١٤٥٨٢٢-٢٠٢٣٧١٣

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده علوم پایه

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد شیمی (آلی)

سنتز و بررسی فعالیت کاتالیتیکی نانو ذرات فرو اسپینل های مس، کبالت، نیکل، روی، منگنز، پالادیوم و سرب در تشکیل پیوند کربن–کربن و کربن–هتروواتم

علی ابراهیمی

۱۳۸۹/۸/۳۰

استاد راهنما:

اکبر حیدری

استاد مشاور:

احمد یزدانی

شهریور ۱۳۸۹

۱۴۵۸۶۶

دانشکده علوم پایه

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

اعضای هیئت داوران نسخهٔ نهایی پایان‌نامه **آقای علی ابراهیمی** رشته **شیمی آلی** تحت عنوان:«**سنتز و بررسی فعالیت کاتالیتیکی نانوذرات فرواسپینل های مس، کبالت، نیکل، روی، منگنز، پالادیوم و سرب در تشکیل پیوند کربن – کربن و کربن – هتروواتم**» از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آنرا برای اخذ درجهٔ کارشناسی‌ارشد مورد تائید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر اکبر حیدری	استاد	
۲- استاد مشاور	دکتر احمد یزدانی	دانشیار	
۳- استاد ناظر داخلی	دکتر عبدالعلی علیزاده	دانشیار	
٤- استاد ناظر خارجی	دکتر جعفر عسگریان	استاد	
٥- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر عبدالعلی علیزاده	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب علی ابراهیمی دانشجوی رشته شیمی آلی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: علی ابراهیمی

تاریخ و امضا: ۸۹/۷/۱۷

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب علی ابراهیمی دانشجوی رشته شیمی آلی ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۷ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده علوم پایه متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:

تاریخ: ۸۷/۷/۱۷

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

که هرآنچه دارم مرهون زحمات آن‌هاست.

تقدیر و تشکر

در اینجا لازم می‌بینم از استاد گرامی‌ام جناب آقای دکتر اکبر حیدری که از دانش و تجربه ایشان برای این پایان‌نامه بهره بردم تشکر کنم.

اساتید محترم، جناب آقای دکتر احمد یزدانی و جناب آقای دکتر علی مرسلی را که همواره پاسخ‌گوی سؤالات من بودند، سپاس‌گزارم.

آزمایش‌های فصل پنجم این پایان‌نامه توسط خانم زهره شبیری دانشجوی مقطع دکتری شیمی معدنی از دانشگاه فردوسی مشهد با به‌کارگیری یکی از کاتالیزورهایی که ساخت آن در فصل دوم شرح داده شده است انجام گردیده‌اند. از ایشان برای در اختیار قرار دادن نتایج و اطلاعات طیفی مربوط به این آزمایش‌ها متشکرم.

همچنین ممنون دوستان گرامی، خانم دکتر مأمنی و آقایان شیخان، غضنفری و اکبری هستم که مطالب زیادی از آن‌ها آموختم.

از آقایان اکبری و حسینی نیز به خاطر در اختیار گذاردن مایعات یونی به کار رفته در این تحقیق تشکر می‌نمایم.

در پایان از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر عبدالعلی علیزاده و جناب آقای دکتر جعفر عسگریان که زحمت مطالعه و داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند نیز سپاس گزاری می‌کنم.

چکیده

فرو اسپینل‌ها نیمه‌رساناهایی مغناطیسی با فرمول عمومی $M^{II}Fe^{III}_2O_4$ هستند. توانایی نانو ذرات این مواد در کاتالیزکردن در کنار قابلیت جداسازی آن‌ها به‌واسطه اعمال شیب میدان مغناطیسی، آن‌ها را به کاتالیست‌هایی جالب توجه تبدیل می‌کند. در این تحقیق نانو ذرات فریت فلزات مس، کبالت، نیکل، روی، کادمیوم و منیزیم با روشی در دسترس و کارآمد سنتز شدند و از آن‌ها به عنوان کاتالیزور در ایجاد پیوند کربن-کربن و کربن-هترواتم استفاده گردید. اثر کاتالیتیکی این نانوذرات در بازکردن حلقه اپوکسید با آمین‌ها با یکدیگر مقایسه گردید که در این میان منیزیم فریت بیشترین فعالیت را از خود نشان داد. همچنین در واکنش جفت‌کردن آلکین‌های انتهایی از میان فریت فلزات کبالت، مس و نیکل، بهترین عملکرد برای مس فریت دیده شد. از کاتالیست مس فریت در واکنش آزا-مایکل میان مشتقات کلکون و آنیلین نیز استفاده شد. این کاتالیست‌ها در واکنش‌های ذکر شده عملکرد متوسط تا خوبی در مقایسه با کاتالیست‌های مرسوم در این واکنش‌ها داشتند و علاوه بر آن از مزایای ناهمگن و مغناطیسی بودن نیز برخوردارند. در این تحقیق از روش هم‌رسوبی در حضور امواج فراصوت برای تولید نانو ذرات استفاده شد. در کنار امواج فراصوت از عواملی چون مواد سطح فعال، مایعات یونی و لیگاندها نیز برای تنظیم اندازه و شکل نانو ذرات و نیز نحوه توزیع اندازه آن‌ها استفاده شد و دستیابی به حالت بهینه ابرپارامغناطیس برای نانوذرات مغناطیسی مد نظر قرار گرفت.

کلید واژه ها: فرواسپینل، کاتالیست ابرپارامغناطیس، بازکردن اپوکسید، جفت‌شدن آلکین انتهایی، واکنش آزا-مایکل

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فهرست جداول ..... ج

فهرست اشکال ..... د

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱- مغناطیس ۲

۱-۱-۱- انواع مواد مغناطیسی ۲

۱-۱-۲- فرومغناطیس ۴

۱-۱-۳- ناهمسانگردی مغناطیسی ۶

۱-۱-۴- حوزه مغناطیسی ۱۲

۱-۱-۵- چرخه پسماند ۱۳

۱-۱-۶- ابرپارامغناطش ۱۵

۱-۲- کاربرد نانوذرات مغناطیسی به عنوان کاتالیست ناهمگن ۱۸

۱-۲-۱- تفاوت های نانوذرات و مواد تودهای ۱۸

۱-۲-۲- جذب نانوذرات مغناطیسی با گرادیان میدان مغناطیسی ۱۹

۱-۳- فرواسپینل‌ها و کاربردهای آن‌ها ۲۰

۱-۳-۱- انواع فریت‌ها ۲۰

۱-۳-۲- کاربرد فرواسپینل‌ها به عنوان کاتالیست ۲۲

۱-۴- دستگاه‌های به کار رفته و مواد شیمیایی ۲۲

۱-۴-۱- مغناطش‌سنج نمونه لرزان ۲۲

۱-۴-۲- پراش پرتو ایکس پودری ۲۴

۱-۴-۳- دیگر موارد ۲۷

فصل ۲ تهیه فرواسپینلها و شناسایی آن‌ها ۳۰

۲-۱- روش سنتز عمومی ۳۱

۲-۲- شرح سنتز و شناسایی هر یک از فریت‌ها ۳۲

۲-۲-۱- مس فریت ۳۲

۲-۲-۲- کبالت فریت ۳۸

۲-۲-۳- منگنز فریت ۴۲

۲-۲-۴- نیکل فریت ۴۵

۲-۲-۵- کادمیوم فریت ۴۸

۲-۲-۶- روی فریت ۵۰

۲-۲-۷- منیزیم فریت ۵۳
۲-۲-۸- پالادیم فریت ۵۶
۲-۲-۹- جیوه فریت ۶۰
۲-۲-۱۰- سرب فریت ۶۱

فصل ۳ واکنش باز کردن حلقه اپوکسید ۶۵
۳-۱- معرفی ۶۶
۳-۲- روش انجام واکنش کاتالیزوری و بررسی نتایج ۶۷
۳-۲-۱- روش عمومی انجام واکنش‌ها ۶۷
۳-۲-۲- مقایسه تأثیر نانوذرات فرواسپینل ساخته شده در یک واکنش الگو ۶۸
۳-۲-۳- بررسی مکان‌گزینی واکنش و تأثیر تنوع واکنشگرها هنگام استفاده از کاتالیزور مس فریت ۷۰

فصل ۴ واکنش جفت کردن آلکین انتهایی ۷۳
۴-۱- معرفی ۷۴
۴-۲- روش انجام واکنش کاتالیزوری و بررسی نتایج ۷۵
۴-۲-۱- روش عمومی انجام واکنش‌ها ۷۵
۴-۲-۲- بررسی تأثیر تنوع واکنشگرها هنگام استفاده از کاتالیزور مس فریت ۷۶
۴-۲-۳- تلاش برای تسهیل شرایط واکنش جفت شدن فنیل استیلن و بررسی اثر دیگر کاتالیزورها ۷۷

فصل ۵ واکنش آزا-مایکل ۷۸
۵-۱- معرفی ۷۹
۵-۲- روش انجام واکنش کاتالیزوری و بررسی نتایج ۸۰
۵-۲-۱- روش عمومی انجام واکنش‌ها ۸۰
۵-۲-۲- بررسی اثر چندین حلال ۸۱
۵-۲-۳- بررسی تأثیر تنوع واکنشگرها ۸۲
۵-۲-۴- بازیابی کاتالیزور ۸۳

فهرست مراجع ۸۴
پیوست ۸۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: ثابت های ناهمسانگردی شکلی برای Fe، Ni و Co ۱۰

جدول۳-۱: وزن فرمولی کاتالیزورها به همراه وزن به کار رفته برای انجام واکنش‌ها ۶۸

جدول۴-۱: شرایط به کار رفته برای انجام واکنش جفت کردن فنیل استیلن ۷۷

جدول ۵-۱: بررسی اثر چندین حلال برای انجام واکنش آزا-مایکل میان آنیلین و کلکون ۸۲

جدول ۵-۲: واکنش آزا-مایکل میان مشتقات آنیلین و مشتقات کلکون در حضور کاتالیزور مس فریت ۸۳

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: آرایش الکترونی در مواد پارا و دیامغناطیس ۳

شکل ۱-۲: تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی مواد پارامغناطیس با دما ۳

شکل ۱-۳: آرایش دوقطبی‌ها در مواد فرومغناطیس ۴

شکل ۱-۴: آرایش دوقطبی‌ها در مواد پادفرومغناطیس ۵

شکل ۱-۵: منحنی تغییرات معکوس پذیرفتاری بر حسب دما برای مواد پادفرومغناطیس ۵

شکل ۱-۶: آرایش دوقطبی‌ها در مواد فری‌مغناطیس ۶

شکل ۱-۷: سطوح انرژی برای تقارن مکعبی ۷

شکل ۱-۸: منحنی مغناطش در جهات مختلف برای چند بلور و سطوح انرژی برای تقارن تک محور ۸

شکل ۱-۹: منحنی‌های مغناطش یک بس بلور در جهت های مختلف ۹

شکل ۱-۱۰: مغناطش طولی و مقطعی در یک نمونه کشیده به همراه میدان مغناطیس‌زدای مربوطه ۱۰

شکل ۱-۱۱: توزیع تصادفی، بلور کامل (نظم بلند برد) و ناهمسانگردی القایی (نظم کوتاه برد) ۱۲

شکل ۱-۱۲: تصویری از حوزه‌های مغناطیسی که با تجهیزات مخصوص تهیه شده است ۱۳

شکل ۱-۱۳: چرخه پسماند برای یک ماده فرومغناطیس نوعی ۱۴

شکل ۱-۱۴: تغییرات وادارندگی بر حسب اندازه ذرات ۱۵

شکل ۱-۱۵: چرخه پسماند برای یک ماده ابرپارامغناطیس ۱۶

شکل ۱-۱۶: ساختار اسپینل ۲۱

شکل ۱-۱۷: طرح واره‌ای از دستگاه مغناطش‌سنج نمونه لرزان ۲۳

شکل ۱-۱۸: نحوه تعیین پهنای کل در نصف شدت بیشینه ۲۶

شکل ۱-۱۹: نحوه تعیین پهنای مستطیلی با ارتفاع و سطحی برابر با قله پراش ۲۶
شکل ۲-۱: طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های مس-۱، مس-۲، مس-۳ و مس-۴..... ۳۴
شکل ۲-۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه مس-۱ و نمونه مس-۴ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۳۶
شکل ۲-۳: چرخه پسماند برای نمونه مس-۴..... ۳۷
شکل ۲-۴: طیف فروسرخ تبدیل فوریه مربوط به نمونه مس-۱ قبل از پخت در کوره و نمونه مس-۴ ..... ۳۸
شکل ۲-۵: طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های کبالت-۱ و کبالت-۳ ..... ۳۹
شکل ۲-۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه کبالت-۱ و نمونه کبالت-۳ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۴۰
شکل ۲-۷: چرخه پسماند برای نمونه کبالت-۱..... ۴۱
شکل ۲-۸: طیف فروسرخ تبدیل فوریه مربوط به نمونه کبالت-۱ قبل و پس از پخت در کوره ۴۱
شکل ۲-۹: طیف پراش پرتو ایکس نمونه منگنز-۱ قبل و پس از پخت در کوره ۴۳
شکل ۲-۱۰: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه منگنز-۱ بعد از پخت، به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۴۴
شکل ۲-۱۱: منحنی‌های مغناطش سنجی نمونه منگنز-۱ قبل و بعد از پخت ۴۴
شکل ۲-۱۲: طیف پراش پرتو ایکس نمونه نیکل فریت تهیه شده در حمام فراصوت پس از پخت .. ۴۵
شکل ۲-۱۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه نیکل-۱ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۴۶
شکل ۲-۱۴: چرخه پسماند برای نمونه نیکل-۱ ..... ۴۶
شکل ۲-۱۵: طیف فروسرخ تبدیل فوریه مربوط به نمونه نیکل-۱ قبل و پس از پخت در کوره ۴۷
شکل ۲-۱۶: طیف پراش پرتو ایکس نمونه کادمیوم-۱ پس از پخت در کوره ۴۹

شکل ۲-۱۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه کادمیوم-۱ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۴۹
شکل ۲-۱۸: منحنی مغناطش‌سنجی برای نمونه کادمیوم-۱ ..... ۵۰
شکل ۲-۱۹: طیف پراش پرتو ایکس نمونه روی فریت تهیه شده در حمام فراصوت پس از پخت و بازپخت (به ترتیب روی-۱ و روی-۲) ۵۱
شکل ۲-۲۰: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه روی-۲ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۵۱
شکل ۲-۲۱: طیف فروسرخ تبدیل فوریه مربوط به روی فریت قبل از پخت در کوره و پس از پخت در ۵۰۰°C (روی-۱) و نیز پس از بازپخت در ۶۰۰°C (روی-۲) ۵۲
شکل ۲-۲۲: منحنی مغناطش‌سنجی برای نمونه روی-۱ ..... ۵۳
شکل ۲-۲۳: طیف پراش پرتو ایکس نمونه منیزیم-۱ پس از پخت در کوره ۵۴
شکل ۲-۲۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه منیزیم-۱ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۵۵
شکل ۲-۲۵: منحنی مغناطش‌سنجی برای نمونه منیزیم-۱ ..... ۵۵
شکل ۲-۲۶: طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های پالادیم-۱ و پالادیم-۲ ..... ۵۷
شکل ۲-۲۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه پالادیم-۱ و نمونه پالادیم-۲ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۵۸
شکل ۲-۲۸: چرخه پسماند برای نمونه پالادیم-۱ ..... ۵۹
شکل ۲-۲۹: طیف پراش پرتو ایکس نمونه جیوه-۱ ..... ۶۰
شکل ۲-۳۰: طیف فروسرخ تبدیل فوریه مربوط به نمونه جیوه-۱ بعد از پخت در کوره ۶۱
شکل ۲-۳۱: طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های سرب-۱ و سرب-۲ پس از پخت ۶۳

شکل ۲-۳۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه سرب-۱ و نمونه سرب-۲ به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات ۶۴
شکل ۳-۱: بررسی قدرت کاتالیزورهای مختلف در واکنش باز شدن اپوکسید سیکلوهگزن اکسید با آنیلین ۶۹
شکل ۵-۱: طیف فروسرخ مربوط به نمونه مس-۱ قبل از استفاده در واکنش آزا-مایکل و پس از آن ۸۳

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مغناطیس [۱]

آن بخش از خواص مغناطیسی مواد که عموماً مورد توجه هستند از الکترون‌ها ناشی می‌شوند. حرکت الکترون در اربیتال و چرخش آن به دور خود (اسپین) هر دو در خواص مغناطیسی مواد سهیم هستند. برای روشن شدن این موضوع توجه به این مطلب لازم است که گشتاور مغناطیسی الکترون از مرتبه مگنتون بوهر است درحالیکه برای پروتون‌ها و نوترون‌ها این کمیت از مرتبه مگنتون هسته است که خود ۱۸۳۶ بار از مگنتون بوهر کوچکتر است (گشتاور مغناطیسی پروتون و نوترون به ترتیب برابر ۲/۷۹ و ۱/۹۱- مگنتون هسته است). طبیعی‌ترین روش برای دسته‌بندی خواص مغناطیسی مواد، توجه به پاسخگویی آنها به یک میدان مغناطیسی خارجی است. بر این اساس مواد مغناطیسی به فازهای دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری‌مغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱-۱-۱- انواع مواد مغناطیسی

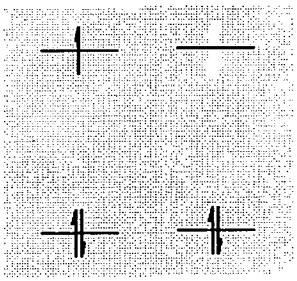
۱-۱-۱-۱- دیامغناطیس

دیامغناطش ویژگی همه‌ی مواد است؛ اما اغلب توسط مغناطش‌های قوی‌تر پوشیده می‌شود. اتم-های دیامغناطیس دارای هیچ گشتاور مغناطیسی نمی‌باشند و با قرارگرفتن در میدان مغناطیسی خارجی دارای گشتاور مغناطیسی القایی در خلاف جهت میدان خارجی می‌شوند و از آهن‌ربا دفع می-

شوند. پذیرفتاری مغناطیسی[1] (χ) این مواد بسیارکوچک، منفی و مستقل از دما می‌باشد. مواد آلی، گازهای نجیب، بیسموت، مس، روی و کوارتز نمونه‌هایی از مواد دیامغناطیس می‌باشند.

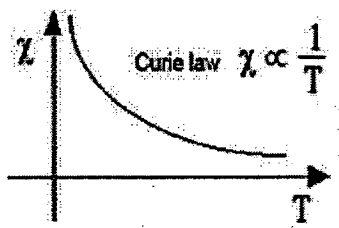
۱-۱-۱-۲- پارامغناطیس

خاصیت پارامغناطش ناشی از الکترون‌های جفت‌نشده‌ای است که به صورت مجزا و بدون



شکل ۱-۱: در مواد دیامغناطیس تمامی الکترون‌ها جفت شده هستند (سمت راست) در حالیکه در مواد پارامغناطیس الکترون‌های جفت نشده وجود دارند (سمت چپ).

برهمکنش متقابل هستند و به سبب ارتعاشات حرارتی، جهت‌گیری تصادفی دارند. اعمال میدان مغناطیسی خارجی، سبب جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی در جهت میدان و تقویت آن می‌شود. با این حال اغتشاشات حرارتی، موجب همخط‌شدگی جزئی آنها در جهت میدان خارجی می‌شود و بنابراین مغناطش و پذیرفتاری مغناطیسی آن‌ها کوچک می‌باشد (پذیرفتاری مغناطیسی در این مواد



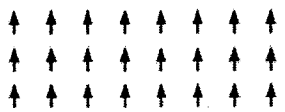
شکل ۱-۲: قانون کوری.تناسب میان پذیرفتاری مغناطیسی مواد پارامغناطیس با معکوس دما را بیان می‌کند.

[1] Magnetic Susceptibility

از مرتبه 10^{-2} تا 10^{-5} و شدیداً وابسته به دما است). اکثر فلزات قلیایی، فلزات واسطه و لانتانیدها از این دسته هستند. اکسیژن نیز از مواد پارامغناطیس است و در حالت مایع و منجمد جذب آهن‌ربا می‌گردد.

۱-۱-۲- فرومغناطیس

در این مواد گشتاور مغناطیسی اتم‌ها یا یون‌ها در یک جوزه، جهت‌گیری موازی یکدیگر دارند. این پدیده نتیجه پایداری حاصل از جفت شدگی دو قطبی‌هاست. مقدار این پایداری به ازای هر دوقطبی



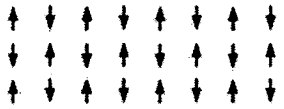
شکل ۱-۳: انرژی تبادلی مثبت باعث همسو شدن دوقطبی‌های مربوط به اتم‌ها یا یون‌های دارای الکترون جفت نشده می‌گردد.

انرژی تبادلی نامیده می‌شود. در مواد فرومغناطیس برهمکنش تبادلی[1] مثبت می‌باشد ($J>0$). پذیرفتاری مغناطیسی در این مواد شدیداً به دما و میدان مغناطیسی وابسته است و بزرگی آن می‌تواند تا 10^{6} برسد. با افزایش دما قفل‌شدگی گشتاورهای مغنایسی کاهش می‌یابد و در نتیجه مغناطش کاهش می‌یابد تا اینکه در دمای خاصی که به دمای کوری (T_C) معروف است ماده فرومغناطیس به پارامغناطیس تبدیل می‌شود. در دمای اتاق تنها عناصر آهن، نیکل، کبالت و گادولینیم فرومغناطیس‌اند.

۱-۱-۲-۱- پادفرومغناطیس

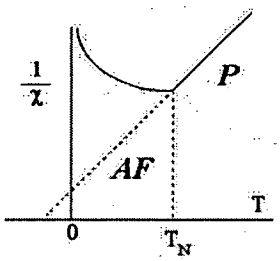
اگر برهمکنش تبادلی منفی باشد ($J<0$)؛ نزدیکترین گشتاورهای مغناطیسی به صورت پادموازی با یکدیگر قرار می‌گیرند و ماده پادفرومغناطیس می‌شود. در مورد این مواد، مغناطشی در غیاب میدان

[1] Exchange interaction



شـــکل ۱-۴: در مـواد پـادفرومغنـاطیس، انـرژی تبـادلی منفـی باعـث جهـت‌گیـری دوقطبی‌های بر خلاف یکدیگر می‌گردد.

خارجی وجود نخواهد داشت. پذیرفتاری مغناطیسی این مواد کوچک اما مثبت می‌باشد و از این جهت به مواد پارامغناطیس شبیه هستند اما با افزایش دما این کمیت افزایش می‌یابد تا آن‌که در دمای نیل (T_N) گذار به فاز پارامغناطیس اتفاق می‌افتد و پذیرفتاری مغناطیسی رو به کاهش می‌گذارد. در جدول تناوبی، کروم تنها عنصری است که در دمای اتاق پادفرومغناطیس می‌باشد. ترکیباتی چون. اکسید منگنز، اکسید آهن (هماتیت) و اکسید نیکل نیز از مواد پادفرومغناطیس هستند.



شکل ۱-۵: منحنی تغییرات معکوس پذیرفتاری بر حسب دمـا بـرای مـواد پـادفرومغنـاطیس. در دمای نیـل پـادفرومغنـاطیس بـه پارامغنـاطیس تبدیل می‌شود.

۱-۱-۲-۲- فری‌مغناطیس

مواد فری‌مغناطیس نیز مانند فرومغناطیس‌ها از خود مغناطش خودبه‌خودی نشان می‌دهند. فری-مغناطش فقط در ترکیباتی که ساختار بلوری پیچیده‌تری نسبت به عناصر خالص دارند از جمله اکسیدهای مخلوط مشاهده می‌شود. در این مواد همانند پادفرومغناطیس‌ها برهمکنش تبادلی منفی گشتاورهای مغناطیسی را پادموازی هم قرار می‌دهد اما اندازه گشتاورهای پادموازی که از یون‌های متفاوتی ناشی می‌شوند برابر نیست و در نتیجه مغناطش خالصی باقی می‌ماند که کمتر از مغناطش