

## مقدمه

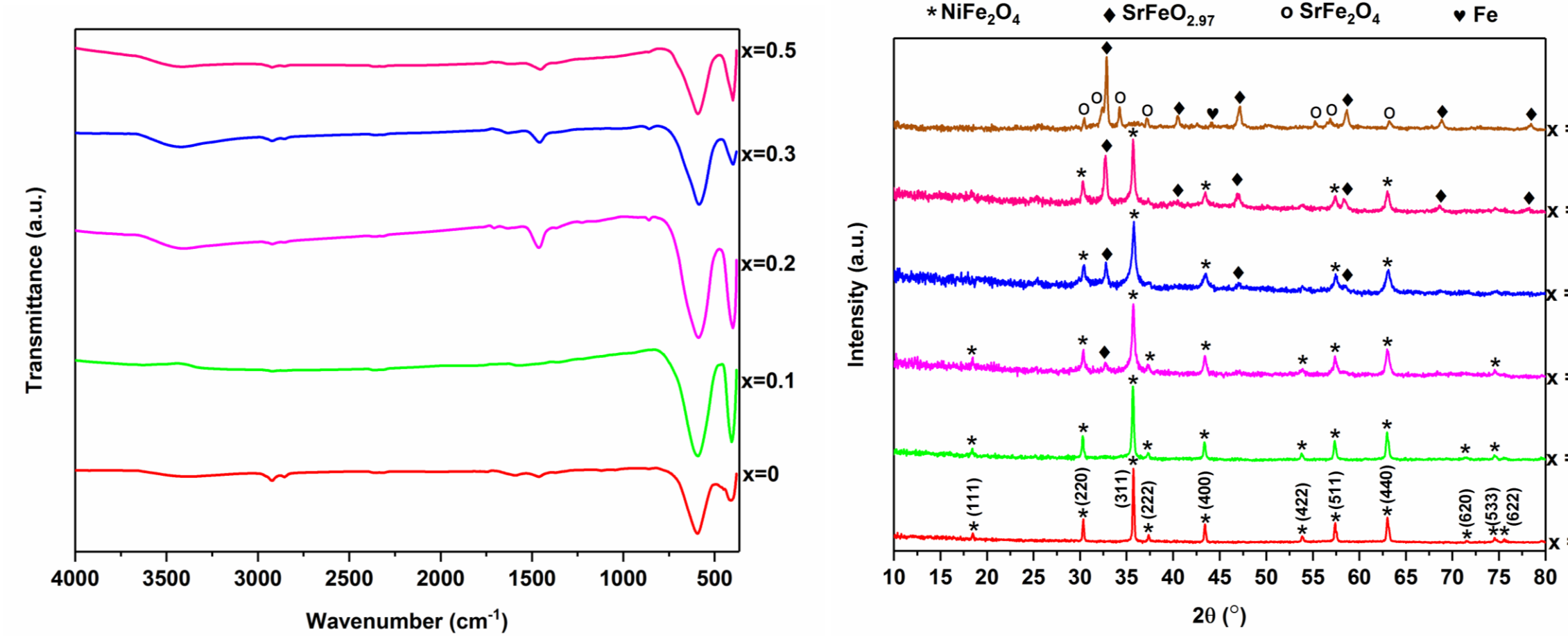
در سال‌های اخیر، نانوذرات فریت اسپینل به واسطه خواص الکتریکی و مغناطیسی منحصر به فرد، مورد توجه ویژه پژوهشگران و دانشمندان قرار گرفته است [۱]. در بین فریت‌های اسپینل، فریت نیکل با فرمول استکیومتری  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  از جمله اکسیدهای مغناطیسی است که به دلیل مقاومت الکتریکی بالا و تلفات مغناطیسی کم، کاربردهای فراوانی در حوزه‌های الکترونیک و پزشکی از جمله قطعات میکروویو، ادوات ضبط مغناطیسی، حسگرهای گازی، داروسازی هدفمند و سیالات مغناطیسی، پیدا کرده است [۲،۳]. در این پژوهش، از روش سل-ژل خوداحتراقی برای تهیه نانوذرات فریت نیکل جانمایی شده با استرانسیوم ( $\text{Ni}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) استفاده شده است. ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1$ )

## روش آزمایش

برای تهیه نانوذرات فریت نیکل آلاییده شده با استرانسیوم، در ابتدا مقادیر لازم از نیترات آهن ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )، نیترات نیکل ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) و نیترات استرانسیوم ( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ) در آب دیونیزه حل شد. سپس اسید سیتریک با نسبت مولی برابر مجموع نیترات‌های فلزی به محلول اضافه شد. در ادامه و با هدف خنثی شدن محلول ( $\text{pH}=7$ )، آمونیاک به صورت قطره قطره به محلول اضافه شد. محلول در دمای  $80^\circ\text{C}$  حرارت‌دهی شده تا به ژل چسبناکی تبدیل شود. سپس جهت خشک شدن و سوختن ژل، آنرا داخل آون در دمای  $220^\circ\text{C}$  قرار می‌دهیم. در نهایت، ژل خشک شده داخل هاون آسیاب شده و جهت کلسینه شدن به مدت ۲ ساعت داخل کوره در دمای  $800^\circ\text{C}$  حرارت داده شد.

## نتایج و بحث

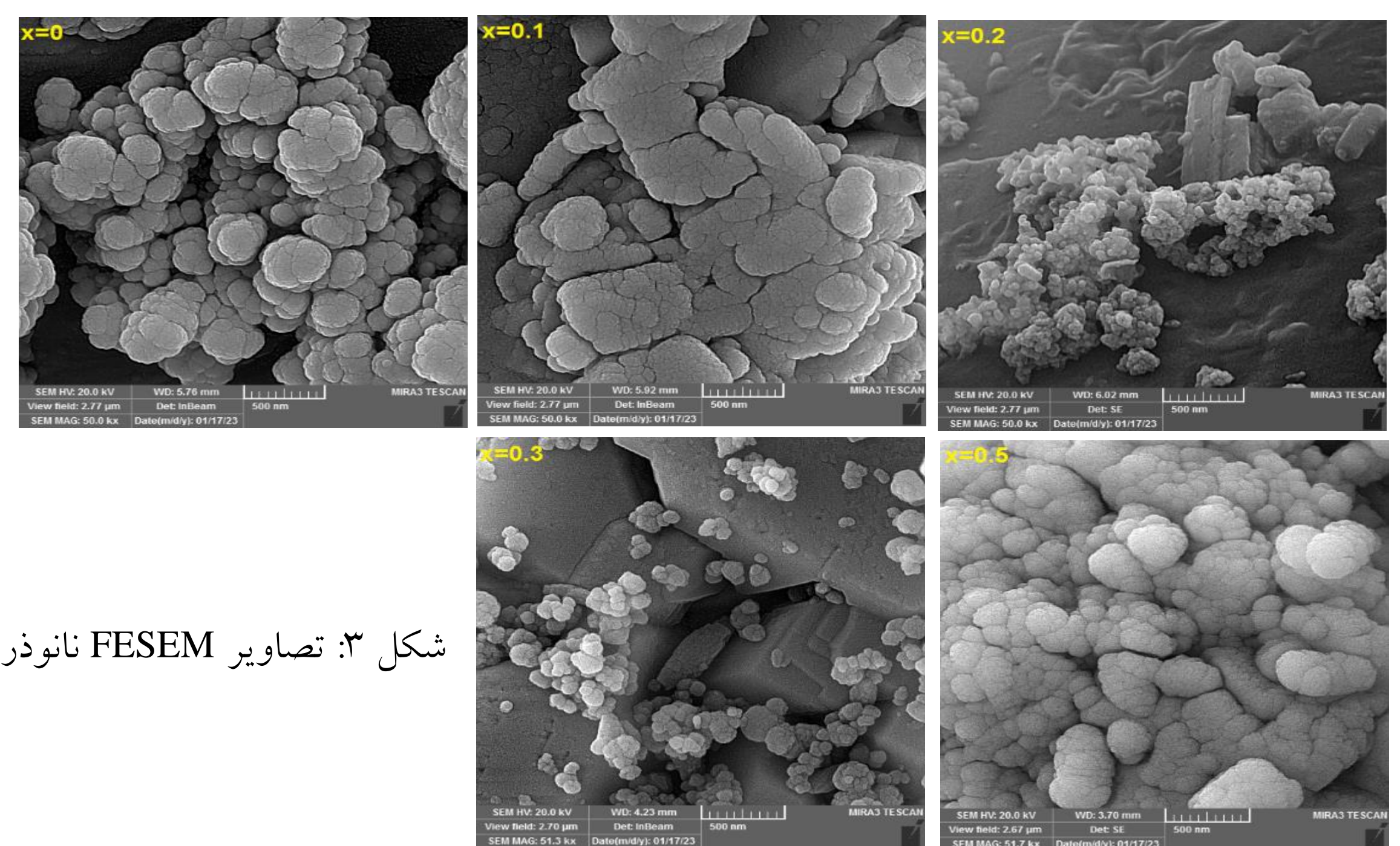
در شکل ۱، الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات فریت نیکل-استرانسیوم نشان داده شده است. تمامی قله‌های ظاهر شده در الگوی XRD نمونه‌های  $x=0, 0.1$  با کارت استاندارد PDF شماره ۱۴۸۵-۴۴ (ساختار بلوری اسپینل مکعبی FCC با گروه فضایی  $\text{Fd}3\text{m}$ ) مطابقت دارد و هیچگونه فاز ثانویه‌ای در این دو نمونه مشاهده نمی‌شود. با این حال، با افزایش مقدار جانمایی استرانسیوم به جای نیکل تا مقدار  $x=0.5$ ، یک سری قله جدید در محدوده زوایای  $32.7^\circ$ ،  $40.4^\circ$ ،  $58.3^\circ$ ،  $68.4^\circ$  و  $78.0^\circ$  درجه مشاهده می‌شود که با فاز بلوری ثانویه  $\text{SrFeO}_{2.97}$  (کارت PDF شماره ۰۹۰۵-۴۰)، همخوانی دارد. ضمناً افزایش جانمایی  $\text{Sr}^{2+}$  به جای  $\text{Ni}^{2+}$  باعث تولید عیوب ساختاری شده و در نتیجه، قله‌های ضعیف مربوط به فاز اصلی  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  از بین رفته و شدت قله‌های مربوط به فاز ثانویه  $\text{SrFeO}_{2.97}$ ، افزایش پیدا می‌کند. این مطلب بیان می‌کند که با افزایش جانمایی یون  $\text{Sr}^{2+}$ ، درصد وزنی فاز اصلی  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  کاهش و در عوض درصد تشکیل فاز  $\text{SrFeO}_{2.97}$  افزایش می‌یابد. با جانمایی کامل یون‌های  $\text{Ni}^{2+}$  توسط یون‌های  $\text{Sr}^{2+}$ ، ضمن افزایش درصد فاز بلوری  $\text{SrFeO}_{2.97}$ ، فاز اصلی فریت نیکل ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) به طور کامل از بین رفته و ساختار بلوری فریت استرانسیوم ( $\text{SrFe}_2\text{O}_4$ ) با شماره کارت استاندارد شماره ۱۰۲۷-۱ و فاز بلوری آهن خالص (Fe) با شماره کارت استاندارد شماره ۱۲۵۲-۱ شکل می‌گیرد. تحلیل این نتایج نشان می‌دهد که ساختار اسپینل فریت نیکل قادر است تا حداکثر ۱۰٪ یون‌های  $\text{Sr}^{2+}$  را به جای  $\text{Ni}^{2+}$  بدون ایجاد فاز ثانویه، درون خود جای دهد.



شکل ۱: الگوی XRD نانوذرات

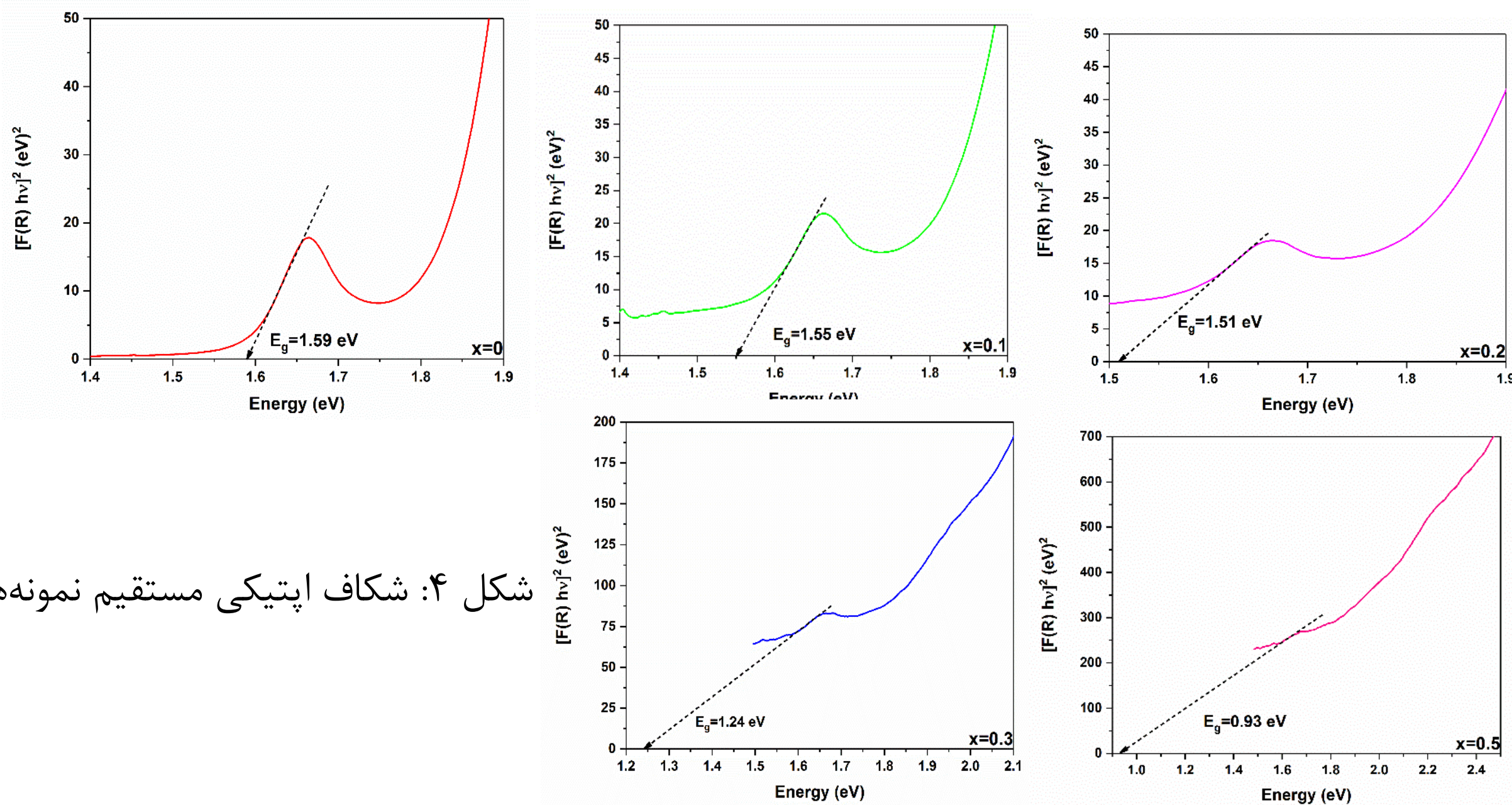
شکل ۲: طیف FTIR نانوذرات

در طیف FTIR تمامی نمونه‌ها، دو نوار جذب واضح در موقعیت حدود  $592\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_t$ ) و  $407\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_o$ ) مشاهده می‌شود که به ترتیب به ارتعاشات کششی ذاتی بین اکسیژن و یون فلز (M-O) در موقعیت‌های چهار وجهی و هشت وجهی نسبت داده می‌شود.



شکل ۳: تصاویر FESEM نانوذرات

تصاویر آنالیز FESEM، مورفولوژی نانوذرات را به صورت شبه‌کروی نشان می‌دهد. ضمناً با افزایش جانمایی استرانسیوم به جای نیکل، درجه کلوخه شدن ذرات افزایش می‌یابد که احتمالاً به دلیل افزایش انرژی سطحی دانه‌ها می‌باشد. میانگین اندازه ذرات  $\text{Ni}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  برای  $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$  به ترتیب برابر مقدار  $106/47$ ،  $93/49$ ،  $62/13$ ،  $79/78$  و  $110/86$  نانومتر بدست آمد. همانطور که مشاهده می‌شود، اندازه ذرات با افزایش مقدار Sr تا مقدار  $x=0.2$  کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند.

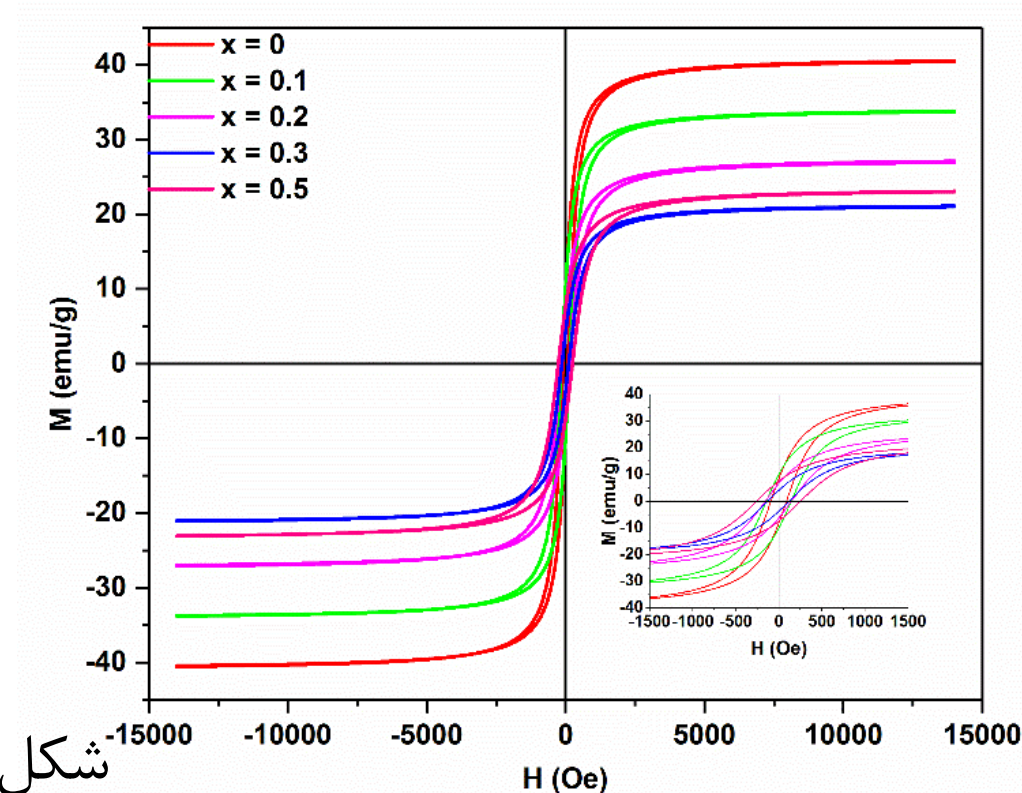


شکل ۴: شکاف اپتیکی مستقیم نمونه‌ها

با اندازه‌گیری طیف جذب اپتیکی نانوذرات و استفاده از معادلات تائوک و کوبلکا-مانک، مقادیر شکاف اپتیکی ( $E_g$ ) مستقیم نانوذرات برآورد شد (شکل ۴). بر این اساس،  $E_g$  نمونه‌های  $\text{Ni}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  برای  $x=0.1, 0.2, 0.3, 0.5$  به ترتیب برابر مقدار  $1/59$ ،  $1/55$ ،  $1/51$ ،  $1/24$  و  $1/93$  الکترون ولت بدست آمد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار جانمایی Sr، مقادیر گاف اپتیکی مستقیم کاهش می‌یابد که به دلیل افزایش عیوب ساختاری در ساختار بلوری نمونه‌های آلاییده شده با استرانسیوم است.

جدول ۱: کمیت‌های مغناطیسی نمونه‌ها

$H_c$ (Oe)	$M_r$ ( $\frac{\text{emu}}{\text{g}}$ )	$M_s$ ( $\frac{\text{emu}}{\text{g}}$ )	$x$
90.80	8.37	40.99	0
146.63	10.13	34.20	0.1
152.28	6.48	27.52	0.2
122.26	3.91	21.47	0.3
255.71	7.53	23.55	0.5



شکل ۵: منحنی M-H نمونه‌ها

شکل ۵ و جدول ۱، به ترتیب منحنی M-H و کمیت‌های مغناطیسی نمونه‌ها در دمای اتاق را نشان می‌دهد. با جانمایی ۳۰٪ یون‌های نیکل با یون  $\text{Sr}^{2+}$ ، مغناطش کل فریت نیکل به صورت پیوسته کاهش می‌یابد و سپس برای نمونه  $x=0.5$ ، این نحوه تغییرات را می‌توان با استفاده از مدل نیل و بر اساس اشغال فضاهای چهاروجهی و هشت‌وجهی توسط یون‌های نیکل، استرانسیوم و آهن توجیه کرد. از طرف دیگر، با تغییر مقدار جانمایی استرانسیوم از  $x=0$  به  $x=0.2$ ، میدان وادارندگی از  $90.8\text{ Oe}$  به  $152.3\text{ Oe}$  افزایش می‌یابد. سپس برای مقدار  $x=0.3$ ، به مقدار  $122.3\text{ Oe}$  کاهش یافته و برای  $x=0.5$ ، مجدداً افزایش می‌یابد. افزایش مقدار  $H_c$  را می‌توان بدین صورت تحلیل کرد: با افزایش یون‌های  $\text{Sr}^{2+}$ ، گشتاورهای مغناطیسی نمونه به سختی به حالت تصادفی برمی‌گردند که به دلیل میخکوب شدن دیواره حوزها می‌باشد. بنابراین حلقه هیستریزس نمونه‌ها پهن‌تر شده و میدان وادارندگی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه، میدان وادارندگی با متوسط اندازه ذرات، رابطه عکس دارد، لذا از آنجائیکه با افزایش مقدار یون  $\text{Sr}^{2+}$  از  $x=0$  تا  $x=0.2$ ، اندازه دانه‌ها کاهش یافته، بنابراین  $H_c$  افزایش می‌یابد. برای  $x=0.3$ ، اندازه دانه‌ها افزایش یافته که منجر به کاهش  $H_c$  می‌شود. مقدار بالای وادارندگی فریت نیکل جانمایی شده با ۵۰٪ استرانسیوم را می‌توان به ناهمسانگردی مغناطیسی بلوری ترکیب، به دلیل درصد بالای فاز بلوری  $\text{SrFeO}_{2.97}$  نسبت داد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوذرات فریت نیکل جانمایی شده با استرانسیوم به روش سل-ژل خود احتراقی تهیه شدند. مشخصه‌یابی XRD، شکل‌گیری فاز اسپینل مکعبی فریت نیکل را برای تمامی نمونه‌های تکلیس شده، تأیید می‌کند. با اینحال، تنها دو نمونه فریت نیکل خالص و همچنین جانمایی شده با مقدار ۱۰٪ استرانسیوم، تک فاز هستند و برای مقادیر بیشتر جانمایی Sr، فاز ثانویه  $\text{SrFeO}_{2.97}$  نیز ظاهر می‌شود. نتایج آنالیز FTIR، شکل‌گیری ساختار اسپینل فریت نیکل و همچنین جانمایی یون‌های نیکل با یون‌های استرانسیوم را نشان می‌دهد. بر اساس تصاویر FESEM، شکل نانوذرات فریت نیکل-استرانسیوم، به صورت شبه‌کروی است. مشخصه‌یابی UV-Vis، نشان می‌دهد گاف اپتیکی مستقیم نانوذرات به طور پیوسته با افزایش مقدار استرانسیوم، کاهش می‌یابد. نتایج آنالیز VSM نمونه‌ها ضمن تأیید رفتار فری مغناطیسی نانوذرات، وابستگی کمیت‌های مغناطیسی از جمله مغناطش اشباع و میدان وادارندگی را به مقدار استرانسیوم، نشان می‌دهد.

## مراجع

- [1] Xian, G., Kong, S., Li, Q., Zhang, G., Zhou, N., Du, H., & Niu, L. (2020). Synthesis of spinel ferrite  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  (M= Co, Cu, Mn, and Zn) for persulfate activation to remove aqueous organics: effects of m-site metal and synthetic method. *Frontiers in chemistry*, 8, 177.
- [2] Narang, S. B., & Pubby, K. (2021). Nickel spinel ferrites: a review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 519, 167163.
- [3] Nejati, K., & Zabihi, R. (2012). Preparation and magnetic properties of nano size nickel ferrite particles using hydrothermal method. *Chemistry Central Journal*, 6(1), 1-6.