

## بررسی نماهای بحرانی آلیاژ حافظه‌پذیر فرومغناطیس $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$

قطبی ورزانه، علی<sup>۱</sup>؛ کاملی، پرویز<sup>۱</sup>؛ امیری، محمد تقی<sup>۲</sup>؛ عبدالحسینی سارسری، اسماعیل<sup>۱</sup>؛ هادی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه آلبرتا، ادمونتون

### چکیده

در این تحقیق آلیاژ هویسلر حافظه‌پذیر فرومغناطیس  $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$  به روش آلیاژسازی مکانیکی ساخته شد. سپس نمونه به مدت زمان ۱۶ ساعت در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد بازپخت شد. الگوی پراش پرتو ایکس تشکیل ساختار بلوری آلیاژ هویسلر را تایید کرد. در ادامه توان‌های بحرانی با استفاده از منحنی‌های آروت ارتقا یافته در محدوده‌ی گذار فرومغناطیس-پارامغناطیس بررسی شد. نتایج به دست آمده برای پارامترهای  $\beta$ ،  $\gamma$  نشان داد این مقادیر بین مقدارهای مدل میدان میانگین و هایزنبرگ ۳ بعدی قرار دارد که این نشان از همزیستی نظم بلند برد و کوتاه برد در نمونه است.

## Investigation of critical exponents in $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$ ferromagnetic shape memory alloy

Ghotbi Varzaneh, Ali<sup>1</sup>; Kameli, Parviz<sup>1</sup>; Amiri, Mohamad Taghi<sup>2</sup>; Abdolhosseini Sarsari, Ismaeel<sup>1</sup>  
Salamati, Hadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Isfahan University of Technology, Isfahan

<sup>2</sup>Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Edmonton

### Abstract

*In this investigation  $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$  ferromagnetic shape memory alloy was prepared by mechanical alloying. Then sample heat treated at 950 C for 16 h. X-ray diffraction pattern confirmed formation of well crystalline structure of Heusler alloy. Also Critical properties near the ferromagnetic-paramagnetic (FM-PM) phase transition were analyzed using a modified Arrott plots method. The estimated values of critical parameters ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) show that this alloy is located between those expected for the mean field (MF) and the 3D-Heisenberg models which indicates a coexistence of short-range and long-range order in the sample.*

PACS No. 75

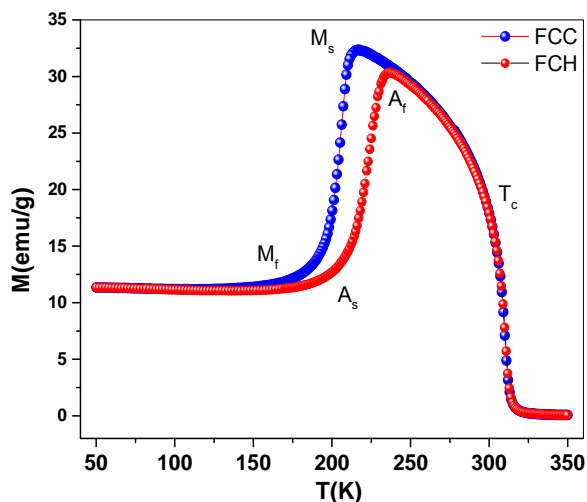
### مقدمه

داشته باشند گزینه‌های مناسب برای اثر مغناطوگرمایی هستند [۲]. این آلیاژها به دلیل صرفه اقتصادی شان می‌توانند جایگزین مناسبی برای ترکیبات گادولونیم که در حال حاضر در یخچال‌های مغناطیسی استفاده می‌شود باشند.

در چند سال اخیر تلاش‌های زیادی برای فهم رابطه‌ی بین ترکیب، ساختار و ویژگی‌های مغناطوگرمایی برای بهبود اثر مغناطوگرمایی در حال انجام است.

امروزه آلیاژهای حافظه‌پذیر فرومغناطیس به دلیل بروز ویژگی‌هایی مانند حافظه‌پذیری و مغناطوگرمایی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. مشخصه اصلی این آلیاژها وجود گذارهای مغناطیسی و ساختاری هست که در آنها مشاهده شده است [۱]. به دلیل وابسته بودن ویژگی‌های مغناطیسی این آلیاژها به فاصله‌ی بین اتم‌ها، تغییر فاز ساختاری تغییرات زیادی در مغناطش را به همراه دارد. موادی که در گذارهای خود تغییرات مغناطش زیادی

مکعبی (تقارن بلوری  $L2_1$ ) وارد فاز مارتزیت ( $M_S$ ) با ساختار تتراگونالی (تقارن بلوری  $L1_0$ ) می‌شود و در دمای  $M_F$  گذار کامل می‌شود. طی گرم شدن نمونه، گذار عکس رخ می‌دهد و نمونه در دمای  $A_S$  وارد فاز آستنیت می‌شود و در دمای  $A_F$  گذار کامل می‌شود. در محدوده ۳۱۰ کلوین نیز نمونه از حالت فرومغناطیس آستنیت به پارامغناطیس آستنیت ( $T_C$ ) گذار می‌کند [۳].



شکل ۱: تغییرات مغناطیس نمونه بر حسب دما در سرمایش

و گرمایش

برای فهم بهتر برهمکنش‌های مغناطیسی نماهای بحرانی در نزدیکی دمای کوری مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا پارامترهای  $\beta, \gamma$  و  $\delta$  با استفاده از منحنی‌های  $M-H$  و به کمک روش آروت ارتقا یافته بدست آمدند. بدین منظور ابتدا برای دقت بیشتر در مقادیر بدست آمده منحنی‌های  $M-H$  در محدوده دمای کوری و با گام‌های ۲ کلوین اندازه‌گیری شد (شکل ۲). سپس برای بدست آوردن نقطه شروع برای محاسبه‌ی نماهای بحرانی منحنی‌های  $M^{1/\beta}$  بر حسب  $(H/M)^{1/\gamma}$  به ازای مدل‌های مختلف از جمله، میدان میانگین  $(\beta = 0.5, \gamma = 1)$  هایزنبرگ ۳ بعدی  $(\beta = 0.365, \gamma = 1.336)$ ، آیزینگ ۳ بعدی  $(\beta = 0.325, \gamma = 1.24)$  و میدان میانگین بحرانی  $(\beta = 0.25, \gamma = 1)$  رسم شد [۴].

در گذار فاز مرتبه دوم اگر گذاری مطابق با یکی از مدل‌های ذکر شده صورت بگیرد، بایستی نمودارهای

در مطالعات قبلی ترکیب  $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$  ساخته شد و اثر مغناطو گرمایی آن در گذار ساختاری و مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت [۳]. علی‌رغم مطالعات زیادی که روی اثر مغناطو گرمایی این آلیاژها در حال انجام است مطالعه کمی رو ماهیت برهمکنش‌ها در گذار مغناطیسی انجام شده است. از این رو در این تحقیق برای مطالعه نوع برهمکنش‌ها در گذار مغناطیسی، نماهای بحرانی این آلیاژ در محدوده دمای کوری با استفاده از مدل آروت ارتقا یافته<sup>۱</sup> به دست آمد.

## آزمایش

آلیاژ  $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$  به روش آلیاژسازی مکانیکی ساخته شد سپس در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۶ ساعت بازپخت و تحت فرایند سردسازی سریع در مخلوط آب و یخ قرار گرفت که جزئیات آن در مقاله دیگری بیان شده است [۳]. مغناطش بر حسب دمای نمونه در بازه‌ی دمایی ۳۵۰-۵۰ کلوین با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی (PPMS) ساخت شرکت Quantum Design انجام شد. در ادامه با مشخص شدن محدوده‌ی گذار مغناطیسی ماده منحنی‌های  $M-H$  در این محدوده با گام‌های دمایی ۲ کلوین با اعمال میدان مغناطیسی ۵ تسلا اندازه‌گیری شد.

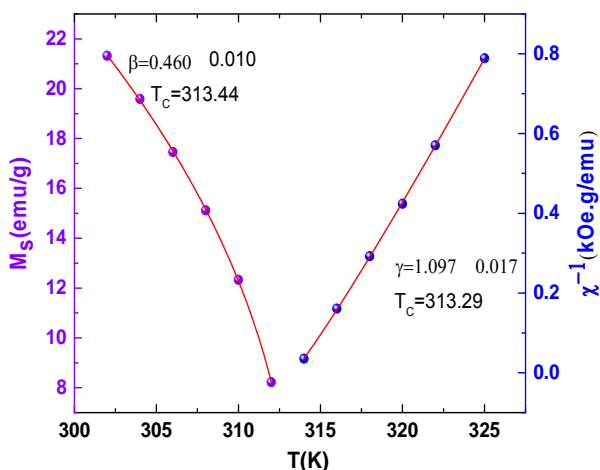
## نتایج و بحث

الگوی پراش پرتو ایکس همراه با تحلیل ریتولد توسط نرم افزار FullProf انجام شد که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و محاسباتی را تایید کرد (نشان داده نشده). در این الگو قله‌های ابر شبکه وجود داشت که خود نشان از تشکیل فاز  $L2_1$  با نظم اتمی بالا را تایید می‌کند [۳].

شکل ۱ منحنی مغناطش نمونه را در بازه‌ی دمایی ۵۰ تا ۳۵۰ کلوین نشان می‌دهد که تحت میدان ۲۰۰ اورستد و در حالت سرمایش و گرمایش انجام شده است. پسماند گرمایی موجود در نمونه تایید کننده‌ی وجود گذار ساختاری در آن است [۵]. نمونه از فاز آستنیت با ساختار

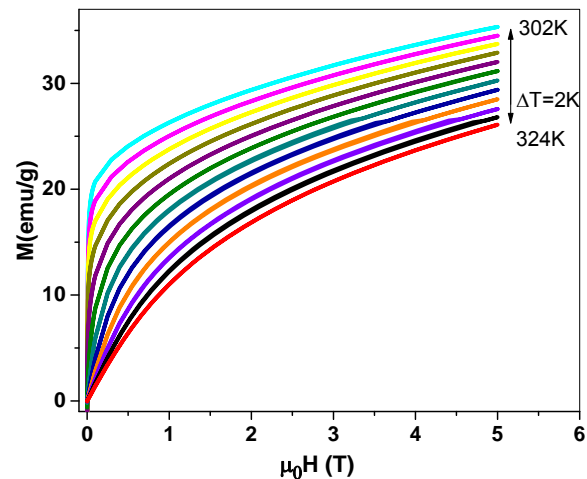
<sup>۱</sup> Modified Arrott plots

می‌کنیم. در ادامه برای دماهای کمتر از دمای کوری برای هر نمودار یک برازش خطی انجام می‌دهیم و محلی که محور  $M^{1/\beta}$  را قطع می‌کند بدست می‌آوریم. سپس با استفاده از مقادیر بدست آمده  $M_S$  برای هر دما، نمودار  $M_S - T$  را رسم و با یک تابع توانی برازش کرده و مقدار  $\beta$  را بدست می‌آوریم (شکل ۳). در ادامه برای بدست آوردن مقدار  $\gamma$  منحنی  $M^{1/\beta} - (H/M)^{1/\gamma}$  را برای دماهای بیشتر از دمای کوری رسم می‌کنیم و عرض از مبدا را مطابق معادله (۳) بدست می‌آوریم. سپس مقادیر بدست آمده برای  $\chi_0^{-1}(T)$  را برحسب دما رسم کرده و با یک تابع توانی برازش می‌کنیم و مقدار  $\gamma$  را بدست می‌آوریم (شکل ۳). بعد از بدست آمدن مقادیر نماهای بحرانی منحنی های  $M^{1/\beta} - (H/M)^{1/\gamma}$  را با مقادیر جدید  $\beta$  و  $\gamma$  رسم می‌کنیم و این کار را تا رسیدن به مقادیری پایا ادامه می‌دهیم. شکل ۳ نمودار برازش خطی برای بدست آوردن مقدار  $\beta$  و  $\gamma$  را بعد از طی ۱۰ سیکل برازش نشان می‌دهد. در سیکل‌های بعدی تغییرات در مقدار  $\beta = 0.460$  و  $\gamma = 1.097$  ناچیز است. دمای کوری بدست آمده توسط این دو نمودار در شکل ۳ مشخص شده است که تطابق خوبی با یکدیگر دارند. لازم به ذکر است مقدار بدست آمده برای دمای کوری با این روش دقیق‌تر از سایر روشها است [۶].



شکل ۳: برازش نمودار مغناطش خود به خودی و عکس پذیرفتاری بر حسب دما با تابع توانی برای دماهای نزدیک دمای کوری.

$M^{1/\beta} - (H/M)^{1/\gamma}$  با این نما به صورت خطوط کاملاً موزی باشند و خطی که از مبدا می‌گذرد نشان دهنده دمای کوری است. با توجه به این نکته از بین مدل‌های ذکر شده در نموداری که با نماهای میدان میانگین رسم شده بود این ویژگی بارزتر بود. به همین دلیل نقطه شروع محاسبه نماهای بحرانی  $\beta = 0.5, \gamma = 1$  انتخاب شد.



شکل ۴: تغییرات مغناطش نمونه بر حسب میدان در دماهای نزدیک دمای کوری با گام ۲ کلوین.

این روش بر اساس معادله حالت آروت-نواکز<sup>۷</sup>:

$$(H/M)^{1/\gamma} = a\varepsilon + bM^{1/\beta} \quad (1)$$

است که در آن  $a$  و  $b$  ثابت اند،  $\varepsilon = (T - T_c)/T_c$ ، و  $\beta$  و  $\gamma$  نماهای بحرانی هستند. برای یک گذار مرتبه دوم رفتار بحرانی با استفاده از مجموعه‌ای از نماهای بحرانی با کمک معادلات زیر بدست می‌آیند [۵]:

$$M_S(T) = M_0(-\varepsilon)^\beta \quad \varepsilon < 0 \quad T < T_c^A \quad (2)$$

$$\chi_0^{-1}(T) = (h_0/M_0)\varepsilon^\gamma \quad \varepsilon > 0 \quad T > T_c^A \quad (3)$$

$$M = DH^{1/\delta} \quad \varepsilon = 0 \quad T = T_c^A \quad (4)$$

معادله اول رابطه بین نمای بحرانی  $\beta$  و مغناطش خود به خودی  $(M_S)$  را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن نمای  $\beta$  ابتدا نمودارهای  $M^{1/\beta} - (H/M)^{1/\gamma}$  را با نقطه‌ی شروع  $\beta = 0.5, \gamma = 1$  برای دماهای مختلف رسم

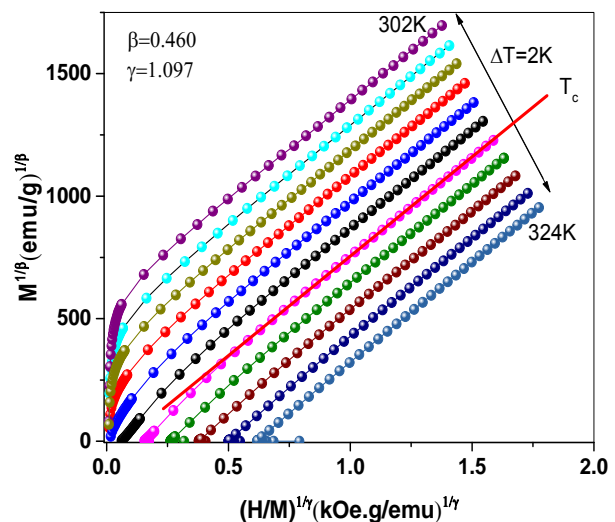
<sup>۷</sup> Arrott-Noakes

FullProf مورد بررسی قرار گرفت و تطابق خوبی بین طیف تجربی و محاسباتی مشاهده شد. سپس گذارهای مغناطیسی و ساختاری نمونه با استفاده از منحنی مغناطش بررسی شد. در ادامه نوع برهمکنشهای مغناطیسی در فاز فرو مغناطیس آستنیت با استفاده از منحنی‌های آروت ارتقا یافته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد نماهای بحرانی برای این آلیاژ متفاوت از نتایج پیش بینی شده توسط مدل های میدان میانگین و هایزنبرگ ۳ بعدی است. مقادیر بدست آمده همزیستی نظم فرومغناطیس بلند برد را با کوتاه برد نشان می‌دهند که به دلیل وجود ناهمگنی های مغناطیسی در نمونه است.

### مراجع

- [1] J. Liu, T. Gottschall, K. P. Skokov, J. D. Moore, and O. Gutfleisch, "Giant magnetocaloric effect driven by structural transitions," *Nature Materials* **11**, (2012) 620-626.
- [2] T. Gottschall, K. Skokov, F. Scheibel, M. Acet, M. G. Zavareh, Y. Skourski, *et al.*, "Dynamical Effects of the Martensitic Transition in Magnetocaloric Heusler Alloys from Direct  $\Delta T$  ad Measurements under Different Magnetic-Field-Sweep Rates," *Physical Review Applied* **5**, (2016) 024013.
- [3] A. G. Varzaneh, P. Kameli, F. Karimzadeh, B. Aslibeiki, G. Varvaro, and H. Salamati, "Magnetocaloric effect in Ni<sub>47</sub>Mn<sub>40</sub>Sn<sub>13</sub> alloy prepared by mechanical alloying," *Journal of Alloys and Compounds* **598**, (2014) 6-10.
- [4] J. Fan, L. Ling, B. Hong, L. Zhang, L. Pi, and Y. Zhang, "Critical properties of the perovskite manganite La<sub>0.1</sub>Nd<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>," *Physical Review B* **81**, (2010) 144426.
- [5] H. E. Stanley, "Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena, by H Eugene Stanley", *Oxford University Press* (1987) 336.
- [6] R. Das, P. Alagarsamy, and A. Srinivasan, "Critical behavior and magnetic entropy change at magnetic phase transitions in Ni<sub>50</sub>Mn<sub>35</sub>In<sub>14</sub>Si<sub>1</sub> ferromagnetic shape memory alloy," *EPL (Europhysics Letters)* **108**, (2015) 66004.

مقادیر به دست آمده برای  $\beta$  و  $\gamma$  متفاوت از مدل میدان میانگین و هایزنبرگ ۳ بعدی است. این مقادیر بین مقادیر تعریف شده برای مدل میدان میانگین و هایزنبرگ ۳ بعدی قرار دارد. این انحراف می‌تواند ناشی از همزیستی نظم فرو مغناطیس بلند برد با فرو مغناطیس کوتاه برد باشد که در اثر وجود ناهمگنی های مغناطیسی پدید آمده است. برای اطمینان از مقادیر بدست آمده ی  $\beta$  و  $\gamma$  نمودار  $M^{1/\beta} - (H/M)^{1/\gamma}$  برای نماهای بحرانی نهایی رسم شده است. در این نمودار یک سری خطوط موازی دیده می‌شود که خود نشان از اعتبار مقادیر بدست آمده برای نماهای بحرانی است و خطی که از مبدا میگذرد نشان دهنده دمای کوری است. با استفاده از معادله (۴) مقدار  $\delta$  برای این نمونه 3.16 بدست آمد. با مقایسه این مقدار با مقدار بدست آمده از رابطه وی دوم  $(\delta = 1 + \nu/\beta)^3$   $\delta = 3.38$  مشخص می‌شود این مقادیر با تقریب خوبی به یکدیگر نزدیک هستند که تاییدی بر درستی نتایج به دست آمده به روش آروت ارتقا یافته است.



شکل ۴: نمودار آروت ارتقا یافته با استفاده از مقادیر نماهای بحرانی بدست آمده.

### نتیجه گیری

ترکیب  $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$  به روش آلیاژسازی مکانیکی ساخته شد. الگوی پراش پرتو ایکس با استفاده از نرم افزار