

## بررسی اثر آرایش کروم بر روی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت

 $MnFe_{2-x}Cr_xO_4$ 

حمزه قربانی، مهین اشراقی\*

گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، ایران

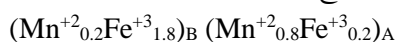
## چکیده

در این تحقیق، نانوذرات فریت منگنز با فرمول  $(x=0, 0.25, 0.5, 0.75)MnFe_{2-x}Cr_xO_4$  ساخته شد. ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها با پراش سنتزی پرتوی ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، همچنین ویژگی‌های مغناطیسی با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی و مغناطش‌سنج ارتعاشی (VSM) مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز XRD نشان می‌دهد که ساختار فریت اسپینلی با فاز خالص در نمونه‌ها شکل گرفته است و با استفاده از معادله شرر اندازه بلورک‌ها در حدود ۴ نانومتر به دست آمد. تصاویر FESEM نشان می‌دهند که ذرات کلوخه شده‌اند. نتایج VSM نشان می‌دهند که مغناطش نانوذرات با افزایش میزان آرایش کروم، کاهش می‌یابد. همچنین اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه‌ها نشان می‌دهند که پاسخ نمونه‌ها به میدان مغناطیسی خارجی به بسامد اعمالی وابسته است و پس از محاسبات و برازش داده‌ها مشخص شد که مواد ساخته شده در دماهای پایین رفتار ابرشیشه‌اسپینی با برهم‌کنش قوی بین نانوذرات دارند.

کلیدواژگان: فریت، نانو ذرات، ابر پارامغناطیس، شیشه ابر اسپین.

## مقدمه

است که در میان فریت‌های اسپینلی مقدار نسبتاً بالایی به حساب می‌آید. فریت منگنز دمای کوری ۵۷۳ کلوین دارد [۳]. پایداری شیمیایی این ترکیب نسبت به دیگر فریت‌ها در دمای اتاق بالا است که استفاده از آن را در زمینه‌های مختلف پزشکی امکان‌پذیر کرده است [۴]. در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ کلوین، فریت منگنز به فازهای اکسید آهن و اکسید منگنز تجزیه می‌شود و در دمای بالاتر از ۱۲۰۰ کلوین دوباره ساختار اسپینلی تشکیل می‌دهد [۳]. ساختار جزئی معکوس فریت منگنز به صورت توزیع کاتیونی زیر می‌باشد:



که در آن A و B به ترتیب نشان‌دهنده مکان‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی در ساختار اسپینلی هستند [۳]. در واقع به دلیل تشابه نسبی اندازه شعاع یونی آهن

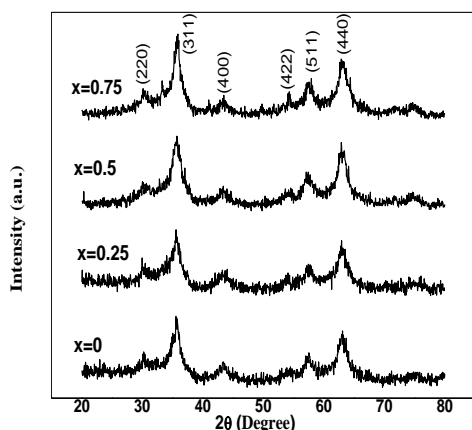
در سال‌های اخیر، استفاده از نانوذرات مغناطیسی، در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی گسترش پیدا کرده است [۱]. از جمله ذرات مغناطیسی کاربردی در این زمینه، فریت‌های اسپینلی است. در سال‌های اخیر تحقیقات و پژوهش‌های زیادی روی فریت‌های اسپینلی و نیز ترکیب و آرایش آنها انجام شده است [۲]. از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین آنها فریت نیکل-روی و منگنز-روی است که تاکنون مقالات زیادی درباره روش‌های متعدد ساخت آن، ترکیب و آرایش آن با دیگر عناصر به چاپ رسیده است. ساختار فریت منگنز، اسپینلی مکعبی است و به دلیل توزیع کاتیونی جزئی معکوس خود، پیچیدگی خاصی دارد. مغناطش اشباع این ماده در دمای ۳۰۰ کلوین در حدود ۸۳ emu/g

### کارهای آزمایشگاهی

در این پژوهش، ترکیب فریت منگنز، آلییده شده با کروم  $(x=0, 0.25, 0.5, 0.75)\text{MnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  به روش تجزیه حرارتی نیترات‌ها در حضور اسید سیتریک تهیه شد. نخست مواد اولیه، شامل نیترات آهن، نیترات منگنز، استات کروم و اسید سیتریک با نسبت مولی ۱ به ۳ برای نیترات‌های فلزی به اسید سیتریک، توزین و پس از مخلوط کردن، داخل ظرف‌های دستگاه آسیاب ریخته شد و به مدت یک ساعت آسیاب شد. پودر به دست آمده در داخل کوره قرار داده شد و به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۳۳۵ درجه سانتی‌گراد بازپخت شد. برای شناسایی ساختار بلوری، اطلاع از فاز تشکیل شده و مشاهده میزان تراکم نانوذرات، آزمایشات پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین برای بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها، اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) و پذیرفتاری مغناطیسی متناوب انجام شد.

### نتایج و بحث

شکل ۱ الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های ساخته شده.

و منگنز و نیز یکسان بودن ممان مغناطیسی یون‌های آهن ( $\text{Fe}^{+3}$ ) و منگنز ( $\text{Mn}^{+2}$ ) که برابر با  $5 \mu_B$  است، چنین پدیده‌ای در این ماده رخ می‌دهد [۳]. وقتی در مقیاس نانو، فریت منگنز را بررسی کنیم، خواهیم دید که دمای کوری، مغناطش اشباع و توزیع کاتیونی نانوذرات نسبت به حالت غیر نانو تغییر خواهد کرد [۵]. فریت منگنز از جمله مواد مغناطیسی نرم به‌شمار می‌آید. نانو ذرات این ترکیب نیز میدان وادارندگی پایینی (از مرتبه چند ده اورستد) نسبت به نانو ذرات دیگر فریت‌ها دارند که با این ویژگی، این ترکیب، گزینه مناسبی برای استفاده به‌عنوان مواد مغناطیسی نرم با وادارندگی کوچک و مغناطش اشباع نسبتاً بالا است [۵]. مطالعات نشان می‌دهند که با آلیش عناصر مختلف در ساختار فریت‌ها می‌توان ویژگی‌های ساختاری، الکتریکی و مغناطیسی این مواد را کنترل کرد. به‌عنوان مثال نشان داده شده است که جایگزینی Co به‌جای آهن در فریت نیکل باعث افزایش میدان وادارندگی می‌شود [۶]. در تحقیقی دیگر گزارش شده است که آلیش هم‌زمان Al و Cr به‌جای آهن در فریت روی مغناطش را کاهش می‌دهد [۷]. در مطالعه اخیر نشان داده شده است که جایگزینی Cr در فریت کبالت-روی منجر به افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها شده است [۸]. براساس بررسی‌های انجام شده و در حد اطلاعات به‌دست آمده توسط نویسندگان، مشاهده شد که تاکنون هیچ گزارشی مبنی بر آلیش کروم در فریت منگنز ارائه نشده است. لذا هدف ما در این پژوهش بررسی اثر آلیش کروم بر ویژگی‌های مغناطیسی فریت منگنز می‌باشد. بدین منظور نانوذرات فریت منگنز آلیش شده با درصد‌های مختلف کروم  $(x=0, 0.25, 0.5, 0.75)$  ساخته شده و ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱. اندازه میانگین بلورک‌ها، ثابت شبکه و حجم سلول واحد نمونه‌های ساخته شده.

نمونه	X=۰	X=۰٫۲۵	X=۰٫۵	X=۰٫۷۵
میانگین اندازه بلورک‌ها(نانومتر)	۴	۴	۴	۴
ثابت شبکه(آنگستروم)	۸٫۴۴	۸٫۳۹	۸٫۳۷	۸٫۳۳
حجم سلول واحد <sup>۳</sup> (آنگستروم)	۶۰۱	۵۹۰	۵۸۷	۵۷۸

نتایج نشان می‌دهد که ثابت شبکه، با افزایش میزان آلیش، به مقدار کمی کاهش یافته است که به تبع آن حجم سلول واحد ساختار اسپینلی نیز کم شده است. به نظر می‌رسد، کوچک بودن شعاع یونی کروم ( $Cr^{+3}:0.63\text{\AA}$ ) نسبت به آهن ( $Fe^{+3}:0.645\text{\AA}$ ) علت کاهش پارامتر شبکه و حجم سلول واحد است [۹]. شکل ۲، تصاویر FESEM نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. در این تصاویر اندازه ذرات به دلیل کلوخگی بالای این مواد قابل تشخیص نیست و بیانگر این مطلب است که هر کدام از این کلوخه‌ها از تعداد زیادی نانوذره فریت که به هم چسبیده‌اند، تشکیل شده است. همچنین ریخت نمونه‌ها با آلیش کروم تغییر کرده است. این میزان از کلوخه شدن و تغییر ریخت در تحقیقات مشابه نیز مشاهده شده است و به نظر می‌رسد به دلیل مغناطیسی بودن ذرات و به تبع آن جاذبه بین نانوذرات ایجاد شده است که البته میزان جاذبه بین نانوذرات با آلیش کروم و تضعیف مغناطش نمونه‌ها تغییر می‌کند [۱۰].

همان‌گونه که دیده می‌شود، فاز فریت منگنز با ساختار اسپینلی مکعبی در همه نمونه‌ها تشکیل شده است. همه قله‌ها اندیس‌گذاری شدند که به خوبی با کارت استاندارد به شماره (۷۳-۱۹۶۴) توافق دارد. لازم به ذکر است که به دلیل پایین بودن دمای بازپخت، قله‌های نسبتاً پهن در الگوی پراش نمونه‌ها شکل گرفته است. همچنین این رفتار نشان‌دهنده نانومتری بودن اندازه نانو ذرات می‌باشد.

با استفاده از معادله شرر:

$$D_{XRD} = K\lambda / \beta \cos\theta \quad 1$$

(که در آن  $k$  ثابت شرر تقریباً برابر با  $0.9$ ،  $\lambda$  طول موج پرتو  $X$  برابر با  $1.5406$  آنگستروم،  $\beta$  پهنای قله‌ها در نصف بیشینه شدت قله و  $\theta$  زاویه براگ مربوط به پراش اشعه می‌باشد) و نیز داده‌های حاصل از قله‌های پراش، میانگین اندازه بلورک‌ها محاسبه شد.

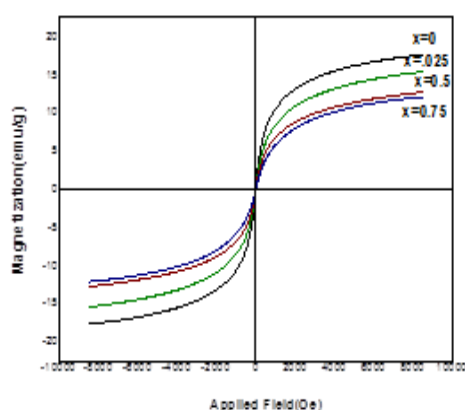
همان‌طور که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است، دیده می‌شود که مقدار آن در حدود  $4$  نانومتر بوده و اندازه بلورک‌ها با آلیش کروم تغییر محسوسی ندارد. با استفاده از معادله ۲

$$1/d^2 = (h^2 + k^2 + L^2) / a^2 \quad 2$$

(که در آن  $h$  و  $k$  و  $L$  اندیس‌های میلر صفحات پراش و  $d$  فاصله صفحات هستند)، میانگین ثابت شبکه ( $a$ ) و حجم سلول واحد ساختار اسپینلی مکعبی نمونه‌ها ( $V$ ) محاسبه شد که نتایج آن نیز در جدول ۱ آمده است. توضیح اینکه برای جلوگیری از خطای حاصل از محاسبات، محاسبات اندازه بلورک‌ها و ثابت شبکه برای چند قله انجام شده و مقادیر متوسط برآورد شد.

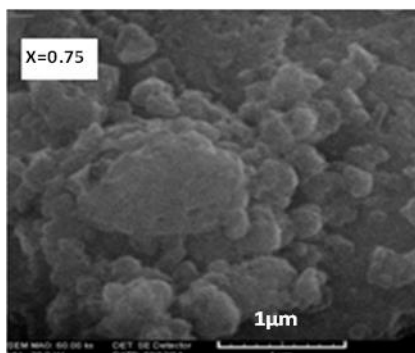
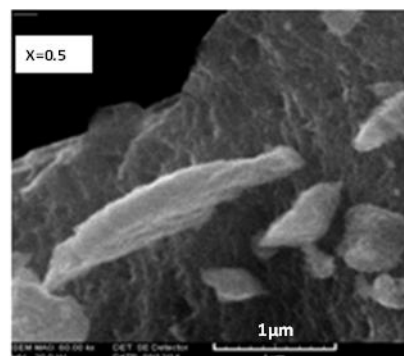
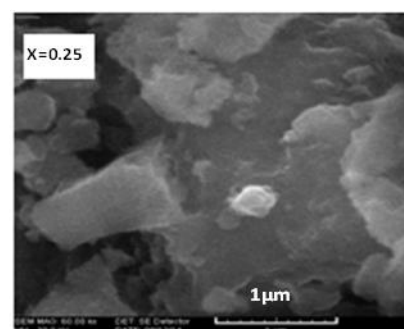
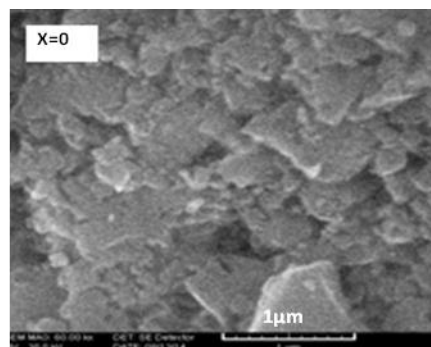
شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود مغناطش نمونه‌ها با افزایش میزان آرایش کروم کاهش یافته است. با توجه به ساختار فریت منگنز که در مقدمه به آن پرداختیم، می‌توان گفت با افزایش آرایش کروم به جای آهن، یون‌های  $Cr^{+3}$  (با ممان مغناطیسی  $3\mu_B$ )، جایگزین یون‌های  $Fe^{+3}$  (با ممان مغناطیسی  $5\mu_B$ ) در جایگاه هشت وجهی B می‌شوند که این جانشینی منجر به کاهش مغناطش زیرشبکه B می‌شود. مغناطش فری مغناطیس‌ها اختلاف مغناطش زیرشبکه A و B است. بنابراین با کاهش مغناطش زیر شبکه B، مغناطش کل نمونه کم می‌شود. این رفتار در نانوذرات فریت نیکل آرایش یافته با کروم نیز مشاهده شده است [۱۰].

همچنین دیده می‌شود که نمونه‌ها تقریباً هیچ پسماند مغناطیسی ندارند که نشان‌دهنده آن است که نمونه‌ها تک حوزه بوده و در دمای اتاق رفتار ابرپارامغناطیس دارند. این رفتار در داخل شکل ۳ که برای محدوده میدان‌های کم رسم شده به نحو بهتری دیده می‌شود.



شکل ۳. منحنی مغناطش نمونه‌ها برحسب میدان در دمای اتاق.

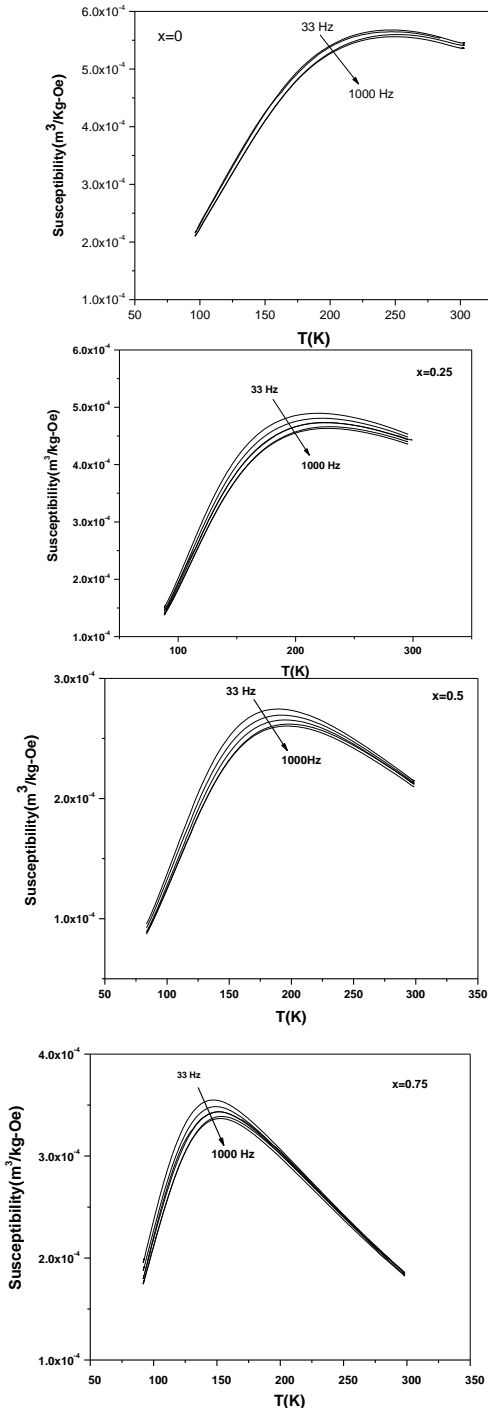
برای مطالعه رفتار دینامیکی مغناطش نانوذرات و پاسخ آنها به میدان متناوب، پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه‌ها برحسب دما اندازه‌گیری شد. شکل ۴، نمودار تغییرات دمایی بخش حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی



شکل ۲. تصاویر FESEM نمونه‌های ساخته شده.

برای بررسی پاسخ مغناطیسی نانوذرات ساخته شده به میدان مغناطیسی خارجی، منحنی مغناطش نمونه‌ها برحسب میدان با استفاده از دستگاه VSM اندازه‌گیری

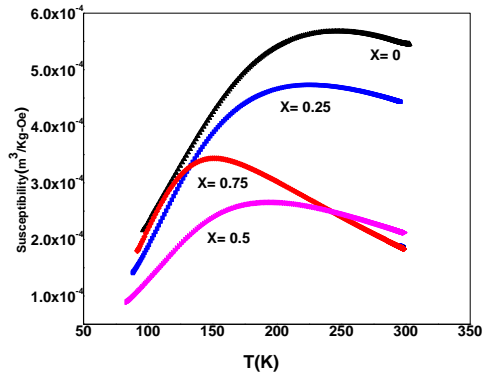
اندازه‌گیری شد. شکل ۵ وابستگی منحنی پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها را به فرکانس نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار تغییرات دمایی بخش حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی ac نمونه‌های ساخته شده در فرکانس‌های مختلف.

همان‌طور که از شکل‌ها پیداست، قله موجود در نمودار پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس بوده و با

متناوب نمونه‌های ساخته شده در فرکانس ۳۳۳ هرتز و میدان ۱۰ اورستد را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمودار تغییرات دمایی بخش حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی ac نمونه‌های ساخته شده در فرکانس ۳۳۳ هرتز.

مشاهده می‌شود که با کاهش دما، قله‌ای در منحنی پذیرفتاری مغناطیسی شکل می‌گیرد. این رفتار معمولاً برای نانوذرات تک حوزه مغناطیسی که رفتار ابرپارامغناطیس دارند دیده می‌شود [۱۱]. در واقع در دماهای بالاتر از دمای قله، مغناطش نانوذرات به دلیل انرژی گرمایی، توزیع تصادفی دارند که با کاهش دما پاسخ آنها به میدان مغناطیسی اعمالی زیاد شده و پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد. با کاهش دما و به تبع آن کاهش انرژی گرمایی، مغناطش نانو ذرات در حالت قفل شده قرار می‌گیرند و پاسخ آنها به میدان کم می‌شود. دیده می‌شود، با افزایش میزان آلایش کروم، دمای قله به سمت دماهای پایین جابجا می‌شود. این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش مغناطش نمونه‌ها، با آلایش کروم باشد. برای مطالعه بیشتر بر ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های ساخته شده، پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها، در فرکانس‌های مختلف و میدان ۱۰ اورستد

در این رابطه،  $\tau_0$  برای نانوذرات ابرپارامغناطیس غیر برهم‌کنشی در محدوده  $10^{-13}$  تا  $10^{-9}$  ثانیه گزارش شده است و  $\tau$ ، عکس فرکانس اعمالی است. دمای قفل‌شدگی ( $T_B$ )، سد انرژی وابسته به اندازه ذرات ( $E_a$ ) و ثابت ناهمسانگردی ( $K$ )، تنها عوامل مؤثر در واهلش نیل می‌باشند [۱۳]. اگر  $\Phi$  در بازه  $0.13 \leq \Phi \leq 0.70$  باشد، نانو ذرات برهم‌کنش ضعیفی دارند و از مدل وگل-فالچر طبق رابطه ۵ پیروی می‌کنند [۱۵]:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_a / K_B (T_B - T_0)) \quad 5$$

که در آن  $T_0$  دمای مؤثری است که میزان برهم‌کنش بین نانوذرات را نشان می‌دهد و مقدار به‌دست آمده برای کمیت  $\tau_0$ ، در این مدل نیز در محدوده  $10^{-13}$  -  $10^{-9}$  ثانیه است [۱۶]. اگر  $\Phi$  در بازه  $0.70 \leq \Phi \leq 0.70$  باشد برهم‌کنش‌های بین ذرات بسیار زیاد بوده و نانوذرات در حالت ابرشیشه‌اسپینی هستند که از مدل توان دینامیکی طبق رابطه ۶ پیروی می‌کند [۱۷]:

$$\tau = \tau_0 \exp(T_f / T_B - 1)^{-z_v} \quad 6$$

در رابطه ۶،  $T_f$  مقدار دمای قفل‌شدگی در فرکانس صفر،  $T_B$  دمای قله،  $\tau_0$  زمان واهلش ممان مغناطیسی یک تک‌حوزه مجزا و پارامترهای  $z_v$  رابطه میان طول همبستگی، زمان واهلش و دمای کاهش یافته است. در واقع این مدل بیانگر احتمال حضور فاز بی‌نظم شیشه‌اسپینی میان نانوذرات (ابراسپین‌های) ساخته شده در دمای پایین دمای قفل‌شدگی است. رفتار نمونه‌ها با هر سه مدل برازش داده شد. شکل ۶ نشان‌دهنده برازش نوعی داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های ساخته شده با مدل توان دینامیکی است. دیده می‌شود که

افزایش فرکانس به سمت دماهای بیشتر جابه‌جا می‌شود. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، دمای متناظر با این قله نشان‌دهنده دمای قفل‌شدگی مغناطش (ابراسپین‌ها) می‌باشد [۱۲]. چنین رفتاری در اغلب نانوذرات تک‌حوزه فرومغناطیسی مشاهده می‌شود که در واقع مربوط به واهلش ابراسپین‌ها در حضور میدان خارجی متناوب است. با استفاده از این آزمایش تا حدی می‌توان به نوع واهلش و همچنین رفتار مغناطیسی نانوذرات در زیر دمای قله پی‌برد. به‌همین منظور و برای بررسی بیشتر منحنی‌های پذیرفتاری مغناطیسی، برازش‌هایی با هر سه مدل نیل-براون، و گل-فالچر و توان دینامیکی انجام شد که قبل از ارائه نتایج، این مدل‌ها به‌طور مختصر معرفی می‌شوند:

برای طبقه‌بندی نانوذرات مغناطیسی برحسب قدرت برهم‌کنش‌های مغناطیسی میان آنها، از پارامتر  $\Phi$  طبق رابطه ۳ استفاده می‌شود:

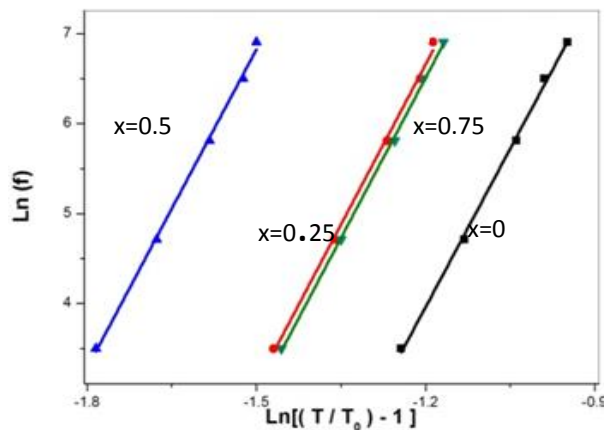
$$\Phi = \Delta T_B / T_B \Delta(\log f) \quad 3$$

که در آن  $\Delta T_B$  اختلاف دمای قفل‌شدگی در فرکانس‌های ۱۰۰۰ و ۳۳ هرتز می‌باشد.  $T_B$  نیز مقدار میانگین دماهای قفل‌شدگی در فرکانس‌های مختلف است. همچنین  $\Delta(\log f)$  اختلاف لگاریتم‌های فرکانس‌های بیشینه و کمینه می‌باشد [۱۳]. اگر  $\Phi \geq 0.13$  باشد، نانوذرات در حالت ابرپارامغناطیسی غیر برهم‌کنشی هستند و از مدل نیل-براون طبق رابطه ۴ تبعیت می‌کند [۱۴]:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_a / K_B T_B) \quad 4$$

شده در این مدل‌ها ( $10^{-9}$ – $10^{-13}$ ) دارد، درحالی‌که نتایج به‌دست‌آمده از برازش با مدل توان دینامیکی بحرانی توافق خوبی با نتایج به‌دست‌آمده برای سایر نانوذرات فریت‌ها مانند فریت نیکل-روی دارد [۱۸]. بنابراین نانوذرات ساخته شده برهم‌کنش قوی دارند و احتمال حضور فاز بی‌نظم ابرشیشه اسپینی در این نانوذرات وجود دارد. به‌نظر می‌رسد، دلیل این برهم‌کنش قوی ناشی از کلوخه‌شدن ذرات و قرارگرفتن آنها در نزدیک‌ترین فاصله باشد. این برهم‌کنش‌ها معمولاً از نوع دوقطبی-دوقطبی هستند، هرچند برهم‌کنش تبادلی هم می‌تواند وجود داشته باشد. در واقع بزرگ بودن گشتاور دوقطبی نانوذرات مغناطیسی که از تعداد زیادی گشتاور دوقطبی تشکیل شده‌اند، باعث می‌شود که برهم‌کنش دوقطبی-دوقطبی بین نانوذرات بسیار بزرگ باشد.

نمونه‌های ساخته‌شده هم‌خوانی خوبی با مدل توان دینامیکی دارند.



شکل ۶. برازش داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های ساخته شده با مدل توان دینامیک.

جدول ۲ مقادیر حاصل از برازش داده‌های تجربی پذیرفتاری مغناطیسی را با سه مدل مذکور نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده برای  $\tau_0$  در دو مدل نیل-براون و وگل-فالچر زیادی با مقادیر پیش‌بینی

جدول ۲. مقادیر حاصل از برازش داده‌های تجربی پذیرفتاری مغناطیسی با مدل‌های نیل براون، وگل-فالچر و توان دینامیکی.

نمونه	$x=0.75$	$x=0.5$	$x=0.25$	$x=0$
$\tau_0$ مدل نیل براون (S)	$2.71 \times 10^{-27}$	$1.53 \times 10^{-24}$	$1.51 \times 10^{-27}$	$2.54 \times 10^{-23}$
$E_a / K_B$ مدل نیل براون (K)	۸۳۹۱	۱۴۱۵۶	۱۲۶۱۴	۱۱۴۴۶
$\tau_0$ مدل وگل-فالچر (S)	$5.37 \times 10^{-20}$	$2.9 \times 10^{-27}$	$4.88 \times 10^{-22}$	$3.76 \times 10^{-19}$
$E_a / K_B$ مدل وگل-فالچر (K)	۴۱۰۹	۸۳۷۱	۷۵۹۰	۷۲۴۱
$\tau_0$ مدل توان دینامیکی (S)	$9.63 \times 10^{-10}$	$2.19 \times 10^{-11}$	$8.38 \times 10^{-10}$	$1.47 \times 10^{-8}$
$ZU$ مدل دینامیکی	۱۱.۸۸	۱۱.۸۱	۱۱.۸۷	۱۱.۷۳
مقدار پارامتر $\Phi$	۰.۰۴۱۱	۰.۰۳۱۰	۰.۰۳۹۸	۰.۰۴۹۶

## نتیجه گیری

نمونه‌های فریت منگنز آلیش یافته با کروم، با فرمول  $(x=0, 0.25, 0.5, 0.75) \text{ MnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  به روش تجزیه حرارتی نیترات‌ها در حضور اسید سیتریک، ساخته شد. نتایج XRD نشان می‌دهد که با افزایش آلیش کروم، حجم سلول واحد به دلیل کوچک بودن شعاع یونی کروم در مقایسه با آهن، کاهش می‌یابد. نتایج اندازه‌گیری مغناطش نمونه‌ها نشان می‌دهد که با آلیش کروم مغناطش نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند و همه نمونه‌ها در دمای اتاق رفتار ابرپارامغناطیس دارند. همچنین نتایج پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته شده رفتار ابر شیشه اسپینی در دمای پایین دارند.

## مرجع‌ها

- [6] F. Saffari, P. Kamel, M. Rahimi, H. Ahmadvand, H. Salamati, Effects of Co-substitution on the structural and magnetic properties of  $\text{NiCo}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ferrite nanoparticles, *Ceramics. Int*, 108 41(2015) 7352.
- [7] A.I. Borhan, V. Hulea, A.R. Iordana, M.N. Palamaru,  $\text{Cr}^{3+}$  and  $\text{Al}^{3+}$  co-substituted zinc ferrite: Structural analysis, magnetic and electrical properties, *Polyhedron*, 70 (2014) 110.
- [8] M.H.R. Khan, A. K. M. Akther Hossain, Investigation of structural and temperature dependent electromagnetic properties of  $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Cr}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ , *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 391 (2015) 34.
- [9] S. M. Patange, S. E. Shirsath, S. S. Jadhav, K. M. Jadhav, Cation distribution study of nanocrystalline  $\text{NiFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  ferrite by XRD, magnetization and Mössbauer spectroscopy, *Physics Status Solidi A* 209 (2012) 347-352.
- [10] A. Baykal, A. Z. Elmal, M. Sertkol, H. Sozeri, Structural and Magnetic Properties of  $\text{NiCr}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  Nanoparticles Synthesized via Microwave Method, *Journal of superconductivity and Novel Magnetism* 28 (2015) 3405.
- [11] J. Nogués, V. Skumryev, J. Sort, S. Stoyanov, D. Givord, Shell- driven magnetic stability in core- shell nanoparticles, *Physical Review Letters* 97 15 (2006) 157203.
- [12] M. Eshraghi, P. Kameli, Magnetic properties of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles prepared by thermal treatment of ball-milled precursors, *Current Applied Physics* 11 (2011) 476.
- [13] J.L. Dormann, D. Fiorani, E. Tronce, Magnetic Relaxation in Fine-Particle Systems, *Advances in Chemical Physics*, John Wiley & sons, Inc (1997) 283.
- [14] D.E. Madsen, M.F. Hansen, S. Murup, The correlation between superparamagnetic blocking temperature and peak temperature obtained from ac magnetization measurements, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20 (2008) 345209.
- [1] M. Ulrich, J. Garcia-Otero, J. Rivas, A. Bunde, Slow relaxation in ferromagnetic nanoparticles: Indication of spin- glass behavior, *Physical Review Letters* 67 2 (2003) 024416.
- [2] Y. Koseglu, F. Alan, M. Tan, R. Yilgin, M. Ozturk, Low temperature hydrothermal synthesis and characterization of Mn doped cobalt ferrite nanoparticles, *Ceramics. Int* 38 5 (2012) 3625.
- [3] A. Goldman, *Modern Ferrite Technology*, springer (2007).
- [4] L. C. Branquinho, M. S. Carrião, A. S. Costa, N. Zufelato, M. H. Sousa, R. Miotto, R. Ivkov, A. F. Bakuzis, Effect of magnetic dipole interactions on nanoparticle heating efficiency: Implications for cancer hyperthermia, *SCIENTIFIC REPORTS* 3 (2013) 2887.
- [5] Z.X. Tang, C.M. Sorensen, K.J. Klabunde, G.C. Hadjipanayis, Size-dependent Curie temperature in nanoscale  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  particles, *Physical Review Letters* 67 25(1991)3602.



- [15] A.A. Birajdar, Sagar. E. Shirsath, R.H. Kadam, S.M. Patange, K.S. Lohar, D.R. mane, A.R. Shitre, Role of  $Cr^{+3}$  ions on the microstructure development, and magnetic phase evolution of  $Ni_{0.7}Zn_{0.3}Fe_2O_4$  ferrite nanoparticles, *Journal of alloys and compounds*, 512 (2012) 316.
- [16] M. Tadic, V. Kusigerski, D. Markovic, I. Milosevic, V. Spasojevic, High concentration of hematite nanoparticles in a silica matrix, structural and magnetic properties, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321 1 (2009) 12.
- [17] B. Aslibeiki, P. Kameli, H. Salamati, M. Eshraghi, T. Tahmasebi, Superspin glass state in  $MnFe_2O_4$  nanoparticles *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (2010) 2929.
- [18] C.E. Botez, A.H. Adair, R.J. Tackett, Evidence of superspin-glass behavior in  $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$  nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 27 (2015) 076005.

# Investigation of chromium doping effect on the structural and magnetic properties of $\text{MnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ ferrite nanoparticles

Hamzeh Ghorbani, Mahin Eshraghi\*

Department of Physics, Payamenoor University, Iran

## Abstract

In this investigation, the manganese ferrite nanoparticles  $\text{MnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  ( $x=0, 0.25, 0.5, 0.75$ ) were prepared. Structural properties of samples were analyzed using X-ray diffraction and field emission scanning electron microscopy (FESEM). By evaluating XRD results, using Scherrer's equation, the size of the crystallites was obtained about 4 nm. FESEM images indicated agglomerated nanoparticles for samples. The magnetic properties have been characterized by using AC susceptometer and vibrating sample magnetometer (VSM). Given the results of VSM, the study found that the magnetization of nanoparticles decreased with increasing Cr doping. AC magnetic susceptibility of samples shows, the response of samples is dependent on the applied frequency. Results showed that the prepared samples at low temperatures indicate super spin-glass behavior with strong interaction between nanoparticles.

**Keywords:** Ferrite, Nanoparticles, Super paramagnetic, Super spin-glass.

---

\* Corresponding Author: Mahin\_eshraghi@yahoo.com