

## رفتار ناهنجار مغناطوتنگش و پذیرفتاری مغناطیسی متناوب در بسبورهای $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$

احمد امیرآبادی زاده<sup>۱</sup>، ناصر تجبر<sup>۱</sup>، فائز پورآرین<sup>۲</sup> هادی سلامتی<sup>۳</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. مؤسسه تحقیقاتی کارنگی ملون، دانشگاه کارنگی ملون، پیتسبورگ، آمریکا

۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۱/۱۲/۲ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۸/۱۷)

### چکیده

مغناطوتنگش و پذیرفتاری مغناطیسی متناوب بسبورهای  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  و  $x = 0, 0,1$  و  $0,5$  در بازه دمایی  $77 K$  تا  $300 K$  اندازه گیری شد. طیفهای  $XRD$  نشان دادند نمونه‌ها تک فاز هستند. در منحنیهای تجربی مغناطوتنگش و پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه  $GdCo_5$  بر حسب دما هیچ گونه ناهنجاری دیده نشد. در حالی که در منحنیهای مغناطوتنگش و پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های محتوی  $Pr$  ( $x = 0,1$  و  $0,5$ ) در بازه های دمایی خاصی ناهنجاری دیده می‌شود. این ناهنجاریها بر اساس چرخش آسان راستای مغناطیسی تفسیر می‌شوند. بدین معنی که، چرخش راستای آسان در نمونه  $x = 0,1$  از حالت مایل به سمت محور  $c$  ششگوشی است. در حالی که منحنی پذیرفتاری نمونه  $x = 0,5$  بر اساس دو چرخش پی‌درپی اول از حالت خوابیده در صفحه عمود بر محور  $c$  به حالت مایل و آنگاه از حالت مایل به سمت محور  $c$  با افزایش دما قابل تفسیر است. مغناطوتنگش نمونه‌های محتوی  $Pr$  در ناحیه دمایی گذار بازجهت‌گیری اسپینی به طور غیرعادی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مغناطوتنگش، پذیرفتاری مغناطیسی، ناهمسانگردی مغناطوبلوری، بازجهت‌گیری اسپینی

### ۱. مقدمه

جاننشانی بخشی از اتمهای خاکی نادر به شکل  $R_{1-x}R'_xCo_5$  خواص مغناطیسی متنوعی را نشان می‌دهند [۲-۴]، بنابراین آگاهی از خواص میکروسکوپیکی آنها مهم است [۱، ۲]. از مهمترین ویژگیهای میکروسکوپیکی می‌توان به اثرات میدان بلوری اشاره کرد که عامل ایجاد ساختارهای اسپینی متنوع و گذارهای فاز بازجهت‌گیری اسپینی در این قبیل آلیاژها هستند [۵-۸]. گذار بازجهت‌گیری اسپینی به معنی چرخش راستای آسان مغناطش با تغییر دما است. این پدیده ناشی از رقابت انرژیهای ناهمسانگردی مغناطوبلوری گشتاورهای مغناطیسی در جایگاه‌های بلوری متفاوت است، که جهت‌گیری آن گشتاورها را در راستاهای بلوری متمایزی به وجود می‌آورند. چرخش اسپینها در یک دمای بحرانی به نام دمای بازجهت‌گیری اسپینی

ترکیبات فلزات واسط ( $Co, Ni, Fe$ ) با عناصر خاکی نادر ( $R$ ) گروه مهمی از مواد مغناطیسی را تشکیل می‌دهند که کاربردهای فراوانی در ساخت آهنرباهای دائم، وسایل مغناطوتنگشی و ضبط مغناطونوری دارند [۱]. از مجموعه این قبیل آلیاژهای بین فلزی که تاکنون شناخته شده‌اند، ترکیبات  $RCO_5$  که در ساختار بلوری ششگوشی از خانواده  $CaCu_5$  بلوری می‌شوند از جایگاه ممتازی برخوردارند. مهمترین عواملی که موجب این امتیاز شده‌اند عبارتند از: اولاً، با ناهمسانگردی مغناطوبلوری بزرگی که دارند به عنوان آهنرباهای دائم استفاده می‌شوند. ثانیاً، در صورت تعویض اتمهای کبالت با عناصر واسط دیگر به شکل  $R(Co_{1-x}T_x)_5$  ( $T = Ni$  و  $Fe$ )، و یا

$T_{SR}$  رخ می دهد.

در ترکیبات  $RCo_5$  با اتمهای خاکی نادری که میدان ناهمسانگردی مغناطوبلوری آنها صفر است (مثل  $R = Gd, Y$ )، راستای آسان مغناطش به موازات محور  $c$  یاخته ششگوشی در دماهای پایتتر از دمای کوری ( $T_c = 600 K$ ) قرار دارد [۹]. اما، در ترکیباتی که ناهمسانگردی زیر شبکه اتمهای خاکی نادر در آنها صفر نیست، رقابت میدانهای ناهمسانگردی زیر شبکه های مختلف ممکن است موجب تغییر امتداد آسان مغناطش با دما (بازجهت گیری اسپینی) شود. ترکیب  $PrCo_5$  نمونه ای از این گونه ترکیبات است که در آن پدیده بازجهت گیری اسپینی، به صورت چرخش امتداد آسان مغناطش از راستایی که به اندازه ۲۳ درجه از محور  $c$  ششگوشی انحراف دارد به سمت محور  $c$  با افزایش دما به مقادیر بالاتر از  $T_{SR} = 107 K$  اتفاق می افتد [۲].

ترکیباتی که از خود گذار بازجهت گیری اسپینی نشان می دهند در وسایل مغناطوتنگشی کاربرد دارند [۱۰]. چنانچه بازه دمایی گذار اسپینی پهن و به دمای بالاتر انتقال یابد، ترکیبات در ساخت مبدلهای ترمومغناطیسی اهمیت می یابند [۱۱]. پیش بینی می شود بتوان با تعویض اتمهای  $Gd$  با  $Pr$  در ترکیب  $GdCo_5$  ضمن انحراف راستای آسان مغناطیسی از امتداد محور  $c$  در دماهای پایتتر از دمای کوری، دمای گذار بازجهت گیری اسپینی ( $T_{SR}$ ) ترکیب  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  را تغییر داد به طوری که به دمای اتاق نزدیک شود.

گذار بازجهت گیری اسپینی به روشهای مختلفی از جمله پراش نوترون [۲] ناهمسانگردی مغناطیسی [۱۲]، مغناطش [۱۳]، پذیرفتاری مغناطیسی [۸ و ۱۴]، مغناطوتنگش [۱۵ و ۱۶] و نیز مقاومت الکتریکی [۵] قابل مشاهده است. در این پژوهش اثر جاننشانی جزئی  $Pr$  به جای  $Gd$  بر گذار بازجهت گیری اسپینی در بسبلورهای  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  با  $x = 0, 0.1$  و  $0.5$  به کمک اندازه گیری مغناطوتنگش و پذیرفتاری مغناطیسی متناوب بررسی می شود.

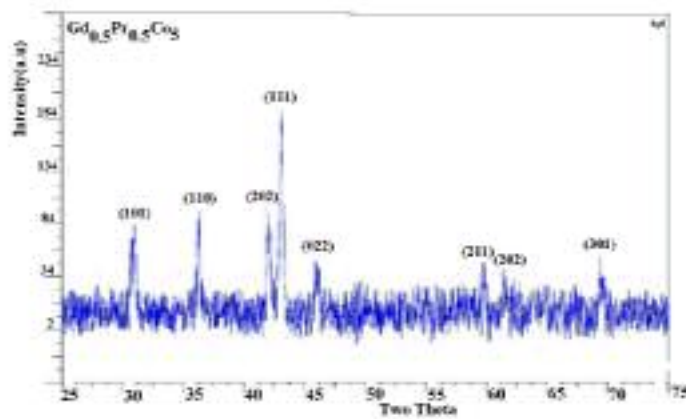
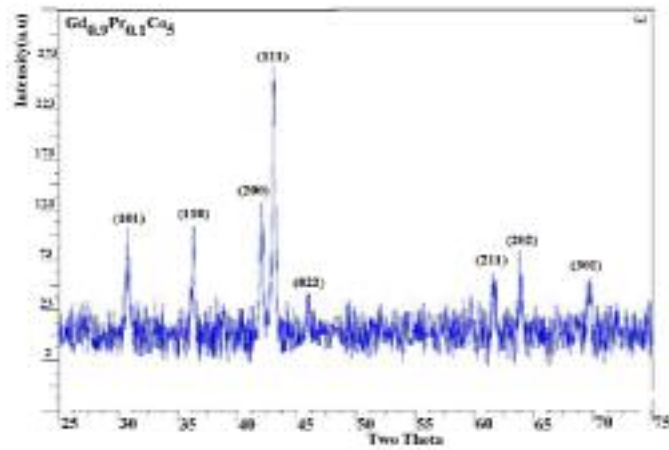
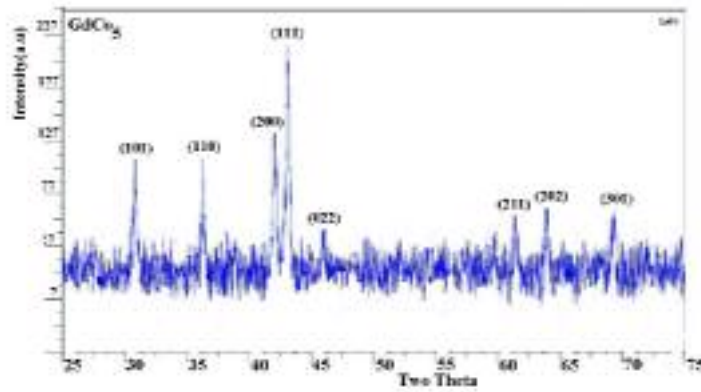
## ۲. روش آزمایش

آلیاژهای  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  با  $x = 0, 0.1$  و  $0.5$  به وسیله ذوب مخلوط عناصر اولیه در یک کوره ذوب القایی با فرکانس بالا و درون جانمونه ای مسی که با آب خنک می شد، در موسسه تحقیقاتی کارنگی ملون امریکا تهیه شدند. عناصر اولیه با درجه خلوص بهتر از ۹۹/۹۵٪ انتخاب شدند. به منظور حفظ موازنه شیمیایی ترکیبات، ذوب کردن در محیط آرگون خالص با فشار کمی بالاتر از فشار اتمسفر انجام شدند. هر یک از آلیاژهای ریخته گری شده به طور جداگانه در ورقه نازک تانتال پیچیده و آنگاه در حضور گاز خالص آرگون با فشار حدود  $1/3 Pa$  درون کپسولهای کوارتز محبوس شد. عملیات بازپخت هر یک از نمونه های محبوس شده در کپسول کوارتز در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت هفت روز (با توجه به نمودار فاز این ترکیبات) انجام شد. فازهای بلوری موجود در نمونه ها به کمک پراش پرتو  $X$  با تابش  $Cu-K\alpha$  بررسی شدند.

از بدنه هر نمونه بازپخت شده، قطعاتی قرصی شکل به قطر  $6 mm$  و ضخامت حدود  $3 mm$  برش داده شدند. با نصب پیمانه کرنشی روی سطح تخت هر یک از قرصها، مغناطوتنگش آنها در بازه دمایی  $77 K$  الی  $300 K$  و در میدانهای مغناطیسی تا  $1.5 T$  اندازه گیری شد. این روش توسط مؤلفان حاضر در مراجع [۱۴] و [۱۵] توصیف شده است. پس از اندازه گیری مغناطوتنگش در راستای موازی با امتداد میدان خارجی ( $\lambda_1$ ) و عمود بر آن ( $\lambda_2$ )، مغناطوتنگش ناهمسانگرد از رابطه  $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_a$  محاسبه شد [۱۷]. پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه ها به کمک دستگاه تجاری مدل ۷۰۰۰ شرکت Lake-Shore اندازه گیری شد.

## ۳. نتایج تجربی و برداشت

طرحهای پراش پرتو  $X$  ( $XRD$ ) آلیاژهای بازپخت شده  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  با  $x = 0, 0.1$  و  $0.5$  در دمای اتاق در شکل ۱ نشان داده شده اند. با مقایسه طیفهای پراشی با ساختار بلوری ششگوشی از نوع  $CaCu_5$  (کارت  $XRD$  شماره ۴۹۳-۱۲ از سری کارتهای  $ASTM$ ) تک فاز بودن نمونه ها را نتیجه داد.



شکل ۱. طرحهای پراش در دمای اتاق برای ترکیبات (الف)  $GdCo_5$ ، (ب)  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  و (پ)  $Gd_{0.5}Pr_{0.5}Co_5$

است [۲]. بنابر این در منحنیهای مغناطوتنگش و پذیرفتاری نمونه  $GdCo_5$  رفتار غیرعادی وجود ندارد.

وابستگی دمایی مغناطوتنگش طولی  $\lambda_1$  و ناهمسانگرد  $\lambda_a$  نمونه  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  در چند میدان برگزیده در شکل ۵ نشان داده شده است. این تصاویر نشان می دهند که هر دو کمیت در محدوده دماهای پایین تقریباً ثابت هستند، اما با افزایش دما به مقادیر بیش از حدود  $180K$  کاهش می یابند. که منحنی پذیرفتاری نمونه  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  (شکل ۴ را ببینید) در بازه دمایی  $180K$  تا  $280K$  از یک بیشینه پهن می گذرد. بازنگری شکل ۵-ب نشان می دهد که مغناطوتنگش ناهمسانگرد این نمونه نیز در بازه دمایی فوق رفتار غیر عادی دارد. در ترکیباتی که ناهمسانگردی زیر شبکه اتمهای خاکی نادر در آنها صفر نیست، رقابت میدانهای ناهمسانگردی زیر شبکه های مختلف ممکن است موجب تغییر امتداد آسان مغناطش با دما (باز جهت گیری اسپینی) شود. در این راستا محاسبات زیر نشان خواهند داد که حضور  $Pr$  در آلیاژهای  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  نیز می تواند باعث ایجاد یک سهم منفی در انرژی ناهمسانگردی و در نتیجه گذار باز جهت گیری اسپینی شود.

از نقطه نظر انرژی مغناطیسی، گذار باز جهت گیری اسپینی به صورت زیر قابل توصیف است.

بخش ناهمسانگرد انرژی مغناطیسی در یک بلور ششگوشی توسط رابطه پدیده شناختی زیر بر حسب زاویه انحراف مغناطش از راستای  $c$  ششگوشی ( $\theta$ ) و ضرایب ناهمسانگردی  $K_i$  قابل توصیف است [۸]:

$$E_a = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta \quad (1)$$

در این توصیف، مقادیر منفی ضریب ناهمسانگردی مرتبه اول ( $K_1 < 0$ ) گواهی بر جهت گیری راستای آسان مغناطیسی در جهتی منحرف از امتداد  $c$  ششگوشی خواهد بود، اگر داشته باشیم:

$$K_2 > 0, \quad 2K_2 > | -K_1 | \quad (2)$$

که البته اندازه این انحراف تابعی از مغناطش و برهمکنشهای تبدیلی بین گشتاورهای مغناطیسی است [۱۹]. بنابرین، وابستگی

مقایسه طرحهای پراشی با ساختار بلوری ششگوشی ( $P6/mmm$ ) به منظور استخراج ثابتهای شبکه ای به کمک نرم افزار کامپیوتری *Celref* از محصولات مؤسسه تحقیقاتی *LMGP* فرانسه انجام شد. ثابتهای شبکه ای به دست آمده برای هر یک از نمونه ها در جدول ۱ ارائه شده است.

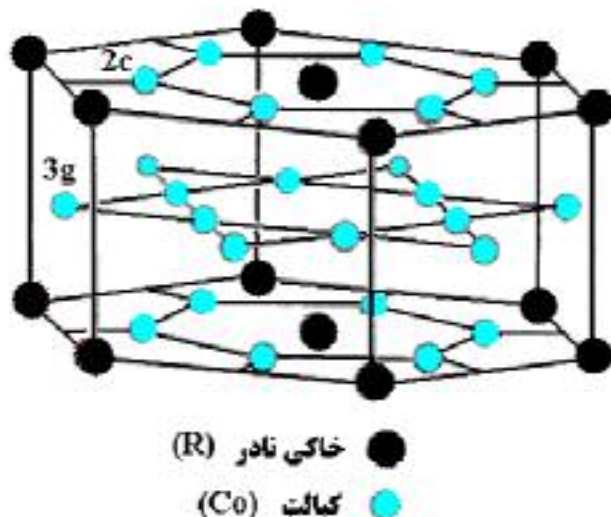
ساختار ششگوشی ترکیبات  $RCO_5$  از خانواده  $CaCu_5$  در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این ساختار دو جایگاه بلوری متفاوت  $2c$  و  $3g$  توسط اتمهای  $Co$  اشغال می شوند، در حالی که اتمهای خاکی نادر ( $R$ ) جایگاه بلوری  $1a$  را اشغال می کنند. در یک محلول جامد از این خانواده (مثل  $R_{1-x}R'_xCo_5$ ) اتمهای خاکی نادر متفاوت  $R$  و  $R'$  جایگاههای بلوری  $1a$  را به طور تصادفی اشغال می کنند [۱۸]. با توجه به اینکه شعاع یونی  $Pr$  در حدود  $7.5\%$  بزرگتر از شعاع یونی  $Gd$  است، لذا جانشانی جزئی  $Pr$  در ترکیب  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  می تواند باعث افزایش حجم یاخته بلوری شود که با نتایج به دست آمده در این تحقیق در جدول ۱ سازگاری دارد.

وابستگی دمایی مغناطوتنگش طولی ( $\lambda_1$ ) و مغناطوتنگش ناهمسانگرد  $\lambda_a$  نمونه  $GdCo_5$  در حضور میدانهای مغناطیسی  $0.5$ ،  $1$  و  $1.5$  تسلا، به ترتیب در شکلهای ۳-الف و ۳-ب نشان داده شده اند. مشاهده می شود که هر دو کمیت در محدوده دمایی قابل دسترس در این تحقیق، تقریباً ثابت هستند و اندازه مغناطوتنگش ناهمسانگرد کوچک است.

پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه ها در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود که پذیرفتاری نمونه  $GdCo_5$  در محدوده خطای تجربی تقریباً ثابت است و منحنی مربوطه رفتار غیر عادی نشان نمی دهد. همان طور که در مقدمه ذکر شد، در ترکیبات  $RCO_5$  با اتمهای خاکی نادری که میدان ناهمسانگردی مغناطوبلوری آنها صفر است (مثل  $R = Gd, Y$ )، ناهمسانگردی در جایگاه  $2c$  که قویتر است باعث جهت گیری راستای آسان مغناطش به موازات محور  $c$  یاخته ششگوشی در دماهای پایتتر از دمای کوری ( $T_c = 600 K$ ) می شود [۹]. این راستای آسان مغناطش توسط آزمایشهای پراش نوترون نیز تایید شده

جدول ۱. ثابتهای شبکه ششگوشی  $P6_3/mmm$  ترکیبات  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$ 

$x$	$a (A^\circ)$	$c (A^\circ)$	$cla$	$v(A^\circ)^3$
۰	۴/۹۷۳۶	۳/۹۷۴۰	۰/۷۹۹۰	۸۴/۶۳۱
۰/۱	۴/۹۷۹۶	۳/۹۷۱۳	۰/۷۹۷۵	۸۴/۶۳۶
۰/۵	۵/۰۰۰۳	۳/۹۶۵۴	۰/۷۹۳۰	۸۴/۶۵۴

شکل ۲. ساختار بلوری  $RCo_5$ .

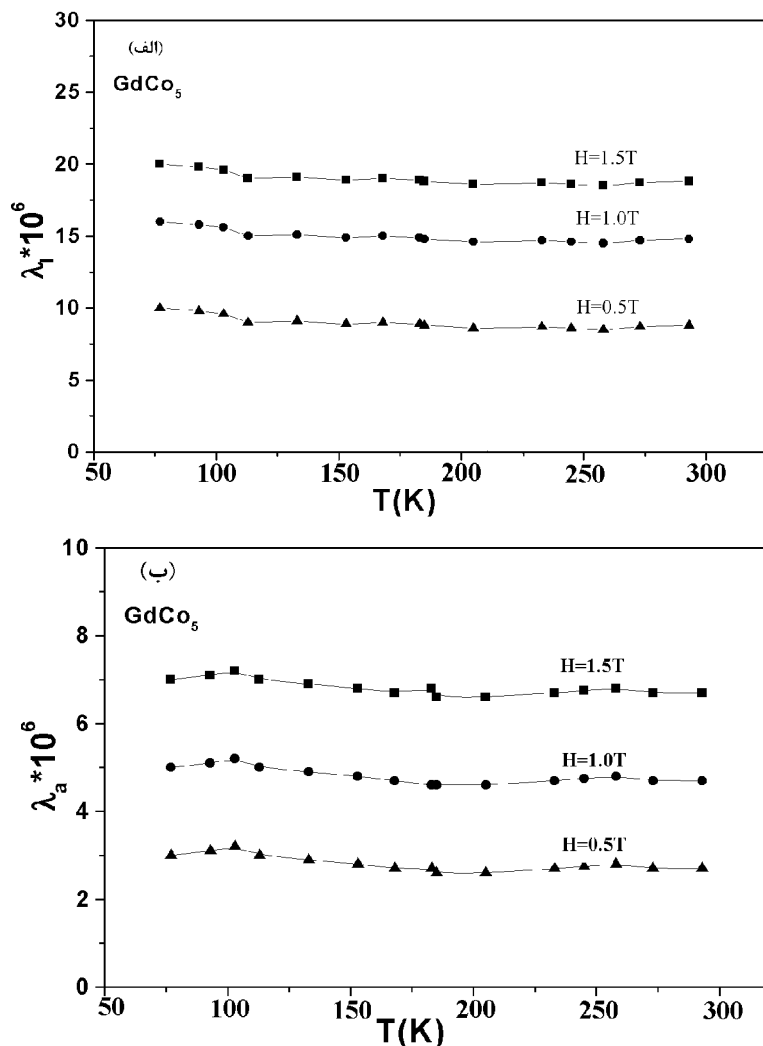
ضریب ناهمسانگردی مرتبه اول هر یک از دو زیر شبکه تشکیل دهنده آن  $(K_i^R, K_i^{Co})$  قابل محاسبه است:

$$K_1 = (K_1^{Co} + K_1^R) + 2D' / J'(1 + 2S / J'), \quad (3)$$

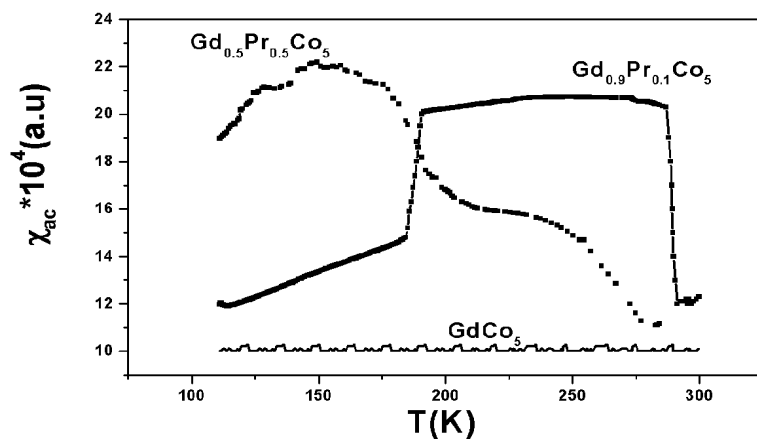
که در آن  $J' \equiv JM^y M_{Co} / M_R$ ,  $S \equiv K_1^{Co} + K_1^R M_{Co}^y / M_R^y$  و  $D \equiv (K_1^{Co} - K_1^R M_{Co} / M_R)$  بر حسب مغناطش هر یک از دو زیر شبکه  $(M_{Co}$  و  $M_R)$  و ثابت برهمکنش تبادلی بین آن دو  $(J)$  تعریف شده‌اند. به کمک مقادیر  $K_1^{Co}$ ,  $K_1^R = 0.18 K_1^{Pr}$ ,  $M_{Co}$ ,  $M_R = M_{Pr}$  که در مراجع [۲۰] و [۲۱] ارائه شده‌اند، و با استفاده از رابطه (۳)، مقدار  $K_1$  ترکیب  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  در دماهای مختلف محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مقایسه این شکل با منحنی  $K_1$  ترکیب  $GdCo_5$  در شکل ۶ نشان می‌دهد که جانشانی جزئی  $Pr$  بجای  $Gd$

دمایی مقادیر تجربی ضرایب ناهمسانگردی ترکیب  $PrCo_5$  در شکل ۶، گذار باز جهت‌گیری اسپینی که در بالا توصیف شد را به خوبی نشان می‌دهند. به منظور مقایسه، ضریب ناهمسانگردی مرتبه اول  $GdCo_5$  نیز در شکل ۶ نشان داده شده است، که با توجه به صفر بودن ناهمسانگردی مغناطوبلوری زیر شبکه  $Gd$ ، قابل انتساب به زیر شبکه  $Co$  در این ترکیب است. مقادیر مثبت و تقریباً ثابت ضریب  $K_1$  در این شکل، جهت آسان ثابت (موازی با امتداد  $c$  ششگوشی) در ترکیب  $GdCo_5$  را تایید می‌کند.

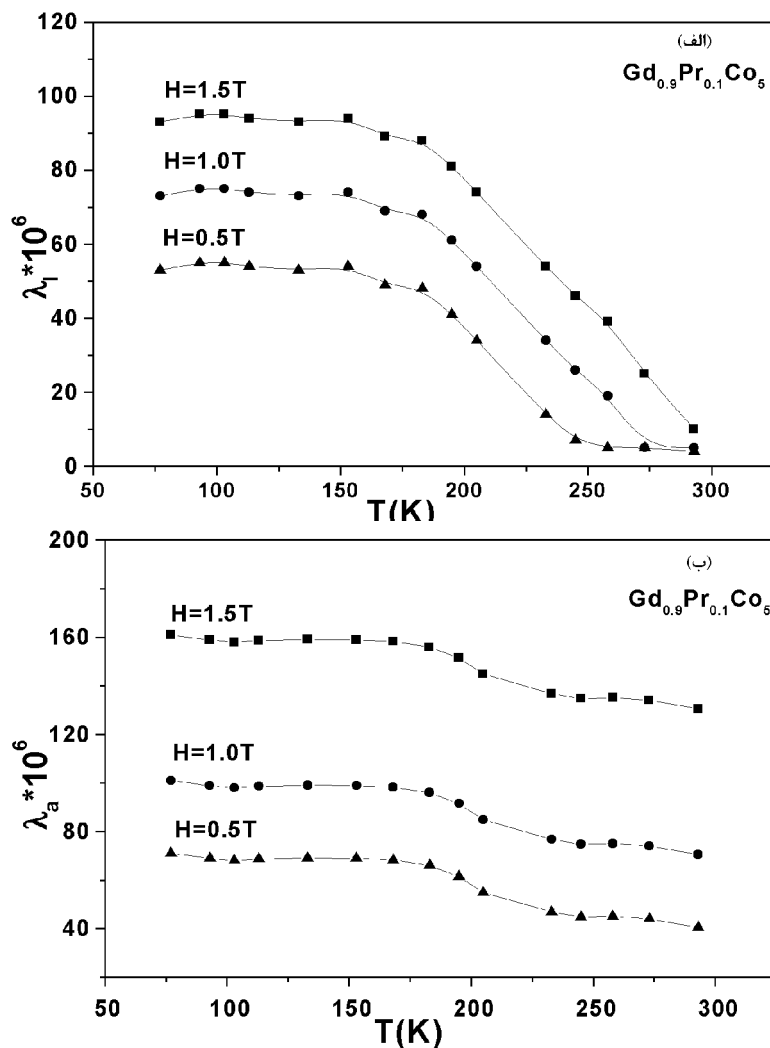
بر اساس مدل کلاسیکی مبتنی بر دو زیر شبکه و در تقریب میدان متوسط [۲۰]، ضریب ناهمسانگردی مرتبه اول کل آلیاژ  $PrCo_5$  با مغناطش اشباعی  $M$  به صورت زیر بر حسب



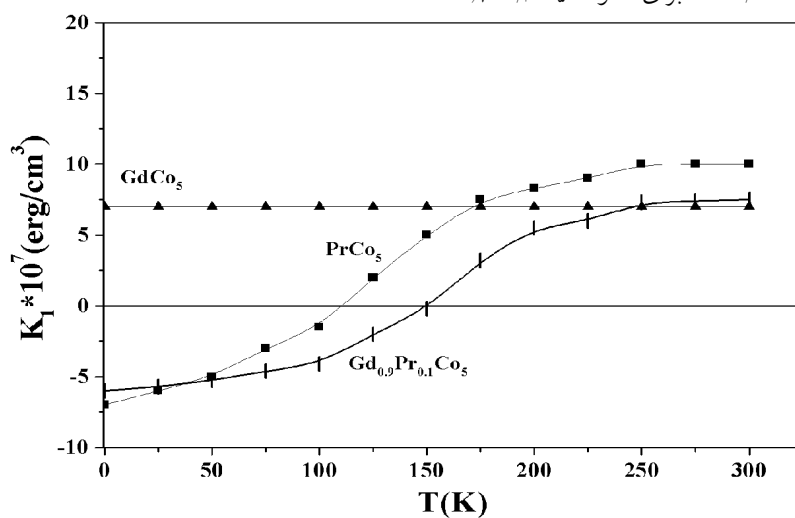
شکل ۳. وابستگی دمایی الف) مغناطوسنگش طولی ( $\lambda_1$ ) و ب) مغناطوسنگش ناهمسانگرد ( $\lambda_a$ ) در حضور میدانهای خارجی  $H = 0.5, 1, 1.5 T$  برای نمونه  $GdCo_5$ .



شکل ۴: پذیرفتاری مغناطیسی متناوب ترکیبات  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  ( $x = 0, 0.1$  و  $0.5$ ) بر حسب دما. دامنه میدان مغناطیسی متناوب  $1 Am^{-1}$ ، فرکانس  $333/3 Hz$ ، آهنگ افزایش دما  $1^\circ C/min$ .



شکل ۵. وابستگی دمایی الف) مغناطوتنگش طولی ( $\lambda_l$ ) و (ب) مغناطوتنگش ناهمسانگرد ( $\lambda_a$ ) در حضور میدانهای خارجی  $T = 0.5, 1$  و  $1.5 T$  برای نمونه  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$ .



شکل ۶. وابستگی دمایی ثابتهای ناهمسانگردی مرتبه اول در ترکیبات  $GdCo_5$  [۹، ۲] و  $PrCo_5$  برای ترکیب  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  که بر اساس رابطه (۳) محاسبه شده است.

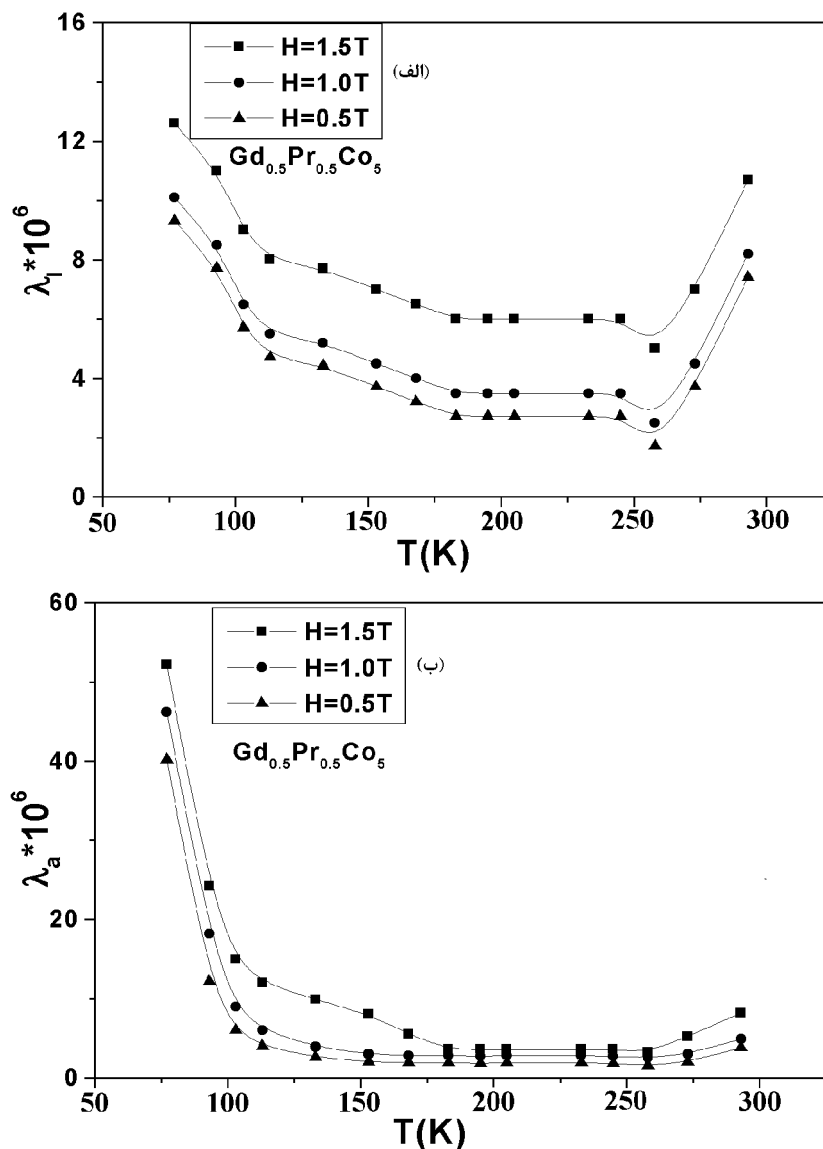
دیگر است. این منحنی پس از عبور از یک بیشینه در دمای حدود  $150\text{ K}$ ، در محدوده دمایی  $200\text{ K}$  تا  $250\text{ K}$  به صورت افقی در آمده و شیب آن صفر شده است، و آنگاه با افزایش دما به مقادیر بالاتر از حدود  $250\text{ K}$  به سرعت کاهش می‌یابد.

منحنیهای پذیرفتاری و مغناطوتنگش نمونه  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  نیز با دو مورد تفاوت به روش مشابهی قابل توصیف هستند. اول، از آنجا که جانمایی مقادیر زیاد  $Pr$  با کاهش حضور  $Gd$  در نتیجه کاهش نسبی برهمکنشهای تبادلی همراه است، لذا بازجهت‌گیری اسپینی در آلیاژ  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  در دمای پایتتری نسبت به آلیاژ  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  اتفاق افتاده است. دوم این که، منحنی پذیرفتاری نمونه  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  در شکل ۴ وجود دو گذار بازجهت‌گیری اسپینی، که اولی در حدود دمای  $175\text{ K}$  و دومی در دمای  $260\text{ K}$  کامل می‌شود را در این نمونه تأیید می‌کند. از آنجا که نقطه شروع به افزایش پذیرفتاری مغناطیسی با افزایش دما مشاهده نمی‌شود، لذا گذار اول در دمایی پایتتری از دمای قابل دسترس در این تحقیق ( $77\text{ K}$ ) شروع شده است. با توجه به این که جانمایی  $Gd$  با  $Pr$  به میزان  $50\%$  موجب تقویت شدید ناهمسانگردی در صفحه عمود بر محور  $c$  یاخته ششگوشی در دماهای پایین می‌شود (شکل ۶ را ببینید)، لذا پیش‌بینی می‌کنیم که این گذار به صورت چرخش امتداد آسان مغناطیسی از صفحه عمود بر محور  $c$  یاخته ششگوشی به سوی راستایی منحرف از محور  $c$  (حالت مخروطی) با افزایش دما باشد. بنابراین می‌توان گفت که گذار بازجهت‌گیری اسپینی دوم مشابه با تک گذار مشاهده شده در نمونه  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  است و با افزایش دما به صورت چرخش راستای آسان مغناطیسی از حالت مخروطی به سمت محور  $c$  یاخته ششگوشی در دمای  $260\text{ K}$  اتفاق می‌افتد. شباهت رفتار منحنی پذیرفتاری در ناحیه گذار اسپینی دوم نمونه  $x = 0.5$  (یعنی صفر شدن شیب خط مماس بر منحنی پذیرفتاری در یک بازه دمایی محدود) با رفتار غیر عادی منحنی پذیرفتاری نمونه  $x = 0.1$  در ناحیه گذار اسپینی آن در شکل ۳ خود گواهی بر این ادعاست. با توجه به این که گستره دمایی وقوع این دو گذار اسپینی تا دمای  $260\text{ K}$

ترکیب  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  باعث ایجاد یک سهم منفی در ضریب ناهمسانگردی مرتبه اول در ناحیه دماهای پایتتری از حدود  $150\text{ K}$  و در نتیجه انحراف راستای آسان مغناطش از محور  $c$  ششگوشی می‌شود. انتظار می‌رود با افزایش درصد  $Pr$ ، این دما به سمت دماهای پایتتری پیش رود تا نهایتاً به دما بازجهت‌گیری اسپینی  $PrCo_5$  نزدیک شود. از آنجا که ناهمسانگردی مغناطیسی در ناحیه دمایی که بازجهت‌گیری اسپینی اتفاق می‌افتد از یک کمینه می‌گذرد، لذا انتظار داریم که چنین گذاری با افزایش پذیرفتاری مغناطیسی متناوب و کاهش مغناطوتنگش اشباعی همراه باشد [۱۴]. بنابراین، در مقایسه با پذیرفتاری مغناطیسی نمونه  $[8] Nd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$ ، منحنی پذیرفتاری ترکیب  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  در شکل ۴ نشان دهنده چرخش راستای آسان مغناطش به سمت محور  $c$  ششگوشی با افزایش دماست که از حدود  $180\text{ K}$  شروع و در دمای  $280\text{ K}$  کامل می‌شود. با توجه به این که ناهمسانگردی اتمهای  $Co$  در جایگاه بلوری  $3g$  در صفحه عمود بر محور  $c$  ششگوشی است، لذا جانمایی مقادیر جزئی  $Pr$  می‌تواند انحراف محسوس راستای آسان از محور  $c$  را به همراه داشته باشد. با افزایش دما به مقادیر نزدیک به دمای اتاق که با کاهش چشمگیر ناهمسانگردی زیرشبکه  $Pr$  نسبت به زیرشبکه  $Co$  همراه است، راستای آسان مغناطش در موافقت با ناهمسانگردی اتمهای  $Co$  در جایگاه بلوری  $2c$ ، موازی با محور  $c$  یاخته ششگوشی قرار خواهد گرفت. تفاوت ناهمسانگردی اتمهای  $Co$  در دو جایگاه بلوری متفاوت به همراه برهمکنشهای تبادلی قوی ناشی از حضور  $Gd$  باعث افزایش نسبی دمای بازجهت‌گیری اسپینی در آلیاژ  $Gd_{0.9}Pr_{0.1}Co_5$  نسبت به  $PrCo_5$  شده است.

منحنیهای تجربی  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  برای نمونه  $Gd_{0.5}Pr_{0.5}Co_5$  در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب نشان می‌دهند که با افزایش دما از پایتترین مقدار ( $77\text{ K}$ ) هر دو کمیت کاهش می‌یابند و پس از عبور از یک کمینه در محدوده دمایی  $200\text{ K}$  تا  $250\text{ K}$  بار دیگر شروع به افزایش می‌کنند. منحنی پذیرفتاری مغناطیسی نمونه  $Gd_{0.5}Pr_{0.5}Co_5$  در شکل ۴، کمی پیچیده‌تر از دو نمونه





شکل ۷. وابستگی دمایی الف) مغناطوتنگش طولی ( $\lambda_l$ ) و ب) مغناطوتنگش ناهمسانگرد ( $\lambda_a$ ) در حضور میدانهای خارجی  $H = 0.5, 1$  و  $1.5 T$  برای نمونه  $Gd_{0.5}Pr_{0.5}Co_5$ .

در جمع‌بندی می‌توان گفت در این تحقیق مشاهده شد که مغناطوتنگش و پذیرفتاری مغناطیسی متناوب بسپلورهای تک فاز  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$ ،  $x = 0.1$  و  $0.5$  در بازه‌های دمایی خاصی همراه با ناهنجاری می‌باشد. این ناهنجاریها با پدیده گذار بازجهت گیری اسپینی قابل توصیف هستند. دیده می‌شود با افزایش جانشانی  $Pr$  به جای  $Gd$  در ترکیب  $Gd_{1-x}Pr_xCo_5$  (افزایش  $x$ ) به دمای بازجهت گیری اسپینی  $PrCo_5$  ( $T_{SR} = 107 K$ ) نزدیک می‌شویم.

را در بر می‌گیرد، لذا مغناطوتنگش نیز در این ناحیه کوچک است. در دماهای بالاتر از  $260 K$  که هر دو گذار اسپینی کامل شده‌اند، ناهمسانگردی مغناطیسی و نیز مغناطوتنگش موقتاً افزایش می‌یابند، که افزایش مغناطوتنگش در شکل ۷-الف مشاهده شد. تفاوت‌های جزئی قابل مشاهده در منحنیهای  $\lambda_a$  و  $\lambda_l$  برای هر یک از دو نمونه ناشی از اثر میدان و امغناطش بر  $\lambda_l$  است که با توجه به شکل مقارن نمونه‌ها در مغناطوتنگش ناهمسانگرد ظاهر نمی‌شود.

## مراجع

12. T I Ivanova, Yu G Pastushenkov, K P Skov, I V Telegina and I A Tskhadaze, *journal of alloys and Compounds*, **280** (1998) 20.
13. W Liu, X K San, Z O Zhang, J L Wang and R Grossinger, *J. Phys. Condens. Mater*, **10** (1998) 379.
14. N Tajabor, M R Alinejad and F Pourarian, *Physica B*, **321** (2002) 63.
15. N Tajabor, M R Alinejad and F Pourarian, *Physica B*, **321** (2002) 60.
16. V Yu Bodriakov, T H Ivanova, S A Nikitin and I S Tereshina, *J. Magn. Magn. Mater*, **59** (1997) 265.
17. F Pourarian and N Tajabor, *Phys. State. Sol(a)*, **61** (1980) 537.
18. L Streever, *Physical Review B*, **9** (1978) 6.
۱۹. م. ر. علی‌نژاد، پایان نامه دکتری، گروه فیزیک دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۱).
20. F Bolzoni and M F Pirini, *J. Appl. Phys.* **66**(5)(1990) 2315.
21. E A Nesbitt and J H Wernick, "Rare Earth Permanent Magnets" Academic Press, (1973).
1. A T Pedziwiatr and W E Wallance *J. Magn. Magn. Mater.* **66** (1987) 69.
2. A V Andreev, "Handbook of Magnetic Materials", Edited by K.H.J. Buschow, Elsevier, Vol. **8** (1995) 86.
3. T Ito, H Asano, H Ido and M Yamada, *J. Appl. Phys.* **79** (8)(1997) 5507.
4. T Ito, H Asano, H Ido, M Yamada and G Kido, *J. Magn. Magn. Mater.* **140-144** (1995) 943.
5. J B Sousa, J M Moreira, A del Moral, P Algarabel and R Ibarra, *J. Phys. Condens. Mater.* **2** (1990) 3897.
6. A del Moral, *J. Phys. Condens. Mater.* **4** (1992) 4686.
7. A del Moral, *J. Phys. Condens. Mater.* **4** (1992) 4703.
8. O Moze, M R Ibarra, A del Moral, G Marusi and P A Algarabel, *J. Phys. Condens. Mater.* **2** (1990) 6031.
9. B Szpunar and P A Lindgard, *J. Phys F*, **9**(3) (1979) 56.
10. F Pourarian, MV Satyanarayana and W E Wallance, *J. magn. Magn. Mater.* **25** (1981) 113.
11. M Sagawa, W Yamagishi and Z Henmi *J. Appl. Phys.* **52**(3) (1981) 2520.