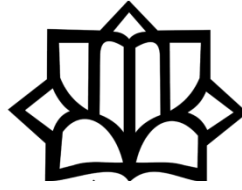


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

پژوهشکده علوم و فناوری نانو

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته علوم و فناوری نانو

گرایش نانوفیزیک

عنوان:

بررسی اثر تغییر اندازه دانه بر خواص ساختاری و مغناطیسی

نانوذرات آلیاژی هویسلر  $\text{Co}_2\text{FeAl}$

استاد راهنما:

دکتر محمد الماسی کاشی

استاد مشاور:

دکتر سیما علیخانزاده آرانی

توسط:

زهرا پزشکی نژاد

شهریور ۱۳۹۳

## تقدیم به:

درگاه یگانه معبودی که توانم داد تا بتوانم، فکرم داد تا بیاموزم و قلمم داد تا بنگارم.

**مادرم**، این دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم سراسر مهر و محبت

**برادران و خواهرانم**، این همراهان همیشگی و پشتوانه های زندگیم و همچنین تمام کسانی که دوستشان دارم و دوستم دارند. \*

و

همه سبزانمایشانی که شور دانستن، طعم حیاتشان است.

## تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده اند، تشکر و قدردانی کنم.

از اساتید فرهیخته و بزرگوار؛ جناب آقای **دکتر محمد الماسی و دکتر سیما علیخانزاده** که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نفرموده و زحمت راهنمایی و مشاوره این رساله را بر عهده گرفتند و با راهنمایی های ارزنده و مشاوره های دلسوزانه و نظارت همه جانبه خود، نگارنده را در تالیف این پژوهش یاری رساندند نهایت تشکر و قدر دانی را دارم.

و از استاد فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای **دکتر عبدالعلی رضانی** که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند قدر دانی می‌کنم.

در پایان از جناب آقای **دکتر مسعود صلواتی** به خاطر راهنمایی های بی دریغ و حمایت های همه جانبه، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

## چکیده:

در این پروژه، نانوذرات آلیاژی هویسلر  $\text{Co}_2\text{FeAl}$  تهیه و به طور کامل شناسایی و مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به اینکه بیشترین روشی که در تهیه آلیاژهای هویسلر بکار می‌رود، روش‌های فیزیکی از جمله آلیاژسازی مکانیکی و ذوب قوسی می‌باشد، روش ساده، قابل دسترس، ارزان قیمت و قابل صنعتی شدن به جای استفاده از روش‌های پیچیده و پرهزینه مورد استفاده قرار گرفت. برای اولین بار، روش هم‌رسوبی با افزودن سورفکتانت، جهت سنتز آلیاژهای هویسلر اصلاح شد و نانوذرات  $\text{Co}_2\text{FeAl}$  در حضور چند سورفکتانت معروف اعم از سورفکتانت‌های کاتیونی و پلیمرهای صنعتی و طبیعی سنتز شد و اثر سورفکتانت‌های مختلف بر اندازه ذرات، مورفولوژی و خواص مغناطیسی ذرات مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین برای بررسی اثر تغییر آهنگ افزایش دما، نمونه‌ها با سه نرخ افزایش دمای مختلف تحت فرآیند تابکاری قرار گرفتند. در این پروژه خواص ساختاری نانوذرات توسط الگوی پراش X و آنالیز ریتولد، خلوص و استوکیومتری توسط FT-IR و EDS، مورفولوژی توسط SEM و خواص مغناطیسی توسط VSM بررسی گردید. همچنین برای اولین بار آنالیز FORC برای مطالعه دقیق و جزئی برهم‌کنش‌های مغناطیسی بین نانوذرات مغناطیسی  $\text{Co}_2\text{FeAl}$  بکار گرفته شد.

## کلمات کلیدی:

نانوذرات آلیاژی هویسلر  $\text{Co}_2\text{FeAl}$ ، روش هم‌رسوبی، سورفکتانت، تابکاری، آنالیز FORC

## فهرست مطالب

فصل اول: مبانی نظری .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۲-۱- نام‌گذاری ترکیبات هویسلر .....	۵
۱-۲-۱- ترکیبات نیم هویسلر .....	۵
۲-۲-۱- ترکیبات تمام هویسلر .....	۵
۳-۱- ویژگی‌های آلیاژهای هویسلر .....	۶
۱-۳-۱- ساختار بلوری .....	۶
۲-۳-۱- خواص مغناطیسی آلیاژهای هویسلر .....	۱۰
۱-۲-۳-۱- فرومغناطیس‌های نیم‌فلز .....	۱۱
۳-۲-۳-۱- منحنی اسلیتر-پائولینگ .....	۱۲
۳-۲-۳-۱- فری‌مغناطیس‌های خنثی شده .....	۱۴
۳-۳-۱- خواص مغناطو اپتیکی آلیاژهای هویسلر .....	۱۶
۴-۳-۱- آلیاژهای هویسلر با خاصیت حافظه شکلی .....	۱۶
۵-۳-۱- خواص ابررسانایی در آلیاژهای هویسلر .....	۱۷
۴-۱- کاربردهای آلیاژهای هویسلر .....	۱۷
۱-۴-۱- ترکیبات هویسلر در ابزارهای اسپینترونیک .....	۱۷
۲-۴-۱- مغناطومقاومت .....	۱۸
۱-۲-۴-۱- مغناطومقاومت بزرگ .....	۱۹
۲-۲-۴-۱- مغناطومقاومت تونلی .....	۲۰
۵-۱- آلیاژهای هویسلر و نانو تکنولوژی .....	۲۱
۶-۱- آلیاژ هویسلر بر پایه کبالت: $Co_2FeAl$ .....	۲۲
۷-۱- مروری بر کارهای اخیر با تاکید بر آلیاژ مورد بررسی در این پروژه .....	۲۴
۸-۱- روش‌های مرسوم ساخت آلیاژهای هویسلر .....	۲۵

۲۵	۱-۸-۱- روش آلیاژسازی مکانیکی
۲۶	۲-۸-۱- روش ذوب قوسی
۲۸	<b>فصل دوم: بخش تجربی</b>
۲۹	۱-۲- روش ساخت
۲۹	۱-۱-۲- مقدمه
۳۰	۲-۱-۲- تئوری و ترمودینامیک روش هم‌رسوبی
۳۱	۳-۱-۲- مراحل واکنش هم‌رسوبی:
۳۳	۲-۲- وسایل و مواد شیمیایی مورد استفاده
۳۳	۱-۲-۲- وسایل آزمایشگاهی
۳۴	۲-۲-۲- مواد شیمیایی
۳۵	۳-۲- تهیه نانو ذرات $Co_2FeAl$
۳۵	۱-۳-۲- تهیه نانو ذرات $Co_2FeAl$ به روش هم‌رسوبی
۳۶	۲-۳-۲- تهیه نانو ذرات $Co_2FeAl$ به روش هم‌رسوبی اصلاح شده
۳۹	۴-۲- روش‌های آنالیز
۳۹	۱-۴-۲- بررسی ساختار بلوری با پراش پرتو ایکس (XRD)
۴۱	۲-۴-۲- ریخت شناسی توسط SEM
۴۲	۳-۴-۲- آنالیز تفکیک انرژی EDS
۴۲	۴-۴-۲- بررسی خواص مغناطیسی با VSM
۴۳	۱-۴-۴-۲- حلقه پسماند
۴۴	۲-۴-۴-۲- آنالیز FORC
۴۷	۵-۴-۲- طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR)
۴۸	<b>فصل سوم: بحث و نتیجه‌گیری</b>
۴۹	۱-۳- مطالعه و شناسایی خواص نانو ذرات $Co_2FeAl$ تهیه شده در غیاب سورفکتانت
۴۹	۱-۱-۳- تاثیر بازپخت
۵۰	۲-۱-۳- نتایج آنالیز XRD
۵۲	۳-۱-۳- آنالیز FT-IR
۵۳	۴-۱-۳- نتایج آنالیز EDS
۵۴	۵-۱-۳- نتایج آنالیز SEM

۵۶	.....	نتایج آنالیز VSM	۳-۱-۶
۵۶	.....	بررسی منحنی پسماند	۳-۱-۶-۱
۵۸	.....	بررسی دیاگرام FORC	۳-۱-۶-۲
۶۲	.....	مطالعه و شناسایی خواص نانو ذرات $\text{Co}_2\text{FeAl}$ در حضور سورفکتانت CTAB	۳-۲
۶۲	.....	نتایج آنالیز XRD	۳-۲-۱
۶۴	.....	نتایج آنالیز EDS	۳-۲-۲
۶۵	.....	نتایج آنالیز FT-IR	۳-۲-۳
۶۶	.....	نتایج آنالیز SEM	۳-۲-۴
۶۹	.....	نتایج آنالیز VSM	۳-۲-۵
۷۳	.....	مطالعه و شناسایی خواص نانو ذرات $\text{Co}_2\text{FeAl}$ در حضور سورفکتانت کیتوسان	۳-۳
۷۳	.....	نتایج آنالیز XRD	۳-۳-۱
۷۴	.....	نتایج آنالیز EDS	۳-۳-۲
۷۵	.....	نتایج آنالیز FT-IR	۳-۳-۳
۷۶	.....	نتایج آنالیز SEM	۳-۳-۴
۷۷	.....	نتایج آنالیز VSM	۳-۳-۵
۸۱	.....	مطالعه و شناسایی خواص نانو ذرات $\text{Co}_2\text{FeAl}$ در حضور سورفکتانت PEG	۳-۴
۸۱	.....	نتایج آنالیز XRD	۳-۴-۱
۸۲	.....	نتایج آنالیز EDS	۳-۴-۲
۸۳	.....	نتایج آنالیز FT-IR	۳-۴-۳
۸۴	.....	نتایج آنالیز SEM	۳-۴-۴
۸۶	.....	نتایج آنالیز VSM	۳-۴-۵
۹۰	.....	مطالعه و شناسایی خواص نانو ذرات $\text{Co}_2\text{FeAl}$ در حضور سورفکتانت PVP	۳-۵
۹۰	.....	نتایج آنالیز XRD	۳-۵-۱
۹۱	.....	نتایج آنالیز EDS	۳-۵-۲
۹۲	.....	نتایج آنالیز FT-IR	۳-۵-۳
۹۳	.....	نتایج آنالیز SEM	۳-۵-۴
۹۶	.....	نتایج آنالیز VSM	۳-۵-۵
۱۰۰	.....	مطالعه و شناسایی خواص نانو ذرات $\text{Co}_2\text{FeAl}$ در حضور سورفکتانت PVA	۳-۶
۱۰۰	.....	نتایج آنالیز XRD	۳-۶-۱



۱۰۱	.....	۲-۶-۳ نتایج آنالیز EDS
۱۰۲	.....	۳-۶-۳ نتایج آنالیز FT-IR
۱۰۳	.....	۴-۶-۳ نتایج آنالیز SEM
۱۰۴	.....	۵-۶-۳ نتایج آنالیز VSM
۱۰۸	.....	۷-۳ نتیجه گیری
۱۱۲	.....	۸-۳ پیشنهادات
۱۱۳	.....	مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: جدول تناسبی عناصر..... ۴
- شکل ۱-۲: (a) ساختار بلوری (a) نیم‌هویسلر و (b) تمام هویسلر ..... ۷
- شکل ۱-۳: ساختار هویسلر (a) معکوس و (b) ۴ تایی ..... ۷
- شکل ۱-۴: انواع ساختار بلوری بینظم ..... ۸
- شکل ۱-۵: وضعیت گشتاورهای مغناطیسی در دو ساختار تمام هویسلر و نیم‌هویسلر ..... ۱۰
- شکل ۱-۶: تصاویر چگالی حالات الکترونی ..... ۱۲
- شکل ۱-۷: ارتباط مغناطش با تعداد الکترون ظرفیت در مواد مختلف ..... ۱۲
- شکل ۱-۸: سیستم چند لایه‌ای Fe-Cr-Fe ..... ۲۰
- شکل ۱-۹: شماتیکی از اثر مغناطومقامت تونلی ..... ۲۰
- شکل ۱-۱۰: ساختار بلوری  $Co_2FeAl$  ..... ۲۱
- شکل ۱-۱۱: نمونه‌ای از دستگاه ذوب قوسی مجهز به سیستم خنک کننده با آب ..... ۲۷
- شکل ۱-۲: فرآیند عمل‌آوری استوالد. مصرف ذرات ریز در محصول به تولید ذرات درشت ترمی انجامد. ..... ۳۲
- شکل ۲-۲: طرح شماتیکی از هسته‌زایی و رشد ذرات به روش رسوبگذاری ..... ۳۳
- شکل ۲-۳: ثبات نانو ذرات مغناطیسی با استفاده از (A) دافعه الکترواستاتیک و (B) مانع پوششی ..... ۳۶
- شکل ۲-۴: نمایی از یک حلقه پسماند ..... ۴۴
- شکل ۲-۵: منحنی‌های بازگشتی مرتبه اول برای یک ماده فرومغناطیس ..... ۴۶
- شکل ۳-۱: رفتار مغناطیسی نمونه قبل از تابکاری ..... ۴۹
- شکل ۳-۲: حلقه پسماند نمونه‌های هویسلر بعد از تابکاری ..... ۵۰
- شکل ۳-۳: الگوی پراش پرتو X نمونه یک ..... ۵۱
- شکل ۳-۴: آنالیز ریتولد مربوط به نمونه یک ..... ۵۲
- شکل ۳-۵: آنالیز EDS مربوط به نمونه یک ..... ۵۳
- شکل ۳-۶: طیف مادون قرمز نمونه یک (a) قبل (b) بعد از تابکاری ..... ۵۴

- شکل ۳-۷: تصویر SEM نمونه یک با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۵۵
- شکل ۳-۸: حلقه پسماند نمونه‌ی یک با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۵۷
- شکل ۳-۹: تغییرات  $H_c$  و  $M_s$  بر حسب آهنگ افزایش دما مربوط به نمونه یک ..... ۵۷
- شکل ۳-۱۰: دیاگرام FORC و منحنی‌های بازگشتی نمونه یک با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۱: نمودار توزیع وادارندگی نمونه ۱ با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۲: برش عرضی از دیاگرام FORC در راستای موازی محور برهمکنش در میدان  $O_e$  ۹۵۰ برای نمونه یک ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۳: (a) آنالیز ریتولد و (b) نمودار ویلیامسون-هال مربوط به نمونه دو ..... ۶۳
- شکل ۳-۱۴: آنالیز EDS مربوط به نمونه دو با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۵: طیف FT-IR مربوط به نمونه دو (a) قبل و (b) بعد از بازپخت ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۶: آنالیز SEM نمونه دو با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۷: منحنی توزیع اندازه ذرات مربوط به نمونه دو با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۸: حلقه‌های پسماند نمونه دو با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۹: دیاگرام FORC و منحنی‌های بازگشتی نمونه دو با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۰: نمودار توزیع وادارندگی نمونه دو با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۱: برش عرضی از دیاگرام FORC در راستای موازی محور برهمکنش در میدان  $O_e$  ۷۰ برای نمونه دو ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۲: آنالیز ریتولد مربوط به نمونه ..... ۷۳
- شکل ۳-۲۳: آنالیز EDS مربوط به نمونه ..... ۷۳
- شکل ۳-۲۴: طیف FT-IR مربوط به نمونه سه، (a) قبل و (b) بعد از بازپخت ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۵: آنالیز SEM نمونه سه با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۷۶
- شکل ۳-۲۶: منحنی پسماند نمونه سه با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۷: دیاگرام FORC و منحنی‌های بازگشتی نمونه سه با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۷۹
- شکل ۳-۲۸: نمودار توزیع وادارندگی نمونه سه با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۸۰

- شکل ۳-۲۹: برش عرضی از دیاگرام FORC در راستای موازی محور برهمکنش در میدان Oe ۱۰۰۰ برای نمونه سه ..... ۸۰
- شکل ۳-۳۰: آنالیز ریتولد نمونه چهار ..... ۸۱
- شکل ۳-۳۱: آنالیز EDS مربوط به نمونه چهار ..... ۸۲
- شکل ۳-۳۲: طیف FT-IR مربوط به نمونه چهار (a) قبل و (b) بعد از بازپخت ..... ۸۳
- شکل ۳-۳۳: منحنی توزیع ذرات مربوط به نمونه چهار با نرخ تابکاری ۱۵ ..... ۸۴
- شکل ۳-۳۴: تصاویر SEM نمونه چهار با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۸۵
- شکل ۳-۳۵: حلقه پسماند نمونه‌ی چهار با سه آهنگ افزایش مختلف ..... ۸۷
- شکل ۳-۳۶: دیاگرام FORC و منحنی‌های بازگشتی نمونه یک با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۸۸
- شکل ۳-۳۷: نمودار توزیع وادارندگی نمونه چهار با آهنگ افزایش دماهای مختلف ..... ۸۹
- شکل ۳-۳۸: برش عرضی از دیاگرام FORC در راستای موازی محور برهمکنش در میدان Oe ۷۰۰ برای نمونه چهار ..... ۸۹
- شکل ۳-۳۹: الگوی پراش پرتو X نمونه پنج ..... ۹۰
- شکل ۳-۴۰: نتایج حاصل از EDS مربوط به نمونه پنج ..... ۹۱
- شکل ۳-۴۱: طیف مادون قرمز نمونه پنج (a) قبل و (b) بعد از تابکاری ..... ۹۲
- شکل ۳-۴۲: تصاویر SEM نمونه پنج آهنگ افزایش دمای (a) ۵، (b) ۱۰ و (c) ۱۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه ..... ۹۴
- شکل ۳-۴۳: شماتیکی از نحوه زنجیره‌ای شدن ذرات در حضور PVP ..... ۹۵
- شکل ۳-۴۴: منحنی توزیع اندازه ذرات مربوط به نمونه پنج با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۹۵
- شکل ۳-۴۵: حلقه پسماند نمونه‌ی پنج با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۹۶
- شکل ۳-۴۶: دیاگرام FORC و منحنی‌های بازگشتی نمونه پنج با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۹۸
- شکل ۳-۴۷: منحنی توزیع وادارندگی در نمونه پنج برای هر سه آهنگ تابکاری ..... ۹۹
- شکل ۳-۴۸: برش عرضی از دیاگرام FORC در راستای موازی محور برهمکنش برای نمونه پنج ..... ۹۹
- شکل ۳-۴۹: طیف پراش پرتو X نمونه شش ..... ۱۰۰

- شکل ۳-۵۰: نتایج آنالیز EDS مربوط به نمونه شش ..... ۱۰۱
- شکل ۳-۵۱: طیف مادون قرمز نمونه ۱ (a) قبل از بازیخت (b) بعد از بازیخت ..... ۱۰۲
- شکل ۳-۵۲: تصاویر SEM مربوط به نمونه شش با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۱۰۳
- شکل ۳-۵۳: منحنی توزیع اندازه ذرات مربوط به نمونه شش با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۱۰۴
- شکل ۳-۵۴: حلقه پسماند نمونه‌ی شش با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۱۰۴
- شکل ۳-۵۵: دیاگرام FORC و منحنی‌های بازگشتی نمونه شش با سه آهنگ افزایش دمای مختلف ..... ۱۰۵
- شکل ۳-۵۶: منحنی توزیع وادارندگی در نمونه شش برای هر سه آهنگ تابکاری ..... ۱۰۷
- شکل ۳-۵۷: برش عرضی از دیاگرام FORC در راستای موازی محور برهمکنش برای نمونه شش ..... ۱۰۷
- شکل ۳-۵۸: مقایسه الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های یک تا شش ..... ۱۰۸
- شکل ۳-۵۹: مقایسه تصاویر SEM نمونه‌های یک تا شش ..... ۱۱۰
- شکل ۳-۶۰: مقایسه حلقه‌های پسماند نمونه‌های یک تا شش ..... ۱۱۱

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱: مقایسه انواع ساختارهای هویسلر ..... ۹
- جدول ۱-۲: انواع مواد شیمیایی مورد استفاده ..... ۳۴
- جدول ۲-۲: مشخصات انواع سورفکتانت‌های مورد استفاده در تحقیق ..... ۳۸
- جدول ۱-۳: تایج حاصل از حلقه‌های پسماند مربوط به نمونه یک ..... ۵۶
- جدول ۲-۳: تایج حاصل از حلقه‌های پسماند مربوط به نمونه دو ..... ۷۰
- جدول ۳-۳: تایج حاصل از حلقه‌های پسماند مربوط به نمونه سه ..... ۷۸
- جدول ۴-۳: تایج حاصل از حلقه‌های پسماند مربوط به نمونه چهار ..... ۸۷
- جدول ۵-۳: نتایج حاصل از طیف FT-IR مربوط به نمونه پنج ..... ۹۳
- جدول ۶-۳: تایج حاصل از حلقه‌های پسماند مربوط به نمونه پنج ..... ۹۷
- جدول ۷-۳: تایج حاصل از حلقه‌های پسماند مربوط به نمونه شش ..... ۱۰۶
- جدول ۸-۳: نتایج بدست آمده از الگوی پراش پرتو X ..... ۱۰۹

## فهرست علائم و اختصارات

<b>FORC</b>	First Order Reversal Curve
<b>VSM</b>	Vibrating Sample Magnetometr
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscope
<b>FT-IR</b>	Furier Transform Infra-Red
<b>XRD</b>	X-Ray Difraction
<b>EDS</b>	Energy Dispersive Spectroscopy
<b>CTAB</b>	Cetyltrimethyl Ammonium Bromid
<b>PEG</b>	Poly Ethylene Glycol
<b>PVP</b>	Poly Vinyl Pirrolidone
<b>PVA</b>	Polyveinyl alcohol
<b>Surfactant</b>	Surface active agents
<b>Hc</b>	Coercivity
<b>M<sub>s</sub></b>	Saturation Magnetization
<b>M<sub>r</sub></b>	Remanence Magnetization
<b>S<sub>q</sub></b>	Squireness
<b>Emu/g</b>	Electromagnetic unit/gramme
<b>Oe</b>	Orested

# مبانی نظری

فصل اول



## ۱-۱- مقدمه

در سه دهه گذشته کوچک‌سازی مدارات الکتریکی در ابزارهای الکترونیک سریعاً توسعه پیدا کرده است. هدف، تولید عناصر الکتریکی کوچکتر و با انرژی موثرتر با کارایی بیشتر نسبت به نسل سابق است. به همین دلیل فن‌آوری‌های جدید برای کوچک شدن اندازه مدارهای الکتریکی ایجاد شدند. اسپین-الکترونیک یا همان اسپینترونیک یک تکنولوژی جایگزین پیشنهاد می‌کند که در آن درجه آزادی اسپین به الکترونیک معرفی می‌شود. اطلاعات را می‌توان به صورت اسپین الکترون و همچنین بار الکترون کدگذاری کرد. رتبه بندی مواد برای استفاده در ابزارهای اسپینترونیک بر مبنای خواصی چون مغناطش بالا، دمای کوری بالا، مغناطومقاومت، نظم بلوری و به ویژه خواص نیمه فلزی صورت می‌گیرد. خاصیت نیمه فلزی خاصیتی است که در بعضی از مواد دیده می‌شود. این مواد در باند اسپینی اقلیت رفتار نیمه رسانایی و در باند اسپینی اکثریت رفتار به شدت فلزی از خود نشان می‌دهند که این باعث قطبش اسپینی کامل (۱۰۰٪) الکترون‌های رسانش در تراز فرمی می‌شود یعنی تمامی الکترون‌های سطح فرمی در یک راستا قرار دارند، به عبارت دیگر برای راستای مخالف اسپینی در سطح فرمی گاف نواری وجود دارد که دلیل آن جفت شدگی بین ممان‌های مغناطیسی اسپین الکترون سیار فلزات واسطه ۳d و اسپین الکترون‌های ۴f عناصر نادر خاکی می‌باشد که محاسبه ساختار نواری این را تایید می‌کند. از لحاظ نظری قطبش این نیمه فلزات در دمای صفر کلوین ۱۰۰٪ می‌باشد ولی به دلیل محدودیت‌های تجربی، قطبش اسپینی نمونه‌ها ۳۰ تا ۴۵ درصد است. این خاصیت نخستین بار توسط گروت و همکارانش<sup>۱</sup> به طور نظری در آلیاژهای هویسler پیش‌بینی شد [۱]. تاریخچه آلیاژهای هویسler به سال ۱۹۰۳ برمی‌گردد. در آن زمان فریتز

---

<sup>۱</sup> De Groot et al

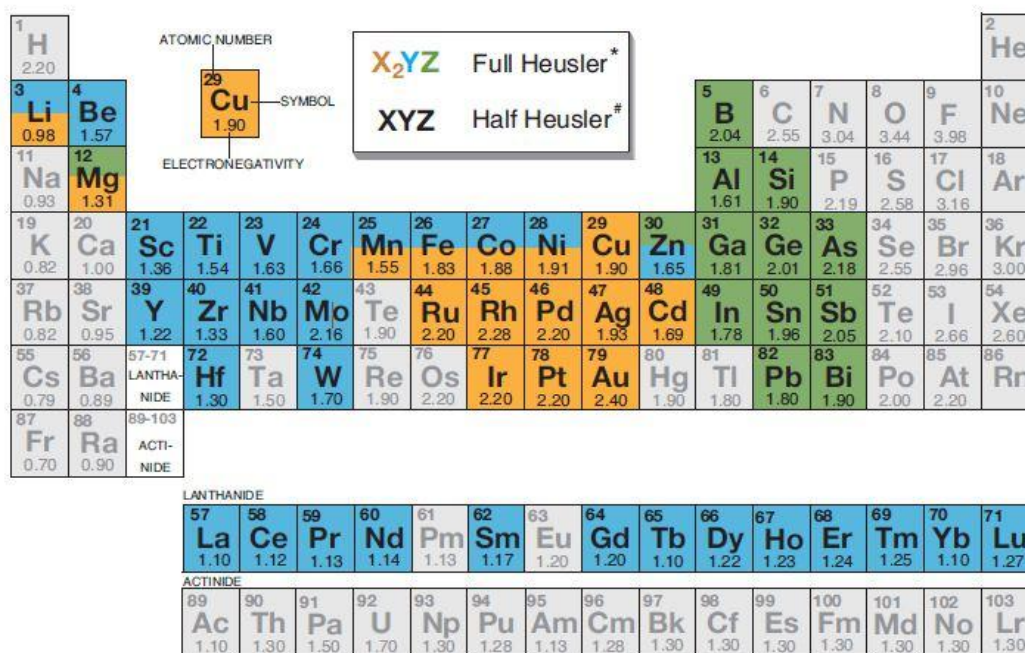
هویسلر<sup>۱</sup> ترکیب  $Cu_2MnAl$  را کشف کرد. خاصیت جالبی که این ترکیب را مورد توجه قرار داد این بود که علی‌رغم اینکه عناصر تشکیل دهنده آن به صورت مجزا در دمای محیط غیر مغناطیسی‌اند ترکیب مانند یک فرومغناطیس عمل می‌کند [۲]. با این حال درک اولیه از ساختار بلوری و ترکیب این آلیاژها تا مدت زمان طولانی نا شناخته بود تا این که در سال ۱۹۲۹ اندازه گیری  $X\_Ray$  پاتر نشان داد تمام ترکیبات این سیستم به صورت  $fCC$  چیده شده‌اند. اما متأسفانه بعد از آن تا چند دهه بعد توجه به این ترکیبات کمرنگ شد و فقط چند گزارش از سنتز و خواص ترکیبات هویسلر در دهه ۱۹۷۰ گزارش شد [۳]. این روند ادامه داشت تا اینکه در سال ۱۹۸۳ دی‌گروت و همکارانش با استفاده از اصول اولیه محاسبات ساختار الکترونی نشان دادند که ترکیب  $MnNiSb$  یک فرومغناطیس نیمه فلز است که این منجر شد توجه جدیدی به این ترکیبات آغاز شود.

امروزه ترکیبات هویسلر بسیاری با پتانسیل بالایشان در زمینه‌های مختلف از جمله اسپینترونیک، آلیاژهای حافظه‌شکلی<sup>۲</sup>، نیمه‌رسانا با گاف انرژی کنترل‌شونده برای عایق‌های توپولوژیکی و تولید عظیم فعالیت‌های تحقیقاتی کشف شده است. تعداد اعضاء خانواده آلیاژهای هویسلر هم‌اکنون به بیش از ۱۰۰۰ ترکیب می‌رسد. این ترکیبات می‌توانند به صورت نیمه‌رسانا یا فلز ظاهر شوند و به دو صورت استوکیومتریک ۱:۱:۱ و ۲:۱:۱ مشاهده می‌شوند که به ترتیب نیم‌هویسلر و تمام هویسلر نامیده می‌شوند. شکل ۱-۱ یک مرور کلی از ترکیبات ممکن از عناصر تشکیل دهنده این مواد را نشان می‌دهد. با کمال تعجب خواص بسیاری از ترکیبات هویسلر را می‌توان با شمارش تعداد الکترون‌های ظرفیت پیش‌بینی کرد. ابررساناها، نیمه فلزات فرومغناطیس، فری مغناطیس‌خنثی شده و عایق‌های توپولوژیکی به سادگی با تغییر اجزاء اصلی ایجاد شده‌اند. به عنوان مثال، ترکیبات غیر مغناطیسی هویسلر با تقریباً ۲۷ الکترون ظرفیت، ابررسانا هستند.

---

<sup>۱</sup>F. Heusler

<sup>۲</sup>Shape memori alloy



شکل ۱-۱: جدول تناسبی عناصر. تعداد زیادی از مواد هویسلر را می توان با ترکیبی از ترکیبی از عناصر مختلف با توجه به طرح رنگ تشکیل داد [۴].

این خاصیت منجر به کارآیی این ترکیبات در دو صنعت سلول‌های خورشیدی و مواد ترموالکتریک شده است. برخی از آلیاژهای هویسلر در اثر اعمال میدان خارجی تغییر شکل می‌دهند. به این دسته از مواد آلیاژهای حافظه‌شکلی می‌گویند. اخیراً مواد حافظه‌شکلی به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند، چرا که در این ترکیبات امکان تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر، بدون تغییر دما وجود دارد.

گروه دیگری از ترکیبات هویسلر که بیش از ۲۵۰ عضو دارند از خود خاصیت نیمه‌رسانایی نشان می‌دهد و مواد جدید برای فن‌آوری انرژی در نظر گرفته می‌شود. پهنای گاف نواری این مواد به راحتی می‌تواند بین ۰ تا ۴ الکترون‌ولت با تغییر ترکیب شیمیایی آن‌ها تنظیم شود. در ادامه به معرفی آلیاژهای هویسلر و انواع آن‌ها و بررسی برخی از ویژگی‌های اساسی مربوط به این آلیاژها می‌پردازیم.

## ۱-۲- نام‌گذاری ترکیبات هویسلر

### ۱-۲-۱- ترکیبات نیم هویسلر

عموماً ترکیبات نیم‌هویسلر با فرمول شیمیایی  $XYZ$  از دو بخش یونی و کووالانسی تشکیل شده‌اند. در این ترکیبات عناصر  $X$  و  $Y$  معمولاً مشخصه کاتیونی دارند در صورتی که عنصر  $Z$  در پیوند، نقش آنیون را بازی می‌کند. ترتیب نوشتن نام عناصر در فرمول شیمیایی می‌تواند به صورت ترتیب الفبایی، برحسب میزان الکترونگاتیویته عناصر و یا به صورت تصادفی انجام گیرد، با این وجود نوشتن نام ترکیب بر اساس میزان الکترونگاتیویته عناصر مناسبتر به نظر می‌رسد. در این صورت اتم با بیشترین الکترونیخواهی که می‌تواند از عناصر گروه اصلی، فلزات واسطه و یا عناصر نادر خاکی باشد در سمت چپ قرار می‌گیرد از جمله این عناصر می‌توان به کبالت، مس، آهن، منگنز و غیره نام برد و اتم با الکترونگاتیویته بالاتر که در سمت راست قرار می‌گیرد می‌تواند از عناصر نیمه دوم گروه اصلی همچون آلومینیوم، گالیم، ژرمانیوم، ایندیوم و سیلیسیوم باشد. البته باید توجه داشت که نحوه چینش اتم‌ها در ساختار بلوری لزوماً از این نوع نام‌نویسی تبعیت نمی‌کند و اشتباه در چینش اولیه عناصر در کارهای محاسباتی منجر به نتایج نادرست می‌شود.

### ۱-۲-۲- ترکیبات تمام هویسلر

در گذشته تفاوتی بین آلیاژهای هویسلر و ترکیبات بین‌فلزی در نظر گرفته نمی‌شد. توصیف بین‌فلزی برای ترکیبات هویسلر توصیف مناسبی به نظر می‌رسد، با این وجود بین این دسته از مواد تفاوت‌هایی وجود دارد. فرمول شیمیایی ترکیبات هویسلر به صورت  $X_2YZ$  می‌باشد که در آن  $X$  و  $Y$  فلزات واسطه و  $Z$  یکی از عناصر گروه اصلی جدول تناوبی است. با این وجود بسیاری از این ترکیبات با جانشینی اتم  $Y$  با یک عنصر نادر خاکی یا فلزات قلیایی خاکی به دست می‌آیند. عموماً اتمی که دو بار در ترکیب وجود دارد در ابتدای فرمول می‌آید با این حال در مواردی که میزان الکترونیخواهی یکی از عناصر دیگر به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر است این نحوه نوشتن تغییر می‌کند. به طور مثال می‌توان از ترکیب  $LiCu_2Sb$  نام برد.