

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



**تأثیر فرآیند تولید و عناصر آلیاژی بر ریزساختار،
خواص مغناطیسی نرم و سینتیک تبلور آلیاژهای
نانوساختار سیستم Fe-Si-B-Nb-Cu
(FINEMET)**

دانشجو
فرزاد شهری

پایان نامه برای دریافت درجه دکتری
در رشته مهندسی مواد

اساتید راهنما
دکتر علی بیت اللهی
دکتر سعید شبستری

تیر ماه ۱۳۸۶

تقدیم به مادر گرامیم

به خاطر تمامی از خود گذشتگیهای بی دریغش در طول دوران زندگی،

بی شک شمع وجودش همواره روشنگر مسیر حرکتم

و حمایتهایش تصنیفگر سروده های تمامی آنچه که بدان دست یافتم.

چکیده:

هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر پارامترهای فرآیند انجماد سریع نظیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی و همچنین تاثیر عناصر آلیاژی Al (۱/۵ درصد اتمی) و Ge (۱ درصد اتمی) بر ریز ساختار، خواص مغناطیسی و سینتیک فرآیند تبلور سیستم آلیاژی Fe Si-B-Nb-Cu بوده است.

بر همین اساس آلیاژهایی با ترکیب $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1Al_{1.5}Ge_1$ و همچنین $Fe_{71}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1Al_{1.5}Ge_1$ تهیه و با استفاده از فرآیند انجماد سریع و به وسیله دستگاه چرخ مذاب در شرایط مختلف از فوق ذوب ($150-250^{\circ}C$) و همچنین سرعتهای مختلف چرخ تبریدی ($20-40\text{ m/s}$) به شکل نوارهایی با ریزساختار عمدتاً آمورف و در برخی نمونه ها بصورت جزیی تبلور یافته تهیه شدند.

جهت بررسی ریزساختار و خواص حرارتی نمونه های مختلف قبل و بعد از فرآیند عملیات حرارتی بازپخت از تکنیکهایی نظیر XRD، SEM، TEM، مازباور و DSC استفاده شد. محدوده عملیات حرارتی در نمونه های مختلف با استفاده از آنالیز حرارتی DSC شناسایی گردید و نمونه ها در دماهای 400 الی 730 درجه سانتی گراد در کوره تحت خلا 10^{-6} mbar عملیات حرارتی شدند.

ارزیابی خواص مغناطیسی نمونه ها در حالت انجماد سریع شده و پس از فرآیند بازپخت با استفاده از دستگاه منحنی نگار هیستریزس و میکرومغناطیسی (Squid) انجام شد.

نتایج حاصل از آنالیز XRD و TEM نشان داد که در نمونه های تهیه شده در سرعتهای پایین چرخ تبریدی و مقادیر فوق ذوب کم در حالت انجماد سریع شده فازهای نانو بلوری Fe-Si تشکیل شده و با افزایش فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی، میزان درصد فاز آمورف در ساختار افزایش یافته است. ارزیابی خواص مغناطیسی نمونه های انجماد سریع شده حاکی از بهبود خواص مغناطیسی در نمونه های تهیه شده در فوق ذوبهای کم و سرعتهای پایین چرخ تبریدی بوده است. ارزیابی آنالیز حرارتی بر روی نمونه های مذکور حکایت از افزایش میزان انرژی لازم جهت تبلور فاز فرومغناطیسی Fe Si با افزایش میزان فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی داشته است. از سوی دیگر مشاهده شده است که رشد دانه در نمونه های تهیه شده در سرعتهای پایین چرخ تبریدی و مقادیر کمتر فوق ذوب پس از فرآیند بازپخت در محدوده دمایی ذکر شده، بیشتر بوده است.

بررسی های انجام شده بر روی تاثیر افزودن عناصر آلیاژی Al و Ge نشاندهنده بهبود نفوذپذیری مغناطیسی و کاهش وادارندگی مغناطیسی نسبت به آلیاژ Finemet می باشد. ارزیابی های صورت پذیرفته با استفاده از XRD و مازباور حکایت از تشکیل فاز $D_{0-3}-FeSi$ در ریزساختار و بهبود قابل ملاحظه خواص مغناطیسی پس از فرآیند عملیات حرارتی بوده است. کمترین مقدار وادارندگی و بیشترین مقدار نفوذپذیری مغناطیسی در نمونه حاوی عناصر Al و Ge پس از عملیات حرارتی در دمای 580 درجه سانتی گراد حاصل شده است. همچنین میزان امپدانس مغناطیسی برابر با 323% در نمونه حاوی عناصر Al و Ge که به میزان قابل توجهی نسبت به آلیاژ Finemet (217%) بالاتر است، از نتایج سودمند تاثیر عناصر آلیاژی بکار برده شده در این تحقیق بشمار می آید.

از دیگر نتایج قابل توجه تاثیر عناصر آلیاژی Al و Ge در محدوده ترکیبی بکار برده شده علاوه بر بهبود خواص

مغناطیسی، می توان به افزایش دمای فرومغناطیسی کوری فاز آمورف و همچنین گسترش فاصله دمایی بین دمای تبلور اولیه و ثانویه (در حدود ۳۵ درجه سانتی گراد) و در نتیجه افزایش دمای کاربردی نمونه های مورد بررسی اشاره نمود.

بررسی های سینتیکی تاثیر فرآیند تولید و عناصر آلیاژی را بر نحوه تبلور در این آلیاژها نشان داد و مشخص گردید که افزودن عناصر آلیاژی Al و Ge علاوه بر کاهش دمای تبلور اولیه سبب کاهش میزان انرژی لازم جهت فرآیند تبلور می گردند. همچنین مشخص گردید که در نمونه های تهیه شده در مقادیر پایین فوق ذوب، انرژی اکتیواسیون لازم جوانه زنی و رشد دانه های فرو مغناطیسی با توجه به حضور جوانه های از پیش تشکیل شده کمتر بوده است که تاییدی بر الگوی ریزساختاری مشاهده شده و اثر بخشی عناصر آلیاژی افزودنی در سیستم آلیاژی مورد بررسی بوده است.

تقدیر و تشکر

سپاس قلبیم ایزد منان را که توفیق رسیدن به جایگاه های رفیع علمی به اینجانب عطا فرمود. از زحمات استاد گرانقدر آقای دکتر بیت الهی که در تمامی طول این دوره، از راهنماییهای عالمانه و مدد های علمی و معنوی ایشان بهره ها جستم و بی شک بدون کمک ایشان انجام این تحقیق میسر نمی شد، از صمیم قلب تشکر می نمایم.

از آقای دکتر شبستری، استاد گرانقدر، که در طول تحصیلات دانشگاهی اینجانب، چه در گذشته و چه اکنون نقش غیر قابل انکاری را ایفا نموده و از کمک های ایشان بهره ها گرفتم، صمیمانه تشکر می نمایم. از اساتید محترم کمیته هادی و داوران، آقایان دکتر مارقوسیان، دکتر خرازی، دکتر کاویانی، دکتر جوادپور، دکتر عطایی و دکتر طهرانچی که زحمت خواندن گزارشها و استماع سخنان اینجانب را در مسیر انجام پروژه بر خود هموار نموده و نکات ارزشمندی را در جهت روند مطلوبتر انجام این تحقیق و افزایش بار علمی به اینجانب گوشزد نمودند، سپاس گذاری می نمایم.

آقای دکتر غلامی پور به جهت راهنماییهای صمیمانه و همکاری های ستودنی شان، مرا مدیون و مرهون خود نموده است.

زحمات قابل تقدیر آقای دکتر کمالی به جهت انجام آزمایشهای طیف سنجی مازباور در دانشگاه آپسالا کشور سوئد شایسته تشکر و قدردانی است.

حمایتهای آقای مهندس شیخی، مدیر گروه صنایع فجر برایم قوت قلبی بود که ستودنی است. همکاریهای مؤثر آقایان مهندس جهانگیری، مهندس جمشیدی، مهندس عقیلی، مهندس عالی و مهندس عراقی در پیشبرد این پروژه شایسته تشکر و قدردانی است.

تشویق ستاد نانو از اینجانب برای انجام پژوهش در زمینه نانومغناطیسها شایسته سپاسگذاری است.

و اما

امید دارم رساله حاضر بتواند سهمی هر چند اندک در پیشبرد اهداف علمی این مرز و بوم کهن و جامعه علمی ایرانیان به گونه ای شایسته ایفاء نموده باشد.

فرزاد شهری

تیر ماه ۱۳۸۶

فهرست مطالب

۱	فصل ۱ مقدمه
۲	۱-۱. مقدمه
۷	فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی
۸	۱-۲. مروری بر خواص مغناطیسی مواد
۸	۱-۱-۲. تعاریف
۸	۱-۱-۲-۱. دوقطبها و گشتاورهای مغناطیسی
۸	۱-۱-۲-۲. آهنربایی
۸	۱-۱-۲-۳. میدان مغناطیسی
۹	۱-۱-۲-۴. القاء یا شار مغناطیسی
۱۰	۱-۱-۲-۵. نفوذپذیری مغناطیسی
۱۰	۱-۱-۲-۶. پذیرفتاری مغناطیسی
۱۰	۱-۲. دسته‌بندی مواد از نظر خواص مغناطیسی
۱۰	۱-۲-۱. مقدمه
۱۱	۱-۲-۲. مواد دایامغناطیس
۱۱	۱-۲-۳. مواد پارامغناطیس
۱۲	۱-۲-۴. مواد فرومغناطیس
۱۳	۱-۲-۵. مواد آنتی فرومغناطیس
۱۴	۱-۲-۶. مواد فری مغناطیس
۱۴	۱-۲-۳. سامانه‌های مغناطیسی و قابلیت تحرک دیواره‌ها
۱۷	۱-۲-۴. مواد مغناطیسی نرم و سخت
۱۷	۱-۴-۱. مواد مغناطیسی سخت
۱۷	۱-۴-۲. مواد مغناطیس نرم
۱۸	۱-۴-۳. بررسی سامانه‌های مغناطیسی تحت تاثیر میدان
۲۰	۲-۲. روشهای تولید آلیاژهای نانوبلور
۲۰	۱-۲-۲. فرآیند سنتز پودر
۲۱	۲-۲-۲. فرآیند انجماد سریع
۲۱	۱-۲-۲-۱. مقدمه
۲۵	۲-۲-۲-۲. فوق تبرید و جوانه‌زنی
۲۵	۲-۲-۲-۳. انتقال حرارت و جرم
۲۷	۳-۲. تبلور آلیاژ آمورف از منظر ترمودینامیک
۲۹	۴-۲. بررسیهای ترمودینامیکی و سینتیک استحاله آلیاژهای نرم مغناطیس نانو بلور
۳۰	۵-۲. آلیاژهای نرم مغناطیس نانو بلور
۳۰	۱-۵-۲. مقدمه
۳۱	۲-۵-۲. انواع آلیاژهای نرم مغناطیس نانوبلور
۳۱	۱-۲-۵-۲. مقدمه
۳۲	۲-۲-۵-۲. آلیاژ Nanoperm (سیستم Fe-Zr-B)
۳۲	۳-۲-۵-۲. آلیاژ Hitperm (سیستم Fe Co-Zr-B)
۳۳	۳-۵-۲. آلیاژ Finemet (سیستم FeSi -B -Nb-Cu)

۳۳	..... ۱-۳-۵-۲. مقدمه
۳۵	..... ۲-۳-۵-۲. اثر عناصر آلیاژی بر آلیاژ Finemet
۳۶	..... ۱-۲-۳-۵-۲. اثر عناصر آلیاژی Fe و Si
۳۹	..... ۲-۲-۳-۵-۲. اثر عناصر افزودنی
۴۰	..... ۳-۲-۳-۵-۲. عناصر جانشینی
۴۱	..... ۴-۲-۳-۵-۲. دیگر عناصر آلیاژی
۴۲	..... ۳-۳-۵-۲. ارتباط بین ریزساختار و خواص مغناطیسی در آلیاژ Finemet
۴۴	..... ۴-۳-۵-۲. مدل ناهمسانگردی تصادفی (مدل Herzer)
۴۶	..... ۵-۳-۵-۲. اثر اندازه دانه
۴۷	..... ۴-۵-۲. تبادل دوطرفه بین دانه‌ها
۴۸	..... ۵-۵-۲. رسوبات سخت مغناطیسی
۴۹	..... ۶-۵-۲. مغناطواستریکشن اشباع
۵۲	..... ۶-۲. مروری بر آخرین تحقیقات انجام شده بر آلیاژ Finemet
۵۲	..... ۱-۶-۲. بررسی استحاله‌های ساختاری و ریزساختاری
۵۳	..... ۲-۶-۲. طیف سنجی مازباور
۵۴	..... ۳-۶-۲. ارزیابی خواص مغناطیسی
۵۷	..... ۴-۶-۲. بررسی امپدانس مغناطیسی
۵۸	..... ۵-۶-۲. بررسی‌های سینتیکی

فصل ۳ نحوه انجام آزمایشها

۶۰	
۶۱	..... ۱-۳. مقدمه
۶۱	..... ۲-۳. انتخاب آلیاژ
۶۱	..... ۳-۳. طراحی فرآیند
۶۲	..... ۴-۳. تهیه آلیاژ
۶۲	..... ۵-۳. آنالیز نمونه‌ها
۶۳	..... ۶-۳. تهیه نوارهای انجماد سریع شده به روش چرخ مذاب
۶۴	..... ۷-۳. روند عمومی آزمایشهای انجام شده
۶۶	..... ۸-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام عملیات حرارتی
۶۸	..... ۹-۳. اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها
۶۸	..... ۱۰-۳. میکروسختی سنجی
۶۹	..... ۱۱-۳. آنالیز حرارتی
۶۹	..... ۱-۱۱-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آنالیز حرارتی
۷۰	..... ۱۲-۳. ارزیابی ساختاری
۷۰	..... ۱-۱۲-۳. XRD
۷۰	..... ۲-۱۲-۳. میکروسکپ الکترونی عبوری (TEM)
۷۱	..... ۱-۲-۱۲-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش TEM
۷۱	..... ۳-۱۲-۳. میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM)
۷۱	..... ۱۳-۳. آزمایش سنجش خواص مغناطیسی
۷۲	..... ۱۴-۳. اثر امپدانس مغناطیسی
۷۴	..... ۱۵-۳. طیف سنجی مازباور

۷۶	۱-۴. مقدمه
۷۶	۲-۴. بررسی نمونه‌های انجماد سریع شده
۷۶	۱-۲-۴. نتایج حاصل از تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی بر ریزساختار و خواص مغناطیسی نوارهای انجماد سریع شده
۷۶	۱-۲-۴. نتایج حاصل از تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی بر ضخامت نوارهای تهیه شده
۷۷	۲-۱-۲-۴. بررسی نتایج حاصل از تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی بر میکروسختی نوارهای تهیه شده
۷۸	۳-۱-۲-۴. نتایج مشاهدات ساختاری و ریزساختاری
۷۸	۱-۳-۱-۲-۴. بررسی ساختاری بوسیله میکروسکپ SEM
۸۰	۲-۳-۱-۲-۴. نتایج آزمایش پراش اشعه X (XRD)
۸۲	۳-۱-۲-۴. بررسی ریزساختار بوسیله میکروسکپ TEM
۸۳	۴-۱-۲-۴. نتایج آنالیز حرارتی
۸۴	۵-۱-۲-۴. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی
۸۴	۱-۵-۱-۲-۴. اثر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی بر خواص مغناطیسی نوارهای انجماد سریع شده
۸۹	۶-۱-۲-۴. طیف سنجی مازباور
۹۱	۳-۴. نتایج حاصل از تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی بر نمونه های عملیات حرارتی شده
۹۱	۱-۳-۴. نتایج آزمایشهای ارزیابی ساختاری (XRD)
۹۱	۱-۱-۳-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده تحت سیکل $T_{P_{1-x}}$ ($400-480^{\circ}C$)
۹۳	۲-۱-۱-۳-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل $T_{P_{1+E}}$ ($560^{\circ}C$)
۹۵	۳-۱-۱-۳-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل $T_{P_{1+X}}$ ($640^{\circ}C$)
۹۶	۴-۱-۱-۳-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل $T_{P_{2+X}}$ ($730^{\circ}C$)
۹۹	۲-۱-۳-۴. بررسی نتایج حاصل از تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی بر سختی میکروسکپی نوارهای عملیات حرارتی شده
۱۰۱	۳-۱-۳-۴. نتایج آزمایشهای سنجش خواص مغناطیسی
۱۱۰	۴-۴. نتایج بررسی های حاصل از افزودن عناصر Al و Ge در نوارهای انجماد سریع شده
۱۱۰	۱-۴-۴. نتایج مشاهدات ساختاری و ریزساختاری
۱۱۰	۱-۱-۴-۴. نتایج آزمایش پراش اشعه X
۱۱۰	۲-۱-۴-۴. بررسی ریزساختار بوسیله میکروسکپ TEM
۱۱۱	۲-۴-۴. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی
۱۱۳	۳-۴-۴. نتایج آنالیز حرارتی
۱۱۴	۴-۴-۴. طیف سنجی مازباور نمونه های انجماد سریع شده
۱۱۶	۵-۴-۴. بررسی نتایج آزمایش امپدانس مغناطیسی
۱۱۷	۵-۴. نتایج بررسی های حاصل از افزودن عناصر Al و Ge در نمونه های عملیات حرارتی شده
۱۱۷	۱-۵-۴. نتایج آزمایشهای آنالیز ساختار و ریزساختار
۱۱۷	۱-۱-۵-۴. نتایج بررسی پراش پرتو X
۱۱۷	۱-۱-۱-۵-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده تحت سیکل $T_{P_{1-x}}$ ($400-480^{\circ}C$)
۱۱۸	۲-۱-۱-۵-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل $T_{P_{1+E}}$
۱۱۸	۳-۱-۱-۵-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل $T_{P_{1+X}}$ ($640^{\circ}C$)
۱۱۹	۴-۱-۱-۵-۴. نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل $T_{P_{2+X}}$ ($730^{\circ}C$)
۱۲۵	۲-۵-۴. بررسی ریز ساختاری نمونه‌های عملیات حرارتی شده با استفاده از TEM
۱۳۰	۲-۲-۵-۴. بررسی آنالیز ساختاری بوسیله سیستم EDXS
۱۳۵	۳-۵-۴. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی

۱۴۰	..... ۴-۵-۴. طیف‌سنجی مازباور
۱۴۰	..... ۱-۴-۵-۴. نمونه‌های بازپخت شده در دمای 400°C
۱۴۰	..... ۲-۴-۵-۴. نمونه‌های بازپخت شده در دمای 480°C (درصد کم فاز بلوری تشکیل شده)
۱۴۰	..... ۳-۴-۵-۴. نمونه‌های بازپخت شده در دمای 560°C (دمای تبلور اولیه)
۱۴۱	..... ۴-۴-۵-۴. نمونه‌های بازپخت شده در دماهای 640°C و 730°C (درجه سانتی‌گراد (شروع و پایان دمای تبلور ثانویه))
۱۴۷	..... ۶-۴. ارزیابی تاثیر عملیات حرارتی بازپخت بر امیدانس مغناطیسی نمونه‌های $\text{Al}_x\text{Ge}_{1-x}$ و Al_xGe_1
۱۵۳	..... ۷-۴. نتایج بررسی سینتیک فرآیند تبلور

فصل ۵ تحلیل نتایج

۱۵۹	
۱۶۰	..... ۱-۵. مقدمه
۱۶۰	..... ۲-۵. تحلیل نتایج بررسی تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی در نمونه های انجماد سریع شده
۱۶۰	..... ۱-۲-۵. تحلیل نتایج بررسی تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی در نمونه های انجماد سریع شده
۱۶۰	..... ۱-۱-۲-۵. تحلیل نتایج بررسیهای ریزساختاری و ساختاری از نمونه های انجماد سریع شده
۱۶۳	..... ۲-۱-۲-۵. بررسی نتایج آنالیز حرارتی از نمونه های انجماد سریع شده
۱۶۴	..... ۳-۱-۲-۵. تحلیل نتایج سنجش خواص مغناطیسی
۱۶۶	..... ۲-۲-۵. تحلیل نتایج حاصل از تاثیر فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی بر نمونه های عملیات حرارتی شده
۱۶۶	..... ۱-۲-۲-۵. تحلیل نتایج ساختاری
۱۶۶	..... ۱-۱-۲-۲-۵. تحلیل نتایج نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل T_{P1-X} ($400-480^{\circ}\text{C}$)
۱۶۶	..... ۲-۱-۲-۲-۵. تحلیل نتایج نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل T_{P1+E} (560°C)
۱۶۷	..... ۳-۱-۲-۲-۵. تحلیل نتایج نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل T_{P1+X} (640°C)
۱۶۸	..... ۴-۱-۲-۲-۵. تحلیل نتایج نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سیکل T_{P2+X} (730°C)
۱۶۹	..... ۲-۲-۲-۵. تحلیل نتایج حاصل از سنجش خواص مغناطیسی
۱۷۴	..... ۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از بررسی های افزودن عناصر Al و Ge
۱۷۴	..... ۱-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از بررسی های افزودن عناصر Al و Ge در نوارهای انجماد سریع شده
۱۷۴	..... ۱-۱-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از مشاهدات ساختاری و ریزساختاری
۱۷۴	..... ۲-۱-۳-۵. بررسی نتایج آنالیز حرارتی از نمونه های انجماد سریع شده
۱۷۵	..... ۳-۱-۳-۵. طیف‌سنجی مازباور (Mössbauer Spectroscopy)
	..... ۴-۱-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از افزودن عناصر آلیاژی Al و Ge بر خواص مغناطیسی و امیدانس مغناطیسی نمونه های آمورف
۱۷۶	..... ۲-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از بررسی های افزودن عناصر Al و Ge در نمونه های بازپخت شده
۱۷۷	..... ۱-۲-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از مشاهدات ساختاری (XRD)
۱۸۰	..... ۲-۲-۳-۵. تحلیل نتایج بررسی های ریزساختاری بوسیله میکروسکپ TEM
۱۸۱	..... ۳-۲-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از سنجش خواص مغناطیسی در نمونه های عملیات حرارتی شده
۱۸۳	..... ۴-۲-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از طیف سنجی مازباور در نمونه های بازپخت شده
۱۸۴	..... ۱-۴-۲-۳-۵. نمونه‌های بازپخت شده در دمای 400°C
۱۸۵	..... ۲-۴-۲-۳-۵. نمونه‌های بازپخت شده در دمای 480°C (درصد کم فاز بلوری تشکیل شده)
۱۸۶	..... ۳-۴-۲-۳-۵. نمونه‌های بازپخت شده در دمای 560°C (دمای تبلور اولیه)
	..... ۴-۴-۲-۳-۵. نمونه‌های بازپخت شده در دماهای 640°C و 730°C (درجه سانتی‌گراد (شروع و پایان دمای تبلور ثانویه))
۱۸۷	..... ۵-۲-۳-۵. تحلیل نتایج حاصل از بررسی امیدانس مغناطیسی نمونه های بازپخت شده
۱۹۱	..... ۴-۵. تحلیل نتایج بررسی سینتیک فرآیند تبلور اولیه (T_{P1})
۱۹۲	.....

۱۹۶	نتیجه گیری
۲۰۰	مراجع
۲۱۹	یوست الف
۲۲۰	امپدانس مغناطیسی
۲۲۳	پیوست ب
۲۲۴	طیف سنجی مازباور در آلیاژهای نانو بلور نرم مغناطیس
۲۲۴	مقدمه
۲۲۴	طیف مازباور مواد آمورف و نانو بلور
۲۲۳	پیوست ج

۱	فصل ۱ مقدمه
۳	شکل ۱-۱. ارتباط بین نفوذپذیری ($f=1\text{KHz}$) و القاء اشباع در مواد مغناطیسی نرم.
۵	شکل ۱-۲. وادارندگی، H_C ، بر حسب اندازه دانه در مواد نرم مغناطیسی مختلف.
۷	فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی
۱۲	شکل ۲-۱. نظم ممانها در مواد (a) پارامغناطیس (b) فرومغناطیس (c) آنتی فرومغناطیس (d) فری مغناطیس.
۱۳	شکل ۲-۲. منحنی آهنربایش (M-H) در مواد فرومغناطیسی.
۱۵	شکل ۲-۳. مرز حوزه و نحوه تغییر جهت ممانها در طول دیواره.
۱۸	شکل ۲-۴. منحنی هیستریزس مواد (الف) نرم و (ب) سخت.
۱۹	شکل ۲-۵. نحوه جهت گیری و رشد حوزه های مغناطیسی در مراحل مختلف اعمال میدان مغناطیسی.
۲۲	شکل ۲-۶. شماتیک فرآیند چرخ مذاب.
۲۷	شکل ۲-۷. شمایی از منحنی TTT در فرایند تبلور مذاب.
۲۸	شکل ۲-۸. مفهوم دمای انتقال به شیشه T_g .
۳۱	شکل ۲-۹. شماتیک مبانی طراحی و تولید یک نرم مغناطیس نانوبلور از یک پیش ماده آمورف.
۳۴	شکل ۲-۱۰. (a) تصویر BFTEM از آلیاژ Finemet که در دمای ۸۲۳ درجه سانتی گراد و زمان ۶۰ دقیقه بازپخت شده است (b) تصویر HRTEM از همان آلیاژ.
۳۴	شکل ۲-۱۱. شماتیک تغییرات ریز ساختاری در تبلور اولیه آلیاژ $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ که با استفاده از روش چرخ مذاب تهیه شده است.
۳۴	شکل ۲-۱۲. شماتیک χDAP از اتمهای Cu, B, Nb و Si نزدیک به یک رسوب Cu در یک منطقه مشخص از آلیاژ $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ که به مدت زمان ۱۰ دقیقه در دمای $500^\circ C$ بازپخت شده است.
۳۷	شکل ۲-۱۳. دیاگرام فازی Fe-Si.
۳۸	شکل ۲-۱۴. تغییرات خواص فیزیکی آلیاژهای Fe Si با تغییر سیلیسیم.
۳۸	شکل ۲-۱۵. ساختار D_{03} -FeSi در آلیاژهای Fe-Si.
۳۹	شکل ۲-۱۶. نفوذپذیری نسبی در آلیاژهای $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_x$ و $Fe_{77}Si_{11}B_9Nb_{3-x}Cu_x$ بر حسب تابعی از x. نمونه در دمای $550^\circ C$ به مدت ۱ ساعت بازپخت شده است.
۴۱	شکل ۲-۱۷. ارتباط بین مقاومت الکتریکی و دمای بازپخت در آلیاژهای Finemet بدون Al و حاوی ۲% at Al.
۴۱	شکل ۲-۱۸. اندازه متوسط دانه، وادارندگی و نفوذپذیری اولیه در آلیاژ $Fe_{74.5-x}Cu_xNb_3Si_{13.5}B_9$ (x=۰ و ۱) بعنوان تابعی از دمای بازپخت.
۴۳	شکل ۲-۱۹. وادارندگی، H_C و نفوذپذیری اولیه بر حسب میزان Si در آلیاژ نانوبلور $Fe_{96-z}Cu_1Nb_3Si_xB_{z-x}$ که در دمای $540^\circ C$ بمدت زمان ۱ ساعت بازپخت گشته است.
۴۴	شکل ۲-۲۰. شماتیک مدل ناهمسانگردی تصادفی در دانه هایی که در یک زمینه فرومغناطیس قرار گرفته اند. جهات دوطرفه نشاندهنده محور ناهمسانگردی اتفاقی و حجم هاشورخورده بیانگر ارتباط فرو مغناطیسی است که بوسیله طول تبدالی $L_{ex}=(A/\langle K \rangle)^{1/2}$ تعیین می گردد.
۴۵	شکل ۲-۲۱. وادارندگی، نفوذ پذیری اولیه، وادارندگی و (α_R) در آلیاژهای نانوبلوری پایه آهن در مقادیر مختلف اندازه دانه.
۴۷	شکل ۲-۲۲. نفوذ پذیری اولیه، وادارندگی مغناطیسی و القاء اشباع، Br/Bs، در آلیاژ Finemet. بازپخت شده در دمای $540^\circ C$ بمدت ۱ ساعت و $350^\circ C$ بمدت ۴ ساعت در میدان مغناطیسی معکوس بر حسب دما. واکنشها نشان دهنده دمای کوری فاز آمورف زمینه ($T_C^{am}=291^\circ C$) و دانه های b.c.c.-Fe(Si) ($T_C^{Fe-Si}=607^\circ C$) می باشند.
۴۸	

شکل ۲-۲۳. وابستگی دمایی H_c و μ_i در آلیاژ Finemet همراه با مقادیر جزئی از فاز Fe_3B ۵۰

شکل ۲-۲۴. مغناطواستریکشن اشباع، λ_s ، در آلیاژهای Fe-Cu-Nb-Si-B (a) تاثیر دمایی بازپخت (T_a) و (b) تاثیر مقدار Si در حالت نانوبلور. نتایج آلیاژهای Fe-Nb-B و Fe-(Cu)-Zr-B نیز مشخص گردیده اند. ۵۱

شکل ۲-۲۵. وابستگی مغناطواستریکشن اشباع (اندازه گیری شده در دمایی $50^\circ C$) با توجه به کسر رسوب یافته دانه های b.c.c.-FeSi در نمونه های بازپخت شده در دما و زمانهای مختلف. ۵۱

شکل ۲-۲۶. ارزیابی القاء اشباع، نسبت B_r/B_s و وادارندگی مغناطیسی در حین فرآیند بازپخت همدمای در دمایی $500^\circ C$ ۵۴

شکل ۲-۲۷. وابستگی وادارندگی مغناطیسی در آلیاژ $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Ta_3Cu_1$ در (a) بازپخت به مدت زمان یک ساعت و (b) پس از یک ساعت بازپخت در دماهای مختلف..... ۵۵

فصل ۳ نحوه انجام آزمایشها

۶۰

شکل ۳-۱. نوارهای انجماد سریع حاصل از فرآیند چرخ مذاب..... ۶۴

شکل ۳-۲. فلوجارت روند کلی آزمایشهای انجام شده..... ۶۵

شکل ۳-۳. انتخاب منطقه دمایی عملیات حرارتی با استفاده از پروفایل آنالیز حرارتی DSC..... ۶۷

شکل ۳-۴. شماتیک سیکل فرآیند عملیات حرارتی..... ۶۷

شکل ۳-۵. اثر میکروسختی سنجی بر نوارهای تهیه شده..... ۶۸

شکل ۳-۶. پروفایل نوعی آنالیز حرارتی نمونه های F_1 و F_2 ۶۹

شکل ۳-۷. نمونه آماده شده جهت سنجش خواص مغناطیسی با استفاده از منحنی نگار هیستریزس دارای قطر داخل و خارج به ترتیب ۲۰ و ۲۴ میلی متر..... ۷۲

شکل ۳-۸. چیدمان اندازه گیری امپدانس مغناطیسی..... ۷۳

شکل ۳-۹. شماتیک چیدمان اندازه گیری امپدانس مغناطیسی..... ۷۳

فصل ۴ نتایج آزمایشها

۷۵

شکل ۴-۱. ضخامت نوارهای تهیه شده بر حسب تابعی از سرعت چرخش چرخ تبریدی و میزان ذوب..... ۷۷

شکل ۴-۲. سختی میکروسختی نوارهای تهیه شده بر حسب تابعی از سرعت چرخ تبریدی و فوق ذوب..... ۷۸

شکل ۴-۳. تاثیر ضخامت نوارهای تهیه شده در شرایط مختلف از فرآیند تولید بر سختی میکروسختی..... ۷۸

شکل ۴-۴. مورفولوژی دو سطح نوارهای انجماد سریع شده در شرایط مختلف از فرآیند تولید..... ۷۹

شکل ۴-۵. الگوهای پراش اشعه X نمونه های $Al_{1.5}Ge_1$ از سطحی که در تماس با چرخ تبریدی بوده است..... ۸۰

شکل ۴-۶. الگوهای پراش اشعه X نمونه های $Al_{1.5}Ge_1$ از سطح آزاد نمونه..... ۸۱

شکل ۴-۷. الگوهای پراش اشعه X از سطح آزاد نمونه های $Al_{1.5}Ge_1$ در دماهای مختلف فوق ذوب و در سرعت چرخ 25 m/s ۸۱

شکل ۴-۸. تصاویر میدان روشن از نوارهای انجماد سریع شده به همراه الگوی پراش الکترونی..... ۸۲

شکل ۴-۹. طیف حرارتی DSC مربوط به تبلور اولیه و ثانویه در نمونه های حاوی Al و Ge..... ۸۳

شکل ۴-۱۰. تغییر انرژی تبلور اولیه بر حسب تغییرات ضخامت در نمونه های مختلف..... ۸۴

شکل ۴-۱۱. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه های انجماد سریع شده با ترکیب $Al_{1.5}Ge_1$ در حالت استاتیک..... ۸۵

شکل ۴-۱۲. اثر سرعت سرد شدن و فوق ذوب بر القاء اشباع نمونه های انجماد سریع شده..... ۸۶

شکل ۴-۱۳. اثر سرعت سرد شدن و فوق ذوب بر القاء نسبی نمونه های انجماد سریع شده..... ۸۷

شکل ۴-۱۴. اثر سرعت سرد شدن و فوق ذوب بر نفوذپذیری اولیه نمونه های انجماد سریع شده..... ۸۷

شکل ۴-۱۵. اثر سرعت سرد شدن و فوق ذوب بر نفوذپذیری ماکزیمم نمونه های آمورف..... ۸۸

شکل ۴-۱۶. اثر سرعت سرد شدن و فوق ذوب بر وادارندگی نمونه های انجماد سریع شده..... ۸۸

شکل ۴-۱۷. تغییرات وادارندگی مغناطیسی بر حسب تغییرات ضخامت در نمونه های مختلف..... ۸۹

- شکل ۴-۱۸. طیف مازباور نوارهای انجماد سریع شده در شرایط مختلف از فرآیند تولید. ۹۰
- شکل ۴-۱۹. الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های بازپخت شده در دمای 400°C . ۹۲
- شکل ۴-۲۰. الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های بازپخت شده در دمای 480°C . ۹۳
- شکل ۴-۲۱. الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های بازپخت شده در دمای 560°C . ۹۴
- شکل ۴-۲۲. الگوی پراش پرتو X نمونه‌های $\text{Al}_{1.5}\text{Ge}$ بازپخت شده در دمای 560°C . تصویر کوچک نشان‌دهنده فوق شبکه فاز D_{02} می‌باشد. ۹۵
- شکل ۴-۲۳. الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های بازپخت شده در دمای 640°C . ۹۶
- شکل ۴-۲۴. الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های بازپخت شده در دمای 730°C . ۹۷
- شکل ۴-۲۵. تاثیر فوق ذوب بر تغییرات اندازه دانه در سیکلهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۹۸
- شکل ۴-۲۶. تاثیر تغییر سرعت چرخ تبریدی بر تغییرات اندازه دانه در سیکلهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۹۸
- شکل ۴-۲۷. تاثیر میزان فوق ذوب بر پارامتر شبکه نمونه های بازپخت شده در سرعت چرخ تبریدی 25 m/s . ۹۹
- شکل ۴-۲۸. تاثیر تغییر فوق ذوب بر تغییرات سختی میکروسکپی، در سیکلهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۰۰
- شکل ۴-۲۹. تاثیر سرعت چرخ تبریدی بر تغییرات سختی میکروسکپی در سیکلهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۰۰
- شکل ۴-۳۰. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه F_2 در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۰۲
- شکل ۴-۳۱. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه F_{12} در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۰۳
- شکل ۴-۳۲. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه F_5 در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۰۴
- شکل ۴-۳۳. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه F_7 در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۰۵
- شکل ۴-۳۴. ارتباط بین دمای بازپخت و وادارندگی نمونه‌های تهیه شده در مقادیر مختلف از فوق ذوب. ۱۰۶
- شکل ۴-۳۵. ارتباط بین دمای بازپخت و وادارندگی نمونه‌های تهیه شده در سرعتهای مختلف چرخ تبریدی. ۱۰۶
- شکل ۴-۳۶. ارتباط بین دمای بازپخت و القاء اشباع نمونه‌های تهیه شده در مقادیر مختلف از فوق ذوب. ۱۰۷
- شکل ۴-۳۷. ارتباط بین دمای بازپخت و القاء اشباع نمونه‌های تهیه شده در سرعتهای مختلف چرخ تبریدی. ۱۰۷
- شکل ۴-۳۸. ارتباط بین دمای بازپخت و نفوذپذیری ماکزیمم در نمونه‌های تهیه شده در مقادیر مختلف از فوق ذوب. ۱۰۸
- شکل ۴-۳۹. ارتباط بین دمای بازپخت و نفوذپذیری ماکزیمم در نمونه‌های تهیه شده در سرعتهای مختلف چرخ تبریدی. ۱۰۸
- شکل ۴-۴۰. نمونه ای از منحنی هیستریزس نوارهای بازپخت شده در دمای 730°C با استفاده از Squid. ۱۰۹
- شکل ۴-۴۱. الگوی های پراش پرتو X نمونه‌های F و F_6 در حالت انجماد سریع شده برای سطوح در تماس و آزاد نوارها. ۱۱۰
- شکل ۴-۴۲. تصویر میدان روشن از نوار های انجماد سریع شده به همراه الگوی پراش الکترونی. ۱۱۱
- شکل ۴-۴۳. منحنی های هیستریزس نمونه های F و F_6 در حالت انجماد سریع شده. ۱۱۲
- شکل ۴-۴۴. نمودار DCS در نمونه های Al_1Ge و $\text{Al}_{1.5}\text{Ge}$ در شرایط یکسان از فرآیند تولید. ۱۱۳
- شکل ۴-۴۵. (الف و ج) طیفهای مازباور دمای محیط نمونه های F و F_6 در حالت انجماد سریع شده (ب و د) مقادیر متوسط میدان هایپرفاین در نمونه‌های مذکور. ۱۱۵
- شکل ۴-۴۶. حداکثر مقادیر امپدانس مغناطیسی در نمونه های F و F_6 در حالت انجماد سریع شده. ۱۱۷
- شکل ۴-۴۷. الگوهای پراش پرتو X نمونه F بازپخت شده در دماهای $400-730$ درجه سانتی گراد. ۱۲۰
- شکل ۴-۴۸. الگوهای پراش پرتو X نمونه F_6 بازپخت شده در دماهای $400-730$ درجه سانتی گراد. ۱۲۱
- شکل ۴-۴۹. الگوی پراش پرتو X نمونه‌های Al_1Ge بازپخت شده در دمای 560°C . تصویر کوچک نشان‌دهنده فوق شبکه فاز D_{02} می‌باشد. ۱۲۲
- شکل ۴-۵۰. تغییرات اندازه دانه در نمونه‌های F و F_6 در سیکلهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۲۲
- شکل ۴-۵۱. میزان درصد اتمی Si در ساختار $\text{D}_{02}\text{-FeSi}$ در نمونه F در سیکلهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۲۳
- شکل ۴-۵۲. پارامتر شبکه نمونه‌های F و F_6 در سیکلهای مختلف از فرآیند بازپخت. ۱۲۳

- شکل ۴-۵۳. الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های F و F_۶ بازپخت شده در دمای ۷۳۰ درجه سانتی گراد..... ۱۲۴
- شکل ۴-۵۴. تغییرات سختی میکروسکوپی نمونه های F و F_۶ با توجه به تغییر دمای فرآیند بازپخت..... ۱۲۴
- شکل ۴-۵۵. تصاویر میدان روشن از نمونه F، بازپخت شده در دمای ۵۶۰°C به همراه الگوی پراش الکترونی..... ۱۲۶
- شکل ۴-۵۶. تصاویر میدان روشن از نمونه F_۶ بازپخت شده در دمای ۵۶۰°C به همراه الگوی پراش الکترونی..... ۱۲۷
- شکل ۴-۵۷. الگوی پراش الکترونی نمونه های F و F_۶ به همراه اندیس گذاری صفحات فاز D_{۰۳}-FeSi..... ۱۲۸
- شکل ۴-۵۸. تصاویر میدان روشن از نمونه Al_{۱,۵}Ge_۱ که در دمای ۷۳۰°C بازپخت شده است..... ۱۲۹
- شکل ۴-۵۹. آنالیز EDXS از فاز D_{۰۳}-FeSi در نمونه های F و F_۶..... ۱۳۱
- شکل ۴-۶۰. (الف) تصویر میدان روشن از نمونه F_۶ بازپخت شده در دمای ۵۶۰°C به مدت زمان یک ساعت به همراه آنالیز EDXS از نواحی (ب) فاز فرومغناطیسی Fe(Si) (ج) مرز بین فاز آمورف باقی مانده و فاز F(Si) و (د) فاز آمورف باقی مانده..... ۱۳۳
- شکل ۴-۶۱. تصاویر میدان روشن از نمونه Al_{۱,۵}Ge_۱ بازپخت شده در دمای ۷۳۰°C..... ۱۳۴
- شکل ۴-۶۲. آنالیز EDXS از فاز ثانویه برآیدی Fe-Nb-B در نمونه F_۶ که در دمای ۷۳۰°C به مدت زمان یک ساعت بازپخت شده است..... ۱۳۵
- شکل ۴-۶۳. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه F در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت..... ۱۳۶
- شکل ۴-۶۴. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه F_۶ در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت..... ۱۳۷
- شکل ۴-۶۵. ارتباط بین دمای بازپخت و خواص مغناطیسی در نمونه‌های F و F_۶..... ۱۳۸
- شکل ۴-۶۶. نتایج حاصل از سنجش خواص مغناطیسی نمونه‌های F و F_۶ بازپخت شده در دمای ۷۳۰ °C به مدت زمان یک ساعت با استفاده از دستگاه مغناطیس سنج SQUID..... ۱۳۹
- شکل ۴-۶۷. (الف) طیفهای مازباور دمای محیط نمونه F در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت و (ب) مقادیر متوسط میدان هایپرفاین در نمونه مذکور..... ۱۴۲
- شکل ۴-۶۸. (الف) طیفهای مازباور دمای محیط نمونه F_۶ در دماهای مختلف از فرآیند بازپخت و (ب) مقادیر متوسط میدان هایپرفاین در نمونه مذکور..... ۱۴۳
- شکل ۴-۶۹. تغییرات متوسط میدان هایپرفاین در فاز آمورف با توجه به تغییر دمای بازپخت در نمونه‌های F و F_۶..... ۱۴۴
- شکل ۴-۷۰. کسر استحاله یافته فاز بلورین با تغییر دمای بازپخت در نمونه‌های F و F_۶..... ۱۴۴
- شکل ۴-۷۱. پروفایل امپدانس مغناطیسی نمونه F بازپخت شده در دمای ۴۰۰-۵۸۰ °C و فرکانس اعمالی ۰/۵-۱۰ MHz..... ۱۵۰
- شکل ۴-۷۲. پروفایل امپدانس مغناطیسی نمونه F_۶ بازپخت شده در دمای ۴۰۰-۵۸۰ °C و فرکانس اعمالی ۰/۵-۱۰ MHz..... ۱۵۲
- شکل ۴-۷۳. مقادیر حداکثر امپدانس مغناطیسی با تغییر دمای عملیات حرارتی بازپخت در نمونه F..... ۱۵۲
- شکل ۴-۷۴. مقادیر حداکثر امپدانس مغناطیسی با تغییر دمای عملیات حرارتی بازپخت در نمونه F_۶..... ۱۵۳
- شکل ۴-۷۵. منحنی آنالیز حرارتی DSC در نرخهای متفاوت حرارت دهی جهت محاسبه گرافیکی انرژی اکتیواسیون و فاکتور فرکانس در نمونه F..... ۱۵۴
- شکل ۴-۷۶. منحنی آنالیز حرارتی DSC در نرخهای متفاوت حرارت دهی جهت محاسبه گرافیکی انرژی اکتیواسیون و فاکتور فرکانس در نمونه F_۲..... ۱۵۵
- شکل ۴-۷۷. منحنی آنالیز حرارتی DSC در نرخهای متفاوت حرارت دهی جهت محاسبه گرافیکی انرژی اکتیواسیون و فاکتور فرکانس در نمونه F_۶..... ۱۵۶
- شکل ۴-۷۸. منحنی آنالیز حرارتی DSC در نرخهای متفاوت حرارت دهی جهت محاسبه گرافیکی انرژی اکتیواسیون و فاکتور فرکانس در نمونه F_{۱۱}..... ۱۵۷
- شکل ۴-۷۹. نمودارهای کسر استحاله یافته (X) بر حسب زمان استحاله در نمونه‌های F، F_۲، F_۶ و F_{۱۱}..... ۱۵۸

شکل ۵-۱. طیف مازباور نمونه های F_e و F_c در مراحل مختلف از فرآیند بازپخت و شماتیک مراحل فرآیند تبلور در دو نمونه مذکور..... ۱۸۹

شکل ۵-۲. تغییرات Collinear Moment و زاویه متوسط با دمای بازپخت در نمونه های F_e و F_c ۱۹۰

یوست الف ۲۱۹

شکل (۱). پدیده امپدانس مغناطیسی در لوله های استوانه ای شکل..... ۲۲۱

فهرست جداول

فصل ۱ مقدمه

جدول ۱-۱. اندازه دانه، آهنربایش اشباع (J_s)، مغناطواستریکشن اشباع (λ_s)، وادارندگی (H_C)، نفوذپذیری اولیه (μ_i)، مقاومت الکتریکی (ρ)، تلفات هسته در $0.7T$ (P_{Fe}) و ضخامت نوار (t) در مواد نرم مغناطیسی آمورف، نانوبلور و میکروبلور متداول. ۵

فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی

جدول ۱-۲. مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی و ضریب نفوذ نسبی برای مواد مغناطیسی مختلف. ۱۲
جدول ۲-۲. خلاصه‌ای از سینتیک فرآیند تبلور پیش ماده آمورف به ساختار نانوبلور در آلیاژهای نرم مغناطیسی. ۳۰
جدول ۲-۳. انواع آلیاژهای نرم مغناطیسی نانو کریستالین. ۳۲

فصل ۳ نحوه انجام آزمایشها

جدول ۱-۳. درصد خلوص عناصر مورد استفاده. ۶۲
جدول ۲-۳. نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه‌های آمورف. ۶۳
جدول ۳-۳. کدگذاری نمونه‌های مختلف بر اساس تغییرات فوق ذوب و سرعت چرخ تبریدی. ۶۵

فصل ۴ نتایج آزمایشها

جدول ۱-۴. دماهای تبلور هر فاز و انرژی مربوط به آن. ۸۴
جدول ۲-۴. نتایج آزمایش سنجش خواص مغناطیسی نمونه‌های انجماد سریع شده $Al_{1.5}Ge_1$ ۸۶
جدول ۳-۴. خواص مغناطیسی نمونه‌های F_6 و F_7 در حالت انجماد سریع شده. ۱۱۲
جدول ۴-۴. نتایج آنالیز حرارتی DSC نمونه‌های F_6 و F_7 ۱۱۴
جدول ۵-۴. پارامترهای هایپرفاین نمونه‌های F_6 و F_7 در حالت انجماد سریع شده. ۱۱۶
جدول ۶-۴. پارامترهای هایپرفاین مغناطیسی در نمونه F_6 با تغییر دمای بازپخت. ۱۴۵
جدول ۷-۴. پارامترهای هایپرفاین مغناطیسی نمونه F_6 با تغییر دمای بازپخت. ۱۴۶
جدول ۸-۴. پارامترهای سینتیکی واکنش تبلور در نمونه‌های F_6 ، F_7 و F_{11} ۱۵۸

پیوست ج

جدول ۱. خواص مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده در شرایط مختلف از فرآیند تولید و دماهای مختلف بازپخت. ۲۲۴
جدول ۲. خواص مغناطیسی نمونه‌های F_6 و F_7 در شرایط مختلف از فرآیند بازپخت. ۲۲۵

فهرست علائم و اختصارات

a	Lattice Parameter	پارامتر شبکه
A	Exchange Stiffness	سفتی تبادل
B	Induction, Flux Density	القاء مغناطیسی
B _{hf}	Hyperfine Field	میدان هایپرفاین مغناطیسی
B _r	Remanent Induction	القاء نسبی
B _s	Saturation Induction	القاء اشباع
c	Speed of Light	سرعت نور
C	Specific Heat	گرمای ویژه
D	Grain Size	اندازه دانه
E	Activation Energy	انرژی فعال سازی
E _γ	Energy of Gamma Radiation	انرژی تشعشع گاما
f	Frequency	فرکانس
H	Magnetic Field	میدان مغناطیسی
H _C	Coercive Field	میدان پسماند زدا
I	Current	جریان
I	Intenitry	شدت
J, J _{ex}	Exchange Energy Density	دانسیتته انرژی تبدالی
k _B	Boltzman Constant	ثابت بولتزمن
k	Equilibrium Constant	ثابت تعادل
K	Magnetic Anisotropy	ناهمسانگردی مغناطیسی
K _{eff}	Effective Magnetic Anisotropy	ناهمسانگردی مغناطیسی موثر
l	Length	طول
L	Latent Heat	گرمای ویژه
L _{ex}	Exchange Correlation Length	طول تبدالی
Ln	Lantanide	لانتانید
M	Magnetization	آهنربایش
M	Metalloid	شبه فلز
M _s	Saturation Magnetization	آهنربایش اشباع
N	Number of Grains	تعداد دانه ها
P(B _{hf})	Hyperfine Field Distribution	توزیع میدان هایپرفاین
R	Resistance	مقاومت
R _C	Cooling Rate	سرعت سرد شدن

t	time	زمان
T	Temperature	دما
T _a	Annealing Temperature	دمای بازپخت
T _C	Curie Temperature	دمای کوری
T _E	Eutectic Temperature	دمای یوتکتیک
TE	Early Transition Metals	فلزات انتقالی
T _g	Glass Transition Temperature	دمای استحاله شیشه ای
T _L	Liquid Temperature	دمای ذوب
T _X	Crystallization Temperature	دمای تبلور
X	Volume Fraction	کسر حجمی
v	Velocity	سرعت
V	Voltage	ولتاژ
θ	Angle	زاویه
θ _B	Bragg Angle	زاویه براگ
Δ	Quadropole Splitting	شکافتگی چهارقطبی
δ	Mössbauer Line Position	موقعیت خطوط مازباور
δ _w	Domain Wall Width	ضخامت دیواره حوزه
ΔT _X	Width of Supercooled Region	عرض ناحیه فوق تبرید یافته
γ	Gamma Radiation	اشعه گاما
γ _{ex}	Exchange Interaciton Parameter	پارامتر میانکنش تبدالی
γ _{wall}	Domain Wall Interfacial Energy	انرژی فصل مشترک دیوار حوزه
λ	X-Ray Wave Lenght	طول موج اشعه X
λ _S	Saturation Magnetostriction	مغناطواستریکشن اشباع
μ	Permeability	نفوذپذیری
μ _i	Initial Permeability	نفوذپذیری اولیه
π	Pi	عدد پی
χ	Magnetic Susceptibility	پذیرفتاری مغناطیسی
ρ	Density	دانسیته
Å°	Angstrom	آنگسترم
nm	Naometer	نانومتر
Nanoperm	Fe-M-B-Cu Alloys	نانوپرم
Finemet	Fe-Si-B-Nb-Cu Alloys	فاینمت
Hitperm	Fe-Co-M-B-Cu Alloys	هیتپرم
AC	Alternating Current	جریان متناوب
DC	Direct Current	جریان مستقیم
DSC	Differential Scanning Calorimetry	آنالیز حرارتی روبشی
DTA	Differential Thermal Analysis	آنالیز حرارتی تفرقی
CM	Collinear Moment	سامانه های همسو

3DAP	3 Dimensional Atom Probe	پراب اتمی سه بعدی
GFA	Glass Forming Ability	قابلیت تشکیل فاز شیشه ای
HV	Vickers Hardness	سختی سنجی ویکرز
JMA	Johnson-Mehl-Avrami Kinetics	سینتیک جانسون-مهل-آورامی
KP	Kissinger Plot	دیاگرام کیسینجر
SQUID	Superconducting Quantum Interface Device	مغناطیس سنج SQUID
SEM	Scanning Electron Microscope	میکروسکپ الکترونی روبشی
TEM	Transmission Electron Microscopy	میکروسکپ الکترونی عبوری
XRD	X-Ray Diffraction	پراش پرتو ایکس