و جداسازی با سانتریفیوژ چندین بار با آب مقطر شسته شدند تا یون های آزاد کلر و سدیم زدوده شوند. رسوب حاصل در دمای اتاق خشک و سپس در هاون به مدت ۱۵ دقیقه ساییده شد تا پودر همگن و یکنواختی به دست آید.

الگوی پراش پرتو X نمونه ها با پراش سنج پرتو ایکس بروکر^۳ با لامپ مسی و با طول موج $\lambda=1.54\text{\AA}$ به دست آمد. میانگین اندازه ی بلورکها، D ، از پهن شدگی قله ی (۳۱۱) نمونه ها و به کمک رابطه ی شرر [۱۱] $D=0.9\lambda/\beta\cos\theta$ که در آن β پهنای قله پراش در نیم شدت و θ زاویه براگ است، محاسبه شدند. ثابت شبکه با نرم افزار EVA با کوک کردن ثابت شبکه^۴ به دست آمد.

ریخت شناسی و اندازه ی ذرات نمونه ها با یک میکروسکوپ الکترون تراگسیلی (TEM, LEO-906E) به دست آمد.

یک نمونه ی پودری از ذرات مغناطیسی تک حوزه، دمایی به نام دمای بستن (T_B) دارند که در دماهای پایین تر از آن گشتاورهای مغناطیسی ذرات نظم فری یا فرومغناطیسی دارند و وادارندگی آن ها ناصفر است و در دماهای بالاتر از آن وادارندگی آن ها صفر است و یک رفتار پارامغناطیسی شدید به خاطر بزرگ بودن گشتاور دوقطبی مغناطیسی هر ذره به نام ابرپارامغناطیس از خود نشان می دهند [۶]. اندازه ی بحرانی تک حوزه ی مغناطیسی برای فریت کبالت پیرامون ۳۲ nm گزارش شده است [۶]. رفتار دمای بستن با بسامد f میدان مغناطیسی AC برای ذرات نابهرمکنشی را می توان با قانون آرنیوس^۱، برازش داد [۶]:

$$\ln f + \ln \tau_0 = -\frac{E}{k_B T_B} \quad (1)$$

که τ_0 مقدار ثابت و از مرتبه ی 10^{-9} تا 10^{-13} ثانیه، $E = K_{eff} V$ ، K_{eff} ثابت ناهمسانگردی مغناطیسی مؤثر و V حجم ذره است. برای ذرات مغناطیسی بهرهمکنشی، قدرت بهرهمکنش با یک جمله ی اضافی $k_B T_0$ بیان می شود و رابطه ی آرنیوس به صورت زیر در می آید:

$$\ln f + \ln \tau_0 = -\frac{E}{k_B (T_B - T_0)} \quad (2)$$

که به نام قانون وگل- فولچر^۲ شناخته می شود [۹، ۱۰]. با بازنویسی این رابطه برای بسامد به دست می آید:

$$-T_B \ln f \tau_0 = -T_0 \ln f \tau_0 + \frac{E}{k_B} \quad (3)$$

برای یک نمونه ی معین می توان کمیت های T_B و f را از نتیجه های تجربی به دست آورد، اما سه کمیت τ_0 ، T_0 و E مجهول هستند. با رسم نمودار $-T_B \ln f \tau_0$ برحسب $-\ln f \tau_0$ و گزینش τ_0 در گستره ی $10^{-13} < \tau_0 < 10^{-9} \text{ sec}$ برای بهترین برازش با داده های تجربی می توان از شیب خط و عرض از مبدا آن دو مجهول دیگر را به دست آورد.

در این کار پژوهشی نانوذرات فریت کبالت با جانشانی روی به روش هم رسوبی در دمای 80°C بی پخت پس از آن تهیه شدند. ویژگی های مغناطیسی و ساختاری نمونه ها با TEM, XRD و AC-susceptibility بررسی شده است.

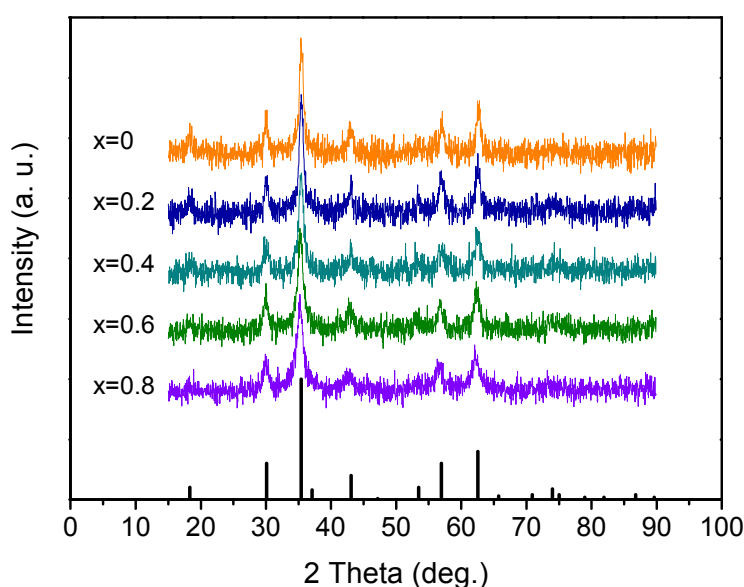
همه‌ی نمونه‌ها با ساختار بلوری فریت کبالت (کارت مرجع ۲۲-۱۰۸۶) هم خوان است. تغییرات ثابت شبکه‌ی نمونه‌ها بر حسب مقدار جانشانی x در شکل ۲ آمده‌اند. اگرچه دامنه‌ی تغییرات ثابت شبکه با گزارش‌های دیگر هم خوانی دارد [۱، ۲، ۱۲، ۱۳]، ولی رفتار آن‌ها متفاوت است. چنانکه که دیده می‌شود، ثابت شبکه با افزایش x افزایش می‌یابد. افزایش خطی ثابت شبکه با جانشانی روی نشان می‌دهد که تغییرات ثابت

تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها بر حسب دما از دمای ۷۷ تا دمای ۶۵۰ K در یک میدان مؤثر مغناطیسی متناوب 120 A/m در گستره‌ی بسامدی ۳۰۰ Hz تا ۱۰۰ kHz با یک دستگاه LCR سنج (Fluke, PM6306) به دست آمد.

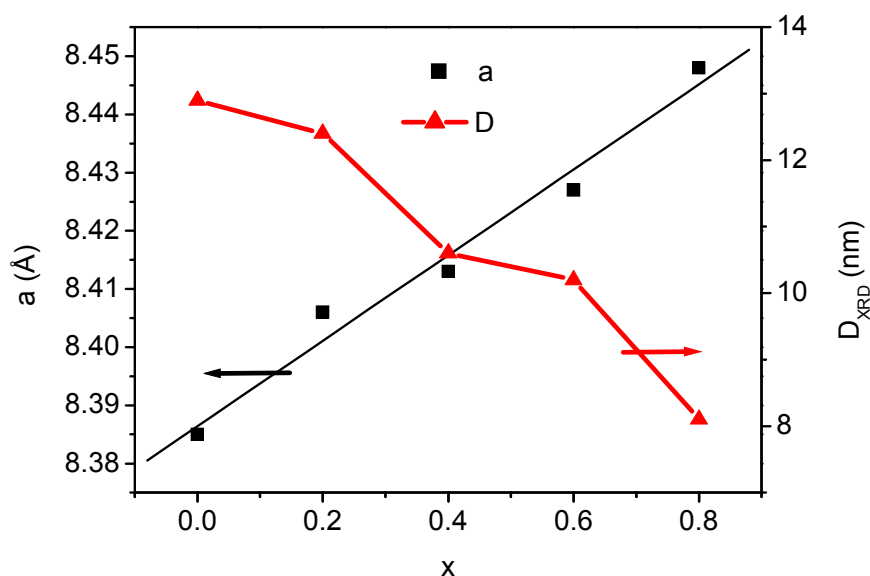
نتایج و بررسی

بررسی‌های ساختاری

شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌ها را نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود، قله‌های الگوهای پراش پرتو ایکس



شکل ۱ الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های فریت کبالت-روی. خطوط پایین شکل وابسته به قله‌های پراشی فریت کبالت (کارت مرجع: ۲۲-۱۰۸۶) است.



شکل ۲ تغییرات ثابت شبکه (■) و میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها (▲) بر حسب جانشانی یون‌های روی.

چسبیده‌اند. میانگین اندازه‌ی ذرات برای این نمونه برابر ۱۳/۵ nm است که با میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها به دست آمده از XRD هم خوانی دارد. این نشان می‌دهد که هر ذره یک تک بلور است.

بررسی وابستگی دمای بستن (T_B) به بسامد میدان مغناطیسی و مقدار روی جانشانی شده در نمونه‌های فریت کبالت-روی

پذیرفتاری AC برحسب دمای نمونه‌ها در بسامدهای گوناگون ۱۰۰، ۱۰، ۵، ۱، ۰/۵، ۰/۳ Hz اندازه‌گیری شد. برای نمونه شکل‌های ۴ (الف) و ۴ (ب) تغییرات پذیرفتاری AC برحسب دما را به ترتیب برای نمونه‌های با $x=0$ و $x=0/8$ نشان می‌دهد. چنانکه که دیده می‌شود در هر دو شکل منحنی‌ها رفتار همانندی نسبت به دما دارند و بیشینه‌ی پذیرفتاری که در دمای بستن T_B رخ می‌دهد، نشان می‌دهد که با افزایش بسامد، دمای بستن افزایش می‌یابد. چنین رفتاری در کارهای دیگران نیز دیده شده است [۹، ۳]. اندازه‌ی T_B به دست آمده در این پژوهش با آنچه در گزارش‌های دیگر آمده متفاوت است که دلیل آن تفاوت در اندازه‌ی ذرات و روش‌های تهیه است. علت افزایش دمای بستن با افزایش بسامد میدان مغناطیسی بنابر رابطه‌ی (۱) توضیح داده می‌شود. با افزایش بسامد، زمان تناوب میدان مغناطیسی کوچک می‌شود و مدت زمانی که راستای میدان مغناطیسی بدون تغییر می‌ماند کاهش می‌یابد. در نتیجه زمان مؤثر برای تغییر راستای گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی کوتاه می‌شود. لذا احتمال‌گذار از سد انرژی E کم شده و برای انجام‌گذار نیاز به دمای بستن بزرگتر است، تا گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی ارتفاع سد کوتاه‌تری را تجربه کنند. همچنین با افزایش جانشانی روی، دمای بستن حدود ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش می‌یابد که می‌تواند به تغییر در ثابت ناهمسانگردی و شدت برهمکنش وابسته باشد. شکل-های ۵ و ۶ نمودار تغییرات بسامد برحسب وارون دمای بستن نمونه‌های $x=0$ و $x=0/8$ را نشان می‌دهد. چنان‌که از رابطه‌ی آرنیوس (۱) بر می‌آید، می‌توان از عرض از مبدا شکل‌های ۵ و ۶ کمیت τ_0 را محاسبه کرد. مقدار τ_0 برای نمونه‌های $x=0$ و $x=0/8$ به ترتیب برابر با $1/5 \times 10^{-27}$ و $2/9 \times 10^{-20}$ sec به دست می‌آید. اندازه‌های به‌دست آمده بیرون از بازه‌ی فیزیکی $10^{-9} < \tau_0 < 10^{-13}$ است. این نتیجه نشان می‌دهد که ذرات نابرهمکنشی نیستند و به کارگیری این رابطه نادرست است و بایستی بین ذرات مغناطیسی برهمکنش وجود داشته باشد.

شبکه‌ی این ترکیب‌ها از قانون وگارد^۵ [۱۳-۱۵] پیروی می‌کند. از سوی دیگر برای ترکیب‌هایی همانند فریت کبالت-روی، که توزیع کاتیونی در آن‌ها به طور کامل عادی یا وارون نیستند، رفتار ناخطی گزارش شده است [۱۶، ۱۷]. شعاع‌های یونی Zn^{2+} (۰/۸۲ Å) و Co^{2+} (۰/۸۲ Å) اند که نسبت به شعاع یونی Fe^{3+} (۰/۶۴ Å) بزرگترند [۱۸، ۱۹]. با نشان دادن یون‌های روی به جای یون‌های کبالت، یون‌های روی در جایگاه A قرار می‌گیرند و بخشی از یون‌های Fe^{3+} از جایگاه A به جایگاه B می‌روند، به گونه‌ای که شمار یون‌های روی در جایگاه‌های A و یون‌های آهن در جایگاه‌های B افزایش و یون‌های آهن در جایگاه‌های A کاهش می‌یابد. با توجه به ساختار بلوری تنگ پکیده‌ی مکعبی مرکز سطحی اکسیژن‌ها، فضای خالی دسترس پذیر در یک ساختار تنگ پکیده آرمانی از آنیون‌های اکسیژن برای جایگاه A تنها یون‌هایی با بیشینه شعاع ۰/۳ Å و برای جایگاه B یون‌هایی با بیشینه شعاع ۰/۵۵ Å را می‌تواند در خود جای دهد [۱۹]. با این فرض، ثابت شبکه‌ی آرمانی اسپینل ۷/۴۷ Å محاسبه می‌شود [۱۹]. پس با جانشانی یون‌های روی به جای یون‌های کبالت، یون‌های بزرگتر روی در جایگاه کوچکتر به جای یون‌های کوچکتر آهن می‌نشینند و یون‌های کوچکتر آهن در جایگاه بزرگتر به جای یون‌های بزرگتر کبالت می‌نشینند. بنابر این افزایش ثابت شبکه با جانشانی روی به دلیل اختلاف در شعاع‌های یونی است، زیرا ثابت شبکه به هنگام جانشانی با یون‌های بزرگتر افزایش می‌یابد. نتیجه‌های همانندی برای ترکیب‌های فریت Zn-Mg توسط مازن^۶ و همکارانش [۲۰] و کاسابوا^۷ و همکارانش [۲۱] و برای ترکیب‌های فریت Zn-Ni توسط کاستا^۸ و همکارانش [۷] گزارش شده است. میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با فرمول شرر محاسبه شد و در شکل ۲ تغییرات آن با افزایش غلظت مولی روی دیده می‌شود. چنانکه دیده می‌شود، میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها از ۱۲/۹ nm برای $x=0$ به ۸/۱ nm برای $x=0/8$ کاهش می‌یابد. نتیجه‌های همانندی برای کاهش میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با افزایش غلظت مولی روی برای ترکیب‌های فریتی کبالت-روی و منگنز-روی گزارش شده است [۱، ۸، ۲۲].

تصویر TEM

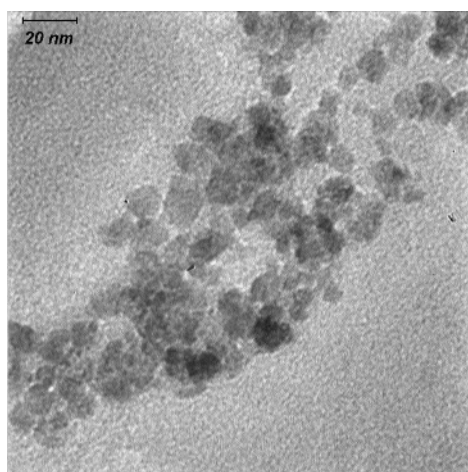
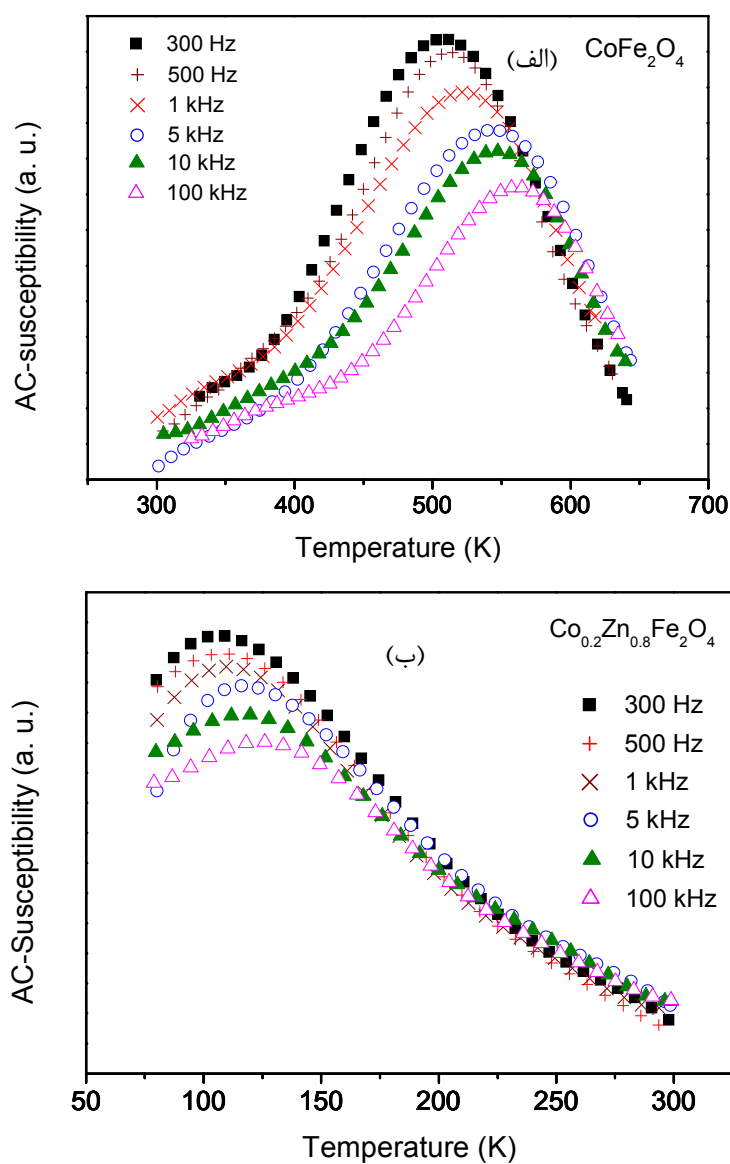
در شکل ۳ تصویر TEM نمونه با $x=0$ دیده می‌شود. در این تصویر بیشتر ذرات تقریباً کروی‌اند و برخی از ذرات به هم

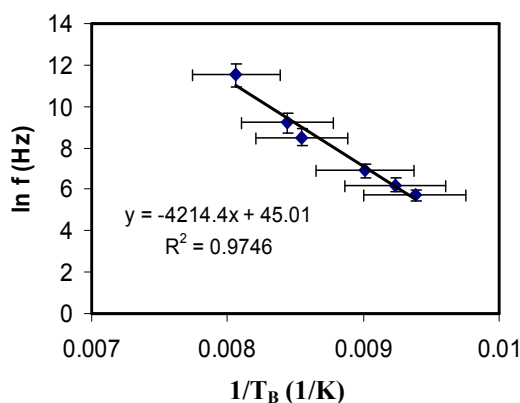
5- Vegard's law

6- Mazen

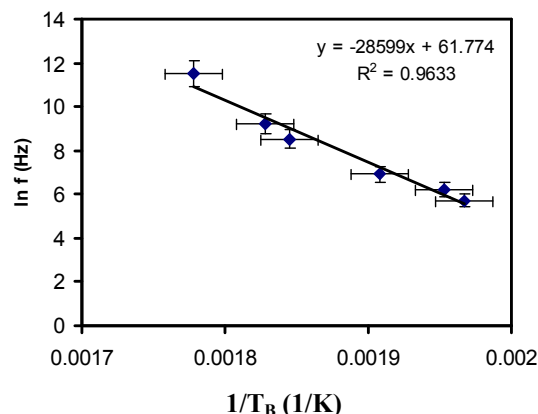
7- Kassabova

8- Costa

شکل ۳ تصویر TEM نمونه $X=0$.شکل ۴ تغییرات پذیرفتاری AC برحسب دما در بسامدهای گوناگون میدان مغناطیسی برای نمونه‌های (الف) $X=0$ و (ب) $X=0.8$.



شکل ۶ نمودار تغییرات لگاریتم بسامد برحسب وارون دمای بستن نمونه‌ی با $X=0.8$.



شکل ۵ نمودار تغییرات لگاریتم بسامد برحسب وارون دمای بستن نمونه‌ی با $X=0$.

مقدارهای C_1 و C_2 این جدول می‌توان نتیجه گرفت که بهترین ترکیب‌ها که کمترین برهمکنش بین ذرات را دارند، نمونه‌های $X=0$ و $X=0.8$ هستند و نمونه $X=0.2$ دارای بیشترین برهمکنش بین ذرات است. از مقدار T_0 نتیجه می‌شود که شدت برهمکنش بین ذرات برای نمونه‌های $X=0$ و $X=0.2$ تقریباً برابرند و سپس با افزایش X کاهش می‌یابد. این رفتار منطقی است، زیرا برهمکنش بین ذرات می‌تواند شامل برهمکنش دوقطبی-دوقطبی و برهمکنش تبدیلی بین اتم‌های سطحی ذرات همسایه شود. گزارش شده است که با افزایش جانشانی روی از $X=0$ تا $X=0.3$ مغناطش اشباعی نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۱۷]. با توجه به حجم ذره برای هر نمونه، دیده می‌شود که نخست گشتاور دوقطبی مغناطیسی هر ذره افزایش می‌یابد که باعث شدید شدن برهمکنش بین ذرات خواهد شد و سپس با افزایش بیشتر جانشانی روی کاهش مغناطش اشباعی و به همراه آن کاهش گشتاور دوقطبی مغناطیسی برای هر ذره ایجاد می‌شود که به همین سبب تضعیف قدرت برهمکنش حاصل می‌شود. انرژی سد ناهمسانگردی بلوری به دو عامل ثابت ناهمسانگردی بلوری و حجم ذرات وابسته است. با توجه به اندازه‌ی ذرات که برای نمونه‌های تهیه شده متفاوت است و انرژی سد ناهمسانگردی و با فرض کروی بودن ذرات می‌توان ثابت ناهمسانگردی را محاسبه کرد. ثابت ناهمسانگردی برای فریت کبالت بزرگتر از حالت حجمی ($K=2 \times 10^5 \text{ J/m}^3$) [۱۸، ۶] است. این افزایش در ثابت ناهمسانگردی برای نانو ذرات به اثرهای سطحی نسبت داده می‌شود [۲۶، ۲۵، ۹].

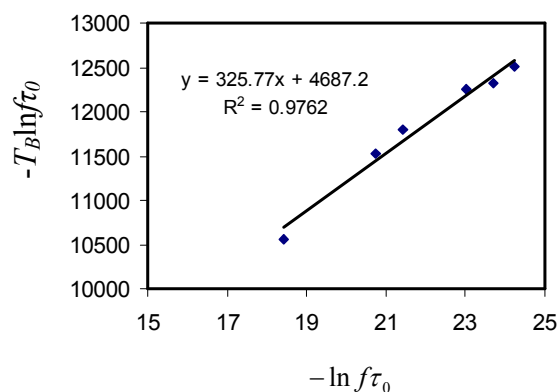
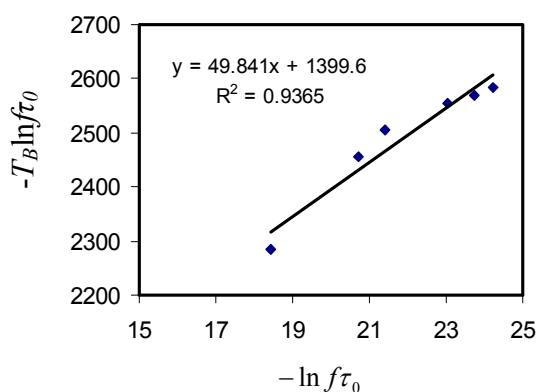
بر پایه‌ی رابطه‌ی (۳) برای ذرات برهمکنشی نمودار $-T_B \ln f \tau_0$ برحسب $-\ln f \tau_0$ به صورت خطی در شکل-های ۷ و ۸ به ترتیب برای نمونه‌های $X=0$ و $X=0.8$ با گزینش $\tau_0 = 10^{-13} \text{ sec}$ نشان داده شده است. چنان که دیده می‌شود، قانون وگل-فولچر برقرار شده و نشانگر آن است که نمونه‌های تهیه شده شامل نانوذرات برهمکنشی‌اند. با برازش یک خط با هر مجموعه از داده‌های T_B و f که از تغییرات پذیرفتاری AC برحسب دما در بسامدهای گوناگون به دست می‌آیند، می‌توان معادله‌های آن خط‌ها را به دست آورد.

کمیت‌های T_0 و E به ترتیب از شیب و عرض از مبدا، خط‌ها محاسبه شدند و در جدول ۱ آمده‌اند. پارامترهای تجربی C_1 و C_2 برای تأیید برهمکنش بین ذرات با روابط زیر تعریف می‌شوند [۲۴، ۲۳، ۱۰]:

$$C_1 = \frac{\Delta T_B}{T_B \Delta(\log f)} \quad (۴)$$

$$C_2 = \frac{T_B - T_0}{T_B} \quad (۵)$$

کمیت C_1 از هر مدلی مستقل است و جابه‌جایی دمای بستن نسبی را نسبت به تغییرات بسامد نشان می‌دهد. کمیت C_2 برای مقایسه‌ی دماهای بستن ترکیب‌های گوناگون مناسب است. برای ذرات ابرپارامغناطیس نابهمکنشی مقدارهای C_1 و C_2 به ترتیب برابر با ۰.۱ و ۱.۰ است درحالی که این مقدارها برای ترکیب‌های برهمکنشی شدید حدود صد برابر کوچک‌ترند [۲۴، ۲۳، ۱۰]. مقدارهای C_1 و C_2 برای ترکیب‌های تهیه شده در این پژوهش محاسبه و در جدول ۱ آمده‌اند. با توجه به



شکل ۷ نمودار $-T_B \ln f \tau_0$ برحسب $-\ln f \tau_0$ برای نمونه‌ی $X=0$ با $X=0.8$ شکل ۸ نمودار $-T_B \ln f \tau_0$ برحسب $-\ln f \tau_0$ برای نمونه‌ی $X=0.8$

جدول ۱ دمای T_0 ، انرژی سد ناهمسانگردی، C_1 ، C_2 و ثابت ناهمسانگردی K برای نمونه‌های تهیه شده.

x	۰/۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸
T_0 (K)	۳۲۶	۳۴۷	۲۵۱	۱۵۸	۵۰
E/k_B (K)	۴۶۸۷	۱۷۹۲	۱۴۷۸	۱۳۲۴	۱۴۰۰
C_1	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۶
C_2	۰/۳۹	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۵۷
K (J/m ³) $\times 10^5$	۲/۲	۱/۰	۱/۳	۱/۳	۲/۶

برداشت

ثابت شبکه فریت کبالت با افزایش جانشانی روی، به صورت خطی افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد تغییرات ثابت شبکه برای این ترکیب‌ها از قانون وگارد پیروی می‌کند. میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با افزایش جانشانی روی کاهش می‌یابد. دمای بستن T_B با افزایش بسامد میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و با قانون وگل-فولچر هم خوانی دارد. دمای بستن با افزایش جانشانی روی به جای کبالت کاهش می‌یابد که نشان از تغییر ثابت ناهمسانگردی و شدت برهمکنش بین ذرات دارد و نتایج نشان می‌دهد که رابطه‌ی خطی برای آن‌ها وجود ندارد. به دلیل اثرهای سطحی ثابت ناهمسانگردی برای فریت کبالت در اندازه‌ی نانو نسبت به نمونه‌ی حجمی آن بزرگتر است.

مراجع

[1] Vaidyanathan G., Sendhilnathan S., Arulmurugan R., "Structural and magnetic properties of $Co_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ nanoparticles by co-

precipitation method," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 313 (2007) 293-299.

[2] Gul I. H., Abbasi A. Z., Amin F., Anis-ur-Rehman M., Maqsood A., "Structural, magnetic and electrical properties of $Co_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ synthesized by co-precipitation method," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 311 (2007) 494-499.

[3] Peddis D., Mansilla M. V., Morup S., Cannas C., Musinu A., Piccaluga G., D'Orazio F., Lucari F., Fiorani D., "Spin-canting and magnetic anisotropy in ultrasmall $CoFe_2O_4$ nanoparticles," Journal of Physical Chemistry B 112 (2008) 8507-8513.

[4] Lee S. W., Bae S., Takemura Y., Shim I. B., Kim T. M., Kim J., Lee H. J., Zurn S., Kim C. S., "Self-heating characteristics of cobalt ferrite nanoparticles for hyperthermia application," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 310 (2007) 2868-2870.

- [17] Pandya P. B., Joshi H. H., Kulkarni R. G., "Bulk magnetic properties of Co-Zn ferrites prepared by the coprecipitation method," Journal of Materials Science 26 (1991) 5509-5512.
- [18] Goldman A., Modern Ferrite Technology (Springer Science+Business Media, New York, 2006).
- [19] Smit J., Magnetic Properties of Materials (McGraw-Hill, 1971).
- [20] Mazen S. A., Mansour S. F., Zaki H. M., "Some physical and magnetic properties of Mg-Zn ferrite," Crystal Research and Technology 38 (2003) 471-478.
- [21] Kassabova-Zhetcheva V. D., Pavlova L. P., Samuneva B. I., Cherkezova-Zheleva Z. P., Mitov I. G., Mikhov M. T., "Characterization of superparamagnetic $Mg_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ powders," Central European Journal of Chemistry 5 (2007) 107-117.
- [22] Arulmurugan R., Vaidyanathan G., Sendhilnathan S., Jeyadevan B., "Mn-Zn ferrite nanoparticles for ferrofluid preparation: Study on thermal-magnetic properties," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 298 (2006) 83-94.
- [23] Dormann J. L., Fiorani D., Cherkaoui R., Tronc E., Lucari F., D'Orazio F., Spinu L., Nogues M., Kachkachi H., Jolivet J. P., "From pure superparamagnetism to glass collective state in gamma- Fe_2O_3 nanoparticle assemblies," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 203 (1999) 23-27.
- [24] Sharma S. K., Kumar R., Kumar S., Kumar V. V. S., Knobel M., Reddy V. R., Banerjee A., Singh M., "Magnetic study of $Mg_{0.95}Mn_{0.05}Fe_2O_4$ ferrite nanoparticles," Solid State Communications 141 (2007) 203-208.
- [25] Dutta P., Pal S., Seehra M. S., Shah N., Huffman G. P., "Size dependence of magnetic parameters and surface disorder in magnetite nanoparticles," Journal of Applied Physics 105 (2009) 07B501.
- [26] Ibusuki T., Kojima S., Kitakami O., Shimada Y., "Magnetic anisotropy and behaviors of nanoparticles," IEEE Transactions on Magnetics 37 (2001) 2223-2225.
- [5] Kashevsky B. E., Agabekov V. E., Kashevsky S. B., Kekalo K. A., Manina E. Y., Prokhorov I. V., Ulashchik V. S., "Study of cobalt ferrite nanosuspensions for low-frequency ferromagnetic hyperthermia," Particuology 6 (2008) 322-333.
- [6] Cullity B. D., Graham C. D., Introduction to Magnetic Materials (John Wiley & sons, New Jersey, 2009).
- [7] Costa A. C. F. M., Morelli M. R., Kiminami R. H. G. A., "Microstructure and magnetic properties of $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ synthesized by combustion reaction," Journal of Materials Science 42 (2007) 779-783.
- [8] Giri J., Sriharsha T., Bahadur D., "Optimization of parameters for the synthesis of nano-sized $Co_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ by microwave refluxing," Journal of Materials Chemistry 14 (2004) 875-880.
- [9] Lopez J. L., Pfannes H. D., Paniago R., Sinnecker J. P., Novak M. A., "Investigation of the static and dynamic magnetic properties of $CoFe_2O_4$ nanoparticles," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 (2008) E327-E330.
- [10] Tadic M., Markovic D., Spasojevic V., Kusigerski V., Remskar M., Pirnat J., Jaglicic Z., "Synthesis and magnetic properties of concentrated $\alpha-Fe_2O_3$ nanoparticles in a silica matrix," Journal of Alloys and Compounds 441 (2007) 291-296.
- [11] Cullity B. D., Elements of X-Ray Diffraction (Addison-Wesley, 1956).
- [12] Wohlfarth E. P., Ferromagnetic Materials (Elsevier Science publishers, North-Holland physics Publishing, Amsterdam, 1982).
- [13] Smit J., Wijn H. P. J., Ferrites (Philips Technical Library, Eindhoven, 1959).
- [14] Haque M. M., Huq M., Hakim M. A., "Effect of Zn^{2+} substitution on the magnetic properties of $Mg_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ferrites," Physica B 404 (2009) 3915-3921.
- [15] Kaldis E., Current Topics in Materials Science (North-Holland Publishing, Amsterdam, 1982).
- [16] Arulmurugan R., Jeyadevan B., Vaidyanathan G., Sendhilnathan S., "Effect of zinc substitution on Co-Zn and Mn-Zn ferrite nanoparticles prepared by co-precipitation," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 288 (2005) 470-477.