



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کردستان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

عنوان:

ساخت و بررسی خواص مغناطیسی نانوسیم های آلیاژی آهن-روی

پژوهشگر:

محمد کریمی

استاد راهنما:

دکتر سعید سلطانیان

استاد مشاور:

دکتر آرش سروری

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

تیر ماه ۱۳۸۹

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه کردستان است.

## \*\*\* تعهد نامه \*\*\*

اینجانب محمد کریمی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد دانشگاه کردستان، دانشکده علوم گروه فیزیک تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

محمد کریمی

۱۳۸۹/۴/۱

تقدیم به تمامی پدران و مادرانی که با لقمه‌ی حلال و  
دامن پاک، فرزندان خود را پرورش داده‌اند و به آنان که  
دعای خیرشان بدرقه‌ی راهم بود.

## قدردانی و تشکر

اتمام این پایان نامه را مدیون مدیریت بالا و راهنمایی های استاد گرانقدر جناب آقای دکتر سعید سلطانیان می دانم و از ایشان کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از زحمات بی دریغ استاد مشاورم جناب آقای دکتر آرش سروری قدردانی می‌نمایم. از خانم دکتر نجفی و آقای مهندس آفتابی به دلیل یاری ها و راهنمایی های بی چشمداشت ایشان بسیار سپاسگزارم.

## چکیده

در این پایان نامه نتایج مربوط به ساخت و بررسی خواص نانوسیم های آلیاژی آهن-روی ارائه شده است. این نانوسیم ها به روش الکتروانباشت متناوب و با استفاده از قالب های آلومینای آندی ساخته شده اند. قالب های آلومینای آندی با روش آندایز دو مرحله ای ورقه های آلومینومی با درصد خلوص ۹۹/۹۹۹ ساخته شده اند. ابتدا نمونه ها در یک سلول الکتروشیمیایی حاوی اسید پرکلریک و اتانول در ولتاژ ۲۰ ولت الکتروپولیش شدند. اثر خلوص آلومینیوم بر کیفیت سطح الکتروپولیش شده به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد. نمونه های پولیش شده در اسید اکسالیک ۳٪، مولار و ولتاژ آندایز ۴۰ ولت در دو مرحله آندایز شدند. تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشان می دهند که قالب ها دارای حفره های استوانه ای به قطر متوسط حدود ۳۵ نانومتر و فاصله ی بین حفره ای حدود ۱۰۰ نانومتر در هر حوزه هستند. در مرحله ی بعد با استفاده از این قالب ها، نانوسیم های آلیاژی آهن-روی با تکنیک الکتروانباشت متناوب ساخته می شوند. فرآیند الکتروانباشت در یک سلول الکتروشیمیایی با ولتاژ قله تا قله ۳۰ ولت و فرکانس ۲۰۰ هرتز سینوسی انجام شد. سپس، اثر تابکاری بر خواص نانوسیم ها بررسی شد. نتایج آزمایش های مربوط به اندازه گیری خواص مغناطیسی نانوسیم ها نشان می دهند که مغناطش نانوسیم ها دارای ناهمسانگردی شدیدی است. الگوی پراش پرتوی ایکس نشان می دهد که نانوسیم های ساخته شده ساختار شبکه ی مکعبی مرکز حجمی با راستای (۱۱۰) منطبق بر محور نانوسیم دارند. میدان وادارندگی و نسبت مربعی بودن نانوسیم های آلیاژی آهن-روی با افزایش مقدار روی در محلول های انباشت کاهش، و سپس با تابکاری افزایش می یابند. به عنوان مثال، میدان وادارندگی و نسبت مربعی بودن نانوسیم های ساخته شده از محلول انباشت با نسبت درصد مولی آهن به روی ۹۰ به ۱۰ و فرکانس الکتروانباشت ۲۰۰ هرتز از ۷۳۰ Oe و ۰/۷۲ با تابکاری در دمای ۵۷۰ درجه ی سانتیگراد به ترتیب به ۱۴۲۰ Oe و ۰/۹۴ افزایش یافتند. در پایان اثر فرکانس الکتروانباشت بر خواص مغناطیسی نانوسیم های ساخته شده از محلول انباشت با نسبت درصد مولی آهن به روی ۹۰ به ۱۰ بررسی شد. بهترین مقادیر میدان وادارندگی و نسبت مربعی بودن نانوسیم های آلیاژی آهن-روی تقریباً برابر با ۱۵۸۵ Oe و ۰/۹۹ بدست آمدند که مربوط به نانوسیم های ساخته شده از محلول انباشت با نسبت درصد مولی آهن به روی ۹۰ به ۱۰، فرکانس الکتروانباشت ۱۷۵۰ و نیز تابکاری شده در دمای ۵۷۰ درجه ی سانتیگراد هستند.

کلمات کلیدی:



نانوسیم‌های آلیاژی آهن- روی، اکسید آلومینیوم آندی، الکتروانباشت، میدان وادارندگی، نسبت مربعی  
بودن



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۳	فصل اول: نانوسرهم ها
۳	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ ساخت نانوسرهم
۴	۱-۲-۱ ساخت نانوسرهم به کمک قالب
۹	۲-۲-۱ روش VLS برای ساخت نانوسرهم ها
۹	۳-۲-۱ رشد به کمک لیزر
۱۱	۴-۲-۱ روش های دیگر ساخت
۱۳	۳-۱ دستگاه های مورد استفاده برای مطالعه ی نانوسرهم ها
۱۳	۱-۳-۱ پراش X-Ray
۱۶	۲-۳-۱ میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM)
۱۷	۳-۳-۱ میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM)
۱۸	۴-۳-۱ میکروسکوپ های پروب روبشی
۲۱	۴-۱ خواص ترابری
۲۲	۵-۱ مقاومت مغناطیسی در نانوسرهم ها
۲۲	۶-۱ کاربردها
۲۵	فصل دوم: مروری بر خواص مغناطیسی
۲۵	۱-۲ مقدمه
۲۶	۲-۲ گشتاورهای مغناطیسی
۲۷	۳-۲ دلی مغناطیس و پارامغناطیس
۲۸	۴-۲ حالت منظم مغناطیسی
۳۳	۵-۲ ناهمسانگردی مغناطیسی
۳۴	۱-۵-۲ ناهمسانگردی در بلورهای مکعبی
۳۶	۲-۵-۲ منشاء فیزیکی ناهمسانگردی بلوری
۳۷	۳-۵-۲ ناهمسانگردی شکلی
۳۸	۴-۵-۲ ناهمسانگردی تنش

۳۹	۶-۲ دستگاه‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی
۳۹	۱-۶-۲ مغناطیس سنج نمونه- ارتعاشی (VSM)
۴۱	۲-۶-۲ مغناطیس سنج گرادین (میان) متناوب
۴۲	۳-۶-۲ مغناطیس سنج SQUID
۴۳	۷-۲ حلقه‌ی پسماند
۴۴	۱-۷-۲ حلقه‌های پسماند مورد نیاز برای کاربردهای مختلف
۴۵	۸-۲ نانوذرات مغناطیسی
۴۶	۱-۸-۲ خواص مغناطیسی نانوذرات فلزی و اکسید فلزی
۴۶	۹-۲ اثرات نانو ساختار شدن مواد حجیم روی خواص مغناطیسی
۴۸	۱-۹-۲ سوپر پارامغناطیس
۵۰	۲-۹-۲ ناهمسانگردی تبادل
۵۱	۱۰-۲ نانوسریم‌های مغناطیسی
۵۱	۲-۱۰-۲ تابعی عوامل مختلف بر خواص مغناطیسی نانوسریم‌ها
۵۶	<b>فصل سوم: پیشینه‌ی ساخت قالب آلومینای آندی و نانوسریم‌های آلکالای آهن</b>
۵۶	۱-۳ مقدمه
۵۷	۲-۳ الکتروپولیش
۶۰	۲-۲-۳ تابعی شرایط مختلف الکتروپولیش بر کیفیت سطح آلومینوم
۶۷	۳-۳ آندای
۶۸	۱-۳-۳ ساختار هندسی آلومینای حفره‌دار آندی
۶۹	۲-۳-۳ مکانیسم رشد آلومینای حفره‌دار
۷۳	۳-۳-۳ تابعی شرایط مختلف بر خودآرایی حفره‌ها
۷۷	۴-۳-۳ چگالی جریتن آندای
۷۸	۵-۳-۳ آندای دو مرحله‌ای
۷۹	۴-۳ ساخت آرایه‌های سربل مرتب از نانوحفره‌ها با استفاده از پیش آماده‌سازی آلومینوم
۸۳	۵-۳ الکتروانباشت
۸۳	۱-۵-۳ مکانیسم الکتروانباشت
۸۳	۲-۵-۳ الکتروانباشت DC
۸۴	۳-۵-۳ تکریم‌های برداشتن لایه‌ی سدی و بازگشایی دهانه‌ی حفره‌ها برای الکتروانباشت DC
۸۵	۴-۵-۳ الکتروانباشت AC

۸۷	..... ۵-۵-۳ اثر لایه‌ی سدی
۸۸	..... ۶-۵-۳ نازک‌سازی لایه‌ی سدی برای الکتروانباشت AC
۸۹	..... ۷-۵-۳ الکتروانباشت پالسری
۹۰	..... ۸-۵-۳ تأثیر شرایط مختلف الکتروانباشت AC بر کیفیت رشد نانوسرهم‌ها
۹۵	..... ۶-۳ تابکاری
۹۹	..... ۷-۳ پیش‌بینی ساخت نانوسرهم‌های آلکژدی آهن
۱۰۵	..... فصل چهارم: شرح کارهای آزمایشگاه‌ی برای ساخت نانوسرهم‌های آهن- روی و بررسی خواص مغناطیسی آنها
۱۰۵	..... ۱-۴ مقدمه
۱۰۵	..... ۲-۴ ساخت قالب آلومینای آندی
۱۰۵	..... ۱-۲-۴ آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از الکتروپولیش
۱۰۶	..... ۲-۲-۴ الکتروپولیش
۱۱۲	..... ۳-۲-۴ اثر خلوص آلومینیوم بر الکتروپولیش
۱۱۸	..... ۴-۲-۴ آندانی مرحله‌ی اول
۱۲۰	..... ۵-۲-۴ سونش
۱۲۰	..... ۶-۲-۴ آندانی مرحله‌ی دوم و نازک‌سازی لایه‌ی سدی
۱۲۴	..... ۳-۴ الکتروانباشت
۱۲۷	..... ۱-۳-۴ نتایج و بررسی رفتار مغناطیسی نانوسرهم‌ها
۱۳۴	..... ۴-۴ مطالعه‌ی اثر تابکاری بر ساختار بلوری و خواص مغناطیسی نانوسرهم‌های آهن- روی
۱۳۴	..... ۱-۴-۴ نتایج و بررسی اثر تابکاری بر خواص مغناطیسی نانوسرهم‌ها
۱۳۹	..... ۵-۴ بررسی اثر فرکانس بر میدان وادارندگی و نسبت مربعی بودن نانوسیم‌های $Fe_{90}Zn_{10}$
۱۴۳	..... مراجع

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: تصویر SEM از سطح قالب آلومینای آندی. .... ۵
- شکل ۲-۱: تصویر SEM از غشای پلی کربنات شیار- حکاکی شده با قطر  $1.0 \mu\text{m}$ . .... ۵
- شکل ۳-۱: (a) تصویر TEM از یک نانوسیم چند لایه‌ی Co/Cu. (b) تصویری با بزرگ‌نمایی بالا از نمونه. .... ۷
- شکل ۴-۱: طرح کلی رشد نانوسیم سیلیکون با مکانیسم VLS. .... ۹
- شکل ۵-۱: چیدمان تجربی ساخت نانوسیم Si به کمک کند و کاش لیزر. .... ۱۱
- شکل ۶-۱: طرح کلی از الکتروانباشت لبه پله‌ای برای ساخت نانوسیم‌های مولیبدنوم. .... ۱۲
- شکل ۷-۱: پراش X-Ray توسط صفحات اتمی. .... ۱۴
- شکل ۸-۱: طرح پراش X-Ray از نانوسیم‌های ZnO. .... ۱۵
- شکل ۹-۱: یک مدل پیشرفته‌ی از TEM. .... ۱۶
- شکل ۱۰-۱: تصویری از یک SEM پیشرفته. .... ۱۸
- شکل ۱۲-۱: طرح کلی STM؛ X، Y، و Z جهت‌های حرکت پیزوالکتریک، t تیپ، و S نمونه است. .... ۱۹
- شکل ۱۳-۱: طرح کلی AFM. .... ۲۰

### فصل دوم

- شکل ۱-۲: منحنی اسلیتر-بته نشان‌دهنده تغییر ثابت تبدلی با نسبت  $I_{ab}/I_d$ . .... ۳۰
- شکل ۲-۲: آرایش گشتاورهای مغناطیسی در سلول واحد آنتی فرومغناطیس  $\text{YMn}_2\text{Ge}_2$ . دایره‌های خالی اتم‌های Y، دایره‌های توپر اتم‌های Ge، و پیکان‌ها Mn را نشان می‌دهند. .... ۳۲
- شکل ۳-۲: منحنی‌های مغناطش برای تک‌بلورهای آهن. .... ۳۴
- شکل ۴-۲: منحنی‌های مغناطش برای تک‌بلورهای نیکل. .... ۳۵
- شکل ۵-۲: برهمکنش‌های اسپین- شبکه- اوربیتال. .... ۳۶
- شکل ۶-۲: شبه کره کشیده‌ی مغناطیسی. .... ۳۸
- شکل ۷-۲: تاثیرات تنش‌های کششی (+) و فشاری (-) بر منحنی مغناطش آهن؛ ۵۵. MPa. .... ۳۸

- شکل ۲-۸: طرح کلی مغناطیس سنج نمونه‌گیری ارتعاشی یا VSM . ..... ۴۰
- شکل ۲-۹: منبع تغذیه سمت چپ، وسایل کنترل و اندازه‌گیری سمت راست. .... ۴۰
- شکل ۲-۱۰: طرح کلی از AFGM. .... ۴۵
- شکل ۲-۱۱: حسگر شارمغناطیسی SQUID. .... ۴۷
- شکل ۲-۱۲: طرح حلقه‌ی مغناطش برای یک ماده فرومغناطیسی

شکل ۲-۱۳: شکل‌های هندسی نانوساختار های مختلف : زنجیره‌ی ذرات ریز، (b) نانوسیم نواری، (c) نانوسیم استوانه‌ای، (d) نانونقاط، (e) نانواتصال، (f) نانولوله، (g) پاد نقطه، (h) سطح پله‌ای پیوسته، (j) نانو حلقه، و (k) فیلم‌های نازک نقش‌دار. .... ۴۷

شکل ۲-۱۵: وابستگی مغناطش اشباع فریت روی به اندازه ی ذره که با مغناطش اشباع یک ذره ی ۹۰ nm بهنجار شده است. .... ۴۷

شکل ۲-۱۶: تغییر میدان وادارندگی ذاتی ( $H_{ci}$ ) با قطر ذره. .... ۴۹

شکل ۲-۱۷: حلقه‌ی هسترزیس برای ذرات سوپرپارامغناطیس. .... ۴۹

شکل ۲-۱۸: حلقه‌های هسترزیس برای ذرات کبالت اکسید - اندود در ۷۷K حلقه‌ی (1) از سردکردن نمونه در میدان ۱۰ kOe در جهت مثبت، و (2) حلقه‌ی از سردکردن نمونه در میدان صفر بدست آمده است. .... ۵۰

شکل ۲-۱۹: حلقه‌های هسترزیس مغناطیسی برای نانوسیم های Fe. میدان اعمالی موازی و عمود بر محور نانوسیم است. قطر متوسط نانوسیم‌ها حدود ۱۰ nm است. .... ۵۲

شکل ۲-۲۰: میدان وادارندگی به عنوان تابعی از قطر نانوسیم ( $d_w$ ) برای آهن، کبالت، و نیکل. .... ۵۳

شکل ۲-۲۱: تغییرات میدان وادارندگی با دما برای نانوسیم های آهن با قطرهای مختلف. .... ۵۴

شکل ۲-۲۲: میدان وادارندگی به عنوان تابعی از نسبت طول به قطر نانوسیم. .... ۵۵

## فصل سوم

۱-۳: نمونه‌ای از نحوه‌ی چیدمان تجهیزات برای انجام الکتروپولیش. .... ۵۸

شکل ۳-۲: تصویر AFM از سطح آلومینیوم بعد از الکتروپولیش با محلول اسید پرکلریک-الکل در ۲۰.۷. .... ۵۸

شکل ۳-۳: مکانسیم الکتروپولیش. .... ۵۹

شکل ۳-۴: چگالی جریان آند به عنوان تابعی از ولتاژ سلول برای الکتروپولیش مس. .... ۶۰

شکل ۳-۵: تصاویر AFM از سطح آلومینیوم الکتروپولیش شده با شرایط الکتروپولیش مختلف در ۱۵ °C. .... ۶۱

- شکل ۳-۶: اثر دما روی فاصله ی قله تا قله ساختار سطح برای نمونه های پولیش شده در ولتاژ های ۴۰ V و ۶۰ V..... ۶۲
- شکل ۳-۷: اثر دما روی ارتفاع سطحی نمونه های پولیش شده در ولتاژهای ۴۰ V و ۶۰ V..... ۶۳
- شکل ۳-۸: منحنی های جریان - پتانسیل نمونه های آلومینیومی تهیه شده در محلول های با نسبت های حجمی مختلف از اسید پرکلریک به اتانول در  $27^{\circ}\text{C}$ ..... ۶۴
- شکل ۳-۹: الگویی از تشکیل خطوط با فاصله ی مختلف. مقدار اتانول در فرآیند های a، b، و c یکسان نیست و به ترتیب افزایش یافته است..... ۶۵
- شکل ۳-۱۰: منحنی های جرطن - پتانسیل برای نمونه های آلومینیومی پولیش شده در دما های مختلف با محلولی شامل اسید پرکلریک و اتانول با نسبت ۱ به ۸..... ۶۶
- شکل ۳-۱۱: طرح شمایی از چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه گیری..... ۶۷
- شکل ۳-۱۲: شمایی از ساختار آلومینای آندی متخلخل..... ۶۸
- شکل ۳-۱۳: طرح کلی از مقطع عرضی نانوحفره..... ۶۹
- شکل ۳-۱۴: طرحی از ساختار قالب آلومینای نانوحفره دار..... ۷۰
- شکل ۳-۱۵: منحنی جریان اندازه گیری بر حسب زمان اندازه گیری برای نمونه ی اندازه گیری شده در اسید اکسالیکی..... ۷۱
- شکل ۳-۱۶: منحنی جریان بر حسب زمان اندازه گیری بدست آمده برای نمونه ی اندازه گیری شده در اسید اکسالیکی..... ۷۲
- شکل ۳-۱۷: نمایشی از انتقال یون ها طی فرآیند اندازه گیری..... ۷۳
- شکل ۳-۱۸: فاصله ای بین حفره ای بر حسب ولتاژ اندازه گیری برای اسیدهای مختلف..... ۷۴
- شکل ۳-۱۹: وابستگی قطر حفره (a) و فاصله ی بین حفره ای (b) به غلظت اسید اکسالیکی در ولتاژ اندازه گیری متفاوت..... ۷۵
- شکل ۳-۲۰: چگالی جریان اندازه گیری بر حسب دمای الکترولیت اسید اکسالیکی  $0.3\text{M}$ ..... ۷۶
- شکل ۳-۲۱: وابستگی نظم ساختار حفره ها به زمان اندازه گیری در الکترولیت اسید سولفوریک  $0.5\text{M}$  (a) ۹ دقیقه، (b) ۳۶ دقیقه، (c) ۷۱۰ دقیقه..... ۷۷
- شکل ۳-۲۲: منحنی های جریان - زمان اندازه گیری در اسید سولفوریک در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و با پتانسیل های مختلف..... ۷۸
- شکل ۳-۲۳: طرح کلی از اندازه گیری دو مرحله ای برای تهیه ی آلومینای متخلخل آندی با حفره های مستقیم..... ۷۹

- شکل ۳-۲۴ : طرح کلی از آماده سازی آلومینای متخلخل آندی با آرایش حفره ای ایده آل با استفاده از پیش آماده سازی ..... ۸۰
- شکل ۳-۲۵ : تصویر از نمای سطحی آلومینیوم آندایز شده . تنها در نیمه ی سمت راست از فرآیند پیش آماده سازی استفاده شده است. .... ۸۱
- شکل ۳-۲۶: تصویر SEM نمای عرضی حفره های آلومینای آندی، ساخته شده به کمک فرآیند پیش آماده سازی. .... ۸۳
- شکل ۳-۲۷: ریزنگار SEM از آلومینای متخلخل آندی با دهانه های (a) مربعی و (b) مثلثی. .... ۸۳
- شکل ۳-۲۸: طرز برداشتن لایه ی سدی برای آسان کردن الکتروانباشت DC ..... ۸۵
- شکل ۳-۲۹: طرحی از یک سلول الکتروشیمیایی برای انباشت نانوسیم. .... ۸۶
- شکل ۳-۳۰: داده های EIS از اندازه ی آمپدانس قالب آلومینا ب حسب فرکانس ..... ۸۷
- شکل ۳-۳۱: مدار معادل استفاده شده برای مدل سازی قالب آلومینای نانوحفره دار. .... ۸۸
- شکل ۳-۳۲: ساختار قالب آلومینا بعد از آندایز دو مرحله ای. آندایز دوم در ولتاژهای پایین موجب تشکیل حفره در لایه ی سدی اولیه می شوند. .... ۸۹
- شکل ۳-۳۳: نمایشی از موج سینوسی پالسی با زمان خاموشی ۱۰۰ ms. .... ۹۰
- شکل ۳-۳۴: تصویر SEM از پرشدگی حفره ها توسط نانوسیم های آهن. .... ۹۱
- شکل ۳-۳۵: میانگین سرعت پرشدن حفره ها به عنوان تابعی از PH الکتروولیت. .... ۹۲
- شکل ۳-۳۶: میانگین سرعت پرشده حفره ها به عنوان تابعی از ولتاژ. .... ۹۳
- شکل ۳-۳۷: میانگین سرعت انباشت بر حسب فرکانس در ولتاژ ۲۰۷ شکل ۳-۳۷: میدان وادارندگی بر حسب فرکانس برای نانوسیم های آهن. .... ۹۳
- شکل ۳-۳۸: میدان وادارندگی نانوسیم های آهن بر حسب فرکانس الکتروانباشت. .... ۹۴
- شکل ۳-۳۹: نسبت مربعی بودن نانوسیم های آهن بر حسب فرکانس الکتروانباشت. .... ۹۵
- شکل ۳-۴۰: وادارندگی نانوسیم های Fe به عنوان تابعی از قطر نانوسیم های تابکاری شده در دما های مختلف؛ مقادیر در K ۳۰۰ اندازه گیری شده اند. .... ۹۶
- شکل ۳-۴۱: وادارندگی نانوسیم های Fe به عنوان تابعی از قطر نانوسیم های تابکاری شده در دمای ۳۰۰°C (اندازه گیری در K ۵ انجام شده است). .... ۹۷



- شکل ۳-۴۲: الگوی پراش از نانوسیم‌های با قطر مختلف. ۹۸
- شکل ۳-۴۳: طرح‌های پراش از نانوسیم‌های تابکاری شده در دماهای مختلف. ۹۸
- شکل ۳-۴۴: میدان وادارندگی و ضریب مربعی بر حسب مقدار آهن موجود در نمونه، (II) میدان خارجی موازی با محور نانوسیم و (L) میدان خارجی عمود بر محور نانوسیم. ۹۹
- شکل ۳-۴۵: (a) میدان وادارندگی و (b) نسبت مربعی بودن برای نانوسیم های  $Fe_xCo_{1-x}$  با دماهای تابکاری مختلف. ۱۰۰
- شکل ۳-۴۶: میدان وادارندگی بر حسب درصد آهن موجود در نانوسیم های آلیاژی Fe-Pd قبل و بعد از تابکاری. ۱۰۱
- شکل ۳-۴۷: نسبت مربعی بودن بر حسب درصد آهن موجود در نانوسیم های آلیاژی Fe-Pd قبل و بعد از تابکاری. ۱۰۲
- شکل ۳-۴۸: طرح‌های پراش XRD نانوسیم‌های  $Fe_{60}Pb_{40}$  در (a) دمای اتاق و بعد از تابکاری در دماهای مختلف: (b). ۱۰۳
- شکل ۳-۴۹: اندازه دانه‌های بلوری آهن بر حسب دمای تابکاری. ۱۰۳
- شکل ۳-۵۰: مقدار  $M_r/M_s$  و  $H_c$  برای نانوسیم  $Fe_{60}Pb_{40}$  بر حسب تابعی از دمای تابکاری. ۱۰۴

## فصل چهارم

- شکل ۴-۱: چیدمان آزمایشگاهی برای الکتروپولیش آلومینیوم. ۱۰۶
- شکل ۴-۲: نمودار جریان بر حسب زمان در فرآیند الکتروپولیش. ۱۰۷
- شکل ۴-۳: تصاویر AFM دو بعدی از سطح آلومینیوم قبل از الکتروپولیش. ۱۰۸
- شکل ۴-۴: تصاویر AFM سه بعدی از سطح آلومینیوم قبل از الکتروپولیش؛ تصاویر الف و ب به ترتیب تصاویر سه بعدی متناظر با تصاویر الف و ب از شکل ۳-۴ می‌باشند. ۱۰۹
- شکل ۴-۵: تصاویر AFM دو بعدی از سطح آلومینیوم بعد از الکتروپولیش. ۱۱۰
- شکل ۴-۶: تصاویر AFM سه بعدی از سطح آلومینیوم بعد از الکتروپولیش؛ تصاویر الف و ب به ترتیب تصاویر سه بعدی متناظر با تصاویر الف و ب از شکل ۴-۳ می‌باشند. ۱۱۱
- شکل ۴-۷: تصاویر AFM دو بعدی از سطح آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۶ قبل از الکتروپولیش. ۱۱۳

- شکل ۴-۸: تصاویر AFM سه بعدی از سطح آلومینیوم قبل از الکتروپولیش؛ تصاویر الف و ب به ترتیب تصاویر سه بعدی متناظر با تصاویر الف و ب از شکل ۴-۷ می باشند. .... ۱۱۴
- شکل ۴-۹: (الف) تصاویر AFM دو بعدی و (ب) سه بعدی از سطح آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۶ بعد از الکتروپولیش. .... ۱۱۵
- شکل ۴-۱۰: تصاویر AFM دو بعدی از سطح آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۶ بعد از الکتروپولیش. .... ۱۱۶
- شکل ۴-۱۱: تصاویر AFM سه بعدی از سطح آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۶ بعد از الکتروپولیش؛ تصاویر الف و ب به ترتیب تصاویر سه بعدی متناظر با تصاویر الف و ب از شکل ۴-۹ می باشند. .... ۱۱۷
- شکل ۴-۱۲: نمودار جریان برحسب زمان در ۴۰ دقیقه‌ی ابتدایی اندازه‌گیری مرحله‌ی اول. .... ۱۱۸
- شکل ۴-۱۳: تصویر AFM دو بعدی از آرایش نانوحفره در قالب آلومینای آندی پس از اندازه‌گیری مرحله‌ی اول. .... ۱۱۹
- شکل ۴-۱۴: تصویر AFM دو بعدی از آرایش نانوحفره در قالب آلومینای آندی پس از اندازه‌گیری مرحله‌ی اول. .... ۱۲۰
- شکل ۴-۱۵: سیستم استفاده شده برای اندازه‌گیری مرحله‌ی دوم. .... ۱۲۱
- شکل ۴-۱۶: تغییرات ولتاژ اعمالی بر حسب زمان در مرحله‌ی نازک سازی لایه سدی. .... ۱۲۲
- شکل ۴-۱۷: تغییرات جریان بر حسب زمان در اندازه‌گیری دوم و مرحله‌ی نازک سازی لایه سدی. .... ۱۲۳
- شکل ۴-۱۸: تصویر SEM از آرایش نانوحفره‌ها در سطح قالب آلومینای آندی. .... ۱۲۴
- شکل ۴-۱۹: تصویر SEM از مقطع عرضی قالب آلومینای آندی. .... ۱۲۴
- شکل ۴-۲۰: تصویر SEM نانوسیم‌های  $Fe_{90}Zn_{10}$  با زمان الکتروانباشت ۵ دقیقه. .... ۱۲۶
- شکل ۴-۲۱: تصویر SEM نانوسیم‌های  $Fe_{90}Zn_{10}$  با زمان الکتروانباشت ۵ دقیقه. .... ۱۲۶
- شکل ۴-۲۲: حلقه‌های پسماند نانوسیم Fe. .... ۱۲۶
- شکل ۴-۲۳: حلقه‌های پسماند نانوسیم‌های  $Fe_{100-x}Zn_x$ . .... ۱۲۸
- شکل ۴-۲۴: تغییر میدان وادارندگی و نسبت مربعی بودن نانوسیم های  $Fe_{100-x}Zn_x$  برحسب درصد مولی Zn محلول انباشت. .... ۱۲۸
- شکل ۴-۲۵: تغییر مغناطش در واحد سطح نانوسیم های  $Fe_{100-x}Zn_x$  برحسب درصد مولی Zn محلول انباشت. .... ۱۲۹
- شکل ۴-۲۶: الگوی EDX نانوسیم  $Fe_{90}Zn_{10}$  انباشت شده در قالب آلومینا آندی. .... ۱۳۰
- شکل ۴-۲۷: الگوی پراش نانوسیم آهن قبل از تابکاری. .... ۱۳۱

- شکل ۴-۲۸: الگوی پراش نانوسیم های  $Fe_{100-x}Zn_x$  قبل از تابکاری..... ۱۳۲
- شکل ۴-۲۹: الگوی پراش نانوسیم های  $Fe_{100-x}Zn_x$  قبل از تابکاری..... ۱۳۳
- شکل ۴-۳۰: تغییر میدان وادارندگی نانوسیم های  $Fe_{100-x}Zn_x$  برحسب دمای تابکاری..... ۱۳۵
- شکل ۴-۳۱: تغییر نسبت مربعی بودن نانوسیم های  $Fe_{100-x}Zn_x$  برحسب دمای تابکاری..... ۱۳۵
- شکل ۴-۳۲: حلقه های پسماند نانوسیم Fe قبل و بعد از تابکاری در دمای  $350^{\circ}C$ ..... ۱۳۷
- شکل ۴-۳۳: حلقه های پسماند نانوسیم  $Fe_{95}Zn_5$  قبل و بعد از تابکاری در دمای  $350^{\circ}C$ ..... ۱۳۷
- شکل ۴-۳۴: حلقه های پسماند نانوسیم  $Fe_{90}Zn_{10}$  قبل و بعد از تابکاری در دمای  $350^{\circ}C$ ..... ۱۳۸
- شکل ۴-۳۵: الگوی پراش نانوسیم  $Fe_{95}Zn_5$  قبل و بعد از تابکاری در دمای  $350^{\circ}C$ ..... ۱۳۹
- شکل ۴-۳۶: الگوی پراش نانوسیم  $Fe_{90}Zn_{10}$  قبل و بعد از تابکاری در دمای  $350^{\circ}C$ ..... ۱۳۹
- شکل ۴-۳۷: میدان وادارندگی نانوسیم های آهن بر حسب فرکانس الکتروانباشت..... ۱۴۰
- شکل ۴-۳۸: نسبت مربعی بودن نانوسیم های  $Fe_{90}Zn_{10}$  بر حسب فرکانس الکتروانباشت..... ۱۴۰
- شکل ۴-۳۹: تغییر مغناطش در واحد سطح نانوسیم های  $Fe_{90}Zn_{10}$  برحسب فرکانس الکتروانباشت (قبل از تابکاری)..... ۱۴۱
- شکل ۴-۴۰: تغییر مغناطش در واحد سطح نانوسیم های  $Fe_{90}Zn_{10}$  برحسب فرکانس الکتروانباشت (بعد از تابکاری)..... ۱۴۱

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۵	جدول ۱-۲: انرژی‌های ناهسانگردی بلوری برای جهت‌های مختلف در یک کرسنال بلور.....
۱۲۶	جدول ۱-۴: مواد بکار رفته در تهیه‌ی محلول‌های مورد نیاز برای انباشت با درصدهای مولی متفاوت از آهن و روی.....
۱۳۲	جدول ۲-۴: مقدار ماده‌ی موجود در نمونه‌های $Fe_{90}Zn_{10}$ برحسب درصد وزنی و اتمی.....