

## اثر جانمایی آنتیموان بر ویژگی ساختاری و مغناطیسی گارنت ایتریوم آهن تهیه شده به روش سل ژل

اسماء پرمهر<sup>۱</sup>، محمد نیایی فر<sup>۲\*</sup>، احمد حسن پور<sup>۲</sup>

۱- گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۲۱، نسخه نهایی: ۹۷/۲/۲۶)

**چکیده:** در این پژوهش نانو بلورکهای گارنت ایتریوم آهن شده با آنتیموان با فرمول ساختاری  $(\text{Sb-YIG}) \text{Sb}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  با  $x = 0, 0.1, 0.2$  به روش سل ژل تهیه شدند و اثر جانمایی آنتیموان بر ساختار بلوری توسط پراش سنج پرتو ایکس (XRD) و بیناب-سنجی تبدیل فوریه فرسرخ دور (Far FT-IR) بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌ها علاوه بر فاز گارنت دارای فازهای جانبی  $\text{YFeO}_3$  (YIP)،  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  بودند و با افزایش مقدار جانمایی، فاز گارنت کاهش یافته است. مقدار فاز گارنت و فازهای ناخالصی محاسبه شد و پس از آن درصد فاز آنتیموان جانمایی شده در جایگاه دوازدهوجهی بدست آمد. در پایان، ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات با استفاده از مغناطیس سنج نمونه‌ی ارتعاشی (VSM) بررسی شد که مشخص شد مغناطش اشباع  $\text{Sb-YIG}$  با افزایش جانمایی کاهش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** سل ژل؛ گارنت ایتریوم آهن؛ آنتیموان؛ بیناب سنجی تبدیل فوریه فرسرخ دور؛ مغناطیس سنج نمونه‌ی ارتعاشی.

### مقدمه

یون ایتریوم، جایگاه‌های چاروجهی (d) و هشتوجهی (a) توسط یون‌های آهن اشغال شده‌اند، به طوری که گشتاورهای مغناطیسی جایگاه‌های a و d به طور پادموازی نسبت به هم جهت‌گیری می‌کنند [۹]. جانمایی در ساختار YIG به‌ویژه در جایگاه دوازدهوجهی، باعث ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی جدیدی می‌شود که وابسته به شعاع یونی و ویژگی‌های مغناطیسی یون آلاینده است. طی دهه‌های گذشته،  $\text{Bi:YIG}$  نه تنها برای کاربرد آن در دستگاه‌های ریزموج و مغناطوپتیکی بلکه به دلیل رفتار مغناطیسی غیرعادی آن بطور گسترده بررسی شده است [۱۰-۱۶]. با گزارش اثر فارادی بزرگ در  $\text{Bi:YIG}$  به‌وسیله چتکین کشف نقش یون مغناطیسی  $\text{Bi}^{3+}$  در ویژگی‌های مغناطیسی  $\text{Bi:YIG}$

گارنت ایتریوم آهن با فرمول ساختاری  $(\text{YIG:Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12})$  یک ماده‌ی فری مغناطیس است که به علت داشتن پتانسیل‌های کاربردی بالا و ویژگی مغناطوپتیکی به طور گسترده در وسایل الکترونیکی برای گستره ریزموج [۱-۳] و همچنین در ابزارهای موج-بری ناوارون، قطعات مجتمع اپتیکی، حافظه‌های مغناطونوری با کارایی‌های بسیار بالا، چرخنده‌ها و جداکننده‌ها به کار می‌رود [۴-۷]. ساختار بلوری YIG، مکعبی با گروه فضایی  $O_h^{10} - Ia3d$  است که هر یاخته یکبه آن شامل هشت واحد فرمولی  $(\text{Y}_2^{3+})_c[\text{Fe}_2^{3+}]_a(\text{Fe}_3^{3+})_a\text{O}_{12}^{2-}$  است که c، a و d به ترتیب جایگاه‌های دوازدهوجهی، هشتوجهی و چاروجهی را نمایش می‌دهند [۸]. جایگاه‌های دوازدهوجهی توسط

روش سل ژل تهیه شدند. مواد به کار رفته در ساخت نانوذرات شامل نیترات آهن ۹ آبه  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  و نیترات ایتريوم ۶ آبه  $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  از شرکت مرک و استات آنتیموان  $Sb(CH_3CO_2)_3$  از شرکت آلدريج با خلوص حداقل ۹۹ درصد بودند. در این کار، نسبت سیترات به یون‌های نیترات ۳ در نظر گرفته شد. مواد اولیه و اسید سیتريك با مقادیر محاسبه شده بر پایه موازنه‌ی عنصری در آب مقطر حل و به منظور تنظیم  $pH = 2$ ، آمونیاک قطره قطره به محلول اضافه شد. سل آماده شده توسط یک همزن مغناطیسی در دمای  $85^\circ C$  به مدت یک ساعت به ژل غلیظی تبدیل شد، ژل بدست آمده به مدت ۴۸ ساعت در دمای  $115^\circ C$  گرما داده شد تا خشک شود و پس از سابیده شدن در کوره با آهنگ  $5^\circ C/min$  به مدت ۳ ساعت در دمای  $1000^\circ C$  گرمادهی (Far-FTIR) شد. الگوهای پراش پرتوایکس (XRD) با استفاده از دستگاه Rigaku 2013 تهیه شدند. طیف‌های تبدیل فوریه فروسرخ دور در گستره‌ی عدد موج  $150-700\text{ cm}^{-1}$  با استفاده از دستگاه Perkin Elmer مدل Spectrum 400 بدست آمدند. منحنی-های پسماند مغناطیسی نمونه‌ها توسط مغناطیس‌سنج نمونه‌ی ارتعاشی (VSM) ساخت شرکت Lake shore مدل 7400 مورد بررسی قرار گرفتند.

#### بحث و بررسی

##### بررسی ویژگی‌های ساختاری

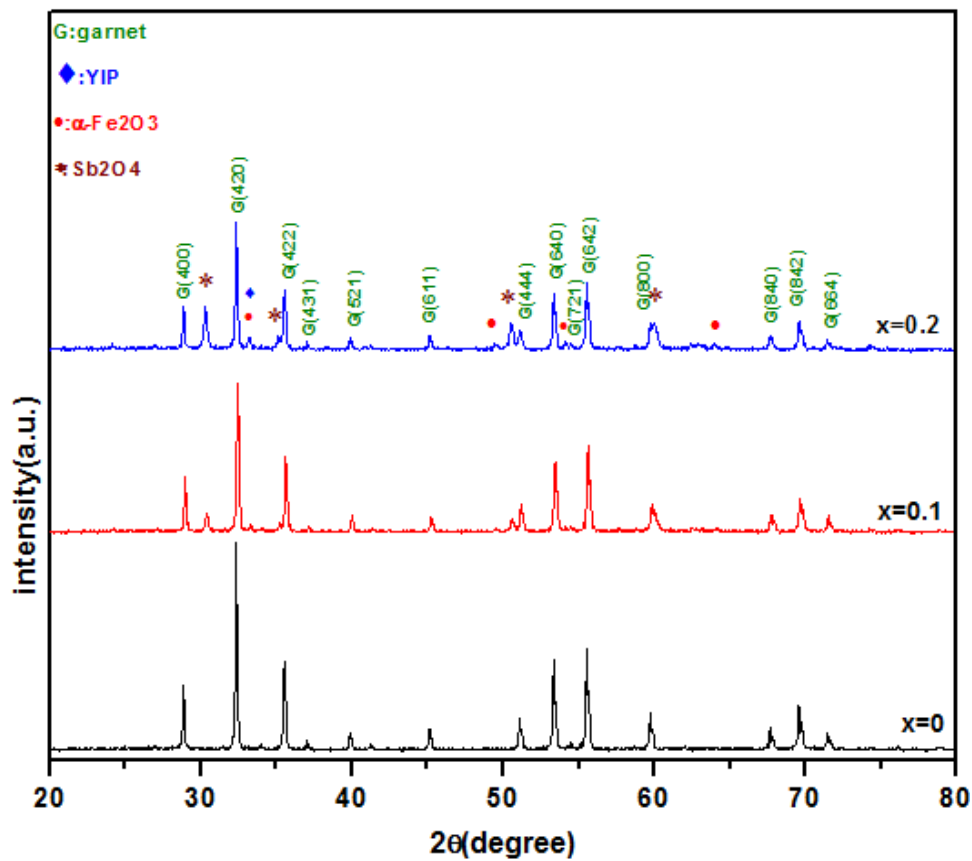
شکل ۱ الگوهای پراش پرتوایکس نانوذرات گارنت  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  را برای  $x = 0, 0.1$  و  $0.2$  نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در الگوی  $x = 0$  تنها فاز YIG دیده می‌شود، اما با افزایش جانشانی فازهای ناخالصی نیز ظاهر می‌شوند. در نمونه‌های  $x = 0.1$  و  $0.2$ ، در کنار فاز اصلی  $YFeO_3$  (YIG)، فازهای جانبی YIP،  $\alpha-Fe_2O_3$  و  $Sb_2O_4$  نیز ظاهر شدند. فاز YIG تشکیل شده با کارت استاندارد  $0693-033-00$ ، فاز YIP با کارت استاندارد  $2609-089-01$ ، فاز  $\alpha-Fe_2O_3$  با کارت استاندارد  $0664-033-00$  و فاز  $Sb_2O_4$  با کارت استاندارد  $1566-075-01$  همخوانی دارند. مقدار نسبی فاز گارنت و سایر فازهای جانبی توسط فرمول کلاگ، (رابطه ۱) محاسبه شد، که مقادیر آنها در جدول ۱ آمده است [۲۹]:

$$f_G = \frac{(I_G^{mix}/I_G^{pure})K_A}{K_G - (I_G^{mix}/I_G^{pure})K_A} \quad (1)$$

بسیار مورد توجه قرار گرفت [۱۷]. از این‌رو، پژوهش‌های بسیاری پیرامون رفتار مغناطیسی Bi:YIG انجام شده و دلیل افزایش مغناطش به تغییر شکل ساختاری و افزایش تبادل الکترونی [۱۹، ۱۸] ناشی از تغییر فاصله‌های  $Fe-O$  و زاویه‌ی  $Fe_{(d)}^{3+}-O-Fe_{(d)}^{3+}$  نسبت داده شده است. در این پژوهش‌ها، مشاهده کاهش اشباع مغناطیسی به یکی از دو عامل جایگاه‌های  $a$  و  $d$  در زیر شبکه‌های با جهت‌های گشتاور مغناطیسی کج شده‌ی متفاوت [۲۱] و اثر وزن اتمی بر چگالی آن نسبت داده شد [۲۲، ۲۳]. بر پایه نتایج پژوهشی اخیر [۲۴]، همپوشی اوربیتال‌های اتمی، و هیبریدشدگی اوربیتال‌های  $6p$  بیسموت در اوربیتال  $3d$  آهن باعث نرخ رشد رفتار مغناطیسی بیسموت در نانوذرات گارنت می‌شود. در این بررسی، برخلاف انتظار، یون دیامغناطیس بیسموت در تغییر مغناطش تاثیرگذار بود. پیش‌بینی می‌شود که به دلیل هم‌گروه بودن دو عنصر آنتیموان و بیسموت در جدول تناوبی و تشابه ویژگی‌های ساختار الکترونی و مغناطیسی آنها، در جانشانی آنتیموان در ساختار گارنت ایتريوم آهن رفتاری مشابه گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با بیسموت از خود دیده می‌شود. از این‌رو، بررسی نقش مغناطیسی یون دیامغناطیس Sb در ساختار YIG بسیار جالب به نظر می‌رسد. گزارش معتبری از ساخت و بررسی ویژگی‌های مغناطیسی گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با آنتیموان سه ظرفیتی مشاهده نشده است. اورازیو و همکاران تنها به بررسی ویژگی مغناطیسی گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با آنتیموان پنج ظرفیتی پرداخته‌اند [۲۵-۲۸]. در این پژوهش نانوذرات گارنت به روش سل‌ژل تهیه و یون دیامغناطیس آنتیموان به جای یون‌های دیامغناطیس ایتريوم جانشانی شدند. انتظار می‌رود که با این جانشانی ویژگی مغناطیسی YIG آلائیده با  $Sb^{3+}$  بدون تغییر بماند. هدف از این پژوهش بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانو ذرات Sb-YIG و تطبیق رفتار این نانوذرات با نانوذرات Bi-YIG است.

#### روش ساخت

نانوذرات گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با آنتیموان ترکیب  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  و مقادیر جانشانی  $x = 0, 0.1, 0.2$  به



شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  با مقادیر جانشانی  $x=0, 0.1, 0.2$ .

جدول ۱ مقادیر فازهای YIP، YIG،  $Sb_2O_4$  و  $\alpha-Fe_2O_3$  موجود در نمونه‌های  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  با مقادیر جانشانی  $x=0, 0.1, 0.2$

نام نمونه	فاز YIG	فاز YIP	فاز $\alpha-Fe_2O_3$	فاز $Sb_2O_4$
$x=0$	۱۰۰٪	۰	۰	۰
$x=0.1$	۷۵٪	۸٪	۱۴٪	۳٪
$x=0.2$	۷۱٪	۷٪	۱۴٪	۸٪

ساختار  $Sb$ -YIG وارد نمی‌شود عبارت است از  $0.14 + 0.40 + 0.7 \times 0.2 = 0.170$  و مقدار آنتیموان جانشانی نشده در سیستم  $0.264 = 0.8 \times 0.33$  است. که با کم کردن آن از مقدار جانشانی، درصد فازی آنتیموان جانشانی شده در جایگاه دوازده‌وجهی  $0.1736 = 0.264 - 0.2$  بدست می‌آید. مقادیر محاسبه شده برای درصد فازی آنتیموان جانشانی شده در جایگاه دوازده‌وجهی برای نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است. دیده می‌شود که در جانشانی‌های کمتر، مقدار بیشتری آنتیموان در ساختار گارنت قرار می‌گیرد. آنتیموان در جایگاه

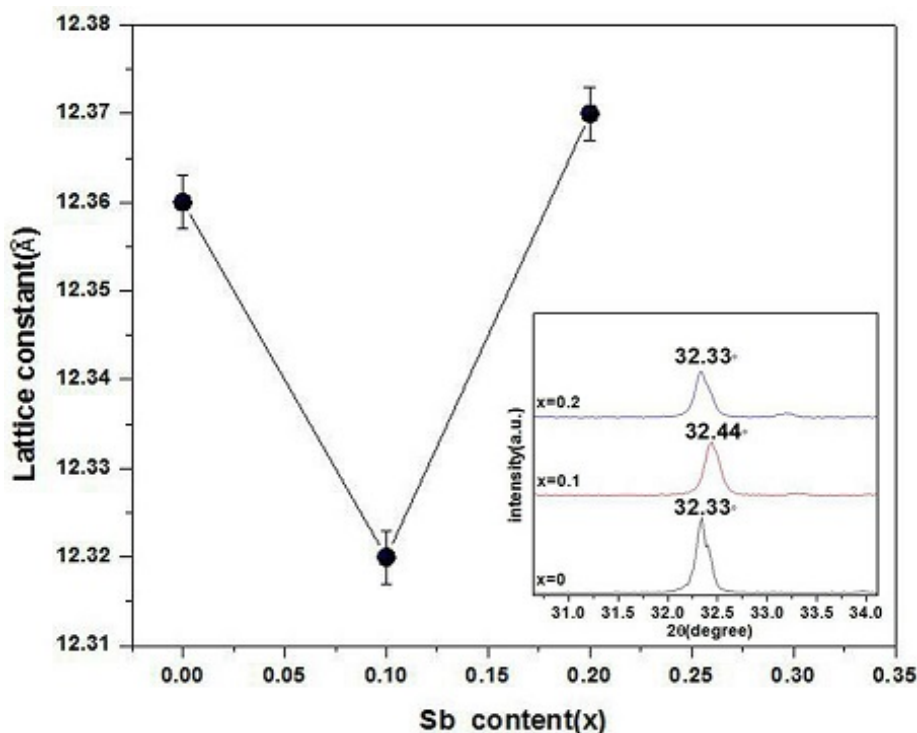
در این رابطه،  $f_G, K_G, K_A$  و  $I_G^{pure}$  و  $I_G^{mix}$  به ترتیب کسر وزنی، ضریب وزن جرمی، شدت فاز در حالت ترکیبی و حالت خالص فاز گارنت است،  $K_A$  برای فازهای YIP،  $\alpha-Fe_2O_3$  و  $Sb_2O_4$  به ترتیب بصورت  $K_{YIP}, K_{\alpha-Fe_2O_3}$  و  $K_{Sb_2O_4}$  است. برای محاسبه درصد آنتیموان جانشانی شده، از آنجاکه یک پنجم ساختار  $YFeO_3$  و دو پنجم ساختار  $\alpha-Fe_2O_3$  آهن و سه پنجم ساختار  $Sb_2O_4$  آنتیموان است، بنابراین می‌توان مقدار آهن و آنتیموان مربوط به هر فاز را در نمونه‌ها محاسبه کرد. برای مثال، در نمونه  $x=0.2$ ، که ۷٪ فاز YIP و ۱۴٪ فاز  $\alpha-Fe_2O_3$  و ۸٪ فاز  $Sb_2O_4$  وجود دارد، مقدار آهنی که در

هشت وجهی و چاروجهی نیز اختلال ایجاد می کند و مقداری از آهن به صورت فاز  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ظاهر می شود. یحیی و همکاران [۳۰] با جانشانی آلومینیم در جایگاه ایتريوم نشان دادند که یون های آلومینیم بطور جزئی اشغال جایگاه های چاروجهی و هشت وجهی را بر جایگاه دوازده وجهی ترجیح می دهند. آن ها این موضوع را به کوچکتر بودن شعاع یونی آلومینیم ( $0.5 \text{ \AA}$ ) نسبت به شعاع یونی ایتريوم ( $1.016 \text{ \AA}$ ) نسبت دادند. برپایه محاسبات انجام شده برای مقدار آنتیموان جانشانی شده در جایگاه دوازده وجهی دیده می شود که آنتیموان نیز به علت کوچکتر بودن شعاع یونی آن ( $0.9 \text{ \AA}$ ) نسبت به ایتريوم ( $1.016 \text{ \AA}$ ) به طور کامل در جایگاه دوازده وجهی قرار نمی گیرد.

اندازه متوسط بلورکها با استفاده از رابطه شرر

جدول ۲ مقدار واقعی آنتیموان جانشانی شده در جایگاه دوازده وجهی برای نمونه های  $\text{Sb}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  با مقادیر جانشانی  $x = 0, 0.1, 0.2$

مقدار واقعی آنتیموان جانشانی شده در جایگاه C	مقدار آنتیموان اضافه آمده در سیستم	مقدار آهن اضافه آمده در سیستم	مقدار ایتريوم اضافه آمده در سیستم	نام نمونه
۰٫۱۹۰۱	۰٫۰۰۹۹	۰٫۰۷۲	۰٫۰۱۶	$x = 0.1$
۰٫۱۷۳۶	۰٫۰۲۶۴	۰٫۰۷۰	۰٫۰۱۴	$x = 0.2$



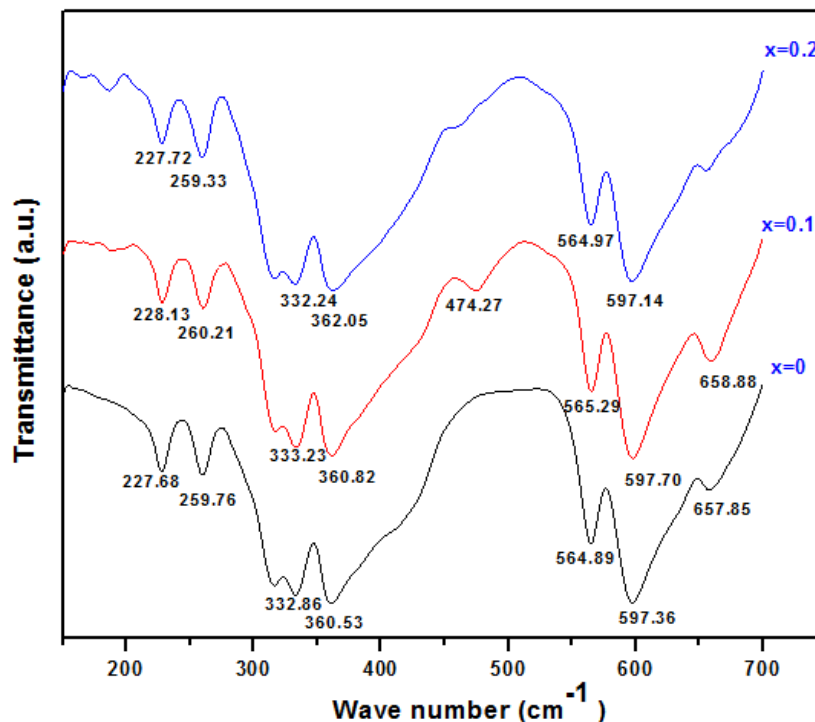
شکل ۲ تغییرات ثابت شبکه نمونه های  $\text{Sb}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  با مقادیر جانشانی  $x = 0, 0.1, 0.2$

نوار موجود در  $474.27 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به مد  $\nu_3$  است. نوارهای موجود در  $259.33$ ،  $316.12$ ،  $362.05$  و  $360.53 \text{ cm}^{-1}$  را نمی‌توان با توجه به گزارشات پیشین به مد R نسبت داد [۳۶، ۳۵].

با توجه به نخستین قانون انتخاب، انتقال بین اوربیتال‌های d برای جایگاه با تقارن مرکزی غیرممکن است. به همین علت، کمبود تقارن مرکزی، انتقال بین اوربیتال‌های d را ممکن می‌کند. با توجه به اینکه جایگاه چاروجهی دارای تقارن مرکزی کمتری در مقایسه با جایگاه هشت‌وجهی است، بنابراین مشاهده شدت جذب قوی‌تر برای نوارهای جایگاه چاروجهی قابل انتظار است [۳۷]. بیناب‌های IR برای همه نمونه‌ها یک جابجایی کوچک در نوارهای جذب را نشان می‌دهد. جانشانی کاتیون موجب ایجاد نوار جدید، جابجایی نوارها و جداسازی در جایگاه جانشانی می‌شود و در دیگر جایگاه‌ها ممکن است تنها پهن‌شدگی و جابجایی رخ دهد [۳۸]. نوارهای ظاهر شده‌ی مربوط به نمونه‌ی  $x = 0$ ، برای نمونه‌ی  $x = 0.2$  در  $597.14$  و  $564.97 \text{ cm}^{-1}$  قرار دارند که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی وارد شدن یون  $\text{Sb}^{3+}$  در جایگاه دوازده‌وجهی ساختار گارنت ایتریوم آهن باشد. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده می‌توان جابه‌جایی و پهن‌شدگی در بیناب فروسرخ دور نمونه‌ها را به جانشانی  $\text{Sb}^{3+}$  در جایگاه دوازده‌وجهی نسبت داد.

شکل ۳ بیناب‌های تبدیل فوریه فروسرخ دور نمونه‌های  $\text{Y}_{3-x}\text{Sb}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  با مقادیر جانشانی ۰، ۰٫۱ و ۰٫۲ را نشان می‌دهد که برای بررسی ارتعاشات یون اکسیژن با کاتیون‌های موجود در ساختار YIG تهیه شده‌اند. با توجه به نظریه گروه، ۹۸ مد ارتعاشی فعال در نخستین منطقه بریلوئن وجود دارد که ۱۷ مد ارتعاشی فعال برای بیناب فروسرخ دور پیش‌بینی می‌شود که عبارتند از ۳ مد کششی نامتقارن چاروجهی ( $\nu_3$ )، ۳ مد خمشی نامتقارن و یک مد خمشی متقارن هشت‌وجهی ( $\nu_2, \nu_4$ )، ۲ مد چرخشی R چاروجهی، ۲ مد انتقالی (T) چاروجهی، ۳ مد انتقالی مربوط به کاتیون جایگاه دوازده‌وجهی ( $T_d$ ) و ۳ مد انتقالی کاتیون‌های هشت‌وجهی ( $T_o$ ) [۳۴].

در شکل ۳ نوارهای ظاهر شده در عددهای موج  $657.85$ ،  $597.36$ ،  $564.97$  و  $565.29 \text{ cm}^{-1}$  برای نمونه  $x = 0$  مربوط به مد کششی نامتقارن جایگاه چاروجهی ( $\nu_3$ ) است. در اینجا چون شعاع یونی آنتیموان از ایتریوم کوچکتر است و همچنین ثابت شبکه نخست کاهش و در نمونه‌ی  $x = 0.2$  افزایش یافته است دیده می‌شود که جایگاه آن‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. نوار موجود در  $362.05 \text{ cm}^{-1}$  را می‌توان  $\nu_2$  در نظر گرفت و نوار موجود در  $332.86 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به مد  $T_o$  است.



شکل ۳ طیف‌های تبدیل فوریه فروسرخ دور نمونه‌های  $\text{Sb}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  با مقادیر جانشانی (۰، ۰٫۱، ۰٫۲).

## بررسی ویژگی‌های مغناطیسی

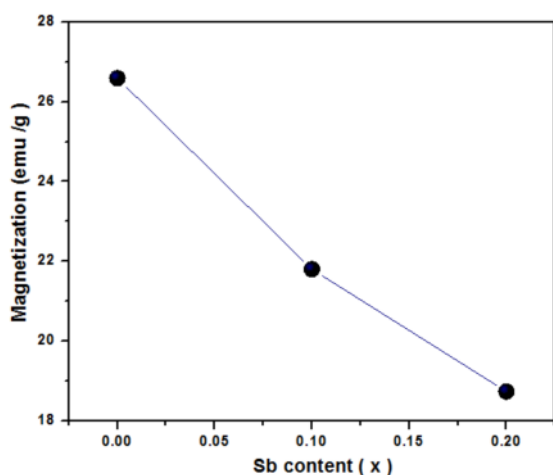
شکل ۴ الف منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  با مقادیر جانشانی  $x = 0, 0.1, 0.2$  را در دمای اتاق نشان می‌دهد. تغییرات مغناطش اشباع ( $M_S$ ) نمونه‌ها نسبت به مقادیر جانشانی نیز در شکل ۴ ب نشان داده شده که به صورت کاهشی است. این موضوع که وجود فازهای YIP و  $\alpha-Fe_2O_3$  باعث کاهش مغناطش می‌شود با گزارش‌های پیشین همخوانی کامل دارد [۳۹]. از آنجاکه نمونه‌ها شامل چهار فاز  $Sb_2O_4$ ،  $\alpha-Fe_2O_3$ ، YIP، YIG هستند، شکل ۴ ب نمی‌تواند شکل صحیحی برای بیان تغییرات مغناطش  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  باشد؛ به عبارتی باید سهم مغناطش فازهای

جانبی را از مغناطش کل کم کرد تا مغناطش

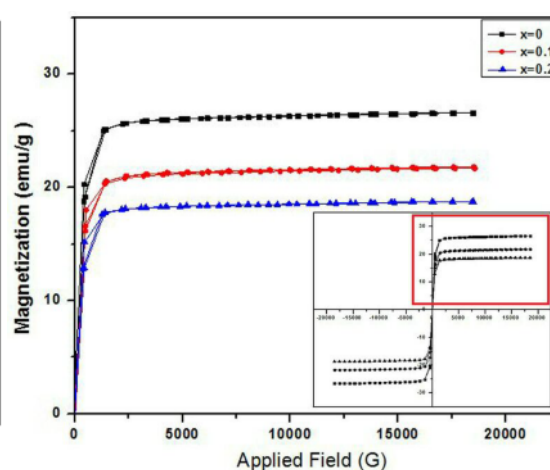
$Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  به دست آید:

$$\begin{aligned} \text{مغناطش اشباع هر نمونه} &= (\text{درصد فاز Sb-YIG}) \times \\ & \times (\text{مغناطش اشباع Sb-YIG}) + (\text{درصد فاز YIP}) \times \\ & \times (\text{مغناطش اشباع YIP}) + (\text{درصد فاز } \alpha-Fe_2O_3) \times \\ & \times (\text{مغناطش اشباع } \alpha-Fe_2O_3) \end{aligned} \quad (۲)$$

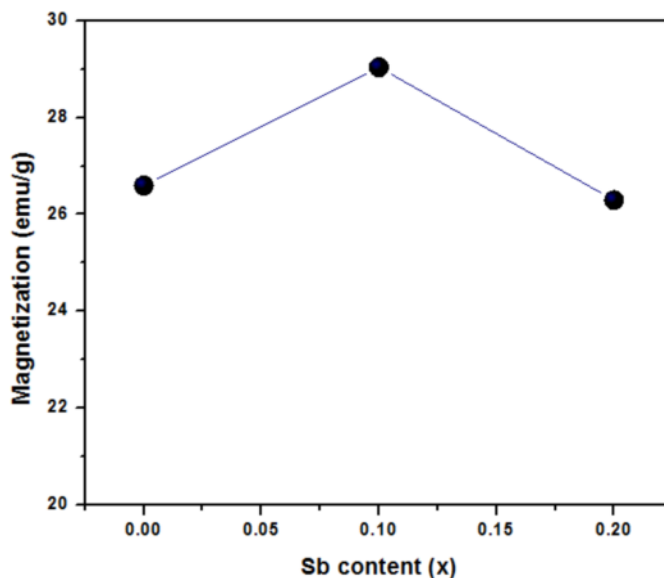
مغناطش اشباع  $M_S$  (YIP) تقریباً برابر  $\frac{27714}{g}$  و  $0.18$  مغناطش اشباع  $\alpha-Fe_2O_3$  تقریباً برابر  $\frac{27714}{g}$  و  $0.3$  است [۴۱،۴۰]. مغناطش اشباع همه نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه شده و در جدول ۳ آمده است.



(ب)



(الف)



شکل ۴ الف) منحنی‌های پسماند مغناطیسی و ب) تغییرات مغناطش اشباع با در نظر گرفتن فازهای جانبی نمونه‌های  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  با مقادیر جانشانی  $x = 0, 0.1, 0.2$  بدون در نظر گرفتن فازهای جانبی نمونه‌های  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  با مقادیر جانشانی  $x = 0, 0.1, 0.2$ .

جدول ۳ مقادیر مغناطش اشباع نانو ذرات گارنت  $Sb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  با جانشانی ۰٫۲، ۰٫۱

نام نمونه	فاز YIP	مغناطش YIP	فاز $Fe_2O_3$	مغناطش $Fe_2O_3$	فاز Sb-YIG	مغناطش Sb-YIG
$x = 0$	۰	۰٫۱۸	۰	۰٫۳	۱۰۰٪	۲۶٫۵۹۴
$x = 0٫۱$	۸٪	۰٫۱۸	۱۴٪	۰٫۳	۷۵٪	۲۹٫۰۴۰
$x = 0٫۲$	۷٪	۰٫۱۸	۱۴٪	۰٫۳	۷۱٪	۲۶٫۲۹۴

مختلف گشتاور مغناطیسی یون‌های آهن در مکان‌های a و d که باعث کاهش در مغناطش می‌شود، نسبت داده شود. این توضیحات با گزارشات مربوط به یون دیامغناطیس  $Bi^{3+}$  که در جدول تناوبی در همسایگی  $Sb^{3+}$  قرار گرفته است همخوانی دارد [۲۴، ۱۹، ۸].

#### برداشت

در این پژوهش، نانوذرات گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با آنتیموان به روش سل ژل ساخته شد، نمونه‌ی بدون جانشانی دارای فاز کامل گارنت بود، اما با جانشانی آنتیموان در کنار فاز گارنت، فازهای جانبی  $YFeO_3$  (YIP)،  $\alpha-Fe_2O_3$  و  $Sb_2O_4$  ظاهر شدند که با افزایش جانشانی درصد فازهای ناخالصی بیشتر شد. مقدار نسبی فاز گارنت و سایر فازهای جانبی با استفاده از رابطه‌ی کلاگ محاسبه شد. محاسبات نشان داد که همه کاتیون‌های  $Sb^{3+}$  به طور کامل در جایگاه دوازده‌وجهی جانشانی نشده و مقداری آنتیموان به صورت فاز جانبی نمایان شده است. بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها بدون در نظر گرفتن فازهای جانبی نشان داد که مغناطش اشباع یک روند افزایشی و سپس کاهش‌ی دارد که روند افزایشی به افزایش برهم‌کنش‌تبادلی و گشتاور مغناطیسی یون  $Sb^{3+}$  و کاهش به جهت‌گیری گشتاور مغناطیسی یون‌های آهن در مکان‌های a و d که باعث کاهش در مغناطش می‌شود، نسبت داده شد.

#### مراجع

[1] J. S. Kum, S. J. Kim, I. B. Shim and Ch. S. Kim; "Magnetic properties of Ce, substituted yttrium iron garnet ferrite powders fabricated using

با توجه به مقادیر محاسبه شده در جدول ۳، نمودار تغییرات مغناطش برحسب افزایش مقادیر جانشانی بدون در نظر گرفتن فازهای اضافی در شکل ۴ پ، ۵ نشان داده شده است. دیده می‌شود که افزایش مغناطش اشباع برای نمونه‌های  $x = 0$  تا  $x = 0٫۱$  افزایش و سپس در  $x = 0٫۲$  کاهش یابد. بر پایه نظریه نیل، گشتاورهای مغناطیسی یون‌های آهن در زیر شبکه‌های a و d نسبت به یکدیگر دارای نظم پادفرو مغناطیس هستند، بنابراین مغناطش کل ساختار YIG برابر است با [۴۲]:

$$M = |M_d - M_a| - M_c \quad (3)$$

که مقدار مغناطش جایگاه c به دلیل وجود یون دیامغناطیس  $Y^{3+}$  در این جایگاه صفر است. با توجه به اینکه یون  $Sb^{3+}$  دارای اربیتال آخر  $5s^2$  است، همانند یک یون دیامغناطیس است. پس انتظار می‌رود که با جانشانی این یون در جایگاه دوازده‌وجهی مغناطش اشباع ثابت بماند، اما جانشانی یون  $Sb^{3+}$  که به‌عنوان یک یون مغناطیسی عمل می‌کند باعث تغییر مغناطش می‌شود. در جانشانی آنتیموان، در جایگاه c دو یون دیامغناطیس ایتريوم و آنتیموان وجود دارند، پس باید مغناطش جایگاه c صفر باشد، اما در واقع چنین نیست. با توجه به پژوهش‌های انجام شده بر روی بیسموت می‌توان گفت که آنتیموان باعث افزایش برهم‌کنش‌تبادلی به وسیله هیبریدشدگی اربیتال  $5p$  آنتیموان در اربیتال  $3d$  آهن جایگاه چاروجهی می‌شود. این پدیده موجب می‌شود که یون آنتیموان به عنوان یک یون مغناطیسی عمل کند. بنابراین، افزایش مغناطش اشباع تا  $x = 0٫۱$  می‌تواند به افزایش برهم‌کنش‌تبادلی و گشتاور مغناطیسی یون  $Sb^{3+}$  نسبت داده شود. کاهش در  $M_s$  نمونه‌های  $x = 0٫۱$  تا  $x = 0٫۲$  می‌تواند به راستاهای



- method", J. Appl. Phys. 97 (2005)pp. 013516-0135164.
- [11] Hansen P., Witter K., Tolksdorf W., "Magnetic and magneto-optic properties of lead- and bismuth-substituted yttrium iron garnet films", Phys. Rev. B27(1983)pp. 6608-6625.
- [12] Matsumoto K., Yamaguchi K., Fujii T., "Preparation of bismuth-substituted yttrium iron garnet powders by the citrate gel process", J. Appl. Phys. 69(1991)pp. 5918-5920.
- [13] Hasanpour A., Mozaffari M., Amighian J., Richert H., Lorenz A., Linder M., Gornert P., Heegn H., "Preparation and magneto-optical properties of  $BiY_2Fe_5O_{12}$  organic nanocomposite films", J. Magn. Magn. Mater. 317(2007)pp. 41-45.
- [14] Kawai N., Komuro E., Namikawa T., Yamazaki Y., "Preparation of Bi-YIG particles for display devices", IEEE Trans. Magn. 30(1994)pp. 4446-4448.
- [15] Kuroda C. S., Taniyama T., Kitamoto Y., Yamazaki Y., "Magneto-optical properties and morphology of particulate film consisting of Bi-YIG coprecipitated particles", J. Magn. Magn. Mater. 241(2002)pp. 201-206.
- [16] Fu Y. P., Hung D. S., Cheng, C. W., Tsai F. Y., Yao Y. D., "Non-isothermal crystallization kinetics and microwave properties of  $Bi_{0.75}Y_{2.25}Fe_5O_{12}$  prepared by coprecipitation", Ceram. Int. 35 (2009) pp. 559-564.
- [17] Chetkin M. V., Morozova I. G., Tyutneva G. K., "Farady effect mechanisms in ferrimagnets" Sov. Phys. Sol. State 9(1968)pp. 2852.
- [18] Geller S., Colville A. A., "Increased Curie temperature and superexchange interaction in bismuth and vanadium substituted YIG", AIP Conference Proceedings No. 24, AIP, New York, (1975) pp. 372-373.
- [19] Scott G. B., Lacklison D. E., Page J., Hewett L. J., "Absorption spectra and magneto-optic figures of merit in the  $Bi_xSm_{3-x}Fe_{5-y}Ga_yO_{12}$  system", Appl. Phys. 9(1976)pp. 71-77.
- [20] Geller S., "in Physics of Magnetic Garnet, A. Paoletti(Ed), North-Holland", New York, 1978.
- a sol-gel method", Journal of Magnetism and magnetic materials 272-276, (2004)pp. 2227-2229.
- [2] A.V. Nazarov, D. Menard, J. J. Green, C. E. Patton, G. M. Argentina, H. J. Van Hook, "Near theoretical microwave loss in hot isostatic pressed (hipped) polycrystalline yttrium iron garnet"; Journal of Applied Physics, vol. 94, no, 11, (2003)pp. 7227-7234.
- [3] T. Aichele, A. Lorenz, R. Hergt, and P. Gornert, "Garnet layers prepared by liquid phase epitaxy for microwave and magneto-optical applications-a review", Crystal Research and Technology, vol. 38, no. 7-8, (2003), pp. 575-587.
- [4] Ristic M., Nowik I., Popovic S., Felner I., Music S., "Influence of synthesis procedure on the YIG formation", Materials Letters 57 (2003)pp. 2584-2590.
- [5] Ravi B. G., Guo X. Z., Yan Q.Y., Gambino R. J., Sampath S., Parise J. B., "Phase evolution and magnetic properties of Al substituted yttrium iron garnet nanopowders and plasma-sprayed coatings", Surface and Coatings Technology 201 (2007)pp. 7597-7605.
- [6] Wang C. C., Yu W. T., "Synthesis of yttrium iron garnet using polymer-metal chelate precursor", Journal of Colloid and Interface Science 306 (2007)pp. 241-247.
- [7] Lee J. W., Oh J. H., "Magneto-optical properties of Bi-YIG nanoparticles dispersed in the organic binder", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 272 (2004)pp. 2230-2232.
- [8] M. Niyafar, H. Mohammadpour, "study on magnetic role of  $Bi^{3+}$  ion by random cation distribution model in Bi-YIG system", Journal of Magnetism and magnetic materials 396(2015)pp. 65-70.
- [9] Menzer G., "Die kristall structure der granate", z. kristallogr 69 (1928)pp. 300-396.
- [10] Ishibashi A., Mizusama M., Nagai S., Shimizu K., Shimizu K., Sato N., Togashi T., Mogi M., Houchido H., Sano K., Kuriyama, "Characterization of epitaxial  $(Y, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$  thin films grown by metalorganic decomposition



- Borkowski, Majid Niaz Akhtar, Muhammad Kashif, Mansor Hashim, "Morphology and magnetic characterization of Aluminium substituted Yttrium-Iron Garnet nanoparticles prepared using sol gel technique", Journal of nanoscience and nanotechnology, Vol. 11, (2011) pp. 2652-2656.
- [31] Kim C. S., Min B. K., Kim S. J., Yoon S. R., Uhm Y. R., "Crystallographic and magnetic properties of  $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ ", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 254-255 (2003)pp. 553-555.
- [32] Azadimotlagh Z., Mozaffari M., Amighian J., "Preparation of nano-sized Al-substituted yttrium iron garnet by the mechanochemical method and investigation of their magnetic properties", Journal of Magnetism and Magnetic Material 321(2009)pp. 1980-1984.
- [33] Beh H.G., Irmawati R., Noorhana Y., Lim K.P., "Phase Evolution and Crystallite size of La-Substituted YIG at different calcination temperatures", International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol:09 No:09 (2009) pp. 59-62.
- [34] Hofmeister A. M., Campbell K. R., "Infrared Spectroscopy of Yttrium aluminum, Yttrium aluminum, Yttrium Gallium and Yttrium Iron Garnet", J. Applied Phys (1992)pp. 638-646.
- [35] Fehine A. B. P., Silva E. N., Menezes A. S., Derov J., Stewart J. W., Drehman A. J., Vasconcelos A. F., Ayala A. P., Cardoso L. P., J. Phys chem solid 70(2009)pp. 202-209.
- [36] Hofmeister A. M., "Infrared microspectroscopy. In H. J. Humecki, Ed., Practical Guide to Infrared Spectroscopy, 2nd ed". Marcel Dekker, New York (1995) pp. 377-416.
- [37] Shaeel A, Al-Thabait, "Synthesis and characterization of a new cobalt poly-meric spinels", Commun. dela Facult'e des Sci. de l'Universit'e d'Ankara 49 (2003)pp. 5-14.
- [38] Hild E., Beregi E., "IR spectroscopic investigation of the garnet materials used in the microwave electronics", Chemical Engineering 30 (1986)pp. 235-246.
- [21] Xu H., Yang H., Xu W., Yu L., "Magnetic properties of Bi-doped  $Y_3Fe_5O_{12}$  nanoparticle", Curr. Appl. phys. 8(2008)pp. 1-5.
- [22] Amighian J., Hasanpour A., Mozaffari M., "The effect of Bi mole ratio on phase formation in  $Bi_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  nanoparticles", Phys. Status Solidi 1(2004)pp. 1769-1771.
- [23] Niyafar M., Ramani M., Radhakrishna C. M., Mozaffari M., Hasanpour A., Amighian J., "Magnetic studies of  $Bi_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  fabricated using conventional method Hyperfine Interact", 187(2008)pp. 137-141.
- [24] Rogalev A., Goulon J., Wilhelm F., Brouder Ch., Yaresko Ch., Ben Youssef J., Indenbom M.V., "Element selective X-ray magnetic circular and linear dichroisms in ferromagnetic yttrium iron garnet films", J.Magn. Magn. Mater. 321 (2009) pp. 3945-3962.
- [25] D'Orazio F., Giammaria F., Lucari F., "Anomalies in the temperature dependence of Faraday rotation on yttrium iron garnets doped with Sn, Zr, or Sb", Journal of Applied Physics 70, (1991)pp. 6295-6297.
- [26] D'Orazio F., Lucari F., Tomassetti G., Desvigenes J. M., "Near infrared magneto-optical effects in Sb doped YIG", Journal of magnetism and magnetic materials 31-34 (1983) pp. 593-594.
- [27] D'Orazio F., Lucari F., Terrenzio E., Tomassetti G., "Annealing effects on YIG:Sn, YIG:Sb and YIG:Zr probed by measurements of magnetic linear dichroism", Journal of magnetism and magnetic materials 54-57 (1986) pp. 1389-1390.
- [28] D'Orazio F., Giammaria F., lucari F., Parone G., "Near ir farady rotation on YIG doped with tetravalent and pentavalent elements", Journal DE physique (1988)pp. C8-969-C8-970.
- [29] Hassanpour A., Niyafar M., Mohammadpour H., Amighian J., "A novel non-thermal process of  $TiO_2$ -shell coating on  $Fe_3O_4$ -core nanoparticles", Journal of Physics and Chemistry of solids 73 (2012) pp. 1066-1070.
- [30] Noorhana Yahya, Ramadan Masoud Al Habashi, Krzysztof Koziol, Rafal Dunin

and uses", Wiely vch verlag GmbH,(2003)pp. 111-137.

[42] Thongmee S., Winotai P., Tang I. M., "Local field fluctuations in the substituted aluminum iron garnets,  $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ ", Solid State Communications 109 (1999) pp. 471-476.

[39] Hudson. A. S., J, Phys D Apply Phy. 3,(1970)251-261.

[40] Lirong Luo, Wei Wei, Yueyong Yuan, Kai Shen, Mingxiang Xu, Qingyu Xu., "Multiferroic properties of Y-doped  $BiFeO_3$ ", Journal of Alloys and compounds 540(2012)pp. 36-38.

[41] Cornell R. M., Schwertman u., "The iron oxide: structure, properties, reactions, occurences