

$Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$

(CNRS)

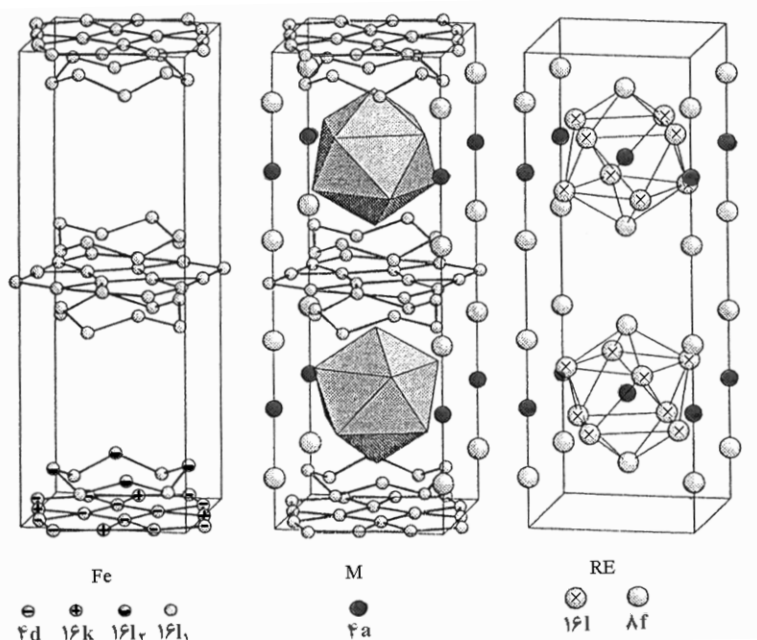
tajabor@ferdowsi.um.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۴/۲۳ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۷/۱۲)

$\nu$ )		Nd Fe Cu	Fe	Co
Co		X		$Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$ ( $x = 0 \dots 1$ )
		$x = 0$	$Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$	$Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$ ( $x = 0 \dots 1$ )
		$Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$		$Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$ ( $x = 0 \dots 1$ )
	$(\lambda_i)$	$(\lambda_i)$		
Nd				
		$x = 0$		
				Fe
				$Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$

عناصر گروه سوم، چهارم و یا پنجم (شبه فلز) جدول تناوبی است [۱-۴]. از طرفی این ترکیبها می توانند اکسیژن را به مقدار زیاد بدون تغییر در ساختارشان جذب کنند [۵]. ترکیب  $Nd_{1-x}Fe_xCo_xCu$  از جمله این ترکیبهاست که همانند شکل ۱ دارای ساختار چارگوشی  $Nd_6Fe_{13}Si$  با گروه فضایی  $I4/mcm$  است [۲-۷]. در شکل ۱ جایگاههای بلورنگاری اتمهای آهن، نادر و فلز M (Si یا Cu) مشخص شده است. نظم مغناطیسی این ترکیب در دماهای کمتر از  $T_N=419K$  به صورت پادمغناطیسی است [۸].

زمینه مواد مغناطیسی پیشرفته ترکیبهای بین فلزی خاکی نادر هم از نظر بررسیهای بنیادی و هم کاربردهای گوناگون از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از جمله ترکیبهایی که در دو دهه اخیر مورد توجه بوده‌اند می توان از  $RE_6Fe_{13}M$  یاد کرد. این دسته از ترکیبها فاز دوم آلیاژهای مغناطیسی RE-Fe-B آلیاژ شده با مقدار کم فلز M محسوب می شوند که با نفوذ در مرزخانه‌های آلیاژ افزایش میدان واگردانی را موجب می شوند. در این فرمول RE یکی از عناصر خاکی نادر سبک و M یکی از



شکل ۱. ساختار بلوری ترکیب  $RE_6Fe_{13}M$  و جایگاه‌های بلورنگاری اتم‌های آهن، خاکی نادر و فلز  $M$  [۲].

اعمال شود. با افزایش و کاهش فرکانس القایی که باعث ذوب و انجماد نمونه می‌شود، نمونه‌هایی با همگنی فاز بسیار بالا حاصل می‌شود. سپس نمونه‌ها در ورقه تانتالوم (Ta) پیچیده و در لوله‌های کوارتز تخلیه شده در دمای  $550^\circ C$  به مدت ۴۰ روز بازپخت و در دمای اتاق سرد شدند [۵]. همگنی فاز و ساختار بلوری نمونه‌ها با استفاده از پراش سنج پرتو X و با تابش  $Cu-K\alpha$  بررسی شد. تحلیل طرح پراش پرتو X با استفاده روش ریتولد<sup>۱</sup> انجام شد و درصد وزنی هر فاز استخراج شد. از میکروسکپ الکترونی روبشی ( $1450 VP$ ) در مد کاری الکترون‌های برگشتی، توپولوژی سطح نمونه‌های صیقلی شده و از تحلیل EDX آن ترکیبات اتمی آنها بررسی شد. قبل از بررسی نمونه‌ها با میکروسکپ الکترونی روبشی می‌بایست با روکش طلا پوشش داده شوند تا سطحی رسانا روی آنها تشکیل شود.

دمای کوری نمونه‌های پودری با استفاده از ترازوی ترمومغناطیسی که براساس گشتاور وارد بر نمونه در حضور میدان مغناطیسی طراحی شده است در آهنگ دمایی  $5^\circ C/min$  و میدان مغناطیسی ثابت  $0.3 T$  اندازه‌گیری شد.

تاکنون آثار نشانیدن Co به جای Fe در خواص مغناطیسی و مغناطوالاستیکی  $Nd_6Fe_{13}Cu$  مورد بررسی قرار نگرفته است، انتظار می‌رود اثر مشترک برهم‌کنش‌های میدان بلوری و برهم‌کنش‌های تبادل تغییر کند و پدیده‌های جالبی به وجود آید.

نمونه‌های  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  ( $x = 0, 1, 2$ ) با استفاده از عناصر سازنده ترکیب (Fe, Nd, Co و Cu) با درجه خلوص ۹۹/۹٪ و در حضور گاز خالص آرگون در کوره قوس آرگون ذوب شدند. هر نمونه چندین بار پشت و رو و دوباره ذوب شد تا فاز همگنی تشکیل شود. بلافاصله هر یک از نمونه‌ها در کوره القایی فرکانس بالا در یک بوتله مسی که با آب خنک می‌شود در اتمسفر گاز خالص آرگون ذوب شدند (سستز نمونه‌ها در CNRS انجام شد). ایجاد جریان ادی در نمونه، هم باعث ذوب آن می‌شود و هم اینکه میدان مغناطیسی حاصل از این جریان و میدان القایی بر یکدیگر اثر کرده و باعث کنده شدن نمونه مذاب از جداره بوتله مسی می‌شود. تعلیق نمونه مذاب تا وقتی ادامه دارد که فرکانس القایی میدان به بوتله

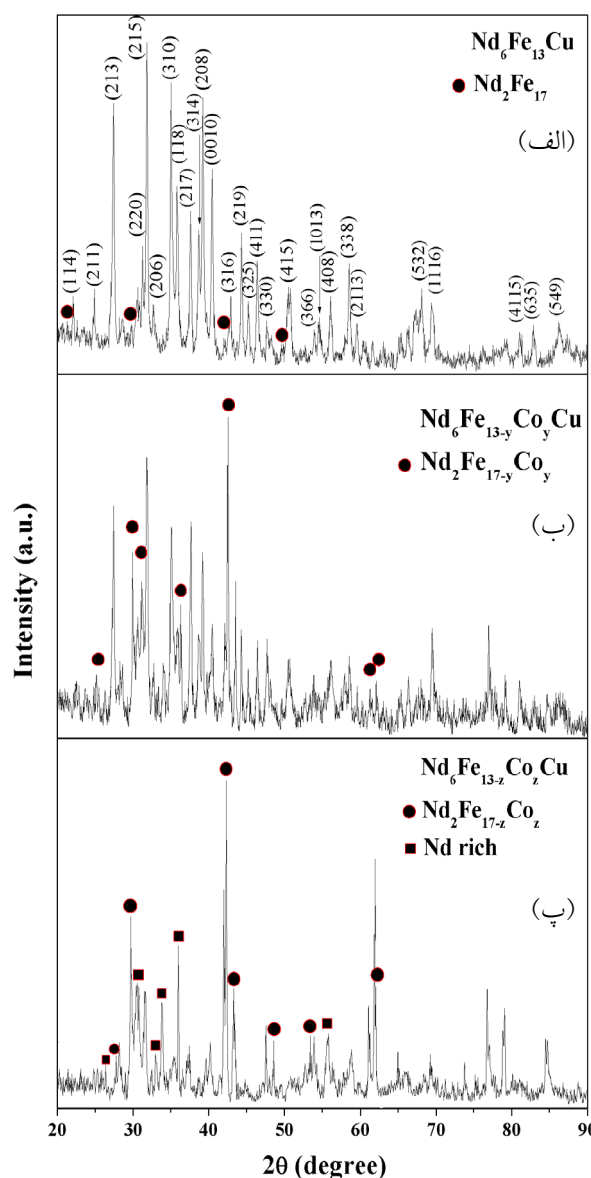
۱. Rietveld

حساسیت این دستگاه از مرتبه  $10^{-4}$  emu/gr و دقت نتایج آن از مرتبه  $10^{-3}$  emu/gr است. پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه‌ها در دماهای ۷۷ تا  $300$  کلوین در میدان  $500$  A/m و فرکانس  $333/3$  Hz انجام شد.

به منظور مطالعه آثار مغناطیسی به روش پیمانه کرنشی از نمونه، قرصی به قطر  $6$  mm و ضخامت  $2$  mm برش داده شد. پس از نصب پیمانه کرنش سنج روی نمونه، انبساط گرمایی،  $\Delta l/l = [l(T) - l(300K)]/l(300K)$  با استفاده از تغییر نسبی طول نمونه‌ها بر حسب دما در بازه دمایی  $80$  تا  $450$  کلوین به کمک ترموکوپل Cu-Con با دقت  $1$  K، اندازه‌گیری شد. مغناطوتنگش نیز در راستای موازی ( $\lambda_1$ ) و عمود ( $\lambda_2$ ) بر میدان در بازه دمایی  $80$  تا  $300$  کلوین و میدان‌های تا  $1/5$  T اندازه‌گیری و مغناطوتنگش ناهمسانگرد  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  محاسبه شد.

تحلیل طرح پراش نمونه‌های ( $x = 0, 1$  و  $2$ )  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  نشان داد که به ازای  $x = 0$  ترکیب  $Nd_6Fe_{13}Cu$  با ساختار چارگوشی و گروه فضایی  $I4/mcm$  تشکیل شده است، علاوه بر آن نمونه شامل  $5$  درصد وزنی فاز  $Nd_2Fe_{17}$  است. در نمونه  $x = 1$  تقریباً  $74$  wt% فاز  $Nd_6Fe_{13-y}Co_yCu$  و  $26$  wt% فاز  $Nd_2Fe_{17-y}Co_y$  با  $0 < y < 1$  تشکیل شده است و در نمونه  $x = 2$  تقریباً  $53$  wt% فاز  $Nd_6Fe_{13-z}Co_zCu$  و  $30$  wt% فاز  $Nd_2Fe_{17-z}Co_z$  با  $1 < z < 2$  و  $17$  wt% فاز غنی از Nd مشاهده می‌شود. شکل ۲ طرح‌های پراش پرتو X و شاخص‌های میلر نمونه‌های ( $x = 0, 1$  و  $2$ )  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  را نشان می‌دهد. داده‌های تحلیل طرح پراش پرتو X در جدول ۱ آورده شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که جانمایی اتم کبالت به جای Fe همراه با کاهش پارامترهای شبکه هر فاز مجزا است و این کاهش در یاخته یک‌به‌یکه به سبب کوچکتر بودن شعاع اتمی Co نسبت به Fe است.

شکل ۳ تصاویر SEM و تحلیل EDX نمونه‌های



شکل ۲. طرح پراش نمونه‌های  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  (الف)  $x = 0$ ، (ب)  $x = 1$  و (پ)  $x = 2$ .

منحنی‌های تغییرات مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی بر روی نمونه پودری در دماهای  $5$  تا  $300$  کلوین و در میدان مغناطیسی تا  $7$  T با استفاده از دستگاه مغناطیس سنج نمونه متحرک<sup>۱</sup>، که براساس حرکت دادن خطی نمونه در میدان مغناطیسی ثابت کار می‌کند، اندازه‌گیری شد. منحنی‌های تغییرات مغناطش بر حسب دما نیز از دمای  $5$  تا  $300$  کلوین و در میدان مغناطیسی  $0.3$ ،  $0.7$  و  $1$  تسلا اندازه‌گیری شد.

۱. Extracting Sample Magnetometer

جدول ۱. پارامترهای شبکه بلوری و دمای کوری ( $T_c$ ) آلیاژهای  $Nd_xFe_{13-x}Co_xCu$ .

نمونه	ترکیب	wt%	a (Å)	c (Å)	V (Å <sup>3</sup> )	T <sub>c</sub> (K)
x = 0	Nd <sub>6</sub> Fe <sub>13</sub> Cu	≈ ۹۵	۸,۰۹۶۲	۲۲,۲۷۹۱	۱۴۶۰,۳۶۰	
	Nd <sub>7</sub> Fe <sub>1۷</sub>	≤ ۵	۸,۵۷۸۲	۱۲,۴۶۱۱	۷۹۴,۱۰۸	۳۲۵
x = 1	Nd <sub>6</sub> Fe <sub>۱۳-y</sub> Co <sub>y</sub> Cu	۷۴	۸,۰۹۵۷	۲۲,۲۷۵۷	۱۴۵۹,۹۶۳	
	Nd <sub>7</sub> Fe <sub>۱۷-y</sub> Co <sub>y</sub>	۲۶	۸,۵۷۴۸	۱۲,۴۵۷۳	۷۹۳,۲۳۴	۴۰۳
x = 2	Nd <sub>6</sub> Fe <sub>۱۳-z</sub> Co <sub>z</sub> Cu	۵۳	۸,۰۹۴۱	۲۲,۲۶۹۸	۱۴۵۸,۹۹۴	
	Nd <sub>7</sub> Fe <sub>۱۷-z</sub> Co <sub>z</sub>	۳۰	۸,۵۷۳۷	۱۲,۴۶۰۲	۷۹۳,۲۱۷	۴۸۴
	Nd-rich	۱۷	*	*	*	پارامغناطیس

\* به علت نامشخص بودن ساختار بلوری، محاسبه پارامترهای شبکه امکان پذیر نیست.

میدان‌های مغناطیسی بالا نیاز دارد [۸]. مقدار کم گشتاور مغناطیسی ( $M < ۸ \mu_B/f.u.$ ) در دمای ۳۰۰ K و میدان ۷ T ساختار مغناطیسی متشکل از حداقل دو زیرشبکه مغناطیسی با سمتگیری پادموازی را تأیید می‌کند.

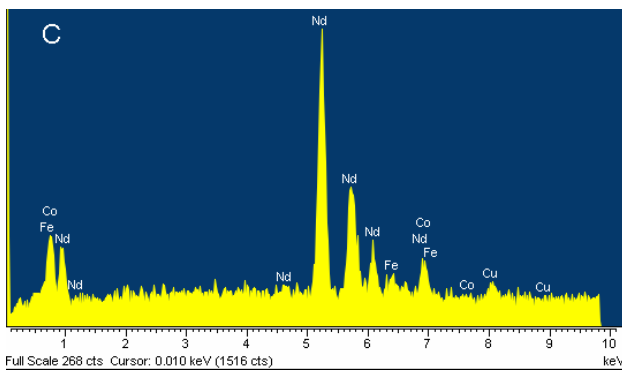
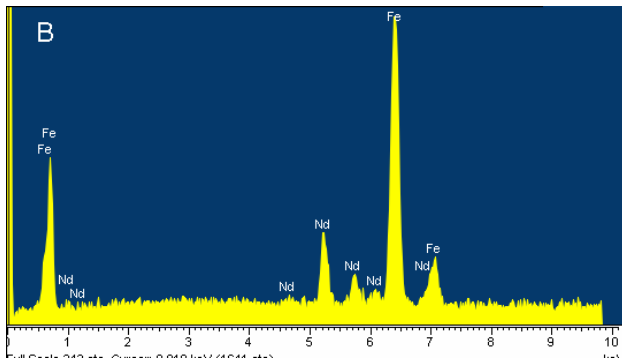
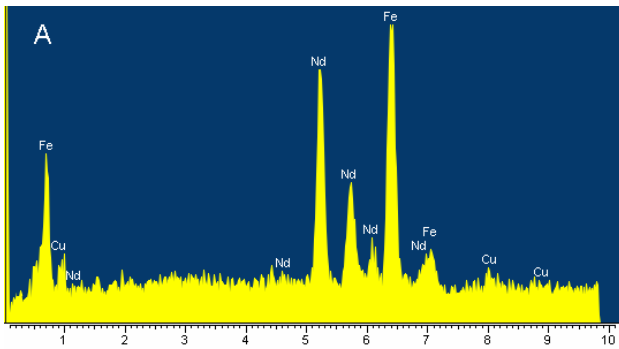
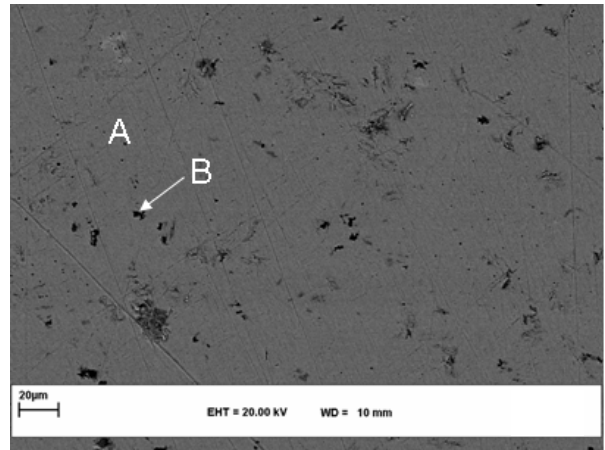
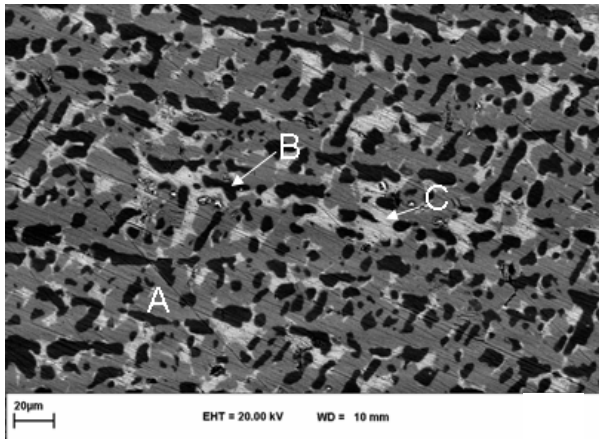
منحنی مغناطش نمونه  $x = 1$  سرجمع مغناطش فازهای  $Nd_6Fe_{13-y}Co_yCu$  و  $Nd_7Fe_{17-y}Co_y$  است. در ناحیه میدان‌های ضعیف، نمونه ناشی از حضور ترکیب  $Nd_7Fe_{17-y}Co_y$  به صورت یک ساختار فرومغناطیسی رفتار می‌کند و پس آن که میدان مغناطیسی افزایش یافت سهم مغناطش ترکیب  $Nd_6Fe_{13-y}Co_yCu$  مهم می‌شود. به این نکته باید توجه کرد که داده‌های مغناطش برحسب  $\mu_B/f.u.$  در شکل ۵ (ب) با فرض اینکه تمام نمونه متشکل از ترکیب  $Nd_6Fe_{13}CoCu$  است محاسبه شده است.

وابستگی دمایی مغناطش نمونه‌های ۱ و  $x = 0$  در میدان‌های انتخابی در شکل ۶ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که منحنی مغناطش نمونه  $x = 0$  وابسته به شدت میدان مغناطیسی در گستره‌ای از دما دارای برآمدگی پهن است. افزایش ناهنجار مغناطش با افزایش دما در گستره ۳۰ تا ۱۵۰ کلوین را می‌توان به پیکربندی کج شده گشتاور زیرشبکه‌های آهن و خاکی نادر که افزایش مغناطش کل را نتیجه می‌دهد نسبت داد. این گونه رفتار برای ترکیب  $Pr_6Fe_{13}Sn$  نیز گزارش شده است [۳]. در نمونه  $x = 1$  مغناطش رفتار کاهشی از خود نشان می‌دهد که ناشی از افت و خیزهای دمایی است. ناهنجاری مشاهده شده در گستره ۲۰

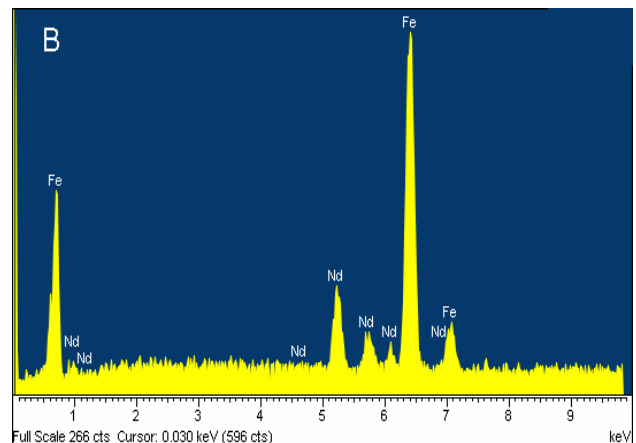
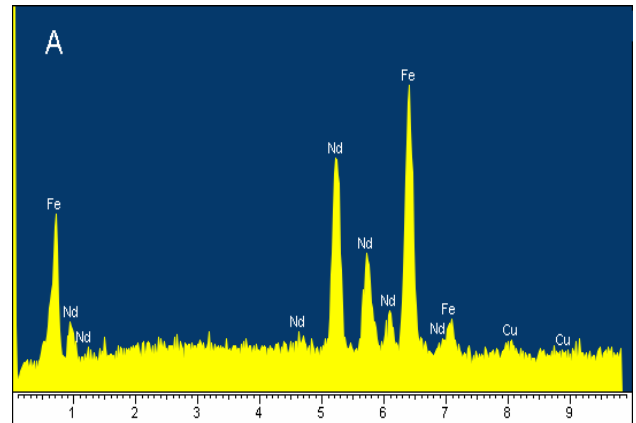
(۱ و  $x = 0$ )  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  را نشان می‌دهد. تحلیل EDX نقاط (A)، (B) و (C) در سطح نمونه‌ها نشان می‌دهد که زمینه خاکستری (A) شامل عناصر Nd-Fe-Cu (نماینده فاز اصلی  $Nd_6Fe_{13}Cu$ )، نقاط تیره (B) Nd-Fe (نماینده فاز  $Nd_7Fe_{17}$ ) و نقاط روشن (C) Nd-Fe-Co-Cu است.

نتایج اندازه‌گیری‌های ترمومغناطیسی نمونه‌ها در میدان اعمالی ضعیف بر حسب دما در شکل ۴ نشان داده شده است. دمای کوری نمونه‌های ۲ و ۱ و  $x = 0$  که از مشتق دوم منحنی مغناطش بر حسب دما به دست آمده است، به ترتیب ۳۲۵، ۴۰۳ و ۴۸۴ کلوین است. مقایسه دماهای کوری با نتایج گزارش شده برای  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  که به ترتیب برای ۲ و  $x = 0$  عبارتند از ۳۳۳,۵ و ۵۵۸ کلوین [۹] نشان داد که نمونه‌های تهیه شده (۲ و ۱ و  $x = 0$ )  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  به ترتیب شامل فازهای  $Nd_7Fe_{17}$ ،  $Nd_7Fe_{17-y}Co_y$  ( $0 < y < 1$ ) و  $Nd_7Fe_{17-z}Co_z$  ( $1 < z < 2$ ) است. این نتیجه در توافق با ریزساختار مشاهده شده با میکروسکپ الکترونی روبشی و طرح‌های پراش پرتو X چند فازی نمونه‌هاست.

منحنی‌های مغناطش بر حسب میدان نمونه‌های (۱ و  $x = 0$ )  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  در شکل ۵ نشان داده شده است. واضح است که نمونه  $Nd_6Fe_{13}Cu$  برای رسیدن به رفتار اشباعی به



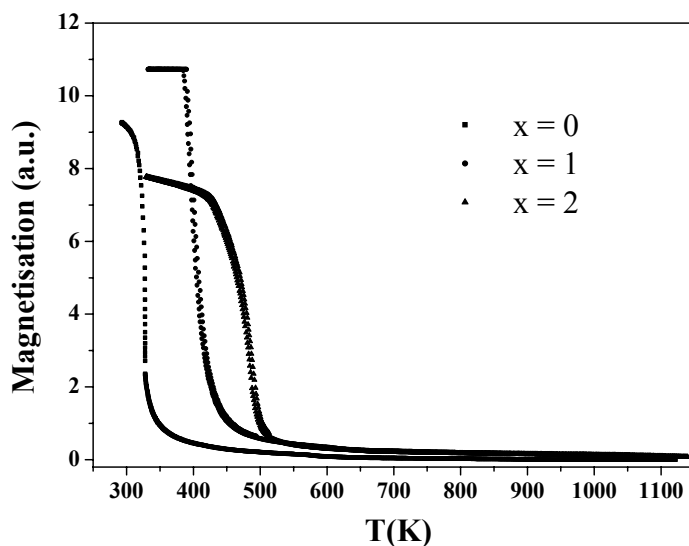
(ب)



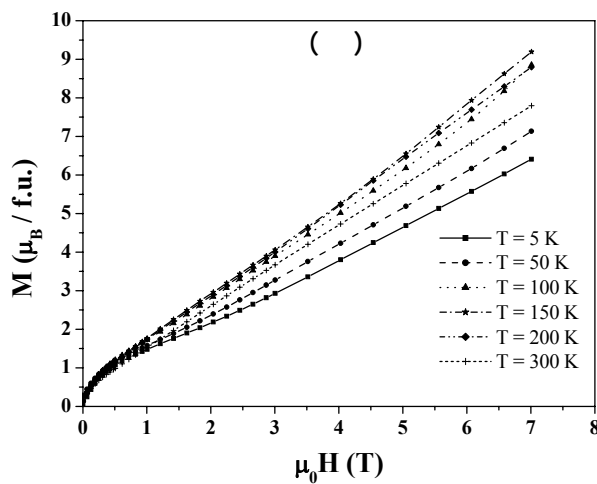
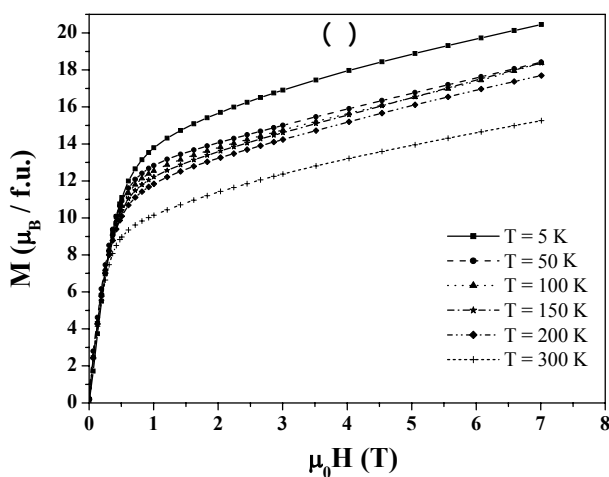
(الف)

شکل ۳. تصاویر SEM و آنالیز EDX نمونه‌های  $Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  (الف)  $x = 0$ ، (ب)  $x = 1$  آنالیز EDX زمینه خاکستری (A) عناصر Nd-Fe-Cu، نقاط تیره (B) Nd-Fe و روشن (C) Nd-Fe-Co-Cu را نشان می‌دهد.

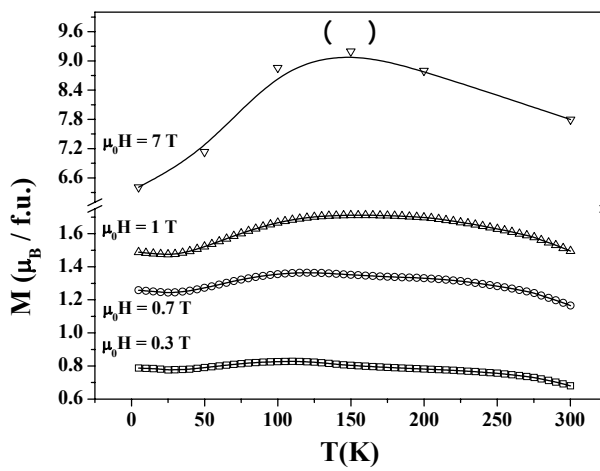
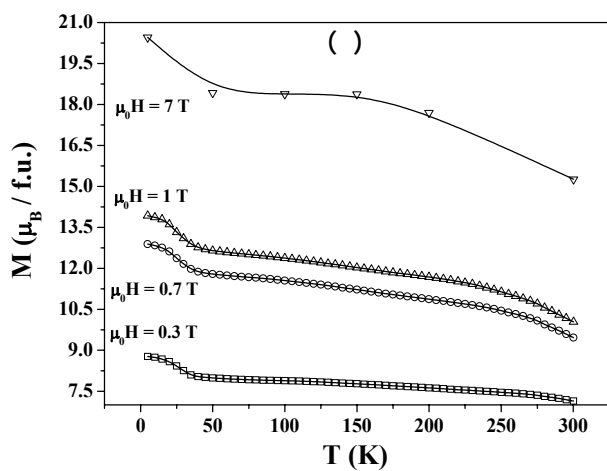
Downloaded from ijpr.iut.ac.ir at 2:58 IRST on Sunday November 19th 2017



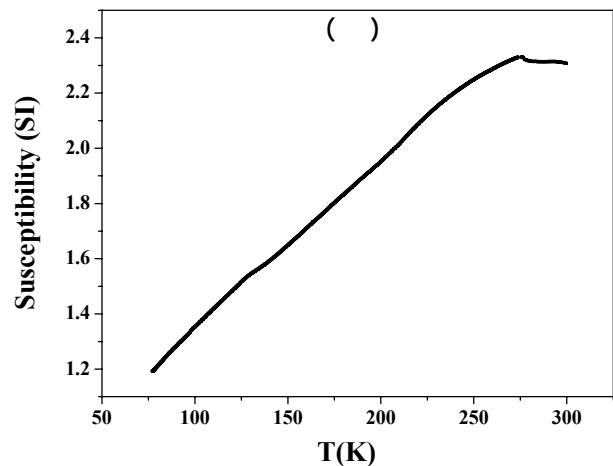
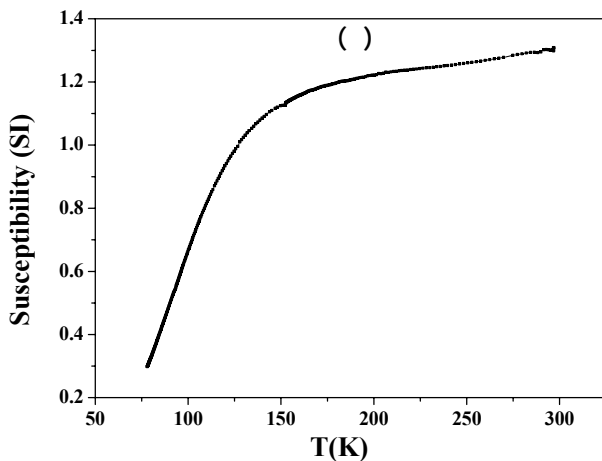
شکل ۴. داده‌های ترمومغناطیسی بر حسب دما برای مقادیر متفاوت  $x$  نمونه‌های  $\text{Nd}_7\text{Fe}_{13-x}\text{Co}_x\text{Cu}$ .



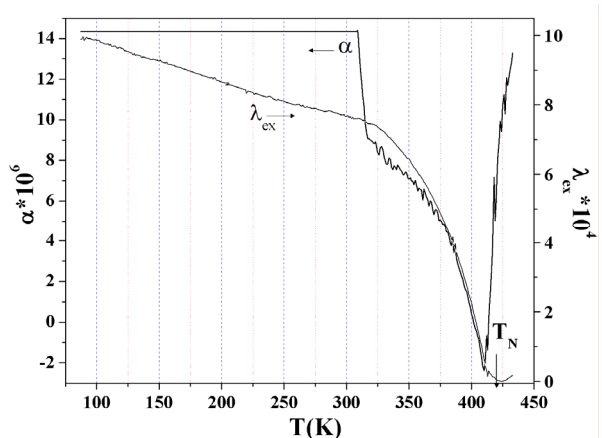
شکل ۵. تغییرات مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی در دماهای مختلف نمونه‌های  $\text{Nd}_7\text{Fe}_{13-x}\text{Co}_x\text{Cu}$  (الف)  $x = 0$  و (ب)  $x = 1$ .



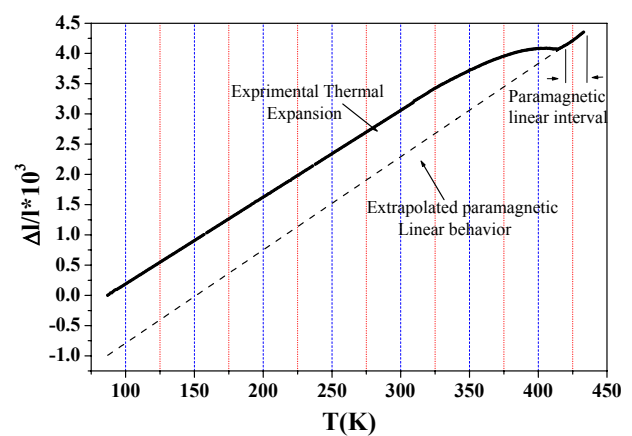
شکل ۶. تغییرات مغناطش بر حسب دما در چند میدان مغناطیسی انتخابی برای نمونه‌های  $\text{Nd}_7\text{Fe}_{13-x}\text{Co}_x\text{Cu}$  (الف)  $x = 0$  و (ب)  $x = 1$ .



شکل ۷. پذیرفتاری متناوب نمونه‌های  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13-x}\text{Co}_x\text{Cu}$  (الف)  $x = 0$  و (ب)  $x = 1$  در میدان  $500 \text{ A/m}$  و فرکانس  $3/333 \text{ Hz}$ .



شکل ۸. منحنی انبساط گرمایی تجربی نمونه  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Cu}$  در گستره دمایی  $80$  تا  $450$  کلوین. خط چین، برون‌یابی رفتار پارامغناطیسی به کمتر از دمای نیل ( $T_N = 419 \text{ K}$ ) را نشان می‌دهد.



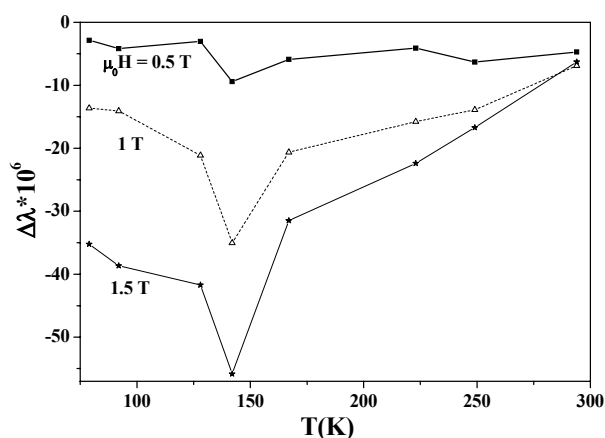
شکل ۹. وابستگی دمایی مغناطوتنگش خودبه‌خودی و ضریب انبساط گرمایی نمونه  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Cu}$ .

شکل ۸. منحنی انبساط گرمایی تجربی نمونه  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Cu}$  در گستره دمایی  $80$  تا  $450$  کلوین. خط چین، برون‌یابی رفتار پارامغناطیسی به کمتر از دمای نیل ( $T_N = 419 \text{ K}$ ) را نشان می‌دهد.

شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این منحنی با افزایش دما به‌طور تقریباً خطی تا دمای  $310 \text{ K}$  صعود می‌کند و ناهنجاری رفتاری پس از این دما (منحنی  $\alpha$  در شکل ۹) مشاهده می‌شود که دمای گذار ساختار مغناطیسی  $T_N = 419 \text{ K}$  را نشان می‌دهد. ضریب انبساط گرمایی متوسط نمونه نیز که از شیب میانگین منحنی انبساط گرمایی استخراج شده است، در شکل ۹ نشان داده شده است. در واقع رفتار مشاهده شده در انبساط گرمایی، ترکیبی از انبساط گرمایی فونونی و آثار مغناطیسی است که سهم مغناطیسی را می‌توان با برون‌یابی رفتار

تا  $30$  کلوین را می‌توان به برهم‌کنش‌های مغناطیسی بین ذرات با اثرات قوی‌تر، در میدان‌های مغناطیسی ضعیف، نسبت داد. در واقع در میدان‌های ضعیف، همه حوزه‌های مغناطیسی درون ذرات با هم به‌طور همبسته رفتار نمی‌کنند. به عبارت دیگر ذراتی با میانگین گشتاور مغناطیسی قوی‌تر بر ذرات دیگر تأثیر دارند.

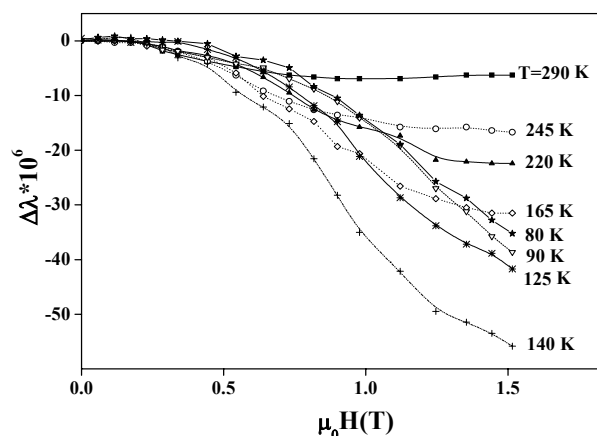
هیچ‌گونه ناهنجاری در پذیرفتاری مغناطیسی متناوب دو ترکیب در گستره دمایی اندازه‌گیری مشاهده نشده است (شکل ۷). رفتار مشاهده شده در نمونه  $x = 1$  ناشی از میانگین برهم‌کنش‌های تبدالی زیر شبکه‌ها، ناهمسانگردی مغناطوبلوری و اثرات مغناطوالاستیکی حضور ترکیب ناخواسته فرومغناطیس  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17-y}\text{Co}_y$  در فاز اصلی پادفرومغناطیس  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13-y}\text{Co}_y\text{Cu}$  است.



شکل ۱۱. وابستگی دمایی منحنی‌های مغناطوتنگش ناهمسانگرد  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Cu}$  ( $\Delta\lambda$ )

آستانه (کمتر از ۰/۵ T) کوچک است و سپس با افزایش میدان عملی افزایش می‌یابد. از آنجایی که در این ناحیه جابه‌جایی دیواره حوزه‌ها در فرایند مغناطش نمونه سهم عمده دارند، نتایج حضور مراکز قفل‌شدگی قوی اتم‌های خاکی نادر (اینجا، Nd) که از جابه‌جایی آسان دیواره حوزه‌ها مانع می‌کنند را تأیید می‌کند [۱۰]. علاوه بر جابه‌جایی دیواره حوزه‌ها، با افزایش میدان مغناطیسی به بیشتر از میدان آستانه گشتاورهای مغناطیسی به تدریج در راستای میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند. این مغناطش القاشده همراه با ثابت جفت‌شدگی مغناطوالاستیکی منفی زیرشبکه  $\text{Nd}(16l)$  تا دمای حدود ۱۴۰ کلوین است، جایی که منحنی‌های  $\Delta\lambda$  در شکل ۱۱ دارای مقادیر کمینه است. سپس با افزایش دما، سهم ثابت‌های جفت‌شدگی مغناطوالاستیکی مثبت دیگر زیرشبکه‌ها در منحنی  $\Delta\lambda$  باعث افزایش آن می‌شود. هنگامی که مغناطوتنگش ناهمسانگرد به سمت صفر میل می‌کند ثابت‌های جفت‌شدگی زیرشبکه‌ها اثرات هم‌دیگر را جبران کرده‌اند. که همانند این رفتار برای ترکیب  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Si}$  در دمای بازجهت‌گیری اسپینی گزارش شده است [۱۱].

ساختار بلوری، خواص مغناطیسی، انبساط گرمایی و مغناطوتنگش ناهمسانگرد نمونه‌های ( $x = 0, 1$  و  $2$ )



شکل ۱۰. وابستگی به میدان منحنی‌های مغناطوتنگش ناهمسانگرد  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Cu}$  ( $\Delta\lambda$ )

خطی پارامغناطیسی (بالای دمای نیل) به ناحیه پادفرومغناطیسی تخمین زد. تفاوت میان منحنی تجربی و خط برون‌یابی شده مغناطوتنگش خودبه‌خودی ( $\lambda_{ex}$  شکل ۹) است که تغییر یافته یک بلورنگاری با دما را نشان می‌دهد. در ترکیبات خانواده  $\text{RE}_6\text{Fe}_{13}\text{M}$  خواستگاه نظم مغناطیسی کوتاه-برد از برهم‌کنش‌های تبادلی Fe-Fe است. این برهم‌کنش‌های مغناطیسی معمولاً اولین گام برای گسترش ماکروسکوپی فاز مغناطیسی در کل حجم نمونه محسوب می‌شوند. با در نظر گرفتن ساختار ترکیب، نظم‌های مغناطیسی کوتاه-برد اولیه از برهم‌کنش‌های تبادلی فرومغناطیسی درون لایه‌های  $\text{Fe}_{16}$  و نظم بلند-برد نیز از برهم‌کنش‌های تبادلی فرومغناطیسی برون لایه‌های  $\text{Nd}(16l)-\text{Nd}(4f)$  آغاز می‌شود و با پیکربندی پادفرومغناطیسی میان لایه‌های مجزا شده با صفحات M کامل می‌شود [۱۰]. این مقدار مثبت مغناطوتنگش خودبه‌خودی پیش از دمای  $T_N = 419 \text{ K}$  را می‌توان به آرایش تدریجی نظم بلند-برد گشتاورهای مغناطیسی که همراه با نظم پادفرومغناطیسی دمای کم  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Cu}$  است نسبت داد. مقدار کوچک  $\lambda_{ex}$  پس از دمای نظم مغناطیسی ناشی از نظم کوتاه-برد میان Fe-Fe است.

شکل ۱۰ رفتار هم‌دمای مغناطوتنگش ناهمسانگرد ( $\Delta\lambda$ ) نمونه  $x = 0$  را نشان می‌دهد. وابستگی دمایی  $\Delta\lambda$  نیز در شکل ۱۱ آمده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دیده می‌شود که تنش‌های مغناطوتنگشی نمونه  $x = 0$  کمتر از میدان مغناطیسی



جایگاه‌های بلورنگاری اتم Nd باشد که با افزایش میدان اثرات آن تضعیف می‌شود. در نمونه  $x = 0$  سهم مغناطوتنگش زیرشبکه خاکی نادر (Nd) در دماهای کم غالب است و با افزایش دما سهم زیرشبکه Fe به طور فزاینده‌ای مهم می‌شود.

به طور کلی حضور جزئی اتم‌های کبالت در ترکیب‌های بین فلزی فرومغناطیس و فری‌مغناطیس باعث افزایش دمای کوری، میدان وادارندگی و افزایش مغناطش اشباع در آنها می‌شود. هم‌چنین در ترکیب‌های پادفرومغناطیسی باعث افزایش دمای نیل و ناهمسانگردی آنها می‌شود. نتایج حاصل در این زمینه در دست بررسی است و به زودی گزارش خواهد شد.

بخشی از هزینه‌های این تحقیق از محل طرح پژوهشی شماره ۱۲۴۲/پ مورخ ۸۶/۸/۱۹ معاونت محترم پژوهشی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد تأمین گردیده است، که بدین وسیله سپاسگزاری می‌گردد.

$Nd_6Fe_{13-x}Co_xCu$  مطالعه شد. نتایج نشان داد که: با جانشانی کبالت، پارامتر شبکه هر فاز مجزا کاهش می‌یابد و همراه با آن دمای گذار افزایش پیدا می‌کند. منحنی‌های مغناطش نمونه  $x = 0$  برآمدگی پهنی را نشان می‌دهد که می‌توان آن را به پیکربندی کج شده گشتاورها که افزایش مغناطش کل را به همراه دارد نسبت داد. در میدان‌های ضعیف، رفتار مغناطیسی فاز  $Nd_2Fe_{17-y}Co_y$  در نمونه  $x = 1$  غالب است.

منحنی ضریب انبساط گرمایی با افزایش دما به‌طور خطی تا دمای  $310\text{ K}$  صعود می‌کند و سپس دمای گذار ساختار مغناطیسی  $T_N = 419\text{ K}$  را نشان می‌دهد. افزایش مغناطوتنگش خودبه‌خودی  $\lambda_{ex}$  همراه با کاهش دما را می‌توان به نظم بلند-برد گشتاورهای مغناطیسی که همراه با نظم پادفرومغناطیسی  $Nd_6Fe_{13}Cu$  است نسبت داد. مغناطوتنگش نمونه  $x = 0$  در میدان‌های ضعیف کوچک است که این می‌تواند ناشی از مراکز قفل‌شدگی قوی دیواره حوزه‌ها در

6. F Wang, J Wang, P Zhang, BG Shen, Q Yan, L Zhang, *Physica B* **269** (1999) 17.
7. P S Papamantellos, K H J Buschow, C H de Groot, F R de Boer, C Ritter, F Fauth, Grit Boettger, *J. Alloys Comp.* **280** (1998) 44.
8. C H de Groot, K H J Buschow, F R Boer, *Phys. Rev. B* **57**(1998)11472.
9. Radhakrishna, P Umarji, A M Murthy, V G Narasimha, *Modern Physics Letters B* **6**(1992)1449.
10. M R Alinejad, N Tajabor, F Pourarian, *J. Magn. Mater.* **320**(2008)2140.
11. N Tajabor, M R Alinejad, F Pourarian, *Physica B* **321**(2002)60.

1. F Weitzer, A Leithe-Jasper, P Rogl, K Hiebl, A Rainbacher, G Wiesinger, W Steiner, J Fried, F E Wagner, *J. Appl. Phys.* **75** (1994) 7745.
2. A Leithe-Jasper, P Rogl, G Wiesinger, A Rainbacher, R Hatzl, M Forsthuber, *J Magn. Magn. Mater.* **170** (1997) 189.
3. Q F Xiao, T Zhao, Z D Zhang, M H Yu, X G Zhao, W Liu, D Y Geng, X K Sun, F R de Boer, *J Magn. Magn. Mater.* **184** (1998)330.
4. O Isnard, G J Long, D Hautot, K H J Buschow, F Grandjean, *J. Phys. Condens. Matter* **14** (2002) 12391.
5. K G Knoch, A Le Calvez, Q Qi, A Leithe-Jasper, J M D Coey, *J. Appl. Phys.* **73** (1993) 5878.