

## اثر حضور وانادیم بر ساختار و خواص مغناطوسالاستیکی ترکیبات $YFe_{12-x}V_x$

خندان فدافن، حسن<sup>۱</sup> - علی نژاد، محمدرضا<sup>۲</sup> - تجیر، ناصر<sup>۲</sup> - فروشارت، دانیل<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گرگان، دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک، پست الکترونیکی: [Khandan@mail.gau.ac.ir](mailto:Khandan@mail.gau.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده علوم پایه - آزمایشگاه تحقیقاتی حالت جامد

<sup>۳</sup> فرانسه، گرونوبل، مرکز ملی تحقیقات علوم CNRS.

### چکیده

آلیاژهای فرومغناطیس  $YFe_{12-x}V_x$  ( $0.5 \leq x \leq 3.5$ ) تهیه و پس از مطالعات ساختاری، انبساط گرمایی و مغناطوتنگش آنها به روش پیمانانه کرنش سنج اندازه گیری شد. تحلیل طرح های پراش پرتو X نشان می دهند که افزایش جایگزینی وانادیم به جای آهن در این ترکیبات، پارامترهای شبکه را افزایش می دهد، در حالی که ساختار بلوری ترکیب بدون تغییر باقی می ماند. نتایج اندازه گیری انبساط گرمایی ترکیبات نشان می دهد که اگرچه رفتار انبساط گرمایی ترکیبات با میزان حضور وانادیم تغییر نمی کند، اما ضریب انبساط گرمایی برای  $x=2$  کمینه می شود. همچنین نتایج اندازه گیری مغناطوتنگش نشان دهنده افزایش مغناطوتنگش ناهمسانگرد با دما به ازای  $x=2$  برخلاف سایر مقادیر  $x$  است. منحنی های مغناطوتنگش حجمی نشان می دهند که ناهمسانگردی حجمی در میدان های قوی مثبت بوده و با میدان به طور تقریباً خطی افزایش می یابد، در حالی که در میدان های ضعیف دارای کمینه ای وابسته به  $x$  است. این نتایج بر اساس تاثیر حضور وانادیم بر مغناطش و ناهمسانگردی مغناطیسی ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  توضیح داده شده اند.

### مقدمه

حضور عنصر  $M$  ( $M = V, Ti, Mo, \dots$ ) در ترکیبات  $RFe_{12-x}M_x$  ( $R$  بیانگر عنصر خاکی نادر است) برای پایدارسازی ساختار بلوری این ترکیبات ضروری است. این در حالی است که افزایش میزان  $M$  در این ترکیبات موجب تضعیف خواص مغناطیسی می شود [۱]. برخلاف باور رایج، این عناصر پایدارساز ساختار، غیرمغناطیسی نیستند، ولی می توانند در برخی ترکیبات، گشتاور مغناطیسی پادموازی با گشتاورهای آهن داشته باشند [۱ و ۲]. بنابراین حضور آنها نه تنها بر برهم کنشهای مغناطیسی زیرشبکه آهن تاثیر می گذارد، بلکه ناهمسانگردی میدان بلوری زیرشبکه خاکی نادر را نیز تغییر می دهد. در تحقیق حاضر، نقش حضور عنصر  $M=V$  بر برهم کنشهای مغناطوسالاستیکی زیرشبکه آهن، با انتخاب عنصر غیرمغناطیسی  $Y$  به جای خاکی نادر، بررسی می شود. تاثیر جایگزینی وانادیم به جای آهن بر خواص مغناطوسالاستیکی از قبیل انبساط گرمایی و مغناطوتنگش، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۳]. ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  با مقادیر کم وانادیم ( $x \leq 2$ ) به دلیل میدان ناهمسانگردی بیش از  $2 T$  در دمای اتاق، پس از بهبود دمای کوری به عنوان انتخاب مناسبی برای کاربردهای آهنربای دائمی مورد توجه قرار دارند [۴ و ۵]. گزارشات قبلی نشان می دهند که مغناطش اشباعی، دمای کوری و ناهمسانگردی مغناطیسی ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  با افزایش حجم یاخته اولیه ناشی از افزایش میزان وانادیم کاهش می یابد [۶]. عموماً چنین گفته می شود که تغییرات

خواص مغناطیسی این ترکیبات شبیه تغییرات مشاهده شده در اثر نفوذ کربن در آنهاست [۷]. علاوه بر این اتم‌های وانادیم تنها جایگزین اتم‌های آهن در جایگاه‌های  $8i$  ساختار  $ThMn_{12}$  می‌شوند و جایگاه‌های  $8f$  و  $8j$  منحصر با اتم‌های آهن اشغال شده‌اند، بطوریکه گستره جایگزینی وانادیم به  $0 \leq x \leq 4$  محدود می‌شود [۸]. در این گستره، گشتاور مغناطیسی میانگین و دمای کوری با افزایش تقریباً خطی حجم یاخته اولیه ناشی از افزایش مقدار وانادیم کاهش می‌یابد [۱]. یک تحلیل ساده نشان می‌دهد که می‌توان مقداری در حدود  $0.88 \mu_B$  - را به گشتاور مغناطیسی یونهای وانادیم در ترکیب  $YFe_{10.5}V_{1.5}$  نسبت داد [۲]. بنابراین می‌توان تغییرات قابل ملاحظه‌ای را در برهم‌کنشهای مغناطیسی با جایگزینی اتم‌های وانادیم به جای آهن در ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  انتظار داشت. با در نظر گرفتن مقدار ناچیز گشتاور مغناطیسی یونهای  $Y^{3+}$  (کوچکتر از  $0.2 \mu_B$ ) [۹] می‌توان سهم آنها را در نتایج بدست آمده ناچیز دانسته و این نتایج را به تاثیر وانادیم بر کرنش‌های مغناطیسی زیرشبکه آهن در این خانواده از ترکیبات نسبت داد.

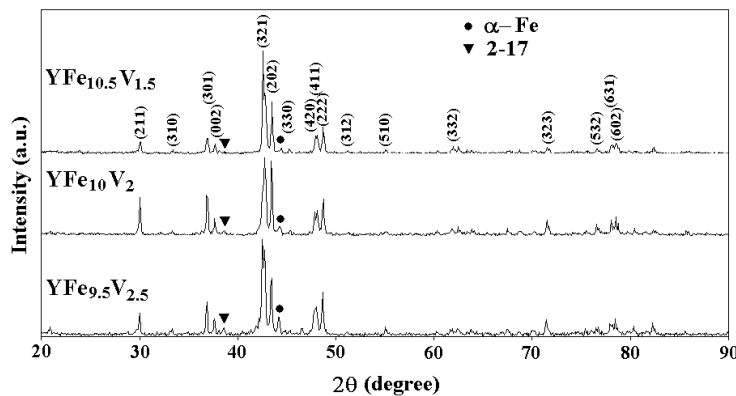
### روشهای تجربی

آلیاژهای  $YFe_{12-x}V_x$  ( $x = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$ ) با ذوب مخلوط عناصر سازنده ترکیب با نسبت شیمیایی مورد نظر، در کوره القایی با فرکانس بالا و تحت اتمسفر آرگون خالص ساخته و به مدت ۲۴ ساعت در کوره خلا ( $10^{-9}$  mbar) با دمای  $960^\circ C$  گرمادهی شدند. قسمتی از آلیاژهای ساخته شده به منظور بررسی‌های ساختاری، پس از حذف لایه اکسیدی شکل گرفته بر سطح نمونه‌ها تا قطر کمتر از  $200 \mu m$  به وسیله یک هاون دستی پودر شد. ترکیب فازی نمونه‌ها توسط پراش پرتو  $X$  با تابش  $Fe-K_{\alpha}$  و درجه تفکیک زاویه  $0.05^\circ$  از روی نمونه‌های پودری شکل، در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل طرح‌های پراش پرتو  $X$  و مقایسه آنها با ساختارهای بلوری جهت استخراج پارامترهای شبکه به کمک نرم‌افزار Celref محصول مؤسسه تحقیقاتی LMGP فرانسه انجام شد. مغناطوتنگش و انبساط گرمایی آلیاژها به روش پیمانته کرنش سنج اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها در گستره دمایی  $80$  تا  $330 K$  و میدان‌های خارجی تا  $1.5 T$  و با دقتی از مرتبه  $10^{-6}$  انجام گرفت. مغناطوتنگش در دو راستای موازی ( $\lambda_{||}$ ) و عمود ( $\lambda_{\perp}$ ) بر جهت میدان مغناطیسی، اندازه‌گیری و سپس مغناطوتنگش ناهمسانگرد ( $\Delta\lambda = \lambda_{||} - \lambda_{\perp}$ ) و مغناطوتنگش حجمی ( $\Delta v/v = \lambda_{||} + \lambda_{\perp}$ ) محاسبه شدند. اندازه‌گیری انبساط گرمایی نمونه‌ها نیز با اندازه‌گیری کرنش حاصل از تغییر دما با شیب دمایی  $1 K/min$  انجام شد. ضریب انبساط گرمایی میانگین، از برازش خطی منحنی تجربی انبساط گرمایی و محاسبه شیب بدست آمد.

### نتایج و بحث

شکل ۱ طرح‌های پراش پرتو  $X$  ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  را، به ازای سه مقدار متفاوت وانادیم، نشان می‌دهد. تحلیل این طرح‌ها، نشان داد شدیدترین قله‌های پراشی، منطبق بر ساختار چارگوشی  $ThMn_{12}$  (گروه فضایی  $I4/mmm$ ) هستند که به ترکیبات مورد نظر مربوط می‌شوند. شاخص‌های میلر صفحات مربوط به ساختار چارگوشی  $ThMn_{12}$  در محل قله‌های پراشی مربوطه قید شده است. همچنین طرح‌های پراش، به روشنی نشان‌دهنده وجود مقادیر جزئی از فازهای

فرعی  $\alpha$ -Fe و  $Y_7Fe_{17}$  در کنار فاز اصلی  $YFe_{12-x}V_x$  هستند، که شدیدترین قله پراشی مربوط به این دو فاز نیز روی شکل مشخص شده است. پارامترهای شبکه‌ای بدست آمده برای نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند که با گزارش‌های قبلی توافق دارند [۶]. نتایج به‌روشنی نشان می‌دهند که ثابتهای شبکه و در نتیجه حجم یاخته اولیه، با جایگزینی بیشتر اتم‌های وانادیم افزایش می‌یابند.



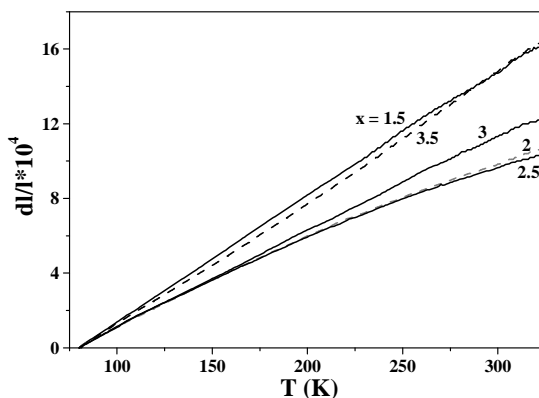
شکل ۱: طرح‌های پراش پرتو X متعلق به ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$ .  
قله‌های پراشی فازهای فرعی آهن و ۱۷-۲ نیز در شکل مشخص شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای شبکه و ضریب انبساط گرمایی میانگین ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  در بازه دمایی ۸۰ تا ۳۲۵ K میدان‌های ناهمسانگردی ( $H_a$ ) نیز از مرجع [۱۰] داده شده است.

$\mu_0 H_a$ (T)	$\alpha$	$\Delta V/V$	$V$ ( $\text{\AA}^3$ )	$c$ ( $\text{\AA}$ )	$a$ ( $\text{\AA}$ )	نمونه مورد مطالعه
(در دمای اتاق)	( $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	(%)				
۲٫۸	۶٫۷	-	۳۴۲٫۶۱۳	۴٫۷۶۵۰	۸٫۴۷۹۵	$YFe_{10.5}V_{1.5}$
۲	۴٫۳	۰٫۰۰۵	۳۴۴٫۴۹۷	۴٫۷۷۳۴	۸٫۴۹۵۳	$YFe_{10}V_2$
۱٫۴	۴٫۳	۰٫۰۰۷	۳۴۵٫۰۴۷	۴٫۷۷۷۲	۸٫۴۹۸۷	$YFe_{9.5}V_{2.5}$
-	۵٫۱	۰٫۰۰۹	۳۴۵٫۵۷۰	۴٫۷۸۴۱	۸٫۴۹۹۰	$YFe_9V_3$
-	۶٫۵	۰٫۰۱۲	۳۴۶٫۵۶۱	۴٫۷۸۵۲	۸٫۵۱۰۲	$YFe_{8.5}V_{3.5}$

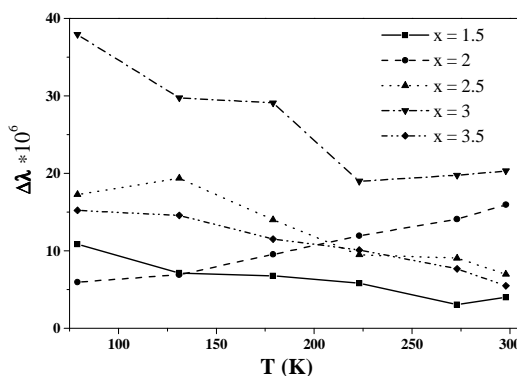
نتایج اندازه‌گیری انبساط گرمایی ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که منحنی‌های انبساط گرمایی به ازای مقادیر متفاوت X رفتار گرمایی مشابهی دارند. این در حالی است که ضرایب انبساط گرمایی میانگین که در جدول ۱ ارائه شده‌اند، تغییری حدود ۳۶٪ را با تغییر میزان وانادیم نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که ضریب انبساط گرمایی برای نمونه با  $x \approx 2$  کمینه است. با در نظر گرفتن اینکه سهم

مغناطیسی در انبساط گرمایی یک نمونه بس بلور از کرنشهای همسانگرد ناشی می شود، این کمینه به کمینه بودن جفت شدگی مغناطیسی زیرشبکه آهن (نرم شدگی) در ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  به ازای  $x \approx 2$  اشاره دارد. با توجه به این حقیقت که اتمهای وانادیم در این خانواده تنها جایگاههای بلوری  $8i$  را اشغال می کنند، و با فرض توزیع یکنواخت آنها، این نرم شدگی هنگامی روی می دهد که نیمی از جایگاههای  $8i$  توسط اتمهای وانادیم اشغال شود (یعنی به ازای  $x \approx 2$ ).



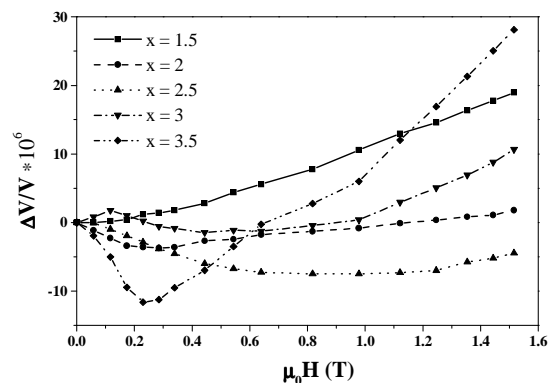
شکل ۲: منحنی های انبساط گرمایی ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$ .

شکل ۳ وابستگی دمایی مغناطوتنگش ناهمسانگرد ( $\Delta\lambda$ ) در میدان ثابت  $1.5T$  را برای مقادیر مختلف  $x$  نشان می دهد. مشاهده می شود که به جز در مورد  $x = 2$ ،  $\Delta\lambda$  با دما کاهش می یابد. برای توضیح این رفتار باید دو عامل اصلی را در نظر داشت: الف) کاهش طبیعی مغناطش و ب) کاهش ناهمسانگردی مغناطیسی با افزایش دما. نخستین عامل موجب کاهش  $\Delta\lambda$  نسبت به دما می شود، در حالیکه عامل دوم موجب افزایش  $\Delta\lambda$  با دما می گردد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، عامل دوم تنها در مورد ترکیب  $YFe_{10}V_2$  غالب است و در سایر ترکیبات، نخستین عامل، وابستگی دمایی  $\Delta\lambda$  را تعیین می کند.



شکل ۳: منحنی های مغناطوتنگش ناهمسانگرد ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  بر حسب دما در میدان ثابت  $1.5 T$ .

منحنی‌های هم‌دمای مغناطوتنگش حجمی ( $\Delta V/V$ ) ترکیبات مورد مطالعه در دمای اتاق در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مغناطوتنگش حجمی تمام نمونه‌ها در ناحیه میدان‌های قوی مثبت است و با افزایش میدان زیاد می‌شود. این در حالی است که در ناحیه میدان‌های ضعیف (کمتر از ۰/۵ T) کمینه‌ای در منحنی‌های  $\Delta V/V$  پدید می‌آید. با افزایش مقدار  $x$ ، این کمینه‌ها عمیق‌تر شده و به سمت میدان‌های ضعیف‌تر جابجا می‌شوند. با توجه به فرایند مغناطیدگی [۱۱] می‌توان گفت که حرکت دیواره‌های حوزه در میدان‌های ضعیف با کرنش همسانگرد منفی همراه است. از طرفی دیگر، چرخش گشتاورهای میکروسکوپی در مقابل ناهمسانگردی مغناطوبلوری موجب ایجاد کرنش همسانگرد مثبت در این ترکیبات می‌شود. در واقع با افزایش میدان اعمالی به چند دهم تسلا، مغناطوتنگش عمدتاً از ناهمسانگردی مغناطوبلوری ناشی می‌شود. در کنار این اثر، وابستگی برهم‌کنشهای مغناطیسی به فواصل بین اتمی که در مرتبه اول همسانگرد هستند نیز، می‌تواند سهمی در مغناطوتنگش حجمی داشته باشد. بنابراین میزان حضور وانادیم با توجه به تغییر در ناهمسانگردی مغناطوبلوری و فواصل بین اتمی در خواص مغناطوالاستیکی این ترکیبات موثر است.



شکل ۴: منحنی‌های هم‌دمای مغناطوتنگش حجمی ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  بر حسب میدان در دمای اتاق.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نقش جایگزینی اتم‌های وانادیم به جای آهن بر ساختار و خواص مغناطوالاستیکی ترکیبات  $YFe_{12-x}V_x$  بررسی شد. مطالعات ساختاری نشان می‌دهند که جایگزینی وانادیم به جای آهن در این ترکیبات، بدون تغییر در ساختار بلوری، موجب افزایش ثابتهای شبکه می‌شود. نتایج انبساط گرمایی حاکی از کمینه بودن ضریب انبساط گرمایی این ترکیبات به ازای  $x \approx 2$  است. همچنین وابستگی دمایی مغناطوتنگش ناهمسانگرد، که رفتار متفاوتی را به ازای  $x = 2$  نشان می‌دهد، با توجه به کاهش مغناطش و ناهمسانگردی مغناطیسی با دما، توضیح داده می‌شود.

منحنی‌های تجربی مغناطوتنگش حجمی نشان می‌دهند که برای تمام نمونه‌ها مغناطوتنگش حجمی در میدان‌های قوی مثبت بوده و با افزایش میدان زیاد می‌شود. در حالی که این منحنی‌ها در ناحیه میدان‌های کمتر از ۰/۵ T دارای کمینه‌ای

هستند که محل و عمق آنها به میزان حضور وانادیم در ترکیب وابسته است. نتایج با در نظر گرفتن تاثیر میزان وانادیم بر ناهمسانگردی مغناطوبلوری ترکیب توضیح داده شد.

### مرجع ها

- [1] R. Coehoorn, Phys. Rev. B 41 (1990) 11790-11797.
- [2] I. Popa, D. Fruchart, P. de Rango, S. Rivoirard, and P. Wolfers, J. Magn. Magn. Mater. 272-276 (2004) 539-541.
- [3] M.R. Alinejad, N. Tajabor, H. Khandan Fadafan, D. Fruchart, and D. Gignoux, J. Magn. Magn. Mater. 311 (2007) 702-707.
- [4] R. Grössinger, R. Krewenka, and K.H.J. Buschow, J. Alloys and Compounds 186 (1992) L11-L15.
- [5] I. Popa, Ph.D. thesis, Joseph Fourier University, Grenoble, France, 2004.
- [6] H. S. Li, and J. M. D. Coey, "Handbook of Magnetic Materials", ed.: K.H.J. Buschow, Vol. 6, Ch. 1, Amsterdam: North-Holland, (1991).
- [7] J. Deniszczyk, and W. Borgiel, J. Phys.: Condens. Matter 9 (1997) 2187-2197.
- [8] M. Bacmann, Ch. Baudalet, D. Fruchart, D. Gignoux, E.K. Hlil, G. Krill, M. Morales, R. Vert, and P. Wolfers, J. of Alloys and Compounds 383 (2004) 166-172.
- [9] K.H.J. Buschow, S.J. Hu, O. Tegus, L. Zhang, E. Brück, and F.R. de Boer, J. of Alloys and Compounds 317-318 (2001) 2-7.
- [10] M. Solzi, L. Pareti, O. Moze, and W.I.F. David, J. Appl. Phys. 64 (1988) 5084-5087.
- [11] David Jiles, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", Chapman & Hall, London (1991).