



## ویژگی‌های ریزساختاری، نوری و مغناطیسی نانوذرات $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$

احمد قلی زاده\*، مرتضی بیرانوند، احمد زاهدی

دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۹، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۹/۳۰)

**چکیده:** اثر جانمایی یون  $Ba$  بر ویژگی‌های ساختاری، نوری و مغناطیسی فریت‌های  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  بررسی شد. نمونه‌ها با پراش سنج پرتو ایکس، طیف‌سنج تبدیل فوریه فروسرخ، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنج نوری مرئی-فرابنفش و مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی مشخصه‌یابی شدند. نتایج ساختاری نشان داد که ساختار نمونه‌ها تا جانمایی  $x = 0/20$  کاملاً در یک ساختار مکعبی تک فاز (گروه فضایی  $Fd3m$ ) بلوری شده‌اند، در حالی که فاز ناخالصی  $BaO$  در نمونه‌های با  $x = 0/25, 0/30$  دیده شد. افت مشاهده شده در مغناطش نمونه‌ها ناشی از حضور یون‌های غیرمغناطیسی  $Ba^{2+}$  در جایگاه هشت‌وجهی است. گاف انرژی نمونه‌ها با افزایش جانمایی باریم تا  $x = 0/10$  یک روند افزایشی را نشان می‌دهد و در ادامه با جانمایی، کاهش می‌یابد. مقادیر گاف نواری بدست آمده با مقادیر پیشتر گزارش شده برای فریت‌ها هم‌خوانی دارد. همچنین افزایش گاف انرژی نمونه‌ها با افزایش باریم را می‌توان بر پایه تغییرات ساختار الکترونی توضیح داد.

**واژه‌های کلیدی:** فریت اسپینل  $Mn-Cu-Zn$ ؛ روش سیترا-نیترا؛ پراش پرتو ایکس؛ ویژگی‌های مغناطیسی؛ ویژگی‌های نوری.

### مقدمه

می‌شود که کاربردهای بسیاری در قطعه‌های خودروها و ابزارهای بی‌سیم مانند دریل‌ها و پیچ‌گوشتهای برقی و شارژی دارند. آهنرباهای بلندگوها و میکروفون‌ها و نیز در یخچال‌ها نیز از فریت‌ها هستند. از ویژگی‌های مهم فریت‌ها نارسا بودن آنهاست. این ویژگی برای استفاده از آنها در کاربردهایی چون مغزی مبدل و القاگرها بسیار مفید است، زیرا در حضور میدان مغناطیسی متغیر، تغییر میدان موجب القای جریان الکتریکی در مواد رسانا و فلزها شده که این به نوبه‌ی خود باعث ایجاد گرما و اتلاف انرژی می‌شود. این پدیده را ایجاد جریان گردابی می‌نامند؛ از این رو، در چنین مواردی نمی‌توان از آهنرباهای فلزی استفاده کرد. اما آهنرباهای فریت به دلیل عایق بودن، جریان گردابی را به شدت کاهش داده و از اتلاف انرژی به صورت گرما جلوگیری می‌کنند. تراوایی مغناطیسی فریت‌ها بالاست و از این رو برای ساخت تجهیزات چون آنتن‌ها به کار می‌روند. برخی از فریت‌ها انرژی ریز موج‌ها فقط در یک راستا

نانوذرات فریت به دلیل ویژگی‌های بی‌مانند در مقایسه با مزیت کپه‌ای توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۱-۷]. نانوذرات فریت با روش‌های مختلفی از جمله هم‌رسوبی، گرمایی، سیترا، سل-ژل، مایسل معکوس و آلیاژسازی مکانیکی و ... تهیه می‌شوند. ویژگی‌های این نانومواد به ترکیب و ساختار سطح و در نتیجه روش آماده‌سازی آنها بستگی دارد [۴]. در این پژوهش از روش سیترا برای ساخت نانوذرات فریت استفاده شد. ارزان قیمت بودن پیش ماده‌ها، تهیه ذرات ریز همگن و یکنواخت با واکنش‌پذیری بالا از مزایای این روش هستند. در این جا امولسیون کننده آلی اسیدسیتریک و نیتراهای فلزی در محلول آبی به عنوان پیش ماده به کار رفتند. دلیل استفاده از نیتراهای فلزی، حلالیت بالای آنها در حلال آب است [۷]. از فریت‌ها در ساخت موتورهای الکتریکی کوچک استفاده

یون‌های  $Mg^{2+}$  می‌تواند در جایگاه‌های  $A$  و  $B$  بنشیند، اما تمایل به اشغال جایگاه  $A$  داشته و یون‌های  $Fe^{3+}$  در هر دو جایگاه وجود دارند [۲۰]. با توجه به بزرگتر بودن شعاع یونی  $Ba^{2+}$  نسبت به بقیه کاتیون‌های دوظرفیتی موجود در جایگاه‌های چاروجهی و هشت‌وجهی، انتظار می‌رود که  $Ba^{2+}$  بیشتر در جایگاه هشت‌وجهی بنشیند. هم‌چنین بررسی نانوذرات  $Mn_{0.3-x}Cd_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  تهیه شده به روش سیترات نیترات نشان می‌دهد که یون‌های  $Mn^{2+}$  می‌توانند در جایگاه‌های  $A$  و  $B$  بنشینند و یون‌های  $Fe^{3+}$  در هر دو جایگاه وجود دارند [۲۱]. با وجود کمتر بودن نفوذپذیری مغناطیسی ( $Mg$ ,  $NiCuZn$ ) نسبت به  $NiCuZn$ ، اما به دلیل مشکلاتی که در ساخت تراشه‌های الکترونیکی بر پایه فریت  $NiCuZn$  وجود دارد، پیشنهاد شده است که از این فریت‌های با مقاومت بالا، دمای کوری به نسبت بالا، مغناطوتنگش کم، پایداری در محیط و کم هزینه استفاده شود [۱۸، ۲۰، ۲۱]. به هر حال، ساخت سرامیکی این فریت‌ها، کارایی آن‌ها را به دلیل افزایش رسانندگی الکتریکی و تشدید دیواره حوزه‌ای محدود می‌سازد و ساخت دمای پایین این مواد نقش کلیدی دارد، زیرا با تهیه آنها در مقیاس نانو مشکل حل می‌شود. برای این مواد در حالت تک حوزه‌ای تشدید دیواره حوزه‌ای ممکن نیست و در نتیجه این نانو مواد را می‌توان در بسامدهای بالا به کار برد [۱۸، ۲۰، ۲۱]. در این پژوهش، ویژگی‌های ساختاری، نوری و مغناطیسی فریت اسپینل  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  ( $x = 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ ) بررسی می‌شود. از آنجا که شعاع یونی  $Ba^{2+}$  نسبت به بقیه یون‌های دوظرفیتی موجود در جایگاه‌های چاروجهی و هشت‌وجهی بیشتر است، انتظار می‌رود که جانشانی یون‌های  $Ba^{2+}$  در جایگاه هشت‌وجهی اثر زیادی بر ویژگی‌های نوری و مغناطیسی فریت منگنز-مس-روی داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه با جانشانی یون‌های  $Ba^{2+}$  در جایگاه هشت‌وجهی مغناطش اشباع فریت  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  کمی کاهش می‌یابد، اما از این جانشانی می‌توان در تنظیم گاف انرژی نمونه  $MnCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  برای کاربردهای فتوولتایی و فوتوکاتالیزوری استفاده کرد.

#### روش بررسی

نیترات منگنز  $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ، نیترات باریم  $Ba(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ، نیترات مس  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ ، نیترات

جذب کرده و از این رو برای ساخت موج‌برهای ریزموج استفاده می‌شوند [۹، ۸].

در ساختار اسپینل مکعبی  $AB_2O_4$ ، جایگاه‌های هشت‌وجهی ( $B$ ) از جایگاه‌های چاروجهی ( $A$ ) بزرگتر هستند. از آنجا که یون‌های دوظرفیتی بزرگتر از یون‌های سه‌ظرفیتی هستند، منطقی است که یون‌های دوظرفیتی در جایگاه‌های هشت‌وجهی و یون‌های سه‌ظرفیتی در جایگاه‌های چاروجهی قرار گیرند، ولی در فریت روی ( $ZnFe_2O_4$ ) یون‌های دو ظرفیتی بزرگتر روی تمایل به اشغال جایگاه‌های چاروجهی دارند، زیرا آرایش‌های الکترونی آن برای اتصال چاروجهی به یون‌های اکسیژن مناسب‌تر است [۱۰-۱۲]. فریت روی ماده‌ای نیم‌رسانا با مقاومت الکتریکی بالاست که جریان الکتریکی مستقیم را از خود عبور نمی‌دهد.  $ZnFe_2O_4$  کاربردهای گسترده‌ای دارد که از جمله می‌توان به فوتوکاتالیزور [۱۳، ۱۴]، تصویبررداری تشدید [۱۵]، مواد مغناطیسی، کاتالیزورها و رنگ دانه‌ها اشاره کرده در نانوذرات  $Zn_{1-x}Cu_xFe_2O_4$  تهیه شده به روش احتراق ریزموج، برخی از یون‌های  $Cu^{2+}$  و  $Zn^{2+}$  جایگاه هشت‌وجهی را اشغال می‌کنند و در عوض، برخی از یون‌های  $Fe^{3+}$  کوچک تر، به جای یون‌های بزرگ تر  $Cu^{2+}$  و  $Zn^{2+}$  می‌توانند در جایگاه چاروجهی قرار گیرند [۱۶، ۱۷].

نانوذرات  $Mg_xMn_{0.3-x}Cu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_3O_4$  و  $NiCuZn$  با روش سیترات نیترات تهیه شدند [۱۸، ۱۹]. بر پایه پژوهش‌های پیشین پیرامون نانوذرات  $Mg_xMn_{0.3-x}Cu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_3O_4$  تهیه شده به روش سیترات، در فریت منگنز(منیزیم)-روی-مس، یون‌های  $Mg^{2+}$  می‌تواند در جایگاه  $A$  و  $B$  بنشیند، اما تمایل به اشغال جایگاه  $A$  دارند [۱۸]. یون‌های  $Fe^{3+}$  در هر دو جایگاه وجود دارند. هم‌چنین منگنز تمایل شدیدی به حضور در جایگاه‌های  $A$  و  $B$  دارد. در نانوذرات فریت  $NiCuZn$  تهیه شده به روش سیترات نیترات، یون نیکل تنها تمایل به اشغال جایگاه  $B$  دارد، در حالی که  $Cu^{2+}$  می‌تواند هر دو جایگاه  $A$  و  $B$  را اشغال کند [۱۹]. جایگزینی یون‌های  $Cu^{2+}$  با  $Ni^{2+}$  در جایگاه هشت‌وجهی  $B$  سبب کاهش مغناطش اشباع می‌شود. افزون بر این، نتایج نشان می‌دهند که در نتیجه توزیع تصادفی کاتیون‌ها در دو جایگاه  $A$  و  $B$ ، مقدار مغناطش در این دو جایگاه متغیر است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در نانوذرات فریت  $Mg_{0.3-x}$   $Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  تهیه شده به روش سیترات نیترات،

انرژی این نانوذرات با استفاده از روش تاوک و از برونیایی قسمت خطی نمودار  $(ahv)$  نسبت به  $hv$  (انرژی فوتون برحسب الکترون ولت) بدست آمدند [۲۳]. منحنی‌های پسماند مغناطیسی نمونه‌ها با مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) مدل Lake Shore 7400 در دمای اتاق و در میدان‌های مغناطیسی تا ۲T ثبت شدند.

#### بحث و بررسی

الگوهای XRD نانوذرات  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  با  $x = 0,00, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30$  نشان داده شده است. شاخص‌های میلر (hkl) قله‌های پراش فاز اسپینل نیز در شکل مشخص شده‌اند که متناظر با صفحه‌های (220)، (311)، (222)، (400)، (422)، (511) و (440) هستند و قله ارجح در راستای صفحه‌ی (311) دیده شده است. بررسی‌های ساختاری بسته نرم افزاری Xpert برای نمونه‌های با  $x = 0,00, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20$  ساختار اسپینل مکعبی با گروه فضایی  $Fd3m$  کارت استاندارد JCPDS به شماره ۲۳۹۹-۴۷، هم‌خوانی دارد [۲۰]. بدون حضور فاز ناخالصی را تأیید کرد. این در حالی است که برای نمونه‌های با  $x = 0,25, 0,30$  قله‌های پراشی فاز ناخالصی  $BaO$  افزون بر فاز اسپینل در الگوهای XRD (شکل ۱) دیده شدند. برای بررسی‌های ساختاری دقیق‌تر و محاسبه ثابت شبکه‌ای، برازش ریتولد الگوهای پراش پرتو X نمونه‌ها با نرم افزار Fullprof انجام شد.

ثابت شبکه همه نمونه‌ها در جدول ۱ و نمودار تغییرات آن در شکل ۲ آورده شده است. ثابت شبکه با افزایش مقدار باریم یک روند کاهشی را نشان می‌دهد. شعاع یون‌های  $Mn^{2+}$ ،  $Ba^{2+}$ ،  $Zn^{2+}$ ،  $Cu^{2+}$ ،  $Fe^{2+}$ ،  $Fe^{3+}$ ،  $O^{2-}$  در جایگاه چاروجهی به ترتیب برابر ۰/۶۶، ۰/۸۴، ۰/۶۲، ۰/۶۰، ۰/۶۳، ۰/۴۹، ۱/۳۸ و در جایگاه هشت‌وجهی به ترتیب ۰/۸۳، ۱/۳۶، ۰/۷۴، ۰/۷۷، ۰/۶۴، ۱/۴۰ است [۲۴]. باریم با توجه به شعاع یونی به اجبار باید در جایگاه بزرگتر هشت‌وجهی ساختار اسپینلی بنشیند و انتظار می‌رود که حضور یون بزرگتر باریم به جای یون کوچکتر منگنز ثابت شبکه را افزایش دهد. به هر حال، رفتار غیرمنتظره ثابت شبکه‌ای با افزایش جانشانی باریم نشان‌دهنده توزیع متفاوت کاتیون‌های جایگاه چاروجهی و هشت‌وجهی است. از آنجا که جایگاه هشت‌وجهی به اندازه رادیکال ۳ برابر بیشتر از جایگاه چاروجهی در تغییرات

روی  $Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  نیترات آهن  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  و اسید سیتریک  $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$  از شرکت سیگما آلدریچ خریداری شدند.

برای تهیه نمونه‌های  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  نخست بر پایه عنصرسنجی، مقدار مناسبی از نیترات منگنز  $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ، نیترات باریم  $Ba(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ، نیترات مس  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ ، نیترات روی  $Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  و نیترات آهن  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  جداگانه در کمترین مقدار آب حل شدند. همچنین محلولی از اسید سیتریک (با نسبت مولی اسید سیتریک به کل مول نیترات‌های فلزی برابر با یک) تهیه گردید و سرانجام همه محلول‌ها مخلوط شده و همزن کاملاً حل شد. سپس محلول آماده شده در فور آزمایشگاهی با دمای  $80^\circ C$  به مدت ۲۴ ساعت کاملاً خشک گردید و پس از پودر شدن، درون کوره  $500^\circ C$  به مدت ۳ ساعت قرار داده شد.

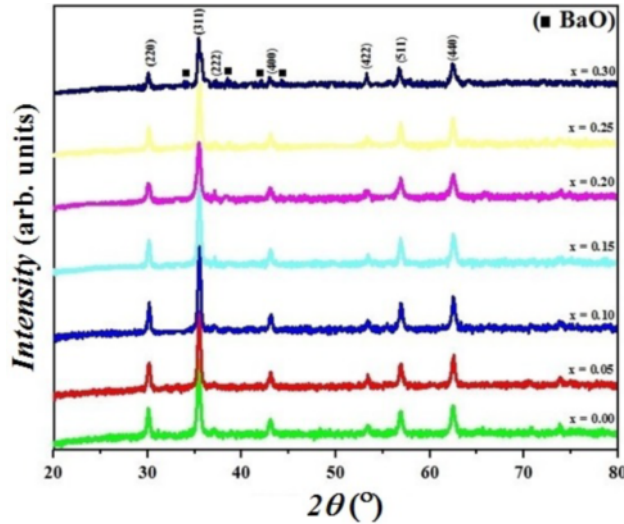
الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های پودری با پراش سنج مدل Advanced-D8 شرکت Bruker، مجهز به منبع تابش  $Cu-K\alpha$  ( $\lambda = 1,54068 \text{ \AA}$ ) و یک صافی نیکل در گستره‌ی  $2\theta = 20-80^\circ$  در دمای اتاق ثبت شد. همچنین برای کمک به تفسیر بهتر نتایج XRD، طیف تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) نمونه‌ها با دستگاه PerkinElmer در دمای اتاق ثبت گردید. تحلیل ساختاری نمونه‌ها از جمله تعیین دقیق ساختار بلوری و ثابت شبکه به روش ریتولد با استفاده از برنامه Fullprof انجام شد. میانگین اندازه بلورک (D) و ریزکرنش ( $\epsilon$ ) از روش هالدر-واگنر (H-W) به دست آمد [۲۲]:

$$\left(\frac{\beta_{hkl}^*}{d_{hkl}^*}\right)^2 = \left(\frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{hkl}^*}{d_{hkl}^*}\right)\left(\frac{1}{D}\right) \quad (1)$$

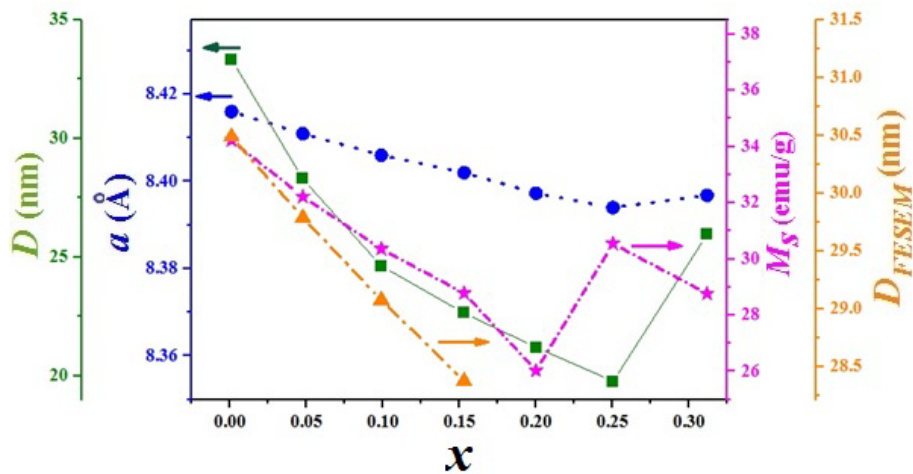
در این رابطه  $\beta_{hkl}$  و  $\frac{2\sin\theta}{\lambda} = d_{hkl}^*$ ،  $\frac{\beta_{hkl} \cos\theta}{\lambda} = \beta_{hkl}^*$  پهنای قله در نیم شدت بیشینه (FWHM) است. ریخت-شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر-میدانی (FE-SEM) مدل MLRA3 انجام شد و اندازه متوسط دانه با نرم‌افزار particle Size digimizer محاسبه شد. همچنین با طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) متصل به میکروسکوپ FE-SEM، درصد اتمی و درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده ترکیب تعیین شدند. ویژگی‌های نوری نمونه‌ها، براساس طیف جذبی آنها که با طیف‌سنج UV-Vis مدل ۴۸۰۲ UNICO در ناحیه فرابنفش ثبت شد بررسی گردید. گاف

ظرفیتی آهن به جایگاه هشت‌وجهی است. این تغییرات به کاهش پارامتر وارونی در ساختار اسپینل منجر می‌شود.

ثابت شبکه‌ای اثردار، یک توجیه برای این کاهش ثابت شبکه و جایگشت کاتیون‌ها، حضور یون‌های روی، مس و منگنز با شعاع یونی بزرگتر از آهن در جایگاه چاروجهی و انتقال یون‌های سه-



شکل ۱ الگوهای پراش پرتو X نانوذرات  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$



شکل ۲ تغییرات ثابت شبکه، اندازه بلورک، مغناطش اشباع و اندازه ذرات  $D_{FE-SEM}$  نمونه‌های فریت  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ .

جدول ۱ مقادیر ثابت شبکه‌ای ( $a$ )، اندازه بلورک ( $D_{H-W}$ ) و ریزکرنش ( $\epsilon$ ) محاسبه شده به روش هالدر-واگنر، چگالی نظری، چگالی تجربی، درصد تخلخل و اندازه ذره محاسبه شده از تصاویر  $FESEM$  ( $D_{FESEM}$ ).

نمونه	$a$ (Å)	$D_{H-W}$ (nm)	$\epsilon \times 10^3$ (بی‌بعد)	$\rho_{XRD}(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{exp}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$P$ (%)	$D_{FESEM}$ (nm)
$x = 0.00$	۸,۴۱۶	۳۰,۳۱	۳,۹۳	۵,۲۹۲	۵,۱۰۱	۳,۶۰۹	۳۰,۴۹
$x = 0.05$	۸,۴۱۲	۲۸,۳۰	۴,۴۷	۵,۳۹۳	۵,۲۰۲	۳,۵۴۱	۲۹,۷۹
$x = 0.10$	۸,۴۰۶	۲۷,۶۳	۵,۲۷	۵,۴۹۶	۵,۱۷۳	۵,۸۷۷	۲۹,۰۸
$x = 0.15$	۸,۴۰۲	۲۴,۹۸	۳,۸۴	۵,۵۹۷	۵,۳۰۸	۵,۱۶۳	۲۸,۳۸
$x = 0.20$	۸,۳۹۸	۲۳,۹۸	۵,۷۱	۵,۶۹۶	۵,۴۶۵	۴,۰۵۵	---
$x = 0.25$	۸,۳۹۴	۱۹,۷۶	۵,۲۹	۵,۷۹۸	۵,۵۵۶	۴,۱۷۳	---
$x = 0.30$	۸,۳۹۵	۲۵,۹۸	۳,۸۴	۵,۸۸۸	۵,۶۵۰	۴,۰۴۲	---

درصد جانشرانی باریم سنگین‌تر از منگنز نشان می‌دهد که روند افزایشی جرم فرمولی بر تغییرات کاهشی ثابت شبکه غلبه کرده است. همچنین، چگالی تجربی ( $\rho_{exp}$ ) همه نمونه‌ها با اندازه-گیری سطح قرص ساخته شده، ضخامت و جرم آن بدست آمد [۲۵].

براساس چگالی‌های نظری و تجربی درصد تخلخل ( $P$ ) نمونه‌ها از رابطه زیر محاسبه شد [۲۲]:

$$P = \frac{\rho_{XRD} - \rho_{exp}}{\rho_{XRD}} \times 100 \quad (۳)$$

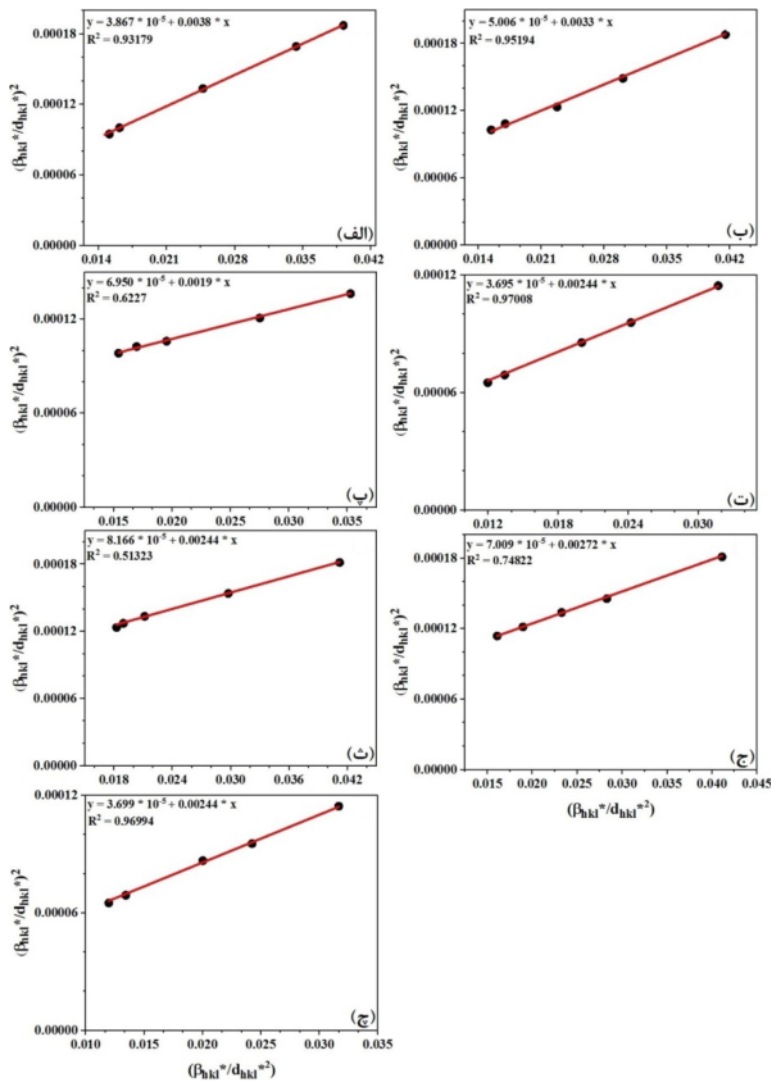
مقادیر چگالی نظری، چگالی تجربی، و تخلخل در جدول ۲ آورده شده است. چنان که دیده می‌شود، مقادیر تخلخل همه نمونه‌ها تقریباً برابر و پایین است.

منحنی‌های برازش خطی  $(\frac{\beta_{hkl}}{d_{hkl}^*})^2$  نسبت به  $(\frac{\beta_{hkl}^*}{d_{hkl}^*})^2$  به روش  $H-W$  برای همه نمونه‌ها در شکل ۳ آورده شده‌اند. در روش  $H-W$ ، اندازه متوسط بلورک ( $D_{H-W}$ ) براساس عکس شیب منحنی برازش خطی و ریز کرنش ( $\epsilon$ ) با استفاده از ریشه دوم عرض از مبدا بدست می‌آیند. مقادیر اندازه بلورک و ریز کرنش به دست آمده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

چگالی نظری ( $\rho_{XRD}$ ) همه نمونه‌ها از رابطه زیر محاسبه شد [۲۲]:

$$\rho_{XRD} = \frac{8M}{N_A a^3} \quad (۲)$$

که  $M$  جرم مولی  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  و  $a$  ثابت شبکه هستند. افزایش چگالی نظری با



شکل ۳ برازش خطی منحنی‌های  $(\frac{\beta_{hkl}}{d_{hkl}^*})^2$  نسبت به  $(\frac{\beta_{hkl}^*}{d_{hkl}^*})^2$  به روش هالدر-واگنر برای نمونه‌های (الف)  $x = 0,00$  (ب)  $x = 0,05$  (پ)  $x = 0,10$ ، (ت)  $x = 0,15$  (ث)  $x = 0,20$  (ج)  $x = 0,25$  و (چ)  $x = 0,30$ .

جدول ۲ مقادیر پارامترهای مغناطیسی بدست آمده از برازش منحنی شدن به اشباع.

نمونه	$H_c$ (Oe)	$M_r$ (emu/g)	$M_s$ (emu/g)	$\chi \times 10^4$ (emu/gOe)	$b \times 10^4$ (Oe <sup>2</sup> )	$c$ $\times 10^2$ (Oe <sup>3</sup> )
$x = 0,00$	۷۵,۴۵	۵,۶۵	۳۲,۷۳	۵,۷۶	۵,۵۹	۱,۲۷
$x = 0,05$	۷۲,۸۲	۵,۳۵	۳۰,۸۸	۶,۰۷	۴,۹۶	۱,۲۶
$x = 0,10$	۵۶,۲۱	۴,۱۰	۲۹,۳۵	۶,۰۴	۵,۱۵	۱,۳۲
$x = 0,15$	۵۷,۲۶	۴,۰۱	۲۸,۴۸	۴,۴۸	۵,۰۱	۱,۳۰
$x = 0,20$	۷۶,۳۳	۴,۵۵	۲۵,۵۴	۴,۸۹	۴,۹۴	۱,۲۸
$x = 0,25$	۷۷,۰۱	۴,۸۵	۲۷,۳۸	۵,۱۴	۵,۲۸	۱,۳۲
$x = 0,30$	۶۲,۱۲	۳,۷۲	۲۵,۱۳	۶,۱۰	۴,۶۶	۱,۲۹

۹۰۰ در شکل ۶ آورده شده است. این طیفها دو نوار جذب شدید را حدود ۴۵۰ و  $560 \text{ cm}^{-1}$  نشان می‌دهند که ویژگی مشترک همه فریت‌های اسپینلی و به طور عمده ناشی از ارتعاش‌های آهن-اکسیژن هستند [۱۹]. نوار بسامدی  $v_1$  پیرامون  $560 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش‌های ذاتی اکسیژن-فلز در جایگاه چاروجهی و نوار بسامدی  $v_2$  پیرامون  $450 \text{ cm}^{-1}$  نشانگر ارتعاش‌های ذاتی اکسیژن-فلز در در جایگاه هشت‌وجهی است [۱۹]. تفاوت در مکان نوارها ناشی از تغییر طول پیوند  $Fe^{3+}-O^{2-}$  در جایگاه‌های چاروجهی و هشت‌وجهی است. هم‌چنین ظاهر شدن این دو نوار در نمونه‌ها تاییدی بر تشکیل ساختار اسپینل است. به هر حال، مکان نوارها وابسته به عواملی چون روش آماده‌سازی، اندازه دانه و شرایط گرمادهی است [۲۲]. با توجه به شکل ۶، مقدار  $v_1$  در جایگاه چاروجهی برای همه نمونه‌ها تقریباً ثابت است، اما  $v_2$  در جایگاه هشت‌وجهی نمونه‌ها یک روند کاهشی را تا  $x = 0,20$  و سپس برای تغییرات  $x = 0,25, 0,30$  یک روند افزایشی را نشان می‌دهد. تغییرات کاهشی  $v_2$  را می‌توان براساس جرم و شعاع بزرگتر یون باریم شرکت‌کننده در جایگاه هشت‌وجهی توضیح داد. جرم و شعاع یونی  $Ba$  نسبت به بقیه یون‌های دوظرفیتی جایگاه‌های چاروجهی و هشت‌وجهی بیشتر است و از تغییرات کاهشی  $v_2$  نیز می‌توان دریافت که  $Ba$  بیشتر در جایگاه هشت‌وجهی نشسته است.

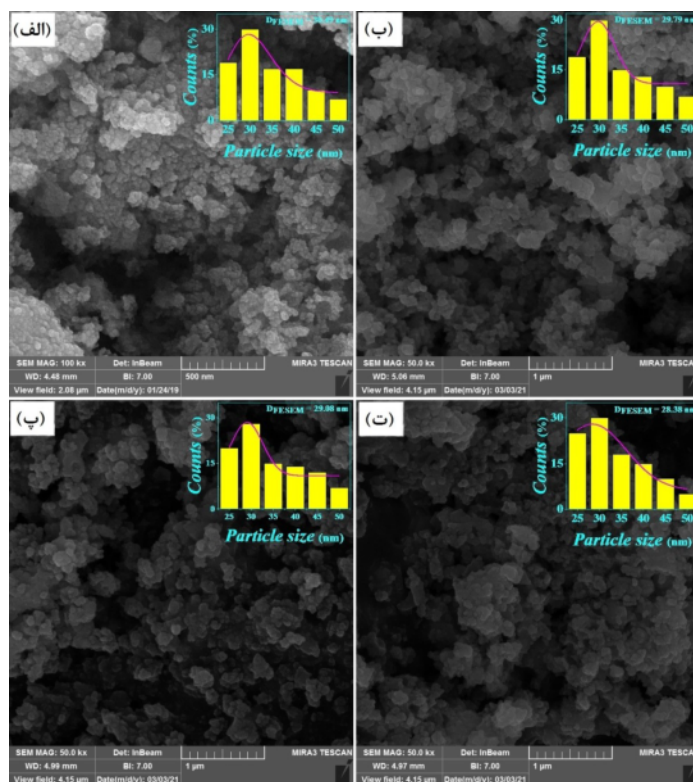
تصاویر  $FESEM$  نمونه‌های با  $x = 0,00, 0,05, 0,10, 0,15$  در شکل ۴ آورده شده است. چنان که دیده می‌شود، ریخت-شناسی سطحی نمونه‌ها شامل کلوخه‌های تشکیل شده از مجموعه ای از نانوذرات به هم چسبیده است. نمودار ستونی توزیع اندازه ذرات فریت اسپینل  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  برای  $x = 0,00, 0,05, 0,10, 0,15$  رسم شد و میانگین اندازه ذره ( $D_{FESEM}$ ) از برازش آن با تابع توزیع لگاریتم عادی به دست آمد [۲۶].

$$P(d) = \frac{1}{d \sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_d^2} \ln\left(\frac{d}{D_{FESEM}}\right)\right) \quad (4)$$

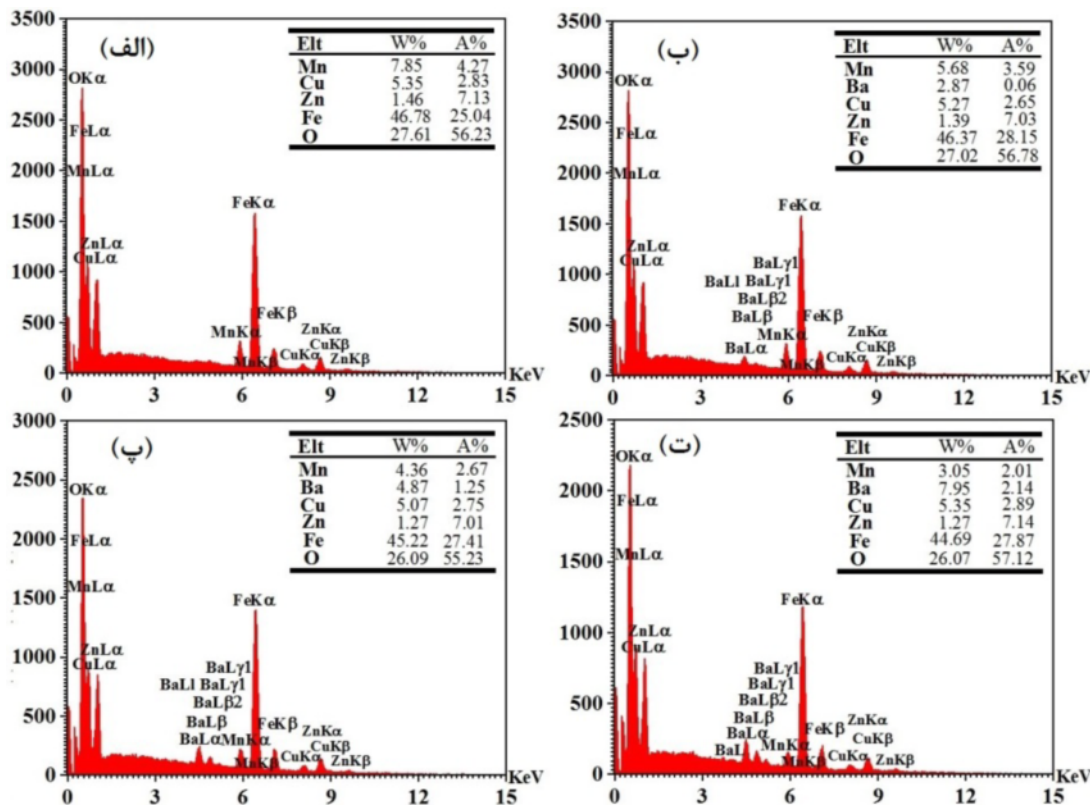
مقادیر  $D_{FESEM}$  محاسبه شده به این روش در جدول ۱ آورده شده و در شکل ۲ رسم شده‌اند. چنان که دیده می‌شود، رفتار ثابت شبکه، اندازه بلورک و اندازه ذرات ( $D_{FE-SEM}$ ) هم‌خوانی دارند.

طیف‌های تجزیه عنصری  $EDX$  نانوذرات  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  در شکل ۵، آورده شده‌اند که خطوط انرژی مربوط به عناصر  $Mn, Ba, Cu, Zn, Fe, O$  دیده می‌شوند. درصد اتمی و درصد وزنی محاسبه شده از روی طیف برای عناصر تشکیل دهنده نمونه‌ها در جدول در شکل ۵ آورده شده است. داده‌های این جداول همخوانی بسیار خوبی با مقادیر فرمولی هر نمونه دارند.

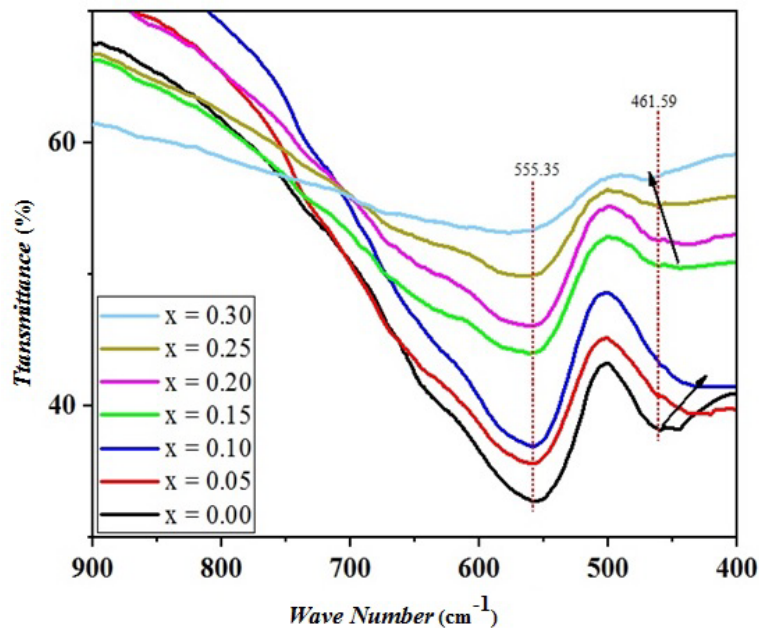
طیف فروسرخ نمونه‌ها در گستره عدد موج ۴۰۰ تا  $\text{cm}^{-1}$



شکل ۴ توزیع لگاریتم عادی نانو ذرات  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  به همراه برازش آن‌ها برای نمونه‌های (الف)  $x = 0,00$  (ب)  $x = 0,05$  (پ)  $x = 0,10$  و (ت)  $x = 0,15$ .



شکل ۵ طیف EDX نانوذرات  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  با (الف)  $x = 0,00$  (ب)  $x = 0,05$  (پ)  $x = 0,10$  (ت)  $x = 0,15$ .



شکل ۶ طیف تبدیل فرسرخ نانوذرات  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$

عواملی چون دما، فرآیند، ترکیب شیمیایی، اندازه دانه و چگالی وابسته است [۱۹ و ۲۲]. بر این اساس مغناطش اشباع از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹-۲۲]:

$$M_s = |M_B - M_A| \quad (۶)$$

که  $M_B$  و  $M_A$  به ترتیب نشان‌دهنده مغناطش یون‌ها در جایگاه‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی هستند. با افزایش جانشانی  $Ba^{2+}$  به جای  $Mn^{2+}$ ، کاهش در مغناطش اشباع نمونه‌ها دیده می‌شود. با توجه به رابطه (۶)، کاهش مغناطش اشباع نمونه‌ها بیانگر حضور یون‌های غیرمغناطیسی  $Ba^{2+}$  در جایگاه هشت‌وجهی است.

ویژگی‌های نوری نانوذرات  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  با استفاده از طیف جذبی آنها در ناحیه مرئی-فرابنفش بررسی شد. گاف انرژی مستقیم همه نمونه‌های مورد بررسی از برونیابی قسمت خطی نمودار  $(ah\nu)^2$  نسبت به  $h\nu$  بدست آمد (شکل ۹). گاف انرژی نمونه‌ها با افزایش جانشانی باریم تا  $x = 0/10$  یک روند افزایشی را نشان می‌دهد و در ادامه با جانشانی باریم کاهش می‌یابد. مقادیر گاف نوری بدست آمده با مقادیر بیشتر گزارش شده برای فریت‌ها هم‌خوانی دارد [۲۷-۲۸]. هم-چنین تغییرات گاف انرژی را می‌توان بر اساس تغییرات ساختار الکترونی نمونه‌ها ناشی از تغییرات طول پیوند  $Fe-O$  و زاویه‌ی پیوند  $Fe-O-Fe$  توضیح داد.

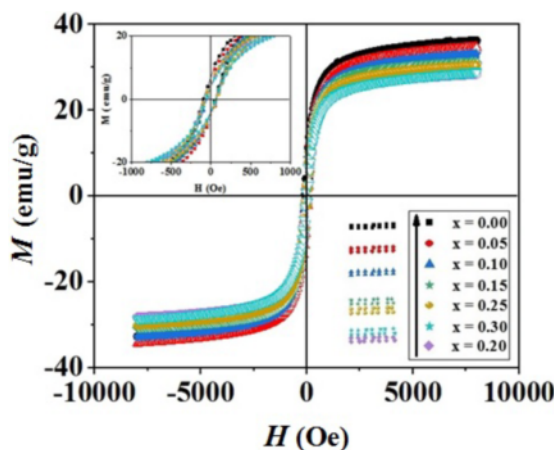
حلقه‌های پسماند مغناطیسی نمونه‌های  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مقادیر مغناطش اشباع نمونه‌ها ( $M_s$ )، میدان وادارندگی ( $H_c$ ) مغناطش مانده ( $M_r$ ) آنها از این منحنی‌ها قابل استخراج هستند. قانون نزدیک شدن به اشباع فرومغناطیس به طور گسترده برای تحلیل منحنی‌های مغناطش مواد مغناطیسی نرم استفاده می‌شود. با توجه به این قانون، مغناطش نانوذرات فرومغناطیس در حد میدان‌های بالا برحسب میدان مغناطیسی از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۹-۲۱].

$$M(H) = M_s \left[ 1 - \left( \frac{b}{H^2} \right) - \left( \frac{c}{H^3} \right) \right] + \chi H \quad (۵)$$

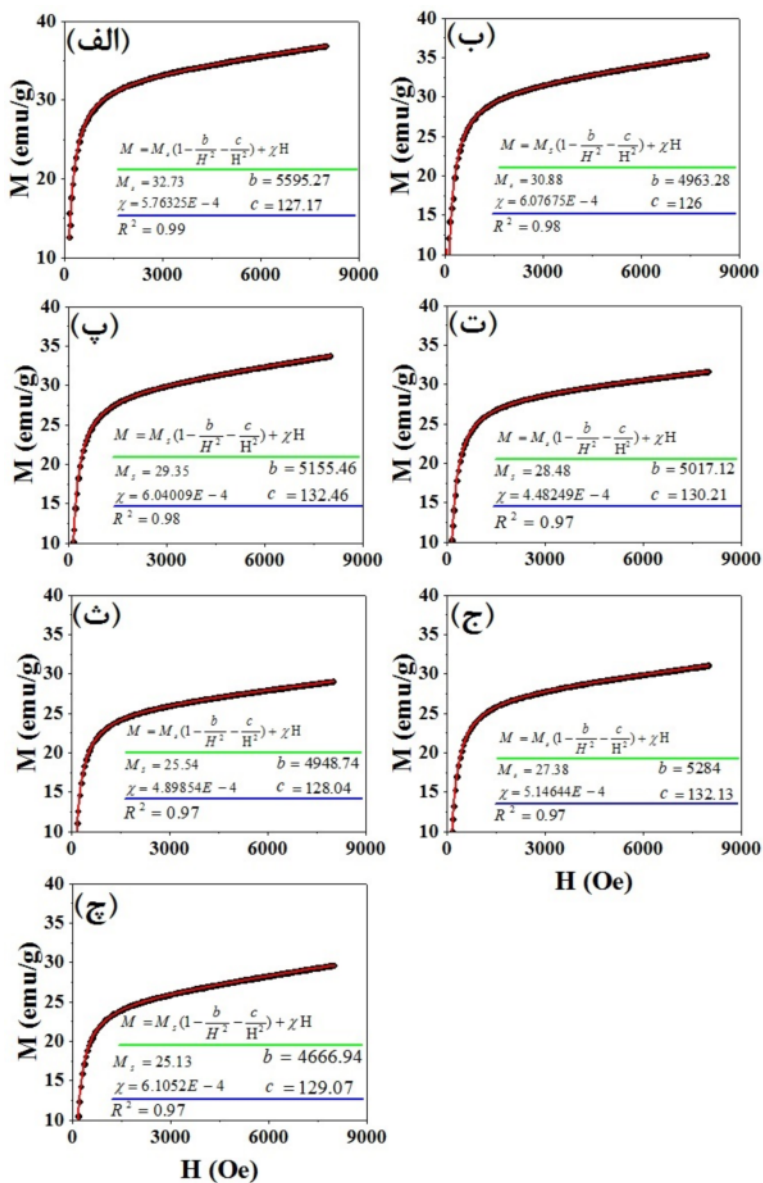
در این رابطه،  $M_{s-f}$  سهم مغناطش اشباع فرومغناطیس است. برازش منحنی‌های مغناطش همه نمونه‌ها با این رابطه در شکل ۸ نشان داده شده است.

در ساختار فریت‌های اسپینل، براساس نظریه نیل، کاتیون-ها در دو زیرشبکه مختلف چاروجهی ( $A$ ) و هشت‌وجهی ( $B$ ) قرار می‌گیرند. با توجه به این نظریه، برهم‌کنش ابرتبادلی  $A-B$  بر برهم‌کنش‌های درون شبکه‌ای  $A-A$  و  $B-B$  غالب است. گشتاورهای مغناطیسی در هر زیرشبکه موازی و نسبت به هم به صورت پادموازی سمتگیری می‌کنند. گشتاور مغناطیسی کل به گشتاور مغناطیسی جایگاه‌های  $A$  و  $B$  وابسته است. مغناطش کل افزون بر توزیع کاتیون‌ها در این دو جایگاه، به

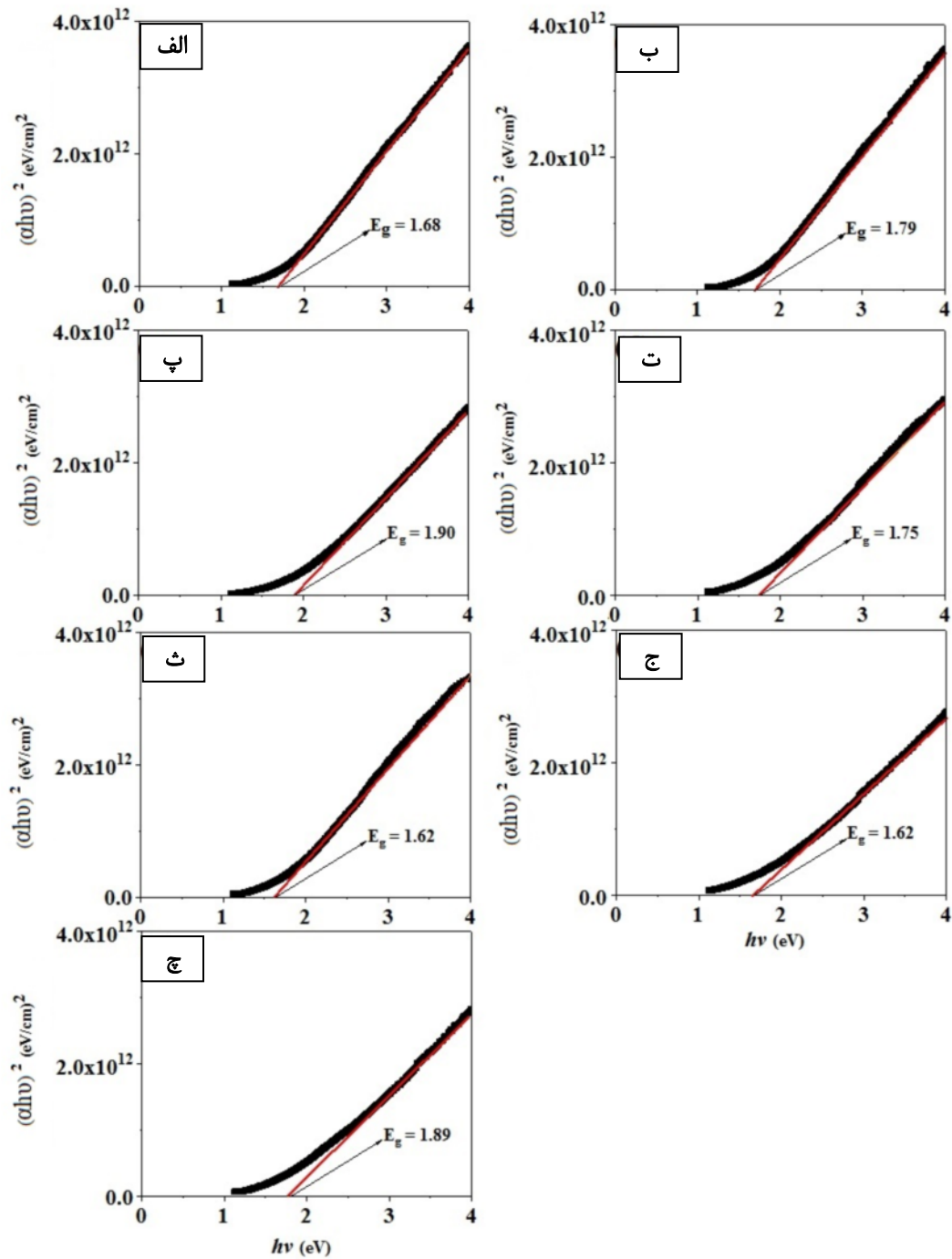




شکل ۷ منحنی پسماند نانوذرات  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$



شکل ۸ برازش قانون نزدیک شدن به اشباع منحنی مغناطش نانوذرات  $Mn_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  برای  $x = 0,00$  (الف)  $x = 0,05$  (ب)  $x = 0,10$  (پ)  $x = 0,15$  (ت)  $x = 0,20$  (ث)  $x = 0,25$  (ج)  $x = 0,30$  (ح)



شکل ۹. برون‌یابی قسمت خطی نمودار  $(\alpha hv)^2$  نسبت به  $h\nu$  برای نانوذرات  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  با  $x = 0,00$  (الف) تا  $x = 0,05$  (پ)  $x = 0,10$  (ت)  $x = 0,15$  (ث)  $x = 0,20$  (ج)  $x = 0,25$  (چ)  $x = 0,30$ .

#### برداشت

فضایی  $Fd3m$  را تایید می‌کند. ثابت شبکه برای جانشانی تا  $x = 0/2$  یک روند کاهشی را نشان می‌دهد که این رفتار را می‌توان به توزیع متفاوت کاتیون‌های جایگاه‌های چاروچی و هشت‌وجهی نسبت داد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که تغییرات اندازه بلورک در واقع از تغییرات ثابت شبکه پیروی

در این پژوهش، ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی فریت اسپینل  $Mn_{0/3-x}Ba_xCu_{0/2}Zn_{0/5}Fe_2O_4$  تهیه شده به روش سیترا- نیترا بررسی شد. مشخصه‌یابی ساختاری نمونه‌ها براساس الگوهای XRD تشکیل ساختار اسپینل مکعبی با گروه

Journal of Crystallography and Mineralogy 3 (1995) :113-122

[6] Haque M.M., Huq M., Hakim M.A., "Effect of Cu for Mn on the magnetic properties of Mn-Zn ferrites", Indian J. Phys. 78A (2004) 397-400.

[7] Alam F., Khan Mohammad H. R., Das H.N., Hossain A.A.K.M., "Structural and Magnetic Properties of  $Mn_{0.50-x}Zn_{0.50}Cu_xFe_2O_4$ ", Materials Sciences and Applications 4 (2013) 831-838.

[8] Manjurul Haque M., Huq M., Hakim M.A., "Influence of CuO and sintering temperature on the microstructure and magnetic properties of Mg-Cu-Zn ferrites", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 (2008) 2792-2799.

[9] Reddy M.P., Penchal M., Ramana M.V., Venkata M., Madhuri W., Sadhana K., Kumar K. V.S., R.R. Reddy, "Effects of sintering temperature on structural and electromagnetic properties of MgCuZn ferrite prepared by microwave sintering", Adv. Appl. Ceram. 114 (2015) 326-332.

[10] Gill N.K., Puri R.K., "Mossbauer study of  $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Cr_xO_4$  ferrites", Spectrochimica Acta A 41 (1985) 1005-1008.

[11] El-Sayed A.M., "Effect of chromium substitutions on some properties of NiZn ferrites", Ceramics International 28 (2002) 651-655.

[12] Manikandan A., Judith Vijaya J., John Kennedy L., Bououdina M., "Structural, optical and magnetic properties of  $Zn_{1-x}Cu_xFe_2O_4$  nanoparticles prepared by microwave combustion method", Journal of Molecular Structure 1035 (2013) 332-340.

[13] Manikandan A., JohnKennedy L., Bououdina M., JudithVijaya J., "Synthesis, Optical and magnetic properties of pure and Co-doped  $ZnFe_2O_4$  nanoparticles by microwave combustion method", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 349 (2014) 249-258.

[14] Abareshi M., Goharshadi E.K., Zebarjad S.M., Fadafan H.K., Youssefi A., "Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of  $Fe_3O_4$  nanofluids", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 322 (2010) 3895-3901.

[15] Manikandan A., Judith Vijaya J., John Kennedy L., Bououdina M., "Microwave combustion synthesis, structural, optical and magnetic properties of  $Zn_{1-x}Sr_xFe_2O_4$

می‌کند. کاهش اندازه ذرات بدست آمده از تصاویر FESEM نیز با کاهش مقادیر ثابت شبکه و اندازه بلورک‌ها هم‌خوانی دارد. هم‌چنین حضور دو نوار  $\nu_1$  و  $\nu_2$  حدود  $450$  و  $560$   $cm^{-1}$  در طیف فروسرخ نمونه‌ها تاییدی بر تشکیل ساختار اسپینل مکعبی نمونه‌هاست و هم‌چنین نتایج نشان داد که باریم در جایگاه هشت‌وجهی قرار گرفته است. با افزایش جانشانی  $Ba^{2+}$  به جای  $Mn^{2+}$  کاهشی در مغناطش نمونه‌ها برای همه جانشانی‌ها دیده می‌شود که گویای حضور یون‌های غیرمغناطیسی  $Ba^{2+}$  در جایگاه هشت‌وجهی و فشار به یون‌های  $Mn^{2+}$  (با  $5 \mu_B$ ) در جایگاه هشت‌وجهی و انتقال آن‌ها به جایگاه چاروجهی است. این امر باعث کاهش مغناطش نمونه‌ها بر اساس رابطه نیل می‌شود. مقادیر گاف انرژی مستقیم نمونه‌ها یک بیشینه را برای جانشانی  $x = 0,10$  نشان می‌دهد. تغییرات گاف انرژی نمونه‌ها را می‌توان براساس تغییرات ساختار الکترونی نمونه‌ها ناشی از تغییرات طول پیوند و زاویه‌ی پیوند فلز-اکسیژن توضیح داد.

#### مراجع

[1] Satalkar M., Kane S.N., "On the study of Structural properties and Cation distribution of  $Zn_{0.75-x}Ni_xMg_{0.15}Cu_{0.1}Fe_2O_4$  nano ferrite: Effect of Ni addition", Journal of Physics: Conference Series 755 (2016) 012050.

[2] Assar S.T., Abosheisha H.F., Sayed A.R.El., "Effect of  $\gamma$ -rays irradiation on the structural, magnetic, and electrical properties of Mg-Cu-Zn and Ni-Cu-Zn ferrites", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 23 (2014) 037503.

[3] Sefatgol R., Gholizadeh A., "The effect of the annealing temperature on the microstructural, magnetic, and spin-dynamical properties of Mn-Mg-Cu-Zn ferrites", Physica B 624 (2022) 413442.

[4] Blooki F., Khandan Fadafan H., Lotfi Orimi R., "Effect of  $Mn^{2+}$  substitution on the structure and magnetic properties of nanosized  $Ni_{0.5-x}Mn_xZn_{0.5}Fe_2O_4$  ( $x = 0, 0.25, 0.35, 0.5$ ) ferrites prepared by co-precipitation method", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 23 (2015) 285-294.

[5] Zaker A., "The Effect of Microstructure in Magnetic Properties of Barium Ferrite", Iranian

- Journal of the American Ceramic Society 100 (2017) 3577-3588.
- [23] Gholizadeh A., Tajabor N., "Influence of  $N_2$ - and Ar-ambient annealing on the physical properties of  $SnO_2:Co$  transparent conducting films", Mater. Sci. Semicond. Process. 13 (3) (2010) 162-166.
- [24] Shannon R.D., "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides", Acta Cryst. A 32 (1976) 751-767.
- [25] Gholizadeh A., "A comparative study of the physical properties of Cu-Zn ferrites annealed under different atmospheres and temperatures: Magnetic enhancement of  $Cu_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  nanoparticles by a reducing atmosphere", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 452 (2017) 389-397.
- [26] Mahmoudi S., Gholizadeh A., "Effect of non-magnetic ions substitution on the structure and magnetic properties of  $Y_{3-x}Sr_xFe_{5-x}Zr_xO_{12}$  nanoparticles", J. Magn. Magn. Mater. 456 (2018) 46-55.
- [27] Ajmal M., Asghari M., "Structural, electrical and magnetic properties of  $Cu_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferrites ( $0 \leq x \leq 1$ )", Journal of Alloys and Compounds 460 (2008) 54-59.
- [28] Khedri H., Gholizadeh A., Malekzadeh A., "Effect of annealing temperature on structural, optical and catalytic properties of Cu-Zn ferrite nanoparticles", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 297-308.
- "nanoparticles", Ceramics International 39 (2013) 5909-5917.
- [16] Ajmal M., Asghari M., "Structural, electrical and magnetic properties of  $Cu_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferrites", Journal of Alloys and Compounds 460 (2008) 54-59.
- [17] Banerjee M., Verma N., Prasad R., "Structural and catalytic properties of  $Cu_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nanoparticles", Journal of Materials Science 42 (2007) 1833-1837.
- [18] Shamgani N., Gholizadeh A., "Structural, magnetic and elastic properties of  $Mn_{0.3-x}Mg_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_3O_4$  nanoparticles", Ceramics International 45 (2019) 239-246.
- [19] Gholizadeh A., Jafari E., "Effects of sintering atmosphere and temperature on structural and magnetic properties of Ni-Cu-Zn ferrite nanoparticles: magnetic enhancement by a reducing atmosphere", J. Magn. Magn. Mater. 422 (2017) 328-336.
- [20] Gholizadeh A., Beyranvand M., "Structural, magnetic, elastic, and dielectric properties of  $Mg_{0.3-x}Ba_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  nanoparticles", Physica B: Physics of Condensed Matter 584 (2020) 412079.
- [21] Beyranvand M., Gholizadeh A., "Structural, magnetic, elastic, and dielectric properties of  $Mn_{0.3-x}Cd_xCu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  nanoparticles", Journal of Materials Science: Materials in Electronics 31 (2020) 5124-5140.
- [22] Ahmad Gholizadeh, "A comparative study of physical properties in  $Fe_3O_4$  nanoparticles prepared by coprecipitation and citrate methods",