

بِسْمِ  
الرَّحْمَنِ  
الرَّحِيمِ

تقدیم به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل یاریم نمود و با صبر و پشتیبانی همیشگی خود در تمامی دوران‌های زندگی ام امید موفقیت را در من زنده نگاه داشت.

تقدیم به پدر و مادرم که به من چگونه زیستن را آموختند.

تقدیم به آنان که دعای خیرشان بدرقه‌ی راهم بود.

سپاسگزاری

حضرت علی(ع) فرمودند:

« مَنْ عَلَّمَنِي حَرْفًا فَقَدْ سَيَّرَنِي عَبْدًا »

پیش از همه مایلم نهایت سپاسگزاری خود را به استاد راهنمایم جناب آقای دکتر ناصر تجبر ابراز نمایم. زحمات ایشان را ارج می‌نهم که با صبر و حوصله بسیار مرا در مسیر این رساله هدایت فرمودند. برخورد لازم می‌دانم از زنده‌یاد دکتر محمدرضا علی‌نژاد که راهگشای ورود اینجانب به این زمینه پژوهشی بود صمیمانه قدردانی کنم. همچنین از جناب آقای دکتر فائز پورآرین به خاطر مشاوره‌های سودمندشان و تهیه نمونه‌ها نهایت سپاسگزاری را دارم. تشکر صمیمانه خود را از استاد راهنمایم جناب آقای دکتر محمد بهدانی دارم که راهنمایی‌های بسیار ارزنده‌ای را به اینجانب در تمام مراحل این دوره ارائه نمودند. از جناب آقای دکتر هادی سلامتی به خاطر در اختیار قراردادن امکانات آزمایشگاهی در دانشگاه صنعتی اصفهان صمیمانه تشکر می‌کنم.

از آقایان دکتر محمد مهدی طهرانچی (استاد مدعو)، دکتر محمود رضایی (استاد مدعو)، دکتر احمد کمپانی (استاد مدعو) و دکتر ناصر شاه‌طهماسبی (نماینده تحصیلات تکمیلی) که امر داوری پایان‌نامه را بر عهده داشتند، به خاطر قبول زحمت و شرکت در جلسه دفاعیه و مطالعه پایان‌نامه سپاسگزارم. از اساتید محترم گروه فیزیک دانشگاه مشهد که در تمام طول تحصیلات دانشگاهی خود از رهنمودهای ارزنده‌شان استفاده برده‌ام، کمال تشکر را دارم.

از تمام کارمندان قسمت اداری، آقایان فنودی، اصغرزاده و کوهستانی، سلیمی، خانم لاری و منشی گروه فیزیک خانم عصمت‌مدار نیز قدردانی می‌کنم.

از دوستان و همکاران عزیزم در آزمایشگاه پیشرفته حالت جامد آقای دکتر داود ثانوی خوشنود، آقای هادی نعمتی‌فر، خانم ایرانمنش و خانم طباطبایی به خاطر همراهی‌شان سپاسگزارم.

در پایان از تمامی معلمین، اساتید، دوستان و خانواده‌ام در کل دوران تحصیل سپاسگزارم و امیدوارم بتوانم ادای دین کنم. خدایا عاقبت به خیری و عافیت و طول عمر را برای آنان از درگاہت مسئلت دارم.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول

#### بررسی برخی از خواص مغناطیسی مواد

۲	۱-۱ ناهمسانگردی مغناطیسی .....
۳	۱-۱-۱ تعیین تجربی ناهمسانگردی مغناطوبلوری مواد بس بلور .....
۳	۱-۱-۱-۱ قانون رسیدن به اشباع (LAS) .....
۴	۱-۱-۱-۲ روش آشکارسازی نقطه تکینه (SPD) .....
۸	۱-۱-۱-۳ محاسبه ثابت‌های ناهمسانگردی مغناطوبلوری .....
۹	۲-۱ مغناطوتنگش .....
۱۱	۱-۲-۱ منشا پدیده مغناطوتنگش .....
۱۲	۲-۲-۱ تاریخچه مواد مغناطوتنگشی .....
۱۴	۳-۲-۱ روش‌های تجربی اندازه‌گیری مغناطوتنگش مواد .....
۱۵	۴-۲-۱ کاربرد مواد مغناطوتنگشی .....
۲۳	۳-۱ مراجعها .....

### فصل دوم

#### بررسی عوامل موثر بر خواص ساختاری و مغناطیسی ترکیب‌های $R_3(Fe, M)_{29}$

۲۷	۱-۲ مقدمه .....
۲۸	۲-۲ بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی ترکیب‌های $R_3(Fe, M)_{29}$ .....
۳۵	۳-۲ تاثیر نشاندن اتم‌های Co به جای Fe .....
۴۰	۴-۲ تاثیر افزودن اتم‌های N، H و C .....
۴۴	۵-۲ تاثیر نشاندن اتم‌های خاکی نادر به جای اتم‌های خاکی نادر دیگر .....
۴۵	۶-۲ تاثیر عناصر پایدارساز .....
۴۷	۷-۲ تاثیر ساخت نمونه‌ها به روش مذاب تنیده .....
۴۹	۸-۲ مراجعها .....

## روش‌های اندازه‌گیری

۵۶.....	۱-۳ ساخت نمونه‌ها.....
۵۶.....	۱-۱-۳ ساخت آلیاژهای ۳:۲۹ مورد مطالعه.....
۵۶.....	۲-۳-۳ ساخت نوارهای مذاب تنیده.....
۵۸.....	۲-۳ مشخصه‌یابی نمونه‌ها.....
۵۸.....	۱-۲-۳ بررسی‌های ساختاری و فازی.....
۵۹.....	۲-۲-۳ اندازه‌گیری میدان ناهمسانگردی و $FOMP's$ .....
۶۱.....	۳-۲-۳ اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی متناوب.....
۶۳.....	۴-۲-۳ اندازه‌گیری حلقه پسماند.....
۶۵.....	۵-۲-۳ اندازه‌گیری مغناطوتنگش و انبساط گرمایی.....
۶۶.....	۱-۵-۲-۳ روش کرنش‌سنج.....
۶۸.....	۳-۳ مرجع‌ها.....

## فصل چهارم

نتایج بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطوالاستیکی ترکیب‌های  $Ce_3Fe_{25}Cr_4$  ،  $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$  و

$Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$  (کپه‌ای و مذاب تنیده)

۷۰.....	۱-۴ بررسی‌های ساختاری و فازی.....
۷۰.....	۱-۱-۴ بررسی‌های ساختاری ترکیب‌های $Ce_3Fe_{25}Cr_4$ و $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$ .....
۷۳.....	۲-۱-۴ بررسی‌های ساختاری ترکیب‌های $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$ (کپه‌ای و مذاب تنیده).....
۷۵.....	۳-۱-۴ بررسی‌های فازی ترکیب‌های $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$ و $Ce_3Fe_{25}Cr_4$ ، $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$ (کپه‌ای و مذاب تنیده).....
۷۵.....	۲-۴ پذیرفتاری مغناطیسی متناوب.....
۷۸.....	۳-۴ بررسی ویژگی‌های مغناطیسی.....
۷۹.....	۴-۴ بررسی ویژگی‌های مغناطوالاستیکی.....
۷۹.....	۱-۴-۴ انبساط گرمایی-مغناطوتنگش خودبه‌خودی ترکیب‌های $Ce_3Fe_{25}Cr_4$ و $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$ .....
۸۱.....	۲-۴-۴ مغناطوتنگش ترکیب‌های $Ce_3Fe_{25}Cr_4$ و $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$ .....
۸۱.....	۳-۴-۴ انبساط گرمایی-مغناطوتنگش خودبه‌خودی ترکیب $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$ (کپه‌ای و مذاب تنیده).....
۸۸.....	.....

- ۴-۴-۴ مغناطوتنگش ترکیب‌های  $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$  (کپه‌ای و مذاب تنیده) ..... ۹۰
- ۴-۵ مرجع‌ها ..... ۹۶

## فصل پنجم

بررسی اثر نشانندن  $Co$  به جای آهن بر ساختار بلوری، ویژگی‌های مغناطیسی و مغناطوالاستیکی

ترکیب‌های  $Tb_3Fe_{28-x}Co_xV_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) و  $Nd_3Fe_{27-x}Co_xV_{2.0}$  ( $x = 0, 2, 4$ )

- ۱-۵ بررسی‌های ساختاری و فازی ..... ۹۹
- ۱-۱-۵ بررسی‌های ساختاری ترکیب‌های  $Nd_3Fe_{27-x}Co_xV_{2.0}$  ( $x = 0, 2, 4$ ) ..... ۹۹
- ۲-۱-۵ بررسی‌های ساختاری ترکیب‌های  $Tb_3Fe_{28-x}Co_xV_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) ..... ۱۰۱
- ۳-۱-۵ بررسی‌های فازی ترکیب‌های  $Nd_3Fe_{27-x}Co_xV_{2.0}$  ( $x = 0, 2, 4$ ) و  $Tb_3Fe_{28-x}Co_xV_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) ..... ۱۰۴
- ۲-۵ بررسی اثر نشانندن  $Co$  بر ویژگی‌های مغناطیسی ترکیب‌های  $Tb_3Fe_{28-x}Co_xV_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) ..... ۱۰۷
- ۱-۲-۵ اندازه‌گیری مغناطش ..... ۱۰۷
- ۲-۲-۵ اندازه‌گیری وابستگی دمایی میدان ناهمسانگردی ( $H_d$ ) و میدان بحرانی ( $H_{cr}$ ) ..... ۱۰۸
- ۳-۵ بررسی ویژگی‌های مغناطوالاستیکی ترکیب‌های  $Tb_3Fe_{28-x}Co_xV_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) ..... ۱۱۳
- ۱-۳-۵ انبساط گرمایی ترکیب‌های  $Tb_3Fe_{28-x}Co_xV_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) ..... ۱۱۳
- ۲-۳-۵ مغناطوتنگش ترکیب‌های  $Tb_3Fe_{28-x}Co_xV_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) ..... ۱۱۶
- ۴-۵ مرجع‌ها ..... ۱۲۵
- ۵-۵ پیوست ..... ۱۲۷
- پیوست ۱ ..... ۱۲۷
- پیوست ۲ ..... ۱۳۲
- پژوهش‌های پیشنهادی ..... ۱۳۷
- فهرست شکل‌ها ..... ۱۳۸
- فهرست جدول‌ها ..... ۱۴۱
- مقاله‌های برگرفته از پایان‌نامه ..... ۱۴۲
- چکیده و عنوان انگلیسی

## چکیده

در این پایان‌نامه، ترکیب‌های بین فلزی خاکی نادر-فلز واسط  $R_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}M_y$  که در آن  $M = Cr, V, Ti$  و  $R = Y, Ce, Pr, Nd, Tb$  مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج در دو بخش ارائه شده است.

در بخش اول، خواص ساختاری، مغناطیسی و مغناطوآلاستیکی ترکیب‌های  $Ce_3Fe_{25}Cr_4$ ،  $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$  و  $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$  (کپه‌ای و مذاب تنیده) بررسی شده‌اند. ناهنجاری‌هایی خوش‌تعریف در ضریب انبساط گرمایی نمونه‌ها دیده می‌شود که به گذارهای فاز مربوط به دماهای نظم مغناطیسی و حضور مقدار کم فاز ۱:۱۲ در نمونه‌ی  $Ce_3Fe_{25}Cr_4$  می‌باشند که حضور فاز ۱:۱۲ در مورد این نمونه در اندازه‌گیری‌های پذیرفتاری مغناطیسی AC هم دیده شده است. برای نمونه‌ی  $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$  رفتار اشباعی در منحنی همدمای مغناطوتنگش ناهمسانگرد نزدیک دمای نظم مغناطیسی دیده می‌شود، در حالی که برای نمونه‌ی  $Ce_3Fe_{25}Cr_4$  از زیر دمای نظم مغناطیسی وجود دارد. منحنی‌های همدمای مغناطوتنگش حجمی نمونه‌های  $Ce_3Fe_{25}Cr_4$  و  $Y_3Fe_{27.8}Cr_{1.2}$ ، ناهنجاری‌هایی را نشان می‌دهد که بر حسب میدان‌های ناهمسانگردی مغناطیسی در صفحه  $b-a$  و محور  $c$  توضیح داده شده است. گذارهای فاز مغناطیسی ( $FOMP$ ) در اندازه-گیری پذیرفتاری مغناطیسی AC نمونه‌های کپه‌ای و مذاب تنیده ترکیب  $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$  دیده شده است. مقادیر مغناطوتنگش ناهمسانگرد نمونه‌های کپه‌ای و مذاب تنیده ترکیب  $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$  با هم متفاوتند که بر حسب حضور مقدار زیاد فاز  $\alpha-Fe$  در نمونه‌ی مذاب تنیده توضیح داده شده است.

در بخش دوم، تأثیر نشانیدن کبالت به جای آهن بر پارامترهای شبکه، دمای کوری ( $T_C$ )، دمای بازجهت-گیری اسپینی و دمای فرایند گذار مرتبه اول ( $T_{SR}$  و  $T_{FOMP}$ )، مغناطش اشباعی و خواص مغناطوآلاستیکی و مغناطوترابری ترکیب‌های  $Nd_3(Fe_{28-x}Co_x)V_{1.0}$  ( $x = 0, 2, 4$ ) و  $Tb_3(Fe_{28-x}Co_x)V_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) بررسی شده‌اند. مطالعه پراش پرتو X نمونه‌های  $Nd_3(Fe_{28-x}Co_x)V_{1.0}$  ( $x = 0, 2, 4$ ) نشان می‌دهد که ساختار ۳:۲۹ تشکیل نشده است و لذا ادامه مطالعه‌ی آن متوقف شد. مشخصه‌یابی ساختاری نمونه‌های  $Tb_3(Fe_{28-x}Co_x)V_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) با استفاده از پراش پرتو X، شاهدهی برای یک ساختار تک‌میلی نوع  $Nd_3(Fe, Ti)_{29}$  با گروه فضایی A2/m می‌باشد. پارامترهای شبکه‌ای  $a$ ،  $b$  (نه  $c$ ) و حجم یاخته یکه بلوری V برازش شده با استفاده از روش ریتولد با افزایش تراکم Co کاهش می‌یابند. رفتار پارامترهای شبکه‌ای و حجم یاخته یکه بلوری بر حسب اتم‌های کوچکتر کبالت و اشغال ترجیحی آهن توسط کبالت توضیح داده شده

است. وابستگی دمایی میدان‌های ناهمسانگردی و بحرانی مواد مغناطیسی سخت  $Tb_3(Fe_{28-x}Co_x) V_{1.0}$  ( $x = 0, 3, 6$ ) در گستره دمایی  $4/2$  تا  $300$  K و میدان‌هایی تا  $T = 30$  به روش SPD اندازه‌گیری شده است. برای  $x = 0$  مقادیر  $H_{cr} = 107, 210$  T بترتیب در  $5$  و  $300$  K معادل با گزارش‌های قبلی می‌باشد. رفتار میدان‌های ناهمسانگردی و بحرانی برای نمونه‌های  $x = 0, 3$  متفاوت با نمونه  $x = 6$  است که به اشغال ترجیحی آهن توسط کبالت در جایگاه‌های بلورنگاری متفاوت ساختار  $3:29$  مرتبط است. پیدایش زاویه‌های مایل بین بردارهای مغناطش زیرشبکه‌های مغناطیسی در خلال فرایند مغناطش به جای سهم‌های ناهمسانگردی مرتبه‌های بالا که در دمای اتاق معمولاً قابل چشم‌پوشی‌اند، به‌عنوان دلیل قابل ملاحظه‌ای در توجیه حضور *FOMP* حتی بالای دمای اتاق در نظر گرفته شده است. سهم زیرشبکه *Tb* به میدان‌های ناهمسانگردی در هر دمایی را می‌توان از اختلاف میدان‌های ناهمسانگردی ترکیب  $Tb_3(Fe, V)_{29}$  (با ساختار تک‌میلی نوع  $Nd_3(Fe, Ti)_{29}$  و ناهمسانگردی تک‌محوری) و میدان ناهمسانگردی اندازه‌گیری‌شده روی تک‌بلور ترکیب  $Y_3(Fe, V)_{29}$  (با ساختار نوع  $CaCu_5$  و ناهمسانگردی صفحه آسان) در آن دما بدست آورد. مغناوتنگش طولی و عرضی در گستره دمایی  $77$  K تا دمای اتاق و میدان‌های خارجی تا  $T = 1.5$  با بکاربردن پیمانه کرنشی اندازه‌گیری شده است. مغناوتنگش ناهمسانگرد نمونه‌های  $x = 0, 3$  دارای علامتی مخالف با نمونه  $x = 6$  است که این رفتار ناشی از افزایش ناهمسانگردی مغناطیسی با افزایش جانشانی *Co* می‌باشد. منحنی‌های همدمای مغناوتنگش حجمی نمونه‌ها، ناهنجاری‌هایی را نشان می‌دهد که بر حسب میدان‌های ناهمسانگردی مغناطیسی در صفحه *b-c* و محور *a* توضیح داده شده است.



## پیش‌گفتار

در جستجوی دستیابی به آهن رباهای سخت با مشخصه‌های مغناطیسی مطلوب، از جمله دمای کوری، میدان ناهمسانگردی و راستای آسان، مواد مختلفی به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بهترین آهن رباهایی که تاکنون به دست آمده‌اند، موادی هستند که در آنها یک یا دو عنصر خاکی نادر با یک یا دو عنصر فلز واسط ترکیب شده‌اند. البته معمولاً برای پایداری و یا بهبود پارامترهایی همچون سختی مکانیکی، از یک عنصر سوم نیز استفاده می‌شود. با کشف ترکیب  $Nd_3(Fe, Ti)_{29}$  مطالعات گسترده‌ای در زمینه ترکیب‌های  $R_3(Fe, M)_{29}$  صورت ساخته است. این دسته از ترکیب‌ها با ساختار بلوری تک‌میلی برای کاربرد در صنعت آهنربای دائمی مناسب‌اند، و پیچیدگی ساختار و رفتار مغناطیسی غیر معمول آنها موجب شده است که مورد توجه قرار گیرند.

در این تحقیق ساختار بلوری، خواص الکتریکی و خواص مغناطیسی ترکیب‌های سه‌تایی بین فلزی  $R_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}M_y$  که در آن  $R = Y, Ce, Pr, Nd, Tb$  و  $M = Cr, V, Ti$  مورد مطالعه قرار گرفته است. بدلیل غیرمغناطیسی بودن عنصر  $Y$ ، می‌توان سهم مغناطیسی و مغناطوتنگش عنصر  $R$  را با مقایسه نتایج اندازه‌گیری این خواص در ترکیب‌های  $R_3(Fe, M)_{29}$  بدست آورد. تفاوت ناهمسانگردی مغناطیسی  $Fe$  با  $Co$  این سؤال را به وجود می‌آورد که با تغییر مقدار  $Co$  در ترکیب‌های  $R_3(Fe, Co, M)_{29}$  خواص ساختاری و مغناطیسی آن‌ها چگونه تغییر می‌کنند و ریشه‌های فیزیکی این تغییرات چیست؟ برای پاسخ به این سؤالات، پس از ساخت این ترکیبات و آنالیز ویژگی‌های ریزساختاری، پذیرفتاری مغناطیسی، انبساط گرمایی و مغناطوتنگش واداشته آن‌ها اندازه‌گیری و سپس نتایج تجربی بدست آمده با مدل‌های نظری موجود و دیگر اطلاعات تجربی مقایسه و بررسی شده‌اند. انتظار می‌رود با بررسی خواص مغناطوتنگشی این مواد بتوان به درک بهتری از ساز و کار جفت‌شدگی مغناطش با شبکه بلوری دست یافت.

در فصل اول و دوم پایان‌نامه به ترتیب به بررسی برخی از خواص مغناطیسی مواد و معرفی ویژگی‌های متفاوت ترکیب‌های ۳:۲۹ پرداخته‌ایم. در فصل سوم روش‌های تجربی به کار رفته معرفی شده است. فصل چهارم اختصاص به نتایج مربوط به بررسی‌های ساختاری و خواص مغناطیسی، مغناطیسی دست‌های از ترکیب‌های ۳:۲۹ دارد. فصل پنجم مطالعات انجام شده روی اثر جانشانی  $Co$  با  $Fe$  بر خواص برخی از ترکیب‌های ۳:۲۹ را در بر می‌گیرد.

### ۱-۱ ناهمسانگردی مغناطیسی

ناهمسانگردی مغناطیسی، به انرژی مورد نیاز برای مغناطش کردن یک ماده معروف می‌باشد که در راستاهای مختلف متفاوت است. انواع گوناگونی از این ناهمسانگردی‌های مغناطیسی وجود دارد از جمله: ناهمسانگردی مغناطوبلوری<sup>۱</sup> (اثر ذاتی مواد)، ناهمسانگردی شکل<sup>۲</sup> (وابسته به شکل نمونه)، ناهمسانگردی مغناطیسی القایی<sup>۳</sup>، به طوری که دستیابی به مغناطش سمت‌دهی شده با اعمال میدان مغناطیسی به نمونه در حال بازپخت در دمای زیر  $T_C$  ممکن می‌باشد، و ناهمسانگردی تنش<sup>۴</sup> (تغییر فاصله بین اتمی با اعمال تنش) است. به طور تجربی مشاهده گردیده است که بردار مغناطش تمایل دارد تا در راستای محورهای بلورنگاری معین که محورهای آسان مغناطش نامیده می‌شوند قرار گیرند. در این راستاها ناهمسانگردی مقدار کمینه دارد. برای یک ماده همسانگرد مغناطیسی ایده‌ال، هیچ راستای ترجیحی برای گشتاورهای مغناطیسی در میدان صفر وجود ندارد در حالی که در یک ماده ناهمسانگرد مغناطیسی، گشتاورها با یک محور آسان همسو می‌شوند. در زیر به روش محاسبه ناهمسانگردی مغناطوبلوری در سیستم ۳:۲۹ می‌پردازیم و اطلاعات بیشتر در مورد انواع ناهمسانگردی در مرجع [۱] وجود دارد.

در حالت کلی ناهمسانگردی مغناطوبلوری به عناصر تشکیل دهنده و همچنین به تقارن بلوری ماده بستگی دارد. انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی بصورت کار مورد نیاز برای سمت‌دهی مغناطش در یک راستای معین در مقایسه با راستای آسان تعریف می‌شود. بنابر نظریه برس<sup>۵</sup>، انرژی ناهمسانگردی مغناطوبلوری ( $E$ ) برای تک‌بلور با اشباع مغناطیسی (یعنی بدون دیواره‌ی حوزه)، بصورت بسط یک سری:

$$E_{crys} = E(M \parallel \hat{z}) - E(M \perp \hat{z}) = \sum_i b_i \alpha_i + \sum_{ij} b_{ij} \alpha_i \alpha_j \quad (1-1)$$

$$+ \sum_{ijk} b_{ijk} \alpha_i \alpha_j \alpha_k + \sum_{ijkl} b_{ijkl} \alpha_i \alpha_j \alpha_k \alpha_l + o(\alpha^5)$$

می‌تواند بیان شود [۲].  $\alpha_i$  کسینوس‌های هادی بردار مغناطش نسبت به سیستم دکارتی راست‌گوشه محورهای مختصات هستند که در شکل ۱-۱ تعریف شده‌اند. انواع تقارن‌های بلوری موجود در ساختارهای سه‌میلی<sup>۶</sup>، تک‌میلی<sup>۷</sup>، راست‌گوشه<sup>۸</sup>، مکعبی<sup>۹</sup>، چارگوشی<sup>۱۰</sup>، سه‌گوشی<sup>۱۱</sup> و شش‌گوشی<sup>۱۲</sup>، همراه با انرژی ناهمسانگردی مغناطوبلوری (برحسب ثابت‌های ناهمسانگردی) در مرجع [۳] خلاصه شده است. معادله ۱-۱ برای مرتبه چهارم  $\alpha_i$  بصورت:

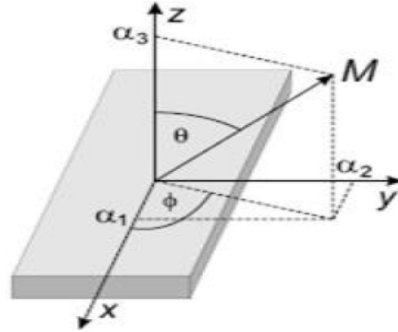
$$E = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^2 \theta \cos 2\varphi + K_3 \sin^2 \theta \sin 2\varphi + K_4 \sin^4 \theta + \quad (2-1)$$

$$K_5 \sin^4 \theta \cos 2\varphi + K_6 \sin^4 \theta \sin 2\varphi + K_7 \sin^4 \theta \cos 4\varphi + K_8 \sin^4 \theta \sin 4\varphi$$

1- Magnetocrystalline Anisotropy  
4- Stress Anisotropy  
9- Cubic

2- Shape Anisotropy  
5- Birss  
10- Tetragonal

3- Induced Magnetic Anisotropy  
6- Triclinic  
7- Monoclinic  
8- Orthorhombic  
11- Trigonal  
12- Hexagonal



شکل ۱-۱: امتداد مغناطش  $m = M/|M|$  نسبت به محورهای مختصات می‌تواند راستای کسینوس‌های  $\alpha_i$  نوشته شود. بازنویسی می‌شود. تنها با انتخاب جمله  $K_1$  در محاسبات معادله ۱-۲، برای  $E$  بسته به علامت  $K_1$ ، در راستای [۰۰۱] یک کمینه یا یک بیشینه پیدا می‌شود. بهرحال، وقتی همه جملات  $\sin^2\theta$  با  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  در محاسبات انتخاب شوند، هشت راستای ترجیحی با زاویه کجی  $\pi/4$  نسبت به صفحه  $xy$  وجود خواهد داشت که می‌تواند از عبارتهای انرژی ناهمسانگردی زیر با استفاده از معادله ۱-۲ برای سه راستای مغناطش ۱۰۰، ۱۱۰ و ۰۰۱ دیده شود:

$$E_{100} = K_0 + K_1 + K_2 \quad E_{100} = K_0 + K_1 + K_3 \quad E_{001} = K_0 \quad (۳-۱)$$

مطالعات روی تک بلور  $Y_3(Fe, V)_{29}$  نشان داده است که از عبارتهای انرژی ناهمسانگردی بالا می‌توان برای تشریح منحنی‌های مغناطش ترکیب‌های  $R$  خاکی نادر و  $T$  فلز واسطه  $R_3(Fe, T)_{29}$  استفاده کرد [۴، ۵].

### ۱-۱-۱ تعیین تجربی ناهمسانگردی مغناطوبلوری مواد بس‌بلور

#### ۱-۱-۱-۱ قانون رسیدن به اشباع<sup>۱۴</sup> (LAS)

تلاش‌هایی برای توصیف تحلیلی منحنی مغناطش مواد بس‌بلور انجام شده است [۶]. منحنی مغناطش  $M$  در میدان‌های بالای  $H$  معمولاً توسط فرمول تجربی:

$$M(H) = M_s [1 - (a/H) - (b/H^2) - (c/H^3)] + \chi H + EH^{1/2} \quad (۴-۱)$$

برازش می‌شود. ناحیه نزدیک به اشباع در منحنی مغناطش برحسب میدان توسط انواع مختلفی از فرایندها شبیه به ناهمگنی‌ها، ناهمسانگردی، امواج اسپینی و پذیرفتاری تعیین می‌شود. تعیین ناهمسانگردی توسط روش LAS برای موادی که تک‌بلور آن‌ها قابل دسترس نباشد و همچنین مواد آمورف اهمیت فراوان دارد. مغناطش اشباع یا ذاتی  $M_s$  و پذیرفتاری  $\chi$  توسط نظریه اتمی توصیف می‌شوند. ثابت  $a$  به کرنش‌های پلاستیکی و دررفتگی‌ها<sup>۱۵</sup> حساس است. تعداد زیادی کار پژوهشی برای تحلیل مغناطش مواد توسط LAS و محاسبه ثابت‌های ناهمسانگردی انجام شده است. ثابت  $b$  در مواد

می‌تواند از داده‌های ناهمسانگردی بلوری و تنش القائی<sup>۱۶</sup> محاسبه شود [۷، ۸]. جمله  $H^{1/2}$  متناسب به حضور امواج اسپینی است که در حالت کلی پارافرایند<sup>۱۷</sup> نامیده می‌شود.

کرانمولر<sup>۱۸</sup> و همکاران، تحلیل مغناطش مواد آمورف را توسط *LAS* انجام داده‌اند [۹]. روشی تعمیم‌یافته برای برازش همزمان همه پارامترها توسط گراسینگر<sup>۱۹</sup>، با استفاده از روش حداقل مربعات انجام شده است که با تولید داده‌های  $M(H)$  با کامپیوتر و آزمون آن‌ها با داده‌های تجربی نمونه‌هایی مثل  $BaFe_{12}O_{19}$  و  $Co, Ni, Fe$  اعتبار روش را نشان داده است [۱۰].

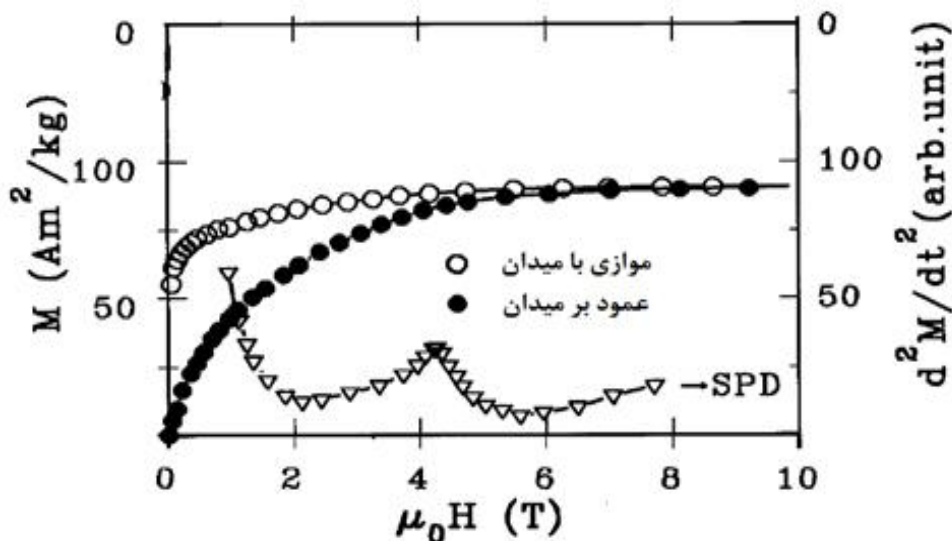
### ۱-۱-۱ روش آشکارسازی نقطه تکینه (SPD)<sup>۲۰</sup>

اساس روش *SPD*، اندازه‌گیری منحنی مغناطش با اعمال میدان مغناطیسی افزایشی با زمان در راستای سخت است [۱۰]. در ابتدا نمونه تک‌بلور را که در آن راستای سخت مشخص می‌باشد در نظر می‌گیریم. همانطوری که می‌دانیم منحنی  $M(H)$  تک‌بلورهای مواد فرومغناطیس و فری‌مغناطیس با اعمال  $H(t)$  موازی با راستای سخت در نقطه اشباع دارای تکینگی می‌باشد (یعنی پرش در منحنی مغناطش تک‌بلور داریم) که در یک مقدار بحرانی میدان مغناطیسی اعمالی در نقطه اشباع معادل با میدان ناهمسانگردی  $H_a$  است. تکینگی، نتیجه‌ای از اتصال دو تابع مختلف،  $M(H)$ ، در  $H = H_a$  است. برای  $H \geq H_a$ ، مقدار  $M(H)$  ثابت است ولی برای  $H < H_a$ ،  $M(H)$  به میدان  $H$  وابسته است. حال وقتی که میدان مغناطیسی بزرگ به یک ماده بس‌بلور اعمال شود منحنی هموار  $M(H)$  بدست می‌آوریم که در نگاه اولیه، هیچ نشانه‌ای از تکینگی در  $H = H_a$  مشاهده نمی‌شود. به‌رحال میانگین‌گیری روی تمام سمت‌گیری‌های بلور تکینگی ناشی از سهم بلورک‌های (دانه‌های) سمت‌گیری‌شده، که راستاهای سخت آن‌ها تقریباً موازی با  $H$  قرار دارند را حذف نمی‌کند. وقتی که مقدار میدان خارجی با زمان افزایش می‌یابد و به مقدار میدان ناهمسانگردی نزدیک می‌شود تکینگی‌هایی ناشی از چرخش بردار مغناطش فقط از بلورک‌های (دانه‌های) سمت‌گیری‌شده (که راستاهای سخت آن‌ها تقریباً موازی با  $H$  قرار دارند) رخ می‌دهند. بنابراین وقتی میدان مغناطیسی به‌طور کامل با راستای سخت همسو می‌شود (تک‌بلور) گذار مرتبه دوم رخ می‌دهد (یعنی پرش در منحنی مغناطش داریم) و برای دیگر سمت‌گیری‌های میدان از راستای سخت (بس‌بلور)، منحنی مغناطش برگشت‌پذیر، تابعی منظمی برای  $H = H_a$  می‌باشد. بطور خلاصه از روش *SPD* می‌توان تکینگی در  $H = H_a$  را برای نمونه‌های بس‌بلور اندازه‌گیری کرد و در نتیجه میدان ناهمسانگردی را محاسبه کرد.

آستی و رینالدی<sup>۲۱</sup> نشان دادند [۱۱] که در مواد بس بلور با توجه به راستای محور سخت با محور تقارن بلوری در یک مشتق معین  $d^n M/dH^n$ ، تکینگی‌هایی در  $H = H_a$  ظاهر می‌شود. مرتبه مشتق به تقارن خاص نمونه وابسته است که تکینگی در بلورهای تک‌محوری و مکعبی بترتیب در  $d^2 M/dH^2$  و  $d^3 M/dH^3$  ظاهر می‌شود. مهمترین مورد در مواد تک‌محوری دارنده راستای سخت در صفحه‌ی قاعده است که تکینگی در  $d^2 M/dt^2 - H$  بشکل فنجان‌هایی در سمت چپ قله  $H = H_a$  ظاهر می‌شود (شکل ۱-۲ را ببینید).

از روش SPD برای اندازه‌گیری میدان ناهمسانگردی مغناطوبلوری ترکیب‌های بین‌فلزی فلز واسط-خاکی نادر در خلال ۳۰ سال در موسسه IMEM-CNR در پارما و دانشگاه فنی وین استفاده شده است [۱۲]. برای دستیابی به ناحیه‌ی فیزیکی مورد علاقه (رسیدن به اشباع در منحنی مغناطش)، اعمال یک میدان مغناطیسی پالسی بزرگ<sup>۲۲</sup> مورد نیاز است. این روش اولین بار روی ترکیب شش‌گوشی  $BaFe_{12}O_{19}$  با روش میدان پالسی امتحان شده بود [۱۱].

در بالا دو روش SPD و LAS برای تعیین ناهمسانگردی مواد بس بلور توصیف شده است. اختلاف اصلی این روش‌ها در این است که روش LAS در حقیقت انتگرال معادله ۱-۴ روی تمامی دانه‌ها یعنی جمع تمامی فرایندهایی که در ناحیه نزدیک به اشباع دخالت دارند است. در حالی که روش SPD فقط به دانه‌های سمت‌گیری شده حساس است که سبب تکینگی‌ها می‌شوند. اینچنین نتایج می‌تواند بدلیل افت و خیزهای ناهمسانگردی متفاوت باشند.



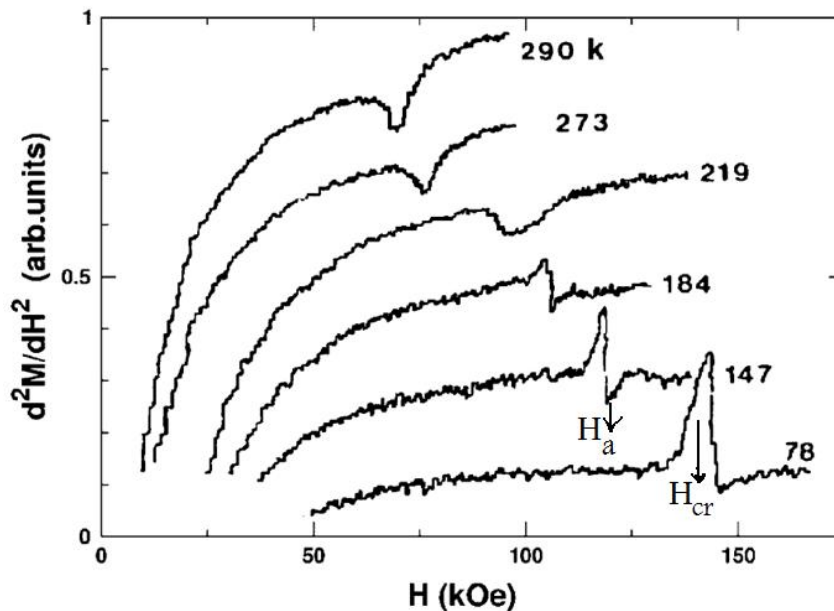
شکل ۱-۲: منحنی همدمای مغناطش و سیگنال SPD در دمای اتاق برای ترکیب  $Sm_3Fe_{26.7}V_{2.3}$  با میدان اعمالی موازی و عمود بر راستای سمت‌دهی نمونه پودری [۴].

دیگر کاربرد روش  $SPD$ ، آشکارسازی فرایندهای مغناطش مرتبه اول<sup>۲۳</sup> ( $FOMP's$ ) است که  $FOMP$  پرش ناپیوسته از یک کمینه انرژی به کمینه دیگر (بطور مثال دو کمینه می‌توانند ۱- محور و صفحه ۲- محور و مخروط ۳- مخروط و صفحه باشند) در منحنی مغناطش تعدادی بلورها می‌باشد [۱۳]. وقتی که پرش در منحنی مغناطش به مقدار اشباع ( $M_s$ ) می‌رسد  $FOMP$  نوع ۱ داریم در غیر اینصورت  $FOMP$  نوع ۲ رخ می‌دهد. بر اساس چگونگی جفت‌شدگی بردارهای مغناطش‌های دو زیرشبکه می‌توان دو سیستم خطی و غیرخطی را تعریف کرد. در سیستم‌های خطی، بردارهای مغناطش‌های دو زیرشبکه دارای جفت‌شدگی خطی می‌باشند ولی در سیستم‌های غیرخطی، بردارهای مغناطش‌های دو زیرشبکه، با یکدیگر زاویه شیب تشکیل می‌دهند. شکل تابع انرژی که باید برای توصیف  $FOMP's$  در سیستم‌های خطی و سیستم‌های غیرخطی در نظر بگیریم با هم فرق می‌کند. در ابتدا برای فهم منشأ  $FOMP's$  در سیستم‌های خطی، انرژی بلوری برحسب ثابت‌های ناهمسانگردی پدیده‌شناختی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$E = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta - HM_s \cos \gamma \quad (5-1)$$

که  $\theta$  و  $\gamma$  بترتیب زاویه بین بردار  $M$  با محور آسان بلورنگاری<sup>۲۴</sup> و با امتداد میدان مغناطیسی خارجی  $H$  می‌باشند. برای بعضی ترکیب‌هایی از ثابت‌های ناهمسانگردی  $K_i$ ، دو نقطه مختلف با انرژی کمینه در مقادیر مختلفی از  $\theta$  رخ می‌دهند و دو نقطه مختلف به شرطی دارای انرژی یکسان می‌باشند که میدان مغناطیسی اعمالی دارای مقدار بحرانی در  $H = H_{cr}$  باشد که  $H_{cr}$  وابسته به مقادیر  $K_i$  است. این شرایط یک چرخش برگشت‌ناپذیر در بردار مغناطش  $M$  یعنی  $FOMP$  را نتیجه می‌دهد. روش  $SPD$  تعیین دقیق و واضح میدان بحرانی  $H_{cr}$  حتی برای نمونه‌های بس‌بلور را فراهم می‌کند [۱۴]. شکل ۱-۳، نتایج  $SPD$  را برای نمونه بس‌بلور  $Nd_2Fe_{14}B$  در دماهای مختلف نشان می‌دهد. در مورد  $FOMP$  نوع ۲، همانطوری که از شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، مکان‌های  $H_a$  و  $H_{cr}$  به‌طور همزمان از تک اندازه‌گیری‌های  $SPD$  دیده می‌شود [۱۵].

فرایند مغناطش مرتبه اول وابسته به چرخش برگشت‌ناپذیر بردار مغناطش ( $M_s$ ) بین حالت‌های ناهم-ارز انرژی است [۱۳]. میدان بحرانی  $H_{cr}$  و بزرگی  $\Delta M$  که پرش در آن در راستای موازی با میدان دیده می‌شود تابعی از ثابت‌های ناهمسانگردی بلورند. این  $FOMP's$  در حقیقت مشابه با گذارهای بازجهت-گیری اسپینی‌اند که می‌توانند به عنوان مورد خاص  $FOMP$  با  $H_{cr} = 0$  در نظر گرفته شوند.  $FOMP$  با  $H_{cr}$  و مغناطش‌های اولیه و نهایی  $M_1$  و  $M_2$  مشخص می‌شود. بستگی به اینکه آیا  $M_2$  (مغناطش در حالت نهایی) برابر یا پایین‌تر از  $M_s$  (مغناطش اشباع) است می‌توان  $FOMP$  نوع ۱ و ۲ را تشخیص داد.



شکل ۱-۳: حضور FOMP's در بس بلور  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  زیر دمای ۲۰۰ K با استفاده از روش SPD.

توصیف نظریه پیدایش FOMP با مطالعه‌ی تابع انرژی برای تقارن مکعبی با سهم‌های ناهمسانگردی تا مرتبه ۶ و برای بلورهای تک‌محوری، تا ثابت‌های ناهمسانگردی مرتبه ۴ انجام شده است [۱۱، ۱۳]. همچنین آستی و بولونزی توضیح دادند [۱۳] که برای توصیف FOMP's، باید ثابت‌های ناهمسانگردی مراتب بالاتر را هم در نظر گرفت. با برازش منحنی مغناطش تجربی تک‌بلور یا پودر سمت‌دهی شده می‌توان ثابت‌های ناهمسانگردی مراتب بالاتر<sup>۲۵</sup> را تعیین کرد. روش گرافیکی مشابه‌ای توسط ساک اسمیت و تامپسون<sup>۲۶</sup> (که در بخش بعدی کامل توضیح داده شده است) ارائه شده است [۱۶] که تعیین ثابت‌های ناهمسانگردی  $K_1$  و  $K_2$  را ممکن می‌سازد. ثابت‌های ناهمسانگردی  $K_1$  و  $K_2$  با برازش قسمت خطی  $\frac{H_{ext}}{M}$  بر حسب  $M^2$  بدست می‌آیند. این برازش با چشم‌پوشی از ثابت‌های ناهمسانگردی مراتب بالاتر، باید خطی باشند. بنابراین اگر رسم  $\frac{H_{ext}}{M}$  بر حسب  $M^2$  خطی باشد می‌توان از تحلیل ارائه شده در بالا که منتسب به مغناطش‌های زیرشبکه‌ای با جفت‌شدگی خطی می‌باشد (معادله ۱-۵ را ببینید) استفاده کرد. رسم غیرخطی یا منحنی‌وار  $\frac{H_{ext}}{M}$  بر حسب  $M^2$ ، توسط ثابت‌های ناهمسانگردی مراتب بالاتر توضیح داده می‌شود و در این حالت احتمال پیدایش دو نوع FOMP بطور همزمان در یک اندازه‌گیری SPD وجود دارد [۱۶] که نمی‌توان برای توصیف FOMP's در این حالت غیرخطی از تحلیل منتسب به مغناطش‌های زیرشبکه‌ای با جفت‌شدگی خطی استفاده کرد. توصیف کیفی پیدایش اینچنین FOMP's توسط رینالدی و پاریتی<sup>۲۷</sup> داده شده بود [۱۷]. آن‌ها پیشنهاد کردند که این اثر در دو سیستم زیرشبکه‌ای رخ می‌دهد که ناهمسانگردی زیرشبکه‌های مختلف، قوی و مخالف هم (به‌طور مثال محوری بر حسب صفحه‌ای) می‌باشند

25- Higher Order Anisotropy Constants  
27- Rinaldi and Pareti

26- Sucksmith and Thompson  
28- Non-Collinear Systems

و برهم کنش تبادلی به اندازه کافی قوی نمی‌باشد تا به‌طور کامل بر سمت‌دهی غلبه کند، که سبب شییبی بین مغناطش‌های زیرشبکه‌ای می‌شود. اینگونه *FOMP's* در سیستم‌های غیر خطی<sup>۲۸</sup> با امکان زاویه شییب بین دو بردار مغناطش زیرشبکه رخ می‌دهند. افزون بر این، سهم‌های ناهمسانگردی مرتبه‌های بالا برای توجیه حضور *FOMP* حتی بالای دمای اتاق مورد نیازند ولی در دمای اتاق معمولاً قابل چشم‌پوشی‌اند. پاریتی و همکاران در گزارشی بیان کردند [۱۸] که پیدایش زاویه‌های شییب بین بردارهای مغناطش دو زیرشبکه‌ی مغناطیسی در خلال فرایند مغناطش به‌عنوان دلیل قابل‌ملاحظه‌ای در تشکیل فرایند مغناطش مرتبه اول ترکیب‌های  $Pr_2Co_{17-x}Fe_x$  بالای دمای اتاق است. درعوض، آنها نشان داده‌اند که پیدایش زاویه شییب در یک سیستم دو زیرشبکه‌ای در خلال فرایند مغناطش درحقیقت معادل پدیده-شناختی با حضور ثابت‌های ناهمسانگردی مرتبه‌های بالا می‌باشند. با توجه به دو دلیل ارائه شده برای توصیف بهتر پیدایش *FOMP's* در تعدادی مواد باید مدل دو زیر شبکه‌ای را در نظر بگیریم. حال به بحث انرژی در مدل غیرخطی می‌پردازیم. در این مدل، انرژی کل سیستم بصورت:

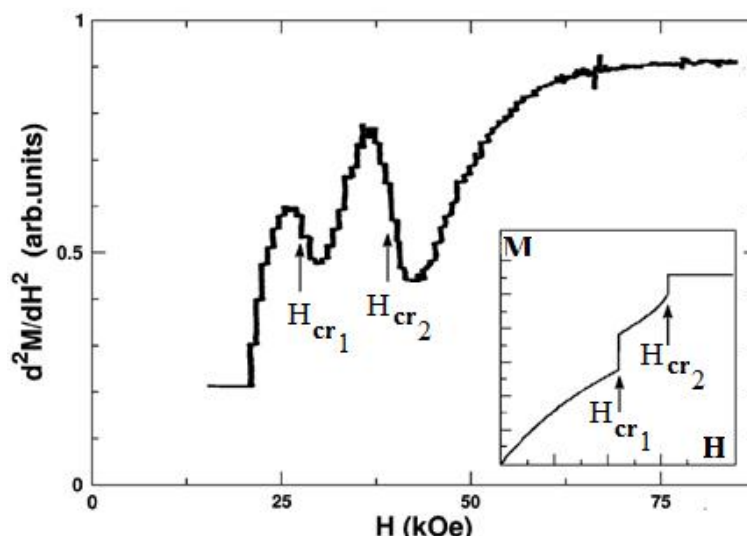
$$E(\theta_a, \theta_b, H) = -J_{ab}M_a \cdot M_b + \sum_{n=1}^3 (K_{na} \sin^{2n} \theta_a + K_{nb} \sin^{2n} \theta_b) - H \cdot (M_a + M_b) \quad (۶-۱)$$

نوشته می‌شود [۱۹] که  $a$  و  $b$  منتسب به دو زیرشبکه هستند،  $\theta_a$  و  $\theta_b$  زاویه‌هایی که دو زیرشبکه  $M_a$  و  $M_b$  با محور  $c$  می‌سازند و  $J_{ab}$  ثابت تبادلی می‌باشد. با کمینه کردن عبارت انرژی بالا، سه حالت مختلف رسیدن به اشباع، *FOMP* معمولی (که قبلاً توصیف شده است) و *FOMP* دوگانه را بدست می‌آوریم. مورد آخر توسط پرش دوگانه در منحنی مغناطش تک‌بلور در راستای سخت و با دو میدان بحرانی مختلف مشخص می‌شود (داخل شکل ۴-۱ را ببینید). پرش اول به حالت اشباع نمی‌رسد درحالی‌که دومی همیشه به اشباع می‌رسد. در شکل ۴-۱، نتیجه بس‌بلور بین‌فلزی  $Pr_2(Co_{0.1}Fe_{0.9})_{17}$  در  $149 K$  گزارش شده است [۱۹] که پیدایش زاویه‌های شییب بین بردارهای مغناطش دو زیرشبکه‌ی مغناطیسی در خلال فرایند مغناطش برای توصیف *FOMP* دوگانه در نظر گرفته شده است. خط‌هایی در اندازه‌گیری میدان ناهمسانگردی مواد به‌روش *SPD* بوجود می‌آید [۱۹، ۲۰] که در فصل ۳ بیشتر توضیح داده شده است.

### ۳-۱-۱-۱ محاسبه ثابت‌های ناهمسانگردی مغناطوبلوری

برای محاسبه ثابت‌های ناهمسانگردی از دو روش ساک اسمیت-تامپسون [۲۱-۲۴] و اندازه‌گیری‌های گشتاور [۲۵-۲۷] استفاده می‌شود.



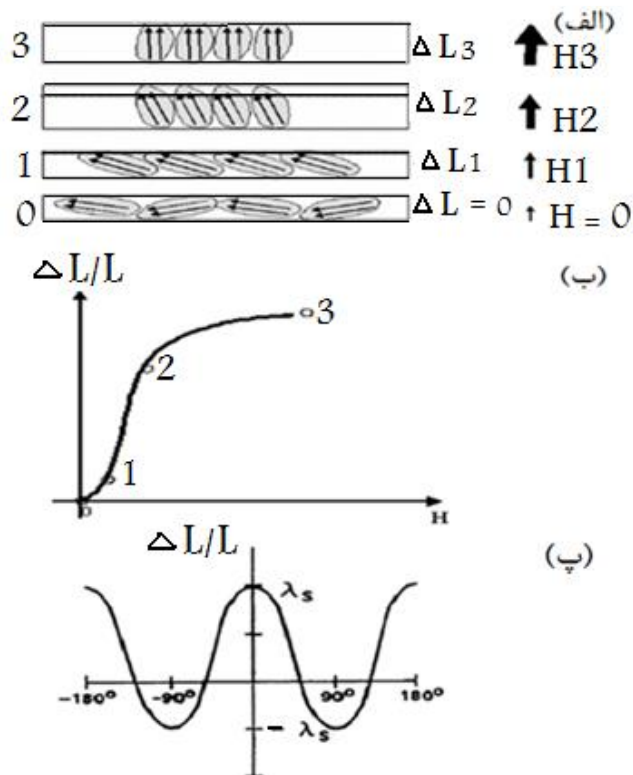


شکل ۱-۴: سیگنال SPD ترکیب  $Pr_2(Co_{0.1}Fe_{0.9})_{17}$  نمایش دهنده یک *FOMP* دوگانه. شکل درونی: منحنی مغناطش تک‌بلور ترکیب مشابه در امتداد راستای سخت [۱۹].

## ۲-۱ مغناطوتنگش

مغناطوتنگش عبارت از تغییر در بعد (طول) یک ماده ناشی از اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی است. این اثر که خاصیتی ذاتی مواد است به مغناطوتنگش خودبه‌خودی<sup>۲۹</sup> و واداشته<sup>۳۰</sup> تقسیم می‌شود. مغناطوتنگش خودبه‌خودی ناشی از برهم‌کنش مغناطیسی درونی یک نمونه است در حالی که نوع واداشته آن ناشی از برهم‌کنش مغناطیسی بین نمونه با میدان مغناطیسی خارجی است. مغناطوتنگش تقریباً متناسب با بزرگی مغناطش است.

وقتی آهن از یک دمای بالا تا زیر دمای کوری سرد می‌شود، انبساط گرمایی همسانگرد غیرعادی نزدیک دمای کوری مشاهده می‌شود [۲۸]. این ناهنجاری اندک، مستقل از میدان مغناطیسی و وابسته به نظم مغناطیسی (آهن یا دیگر نمونه‌های مغناطیسی)، مغناطوتنگش حجمی نامیده می‌شود. مغناطوتنگش حجمی می‌تواند همسانگرد (مواد آمورف) و یا ناهمسانگرد وابسته به تقارن بلوری ماده باشد. حال اگر یک میدان مغناطیسی برای ایجاد نظم مغناطیسی به نمونه اعمال شود، این تغییر بعد یک ناهمسانگرد اضافی در راستای میدان مغناطیسی اعمالی را سبب می‌شود که در اثر آن نمونه منبسط یا منقبض می‌شود. (شکل ۱-۵ الف) را ببینید). این پدیده وابسته به میدان مغناطیسی، مغناطوتنگش ژول نامیده می‌شود. مغناطوتنگش ژول با علامت  $\lambda$  مشخص می‌شود و بر حسب میکرون بر متر بیان می‌شود. شکل ۱-۵ ب)، رابطه بین میدان مغناطیسی  $H$  و مغناطوتنگش  $\lambda$  را نشان می‌دهد.



**شکل ۱-۵:** (الف) با اعمال میدان مغناطیسی قوی بعد از تغییر بعد و چرخش دیواره حوزه‌ها در راستای میدان اعمالی، چرخش بردار مغناطش در راستای میدان و در نهایت اشباع رخ می‌دهد (ب) رابطه بین میدان مغناطیسی و مغناطوتنگش، (پ) چرخش میدان مغناطیسی اشباع‌کننده [۲۸].

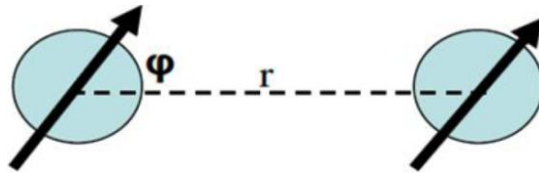
در ناحیه بین ۰ و ۱ که میدان مغناطیسی کوچک می‌باشد تغییر بعد و چرخش دیواره حوزه‌ها در راستای میدان اعمالی را داریم. افزایش بیشتر میدان بین ناحیه ۱ و ۲، سبب چرخش بردار مغناطش می‌شود که کشیدگی نمونه را به‌مراه دارد و همچنین رابطه خطی بین کرنش و میدان مغناطیسی در این ناحیه برقرار است. در میدان‌های بالاتر از ناحیه ۲، بیشتر حوزه‌های مغناطیسی با راستای میدان همسو شده‌اند و در نتیجه، رابطه کرنش و میدان مغناطیسی غیر خطی می‌باشد. در نهایت در نقطه ۳، اثر اشباع وجود دارد که مانع از افزایش بیشتر کرنش می‌شود. همچنین با اعمال میدان مغناطیسی در راستای مخالف (میدان منفی) کشیدگی مشابه‌ای بدست می‌آید. با تغییر راستای زاویه‌ای میدان مغناطیسی اشباع‌کننده، کرنش منتجه بر حسب زاویه چرخش بصورتی که در شکل ۱-۵ (پ) نشان داده شده است می‌باشد. همه مواد خواص مغناطوتنگشی معینی را نشان می‌دهند، اما این اثر در مواد فرومغناطیس و فری-مغناطیس مهم است که در حدود  $10^{-5}$  است. مقدار مغناطوتنگش در آلیاژهای آمورف بر پایه آهن،  $40 \times 10^{-6}$  تا مقدار  $10^{-3}$  در فلزات خاکی‌نادر بالا می‌رود. این اثر در مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس

به طور مثال  $Pd$  در حدود  $10^{-8}$  با میدان  $10$  کیلو اورستد<sup>۳۱</sup> است [۲۹]. اثر مغناطوتنگش اولین بار توسط ژول<sup>۳۲</sup> در ۱۸۴۲ در نمونه‌ای از مواد فرومغناطیس آهن و نیکل کشف شد [۳۰].

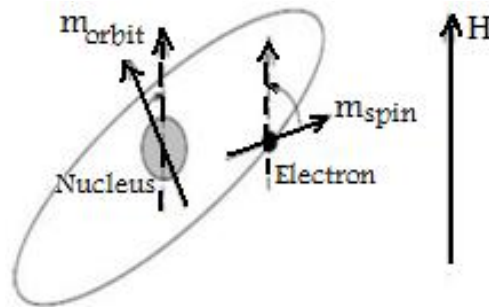
### ۱-۲-۱ منشا پدیده‌ی مغناطوتنگش

منشا اثر مغناطوتنگشی، جفت‌شدگی بین گشتاور مغناطیسی مداری اتم ( $m_{spin}$ ) و شبکه ( $m_{orbit}$ ) است که سمت‌گیری ابر الکترونی ناهمسانگرد و شبکه یعنی جفت‌شدگی اسپین مدار را توصیف می‌کند (شکل ۱-۶ را ببینید). تحت اعمال میدان مغناطیسی خارجی، گشتاور مغناطیسی مداری اتم (انرژی تبادلی دوقطبی-دوقطبی)، تغییر اندکی (راستا و (یا) بزرگی) می‌یابد. در شکل ۱-۶، سیستم اسپین-اسپین (دوقطبی-دوقطبی) قبل از اعمال میدان مغناطیسی در کمینه انرژی خود قرار دارد و حال با اعمال میدان مغناطیسی، سیستم در یک انرژی کمینه جدید قرار می‌گیرد. با قرار گرفتن سیستم در انرژی کمینه جدید، انرژی تبادلی دوقطبی-دوقطبی جفت اسپین نیز تغییر خواهد کرد که منجر به تغییر همزمان فاصله و زاویه گشتاورهای جفت اسپین نسبت بهم در شکل ۱-۶ می‌شود. بنابراین، با تغییر گشتاور هر اسپین، جفت‌شدگی بین گشتاور مغناطیسی مداری اتم و شبکه که منشا اثر مغناطوتنگشی است نیز تغییر خواهد کرد و هر کدام از حجم یا تقارن بلور تغییر خواهد کرد تا مقدار کرنش معین بدست آید که معادل با یک حالت تعادل جدید می‌باشد. این اثر مغناطوتنگش (مغناطوتنگش حجمی یا شکل) نامیده می‌شود.

بطور نظری، مغناطوتنگش ناشی از جفت‌شدگی بین گشتاور مغناطیسی با شبکه است. بنابراین، یک گشتاور مداری بزرگ  $L$  برای دست‌یابی به یک مغناطوتنگش بزرگ مورد نیاز است. در موادی که دارای مقادیر مغناطوتنگش بزرگ هستند، گشتاور مداری با مدار گشتاور اسپینی در راستای میدان مغناطیسی خارجی بشدت جفت می‌شوند و تغییر بعد شبکه‌ای قابل ملاحظه‌ای تولید می‌شود (شکل ۱-۷ را ببینید).



شکل ۱-۶: یک جفت اسپین با طول پیوند  $r$  و زاویه  $\phi$ ، بین اسپین موازی و باند.



شکل ۱-۷: گشتاور مغناطیسی مداری اتم ( $m_{spin}$ ) و شبکه ( $m_{orbit}$ ) [۳۱].

در موادی که دارای مقادیر مغناطوتنگش بزرگ هستند، مدار گشتاور اسپینی  $m_{spin}$  و گشتاور مداری  $m_{orbit}$  بشدت جفت می‌شوند. وقتی گشتاور اسپینی می‌چرخد تا با میدان خارجی  $H$  همسو شود، گشتاور مداری در امتداد با آن می‌چرخد و تغییر بعد شبکه‌ای قابل ملاحظه‌ای تولید می‌شود [۳۱].

### ۱-۲-۲ تاریخچه مواد مغناطوتنگشی

برای اولین بار در سال ۱۸۴۲ جیمز ژول پی برد که نمونه فرومغناطیس آهن تحت مغناطیدگی، طولش تغییر می‌کند که در شکل ۱-۸، تغییر بعد نمونه آهن بر حسب میدان با مقادیر مختلفی از کشش اعمالی نشان داده شده است [۳۰]. متعاقباً، کرنش‌های کوچک در نیکل، کبالت و آلیاژهای ساخته شده از آنها گزارش شد. تغییر در بزرگی و علامت مغناطوتنگش تعدادی مواد بس‌بلور در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. در خلال جنگ جهانی دوم، یکی از اولین کاربردهای عملی مواد مغناطوتنگشی از تک‌بلور نیکل دارنده مغناطوتنگش تقریباً ۵۰ پی پی ام<sup>۳۳</sup>، برای تحریک قطعات مبدل ردیاب صوتی<sup>۳۴</sup> در محل پژواک گزارش شده بود. دیگر کاربردهای اولیه مواد مغناطوتنگشی در گوشی‌های تلفن<sup>۳۵</sup>، میکروفن‌های زیرآبی<sup>۳۶</sup>، شیبورهای مه<sup>۳۷</sup>، نوسانگرها<sup>۳۸</sup> و حسگرهای گشتاور<sup>۳۹</sup> بودند [۳۱]. در سال ۱۹۶۳، بزرگترین مغناطوتنگش در عناصر خاکی نادر تربیوم ( $Tb$ ) و دیسپرسیم ( $Dy$ ) کشف شد. کرنش‌ها در این عناصر از مرتبه  $10^{-6} \times 10000$  در دماهای خیلی پایین بودند و در دمای اتاق بدلیل دارا بودن دمای کوری پایین (۲۱۸ کلوین برای تربیوم و ۲۱۸ کلوین برای دیسپرسیم) کرنش‌ها صفر می‌باشند [۳۰]. بنابراین کاربرد این مواد به‌عنوان محرک در دمای محیط و بالای آن غیرعملی است.

این محدودیت دانشمندان را مجبور کرد تا بدنبال موادی با مغناطوتنگش بزرگ باشند که در دمای اتاق کارکنند و درعین حال با اعمال میدان مغناطیسی پایین، بیشینه مغناوتنگش مورد نیاز بدست آید. در ۱۹۷۰م آلیاژسازی عناصر خاکی نادر ( $f$ ) با آهن ( $d$ )، آلیاژهای  $R-Fe_2$  کشف شده که منجر به تولید

33- Parts per Million

37- Fog Horns

34- Sonar Transducer

38- Oscillators

35- Telephone Receivers

39- Torque Sensors

36- Hydrophones