



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

ساخت و بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آلیاژ حافظه پذیر فرومغناطیس
 $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ نانو ساختار

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

علی قطبی ورزنده

استاد راهنما

دکتر پرویز کاملی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات ،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک - ماده چگال تجربی آقای علی قطبی ورزنه

تحت عنوان

**ساخت و بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آلیاژ حافظه پذیر فرومغناطیس
 $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$ نانو ساختار**

در تاریخ ۹۲/۱۰/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

دکتر پرویز کاملی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر فتح ا... کریم زاده

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکتر محمود کدخدایی

۳- استاد داور

دکتر مهدی رنجبر

۴- استاد داور

دکتر مجتبی اعلائی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

مراتب اتنان خودم را تقدیم می‌کنم به اساتذ راهنمای عزیزیم جناب آقای دکتر پرویز کابلی که بدون پیگیری‌های مستمر و برنامه ریزی‌های دقیق ایشان، این پایان نامه نمی‌توانست به سرانجام برسد. از زحمات استاد مشاورم آقای دکتر فتح‌ا... کریم زاده کمال تشکر را دارم. از اساتید داور که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند سپاسگزاری می‌کنم. از تمامی دوستان عزیزم در گروه ماده چکال تجربی به ویژه آقایان امیری، حیدری، اصلی بیکی و زاهدی که زحمات بی‌شائبه‌ای را متحمل شدند کمال تشکر و سپاس گذاری را دارم.

ماحصل آنچه راتا به حال با حوصله ی زمان آموخته ام تقدیم می کنم: به دو نازنینی که در این سردترین روزکاران همیشه با گرمای دعاها و مهربانی
باشان به مقدم و هدوش من بودند و در این مسیر تلاطم حتی کسری از زمان سایه ی سرزنششان را از من خردک پای دریغ نداشتند.

آری تقدیم به پدر و مادرم که از مکاششان گل محبت چیدم و از کلامشان بوی عشق را استشمام کردم...

تقدیم به همسفران دلسوز زندگیم:

همسفران کارم که با وجودی ملو از مهر و محبت و عشق بستری آرام و بدون دغدغه برای رشد و پیشرفت من مهیا نمود.

و برادر و خواهر عزیزم که با هم کودکی هایمان را با اوج شادی و لذت سپری کردیم و همیشه فردائینی زیبا برای هم آرزو داریم.

چکیده

در این پروژه آلیاژ حافظه پذیر فرومغناطیس $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$ با استفاده از روش آسیاب کاری ساخته شد. بدین منظور پودر عناصر اولیه با خلوص بالا با استوکیومتری ذکر شده توزین شده و به مدت ۲۰ ساعت در آسیاب سیارهای آسیاب شد. سپس به کمک تحلیل پراش پرتو ایکس و پذیرفتاری مغناطیسی فرایند تشکیل فاز با افزایش زمان آسیاب کاری مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل ریتولد نمونه‌ی ۲۰ ساعت آسیاب شده نشان داد این نمونه دارای فاز هویسلر $L2_1$ است. در این نمونه گذار مغناطیسی در محدوده‌ی ۲۹۰ کلوین مشاهده شد اما اثری از گذار مارتزیتی مشاهده نگردید که این موضوع به دلیل بی نظمی‌های ایجاد شده و همچنین کرنش‌های ایجاد شده حین آسیاب کاری است. در ادامه برای دست یابی به نمونه‌هایی با ساختار بلوری با نظم بلند برد، نمونه‌ی ۲۰ ساعت آسیاب شده در لوله‌هایی از جنس کوارتز و تخلیه شده از هوا قرار داده شد و به مدت ۱۶ ساعت در دماهای ۷۵۰، ۵۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد بازپخت شد. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها نشان داد فاز غالب در هر ۳ نمونه آستنیت است اما در نمونه‌های بازپخت شده در دمای ۵۵۰ و ۷۵۰ درجه سانتیگراد قله‌هایی از فاز مارتزیت مشاهده می‌شود. در پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ی بازپخت شده در ۵۵۰ درجه گذار مغناطیسی و ساختاری مشاهده نشد در حالی که در نمونه‌های بازپخت شده در ۷۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد این گذار مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، وجود پارامتر شبکه‌ی بحرانی و همچنین اندازه‌ی بلورک کمتر در نمونه‌ی بازپخت شده در ۵۵۰ درجه باعث شده است که گذار ساختاری و مغناطیسی در این نمونه مشاهده نشود. سپس اثر مغناطوگرمایی نمونه‌ی بازپخت شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل تفاوت مغناطش اشباع فاز مارتزیت و آستنیت، تغییرات آنتروپی قابل ملاحظه‌ای در محدوده‌ی گذار ساختاری و مغناطیسی مشاهده شد. نتایج نشان داد این آلیاژ با توجه به عناصر ارزان و در دسترس، دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در یخچال‌های مغناطیسی است.

کلمات کلیدی: ۱- آلیاژ حافظه پذیر فرومغناطیس ۲- آسیاب کاری ۳- بازپخت ۴- اثر مغناطوگرمایی

فهرست مطالب

| عنوان | صفحه |
|-------------|------|
| فهرست | هشت |
| چکیده | ۱ |

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: مروری بر مفاهیم مغناطیس

| | |
|---|----|
| ۱-۲ پذیرفتاری مغناطیسی | ۶ |
| ۲-۲ حالت های مغناطیسی مواد و ویژگی آنها | ۸ |
| ۱-۲-۲ دیا مغناطیس | ۸ |
| ۲-۲-۲ پارامغناطیس | ۸ |
| ۳-۲-۲ فرومغناطیس | ۹ |
| ۴-۲-۲ یاد فرومغناطیس | ۱۰ |
| ۵-۲-۲ فری مغناطیس | ۱۰ |
| ۳-۲ برهمکنش های مغناطیسی | ۱۱ |
| ۱-۳-۲ برهمکنش دو قطبی-دو قطبی | ۱۱ |
| ۲-۳-۲ بر همکنش تبادلی | ۱۲ |

فصل سوم: ویژگی های آلیاژهای هویسلر

| | |
|--|----|
| ۱-۳ تاریخچه | ۱۴ |
| ۲-۳ ویژگی آلیاژهای حافظه پذیر فرومغناطیس | ۱۷ |
| ۱-۲-۳ اثر حافظه پذیری | ۱۷ |
| ۲-۲-۳ اثر مغناطو گرمایی | ۲۱ |
| ۳-۳ مروری بر کارهای انجام شده | ۲۷ |

۴-۳ اهمیت موضوع و اهداف پروژه ۳۷

فصل چهارم: ساخت و اندازه گیری

۱-۴ روش ساخت ۳۹

۱-۱-۴ روش سنتز خود احتراقی (SHS) ۴۰

۲-۱-۴ روش ذوب قوسی ۴۰

۳-۱-۴ روش مذاب چرخان ۴۱

۴-۱-۴ آلیاژسازی مکانیکی ۴۱

۲-۴ روش های اندازه گیری ۴۶

۱-۲-۴ مطالعه ی ساختار بلوری: پراش پرتو ایکس ۴۶

۲-۲-۴ میکروسکوب الکترونی عبوری ۴۸

۳-۲-۴ میکروسکوب الکترونی روبشی ۴۸

۴-۲-۴ آنالیز گرماسنجی پویشی تفاضلی ۴۹

۵-۲-۴ آنالیز پذیرفتاری مغناطیسی متناوب ۵۱

۶-۲-۴ آنالیز مغناطش سنج نمونه ی ارتعاشی (VSM) ۵۲

۷-۲-۴ مقاومت الکتریکی ۵۳

فصل پنجم: ساخت، مشخصه یابی و تحلیل نتایج

۱-۵ ساخت ۵۵

۱-۱-۵ ویژگی های ساختاری و فرایند تشکیل فاز ۵۶

۲-۱-۵ ویژگی های مغناطیسی ۶۰

۲-۵ اثر دمای بازپخت بر ویژگی های ساختاری و مغناطیسی ۶۳

۱-۲-۵ بازپخت در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد ۶۴

۲-۲-۵ باز پخت نمونه در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد ۶۹

۳-۲-۵ باز پخت نمونه در دمای ۹۵۰ درجه ی سانتیگراد ۷۴

۳-۵ اثر مدت زمان بازپخت بر ویژگی های ساختاری و مغناطیسی ۸۱

| | | |
|---------|-------------------------------|-----|
| ۸۵..... | بررسی اثر مغناطو گرمایی | ۴-۵ |
| ۹۶..... | نتیجه گیری | ۵-۵ |
| ۹۷..... | پیشنهادات پایان نامه | ۶-۵ |
| ۹۸..... | مراجع..... | |

فهرست اشکال

| صفحه | عنوان |
|---------|--|
| ۸..... | شکل ۱-۲ منحنی مغناطش برای مواد دیا مغناطیس، پارامغناطیس، پاد فرومغناطیس و فرومغناطیس . |
| ۹..... | شکل ۲-۲ جهت گیری ممان های یک ماده ی پارامغناطیس. |
| ۹..... | شکل ۳-۲ اثر میدان مغناطیسی بر حوزه های ماده فرومغناطیس |
| ۱۱..... | شکل ۴-۲ جهت گیری ممان های یک ماده ی پاد فرومغناطیس. |
| ۱۱..... | شکل ۵-۲ جهت گیری ممان های یک ماده ی فری مغناطیس. |
| ۱۵..... | شکل ۱-۳ مجموعه ترکیبات هویسلر شناخته شده. |
| ۱۵..... | شکل ۲-۳ ساختار NaCl و ZnS گونه و ارتباط آن با ساختار نیم هویسلر |
| ۱۶..... | شکل ۳-۳ ساختار بلوری آلیاژ تمام هویسلر با تقارن $L2_1$. |
| ۱۷..... | شکل ۴-۳ مقایسه ی تقارنهای بلوری ممکن در تمام هویسلرها. |
| ۱۷..... | شکل ۵-۳ مقایسه ی مواد هوشمند از نظر کرنش بیشینه و فرکانس کاری. |
| ۱۹..... | شکل ۶-۳ منحنی تغییر فاز در اثر تغییر دما |
| ۱۹..... | شکل ۷-۳ تغییر طول نمونه عمود بر میدان مغناطیسی اعمالی |
| ۲۰..... | شکل ۸-۳ سوزن با کارایی بسیار سریع ساخته شده از آلیاژ حافظه پذیر فرومغناطیس |
| ۲۱..... | شکل ۹-۳ استفاده از مواد حافظه پذیر برای تولید نیرو |
| ۲۰..... | شکل ۱۰-۳ ساختمان شیری که در آن از آلیاژ حافظه پذیر استفاده شده. |
| ۲۲..... | شکل ۱۱-۳ نحوه ی سردسازی مواد مغناطو گرمایی طی یک چرخه |
| ۲۳..... | شکل ۱۲-۳ تشابه چرخه ترمودینامیکی در یخچال های معمولی و یخچال های مغناطیسی |
| ۲۳..... | شکل ۱۳-۳ تعداد مقالات منتشر شده با عبارت مغناطو گرمایی در عنوان یا چکیده تا سال ۲۰۰۷. |
| ۲۴..... | شکل ۱۴-۳ تغییرات آنتروپی مغناطیسی با میدان |
| ۲۷..... | شکل ۱۵-۳ تغییرات آنتروپی نسبت به دما در میدان های متفاوت |
| ۲۸..... | شکل ۱۶-۳ تغییرات دمای گذار با تغییر در تعداد الکترون های ظرفیت بر واحد اتم |
| ۳۰..... | شکل ۱۷-۳ منحنی مغناطش بر حسب دما برای آلایش های مختلف |

- شکل ۳-۱۸ تغییرات دمای گذار ساختاری نسبت به حجم سلول واحد و الکترون های ظرفیت بر واحد اتم..... ۳۰
- شکل ۳-۱۹ تغییرات دمای گذار نسبت به چگالی الکترونی..... ۳۱
- شکل ۳-۲۰ الگوی پراش پرتو ایکس در آلایش های مختلف..... ۳۱
- شکل ۳-۲۱ منحنی مقاومت الکتریکی نسبت به دما..... ۳۳
- شکل ۳-۲۲ مغناطومقاومت در محدوده ی گذار ساختاری..... ۳۳
- شکل ۳-۲۳ تغییرات آنتروپی نمونه ی قبل و بعد از آلایش نسبت به دما..... ۳۴
- شکل ۳-۲۴ تغییرات دمای گذار ساختاری با سردسازی در دماهای مختلف..... ۳۵
- شکل ۳-۲۵ پذیرفتاری مغناطیسی نمونه ی آسیاب نشده، پس از آسیاب و بعد از عملیات حرارتی در دماهای..... ۳۷
- شکل ۴-۱ نمایشی از دستگاه ذوب قوسی..... ۴۰
- شکل ۴-۲ شمایی از دستگاه مذاب چرخان..... ۴۱
- شکل ۴-۳ نمایشی از دستگاه آسیاب سیاره ای استفاده شده در این تحقیق..... ۴۳
- شکل ۴-۴ نمونه ای از برازش گوسی برای محاسبه نیم پهنا..... ۴۷
- شکل ۴-۵ نمایشی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری..... ۴۹
- شکل ۴-۶ نحوه ی اندازه گیری نمونه در دستگاه DSC..... ۵۰
- شکل ۴-۷ نمایشی از دستگاه DSC استفاده شده در این تحقیق..... ۵۱
- شکل ۴-۸ نمایشی از دستگاه پذیرفتاریسنج متناوب..... ۵۲
- شکل ۴-۹ نمایشی از دستگاه VSM مورد استفاده در این تحقیق..... ۵۳
- شکل ۴-۱۰ شمایی از نحوه قرار گرفتن نمونه در مدار..... ۵۴
- شکل ۵-۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ی اولیه..... ۵۶
- شکل ۵-۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های آسیاب کاری شده در زمان های مختلف..... ۵۷
- شکل ۵-۳ تحلیل ریتولد نمونه های: الف) ۱۵ ساعت آسیاب شده ب) ۲۰ ساعت آسیاب شده..... ۵۸
- شکل ۵-۴ نقشه رنگی نمونه قبل از آسیاب کاری..... ۵۹
- شکل ۵-۵ نقشه رنگی نمونه ی ۲۰ ساعت آسیاب کاری شده..... ۵۹
- شکل ۵-۶ الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری با مقیاس ۵۰ نانومتر ب) الگوی پراش الکترونی..... ۶۰

- شکل ۵-۷ پذیرفتاری مغناطیسی نمونه ها با زمان های مختلف آسیاب کاری. ۶۱
- شکل ۵-۸ پذیرفتاری نمونه های ۱۵ و ۲۰ ساعت آسیاب شده. ۶۲
- شکل ۵-۹ حلقه پسماند مغناطیسی نمونه ی ۲۰ ساعت آسیاب شده. ۶۲
- شکل ۵-۱۰ دیاگرام فاز ترکیب ۳ تایی Ni-Mn-Sn: الف) برش عرضی ب) دیاگرام فازی در دمای اتاق. ۶۴
- شکل ۵-۱۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه: الف) قبل از بازپخت ب) بعد از بازپخت در دمای ۵۵۰ درجه. ۶۵
- شکل ۵-۱۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ی بازپخت شده در دمای ۵۵۰ درجه ی سانتیگراد به همراه فازیابی. ۶۵
- شکل ۵-۱۳ تحلیل ریتولد نمونه ی بازپخت شده در دمای ۵۵۰ درجه. ۶۶
- شکل ۵-۱۴ پذیرفتاری مغناطیسی نمونه ی بازپخت شده در دمای ۵۵۰ درجه. ۶۷
- شکل ۵-۱۵ آنالیز گرماسنجی پویشی تفاضلی. ۶۸
- شکل ۵-۱۶ مقاومت الکتریکی نمونه ی بازپخت شده در دمای ۵۵۰ درجه. ۶۸
- شکل ۵-۱۷ مقاومت الکتریکی آلیاژ $Ni_{50}Mn_{25}In_{25}$ ساخته شده به روش ذوب قوسی. ۶۹
- شکل ۵-۱۸ الگوی پراش ایکس نمونه ی بازپخت شده در دمای ۷۵۰ درجه. ۶۹
- شکل ۵-۱۹ تحلیل ریتولد نمونه ی بازپخت شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد. ۷۰
- شکل ۵-۲۰ الف) پذیرفتاری مغناطیسی نمونه بازپخت شده در دمای ۷۵۰ ب) نمودار عکس پذیرفتاری. ۷۱
- شکل ۵-۲۱ ساختار آلیاژ هویسلر Ni_2MnSn ۷۲
- شکل ۵-۲۲ تغییر انرژی تبدیلی نسبت به فاصله ی اتمها برواحد پارامتر شبکه. ۷۲
- شکل ۵-۲۳ مقاومت الکتریکی نمونه ی بازپخت شده در الف) ۷۵۰ درجه ب) ۵۵۰ درجه. ۷۳
- شکل ۵-۲۴ مقاومت الکتریکی آلیاژ $Ni_{44.1}Mn_{44.2}Sn_{11.7}$ ۷۴
- شکل ۵-۲۵ الگوی پراش ایکس نمونه های بازپخت شده در دمای ۹۵۰ درجه ی سانتیگراد به همراه فازیابی آن. ۷۵
- شکل ۵-۲۶ تحلیل ریتولد نمونه ی بازپخت شده در ۹۵۰ درجه. ۷۵
- شکل ۵-۲۷ الف) تغییر پارامتر شبکه با دمای بازپخت ب) تغییرات کرنش و اندازه ی بلور کها طی بازپخت. ۷۶
- شکل ۵-۲۸ پذیرفتاری نمونه ی بازپخت شده در دمای ۹۵۰ درجه. ۷۷
- شکل ۵-۲۹ الف) حلقه ی پسماند نمونه بازپخت شده در دمای ۹۵۰ ب) منحنی مغناطش در فاز مارتنزیت و آستنیت ... ۷۷
- شکل ۵-۳۰ مقاومت الکتریکی نمونه ی بازپخت شده در دمای ۹۵۰ درجه. ۷۸

- شکل ۵-۳۱ آنالیز گرماسنجی نمونه ی بازپخت شده در ۹۵۰ درجهی سانتیگراد با آهننگ ۱۰ کلوین بر دقیقه ۷۹
- شکل ۵-۳۲ آنالیز گرماسنجی نمونه ی بازپخت شده در ۹۵۰ درجه با آهننگ های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه بر دقیقه ۸۰
- شکل ۵-۳۳ نمودار محاسبه انرژی فعال سازی با استفاده از رابطه ی کیسینجر ۸۰
- شکل ۵-۳۴ الگوی پراش ایکس نمونه های بازپخت شده در مدت زمان های ۲، ۱۶ و ۴۰ ساعت ۸۱
- شکل ۵-۳۵ تحلیل ریتولد نمونه های بازپخت شده در مدت زمان های ۲، ۱۶ و ۴۰ ساعت بازپخت شده ۸۲
- شکل ۵-۳۶ پذیرفتاری مغناطیسی نمونه های بازپخت شده در مدت زمان های ۲، ۱۶ و ۴۰ ساعت بازپخت ۸۳
- شکل ۵-۳۷ نمودار عکس پذیرفتاری: محاسبه دمای کوری نمونه های بازپخت شده در مدت زمانهای ۲، ۱۶ و ۴۰ ساعت ۸۴
- شکل ۵-۳۸ نمودار حلقه پسماند نمونه های بازپخت شده در مدت زمان های ۲، ۱۶ و ۴۰ ساعت ۸۴
- شکل ۵-۳۹ نمودار مقاومت الکتریکی نمونه های بازپخت شده در مدت زمان های ۲، ۱۶ و ۴۰ ساعت ۸۵
- شکل ۵-۴۰ نمودار مغناطش بر حسب میدان در دماهای نزدیک گذار مغناطیسی ۸۶
- شکل ۵-۴۱ منحنی های اروت در محدوده ی گذار مغناطیسی ۸۶
- شکل ۵-۴۲ تغییر آنتروپی هم دما در بازه های میدان متفاوت ۸۸
- شکل ۵-۴۳ منحنی تغییر آنتروپی نسبت به میدان مغناطیسی ۸۹
- شکل ۵-۴۴ نمودار ظرفیت سردسازی نسبت به دما ۹۰
- شکل ۵-۴۵ نمودار مغناطش بر حسب میدان در محدوده ی گذار مارتنزیتی ۹۱
- شکل ۵-۴۶ نمودار مغناطش بر حسب میدان در دمای گذار ۹۲
- شکل ۵-۴۷ منحنیهای اروت در محدوده ی گذار مارتنزیتی ۹۲
- شکل ۵-۴۸ تغییرات آنتروپی مغناطیسی در محدوده ی گذار مارتنزیتی ۹۳
- شکل ۵-۴۹ منحنی اتلاف ناشی از پسماند در محدوده ی گذار مارتنزیتی ۹۵

فصل اول

مقدمه

آلیاژهای هویسلر دسته‌ای از مواد هستند که در دهه‌ی اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. هنوز هم با وجود گذشت بیش از یک قرن از کشف این ترکیبات، تحقیقات گسترده‌ای بر روی آنها در حال انجام است. این حجم مطالعات به ویژگی‌های متنوعی که این مواد از خود نشان می‌دهند ارتباط دارد. در مطالعات انجام شده بر روی این آلیاژها تاکنون ویژگی‌های ابررسانایی، نیمه‌رسانایی، ترموالکتریک، حافظه‌پذیری مغناطیسی، مغناطوگرمایی، مغناطومقاومت و ... مورد بررسی قرار گرفته است [۱، ۲]. در این بین برخی از این ویژگی‌ها، همچون حافظه‌پذیری مغناطیسی، مغناطوگرمایی و مغناطومقاومت متاثر از اعمال میدان مغناطیسی بر نمونه است.

این آلیاژها به دو دسته‌ی نیم‌هویسلر و تمام‌هویسلر طبقه‌بندی می‌شوند. تمام‌هویسلرها دارای فرمول عمومی X_2YZ هستند که در آن‌ها X، Y از عناصر فلزهای واسطه و Z از گروه‌های ۳، ۴ و ۵ جدول تناوبی هستند. تقارن بلوری این نوع آلیاژها در حالت کاملاً منظم، $L2_1$ است. این تقارن از شبکه fcc که در راستای قطر مکعب به میزان $1/4$ طول قطر جابجا شده‌اند تشکیل شده است. نیم‌هویسلرها دارای فرمول عمومی XYZ و دارای تقارن بلوری $C4v$ هستند. این تقارن از سه شبکه fcc تشکیل شده است که هر یک نسبت به دیگری در راستای قطر مکعب به اندازه‌ی $1/4$ طول قطر جابجا شده‌اند [۳]

به منظور درک بهتر ویژگی‌های فیزیکی این آلیاژها، مطالعاتی بر روی ساختار الکترونی آنها انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که ویژگی‌های این آلیاژها تحت تاثیر تعداد الکترون‌های ظرفیت آنها است به صورتی که برخی ویژگی‌های این آلیاژها با توجه به تعداد الکترون‌های ظرفیت قابل پیش بینی است [۱]. برای مثال آلیاژهای هویسلر غیر مغناطیسی با ۲۷ الکترون ظرفیت ابررسانا هستند. همچنین ترکیبات تمام هویسلر با ۲۴ الکترون ظرفیت و نیم هویسلر با ۱۸ الکترون ظرفیت ویژگی‌های نیمه‌رسانا گونه از خود نشان می‌دهند. گاف نواری این ترکیبات با تغییر نسبت ترکیبات شیمیایی می‌تواند از ۰ تا ۴ eV تغییر کنند. بنابراین دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در سلول‌های خورشیدی و کاربردهای ترموالکتریکی هستند و تغییر در تعداد الکترون‌های ظرفیت منجر به تغییر ویژگی‌های مغناطیسی و ساختار بلوری این ترکیبات می‌شود.

از جمله ویژگی‌های آلیاژهای هویسلر که با اعمال میدان مغناطیسی صورت می‌گیرد اثر مغناطوگرمایی است. این اثر در هر ماده‌ی مغناطیسی رخ می‌دهد و ناشی از وابستگی گرما و ویژگی‌های مغناطیسی است. در اثر اعمال میدان، گشتاورهای مغناطیسی هم راستا می‌شوند و با توجه به وابستگی ویژگی‌های گرمایی و مغناطیسی، منجر به تغییر دمای ماده می‌شوند. از این ویژگی در یخچال‌های مغناطیسی استفاده می‌شود. این یخچال‌ها نسبت به یخچال‌های معمولی دارای بازدهی بیشتری هستند و مشکلات تولید گازهای گلخانه‌ای را نداشته و همچنین از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر هستند [۴].

موادی که برای کاربردهای عملی اثر مغناطوگرمایی به کار می‌روند باید مقرون به صرفه باشد و در میدان‌های مغناطیسی پایین نیز (کمتر از 2 تسلا) بتواند این خاصیت را از خود نشان دهد. از این رو تحقیقات به منظور یافتن موادی که اثر مغناطوگرمایی مناسبی را در دماها و میدان‌های در دسترس، از خود نشان دهند ادامه دارد [۵]. یکی دیگر از ویژگی‌هایی که آلیاژهای هویسلر از خود نشان می‌دهند اثر حافظه پذیری مغناطیسی است. مواد حافظه‌پذیر موادی هستند که قادرند بعد از یک تغییر شکل بزرگ، شکل خود را بازیابی کنند. این مواد به دو دسته حافظه‌پذیر گرمایی و مغناطیسی طبقه بندی می‌شوند. یکی از مشکلات مواد حافظه‌پذیر گرمایی پاسخ کند آنها به اثرات گرمایی است. در اثر حافظه‌پذیری مغناطیسی علاوه بر دما و فشار، میدان مغناطیسی نیز وجود دارد که می‌تواند موجب بروز اثرات مورد نظر شود. امکان کنترل حافظه-پذیری با میدان، با فرکانس بالاتری امکان پذیر است و این باب جدیدی در تولید حسگرها و محرک‌های مکانیکی فراهم کرده است. مشخصه اساسی آلیاژهای حافظه‌پذیر گذار فاز ساختاری است. با سرد کردن این نوع مواد گذار از فاز با تقارن بالا (آستنیت) به فاز با تقارن کمتر (مارتنزیت) رخ می‌دهد. این گذار در یک بازه دمایی معین رخ می‌دهد و ساختار اتم‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کند که انرژی ترموالاستیک کمینه شود [۶]. در این آلیاژها دمای گذار ساختاری از نقطه نظر کاربردی

دارای اهمیت بالایی است زیرا اثرات حافظه پذیری و همچنین مغناطوگرمایی حوالی دمای گذار ساختاری (مارتنزیتی) رخ می‌دهد. آلیاژهای هویسلر بر پایه Ni-Mn به عنوان طبقه‌ای از این آلیاژها به دلیل جفت شدگی قوی بین مغناطیس و ساختار رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند و دمای گذار ساختاری و مغناطیسی این آلیاژها به شدت به میزان ترکیبات آن‌ها، روش ساخت، عملیات حرارتی و ... حساس است [۷]. از این رو مطالعه و بررسی دمای گذار نقش به‌سزایی در بحث پدیده شناختی و کاربردی این آلیاژها دارند.

برای ساخت آلیاژهای هویسلر روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها روش ذوب قوسی می‌باشد که در آن مواد اولیه به صورت عناصر فلزی کوچک به نسبت وزنی مشخصی مخلوط شده و در معرض دو الکترودی که اختلاف پتانسیل بالایی دارند در اتمسفر آرگون قرار می‌گیرند. به واسطه القای الکتریکی ایجاد شده بین الکترودها مولکول‌های آرگون یونیزه شده و جریان بالایی را از نمونه عبور می‌دهند، این جریان منجر به افزایش دما و ذوب نمونه می‌شود. همان‌طور که اشاره شد روش مرسوم برای تولید آلیاژهای هویسلر روش ذوب قوسی است. اخیراً گزارش‌هایی مبنی بر ساخت آلیاژهای هویسلر به روش آلیاژسازی مکانیکی ارائه شده است [۸، ۹]. در این روش پودرهای فلزی اولیه به نسبت مشخصی مخلوط می‌شوند و تحت عملیات آسیاب کاری قرار می‌گیرند. ذرات درون محفظه آسیاب تحت تاثیر برخوردی پراثری قرار می‌گیرند و فرایند رشد دانه‌ها تا زمانی که نرخ جوش خوردن و شکست به تعادل برسند ادامه می‌یابد [۱۰]. در فرایند آسیاب کاری عواملی از قبیل نوع آسیاب، اتمسفر آسیاب کاری، نسبت وزنی گلوله به پودر، سرعت و مدت زمان آسیاب کاری نتایج فرایند را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به فرایند آسیاب کاری به مدت چندین ساعت مشکلات مربوط به ناهمگنی در این روش نسبت به روش ذوب قوسی کمتر است. این روش به صورت محدود برای ساخت آلیاژهای هویسلر استفاده شده است، از این رو به نظر می‌رسد پتانسیل بالایی جهت کار در این زمینه وجود داشته‌باشد.

در این پروژه به ساخت آلیاژ هویسلر $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$ به روش آلیاژسازی مکانیکی و بررسی ویژگی ساختاری و مغناطیسی آن پرداخته شده است. در فصل دوم مواد مغناطیسی و ویژگی‌های آن‌ها به اختصار توضیح داده شده است. سپس در فصل سوم آلیاژهای هویسلر معرفی شده و اثر حافظه پذیری مغناطیسی و مغناطوگرمایی در آن توضیح داده شده است و در انتهای آن مروری بر مطالعات انجام شده بر روی این آلیاژها آورده شده است. در فصل چهارم روش‌های ساخت آلیاژ و نیز تکنیک‌های اندازه‌گیری ویژگی ساختاری، مغناطیسی و الکتریکی مواد آورده شده است. در فصل پنجم ابتدا تاثیر پارامترهای مختلف از جمله مدت زمان آسیاب کاری، دما و مدت زمان بازپخت نمونه با استفاده از آنالیزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته تا شرایط و پارامترهای بهینه برای تولید این آلیاژ حاصل شود. سپس اثر مغناطوگرمایی به عنوان یکی از

ویژگی‌های مورد توجه این آلیاژ با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی مغناطش ماده در دماهای مختلف و در بازه‌ی میدان مغناطیسی ۲ تسلا مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل دوم

مروری بر مفاهیم مغناطیس

با توجه به اهمیت بحث مغناطیس در مطالعه‌ی ویژگی آلیاژهای هویسلر، در این بخش مروری بر مفاهیم مغناطیس داشته و آن‌ها را به طور اجمالی بررسی می‌کنیم. منشا مغناطیس در برهمکنش میان الکترون‌ها و حرکت اسپینی و مداری آنها نهفته است. بهترین راه برای متمایز کردن انواع مواد مغناطیسی، بررسی نحوه‌ی پاسخ آن‌ها به میدان مغناطیسی خارجی است. در برخی مواد برهمکنش میان ممان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف است در حالی که در برخی مواد مغناطیسی، ممان‌ها به شدت با هم برهمکنش دارند، در ادامه به بررسی انواع این مواد پرداخته و رفتار آن‌ها با اعمال میدان مغناطیسی توضیح داده می‌شود.

۱-۲ پذیرفتاری مغناطیسی

پذیرفتاری مغناطیسی یکی از خصوصیات مهم مواد مغناطیسی و ابزاری قدرتمند برای تعیین نوع فاز مغناطیسی مواد است. وقتی که ماده‌ای در یک میدان مغناطیسی خارجی H قرار می‌گیرد، مغناطش M (ممان مغناطیسی بر واحد حجم) در ماده القا می‌شود که با میدان به صورت زیر ارتباط دارد:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (1-2)$$

در این رابطه χ پذیرفتاری حجمی است. چون M و H هر دو واحد فیزیکی یکسانی دارند، χ بدون یکا می باشد. در بعضی موارد پذیرفتاری مولی گزارش می شود که با χ_m نشان داده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\chi_m = \chi V_m \quad (۲-۲)$$

که در آن V_m حجم مولی ماده است. واحد χ_m در سیستم SI به صورت $\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$ تعریف می شود. پذیرفتاری بر حسب جرم نیز کاربرد زیادی دارد که می توان آن را با χ_g بیان کرد و به صورت زیر تعریف می شود [۶]:

$$\chi_g = \frac{\chi}{\rho} \quad (۳-۲)$$

ρ چگالی بر حسب kg/m^3 است. بنابراین واحد پذیرفتاری جرمی χ_g ، m^3/kg می باشد. بسته به اینکه مغناطش توسط میدان ثابت یا متناوب صورت گیرد، دو نوع پذیرفتاری خواهیم داشت، پذیرفتاری در میدان ثابت، χ_{dc} و پذیرفتاری در میدان متناوب، χ_{ac} . پذیرفتاری مغناطیسی که با اعمال میدان مغناطیسی ثابت به دست می آید پذیرفتاری dc نامیده می شود و رابطه ی آن به صورت زیر است:

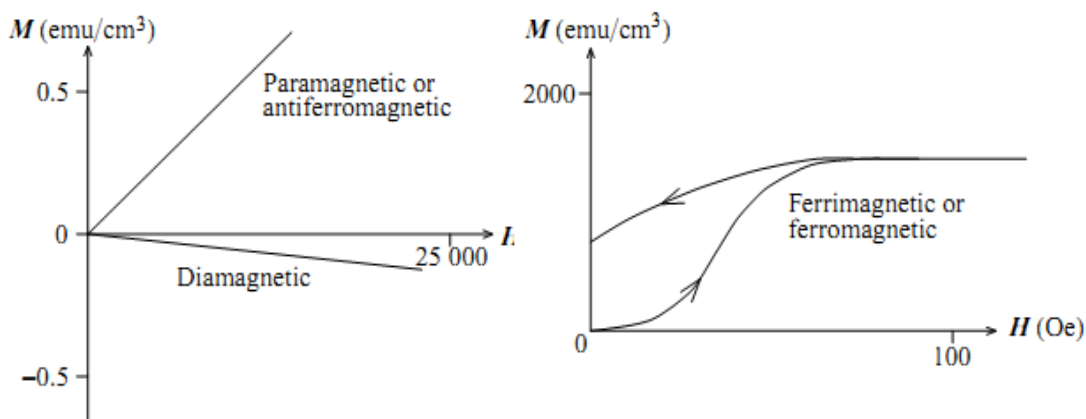
$$\chi_{dc} = \frac{M}{H_{dc}} \quad (۴-۲)$$

و پذیرفتاری مغناطیسی که با اعمال میدان مغناطیسی متناوب به دست می آید پذیرفتاری ac نامیده می شود و رابطه ی آن به صورت زیر است:

$$\chi_{ac} = \frac{dM}{dH_{ac}} \quad (۵-۲)$$

زمانی که ما از پذیرفتاری مغناطیسی صحبت می کنیم، منظور پاسخی است که ماده نسبت به میدان خارجی اعمال شده می دهد. مواد بر اساس چگونگی پاسخگویی آن ها به میدان مغناطیسی خارجی و نظم مغناطیسی آن ها به گروه های مختلف تقسیم بندی می شوند و با کمک پذیرفتاری مغناطیسی می توان این مواد را متمایز کرد [۱۱].

روش دیگر تشخیص نوع ماده مغناطیسی استفاده از منحنی های مغناطش بر حسب میدان است. وقتی که میدان خارجی H به یک نمونه مغناطیسی اعمال می شود بسته به نوع ماده رفتار متفاوتی مشاهده می شود. در فرومغناطیس ها افزایش میدان باعث حرکت حوزه های آن می شود و در نتیجه با زیاد شدن میدان اعمالی مغناطش نمونه زیاد می شود و در میدانی خاص مغناطش نمونه تغییری نمی کند، این مقدار ثابت را مغناطش اشباع می گویند. دیگر مواد مغناطیسی نیز می توانند به کمک داده های مغناطش بر حسب میدان مشخص شوند. شکل ۱-۲ رفتار چندین ماده مغناطیسی را در اثر میدان اعمالی نشان می دهد.



شکل ۱-۲ منحنی مغناطش برای مواد دیا مغناطیس، پارامغناطیس، پاد فرومغناطیس و فرومغناطیس [۱۲].

۲-۲ حالت های مغناطیسی مواد و ویژگی آن ها

۱-۲-۲ دیا مغناطیس

در واقع دیامغناطیس یک پدیده کلی است که منشا آن حرکت مداری الکترون ها است. پذیرفتاری مواد دیامغناطیس منفی و با تغییرات دمایی به طور جزئی تغییر می کند. این مواد وقتی که در میدان مغناطیسی خارجی قرار می گیرند، مغناطش ضعیفی در آنها القا می شود که در خلاف جهت میدان اعمالی می باشد. در این مواد، الکترون های لایه ظرفیت به گونه ای در اوربیتال ها قرار می گیرند که همگی جفت شوند. به همین دلیل ممان مغناطیسی خالص آنها در غیاب میدان صفر است. عناصری نظیر بیسموت، جیوه و بیشتر مولکول های دو اتمی مانند N_2 و H_2 جزء دیا مغناطیس ها هستند.

۲-۲-۲ پارامغناطیس

پارامغناطیس ها در غیاب میدان خارجی مغناطش خود به خودی ندارند. این مواد حتی در حضور میدان مغناطیسی هم مقدار مغناطش شان کوچک است زیرا کسر کوچکی از ممان ها در جهت میدان جهت گیری می کنند. این کسر تابعی از قدرت میدان است و با آن رابطه ی خطی دارد. این مواد در لایه ظرفیتشان الکترون های جفت نشده دارند در نتیجه ممان مغناطیسی خالص آنها غیر صفر است. در غیاب میدان مغناطیسی، ممان ها جهت گیری کاتوره ای دارند. زیرا ممان های اتم های همسایه، برهم کنش بسیار ضعیفی با یکدیگر دارند و می توان آنها را مستقل از هم دانست. اعمال میدان مغناطیسی گشتاورهای دو قطبی را هم خط کرده و مغناطشی در ماده حاصل می شود که مقدار آن به شدت میدان خارجی وابسته است. افزایش دما موجب افزایش ارتعاشات گرمایی اتم ها می شود که بر جهت گیری ممان ها تأثیر منفی دارد به این دلیل که در این سیستم ها هیچ برهمکنشی بین ممان ها وجود ندارد و ارتعاشات گرمایی باعث می شوند که آن ها به صورت کاتوره ای جهت گیری