فصلنامه‌ی علمی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۱۰، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۴۰۰

سنتز و بررسی خواص مغناطیسی نانوذرات فریت کبالت–روی به روش هم‌رسوبی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

بهروز شاه‌بهرامی[۱]، سید محمود ربیعی[۱*]، رضا شیدپور[۱]، حامد سلیمی کناری[۲]

[۱] دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

[۲] دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران

* rabiee@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۰ مرداد ۱۴۰۰

پذیرش: ۱۷ شهریور ۱۴۰۰

صفحه ۹۱ تا صفحه ۱۰۴

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۲۷۸۳-۳۰۰۳

کلیدواژه:

فریت‌کبالت، فریت‌روی، هم‌رسوبی، خواص مغناطیسی.

چکیده:

*نانوذرات فریت کبالت–روی به روش هم‌رسوبی سنتز شدند. در فرآیند حاضر، نانو ذرات در pHهای مختلف رسوب داده شده، سپس در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت کلسینه شدند. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) تشکیل ترکیبات تک‌فازی از فریت–کبالت – روی را در همه نمونه‌ها تأیید نمود. محاسبات ویلیامسون–هال نشان داد که مقدار کرنش در نمونه تهیه شده در pH = ۸ معادل -۷×۱۰^{-۴} می‌باشد. این مقدار برای pH های ۱۱ و ۱۴ به ترتیب به ۱×۱۰^{-۴} و ۱×۱۰^{-۳} افزایش یافت. بر همین اساس بالاترین مقدار قطر کریستالیت در pH =۱۴ برابر ۵۱/۳۵ nm بدست آمد. تصاویر میکروسکپ الکترونی نشر میدانی (FESEM)، توزیع نسبتاً یکنواختی از ذرات با میانگین اندازه‌ای برابر ۳۸/۹، ۵۰/۱ و ۳۰/۷ نانومتر را به ترتیب برای نمونه‌های رسوب شده در pHهای ۸، ۱۱ و ۱۴ نشان داد. با بررسی خواص مغناطیسی به کمک آنالیز مگنتومتر نمونه ارتعاشی (VSM)، مشخص شد که پارامترهای مغناطش اشباع (Ms)، ثابت انیزوتروپی (K) و گشتاور مغناطیسی (nB) نمونه‌ها در pHهای مختلف، متفاوت است. این ویژگی‌ها برای نمونه تهیه شده در pH=۸ به ترتیب برابر ۹۵/۴۸ emu/g، ۱۴/۶۱۴× $۱۰^{۳}$erg/Oe و ۴/۰۶ به‌دست آمدند، در حالی که در pH =۱۱ به ۱۰۰/۳۴ emu/g، ۱۵/۳۵۸ × $۱۰^{۳}$ erg/Oe و ۴/۲۷ افزایش یافته و در pH=۱۴ به ۸۱/۹۸ emu/g، ۱۱/۷۱۲ × *$۱۰^{۳}$ erg/Oe و ۳/۴۹ تغییر یافتند. نتایج نشان داد که تغییر در پارامترهای ریزساختاری ناشی از تفاوت pH، تأثیر چشمگیری بر خواص مغناطیسی نانوذرات سنتز شده دارد.*

کد DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1

۱– مقدمه

فریت‌های اسپینلی با فرمول عمومی MFe_2O_4 یا $MO.Fe_2O_3$ (M: Fe, Co, Ni, Zn و یا ترکیبی از این عناصر است) از یک سلول شبکه با ۳۲ اتم اکسیژن در موقعیت‌های مکعبی به هم فشرده، با ۸ فضای تتراهدرال (A) و ۱۶ موقعیت اکتاهدرال (B) اشغال شده تشکیل شده‌اند. این فریت‌ها به دو گروه نرمال و معکوس تقسیم می‌شوند. در اسپینل نرمال، تمام ۸ عنصر ۲ ظرفیتی در موقعیت‌های تتراهدرال و همه ۱۶ عنصر ۳ ظرفیتی در فضاهای

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

اکتاهدرال قرار می‌گیرند. در صورتی که در اسپینل معکوس نیمی از عناصر ۳ ظرفیتی در فضاهای تتراهدرال و نصف دیگر در موقعیت کتاهدرال می‌نشینند و عناصر ۲ ظرفیتی نیز در فضای اکتاهدرال قرار می‌گیرند [۳-۱]. اشغال و جانشینی کاتیونی می‌تواند به‌طور موثری بر جهش الکترونی و اصلاح خواص مغناطیسی و در نتیجه کاربرد فریت‌ها اثر بگذارد [۷-۴]. با توجه به این ویژگی و دستیابی به خواص متنوعی چون نفوذپذیری مغناطیسی، نیروی وادارندگی، ثابت ناهمسانگردی، مغناطش اشباع (M_s)، سختی مکانیکی و پایداری فیزیکی و شیمیایی حوزه استفاده از این مواد متنوع است. بر این اساس تحقیقات بسیار زیادی در مورد سنتز و تأثیر تزریق عناصر مختلف ۲ و یا ۳ ظرفیتی به درون ساختار فریت کبالت و خواص مغناطیسی فریت‌ها صورت پذیرفته است [۱۳-۵]. در این میان، فریت کبالت به دلیل خواصی چون نفوذپذیری مغناطیسی بالا[۱]، نیروی وادارندگی بالا[۲]، بزرگ‌تر از ۵۰ KOe؛ مغناطش اشباع (M_s) خوب[۳]، ۸۰ emu/g؛ سختی مکانیکی و پایداری فیزیکی و شیمیایی عالی مورد توجه بوده و کاندید مناسبی برای ذخیره‌سازهای مغناطیسی دانسیته بالا[۴]، فناوری سیال مغناطیسی[۵]، رهایش دارو[۶]، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI)[۷]، هایپرترمیای مغناطیسی (MH)[۸] جهت بافت‌های سرطانی و مواد جاذب رادار[۹] (RAM) است [۱۳].

فریت کبالت ($CoFe_2O_4$) ساختار اسپینل معکوس دارد. لذا، یون‌های کبالت ۲ ظرفیتی در موقعیت B و نیمی از یون‌های آهن ۳ ظرفیتی در فضای A و نصف دیگر آن در فضای B قرار دارند [۴، ۱۴و ۱۵]. از طرفی عنصر روی ماده‌ای است کم‌هزینه و تزریق آن به درون فریت کبالت برای رسیدن به خواص مغناطیسی مطلوب به ویژه برای کاربردهای هایپرترمیایی مورد توجه بسیاری از دانشمندان است. فریت روی یک اسپینل نرم است که یون‌های روی ۲ ظرفیتی در موقعیت تتراهدرال قرار دارند و همه یون‌های آهن ۳ ظرفیتی در فضای اکتاهدرال می‌نشینند [۲]. در نتیجه فریت کبالت جانشین شده با روی ساختار اسپینلی تغییر یافته‌ای مانند $(Zn^{2+}_xFe^{3+}_{1-x})A[Co^{2+}_{1-x}Fe^{3+}_{1+x}]BO_4$ خواهد داشت [۱۶].

بدیهی است که خواص فریت‌های سنتزی به اندازه، شکل، توزیع ذرات و ترکیب شیمیایی بستگی دارد [۱۷]. شماری از روش‌های تهیه نانو ذرات مغناطیسی (سنتز فاز گازی، سنتز فاز جامد و سنتز فاز مایع) مطرح هستند. اگرچه، نانوذرات یکنواختی با بهره‌گیری از برخی از این روش‌ها سنتز شده‌اند، کنترل دقیق اندازه، شکل و سطح آن‌ها عموماً مورد چالش است [۸، ۱۸، ۱۹]. در میان روش‌های سنتز، هم‌رسوبی روشی آسان و مرسوم برای سنتز نانوذرات مغناطیسی (فریت‌ها و اکسیدهای فلزی) از محلول‌های نمک‌آبی است. فریت‌ها معمولاً در یک محیط آبی با واکنش شیمیایی طبق معادلات ۱ تا ۴ سنتز می‌شوند [۱۷، ۱۹].

$$Fe^{3+} + 3OH^- = Fe(OH)_3 \quad (۱)$$

[۱] high permeability
[۲] High coercive force
[۳] good saturation magnetization
[۴] high-density magnetic recording
[۵] ferrofluid technology
[۶] drug delivery
[۷] magnetic resonance imaging
[۸] Magnetic hyperthermia
[۹] Radar absorption materials

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

$$Fe(OH)_3 = FeOOH + H_2O \quad (۲)$$

$$M^{2+} + 2OH^- = M(OH)_2 \quad (۳)$$

در نتیجه:

$$2FeOOH + M(OH)_2 = MFe_2O_4 + 2H_2O \quad (۴)$$

که M می‌تواند $Fe^{2+}, Mn^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Mg^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}$ باشد.

در سنتز پودر به روش هم‌رسوبی، ابتدا لازم است که عناصر مختلف موجود در سیستم واکنشی به صورت یون‌های هیدروکسید در کنار یکدیگر رسوب نمایند. پس از کلسیناسیون این رسوبات هیدروکسیدی با یکدیگر واکنش داده و تشکیل فاز محصول مورد نظر را می‌دهند [۱۷]. در حالت کلی، رسوب‌گذاری کامل در pH بین ۸ و ۱۴ مورد انتظار است [۷ و ۱۹]. اندازه، شکل و ترکیب نانوذرات مغناطیسی به میزان زیادی به به پارامترهای موثر بر فرآیند سنتز مانند نوع نمک مورد استفاده (به عنوان مثال کلریدها، سولفات‌ها، نیترات‌ها)، نسبت M^{2+}/Fe^{3+}، دمای واکنش، مقدار pH، سرعت مخلوط کردن، ترتیب افزایش و حتی نوع اتمسفر محیط بستگی دارد [۱۹]. لذا برای رسیدن به خواص بهینه، بررسی پارامترهای مؤثر بر تشکیل ذرات سنتزی و مکانیزم تأثیرگذاری آنها از اهمیت خاصی برخوردار است.

در سنتز پودر به روش هم‌رسوبی، اغلب فرآیندها در pHهای معادل ۱۱ و ۱۲ انجام شده‌اند و نحوه اثرگذاری این پارامتر در تغییرات ساختاری از نقطه نظر تشکیل فاز، قطر کریستالیت‌ها، ثابت شبکه، میزان کرنش موجود درون صفحات کریستالی، دانه بندی، مورفولوژی و در نتیجه خواص فیزیکی و شیمیایی پودرهای سنتزی و خواص مغناطیسی نانوذرات بررسی نشده است، علیرغم اینکه یکی از عوامل بسیار مهم می‌باشد. بنابراین، در تحقیق حاضر به اثر مقدار pH مورد استفاده در رسوب‌گذاری بر خواص ریزساختاری و مغناطیسی نانوذرات سنتزی پرداخته می‌شود.

۲- فعالیت‌های تجربی

به منظور سنتز فریت کبالت روی به روش هم‌رسوبی، نیترات آهن (III) ۹ آبه ($Fe(NO_3)_3.\ 9H_2O$) (مرک)، نیترات کبالت (II) ۶ آبه ($Co(NO_3)_2.\ 6H_2O$) (مرک)، نیترات روی ۴ آبه ($Zn(NO_3)_2.\ 4H_2O$) (مرک)، و هیدروکسید سدیم (NaOH) (مرک) به عنوان مواد استفاده شدند.

جهت تعیین اثر pH بر روند سنتز فریت کبالت – روی، در شرایط نسبت مولی ثابت عنصر روی به میزان ۰/۴ مول ($Co_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$)، ابتدا محلول‌های ۰/۵ مولار از هر کدام از مواد اولیه بر روی همزن مغناطیسی با دور ۴۰۰ rpm و دمای ۵۰°C به مدت ۱۰ دقیقه تهیه گردید. محلول‌های ساخته شده با یکدیگر مخلوط شدند. pH مخلوط حاصل به کمک محلول NaOH در مقادیر ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲و ۱۴ تنظیم شد. پس از رساندن محلول به pH مورد نظر، محلول حاصل تحت دمای ۸۰°C به مدت ۵ ساعت با سرعت ۷۰۰ rpm هم‌زده شد. رسوبات حاصل چندین مرتبه با آب مقطر شسته شدند. رسوبات تهیه شده به مدت ۲۴ ساعت در آون ۱۱۰°C خشک شدند. شایان ذکر است که با افزایش اولین قطرات سود به محلول، رسوبات برگه‌ای شکل در محلول تشکیل گردید و با افزایش مقدار سود حجم رسوبات بیش‌تر و رنگ محلول نیز از قهوه‌ای- آلبالویی به سمت قهوه‌ای تغییر یافت، به گونه‌ای که رسوبات نهایی به رنگ قهوه‌ای تیره درآمد. به منظور تعیین دمای کلسیناسیون از یک نمونه آنالیز

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

گرما وزن‌سنجی[1] (TA Instruments, D-32609 Hullhorst, STA 504, Bahr Co. Germany) گرفته شد. پودرهای خشک شده در دمای ثابت ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت کلسینه شدند. ترکیبات فازی، کرنش و پارمترهای شبکه‌ای نمونه‌ها با آنالیز XRD (D8 ADVANCE, BRUKER, Germany) انجام شد. آنالیز FESEM (Mira 3-XMU) برای بررسی تغییرات ریزساختاری، اندازه و شکل نانوذرات صورت پذیرفت. همچنین آنالیز VSM (ساخت شرکت دانش پژوه ایران) برای ارزیابی خواص مغناطیسی نمونه‌ها به‌کار گرفته شد. برای سهولت در نگارش از این به بعد نمونه‌ها با نام‌های S(۸-۱۴) معرفی می‌شوند. اعداد ۸ الی ۱۴ بعد از حرف S بیانگر عدد pH محلول آماده شده می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز گرما وزن‌سنجی

برای تعیین دمای کلسیناسیون، از نمونه S11 آنالیز گرما وزن‌سنجی انجام شد (شکل ۱). با بررسی نمودار مشاهده می گردد که در دمای ۷۵۰°C یک پیک اندوترمیک ظاهر شده (شکل ۱-a) و مقدار ٪ ۱۸/۲۸ کاهش وزن نیز داشته است (شکل ۱-b). لذا دمای ۷۵۰°C به عنوان دمای کلسیناسیون برای نمونه‌های رسوبی انتخاب گردید. ظهور پیک‌های اندوترمیک در حوالی ۱۰۰°C و نیز محدوده ۴۶۰-۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به خروج آب موجود در سیستم و نیز ترکیبات نیتراتی و سود موجود نسبت داده می‌شود [۱۳]. سیستم واکنشی مواد اولیه می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

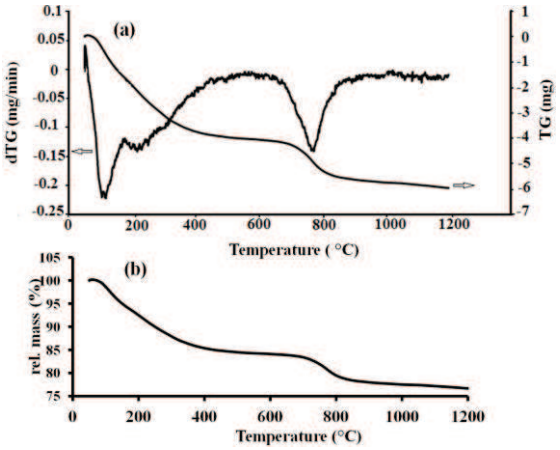
$$2Fe(NO_3)_3.9H_2O + 0.6Co(NO_3)_2.6H_2O + 0.4Zn(NO_3)_2.4H_2O + 8NaOH = Co_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4 + \quad (۵)$$

$$2Fe(NO_3)_3.9H_2O + 6NaOH = 2Fe(OH)_3 + 6NaNO_3 + 18H_2O \quad (۶)$$

$$0.6Co(NO_3)_2.6H_2O + 1.2NaOH = 0.6Co(OH)_2 + 1.2NaNO_3 + 3.6H_2O \quad (۷)$$

$$0.4Zn(NO_3)_2.4H_2O + 0.8NaOH = 0.4Zn(OH)_2 + 0.8NaNO_3 + 1.6H_2O \quad (۸)$$

همچنین کاهش وزن ٪۲۰/۹۴ برای نمونه‌های کلسینه شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت، انطباق خوبی با نتیجه حاصل از آنالیز گرما وزن‌سنجی (٪ ۱۸/۲۸) نشان داد.



شکل ۱- (a) تصویر آنالیز difTG/TG و (b) آنالیز کاهش وزن نسبی از نمونه S11

۳-۲- آنالیز XRD

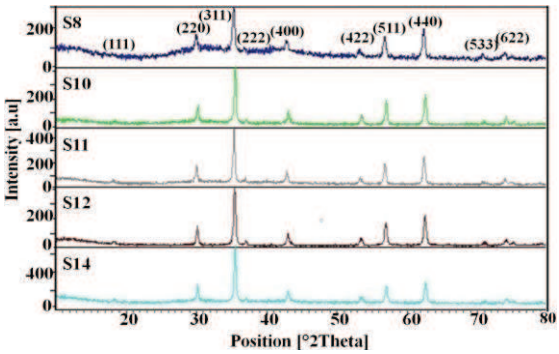
نتایج حاصل از آنالیز XRD نمونه‌های شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت در شکل ۲ آورده شده است. ظهور صفحات (۱۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱)، (۴۴۰)، (۵۳۳) و (۶۲۲) بر اساس کارت JCPDS 00-022-1086 تشکیل ساختار نانوکریستالی

[1] Thermogravimetric Analysis

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

مکعبی اسپینلی با گروه فضایی Fd3m را در همه نمونه‌های سنتزی تأیید می‌نماید.

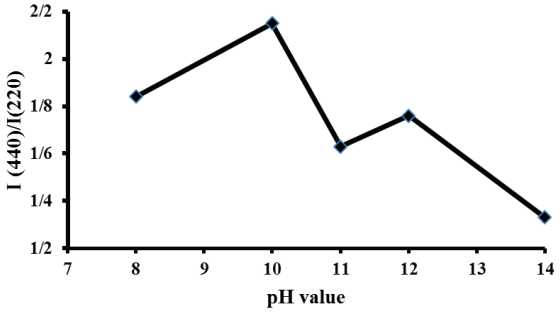
این نتیجه با نتیجه کار ژیائوگو و همکاران [۸] که گزارش نمودند در pH معادل ۸، مقداری ناخالصی Fe_2O_3 و در pHهای بالاتر از ۱۱، $Zn(OH)_2$ در محصول حضور دارند، متفاوت است. هرچند پس زمینه بالاتر در pHهای ۸ و ۱۴ نسبت به دیگر نمونه‌ها ممکن است به حضور فازهای شیشه‌ای یا کریستالینی نسبت داده شود که توسط آنالیز XRD مشاهده نگردیده است.



شکل ۲- تصویر XRD پودرهای سنتزی در شرایط pH مختلف در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت

این موضوع که شدت اشعه ایکس پراش یافته از صفحات به دانسیته اتمی آن‌ها ارتباط دارد کاملاً شناخته شده و بدیهی است. علاوه بر این در محلول‌های جامد و از جمله فریت‌های اسپینلی با عناصر جانشینی یا دوپ شونده، گزارش گردیده که شدت صفحات به توزیع کاتیونی عناصر در این موقعیت‌ها بستگی دارد [۳]. لذا نسبت شدت پیک (۴۴۰) به شدت پیک (۲۲۰)؛ I(440)/I(220)، مربوط به نمونه‌های تهیه شده در pHهای مختلف، محاسبه و نمودار آن در شکل۳ ارائه شده است.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که نسبت شدت پیک‌ها (I(440)/I(220)) با افزایش pH از ۸ به ۱۰ زیاد شده (۱/۸۴ در مقایسه با ۲/۱۵) و سپس در pH برابر ۱۱ به ۱/۶۳ کاهش می‌یابد. این مقدار با تغییر pH به ۱۲ دوباره کمی افزایش (۱/۷۶) و بعد در pH برابر ۱۴ به ۱/۳۳ می‌رسد.



شکل ۳- تغییر نسبت شدت پیک (۴۴۰) به شدت پیک (۲۲۰)؛ I(440)/I(220)، در هر طیف نسبت به مقدار pH

با توجه به اینکه ترکیب و شرایط کلسیناسیون (دما و زمان) در همه نمونه‌ها ثابت است، لذا چنین نتیجه می‌شود که تغییرات pH در روند آماده‌سازی نمونه‌ها باعث تغییر در جابجایی و توزیع کاتیونی در ساختار گردیده است. هر چند که یون‌های روی دارای شعاع بزرگی هستند (۰/۷۴ Å) و به شکل طبیعی ترجیح می‌دهند که در فضای بزرگ‌تر B قرار بگیرند ولی به دلیل پیوندهای قوی‌تر Zn-O در موقعیت A می‌نشینند [۵، ۲۰]. این نوع قرارگیری یون‌ها به معنی اعمال نیرو به یون‌های آهن ۳ ظرفیتی در فضای تتراهدر برای حرکت به سمت موقعیت اکتاهدر می‌باشد. با این فرض می‌توان ترکیب فریت کبالت روی درون ساختار را به صورت $(Zn_x^{2+}Fe_{1-x}^{3+})^A\ [Co_{1-x}^{2+}Fe_{1+x}^{3+}]^B$ در نظر گرفت [۳، ۱۴، ۲۱و ۲۲].

همچنین جهت تعیین قطر دقیق کریستالیت‌ها و نیز کرنش موجود درون ذرات کریستالی از رابطه ویلیامسون-

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

هـــال[1] (رابطه ۹) استفاده گردید:

$$B.\cos(\theta) = (0.9.\lambda/D) + 4\varepsilon\sin(\theta) \quad (۹)$$

در این رابطه D اندازه دانه در مقیاس آنگستروم (Å)، λ طول موج اشعه ایکس $Cu_{K\alpha}$ برابر با Å ۰/۵۴۰۵۶، B پهنای پیک در نیمه حداکثر شدت برحسب رادیان، ε کـرنش شـبکه و θ زاویـه براگ مـی‌باشـد. بـا هـدف محاسبه متوسط اندازه دانه با استفاده از رابطه ویلیامسون- هال و استفاده از مقدار زوایا و عرض پیـک‌هـا در نصـف شـدت میـزان شیب خط مقـدار کـرنش شـبکه‌ای و مقـدار عرض از مبدأ آن برابر با عبارت ۰,۹ λ/D اسـت که با توجه به ثابت بودن مقدار طول موج اشعه ایکـس، مقـدار متوسـط اندازه دانه محاسبه می‌گردد [۲۳]. نتایج حاصل از معادله ویلیامسون- هال برای نمونه‌های تهیه شده در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به محاسبات انجام شـده بـرای تعیـین قطـر کریسـتالیت‌ها در نمونه‌های سنتزی، نمودار تغییر قطر کریسـتالیت بـر حسـب pH نیز در شکل ۵ آورده شده است.

نکته جالب توجه از محاسبات و نتایج معادلات ویلیامسـون- هال در نحوه تغییرات شیب خط است که معرف نوع کرنش می‌باشد (شکل ۴). به گونه‌ای که در pH های ۸ و ۱۰ شیب نمودار منفی است و بیانگر نوع کـرنش کششـی در سیسـتم اسـت و کـرنش از $-7*10^{-4}$ بـه از $-3/5*10^{-4}$ کـم شـده است. قطر کریستالیت در این بازه با تغییر از ۱۹/۲۶ nm به ۳۰/۱۴ nm روند افزایشی نشان داده است. با افزایش pH به ۱۱ و بالاتر شیب خط تغییر مـی‌نمایـد و کـرنش موجـود در سیستم به فشـاری تغییـر یافتـه اسـت (شـکل ۴). لازم بـه توضیح است که در این حالت مقدار کـرنش فشـاری ایجـاد شده در سیستم با افزایش pH از ۱۱ به ۱۲ کاهش و سـپس با افزایش بیش‌تر pH به ۱۴ دوباره زیاد شده است. این روند تغییر کرنش در مقدار قطر کریسـتالیت‌ها نیـز مشـاهده مـی گردد. به این صورت که در pH برابر ۱۱ قطر کریستالیت از ۴۷/۸۱nm ابتـدا بـه nm ۲۷/۱۹ رسـیده و سـپس بـه nm ۵۱/۳۵ تغییر یافته است (شکل ۵). به عبارت سـاده بـا تغییـر نـوع کـرنش از کششـی بـه فشـاری مقـدار قطـر کریستالیت‌ها افزایش می‌یابد و هر چه مقدار این نوع کرنش بیش‌تر شود قطر کریستالیت نیز بزرگ‌تر می‌شود. نکته قابل تأمل دیگر این است که برای یک نمونه، مقـدار کـرنش در صفحات مختلف کریستالی فرق می‌کند. این پدیـده بـه اثـر pH بـر جابجـایی یون‌هـا در فضـاهای موجـود در شـبکه کریستالی نسبت داده می‌شود. برای محاسبه پارامتر شبکه از ترسـیم منحنی تغییرات پارامتر شبکه برحسب تابع برون‌یاب $\cos^2\theta/\sin\theta$ اسـتفاده شـد [۲۴] کـه نمـودار آن در شـکل ۶ آورده شده است. دانسیته تئوری (اشعه ایکـس) و سـطح ویـژه پودر نیز با توجه به تعیین پارامتر شبکه و قطر کریستالیت‌ها بـه ترتیب به کمک روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه شدند [۱۰، ۲۵]:

$$\rho_x = 8M/Na^3 \quad (۱۰)$$

ρ_x دانسـیته اشـعه x (برحسـب gr/cm^3)، M وزن مولکـولی نمونه، N عدد آووگـادرو، a ثابـت شـبکه و ۸ بیـانگر تعـداد سلول واحد است.

$$S = 6000 /D.\rho_x \quad (۱۱)$$

که D قطر کریستالیت (برحسب نانومتر) و ρ_x دانسیته اشـعه x (برحسب gr/cm^3) و S (بر حسب m^2/gr) است.

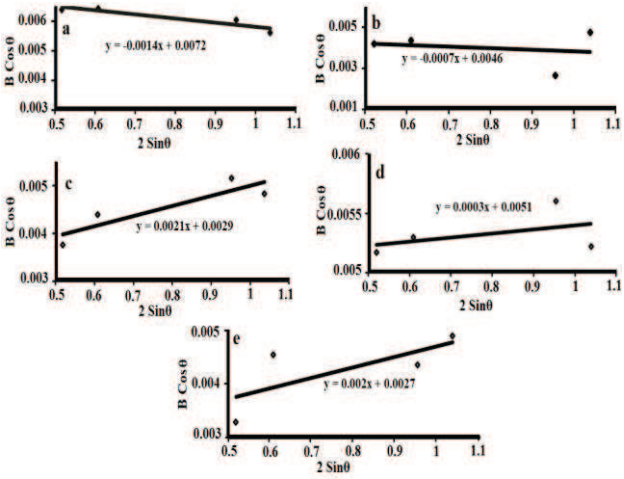
نتایج حاصل از تابع برون‌یاب برای پارامتر شبکه، و نیز دانسیته

[1] Williamson-Hall

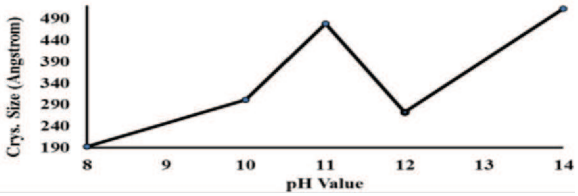
[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

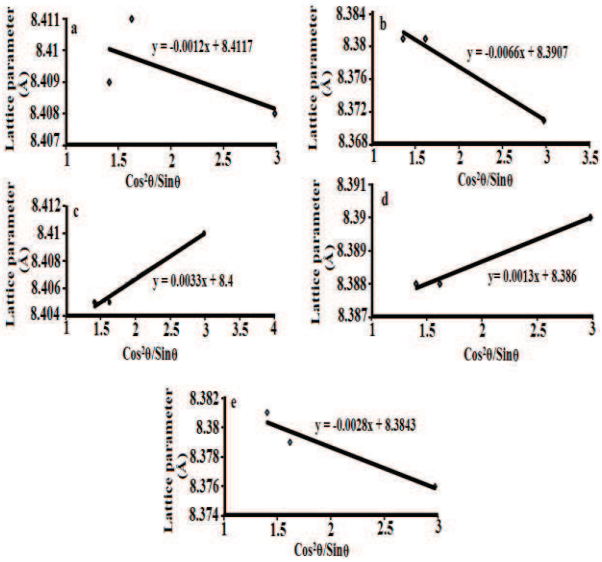
تئوری و سطح ویژه پودر در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۴- نمودار ویلیامسون- هال نمونه‌های سنتزشده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت ؛ (a) S8، (b) S10، (c) S11، (d) S12، (e) S14.



شکل ۵- نمودار قطر کریستالیت‌های نمونه‌های نمونه‌های سنتز شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت



شکل ۶- نمودار توابع برون‌یابی برای نمونه‌های سنتز شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت ؛ (a) S8، (b) S10، (c) S11، (d) S12، (e) S14.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

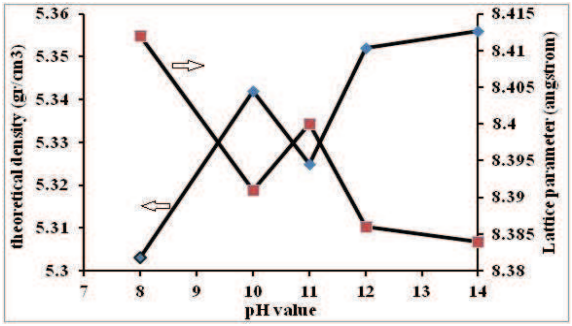
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

جدول ۱- ثابت شبکه، سطح ویژه و دانسیته نمونه‌های سنتز شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت

نمونه	S8	S10	S11	S12	S14
a (Å)	۸/۴۱۲	۸/۳۹۱	۸/۴۰۰	۸/۳۸۶	۸/۳۸۴
ρ_x (gr/cm^3)	۵/۳۰۳	۵/۳۴۲	۵/۳۲۵	۵/۳۵۲	۵/۳۵۶
S (m^2/gr)	۵۸/۷۶	۳۷/۲۶	۲۳/۵۷	۴۱/۲۴	۲۱/۸۲

نحوه تأثیرگذاری مقدار pH بر پارامتر شبکه نمونه‌های سنتزی در شکل ۷ به خوبی نمایان است.

با اینکه در همه نمونه‌ها نوع ترکیب و سایر شرایط سنتز به غیر از مقدار pH ثابت بوده است، لیکن پارامتر شبکه با تغییر pH تغییر یافته است. این مسأله به تغییرات توزیع عناصر درون ساختار به واسطه مقدار pH نسبت داده می‌شود، همانگونه که میزان کرنش موجود در درون ساختار نیز تغییر می‌نمود (شکل ۴). دانسیته تئوری (اشعه یکس) نمونه‌ها نیز طبق رابطه ۱۰ به طور معکوس با پارامتر شبکه تغییر یافته است به این معنی که با زیاد شدن پارامتر شبکه دانسیته کاهش و بالعکس با کاهش پارامتر شبکه افزایش یافته است.



شکل ۷- نمودار دانسیته اشعه x و ثابت شبکه نمونه‌های سنتز شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت

به منظور مقایسه و بررسی ریزساختار پودرهای سنتزی از نمونه‌های تهیه شده تحت pH برابر ۸، ۱۱و ۱۴ آنالیز FESEM انجام شد (شکل ۸).

همانطور که مشاهده می‌شود در همه نمونه‌ها توزیع نسبتاً یکنواختی از نانوذرات با اندازه‌ای کم‌تر از ۷۰ نانومتر وجود دارد. این یکنواختی در نمونه‌های سنتزی تحت pH=۱۱ بیشتر مشهود است (شکل b-۸). در نمونه‌های تهیه شده با pH برابر ۸ و به ویژه ۱۱، شکل مکعبی ذرات تشکیل شده کاملاً مشهود بوده و میانگین اندازه ذرات به ترتیب برابر nm ۳۸/۹ و nm ۵۰/۱ است. با افزایش pH به ۱۴ (شکل c-۸) میانگین اندازه ذرات ریزتر شده (nm ۳۰/۷) و با اینکه توزیع اندازه ذرات یکنواخت است ولی شکل ذرات کمی از حالت مکعبی خارج شده و تا حدی کروی به نظر می‌رسد، ضمن اینکه ذرات هم محور شده و آگلومراسیون ذرات در این نمونه اتفاق افتاده است. آگلومراسیون نانوذرات به واسطه نسبت بالاتر سطح به حجم است که موجب ایجاد تنش‌های بین سطحی و چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌شود. علاوه بر این، نانوذرات مغناطیسی به دلیل بر همکنش دو قطبی‌های مغناطیسی تمایل به کلوخه‌ای شدن و به هم چسبیدن دارند [۲۷].

به نظر می‌رسد که با افزایش pH تا مقدار ۱۱و بالارفتن غلظت یون‌های OH^- در سیستم، یک شبکه فوق اشباع در

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

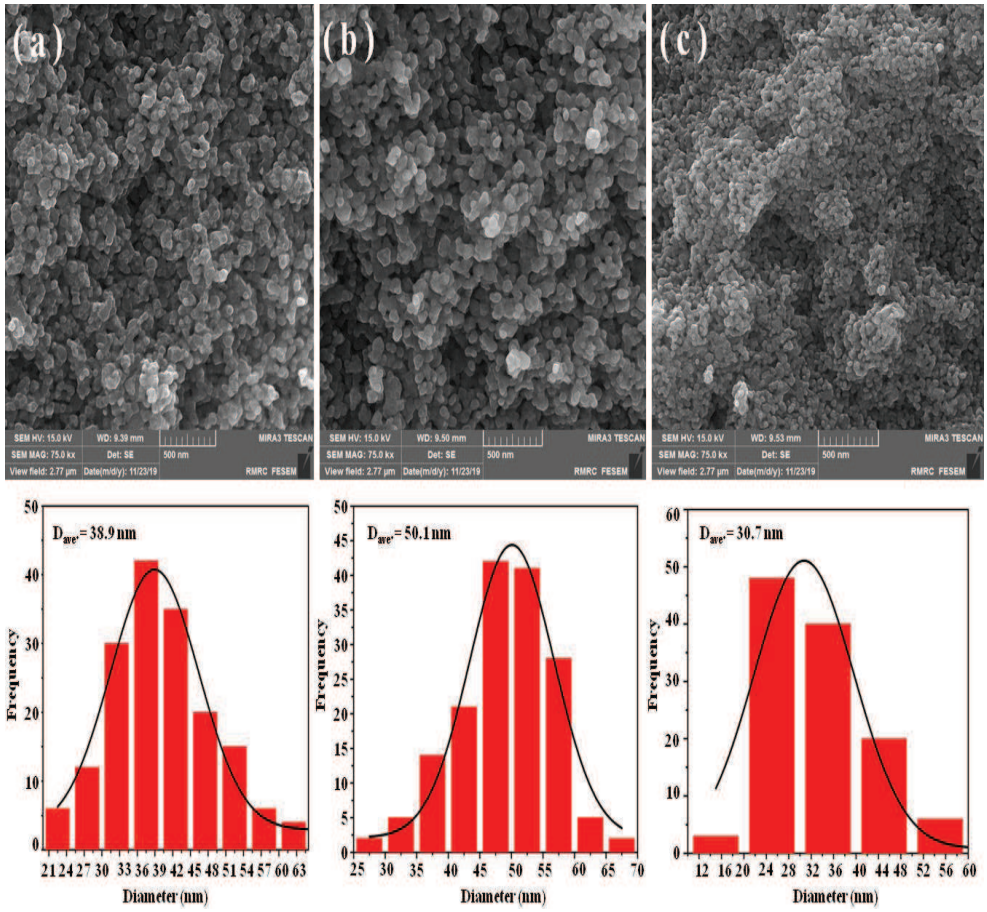
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

محیط ایجاد گردیده و سرعت جوانه‌زنی را پایین آورده است. در نتیجه سرعت رشد ذرات نسبت به جوانه‌زنی در این محدوده زیاد می‌گردد که منجر به بزرگ‌شدن دانه‌ها و ذرات می شود مطابق آنچه ژیائوگو هوآنگ و همکاران گزارش نمودند [۷].

با افزایش بیش‌تر pH به ویژه در pH =۱۴ ذرات کوچک‌تر شده‌اند (شکل ۸-c). این موضوع به معنی بالاتر بودن سرعت جوانه‌زنی نسبت به سرعت رشد و روند معکوس اثرگذاری غلظت هیدروکسید در سیستم می‌باشد، در نتیجه رشد کم‌تری اتفاق افتاده، سطح ذرات افزایش یافته و آگلومراسیون صورت پذیرفته است.

۳-۳- خواص مغناطیسی

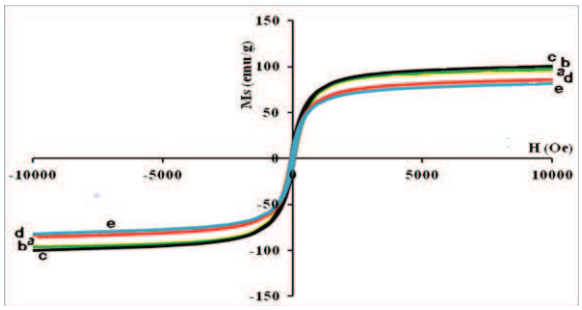
آنالیز خواص مغناطیسی نمونه‌های سنتزی (VSM) در شکل ۹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تغییر pH تأثیر قابل ملاحظه ای بر مقدار مغناطش اشباع داشته است. با افزایش pH از ۸ به ۱۱ مقدار Ms از ۹۵/۴۸ emu/g به ۱۰۰/۳۴ emu/g افزایش یافته و بعد از آن در pH های ۱۲ و ۱۴ به ترتیب به ۸۵/۶۸ emu/g و ۸۱/۹۸ emu/g کاهش یافته است. از آنجایی که ترکیب نمونه‌ها یکسان است، تغییرات در مغناطش اشباع به دو عامل قطر کریستالیت‌ها و اندازه ذرات و نیز به حضور متفاوت عناصر در موقعیت‌های تتراهدرال/اکتاهدرال بر می‌گردد.



شکل ۸- میکروگراف نمونه‌های سنتز شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت ؛ (a) S8، (b) S11 و (c) S14.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

دانه‌های بزرگ‌تر تمایل به داشتن سامانه‌های مغناطیسی بزرگ‌تر دارند. برای حرکت دیواره سامانه، مغناطش شدن یا حذف آن با دانه‌های بزرگ‌تر راحت‌تر است [۱۵، ۲۸]. به این طریق، نمونه‌های با دانه‌های بزرگ‌تر نیروی وادارندگی کم‌تر و مغناطش اشباع بالاتری دارند. همچنین، نسبت پسماند (R= Mr/MS) در نانوذرات سنتز شده حدود ۰/۱ است که به معنای تغییر آسان مسیر مغناطش بعد از حذف میدان خارجی است. از طرفی در آنالیز FESEM (شکل ۸) و نمودار ویلیامسون- هال (شکل ۴) ملاحظه شد که با تغییر pH به ۱۱، اندازه ذرات و نیز قطر کریستالیت‌ها افزایش یافت. از آنجایی که اسپین‌های موجود در سطح ذرات دارای آشفتگی زیادی هستند، لذا با افزایش اندازه ذرات آشفتگی‌ها کاهش یافته است [۲۹-۲۸]. در نتیجه مقدار مغناطش اشباع در نمونه S11 زیاد شده است (شکل c-۹). این افزایش در مغناطش اشباع به مهاجرت یون‌های ۳ ظرفیتی آهن از فضای A به B و تغییر برهمکنش بوسیله یون‌های اکسیژنی محیطی[۱] معروف به برهمکنش‌های ابر تغییرات[۲] بین زیر شبکه های A و B نیز نسبت داده می‌شود [۳، ۲۷، ۳۰]. با بررسی تصویر میکروگراف نانوذرات سنتز شده در pH =۱۴ (شکل c-۸) ملاحظه شد که نانوذرات به دلیل ریز بودن آگلومره شده‌اند. بنابراین انتظار بر این است که مقدار مغناطش حاصل از این نمونه نیز به همان نسبت کاهش یابد که نمودار شکل e-۱۰ نیز این مورد را تأیید می‌نماید. مقدار نیروی پسماند زدا برای همه نمونه‌ها در محدوده ۱۴۰-۱۵۰ Oe به‌دست آمد. این مقادیر کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با مقدار ۷۲۶/۱۳ Oe برای نیروی پسماندزدای نانوذرات فریت کبالت- روی سنتز شده توسط حسین سجاد و همکاران [۱۶] نشان داد. این کاهش به مهاجرت یون‌های Co^{2+} به موقعیت تتراهدرال نسبت داده می‌شود [۳].



شکل ۹- تصویر نمودار VSM برای نمونه‌های سنتز شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۲ ساعت ؛ (a) S8، (b) S10، (c) S11، (d) S12، (e) S14.

علاوه بر این، بر اساس تئوری ولفارث[۳] نیروی پسماندزدا با ثابت انیزوتروپی و ممان مغناطیسی طبق روابط ۱۲ و ۱۳به دست می‌آیند [۱۶، ۳۱]:

$$H_c = 0.98*K/M_s \quad (۱۲)$$

$$n_B = (M_w.M_s)/5585 \quad (۱۳)$$

که K ثابت انیزوتروپی، M_s مغناطش اشباع و M_w وزن مولکولی است. بنابراین مقدار K و n_B در جدول ۲ آورده شده است.

اساساً مقدار میدان پسماندزدا در فریت کبالت ناشی از ناهمسانگردی یون‌های کبالت در محل های اکتاهدرال به سبب کوپل اسپین- اوربیتال می‌باشد. با ورود یون‌های روی به ساختار اسپینلی فریت کبالت و قرارگیری در فضای تتراهدرال، یون‌های آهن به موقعیت اکتاهدرال مهاجرت نموده در نتیجه

[۱] intermediating oxgen ions
[2] superexchange interactions
[3] Wuhlfarth theory

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

یون‌های کبالت به سایت‌های تتراهدرال مجاور می‌روند

جدول ۲- اطلاعات ممان مغناطیسی و ثابت انیزوتروپی نمونه‌های تهیه شده در pHهای مختلف

خواص مغناطیسی	S8	S10	S11	S12	S14
K (erg/oe)	۱۴۶۱۴/۳۳	۹۳۰۵/۶۳	۱۵۳۵۷/۷۰	۱۲۲۳۹/۳۴	۱۱۷۱۱/۹۸
n_B (μ_B/f.u)	۴/۰۶	۲/۷۷	۴/۲۷	۳/۶۴	۳/۴۹

و غلظت یون‌های کبالت به عنوان منبع ناهمسانگردی فریت‌ها در محل‌های اکتاهدرال کاهش می‌یابد، شبیه آنچه که دمیرچی و همکاران با تزریق La^{3+} درون ساختار فریت کبالت گزارش نمودند [۳۰].

بنابراین ناهمسانگردی مغناطیسی بلورین فریت با این اتفاق کم می‌شود. لذا در جدول ۲ دیده می‌شود که ثابت انیزوتروپی به‌واسطه جانشینی یون روی از ۱۴۶۱۴/۳۳ erg/Oe (نمونه S8) به ۱۱۷۱۱/۹۸ erg/Oe (نمونه S14) کاهش یافته است. این رفتار کاهشی همانگونه که اشاره شد به اسپین ضعیف در فضای B نسبت داده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نانوذرات تک فاز فریت کبالت دوپ شده با عنصر روی به روش هم‌رسوبی در pHهای مختلف سنتز شدند. مقدار pH اثر قابل ملاحظه‌ای بر خواص ریزساختاری و مغناطیسی فریت‌های سنتز شده داشت. تصاویر FESEM توزیع نسبتاً یکنواختی از ذرات کروی شکل با اندازه‌های کم‌تر از ۷۰ nm را نشان داد. اندازه کریستالیت‌های نانوذرات در pHهای مختلف متفاوت بود. تغییر در خواص ساختاری به غلظت یون‌های OH^- در سیستم واکنشی و اثر آن بر سرعت جوانه زنی و رشد ارتباط داده می‌شود. تغییرات مغناطش اشباع، ممان مغناطیسی و ثابت انیزوتروپی نمونه‌ها نسبت به pH، رفتار مشابهی تقریباً مشابه اندازه کریستالیت‌ها در مقادیر مختلف pH نشان دادند. مقدار نیروی پسماندزدا برای همه نمونه‌ها در محدوده ۱۴۰-۱۵۰ Oe به‌دست آمد. مشخص شد که خواص مغناطیسی نانوذرات سنتز شده تحت تأثیر مقدار pH مورد استفاده برای تهیه ذرات رسوبی است. این پدیده به دلیل تأثیری است که مقدار pH سیستم بر ریزساختار نانو ذرات تهیه شده می‌گذارد.

مراجع

[1] W.D. Callister, J. David, G. Rethwisch, Materials Science and Engineerin -An introduction, Eight Edition, John Wiley & Sons (2013).

[2] D.R. Askeland, P.P. Fulay, W.J. Wright, The Science and Engineering of Materials, Sixth Edition, Cengage Learning, Inc (2010).

[3] H. Ghayour, M. Abdellahi, N. Ozada, S. Jabbrzare, A. Khandan, Hyperthermia application of zinc doped nickel ferrite nanoparticles, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 111 (2017) 464-472.

[4] A.B. Salunkhe, V.M. Khot, J.M. Ruso, S.I. Patil, Water dispersible superparamagnetic Cobalt iron oxide nanoparticles for magnetic fluid hyperthermia. J. Magnetism and Magnetic Materials 419 (2016) 533-542.

[5] A. Manohar, C. Krishnamoorthi, Synthesis

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

DOI:10.1021/acs.jpcc.7b11014

[12] S. Sunil, S.B. Shelke, A.A. Birajdar, W. Santosh, K.S. Lohar, D.R. Mane, R.H. Kadam, Hopping mechanism and cation distribution studies in Y^{3+} doped cobalt ferrite nanoparticles, International Research journal of Science and Engineering A5 (2018) 57-60.

[13] N. Sanpo, C.C. Berndt, C. Wen, J. Wang, Transition metal-substituted cobalt ferrite nanoparticles for biomedical applications, Acta Biomaterialia 9 (2013) 5830–5837.

[14] S.E. Shirsath, M.L. Mane, Y. Yasukawa, X. Liu, A. Morisako, Self-ignited high temperature synthesis and enhanced super-exchange interactions of Ho^{3+}– Mn^{2+}– Fe^{3+}– O^{2-} ferromagnetic nanoparticles, Physical Chemistry Chemical Physics 16 (2014) 2347–2357.

[15] P. Motavallian , B. Abasht , O. Mirzaee , H. Abdollah-Pour, Correlation between structural and magnetic properties of sub-stituted (Cd, Zr) Cobalt ferrite nanoparticles, Chinese Journal of Physics (2019). DOI: https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.12.018

[16] M.S. Hossain, M.B. Alamy, M. Shahjahan, M. Hosney, M. Hossain, S. Islam,N. Khatun, M. Hossainz, M.S. Alamy, M. Al-Mamun, Synthesis, structural investigation, dielectric and magnetic properties of Zn^{2+} -doped cobalt ferrite by the sol–gel technique, Journal of Advanced Dielectrics 8 [4] (2018) 1850030.

[17] W.M Daoush, Co-Precipitation and Magnetic Properties of Magnetite Nanoparticles for Potential Biomedical Applications, Journal of Nanomedicine Research 5 [3] (2017) 00118.

[18] 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.

[19] T. Sodaee, A. Ghasemi, R. Shoja-Razavi, Microstructural Characteristics and Magnetic Properties of Gadolinium-and magnetic hyperthermia studies on high susceptible $Fe_{1-x}Mg_xFe_2O_4$ super-paramagnetic nanospheres, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 443 (2017). DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.07.065

[6] P.H. Linh, N.T.N. Anh, P.H. Nam, T.N. Bach, V.D. Lam, D.H. Manh, A Facile Ultrasound Assisted Synthesis of Dextran-Stabilized $Co_{0.2}Fe_{0.8}Fe_2O_4$ Nanoparticles for Hyperthermia Application, IEEE Transactions on Magnetics, 54 [6] (2018). DOI: 10.1109/TMAG.2018.2815080

[7] X. Huang, J. Zhang, W. Wang, T. Sang, B. Song, H. Zhu, W. Rao, C. Wong, Effect of pH value on electromagnetic loss properties of Co –Zn ferrite prepared via coprecipitation method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 405 (2016) 36– 41.

[8] S.G.C. Fonseca, L.S. Neiva, M.A.R. Bonifácio, P.R.C.D. Santos, U.C. Silva, J.B.L.D. Oliveira, Tunable magnetic and electrical properties of cobalt and zinc ferrites $Co_{1-X}Zn_XFe_2O_4$ synthesized by combustion route, Materials Research 21 (2018) e2017086.

[9] C. Vinuthna, K.C. Naidu, C. Sekhar, R. Dachepalli, Magnetic and antimicrobial properties of cobalt-zinc ferrite nanoparticles synthesized by citrate-gel method, International Journal of Applied Ceramic Technology 16 (2019) 1944-1953.

[10] Q. Lin, J. Xu, F. Yang, J. Lin, H. Yang and Y. He, Magnetic and Mössbauer spectroscopy studies of zinc-substituted cobalt ferrites prepared by the Sol-Gel method, Materials 11 (2018) 1799.

[11] V. Pilati, R. C. Gomes, G. Gomide, P. Coppola, F.G. Silva, F.L.O. Paula, R. Perzynski, G.F. Goya, R. Aquino, J. Depeyrot, Core/Shell Nanoparticles of Non-Stoichiometric Zn-Mn and Zn-Co Ferrites as Thermosensitive Heat Sources for Magnetic Fluid Hyperthermia, Journal of Physical Chemistry C (2018)

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

Substituted Cobalt Ferrite Nanocrystals Synthesized by Hydrothermal Processing, Journal of Cluster Science (2015). DOI: DOI 10.1007/s10876-015-0925-3

[20] A.Najafi-Birgani, M. Niyaifar, A.Hasanpour, Study of cation distribution of spinel zinc nano-ferrite by X-ray, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 374 (2015)179–181.

[21] S. Raghuvanshi, F. Mazaleyrat, S.N. Kane, Time evolution of structural and magnetic properties of Ni-Zn nano ferrite: an opinion, JOJ Material Science 1 (2017) 1–2.

[22] J. Mao, X. Hou, F. Huang, K. Shen, K.H. Lam, Q. Ru, S. Hu, Zn substitution $NiFe_2O_4$ nanoparticles with enhanced conductivity as high-performances electrodes for lithium ion batteries, Journal of Alloys and Compounds 676 (2016) 265–274.

[23] L. Kumar, P. Kumar, A. Narayan, M. Kar, Rietveld analysis of XRD patterns of different sizes of nanocrystalline cobalt ferrite, International Nano Letters 3 [8] (2013). DOI: http://www.inl-journal.com/content/3/1/8

[24] B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1978.

[25] H. Kumar, R.C. Srivastava, P. Negi, H.M. Agrawal, K.Asokan, dielectric behaviourof cobalt ferrite nanopaerticles, International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEEE) 2, [1] (2013) 59-66.

[26] Y. Zhang, D. Wen, Influence of RE/Mn (RE= La, Nd and Gd) ratios on the Infrared Absorption and Emission Properties of Co-Zn Ferrites‖, Journal of Advanced Material Researchs, 217 (2011) 311-316.

[27] Z. Shaterabadi, G. Nabiyouni, M. Soleymani, Physics responsible for heating efficiency and self-controlled temperature rise of magnetic nanoparticles in magnetic hyperthermia therapy, Progress in Biophysics and Molecular Biology, 133 (2018). DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2017.10.001.

[28] L. Kafrouni, O. Savadogo, Recent progress on magnetic nanoparticles for magnetic Hyperthermia, Prog Biomater, 5 (2016)147–160 .

[29] J.T. Jang, S. Bae, Mg shallow doping effects on the ac magnetic self-heating characteristics of γ-Fe_2O_3 superparamagnetic nanoparticles for highly efficient hyperthermia, Applied Physics Letters 111 [18] (2017). DOI: 10.1063/1.5000841

[30] C.E.Demirci, P.K. Manna, Y. Wroczynskyj, S. Aktürk, J. Van-Lierop, Lanthanum ion substituted cobalt ferrite nanoparticles and their hyperthermia efficiency, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 458(2018) DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.03.024.

[31] T. Zeeshan, S. Anjum, H. Iqbal, R. Zia, Substitutional effect of copper on the cation distribution in cobalt chromium ferrites and their structural and magnetic property, Materials Science-Poland 36 (2018) 255-263.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]

Iranian Journal of
Ceramic Science & Engineering
Vol. 10, No. 3, 2021

Synthesis and Magnetic Properties of Znco-Ferrite Nanoparticles Prepared Using Co-Precipitation Method

B. Shahbahrami[1], S. M. Rabiee[1]*, R. Shidpoor[1], H.Salimi-Kenari[2]

[1] Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
[2] Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

* rabiee@nit.ac.ir

Abstract: Zinc-cobalt ferrite nanoparticles (NPs) were synthesized using co-precipitation method. In the present process, NPs precipitated at various pHs, then calcined at 750°C for 2 h. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed single phase of ZnCo ferrite phase in all of the samples. Williamson-Hall calculations showed that the strain value in the microstructure of specimen prepared at pH= 8 is equal to $-7*10^{-4}$. This content for pHs of 11 and 14 increased to 10^{-4} and 10^{-3}, respectively. Therefore, the highest crystallite diameter was obtained as 51.35 nm for prepared NPs at pH= 14. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) showed a relatively uniform distribution of particles with average size of 9.38, 50.1 and 30.7 nm for prepared powders at pHs equal to 8, 11 and 14, respectively. Vibrating sample magnetometer (VSM) measurements revealed that saturation magnetization (M_S), anisotropic constant (K) and Bohr magneton (n_B) characteristics are different at various pHs. So that, these parameters were obtained as 95.48 emu/g, $14.614*10^3$ and 4.06, respectively for prepared powders at pH= 8, while at pH= 11 increased to 100.34 emu/g, $15.358*10^3$ and 4.27, then changed to 81.98 emu/g, $11.712*10^3$ and 3.49 at pH= 14. It was found different conditions of particles precipitation have a remarkable role on the properties of produced NPs.
Keywords: Cobalt ferrite, Zinc ferrite, Co-precipitation, Magnetic properties.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-12]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.8.1]