

مقدمه‌ای بر مواد مغناطیسی

(ویرایش دوم)

تالیف

بی. دی. کالیتی،

سی. دی. گراهام

مترجمین

محمد ابراهیم قاضی

محمد حسین عامریون

انتشارات وایلی



سرشناسه	: کالینی، برنارد دنیس
عنوان و نام پدیدآور	: Quality, Bernard Dennis
هشتمین نشر	: مقدمه‌ای بر مواد مغناطیسی/تالیف بی‌جی کالینی، سوچی گراهام؛ مترجمین: محمدابراهیم قاضی، محمدحسین عامریون؛ [ویراستار علمی: احمد دارابی].
هشتمین نشر	: شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۳ -
شابک	: ۹78-600-7153-13-0 ج. ۱
وضعیت فهرست نویسی	: فیا
پادداشت	: عنوان اصلی: Introduction to magnetic materials, 2nd ed, 2009.
موضوع	: مغناطیس
موضوع	: مواد مغناطیسی
شناسه افزوده	: گراهام، چاد دی.
شناسه افزوده	: Graham, C. D. (Chad D.)
شناسه افزوده	: قاضی، محمدابراهیم، ۱۳۳۲ - مترجم
شناسه افزوده	: عامریون، محمدحسین، ۱۳۴۴ - مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی شاهرود
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ QC۷۵۷/۷/۵۲۷ ۱۳۰۰ تومان
رده بندی دیویی	: ۵۳۸/۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۵۱۱۷۸۲



نام کتاب: مقدمه‌ای بر مواد مغناطیسی
 تالیف: بی. دی. کالینی، سی. دی. گراهام
 مترجمین: دکتر محمدابراهیم قاضی، محمدحسین عامریون
 ویراستار علمی: دکتر احمد دارابی
 ویراستار ادبی: دکتر نوید فیروزی

طرح جلد: تاهید مصلحی
 ناشر: دانشگاه شاهرود
 چاپ و صحافی: چاپ امید شمال ۰۸۰ ۳۲۲۳۰۰۱۷
 نوبت چاپ: اول
 قیمت: ۱۳۰۰ تومان
 شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۱۵۳-۱۳-۰

نشانی: شاهرود، دانشگاه شاهرود، مرکز چاپ و نشر، صندوق پستی: ۳۶۱۵۵-۳۱۶، تلفن: ۳۲۳۹۲۲۰۴-۹
 حق چاپ برای ناشر محفوظ است و هر گونه استفاده غیرمجاز از این اثر ممنوع می‌باشد.

پیشگفتار ویرایش اول

یک قطب‌نمای جیبی را روی یک میز قرار داده و به سوزن آن نگاه کنید. خواهید دید که سوزن به اطراف حرکت و نوسان می‌کند و نهایتاً کم و بیش به سمت شمال به حال سکون درمی‌آید. در اینجا دو راز وجود دارد: نخستین راز، منشأ میدان مغناطیسی زمین است که جهت دهنده سوزن می‌باشد. دومی، منشأ مغناطیس سوزن می‌باشد که به آن اجازه می‌دهد تا جهت‌مند شود. این کتاب راجع به راز دوم است و این واقعاً یک راز است، چراکه اگرچه مطالب زیادی راجع به مغناطیس می‌دانیم و به‌ویژه درباره خاصیت مغناطیسی آهن، هنوز هم پیش‌بینی اینکه آهن شدیداً مغناطیسی است با استفاده از اصول اولیه غیر ممکن است.

این کتاب برای مبتدیان است. منظور، دانشجویان قدیمی یا سال اول تحصیلات تکمیلی در مهندسی می‌باشد؛ کسانی که تنها دروس معمول کارشناسی فیزیک و علم مواد - که توسط تمام مهندسين یا هر کس دیگری با پیش‌زمینه مشابه گذرانده می‌شوند - را می‌گذرانند. فرض بر آن است که این افراد هیچ اطلاعاتی راجع به خود مغناطیس ندارند.

افرادی که به مغناطیس علاقه‌مند می‌شوند معمولاً هنگام مطالعه موضوع، پیش‌زمینه‌های متفاوتی دارند. آنها متخصصین متالورژی، فیزیکدان‌ها، مهندسين برق، شیمی‌دان‌ها، زمین‌شناسان و سرامیک‌کاران می‌باشند. هر یک از این گروه‌ها درجات متفاوتی از اطلاعات راجع به اصولی مانند نظریه اتمی، بلورشناسی، مدارهای الکتریکی و شیمی بلور دارند. سعی بر آن است که مطالب برای تمام این گروه‌ها قابل فهم باشد. بنابراین بعضی از بخشهای کتاب برای اکثر خوانندگان و نه برای همه آنها، ابتدائی است.

هرچند سیستم آحاد mks در الکتریسیته محبوبیت دارد، اغلب مغناطیس‌دان‌ها هنوز از زبان سیستم cgs ، هم در آزمایشگاه و هم در صنعت استفاده می‌کنند. دانشجویان باید دیر یا زود این زبان را فرا بگیرند. بنابراین این کتاب در سیستم cgs نوشته شده است. یک مبتدی در مغناطیس با واحدهای عجیب و حتی اندازه‌گیری‌های عجیب‌تر سردرگم می‌شود. موضوع اغلب در سطح بسیار نظری ارائه می‌شود با نتایجی که دانشجویان هیچ فهم فیزیکی واقعی‌ای از کمیت‌هایی که معرفی می‌شود، ندارند، چراکه آنها هیچ ایده واضحی از چگونگی اندازه‌گیری این

کمیتها ندارد. به همین دلیل، در سرتاسر کتاب بر روشهای اندازه‌گیری تاکید شده است. فصل دوم به روشهای معمول تر می‌پردازد، درحالی که تکنیک‌های تخصصی‌تر در فصل‌های مناسب بعدی ارائه می‌گردد.

این کتاب به چهار بخش تقسیم شده است:

واحدها و اندازه‌گیری‌ها

انواع مغناطیس یا تفاوت‌هایشان، بطور مثال بین یک فرومغناطیس و پارامغناطیس،

پدیده‌ها در اجسام مغناطیسی قوی مانند ناهمسانگردی و مغناطوتنگش،

مواد مغناطیسی تجاری و کاربرد آنها.

مراجع که از بین مقالات زیاد و متفاوت مغناطیس انتخاب شده‌اند، عمدتاً دو نوع هستند: مقالات مروری و مقالات کلاسیک همراه با دیگر مراجع که برای پشتیبانی از عبارات خاصی در متن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بعلاوه فهرست از کتابها همراه با مختصری از نوع موضوعاتی که هر یک دارند، داده شده است.

مغناطیس ریشه در روزگار باستان دارد. هیچ کس نمی‌داند چه زمانی اولین مگنتایت که یک اکسید طبیعی از آهن است و توسط تخلیه الکتریکی صاعقه مغناطیده شده است، یافت گردیده و معلوم شد که ذرات دیگر مگنتایت یا تکه‌های کوچک آهن را جذب می‌کند. این موضوع مد نظر خرافه‌پرستان قرار گرفت. در قرن شانزدهم گیلبرت فرمول بندی بعضی از اصول اولیه بدیهی را آغاز نمود.

در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم کوری، لانتروین و وایس سهم زیادی در طی یک دهه در زمینه فوق داشتند. می‌توان گفت که در چهل سال بعد مطالعه مغناطیس پیشرفتی نداشت بجز کار چند تن از علاقه‌مندان به این موضوع که جذابیتی در آن یافتند که با فصاحت زیاد توسط پروفیسور ای. سی. استونر توصیف شده است:

تنوع زیاد پدیده‌های فرومغناطیسی، چالش چند ساله به مهارت در آزمایش و بینش فیزیکی در هماهنگی نتایج، طیف گسترده کاربردهای واقعی و ممکن مواد فرومغناطیسی و ویژگی بنیادی مشکلات نظری ضروری، موجب شد که تمام اینها با همدیگر ترکیب شده و فرومغناطیس مورد

توجه زیادی قرار گیرد که به شدت با محدودیت ظاهری موضوع فرومغناطیس یعنی برخی از ویژگی‌های خاص تعداد بسیار محدودی از مواد کاملاً در تضاد است.

سپس با اتمام جنگ جهانی دوم، علاقه به این موضوع بسیار تقویت شد و مطالعه مغناطیس هرگز پرونیق‌تر از این زمان نبوده است. این علاقه‌مندی مجدد، عمدتاً از سه پیشرفت حاصل شد:

مواد جدید: رده کاملاً تازه‌ای از مواد مغناطیسی (فریت‌ها) توسعه یافت، شرح داده شد و مورد استفاده قرار گرفت.

ابزار جدید: پراش نوترون - که به ما توانایی دیدن گشتاور مغناطیسی اتمهای منفرد را می‌دهد - عمق جدیدی به موضوع شیمی مغناطیس داد.

کاربرد جدید: پیشرفت رایانه‌ها - که در دستگاههای مغناطیسی نقش اساسی دارند - باعث تشویق تحقیقات هم روی مواد مغناطیسی جدید و هم قدیمی شد.

و تمام اینها به فهم بهتر حوزه‌های مغناطیسی و بطور همزمان به درک اینکه آنها چگونه رفتار می‌کنند، کمک کرد.

در نوشتن این کتاب، دو فکر و اندیشه بارها و بارها در ذهنم نقش بست. نخستین آن این است که مغناطیس بطور خاصی پدیده نادیدنی است، از این نظر که در تمام اطراف ما وجود دارد، بخشی از زندگی روزانه ماست و با این حال بیشتر مردم حتی مهندسين فراموش کرده‌اند یا آگاه نیستند که زندگی آنها بدون مغناطیس کاملاً متفاوت می‌شد. چنانچه می‌دانیم، هیچ نیروگاه برقی، موتور الکتریکی، رادیو و تلویزیون بدون مغناطیس وجود نمی‌داشت. هرچند الکتریسیته و مغناطیس به اندازه یکدیگر قدمت دارند، مغناطیس به اندازه الکتریسیته مورد توجه عامه (یا حتی متخصصان) قرار نگرفته است. نکته دوم به فرایند غیرمعمول و وارون نقش معمول دانشگاهها و آزمایشگاههای صنعتی در زمینه تحقیقات مغناطیسی در ایالات متحده بازمی‌گردد. درحالی‌که آمریکائیه سهم قابل ملاحظه‌ای در دانش بین‌المللی مواد مغناطیسی داشته‌اند، عملاً تمام این سهم‌ها برآمده از صنعت بوده است. این مسأله برای دیگر کشورها یا سایر موضوعات صادق نمی‌باشد. من وانمود نمی‌کنم که دلیل این عدم توازن را می‌دانم اما به نظر می‌آید مطمئناً زمان آن است که دانشگاهها سهم خود را در مطالعه مغناطیس انجام دهند.

بیشتر کتابهای تکنیکی نتیجه ای از تلاش جمعی هستند، هرچند توسط صاحب نظران در آن موضوع نوشته شده باشد و من نیز همکاران بسیاری داشته‌ام. افراد زیادی در صنعت آزادانه اطلاعات و تجارب ویژه‌شان را در اختیار من قرار داده‌اند. شمار دیگری با مهربانی عکس‌های اصلی را به من دادند. افراد زیر نقادانه بخش‌هایی از کتاب را مطالعه یا اینکه در نکات مشکل کمک کرده‌اند:

چارلز دابلیو آلن، جوزف جی بکر، امی ای برکویز، دیوید کوهن، ان اف فایور، سی دی گراهام، رابرت جی هیز، یوجن دابلو. هنری، کونیر هرینگ، گرال ال جونز، فرد ای لایورسکی، والتر سی میلر، آر پوتنت و ای پی ولفارث. از تمامی این عزیزان و دیگرانی که در آموزش مغناطیس به من کمک کرده‌اند، از صمیم قلب تشکر می‌کنم.

بی دی کالیتی

نوتری دامی، ایندیانا

فوریه ۱۹۷۲

پیشگفتار ویرایش دوم

بی دی (بارنی) کالیتی نویسنده ای با استعداد در موضوعات تکنیکی بود. او می توانست موضوعات پیچیده را در روشی واضح، منسجم و مختصر ارائه کند که این ویژگی، کتابش را هم برای دانشجویان و هم مدرسین محبوب ساخت. اولین کتاب او بنام پراش اشعه X اساس بلورشناسی، ساختار و اشعه X را به متالورژیست ها آموخت. این کتاب اولین بار در ۱۹۶۷ منتشر شد و ویرایش دوم آن در ۱۹۷۸ و نسخه بازبینی شده آن در سال ۲۰۰۱ به وسیله استوارت آر استوک منتشر شد. کتاب مواد مغناطیسی او در سال ۱۹۷۲ منتشر شد و بطور مشابه موفق بود. این کتاب برای چندین سال تجدید چاپ شد و بطور گسترده ای بعنوان مقدمه ای بر موضوعات مغناطیس، اندازه گیری های مغناطیسی و مواد مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفت.

انجمن مغناطیس مؤسسه مهندسين برق و الكترونیک (IEEE) برای چندین سال حامی تجدید چاپ کتابهای کلاسیک و مقالات در زمینه مغناطیس بوده است؛ از جمله احتمالاً مهمترین کار این مؤسسه، تجدید چاپ کتاب ماندگار آر. ام. بوزورس در سال ۱۹۹۳ بنام فرومغناطیس است که ابتدا در سال ۱۹۵۲ منتشر شد. کتاب مقدمه ای بر مواد مغناطیسی کالیتی، نامزد دیگری برای تجدید چاپ بود اما پس از برخی مباحثات تصمیم بر این شد که در عوض تجدید چاپ تشویق شود ویرایشی تازه و به روز شده از آن منتشر گردد. من برای چندین سال فکر چنین بازنگری ای را داشتم و داوطلب انجام آن گردیدم. این کار وقت بیشتری از آنچه انتظار داشتم گرفت و در نهایت تغییرات اندکی نسبت به آنچه انتظار می رفت، اعمال کردم.

کالیتی کتاب خود را بطور واضح برای شخص مبتدی، دانشجوی لیسانس یا دانشجویان تحصیلات تکمیلی ای که تازه شروع کرده اند و هیچ آشنایی قبلی با موضوع نداشته و تنها اطلاعات عمومی در حد لیسانس از شیمی، فیزیک و ریاضیات دارند، نوشت. او بر اندازه گیریه و مواد - خصوصاً موادی که از نظر مهندسی مهم هستند - تاکید داشت. رهیافت کوانتوم مکانیکی او ابتدائی است. من بطور خیلی نزدیکی همان متن اصلی را هم از نظر دسته

بندی و هم رهیافت ادامه دادم و بخش‌های فراوانی را بطور قابل توجهی بدون تغییر گذاشتم. تغییرات اصلی‌ای که انجام شده است، بقرار زیر است:

در جاهایی که کالیتی فقط آحاد cgs را انتخاب کرده بود، من از آحاد SI و cgs استفاده نمودم. استفاده از هر دوی اینها بدون شک موجب تکرار می‌گردد، اما اگر - آنگونه که امیدوارم - کتاب برای سالیان زیادی به عنوان متن اصلی باقی بماند، آحاد SI بطور روزافزونی مهم خواهد بود.

شیوه اندازه‌گیری‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای بازنگری شده است. گالوانومتر بالستیک و شارسنج با پیچه متحرک به‌صورت فشرده در یک پاراگراف آمده است. انتگرال‌گیر الکترونیکی همراه با مغناطیس‌سنج گرایان متناوب، اسکوئید و استفاده از رایانه برای جمع‌آوری داده‌ها اضافه شده است. این تغییرات چندان مایه تعجب نیست.

فصل جدیدی در مورد مواد مغناطیسی برای استفاده در رایانه‌ها و فصل مختصری درباره رفتار مغناطیسی ابررساناها وجود دارد.

مطالبی درباره آلیاژهای مغناطیسی بی‌شکل و آهن‌رباهای دائمی خاکی نادر در کتاب آورده شده است در عوض طرز عمل ساختار حوزه - دیواره و انرژی بسط یافته و بعضی کارها درباره اثر فشارهای مکانیکی روی حرکت دیواره حوزه (موضوع مورد علاقه کالیتی) حذف شده است. من راههای متفاوتی برای کنار آمدن با مکانیک کوانتومی در نظر گرفتم. چنانچه در بالا اشاره شد، طرز عمل کالیتی سطحی بود و او از پدیده‌های کوانتومی در بیشتر قسمت‌های کتاب کمتر استفاده کرده است. می‌توانستم به‌سادگی از مکانیک کوانتومی طرف‌نظر نمایم و آن را به فیزیک کلاسیک مرتبط نمایم یا موضوع مذکور را بسط دهم که البته فکر اخیر را به سرعت کنار گذاشتم. جدا از محدودیت‌های شخصی من، عقیده ندارم ممکن باشد یک کتاب درسی مفید راجع به کوانتوم مکانیک را در یک یا دو فصل در کتابی قرار دهیم که با موضوعات دیگری سروکار دارد. نهایتاً من تقریباً به کار اصلی کالیتی وفادار ماندم. کار من بی‌آنکه شامل جزئیات زیادی باشد، درکی از موضوع را بدست می‌دهد.

مراجع

تمام نویسندگان کتاب تکنیکی - از جمله کالیتی در ۱۹۷۲ - از فراوانی مقالات تکنیکی و ناممکن بودن استفاده از حتی اندکی از آنها افسوس می‌خورند. در چندین سالی که بطور نزدیکی روی کتاب کار کردم، متوجه شدم که حتی اگر خیلی از مراجع آن قدیمی شوند، باز هم مفید باقی خواهند ماند. همچنین خودم را متقاعد کردم که خوانندگان نسخه بازنگری شده عمدتاً در دو گروه جای می‌گیرند: مبتدیان، کسانی که نیازی یا علاقه‌ای به فراتر از آنچه در متن آمده است ندارند و دانشجویان پیشرفته‌تر و محققین، کسانی که به آسانی به جستجوگرهای رایانه‌ای دسترسی دارند که اطلاعات به روزی راجع به موضوعات مورد علاقه‌شان را به جای مراجع قدیمی در یک کتاب قدیمی، بدست آورند بنابراین بیشتر مراجع حذف شده‌اند. مراجعی که باقی ماندند در متن جا داده شده‌اند و مربوط به منابع قدیمی دست‌اول هستند یا منابع ویژه‌ای از اطلاعات در مورد موضوعات خاص و یا کتابهای مرجع سال‌های اخیر (سال ۲۰۰۷). بی شک این تصمیم بعضی از خواننده‌ها را مایوس نموده و شاید بسادگی به عنوان نشانی در محافظه کار بودن شخص نویسنده برداشت شود اما احساس کردم که این تنها راه عملی برای ادامه دادن کار، است.

از رون گلفارب و همکارانش در مؤسسه ملی علوم و تکنولوژی در بولدر کولورادو برای مطالعه و نقد ادبی تک تک فصل‌ها سپاسگزارم. من بیشتر پیشنهادهای آنها را پذیرفته‌ام.

سی دی گراهام

فلادلفیا، پنسیلوانیا

می ۲۰۰۸

پیشگفتار مترجمین

کتاب حاضر ترجمه کتاب مقدمه‌ای بر مواد مغناطیسی می‌باشد. با توجه به اینکه گنج‌انیدن تمام فصل‌های آن در یک جلد مقدور نبود (بدلیل حجم زیاد مطالب)، تصمیم گرفتیم تا مباحث اصلی کتاب (فصل‌های ۱ تا ۶) که راجع به خواص مغناطیسی مواد دیا، پارا، فرو و فری مغناطیس می‌باشد را در جلد اول بگنجانیم و باقیمانده فصل‌ها را انشالله در آینده نزدیک در جلد دوم ارائه کنیم.

در حد توان کوشیده‌ایم تا مطالب متن اصلی را با رعایت امانت کامل و درستی محتوای علمی، به زبان فارسی ترجمه کنیم. یقیناً در انجام این کار نارسایی‌ها و کاستی‌هایی هم وجود دارد که انتظار داریم اساتید و دانشجویان محترم بر ما منت نهاده و اشتباهات احتمالی را از طریق پست الکترونیکی mghazi@shahroodut.ac.ir اعلام نمایند. در نهایت خداوند منان را شاکریم که توفیق این کار را به ما عطا کرد.

محمد ابراهیم قاضی

محمد حسین عامریون

فهرست مطالب

۱ تعاریف و یکاها.....	۱
۱.۱ مقدمه.....	۱
۱.۲ سیستم یکاهای cgs-emu.....	۴
۱.۲.۱ قطب‌های مغناطیسی.....	۴
۱.۳ گشتاور مغناطیسی.....	۸
۱.۴ شدت مغناطیدگی.....	۱۰
۱.۵ دوقطبی‌های مغناطیسی.....	۱۲
۱.۶ اثرات مغناطیسی جریانها.....	۱۳
۱.۷ مواد مغناطیسی.....	۱۶
۱.۸ یکاهای SI.....	۲۵
۱.۹ منحنی‌های مغناطش و حلقه‌های پسماند.....	۲۸
۲ روش‌های تجربی.....	۳۵
۲.۱ مقدمه.....	۳۵
۲.۲ تولید میدان توسط سلنوئیدها.....	۳۷
۲.۲.۱ سلنوئیدهای معمولی.....	۳۷
۲.۲.۲ سلنوئیدهای با میدان قوی.....	۴۳
۲.۲.۳ سلنوئیدهای ابررسانا.....	۴۸
۲.۳ ایجاد میدان مغناطیسی توسط آهن‌رباهای الکتریکی.....	۵۰
۲.۴ تولید میدان به وسیله آهن‌رباهای دائمی.....	۵۵
۲.۵ اندازه‌گیری قدرت میدان.....	۵۷
۲.۵.۱ اثر هال.....	۵۷

۵۹	۲.۵.۲ انتگرال گیر الکترونیکی یا شار سنج
۶۲	۲.۵.۳ سایر روش ها
۶۷	۲.۶ اندازه گیری های مغناطیسی در مدارهای بسته
۷۳	۲.۷ میدان های مغناطیس زدا
۷۸	۲.۸ حفاظت مغناطیسی
۷۹	۲.۹ ضرایب مغناطیس زدائی
۹۴	۲.۱۰ اندازه گیری های مغناطیسی در مدارهای باز
۱۰۱	۲.۱۱ ابزارها برای اندازه گیری مغناطش
۱۰۱	۲.۱۱.۱ روش خارج کردن نمونه
۱۰۴	۲.۱۱.۲ مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی
	۲.۱۱.۳ مغناطیس سنج شیب (میدان) متناوب AFGM یا AGM (مغناطیس سنج نی
۱۰۸	ارتعاشی)
۱۰۹	۲.۱۱.۴ اثر تصویر
۱۱۲	۲.۱۱.۵ مغناطیس سنج SQUID
۱۱۲	۲.۱۱.۶ نمونه های استاندارد
۱۱۲	۲.۱۱.۷ میدان های زمینه
۱۱۳	۲.۱۲ مدارهای مغناطیسی و نفوذپذیری سنج ها
۱۱۹	۲.۱۲.۱ نفوذپذیری سنج
۱۲۲	۲.۱۲.۲ مواد آهن ربای دائمی
۱۲۴	۲.۱۳ اندازه گیری های پذیرفتاری
۱۳۵	۳ دیامغناطیس و پارامغناطیس
۱۳۵	۳.۱ مقدمه
۱۳۵	۳.۲ گشتاورهای مغناطیسی الکترون ها

۳.۳	گشتاورهای مغناطیسی اتم ها.....	۱۳۸
۳.۴	نظریه دیامغناطیس.....	۱۳۹
۳.۵	مواد دیامغناطیس.....	۱۴۰
۳.۶	نظریه کلاسیکی پارامغناطیس.....	۱۴۱
۳.۷	نظریه کوانتومی پارامغناطیس.....	۱۵۲
۳.۷.۱	اثر ژيروماگنتیک.....	۱۵۸
۳.۷.۲	تشديد مغناطیسی.....	۱۵۹
۳.۸	مواد پارامغناطیس.....	۱۶۹
۳.۸.۱	نمک های عناصر واسطه.....	۱۷۰
۳.۸.۲	نمک ها و اکسیدهای خاک های کیمیا.....	۱۷۰
۳.۸.۳	عناصر خاکی کیمیا.....	۱۷۱
۳.۸.۴	فلزات.....	۱۷۱
۳.۸.۵	مطلب کلی.....	۱۷۳
۴	فرومغناطیس.....	۱۷۹
۴.۱	مقدمه.....	۱۷۹
۴.۲	نظریه میدان مولکولی.....	۱۸۲
۴.۳	نیروهای تبدلی.....	۲۰۰
۴.۴	نظریه نواری.....	۲۰۷
۴.۵	آلیاژهای فرومغناطیس.....	۲۲۰
۴.۶	اثرات گرمایی.....	۲۲۷
۴.۷	نظریه های فرومغناطیس.....	۲۲۸
۴.۸	تحلیل مغناطیسی.....	۲۳۰
۵	پادفرومغناطیس.....	۲۳۵

۲۳۵	۵.۱ مقدمه
۲۳۹	۵.۲ نظریه میدان مولکولی
۲۴۰	۵.۲.۱ T_N بالای
۲۴۱	۵.۲.۲ T_N زیر
۲۴۹	۵.۲.۳ مقایسه با تجربه
۲۵۱	۵.۳ پراش نوترون
۲۶۵	۵.۳.۱ پادفرومغناطیس
۲۶۵	۵.۳.۲ فرومغناطیس
۲۶۶	۵.۴ خاکی کمیاب
۲۶۷	۵.۵ آلیاژهای پادفرومغناطیس
۲۷۱	۶ فری مغناطیس
۲۷۱	۶.۱ مقدمه
۲۷۶	۶.۲ ساختار فریت‌های مکعبی
۲۷۹	۶.۳ مغناطش اشباع
۲۸۴	۶.۴ نظریه میدان مولکولی
۲۸۶	۶.۴.۱ T_C بالای
۲۸۹	۶.۴.۲ T_C زیر
۲۹۴	۶.۴.۳ نتایج کلی
۲۹۴	۶.۵ فریت‌های شش گوشه
۲۹۸	۶.۶ دیگر جسم‌های فری مغناطیس
۲۹۸	۶.۶.۱ γ -Fe ₂ O ₃
۲۹۹	۶.۶.۲ گارنت‌ها
۳۰۱	۶.۶.۳ آلیاژها