بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کاشان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک (گرایش ماده چگال)

عنوان:

اثر بازپخت کوره ای، جریانی، جریانی- میدانی بر امپدانس مغناطیسی نوارهای آلیاژ آمورف کبالت پایه

استاد راهنما:

دکتر سید احسان روزمه

استاد مشاور:

دکتر مهرداد مرادی

توسط:

محمدرضا حاجی‌علی

شهریور1392

بسمه تعالی

تاریخ:
شماره:

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو : محمدرضا حاجی‌علی

شماره دانشجویی : ۹۰۱۱۵۶۰۰۰۱

رشته: فیزیک گرایش: ماده چگال دانشکده: فیزیک

عنوان پایان‌نامه : " اثر بازپخت کوره ای، جریانی، جریانی- میدانی بر امپدانس مغناطیسی نوارهای آلیاژ آمورف کبالت پایه"

این پایان‌نامه به مدیریت تحصیلات تکمیلی به منظور بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد ارائه می‌گردد. دفاع از پایان نامه در تاریخ ۹۲/۰۶/۱۷ مورد تأیید و ارزیابی هیأت داوران قرار گرفت و

با نمره به عدد: ۱۹/۹۸ به حروف: نوزده و نود و هشت صدم و درجه عالی به تصویب رسید.

اعضاء هیأت داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱. استاد راهنما :	دکتر سید احسان روزمه	استادیار	
۲. استاد مشاور:	دکتر مهرداد مرادی	استادیار	
۳. متخصص و صاحب نظر داخل دانشگاه :	دکتر عبدالعلی رمضانی	دانشیار	
	دکتر محمد الماسی	دانشیار	
٤.نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه :	دکتر عبدالعلی رمضانی	دانشیار	

مدیر تحصیلات تکمیلی: دکتر محمدرضا منصورنیا

دانشگاه کاشان
دانشکده فیزیک

آدرس: کاشان- بلوار قطب راوندی
کدپستی ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷
تلفن ۵۵۵۲۹۳۵- دورنگار ۵۵۵۲۱۲۵
http : www.kashanu.ac.ir

تقدیم به:

پدر و مادر بزرگوارم

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس بیکران پروردگار دانا و توانا را که هر چه داریم از اوست.

در ابتدا از خانواده‌ی خود تشکر فراوان دارم که با تشویق‌ها و ایجاد یک محیط گرم و صمیمی در خانواده، به بنده کمک‌های شایانی کرده‌اند. از زحمات فراوان آقای دکتر روزمه در همه‌ی مراحل دوره‌ی کارشناسی ارشد و همچنین در سمت استاد راهنما پایان‌نامه‌ی اینجانب سپاسگزارم. از آقای دکتر مرادی به خاطر کمک‌های بی‌دریغ به بنده و همچنین برای راهنمایی آزمایشات انجام شده در راستای این پایان‌نامه در سمت استاد مشاور کمال تشکر را دارم.

از همه‌ی معلمان و اساتیدم که در همه‌ی مراحل تحصیل مشوق و راهنمایم بوده‌اند، به ویژه از آقایان دکتر رمضانی و دکتر جزی به پاس زحماتشان در مقاطع تحصیلی کارشناسی ارشد سپاسگزارم. از آقایان دکتر رمضانی و دکتر الماسی به عنوان متخصصان و صاحب نظران دانشگاه تشکر می‌نمایم. از تمامی دوستانم در آزمایشگاه که با فراهم آوردن محیطی دوستانه و آزمایشگاهی شرایطی مناسب برای انجام فعالیت‌های علمی را مهیا نمودند تشکر می‌کنم.

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 عرصه‌ی فناوری نشان داده است. مناسب‌ترین مواد برای کاربرد در اثر امپدانس مغناطیسی، مواد مغناطیسی نرم همانند آلیاژهای آمورف و مواد مغناطیسی نانوبلور هستند. برای دستیابی به پاسخ امپدانسی مناسب توسط آلیاژهای آمورف، روش‌های گوناگونی وجود دارد که روش بازپخت مواد مورد نظر ماست. در این پایان‌نامه بازپخت به سه روش مختلف کوره‌ای (گرمایی)، جریانی، میدانی- جریانی انجام شده است و اثر هر کدام از آنها بر روی امپدانس مغناطیسی و نامتقارنی امپدانس مغناطیسی (AMI) بررسی شده است.

نتایج این پایان‌نامه نشان می‌دهد که هر چند آلیاژهای آمورف خام (بازپخت نشده) خود کاندید مناسبی برای اثر امپدانس مغناطیسی می‌باشند با بازپخت می‌توانیم خواص مغناطیسی مواد را اصلاح کرده به طوری که نرمی و نفوذپذیری مغناطیسی را افزایش، و تنگش مغناطیسی را کاهش داد و در آنها ساختار نانو و ناهمسانگردی مغناطیسی، القاء و ایجاد کرد. بازپخت در محیط هوا باعث اکسید شدن سطح نمونه و ایجاد نانوبلورک‌های سطحی می‌کند که منجر به نمودارهای گوناگونی در امپدانس مغناطیسی می‌شود. نانوبلورک‌های ایجاد شده در سطح نمونه می‌توانند حساسیت اثر امپدانس مغناطیسی و خواص مغناطیسی ماده را تغییر دهند. با استفاده از روش‌های ارائه شده در این رساله می‌توان به حسگرها، علامت خوان‌ها و سوئیچ‌های مغناطیسی بر مبنای امپدانس مغناطیسی دست یافت.

کلمات کلیدی:

حسگر مغناطیسی، امپدانس مغناطیسی، مواد مغناطیسی نرم، آلیاژ آمورف، بازپخت جریانی و جریانی- میدانی، بازپخت گرمایی، مواد مغناطیسی کبالت پایه

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: بررسی تئوری اثر امپدانس مغناطیسی 1

1-1: مقدمه 2

2-1: خواص ترابرد مغناطیسی مواد 5

1-2-1: امپدانس 5

2-2-1: امپدانس مغناطیسی 6

3-1: مواد مغناطیسی نرم جهت کاربرد در اثر امپدانس مغناطیسی 11

1-3-1: آلیاژهای آمورف مغناطیسی 11

2-3-1: مواد مغناطیسی نانو بلورین 12

4-1: تئوری امپدانس مغناطیسی 14

1-4-1: معادله لاندائو- لیفشیتز 17

5-1: وابستگی امپدانس مغناطیسی به پارامترهای فیزیکی 20

1-5-1: امپدانس مغناطیسی و نواحی فرکانسی متفاوت 20

2-5-1: جریان متناوب اندازه‌گیری 22

3-5-1: میدان مغناطیسی 23

4-5-1: دمای اندازه‌گیری 24

5-5-1: سطح نمونه 25

6-1: معرفی چند مدل 27

1-6-1: مدل شبه استاتیک 27

2-6-1: مدل فرکانس‌های بالا 27

3-6-1: معرفی مدل الکترومغناطیس 28

4-6-1: مدل رسانندگی تبادلی 29

7-1: بررسی نامتقارنی امپدانس مغناطیسی 31

8-1: کاربرد پراش پرتوی X 34

1-8-1: شناسایی مواد با پراش پرتوی X 34
1-8-2: تعیین اندازه‌ی ذرات 35
1-8-3: اندازه‌گیری تنش باقیمانده در نمونه 36
فصل دوم: مروری بر برخی از کارهای انجام شده 37
2-1: بازپخت مواد آمورف کبالت پایه و فرایند بلورین شدن آن 38
2-2: وابستگی بلورین شدن به درصد (B) و (Si) در نوار $Co_{95-X}\ Fe_5\ (B\ Si)_X$ 39
2-3: بازپخت کوره‌ای (گرمایی) مواد کبالت پایه 41
2-3-1: بهینه شرایط بازپخت گرمایی 41
2-3-2: نقش فاز بلورین سطحی در امپدانس مغناطیسی نوارهای آمورف کبالت پایه 45
2-3-3: اثر بازپخت گرمایی بر نفوذپذیری مغناطیسی 47
2-3-4: اثر بازپخت گرمایی بر ساختار میکروسکوپی و مشخصات مغناطیسی 52
2-4: بازپخت جریانی 55
2-4-1: ناهمسانگردی مغناطیسی و اثر امپدانس تنشی در بازپخت جریانی 58
2-5: بازپخت میدانی- جریانی 63
2-6: بازپخت لیزری 66
فصل سوم: روش‌های اندازه‌گیری و تنظیم وسایل آزمایش 70
3-1: روش استحکام سازی سریع در ساخت نوار مغناطیسی 71
3-2: شکل هندسی و ابعاد نمونه‌ها 72
3-3: چگونگی بازپخت نمونه‌ها 73
3-3-1: بازپخت کوره‌ای 73
3-3-2: بازپخت جریانی 75
3-3-3: بازپخت جریانی- میدانی 77
3-4: نحوه‌ی اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی 80
فصل چهارم: نتایج تجربی کارهای انجام شده 83
4-1: بازپخت کوره‌ای(گرمایی) 86

4-2: بازپخت جریانی 88
4-2-1: تاثیر بازپخت جریانی و تشکیل نانو بلورک‌ها بر امپـدانس مغناطیسـی بـزرگ در نـوارهـای کبالت پایه..... 90
4-2-2: بررسی فازهای نانوبلورین ایجاد شده بر سطح بر اثر بازپخت جریانی به کمک نقش پـراش پرتو X 93
4-2-3: اثر اکسیدزدایی سطح نمونه‌ها، بر نرمی مغناطیسی، امپدانس مغناطیسی و نامتقارنی امپـدانس مغناطیسی در نوارهای آلیاژ آمورف کبالت پایه پس از بازپخت جریانی..... 95
4-3: بازپخت میدانی- جریانی 100
4-4: نتایج 107
4-5: پیشنهاد برای ادامه‌ی کار..... 109
مراجع 110

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل1-1: حوزه‌های مغناطیسی و بردار مغناطش درون حوزه..... 9

شکل1-2: زمانی‌که کریستال مغناطیسی کامل تحت یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد 10

شکل1-3: نمایی کلی از اثر عمق پوسته در یک نمونه‌ی فرومغناطیس 15

شکل1-4: تعریف امپدانس برای قطعه سیمی با سطح مقطع q. 15

شکل1-5: امپدانس ناشی از نوار آمورف خام ($Fe_{5.73}\ Cu_1\ Nb_3\ Si_{5.13}\ B_9$) بر حسب فرکانس 20

شکل1-6: تغییر رفتار دو قله‌ای به تک قله‌ای منحنی امپدانس مغناطیسی، در سیم کبالت پایه با افزایش جریان. 23

شکل1-7: وابستگی درصد امپدانس مغناطیسی به میدان مغناطیسی dc در فرکانس‌های مختلف. 23

شکل1-8: وابستگی دمایی امپدانس مغناطیسی آلیاژ کبالت پایه $Co_{70}Fe_5Si_{15}Nb_{2.2}Cu_{0.8}B_7$ در فرکانس 1MHz 25

شکل1-9: وابستگی بیشینه مقدار امپدانس مغناطیسی در نوار نانوبلورین($(Fe_{73.5-x}\ 5$ $Cr_xSi_{13.5}B_9Nb_3Au_1(x=1-$ به سطح نمونه 26

شکل1-10: نمایی از سطح مقطع یک نوار بازپخت شده و ایجاد دو ناهمسانگردی تک جهتی و تک محوری به ترتیب در لایه‌ی بلورین و هسته‌ی آمورف 32

شکل1-11: منحنی‌های امپدانس مغناطیسی برای نمونه‌ی بازپخت شده در میدان بازپخت H_a=3Oe در فرکانس‌های اندازه‌گیری مختلف 33

شکل1-12: امپدانس مغناطیسی اندازه‌گیری شده در فرکانس 10MHz برای میدان‌های بازپخت مختلف..... 33

شکل2-1: طرح واره‌ای از فرایند اکسید سطحی و بلورین شدن نمونه بعد از بازپخت. 39

شکل2-2: AES برای(a) نمونه‌ی خام و نمونه‌های بازپخت شده در زمان‌های مختلف بازپخت،(b)20 دقیقه، (c)2 ساعت، (d)8 ساعت..... 41

شکل2-3: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی در زمان‌های مختلف بازپخت,(a,e) 20دقیقه, (b,f) 1ساعت, (c,g) 8 ساعت, (d,h) 36 ساعت تحت دمای $^{\circ}$c 380 و میدان مغناطیسی 3 Oe 43

شکل2-4: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی در دماهای مختلف بازپخت, (a,e)**c**$^{\circ}$ 200, (b,f) $^{\circ}$c 300,

(c,g) 350 ˚c, (d,h) 450 ˚c, تحت میدان مغناطیسی 3 Oe و زمان بازپخت 8 ساعت. 44
شکل2-5: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی در میدان‌های مختلف بازپخت, (a,e) 50 mOe , (b,f) و (c,g) 0/5 Oe ≤ H_a ≤ 3 Oe ,15Oe (d,h), تحت دمای 380 ˚c و زمان پخت 8 ساعت. 45
شکل2-6: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی(a) نمونه‌ی بازپختی در خلاء (b) نمونه‌ی بازپختی در هوای آزاد. 46
شکل2-7: شماتیکی از ساختار حوزه . حرکت دیواره‌ی حوزه(حوزهI) و چرخش مغناطش(حوزهII) در هنگام مغناطش عرضی 48
شکل2-8: قسمت حقیقی(a) و موهومی(b) نفوذپذیری مغناطیسی برای نمونه‌ی خام تحت دامنه‌های میدان مغناطیسی ac مختلف 48
شکل2-9: قسمت حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی برای نمونه‌ی بازپختی در دمای 540˚c تحت دامنه‌های میدان مغناطیسی ac مختلف 49
شکل2-10: وابستگی نفوذپذیری مغناطیسی طولی μ_L^{dw} و μ_L^{rot} ، به دمای بازپخت. 49
شکل2-11: وابستگی امپدانس مغناطیسی به فرکانس برای نمونه‌ی بازپختی در دمای 540°C. 50
شکل2-12: الگوی پراش پرتوی X برای نمونه‌ی خام آلیاژ $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$. 52
شکل2-13: وابستگی اندازه‌ی متوسط دانه بلورین به دمای بازپخت. 53
شکل2-14: منحنی گرمامغناطیسی آلیاژ آمورف $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$ (1) چرخه‌ی گرم شدن (2) چرخه‌ی سرد شدن. 53
شکل2-15: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس 10 MHz برای نمونه‌های خام و بازپختی در دماهای مختلف 54
شکل2-16: تغییرات میدان ناهمسانگردی و اندازه‌ی درصد امپدانس مغناطیسی با دمای بازپخت 54
شکل2-17: مقاومت الکتریکی برحسب زمان بازپخت جریانی نوار $Fe_{73.5}\,Nb_3\,Cu_1\,Si_{13.5}\,B_9$. 56
شکل2-18: تغییرات نسبی نفوذپذیری و فاکتور کشش بر حسب زمان بازپخت برای جریان 4/5 آمپر. 57
شکل2-19: نفوذپذیری و فاکتور کشش برحسب جریان در دو زمان متفاوت. 57
شکل2-20: شکل هندسی و مختصات سیستم برای مدل چرخشی مغناطش با فرض ناهمسانگردی عرضی .. 59
شکل2-21: وابستگی پذیرفتاری عرضی به تنش کششی طولی در چندین زاویه. 60

شکل2-22: درصد امپدانس مغناطیسی بر حسب تنش کششی اعمالی بـرای نوارهـای بـازپختی در چگـالی جریان مختلف در حضور تنش کششی 100 MPa 61
شکل2-23: طرح پراش پرتو X برای نمونه‌ی خام و بازپخت شـده در چگـالی جریـان‌هـای مختلـف نـوار $Fe_{73.5}\,Nb_3\,Cu_1\,Si_{13.5}\,B_9$ 61
شکل2-24: منحنی پسماند در راستای طولی با و بدون تنش برای نوار بازپختی به وسیله‌ی گرمـای ژول در چگالی جریان $33\ A/mm^2$ و σ =100MPa 62
شکل2-25: مقاومت نمونه، به صورت تابعی از زمان پخت برای I_{DC} = 450 mA و t_a=14 h 64
شکل2-26: منحنی پسماند طولی: (●)سیم خام $Co_{68.18}\,Fe_{4.32}\,Si_{12.5}\,B_{15}$ و (○) همان سیم بعد از بازپخت.. 64
شکل2-27: امپدانس مغناطیسی اندازه‌گیری شده بـا I_{AC}=5 mA و فرکـانس (●) 500 kHz در نمونـه خـام ( ) 0/5 MHz, (○)1 MHz, (–) 5 MHz در نمونه‌ی بازپختی 65
شکل2-28: منحنی مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی نمونه..... 67
شکل2-29: تصاویر بیتر برای نمونه (الف) با تنگش مثبت و (ب) با تنگش منفی..... 67
شکل2-30: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی در انرژی‌های مختلف لیزر. 68
شکل2-31: نمودار امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف. 69
شکل2-32: تغییرات میدان ناهمسانگردی موثر نسبت به انرژی پخت..... 69
شکل 3-1: نمایی از روند ساخت نوار مغناطیسی به روش ذوب چرخان 71
شکل3-2: نمونه نوار مورد آزمایش..... 72
شکل3-3: نحوه چینش نمونه‌ها برای بازپخت کوره‌ای 73
شکل3-4: روند بازپخت کوره‌ای در محیط خلاء..... 74
شکل3-5: نگهدارنده‌ی نمونه برای بازپخت جریانی 75
شکل3-6: روند بازپخت جریانی نمونه‌ها در هوا..... 76
شکل3-7: روند بازپخت جریانی در محفظه‌ی خلاء 76
شکل3-8: چیدمان وسایل آزمایش برای بازپخت جریانی- میدانی نمونه‌ها در هوا 77
شکل3-9: چیدمان وسایل آزمایش برای بازپخت جریانی- میدانی نمونه‌ها در محیط خلاء 78
شکل3-10: رابطه‌ی تقریبی بین جریان و میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیملوله‌ی بزرگ 78
شکل3-11: رابطه‌ی تقریبی بین جریان و میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیملوله‌ی کوچک 79

شکل3-12: پایه نگهدارنده‌ی نمونه جهت اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی 80
شکل3-13: چیدمان وسایل آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی {(الف) منبع تغذیه dc جهت اعمال جریان به سیملوله، (ب) مولتی‌متر (ج) اسیلوسکوپ جهت ثبت ولتاژ از نمونه (د) مولد ac جهت اعمال ولتاژ به نمونه (ح) سیملوله جهت تولید میدان مغناطیسی}..... 81
شکل3-14: بهینه جریان و فرکانس اعمالی به نمونه‌ی خام $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ با اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی 82
شکل4-1: نقش پراش پرتو X (XRD) نوار خام آلیاژ آمورف $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ 84
شکل4-2: منحنی درصد امپدانس مغناطیسی برای نمونه‌ی A و B خام و بازپختی در دماهای مختلف 87
شکل4-3: فرایند اکسید شدن ماده و تشکیل نواحی بلوری و نانوبلوری در فرایند بازپخت جریانی در حضور هوا..... 88
شکل4-4: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس 4 MHz برای بازپخت جریانی در خلاء و فشار 2×10^{-2} میلی بار و برای جریان‌های بازپخت مختلف 91
شکل4-5: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس 4 MHz برای بازپخت جریانی در هوا و برای جریان‌های بازپخت مختلف..... 91
شکل4-6: درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ نوارهای بازپختی در جریان‌های مختلف، (○) در فشار جو (●) در فشار 2×10^{-2} میلی‌بار..... 92
شکل4-7: نقش پراش پرتو X نمونه‌ی خام و بازپخت شده $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ در محیط هوا و در جریان‌های مختلف 94
شکل4-8: منحنی‌های پسماند مغناطیسی طولی مربوط به نمونه‌ی بازپخت شده در جریان 1100 میلی‌آمپر در حالت‌های قبل و بعد از اکسیدزدایی..... 96
شکل4-9: نمودار درصد امپدانس مغناطیسی به صورت تابعی از میدان مغناطیسی اعمالی برای (a) نمونه‌ی خام و بازپختی در جریان‌های (b)1000 mA, (c)1100 mA, (d)1200 mA 97
شکل4-10: بیشینه درصد امپدانس مغناطیسی قبل و بعد از اکسیدزدایی برای نمونه‌های خام و بازپختی در جریان‌های مختلف 98
شکل4-11: درصد امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی برای نمونه‌های $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ که به مدت 15 دقیقه با جریان‌های مختلف مستقیم و متناوب بازپخت

شده‌اند 99
شکل4-12: درصد امپدانس مغناطیسی اندازه‌گیری شده در فرکانس 4 MHz برای نمونه‌های بازپختی در محیط هوا، با جریان مستقیم (DC)600 میلی‌آمپر و میدانهای بازپخت مختلف 101
شکل4-13: درصد امپدانس مغناطیسی اندازه‌گیری شده در فرکانس 4 MHz برای نمونه‌های بازپختی در محیط هوا، با جریان متناوب AC 600 میلی‌آمپر و میدان‌های بازپخت مختلف 104
شکل4-14: درصد امپدانس مغناطیسی اندازه‌گیری شده در فرکانس 4 MHz برای نمونه‌های بازپختی در محیط خلاء، با جریان مستقیم (DC)600 میلی‌آمپر و میدانهای بازپخت مختلف 106

فصل اول

بررسی تئوری اثر امپدانس

مغناطیسی

1-1: مقدمه

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 توسط حسگرهای مغناطیسی می‌باشد. یکی از مهمترین حوادث مرتبط با این فناوری در سال 1988 با کشف اثر مقاومت مغناطیسی[1] (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[2] (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 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 الکترودینامیک 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 قمیت 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

[1] Magnetoresistance (**MR**)
[2] 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 تسمه‌های مغناطیسی آمورف، مطالعه این اثر بر روی مواد و ساختارهای دیگر نیز در دنیا آغاز شد 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 [1].

در این پروژه آزمایشات بر روی نوارهای آمورف کبالت پایه صورت گرفته است. به طور کلی موادی که برای این اثر استفاده می‌شوند باید نرمی خوبی از لحاظ مغناطیسی داشته باشند که به عبارتی باید دارای پذیرفتاری مغناطیسی بالا، ناهمسانگردی کوچک، تنگش مغناطیسی کوچک، دمای کوری بالا و..... باشند. روش‌های زیادی برای نایل شدن به این نوع خواص مورد نظر به کار گرفته شده است، که روش بازپخت مواد آلیاژ آمورف مورد نظر ماست. در راستای این اهداف، این پایان‌نامه در چهار فصل تنظیم شده است. در فصل اول ضمن بیان اثر امپدانس مغناطیسی، نظری آن 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 نانوبلوری می‌باشند. مواد آمورف فلزی به علت دارا بودن خواص فیزیکی مناسب ناشی از حضور یک نظم کوتاه برد در غیاب نظم بلند برد، 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 آن اشاره می‌شود. در فصل دوم به پاره‌ای از آزمایشات انجام شده بر روی مواد کبالت پایه و نانوبلورین‌ها پرداخته شده است. بازپخت‌های مختلف و اثر این بازپخت‌ها در مغناطش، ناهمسانگردی مغناطیسی، تنگش مغناطیسی، روند بلورین شدن و اثر امپدانس مغناطیسی عمده‌ی بحث این فصل را شامل می‌شود. از آنجاییکه در فرایند بازپخت بسته به نوع آن نتایج متفاوتی مشاهده گردیده است به بررسی خواص امپدانس مغناطیسی پس از سه نوع بازپخت کوره‌ای، جریانی و جریانی- میدانی پرداخته‌ایم. نحوه‌ی ساخت مواد خام آمورف، نگهدارنده‌های نمونه برای بازپخت و اندازه‌گیری امپدانس، نحوه‌ی تنظیم وسایل آزمایشگاهی برای انواع بازپخت (بازپخت کوره‌ای، بازپخت جریانی در محیط هوا و خلاء، بازپخت جریانی- میدانی در محیط هوا و خلاء) در فصل 3 ارائه شده است. در فصل 4 آزمایشات انجام شده و نتایج آن، شرح داده شده است که عمدتاً نتایج آن به صورت پوستر و ارائه شفاهی در کنفرانس‌های داخلی مورد قبول قرار گرفته است.

2-1: 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 نمونه تحت اثر یک میدان مغناطیسی است که بررسی آن نیازمند مفاهیم کوانتومی بر پایه‌ی اسپین حامل‌ها و بر هم‌کنش 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.

1-2-1: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 میکرونانو ساختاری شناخته شده است. نمونه مغناطیسی نانو ساختاری، زمانیکه 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 [2]:

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

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:

$$Z = Z' + iZ'' \qquad (2\text{-}1)$$

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[1] می‌دانند. حل دقیق مسئله عموماً وابسته به شکل رسانا و جریان عبوری است. برای بدست آوردن جواب، معادلات ماکسول بکار می‌آیند.

[1] Skin effect

2-2-1:امپدانس مغناطیسی

در دهه‌ی گذشته یکی از پدیده‌های جالب توجه در مغناطیس، امپدانس مغناطیسی بوده است. در این اثر (MI)، زمانیکه یک ماده رسانا که از نظر مغناطیسی، نرم است در معرض یک میدان مغناطیسی پایا قرار می‌گیرد و همزمان یک جریان متناوب با فرکانس بالا از آن عبور می‌کند، امپدانس تغییرات شدیدی از خود نشان می‌دهد. 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. اثرامپدانس 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، σ رسانندگی و μ نفوذپذیری مغناطیسی ماده است. امپدانس مغناطیسی نوعاً با 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:

1) 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:

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

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

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

3) محدوده‌ی فرکانس از مرتبه‌ی مگاهرتز تا دهها مگاهرتز (صرف‌نظر از آثار بنا شده بر پایه تشدید