

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

دانشکده فیزیک

## پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
در رشته فیزیک (گرایش ماده چگال)

عنوان:

اندازه گیری نامتقارنی امپدانس مغناطیسی بزرگ آلیاژ آمورف کبالت پایه در

**DC** بایاس

استاد راهنما:

دکتر سید احسان روزمه

توسط:

احمد قنبری

شهریور ۱۳۹۳

## تقدیم به :

ای پدر، از تو هر چه می‌گویم باز هم کم است  
خورشیدی شدی و از روشنایی‌ات جان گرفتم و در ناامیدی‌ها ناظم را  
کشیدی و لبریزم کردی از شوق  
اکنون حاصل دستان خسته‌ات رمز موفقیت‌م شد  
به خودم تبریک می‌گویم که تو را دارم و دنیا با همه بزرگیش مثل تو را  
ندارد ...

و تو ای مادر، ای شوق زیبایی نفس کشیدن  
ای روح مهربان هستی‌ام  
تو رنگ شادی‌هایم شدی و لحظه‌های بد را با تمام وجود از من دور کردی و  
عمری خستگی‌ها را به جان خریدی تا اکنون توانستی طعم خوش  
پیروزی را به من بچشانی.

## تقدیر تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و مورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ برحسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزوجل": از استاد با کمالات و شایسته جناب آقای دکتر سید احسان روزمه که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند، از استاد فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر عبدالعلی رضائی که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

## چکیده

حسگرهای مغناطیسی بر مبنای اثر امپدانس مغناطیسی MI (تغییر امپدانس الکتریکی یک رسانای مغناطیسی تحت اعمال میدان مغناطیسی خارجی) امروزه قابلیت خود را در عرصه فناوری نشان داده‌اند. مناسب‌ترین مواد برای کاربرد در اثر امپدانس مغناطیسی، مواد مغناطیسی نرم همانند آلیاژهای آمورف و مواد مغناطیسی نانو بلور هستند. جهت دستیابی به پاسخ امپدانس مناسب‌تر به وسیله آلیاژهای آمورف، روش‌های گوناگونی وجود دارد که در اینجا روش بازپخت مواد مورد نظر ماست. در این پایان‌نامه بازپخت جریان‌ی روی نمونه انجام گرفته است و با اعمال جریان مستقیم، نامتقارنی امپدانس مغناطیسی بزرگ نمونه‌های بازپخت شده در بایاس DC اندازه‌گیری شده است.

نتایج این پایان‌نامه نشان می‌دهد که اعمال جریان الکتریکی در بایاس DC باعث افزایش امپدانس مغناطیسی در همه نمونه‌های بازپختی می‌شود. این افزایش بیانگر این مطلب است که این جریان باعث اصلاح و افزایش ناهمسانگردی مغناطیسی در نمونه می‌شود. نامتقارنی بایاس DC از ترکیب ناهمسانگردی مغناطیسی عرضی و حلقوی پیرامونی با میدان DC پیرامونی تولید شده به وسیله جریان بایاس ایجاد می‌شود. این برهم کنش می‌تواند باعث افزایش یک قله و کاهش قله دیگر در منحنی امپدانس مغناطیسی و بنابراین افزایش یا کاهش ناهمسانگردی شود. تغییر ناهمسانگردی، نمونه را برای کاربرد حسگری مناسب می‌سازد.

## کلمات کلیدی:

حسگر مغناطیسی، امپدانس مغناطیسی، مواد مغناطیسی نرم، آلیاژ آمورف، بازپخت جریان‌ی، نامتقارنی، بایاس DC، مواد مغناطیسی کبالت پایه.

## فهرست مطالب

### عنوان

### صفحه

فصل اول: بررسی تئوری اثر امپدانس مغناطیسی .....	۱
۱-۱: مقدمه .....	۲
۲-۱: خواص ترابرد مغناطیسی مواد .....	۴
۱-۲-۱: امپدانس .....	۴
۲-۲-۱: امپدانس مغناطیسی .....	۵
۳-۱: مواد مغناطیسی نرم جهت کاربرد در اثر امپدانس مغناطیسی .....	۱۰
۱-۳-۱: آلیاژهای آمورف مغناطیسی .....	۱۱
۲-۳-۱: مواد مغناطیسی نانو بلورین .....	۱۲
۴-۱: تئوری امپدانس مغناطیسی .....	۱۳
۱-۴-۱: معادله لاندائو-لیفشیتز .....	۱۶
۵-۱: وابستگی امپدانس مغناطیسی به پارامترهای فیزیکی .....	۱۹
۱-۵-۱: امپدانس مغناطیسی و نواحی فرکانسی متفاوت .....	۱۹
۲-۵-۱: جریان متناوب اندازه گیری .....	۲۱
۳-۵-۱: میدان مغناطیسی .....	۲۲
۴-۵-۱: دمای اندازه گیری .....	۲۳
۵-۵-۱: سطح نمونه .....	۲۴
۶-۱: معرفی چند مدل .....	۲۵
۱-۶-۱: مدل شبه استاتیک .....	۲۵
۲-۶-۱: مدل فرکانس های بالا .....	۲۵
۳-۶-۱: معرفی مدل الکترومغناطیسی .....	۲۶
۴-۶-۱: مدل رسانندگی تبادلی .....	۲۷
۵-۶-۱: مروری مختصر بر چند مدل دیگر .....	۲۸

۲۹	۷-۱: بررسی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی
۳۳	فصل دوم: مروری بر برخی از کارهای انجام شده
۳۴	۱-۲: بازپخت مواد آمورف کبالت پایه و فرایند بلورین شدن آن
۳۴	۲-۲: وابستگی بلورین شدن به درصد (B) و (Si) در نوار $Co_{95-x}Fe_5(BSi)_x$
۳۶	۳-۲: بازپخت جریانی
۴۰	۱-۳-۲: ناهمسانگردی مغناطیسی و اثر امپدانس تنشی در بازپخت جریانی
۴۰	۲-۳-۲: محاسبه نفوذپذیری مغناطیسی عرضی به وسیله ی مدل حرکت چرخش مغناطش
۴۵	۴-۲: اعمال بایاس DC و تاثیر آن در نامتقارنی امپدانس مغناطیسی نوار آمورف کبالت پایه
۵۰	فصل سوم: روش های اندازه گیری و تنظیم وسایل آزمایش
۵۲	۱-۳: روش ذوب چرخان در ساخت نوار مغناطیسی
۵۳	۲-۳: شکل هندسی و ابعاد نمونه ها
۵۴	۳-۳: روش انجام بازپخت جریانی
۵۵	۴-۳: نحوه ی اندازه گیری امپدانس مغناطیسی
۵۷	۵-۳: اعمال بایاس DC
۵۸	۶-۳: نحوه ی اندازه گیری نامتقارنی امپدانس مغناطیسی
۶۰	فصل چهارم: نتایج تجربی کارهای انجام شده
۶۲	۱-۴: اندازه گیری فرکانس و دامنه جریان بهینه
۶۵	۲-۴: اثر طول بر امپدانس مغناطیسی آلیاژ آمورف کبالت پایه
۶۵	۳-۴: بازپخت جریانی
۶۷	۱-۳-۴: تاثیر بازپخت جریانی و تشکیل نانوبلورک ها
۶۹	۲-۳-۴: بررسی فازهای نانوبلورین ایجاد شده
۷۱	۴-۴: بررسی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC
۸۲	۵-۴: نتایج
۸۳	مراجع

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۹.....	شکل ۱-۱: حوزه‌های مغناطیسی و بردار مغناطش درون حوزه.....
۱۰.....	شکل ۲-۱: زمانی که کریستال مغناطیسی کامل تحت یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد.....
۱۴.....	شکل ۳-۱: نمایی کلی از اثر عمق پوسته در یک نمونه‌ی فرومغناطیس.....
۱۴.....	شکل ۴-۱: تعریف امپدانس برای قطعه سیمی با سطح مقطع q.....
۱۹.....	شکل ۵-۱: امپدانس ناشی از نوار آمورف خام ( $Fe_{0.73} Cu_1 Nb_3 Si_{0.13} B_9$ ) بر حسب فرکانس و میدان اعمالی به نمونه.....
۲۲.....	شکل ۶-۱: تغییر رفتار دو قله‌ای به تک قله‌ای منحنی امپدانس مغناطیسی، در سیم کبالت پایه با افزایش جریان.....
۲۲.....	شکل ۷-۱: وابستگی درصد امپدانس مغناطیسی به میدان مغناطیسی مستقیم در فرکانس‌های مختلف.....
۲۴.....	شکل ۸-۱: وابستگی دمایی امپدانس مغناطیسی آلیاژ کبالت پایه $Co_{70}Fe_5Si_{15}Nb_{2.2}Cu_{0.8}B_7$ در فرکانس 1MHz.....
۲۴.....	شکل ۹-۱: وابستگی بیشینه مقدار امپدانس مغناطیسی در نوار نانوبلورین ( $Fe_{73.5-x} 5$ ) به سطح نمونه $Cr_xSi_{13.5}B_9Nb_3Au_1(x=1-$ .....
۳۱.....	شکل ۱۰-۱: نمودار نامتقارن GMI بر حسب میدان مغناطیسی در جریان‌های بایاس مستقیم مختلف.....
۳۴.....	شکل ۱-۲: طرح واره‌ای از فرایند اکسید سطحی و بلورین شدن نمونه بعد از بازپخت.....
۳۷.....	شکل ۲-۲: مقاومت الکتریکی بر حسب زمان بازپخت جریانی نوار $Fe_{73.5}Nb_3 Cu_1 Si_{13.5} B_9$ .....
۳۸.....	شکل ۳-۲: تغییرات نسبی نفوذپذیری و فاکتور کشش بر حسب زمان بازپخت برای جریان ۴/۵ آمپر.....
۳۸.....	شکل ۴-۲: نفوذپذیری و فاکتور کشش بر حسب جریان در دو زمان متفاوت.....
۴۰.....	شکل ۵-۲: شکل هندسی و مختصات سیستم برای مدل چرخشی مغناطش با فرض ناهمسانگردی عرضی.....
۴۱.....	شکل ۶-۲: وابستگی پذیرفتاری عرضی به تنش کششی طولی در چندین زاویه.....
۴۲.....	شکل ۷-۲: درصد امپدانس مغناطیسی بر حسب تنش کششی اعمالی برای نوارهای بازپختی در چگالی جریان مختلف در حضور تنش کششی ۱۰۰MPa.....
۴۲.....	شکل ۸-۲: طرح پراش پرتو X برای نمونه‌ی خام و بازپخت شده در چگالی جریان‌های مختلف نوار.....



- ۴۳..... Fe73.5 Nb3 Cu1 Si13.5 B9
- شکل ۲-۹: منحنی پسماند در راستای طولی با و بدون تنش برای نوار بازپختی به وسیله‌ی گرمای ژول در
- ۴۳..... چگالی جریان  $\sigma=100\text{MPa}$  و  $33\text{mm/A}$
- شکل ۲-۱۰: جریان بایاس در حالت موازی و پادموازی با میدان مغناطیسی
- شکل ۲-۱۱: نمودار GMI برحسب میدان فرکانس‌های ۱/۱ تا ۱۰ مگاهرتز در جریان بایاس صفر
- شکل ۲-۱۲: اثر جریان بایاس مستقیم بر نمودار GMI
- شکل ۲-۱۳: حساسیت میدانی GMI در فرکانس ۱ مگاهرتز
- شکل ۲-۱۴: وابستگی نامتقارنی GMI به فرکانس در دو جریان ۱ و ۱۰ میلی‌آمپر
- شکل ۲-۱۵: منحنی پسماند M-H مربوط به جریان‌های بایاس مثبت و منفی مختلف
- شکل ۲-۱۶: اختلاف مغناطش در بیشینه میدان اعمالی برحسب جریان بایاس
- شکل ۳-۱: روند ساخت نوار مغناطیسی به روش ذوب چرخان
- شکل ۳-۲: نمونه نوار استفاده شده در آزمایش‌ها
- شکل ۳-۳: نگهدارنده نمونه برای بازپخت جریانی
- شکل ۳-۴: چیدمان بازپخت جریانی
- شکل ۳-۵: مدار اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی
- شکل ۳-۶: پایه اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی در حالت باز و بسته
- شکل ۳-۷: آرایش وسایل جهت اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی
- شکل ۳-۸: مدار اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی در بایاس DC
- شکل ۳-۹: پایه نگهدارنده جهت اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی در بایاس DC
- شکل ۳-۱۰: آرایش اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی در بایاس DC
- شکل ۴-۱: نقش پراش پرتو X (XRD) نوار خام آلیاژ آمورف  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$
- شکل ۴-۲: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب جریان متناوب در فرکانس  $6\text{MHz}$
- شکل ۴-۳: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب جریان متناوب در فرکانس  $8\text{MHz}$
- شکل ۴-۴: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب جریان متناوب در فرکانس  $10\text{MHz}$
- شکل ۴-۵: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب جریان متناوب در فرکانس  $12\text{MHz}$
- شکل ۴-۶: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب جریان متناوب در فرکانس  $14\text{MHz}$

- شکل ۴-۷: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب فرکانس در جریان متناوب  $4\text{mA}$  ..... ۶۲
- شکل ۴-۸: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب فرکانس در جریان متناوب  $6\text{mA}$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۹: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب فرکانس در جریان متناوب  $8\text{mA}$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۰: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب فرکانس در جریان متناوب  $10\text{mA}$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۱: منحنی امپدانس مغناطیسی برحسب فرکانس در جریان متناوب  $12\text{mA}$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۲: مقایسه امپدانس مغناطیسی برای طول‌های مختلف نوار ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۳: فرایند اکسید شدن ماده و تشکیل نواحی بلوری و نانوبلوری در فرایند بازپخت جریانی در حضور هوا ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۴: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی برحسب میدان مغناطیسی در فرکانس  $12\text{MHz}$  برای بازپخت جریانی و جریان‌های بازپخت مختلف ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۵: بیشینه درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ نوارهای بازپختی در جریان‌های مختلف ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۶: نقش پراش پرتو X برای نمونه خام (الف) و بازپخت شده در جریان  $500\text{mA}$  (ب) و  $600\text{mA}$  (ج) ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۷: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $100\text{mA}$  ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۸: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $200\text{mA}$  ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۹: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $300\text{mA}$  ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۰: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $400\text{mA}$  ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۱: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $500\text{mA}$  ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۲: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $600\text{mA}$  ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۳: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $700\text{mA}$  ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۴: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $800\text{mA}$  ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۵: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $900\text{mA}$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۶: منحنی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در بازپخت جریانی  $1000\text{mA}$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۷: نمودار بیشینه درصد امپدانس مغناطیسی در جریان‌های مختلف بازپختی با و بدون بایاس DC ..... ۷۵
- شکل ۴-۲۸: تفاضل قله‌های امپدانس برای نمونه‌های بازپختی با و بدون بایاس DC ..... ۷۵
- شکل ۴-۲۹: منحنی امپدانس مغناطیسی بزرگ برحسب جریان مستقیم جهت یافتن جریان بهینه ..... ۷۶

- شکل ۴-۳۰: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای نمونه خام ۷۶.....
- شکل ۴-۳۱: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۱۰۰mA.... ۷۷
- شکل ۴-۳۲: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۲۰۰mA.... ۷۷
- شکل ۴-۳۳: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۳۰۰mA.... ۷۷
- شکل ۴-۳۴: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۴۰۰mA.... ۷۸
- شکل ۴-۳۵: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۵۰۰mA.... ۷۸
- شکل ۴-۳۶: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۶۰۰mA.... ۷۸
- شکل ۴-۳۷: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۷۰۰mA.... ۷۹
- شکل ۴-۳۸: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۸۰۰mA.... ۷۹
- شکل ۴-۳۹: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۹۰۰mA.... ۷۹
- شکل ۴-۴۰: مقایسه نامتقارنی در امپدانس مغناطیسی با و بدون بایاس DC برای جریان بازپخت ۱۰۰۰mA... ۸۰

# فصل اول

بررسی تئوری اثر امیدانس

مغناطیسی

خواص ترابرد مواد جایگاه مهم و قابل رقابتی در علوم و صنایع گشوده است. با توجه به نیاز صنعت یکی از مهمترین بخشهای دامنه تحقیقات و ابداعات به گسترش فناوری ضبط مغناطیسی مرتبط می‌باشد که شامل حافظه‌های مغناطیسی و خواندن و نوشتن بر این گونه حافظه به وسیله حسگرهای مغناطیسی می‌باشد. یکی از مهمترین حوادث مرتبط با این فناوری در سال ۱۹۸۸ با کشف اثر مقاومت مغناطیسی<sup>۱</sup> (MR) آغاز شد، که منجر به پیدایش فناوری جدیدی در خواندن و ضبط اطلاعات در سخت افزارهایی مانند حافظه‌های مغناطیسی گردید. از آن زمان پژوهش برای یافتن مواد جدیدی که از خود خاصیت پاسخ دهی بهتری در فرآیند ضبط و خواندن اطلاعات نشان می‌دهند، شروع شد و در حال گسترش می‌باشد. دامنه تحقیقات و شبیه سازی فیزیک این فرآیندها در مواد ادامه دارد و جای گسترش و تحقیقات بیشتری دارد. در کنار خواص یاد شده در بالا، امپدانس مغناطیسی<sup>۲</sup> (MI)، شاخه‌ی جدیدی از خواص ترابرد مواد مغناطیسی معرفی می‌شود. در ابتدا مشاهده این خاصیت کمتر مورد توجه قرار گرفت، شاید به این علت باشد که توقعی از کاربرد این خاصیت مواد در فناوری وجود نداشت. پاسخ‌های جالب و تا حدی قابل توجیه و توانایی فراوان این شاخه از علم مواد در طی چند سال اخیر طرفداران زیادی را به خود جلب کرده است. با وجود این تغییرات جالب، توجیه MI در مواد نیاز به فهم عمیق در خواص میکرومغناطیس نرم دارد و از طرفی دیگر به مفهوم عمیق رفتار دینامیکی مواد مغناطیسی مرتبط می‌شود. با افزایش سریع تعداد گروه‌های علمی موجود در دنیا که در مورد MI و کاربردهای آن در فناوری فعالیت می‌نمایند، این شاخه از علم که ترکیبی از علم خواص میکرومغناطیس مواد مغناطیسی و الکترو دینامیک کلاسیک می‌باشد، جایگاه ویژه‌ای در دنیا باز کرده است.

امروزه انواع مختلفی از حسگرهای مغناطیسی مانند حسگرهای القایی، اثر هال، مقاومت مغناطیسی MR و موارد دیگر در دنیا موجود هستند. حسگرهایی قابل قبول و درخور ارزشیابی جهت استفاده در فناوری می‌باشند، که از لحاظ اقتصادی نیز ارزان قیمت باشند، به این معنی که علاوه بر اینکه برای دریافت پاسخ در استفاده از این حسگرها به دستگاه‌های گران قیمت نیاز نداریم همچنین ساخت آن ماده نیز قابل صرفه باشد. از طرفی دیگر خاصیت دمایی پایدار و خواص الکترونیکی و کاربردی مورد نظر با توجه به نیاز در فناوری

<sup>1</sup> Magnetoresistance (MR)

<sup>2</sup> Magnetoimpedance (MI)

را نیز از خود نشان دهند. حسگرهای امپدانس مغناطیسی به خاطر داشتن مزایایی از قبیل اندازه‌ی کوچک، حساسیت بالا، مصرف کم انرژی و قیمت ارزان مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. از دیدگاه نظری، تحقیق بر روی MI با گسترش مدل‌هایی برای درک کامل با توجه به نمودارهای تجربی، از قبیل وابستگی امپدانس به فرکانس و میدان مغناطیسی و عوامل دیگر شروع شد. بعد از آن مرحله، دامنه تحقیقات بر روی بیان دقیق این رفتارها آغاز شد و هنوز ادامه دارد. بعد از انجام این قبیل تحقیقات و بیان دقیق شرایط مرزی و آزمایشگاهی در مطالعات، امروزه می‌توان رفتار MI را دقیق‌تر از گذشته توجیه کرد. مفاهیم عمیقی که در تئوری MI نهفته است به محققان توانایی پیش‌بینی بررسی برخی رفتارهای مغناطیسی مواد مغناطیسی را منتقل می‌کند و این اجازه را می‌دهد که در ساختار مواد مغناطیسی با در نظر داشتن این رفتار در مواد، بتوان ماده مورد نظر را برای شرایط دلخواه، راحت‌تر تولید کرد. بعد از مشاهده‌ی اثر MI در سیم‌های مغناطیسی آمورف و نوارهای مغناطیسی آمورف، مطالعه این اثر بر روی مواد و ساختارهای دیگر نیز در دنیا آغاز شد که از جمله می‌توان به فیلمها، ساختارهای چند لایه‌ای، نوارها، میکروسیمها و تیوبها و نیز به نوعی ساختارهای حالت جامدی متفاوت از جمله تک بلور، ترکیبات آمورف، مواد بلورین با ابعاد نانو و مواد چند بلورین اشاره کرد [۱].

در این پروژه آزمایش بر روی نوارهای آمورف کبالت پایه صورت گرفته است. بطور کلی موادی که برای این اثر استفاده می‌شوند باید نرمی خوبی از لحاظ مغناطیسی داشته باشند یا به عبارتی باید دارای پذیرفتاری مغناطیسی بالا، ناهمسانگردی کوچک، تنگش مغناطیسی کوچک، دمای کوری بالا و ... باشند. روش‌های زیادی جهت ایجاد نامتقارنی نمونه‌ها وجود دارد که در این پروژه از روش بازپخت جریانی استفاده شده است. همچنین نامتقارنی ایجاد شده به علت بازپخت جریانی را در بایاس DC مورد مطالعه قرار داده‌ایم. در راستای این اهداف، این پایان‌نامه در چهار فصل تنظیم شده است. در فصل اول ضمن بیان اثر امپدانس مغناطیسی، این اثر بصورت نظری در سیم‌ها و نوارها شرح داده شده است. با بیان شرایط عمومی برای اثر امپدانس مغناطیسی به مواد با نرمی مغناطیسی اشاره می‌شود. از جمله مواد نرم مغناطیسی، مواد مغناطیسی آلیاژ آمورف و مواد مغناطیسی نانو بلوری می‌باشند. مواد آمورف فلزی به علت دارا بودن خواص فیزیکی مناسب ناشی از حضور یک نظم کوتاه‌برد در غیاب نظم بلندبرد، می‌تواند در اثر امپدانس مغناطیسی مورد توجه خاص باشد. همچنین به بررسی نظری امپدانس مغناطیسی بر پایه معادلات الکترودینامیک کلاسیک (معادلات ماکسول) می‌پردازیم. اثر امپدانس مغناطیسی به پارامترهای مختلف فیزیکی وابسته است. یکی از

این پارامترهای مهم، فرکانس جریان عبوری از نمونه در هنگام اندازه‌گیری می‌باشد. هر ناحیه از فرکانس بحث‌های فیزیکی مربوط به خود را دارد که به آنها اشاره می‌شود. در فصل دوم به پاره‌ای از آزمایشات انجام شده بر روی مواد کبالت پایه و نانو بلورین‌ها پرداخته شده است. میزان نامتقارنی مواد آمورف در بایاس DC که به علت بازپخت جریانی ایجاد می‌شود و اثر این بازپخت در مغناطش، ناهمسانگردی مغناطیسی، تنگش مغناطیسی، روند بلورین شدن و اثر امپدانس مغناطیسی عمده بحث این فصل را شامل می‌شود. از آنجاییکه اعمال جریان مستقیم در امپدانس مغناطیسی باعث تغییر در امپدانس مغناطیسی و نامتقارنی می‌شود، به بررسی این عمل پرداخته‌ایم. نحوه ساخت مواد خام آمورف، نگهدارنده‌های نمونه برای بازپخت، اندازه‌گیری امپدانس و اعمال جریان مستقیم جهت بایاس DC در نگهدارنده، نحوه تنظیم وسایل آزمایشگاهی برای بازپخت جریانی در فصل ۳ ارائه شده است. در فصل ۴ آزمایشات انجام شده و نتایج آن شرح داده است که به تفصیل بیان خواهند شد.

## ۲-۱: خواص ترابرد مغناطیسی مواد

خواص ترابرد مغناطیسی مواد که شامل مقاومت مغناطیسی و امپدانس مغناطیسی می‌باشد، همراه با پیشرفت روز افزون فناوری بخصوص در زمینه‌ی مغناطیس (توسعه ضبط مغناطیسی، ذخیره‌سازی و بازخوانی اطلاعات) مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت مغناطیسی، تغییر مقاومت الکتریکی نمونه حامل جریان الکتریکی مستقیم تحت اثر یک میدان مغناطیسی استاتیک خارجی است که بررسی آن نیازمند مفاهیم کوانتومی بر پایه‌ی اسپین حامل‌ها و برهم‌کنش آنها با مغناطش ناشی از مواد مغناطیسی است در حالیکه اثر امپدانس مغناطیسی یک پدیده‌ی کلاسیکی است که می‌تواند بر پایه‌ای از اصول و مفاهیم الکترومغناطیسی بیان شود.

### ۱-۲-۱: امپدانس

امپدانس الکتریکی مواد مغناطیسی هنگامیکه آنها تحت اعمال پارامترهای خارجی همچون فشار، پیچش یا میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، توجه محققان را به خود جلب کرده است. البته امپدانس فقط به خواص مغناطیسی ماده‌ی مغناطیسی حساس نیست و پارامترهای ساختاری نیز در اندازه امپدانس دخیل هستند. به همین دلیل امپدانس به عنوان یک کمیت خوب برای مطالعه خواص مغناطیسی مواد در حالت میکرو و نانو ساختاری شناخته شده است. نمونه مغناطیسی، زمانی که در معرض عبور جریان متناوب با فرکانس  $f$  قرار

می‌گیرد، مطابق قانون اهم، ولتاژ القاء شده در دو سر نمونه، با جریان متناوب عبوری از ماده متناسب است و رابطه زیر برقرار است [۲]:

$$V_{ac} = I_{ac} Z \quad (1-1)$$

ولتاژ القائی توسط اسیلوسکوپ، ولت‌متر و وسایل دیگر الکترونیکی قابل اندازه‌گیری است. امپدانس وابسته به فرکانس جریان متناوب دارای دو قسمت حقیقی و موهومی است:

$$Z = R + iX \quad (2-1)$$

حال اگر بخواهیم رابطه امپدانس را با پارامترهای ماده بدانیم، باید توزیع جریان را در بخشی از نمونه مورد بررسی قرار دهیم. زمانیکه فرکانس جریان متناوب افزایش می‌یابد، جریان تمایل پیدا می‌کند که از نواحی نزدیک به سطح عبور کند، که این پدیده را ناشی از اثر پوسته<sup>۱</sup> می‌دانند. حل دقیق مسئله عموماً وابسته به شکل رسانا و جریان عبوری است. برای بدست آوردن جواب، معادلات ماکسول بکار می‌آیند.

### ۲-۲-۱: امپدانس مغناطیسی

در دهه‌ی گذشته یکی از پدیده‌های جالب توجه در مغناطیس، امپدانس مغناطیسی بوده است. امپدانس مغناطیسی (MI) شامل تغییر امپدانس الکتریکی کل یک رسانای مغناطیسی (معمولاً رسانای فرومغناطیس) تحت اعمال یک میدان یکنواخت خارجی  $H_{ext}$  است، وقتی یک جریان متناوب  $I = I_0 e^{i\omega t}$  به اندازه‌ی  $I_0$  و فرکانس  $f$  از نمونه عبور کند. این اثر اولین بار در ماده آمورف Fe Co Si B، که به شکل سیم و نوار درآمده بود، مشاهده شده است. این اثر بعدها در مواد دیگری همچون نوارها و میکروسیمهای آمورف کبالت پایه نیز مشاهده شد. اثر (MI) منشاء الکترومغناطیس کلاسیکی دارد و براساس حل معادلات ماکسول و لاندائو-لیفشیتز برای یک رسانای مغناطیسی، زمانیکه جریان با فرکانس بالا از آن عبور می‌کند، می‌تواند بدست آید و توضیح داده شود. اثر امپدانس مغناطیسی نتیجه‌ای از امپدانس است و به میدان مغناطیسی و فرکانس جریان متناوب بستگی دارد.

وابستگی میدانی امپدانس مغناطیسی به وسیله‌ی عمق نفوذ جریان در سطح  $\delta_m = \frac{c}{\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}}$  قابل بیان است که در آن  $c$  سرعت نور،  $\sigma$  رسانندگی و  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی ماده است. امپدانس مغناطیسی نوعاً با

<sup>1</sup> Skin effect



فرکانس افزایش می‌یابد و در فرکانس‌هایی که اثر سطح قوی است، به یک بیشینه می‌رسد و سپس بر اثر کاهش نفوذپذیری به میدان در فرکانس‌های خیلی بالا کاهش می‌یابد. به منظور شناخت کامل از امپدانس مغناطیسی نکاتی چند باید لحاظ شود:

(۱) باید تغییر شدیدی در امپدانس بر اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت رخ دهد. این تغییر به صورت درصد به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(H) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \times 100 \quad (3-1)$$

که در آن  $Z(H)$  امپدانس اندازه‌گیری شده در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت و  $Z(H_{max})$  امپدانس اندازه‌گیری شده در میدان مغناطیسی اشباع است.

(۲) میدان مغناطیسی خارجی باید فقط از مرتبه‌ی چند اورستد باشد.

(۳) محدوده‌ی فرکانس از مرتبه‌ی مگاهرتز تا دهها مگاهرتز (صرف‌نظر از آثار بنا شده بر پایه تشدید فرومغناطیس<sup>۱</sup> که فرکانس در محدوده‌ی گیگاهرتز است) می‌باشد. تعیین این محدوده‌ی فرکانس به این معنی است که در بسیاری از مواد عمق نفوذ  $\delta_m$  (در حدود میکرون در این فرکانس‌ها) بزرگتر از ضخامت نمونه (نوعاً کسری از میکرون) است. وقتی فرکانس در حدود گیگاهرتز است،  $\delta_m$  معمولاً خیلی کوچکتر از ضخامت نمونه است. در هر صورت برای بررسی اثر امپدانس مغناطیسی با استفاده از عمق نفوذ، باید عمق نفوذ کوچکتر از ابعاد نمونه (شعاع نمونه در سیم و ضخامت نمونه در نوار و فیلم) باشد. امپدانس مغناطیسی به جز وابستگی به فرکانس و دامنه جریان، به خواص مغناطیسی مثل تراوایی، تنگش، ناهمسانگردی و نظایر این پارامترها بستگی دارد. بیشترین مقدار اشباع امپدانس مغناطیسی در موادی که در حالت نرم شدگی مغناطیسی قرار دارند، اتفاق می‌افتد. همین نشانگر وابستگی امپدانس مغناطیسی به خواص مغناطیسی مواد است.

برای نشان دادن اثر امپدانس مغناطیسی چندین شرط عمومی باید در مواد مغناطیسی وجود داشته باشد:

(۱) مواد از نظر مغناطیسی باید نرم باشند. یعنی مواد به آسانی مغناطیده شده و به عبارت دیگر منحنی

<sup>1</sup> Ferromagnetic Resonance

پسماند نازک داشته باشد. مواد مغناطیسی نرم اتلاف کم در جریان چرخه مغناطش دارند.

(۲) مواد محور ناهمسانگردی خوش تعریف داشته باشند. یعنی مواد باید جهتی را دارا باشند که مغناطش به طور متوسط در این راستا قرار گیرد (محور آسان). به هر حال مقدار میدان ناهمسانگردی  $H_k$  باید نسبتاً کم (در حد چند اورستد) باشد. نسبت  $H_c$  به  $H_k$  میدان واقطیدگی حدوداً در مرتبه ۲۰ باشد. این خاصیت اثر امیدانس مغناطیسی نوعاً بزرگ را تضمین می کند.

(۳) ماده باید میدان واقطیدگی  $H_c$  کوچک و حلقه‌ی پسماند<sup>۱</sup> لاغر و کشیده داشته باشد. از آنجا که میدان واقطیدگی و شکل حلقه‌ی پسماند و مقدار آن با زاویه‌ای که میدان مغناطیسی با محور آسان ماده می سازد، تغییر می کند، در هنگامی که میدان در جهت محور آسان است، این کمیتها به عنوان نقطه مرجع استفاده می شوند.

(۴) از آنجایی که ماده جریان حمل می کند باید دارای مقاومت کوچک باشد. این شرط مهمی است زیرا ممکن است مواد مغناطیسی مقاومت بالایی داشته باشند.

(۵) ماده مغناطیسی باید دارای مغناطش اشباع  $M_s$  بزرگ باشد تا بر همکنش با میدان مغناطیسی خارجی را بالا ببرد.

(۶) شرایط بیان شده در قسمت‌های قبل هم‌ارز با این بیان است که نمونه در فرکانس صفر دارای نفوذپذیری خیلی بزرگ باشد. همچنین ماده باید دارای تنگش مغناطیسی<sup>۲</sup> کوچک باشد. در واقع باید آثار مکانیکی ایجاد شده بر اثر میدان مغناطیسی در نمونه کوچک باشد.

همانطوری که نفوذپذیری ماده به نظم داخلی مغناطش (که ممکن است به روش تولید و یا فرکانس تغییر کند) وابسته است، همچنین به هندسه‌ی نمونه، طبیعت القا، میدان، دما، فرکانس و توزیع تنش در ماده بستگی دارد. به عنوان مثال، برای دستیابی به جهت مناسبی برای مغناطش و یا خلاصی تنش موجود در ماده، بعضی از مواد باید تحت شرایطی چون تنش مکانیکی و یا در حضور میدان مغناطیسی بازیخت شوند. تغییر در خواص مغناطیسی می تواند ناشی از جابه‌جایی دیواره حوزه<sup>۳</sup> و یا چرخش گشتاورهای مغناطیسی

---

<sup>1</sup>Hystersis Loop

<sup>2</sup>Magnetostriction

<sup>3</sup>Domain Wall Motion

در حوزه‌ها<sup>۱</sup> باشد. در ارتباط با رفتار فرکانسی، وقتی فرکانس به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، (در بسیاری از مواد بزرگتر از یک مگاهرتز کافی است) جابه‌جایی دیواره حوزه به علت جریان ادی<sup>۲</sup> کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته و مغناطش به واسطه‌ی چرخش در تک حوزه تغییر می‌کند. در نتیجه حرکت چرخشی مغناطش رفتار نفوذپذیری را به واسطه عمق نفوذ کنترل می‌کند. حوزه‌های مغناطیسی قسمتی از ماده مغناطیسی است که گشتاورهای مغناطیسی موجود در آن حوزه همه در یک راستا قرار دارند. برآیند این گشتاورهای مغناطیسی برداری است به نام مغناطش، که جهت بردار مغناطش هر حوزه با حوزه‌های مجاورش متفاوت خواهد بود. این تفاوت از آنجا ناشی می‌شود که جسم مغناطیسی می‌خواهد در حداقل انرژی برهمکنش مغناطیسی قرار گیرد. به همین دلیل جهت بردارهای مغناطش هر حوزه نسبت به حوزه‌ی مجاور خود، طوری قرار می‌گیرد که جسم در پایین‌ترین سطح انرژی مغناطیسی قرار گیرد. در اجسام فرومغناطیس گشتاورهای تمام اتمهای مغناطیسی هم جهت هستند. ولی در اجسام فری مغناطیس گشتاور مغناطیسی اتمهای هر شبکه فرعی در یک راستا ولی با یکدیگر پاد موازی هستند. دلیل پیدایش این حوزه‌های مغناطیسی به حداقل رساندن انرژی برهمکنش مغناطیسی جسم مغناطیسی است که باید هنگام بررسی حوزه‌ها تغییرات این چند انرژی را به طور همزمان در نظر گرفت. از جمله این انرژی‌ها، انرژی ناهمسانگردی بلورینی، انرژی ناهمسانگردی شکل، انرژی حاصل از تنش و چند انرژی دیگر هستند. به طور کلی می‌توان گفت که تشکیل حوزه‌ها به نحوی است که مجموع این چند انرژی در ماده مورد نظر به حداقل مقدار خود برسد.

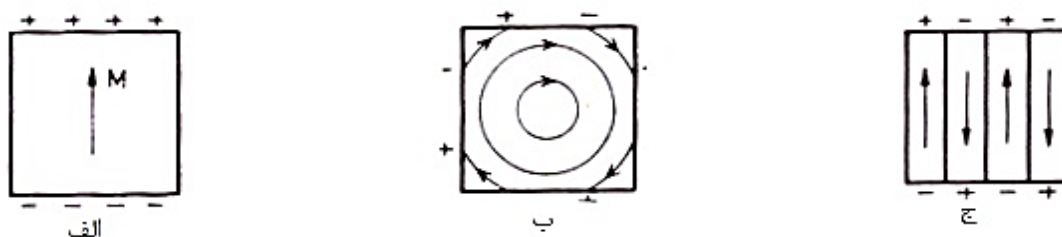
شکل (۱-۱)، یک جسم مغناطیسی تک بلور را نشان می‌دهد که آرایش مختلف حوزه‌های مغناطیسی سطح مقطع آن در شرایط مختلف رسم شده است. در هر کدام از این آرایش‌ها یک انرژی از انرژی‌های ذکر شده در بالا ممکن است در حداقل و انرژی دیگر در حداکثر مقدار خود باشد. همانطور که ذکر شد حوزه‌ها طوری قرار می‌گیرند که مجموع این چند انرژی در حداقل مقدار خود باشد. مثلاً در حالت (الف) فرض شده است که جسم مغناطیسی، تک حوزه است و جهت بردار مغناطش آن در جهت آسان (جهتی از شبکه بلوری است که جسم از نظر انرژی ناهمسانگردی بلورینی در حداقل مقدار ممکن است) قرار گرفته است. در حالت (ب) بردار مغناطش در جهت آسان مغناطیسی قرار ندارد و به طور آزادانه در داخل جسم می‌چرخد. در حالت (ج) جسم از حالت تک حوزه‌ای خارج شده و به چند حوزه‌ی مغناطیسی تقسیم شده

---

<sup>۴</sup> Magnetization Rotation

<sup>۱</sup> Eddy Current

است.



شکل ۱-۱: حوزه‌های مغناطیسی و بردار مغناطش درون حوزه [۱].

همانگونه که بیان شد هر دانه جسم بلوری شامل چند حوزه مغناطیسی است. این حوزه‌های متفاوت، توسط دیواره‌هایی از یکدیگر جدا شده‌اند، که به دیواره‌های مغناطیسی مرسومند. به دلیل متفاوت بودن جهت بردارهای مغناطش حوزه‌های همسایه، جهت بردار مغناطش در دو طرف این دیواره‌ها یکسان نیست. پس بایستی در عرض این دیواره‌ها، چرخش جهت بردارهای مغناطش صورت گرفته باشد. این چرخش‌ها بدین صورت است که از جهت بردار مغناطش یک حوزه شروع می‌شود و تا انتهای عرض دیواره، این چرخش در جهت بردار مغناطش حوزه مجاور قرار گرفته است. بحث دیگری که در مورد دیواره‌های مغناطیسی وجود دارد بحث حرکت یا جابه‌جایی آنها است. می‌دانیم وقتی که بلور مغناطیسی را تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌دهیم حوزه‌های مغناطیسی مجبور به چرخش می‌شوند. زمانیکه حوزه‌ها چرخش داشته باشند، مرز حوزه‌های مغناطیسی که همان دیواره‌های مغناطیسی هستند، مجبور به حرکت هستند. این حرکت دیواره‌ها همانند چرخش حوزه‌ها به دو صورت است: حرکت برگشت‌پذیر و حرکت برگشت‌ناپذیر. بدین صورت که اگر حوزه‌ها حرکت برگشت‌پذیر داشته باشند، مشخصاً دیواره‌ها هم حرکت برگشت‌پذیر خواهند داشت و اگر حوزه‌ها حرکت برگشت‌ناپذیر داشتند، دیواره‌ها هم حرکت برگشت‌ناپذیر خواهند داشت. مطابق شکل ۱-۲ زمانی که بلور مغناطیسی کامل تحت یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، حوزه‌هایی که مؤلفه مغناطش بزرگتری در امتداد موازی با میدان مغناطیسی خارجی دارند، پهن‌تر می‌شوند و حوزه‌هایی که مؤلفه مغناطش کوچکتری در امتداد موازی با میدان دارند، کوچکتر می‌شوند. هر چه شدت میدان مغناطیسی خارجی بیشتر شود از تعداد حوزه‌ها کاسته می‌شود و جسم بلورین به سمت تک حوزه‌ای شدن پیش می‌رود. البته ممکن است که در این حالت جهت بردار مغناطش این تک حوزه در راستای جهت میدان مغناطیسی اعمالی خارجی قرار نگرفته باشد. با این وجود چنانچه شدت میدان مغناطیسی خارجی باز