دانشکده علوم

پایان نامه دکتری در رشته فیزیک (گرایش ماده چگال)

ساخت نانو ساختارهای آلومینای‌دو و سه بعدی و بررسی خواص فیزیکی و کاربردهای آنها

توسط:

محمد نورمحمدی

استاد راهنما:

دکتر محمود مرادی

تیر ماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب محمد نور محمدی (۸۷۱۲۷۸) دانشجوی رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال دانشکده‌ی علوم

اظهارمی‌کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهارمی‌کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام ونام خانوادگی : محمد نور محمدی

تاریخ و امضا: ۱۳۹۲/۵/۱۵

به نام خدا

ساخت نانو ساختارهای آلومینای دو و سه بعدی و بررسی خواص فیزیکی و کاربردهای آنها

به کوشش

محمد نورمحمدی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی

از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه دکتری

در رشته‌ی:

فیزیک

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته‌ی پایان نامه، با درجه‌ی: عالی

دکتر محمود مرادی، استاد بخش فیزیک (رئیس کمیته).....

دکتر غلامحسین بردبار، استاد بخش فیزیک.....

دکتر حمید نادگران، استاد بخش فیزیک.....

دکتر محمدحسین شیخی، دانشیار بخش مهندسی مخابرات و الکترونیک.....

دکتر سعید دعوت الحق، دانشیار بخش فیزیک.....

دکتر علیرضا کشاورز، دانشیار گروه فیزیک دانشگاه صنعتی شیراز (داور خارج).....

دکتر عبدالناصر ذاکری، استاد بخش فیزیک (داور داخل).....

تیر ماه ۱۳۹۲

تقدیم

این پایان نامه را به عزیزانم پدر و مادر مهربانم، برادرارجمندم و همسر فداکارم که درتمام مراحل زندگی حامی و پشتیبانم بوده اند تقدیم می‌نمایم.

سپاسگزاری

خداوند را سپاس می گویم که به لطف وعنایت بی دریغش موفق به اتمام این دوره تحصیلاتی شده ام. بر خود لازم می دانم از تمامی اساتید بزرگوار و به ویژه اساتید دوره دکتری که در طول تحصیل مرا در کسب علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده اند، تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرانقدر جناب آقای **دکتر محمود مرادی** که بزرگوارانه مسئولیت راهنمایی این تحقیق را پذیرفتند و با دقت و سعه صدر، با راهنمایی های ارزنده و مشاوره های دلسوزانه و نظارت همه جانبه خود، نگارنده را در تالیف این پژوهش یاری رساندند، کمال قدردانی را به عمل می آورم. این حقیر، موفقیت خود را در انجام این تحقیق مرهون راهنمایی های این استاد گرانقدر می داند و هرگونه ضعف و کاستی در آن متوجه تهیه کننده است. در پایان، توفیق روزافزون این عزیز را از ایزد منان مسألت دارم.

از اساتید گرانقدر جناب آقایان دکتر غلامحسین بردبار، دکتر حمید نادگران، دکتر محمدحسین شیخی و دکتر سعید دعوت الحق که بزرگوارانه مسئولیت مشاوره این پژوهش را پذیرفتند کمال تشکر را دارم.

همچنین از تشریک مساعی جناب آقای دکتر علیرضا کشاورز به عنوان استاد داور خارج از دانشگاه صنعتی شیراز و جناب آقای دکتر عبدالناصر ذاکری به عنوان استاد داور داخل که این پایان نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده اند تشکر و قدردانی می کنم. از همکاری صمیمانه جناب آقای سعید به آیین، کارشناس آزمایشگاه لایه نازک بخش فیزیک تشکر می نمایم.

در نهایت از **همسر** مهربانم سرکار خانم دکتر **مریم غفاری** که همواره سنگ صبور من در طی این دوره بودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

ساخت نانو ساختارهای آلومینای دو و سه بعدی و بررسی خواص فیزیکی و کاربردهای آنها

به کوشش

محمد نورمحمدی

در این تحقیق به ساخت، بررسی خواص فیزیکی و کاربردهای نانو ساختارهای آلومینای دو و سه بعدی پرداخته شده است. در ابتدا مروری بر فرایند شکل گیری نانو حفره های آلومینا ارائه شده و سپس نظریه هایی که در این زمینه تا کنون بیان شده معرفی شده است. در قسمت بعد روشهای ساخت نانو ساختارهای سه بعدی آلومینای نانو حفره دار که پیشتر توسعه داده شده اند معرفی شده است. در تحقیق حاضر روشهای آندایز پاششی، سرد کردن مستقیم لایه سدی و کنترل ولتاژ حین نوسانات خودبخودی جریان طراحی و توسعه داده شده و بر اساس آنها نانو ساختارهای سه بعدی آلومینای نانو حفره دار در بازه وسیعی از ولتاژها از ۴۵ الی ۱۷۰ ولت ساخته شده است. با اندازه گیری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و ثبت همزمان جریان و ولتاژ آندایز، رابطه بین عوامل موثر در ساخت و ویژگیهای ساختاری نانوحفره ها تعیین گردیده است. در پایان با استفاده از نانو ساختارهای دو و سه بعدی آلومینای نانو حفره دار، انواع نانو ساختار های دیگر از قبیل نانو ساختار های طلا (نانو میله، نانو غشاء و نانو نقطه)، بلور های نوری، حسگرهای گازی و نانو سیمهای فلزی با قطر متغیر ساخته شده اند.

کلید واژه: نانو ساختارهای آلومینا، نانو حفره، لایه سدی، آندایز پاششی، نوسانات خودبخودی جریان.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ای بر فناوری نانو ۲

۱-۲- مقدمه ای بر فرایند آندایز و مهندسی ساختار آلومینا ۳

فصل دوم: معرفی فرایند آندایز

۲-۱- فرایند شکل گیری نانو حفره های آلومینا ۷

۲-۲- مروری بر کاربرد های نانو حفره های آلومینا ۱۳

فصل سوم: مدل سازی فرایند آندایز

۳-۱- مقدمه ای بر مدل سازی فرایند رشد نانوحفره های آلومینا.....۲۲

۳-۲- مدل سازی بر اساس معادله لاپلاس.....۲۳

۳-۳- مدل سازی بر اساس معادله پواسون ۲۷

۳-۴- مدل سازی بر اساس جریان گرانروی اکسیدی.....۲۸

فصل چهارم: روشهای ساخت نانوحفره های سه بعدی آلومینا

۴-۱- مقدمه ای بر مهندسی ساختار آلومینا ۳۵

۴-۲- مهندسی ساختار آلومینا در آندایز نرم ۳۵

۴-۳- مهندسی ساختار آلومینا با ترکیب آندایز نرم و سخت ۳۸

۴-۴- مهندسی ساختار آلومینا با آندایز پالسی در اسید سولفوریک.....۳۹

۴-۵- مهندسی ساختار آلومینا با آندایز پالسی در اسید اکسالیک.....۴۱

۴-۶- مهندسی ساختار آلومینا با آندایز دوره ای ۴۳

۴-۷- ایجاد ساختار آلومینای سه بعدی در جریانهای نوسان کننده خودبخودی ۴۵

فصل پنجم: ساخت نانوساختار های سه بعدی آلومینا

۵-۱- مقدمه ای بر نانو ساختارهای سه بعدی آلومینای نانو حفره دار ۴۹

۵-۲- ساخت ساختار سه بعدی آلومینای نانو حفره دار به روش پاشش الکترولیت ۴۹

۵-۳- ساخت ساختار سه بعدی آلومینای نانو حفره دار

به روش سرد کردن مستقیم لایه سدی ۵۹

۵-۴- ساخت ساختار سه بعدی آلومینای نانو حفره دار به روش کنترل

ولتاژ آندایز حین نوسانات خودبخودی جریان آندایز.....۷۲

فصل ششم: کاربردهای نانوحفره های آلومینا در ساخت نانو ساختارهای

طلا ، بلور های نوری، حسگرهای گازی و نانو سیمهای فلزی

۶-۱- مقدمه ای بر کاربردهای نانوحفره های آلومینا.....۸۱

۶-۲- ساخت نانو ساختار های طلا ۸۱

۶-۳- ساخت حسگر گازی رطوبت و هیدروژن ۸۸

۶-۴- ساخت بلور نوری ۹۹

۶-۵- ساخت نانوسیم های فلزی با استفاده از قالب آلومینا.....۱۰۲

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....۱۰۸

فهرست منابع ۱۱۳

فهرست جدولها

عنوان **صفحه**

جدول (۵-۱): اطلاعات نمونه های ساخته شده با اسید اکسالیک ۰/۳ مولار
و ترکیب آن با اسید سولفوریک و فسفوریک در ولتاژهای مختلف.....۵۳
جدول (۵-۲): اطلاعات نمونه های ساخته شده با اسید اکسالیک ۰/۳ مولار
و ترکیب آن با اسید فسفوریک در ولتاژهای مختلف.....۶۳
جدول (۵-۳): بازه های ولتاژی رفتار متفاوت جریان آندایز برای نمونه های ساخته شده
با اسید اکسالیک ۰/۴ مولار و ترکیب آن با اسید سولفوریک در غلظت های مختلف.....۷۴

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): نمایش نمادین رشد اکسید حفره‌ای تحت آندایز با پتانسیل ثابت.....۸

شکل (۲-۲): نمایش نمادین از ساختار و عناصر هندسی حفره های آلومینا.....۹

شکل (۲-۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از ساختار لانه زنبوری

نانوحفره های آلومینا ساخته شده در ولتاژ ۲۵ ولت با اسید سولفوریک (a)، ولتاژ ۴۰ ولت

با اسید اکسالیک (b) و ۱۹۵ با اسید فسفریک (C) [۱۱].....۱۰

شکل (۲-۴): نمودار جریان بر حسب زمان برای ولتاژ های مختلف (a)، مقایسه

نرخ رشد حفره ها بر حسب زمان برای آندایز نرم و سخت (b) و

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از حفره ها و دیواره نمونه های ساخته

شده در آندایز نرم ۴۰ ولت و سخت ۱۴۰ ولت بعد از دو ساعت (c) [۲۱].....۱۲

شکل (۲-۵): نمایش نمادین از ساخت نانو سیمهای چند لایه مس-طلا-نیکل

و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (a) و عبوری (b) از آنها [۴۱].....۱۳

شکل (۲-۶): نمایش نمادین از سامانه حسگر موجبر نوری [۴۶].....۱۴

شکل (۲-۷): نمودار اثر تغییرات ضریب شکست بر زاویه طیف بازتابی [۴۶].....۱۵

شکل (۲-۸): تصاویر SEM از نانو سیمهای آلومینا (a) (b) (c)

و آنالیز تفکیک انرژی پرتو x (d) [۴۷].....۱۵

شکل (۲-۹): نمودار اثر تغییرات رطوبت بر ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده

بر اساس نانو میله های آلومینا [۴۷].....۱۶
شکل (۲-۱۰): نمایش نمادین از ساخت غشای نانو حفره دار آلومینا بر روی
بستر سیلیسیم [۴۹].....۱۷
شکل (۲-۱۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از غشای آلومینا
با بزرگنمایی مختلف بر روی زیر لایه سیلیسیم [۴۹].....۱۷
شکل (۲-۱۲): نمودار تغییرات میزان نشت مولکولهای
bovine serum albumin (BSA)
و bovine hemoglobin (BHb) از غشای آلومینایی بر حسب زمان [۴۹].....۱۸
شکل (۲-۱۳): نمایش نمادین از خازنهای فلز، عایق، فلز
بر پایه آلومینای نانو حفره دار [۵۰].....۱۸
شکل (۲-۱۴): (a) نمودار ظرفیت خازنی بر حسب فرکانس برای خازنهای
با لایه سدی آلومینا و بدون آن، (b) جریان نشتی بر حسب ولتاژ اعمالی
برای خازنهای با لایه سدی آلومینا [۵۰].....۱۹
شکل (۲-۱۵): (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نانوساختار
فوق آبگریز آلومینا، (b) با بزرگنمایی بالا، تصویر الحاقی
در شکل (b) بیانگر زاویه تماس قطره آب بر روی سطح فوق آبگریز است [۵۴].....۱۹
شکل (۳-۱): نمایش نمادین از شرایط مرزی در حین رشد.....۲۳
شکل (۳-۲): فرایند رشد نانو حفره های آلومینا با گذشت
زمان (a تا d) و تغییرات جریان آندایز e [۷۰].....۲۵
شکل (۳-۳): فرایند رشد نانو حفره های آلومینا به ازای جریان آندایز مختلف
بعد از ۳۰۰ ثانیه. الگوی اعمالی برای تمام نمونه ها یکسان است [۷۰].....۲۶
شکل (۳-۴): فرایند رشد نانو حفره های آلومینا به ازای الگوهای

اولیه مختلف بعد از گذشت ۷۰۰ ثانیه از زمان آندایز [۷۰].....۲۶
شکل (۳-۵): سطوح هم پتانسیل بدست آمده با اعمال
نظریه لاپلاس (a) و تغییرات شدت میدان الکتریکی بر حسب زاویه (b) [۷۱].....۲۷
شکل (۳-۶): سطوح هم پتانسیل بدست آمده با اعمال
نظریه پواسون (a) و تغییرات شدت میدان الکتریکی بر حسب زاویه (b) [۷۱].....۲۸
شکل (۳-۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه های آندایز شده
در زمانهای مختلف که در آنها لایه ۵ نانومتری از تنگستن برای ردگیری جریان
پلاستیکی لایه نشانی شده. (a) ۱۸۰ ثانیه آندایز شده، ۲۴۰، ۳۵۰ و تصویر
(d) شبیه سازی شده تمامی نمونه ها در بازه زمانی ۳۱.۲ ثانیه است [۷۲].....۲۹
شکل (۳-۸): نمایش نمادین از فرایند تولید تنش در
مرز فلز- اکسید در جریانهای کم (a) و زیاد (b) [۷۳].....۳۰
شکل (۳-۹): نمودار تغییرات تنش بر حسب زمان برای سه جریان مختلف [۷۴].....۳۲
شکل (۳-۱۰): خطوط جریان و توزیع پتانسیل (a) و بردار سرعت
وتنش متوسط (b) بدست آمده در داخل اکسید در ولتاژ ۳۶ ولت [۷۵].....۳۳
شکل (۴-۱): (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع
نانوساختار دندانه دار آلومینا [۷۶]، (b) با بزرگنمایی بالا. (c) تاثیر
تعویض متوالی الکترولیت آندایز از اسید فسفریک به اکسالیک [۷۷].....۳۶
شکل (۴-۲): (a) نمودار ولتاژ اعمالی متناوب، (b) طرح نمادین از اثر اعمال
ولتاژ متناوب، (c) و (d) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع
نانوحفره آلومینا به ازای زمان های t_c مختلف نمودار ولتاژ و (e) نمودار طیف
عبوری بلورهای نوری ساخته شده بر اساس نانوحفره آلومینا [۸۰].....۳۷
شکل (۴-۳): (a) و (b) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

از سطح مقطع نانوحفره آلومینا به ازای توالی متفاوت آندایز
در اسید اکسالیک و فسفریک در ولتاژ ۸۶ ولت [۸۱].....۳۸
شکل (۴-۴): (a) طرح نمادین از اثر اعمال آندایزهای متوالی نرم و سخت،
(b) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نانوحفره آلومینا در
ولتاژ اولیه نرم و سخت متعاقب آن،(c) و (d) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی
از سطح و کف نانوحفره آلومینا و (e) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی
از سطح مقطع نانوحفره آلومینا بواسطه اعمال متوالی آندایز نرم و سخت [۲۱].....۳۹
شکل (۴-۵): (a) طرح نمادین از ولتاژ پالس برای اعمال آندایزهای متوالی
نرم و سخت، (b) نمودار جریان-ولتاژ بر حسب زمان در حین آندایز پالسی [۲۵].....۴۰
شکل (۴-۶): (a) طرح نمادین از مراحل پالس، (b) تصویر میکروسکوپ
الکترونی روبشی از سطح مقطع نانوحفره آلومینا در اثر اعمال
پالس ،(c) و (d) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از سطح مقطع
نانوحفره آلومینا در بزرگنمایی های مختلف [۲۵].....۴۱
شکل (۴-۷): طرح نمادین از شکل پالس اعمالی در آندایز با اسید اکسالیک [۲۸].....۴۲
شکل (۴-۸): (a) و (b) نمودار جریان- بار بر حسب زمان در حین آندایز پالسی
در اسید اکسالیک برای پالسهای نشان داده شده در تصاویر میکروسکوپ
الکترونی روبشی (c) و (d) (مقیاس در هر دو تصویر ۱۰۰۰ نانومتر است) [۲۸].....۴۳
شکل (۴-۹): (a) نمودار جریان-ولتاژ بر حسب زمان در حین آندایز جریان دوره ای
و اثر آن بر ساختار نانوحفره آلومینا (b) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از
پشت لایه سدی نانوحفره ها. (c) و (d) اثر سونش شیمیایی حفره ها
در اسید فسفریک ۵٪ وزنی در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱۴۰ دقیقه،
(e) طرح نمادین از فرایند ایجاد حفره های ثانویه در دیواره آلومینا [۲۷].....۴۴

شکل (۴-۱۰): (a) نمودار جریان بر حسب زمان در حین آندایز در اسید اکسالیک زمانی که همزن از کار افتاده باشد. (b) و (c) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع آلومینا در زمانهای اولیه و بعدی، (d) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع لایه سدی آلومینا [۳۰]..... ۴۶

شکل (۴-۱۱): (a) و (b) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع آلومینا به ترتیب در کمینه و بیشینه جریان آندایز (مقیاس در هر دو تصویر ۲۰۰ نانومتر است) [۳۰]..... ۴۶

شکل (۴-۱۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع آلومینا که دچار دگردیسی پلاستیکی شده [۳۰]..... ۴۷

شکل (۵-۱): نمایش نمادین از راکتور آندایز . (A) پمپ، (B) کاتد، (c) دیواره تفلونی، (D) نگهدارنده و نشت گیر تفلونی نمونه، (E) نمونه آلومینیمی..... ۵۰

شکل (۵-۲): (a) اثر خاموش و روشن شدن پمپ بر رفتار جریان در حین آندایز در اسید اکسالیک ۰/۳ مولار..... ۵۱

شکل (۵-۳): تصاویر SEM از تغییر قطر نانو حفره های آلومینا در اثر اعمال پالس جریان بوسیله پمپ..... ۵۲

شکل (۵-۴): تصاویر SEM گرفته شده از نمونه های ساخته شده با ترکیب اسید سولفوریک و یا فسفوریک با اسید اکسالیک ۰/۳مولار، (a) ۷۲ ولت و اسید سولفوریک ۰/۰۳۵ مولار، (b) ۸۶ ولت و اسید سولفوریک ۰/۰۲ مولار ، (c) ۱۱۰ ولت و اسید سولفوریک ۰/۰۰۵ مولار، (d) ۱۳۰ولت و اسید سولفوریک ۰/۰ مولار و (e) ۱۷۰ولت و اسید فسفوریک ۰/۱ مولار..... ۵۴

شکل (۵-۵): نمودار جریان بیشینه بر حسب ولتاژ آندایز در جریان های اولیه مختلف..... ۵۵

شکل (۵-۶): نمودار قطرحفره ها در جریان های بالا (حین پالس جریان)

و جریان های پایین (خارج از پالس جریان) و نسبت آنها بر حسب ولتاژ،
(b) نمودار حفره شدگی در جریان های بالا و جریان های پایین.....۵۶
شکل (۵-۷): نمودار چگالی جریان- بار بر حسب زمان و تصویر SEM متناسب
با آن از سطح مقطع نانوحفره ها (مقیاس ۳۵۰ نانومتر).....۵۷
شکل (۵-۸): تصویر نمادین از اثر روشن و خاموش شدن پمپ بر حرکت
آنیونها به داخل حفره ها (فلش a) و خروج گرمای واکنش از لایه سدی (فلش b).....۵۸
شکل (۵-۹): اثر پالس جریان آندایز ایجاد شده با پمپ در انحراف راستای
رشد حفره ها برای نمونه های آندایز شده در ولتاژ ۱۱۰ولت (a) و ۸۶ ولت (b).....۵۹
شکل (۵-۱۰): نمایش نمادین از راکتور آندایز برای سرد کردن
مستقیم لایه سدی. (A) پمپ، (B) کاتد، (c) دیواره تفلونی، (D) نگهدارنده،نشت گیر
تفلونی نمونه، (E) نمونه آلومینیمی، (f) حمام سرد و (g) پمپ پاشش محلول سرد.....۶۰
شکل (۵-۱۱): اثر سرد کردن مستقیم لایه سدی بر رفتار جریان در حین آندایز
در اسید اکسالیک ۰/۳ مولار در ولتاژ ۱۴۰ ولت.....۶۱
شکل (۵-۱۲): c و a نمودار چگالی جریان- بار بر حسب زمان و تصویر SEM
متناسب با آن از سطح مقطع نانوحفره ها برای نمونه ساخته شده در اسید اکسالیک
۰/۳ مولار و ولتاژ ۱۴۰ ولت (مقیاس ۴۵۰ نانومتر). b اثر پالس جریان آندایز
ایجاد شده در انحراف راستای رشد حفره ها (مقیاس ۴۰۰ نانومتر).....۶۲
شکل (۵-۱۳): نمودار جریان بیشینه بر حسب ولتاژ آندایز در غلظت های
مختلف اسید فسفریک.....۶۳
شکل (۵-۱۴): d و a نمودار چگالی جریان- بار بر حسب زمان و تصویر SEM
متناسب با آن از سطح مقطع نانوحفره ها برای نمونه ساخته شده در ترکیب اسید
اکسالیک ۰/۳ مولار با اسید فسفریک ۰/۰۵ مولار در ولتاژ ۱۵۵ ولت

(مقیاس ۱۵۰۰ نانومتر). b و c تصاویر با بزرگنمایی بالاتر از تصویر a،
(مقیاس ۸۰۰ نانومتر برای b) و (مقیاس ۴۰۰ نانومتر برای c).....۶۴
شکل (۵-۱۵): d و a نمودار چگالی جریان- بار بر حسب زمان و تصویر SEM
متناسب با آن از سطح مقطع نانوحفره ها برای نمونه ساخته شده در ترکیب اسید
اکسالیک ۰/۳ مولار با اسید فسفریک ۰/۱ مولار در ولتاژ ۱۷۰ ولت
(مقیاس ۱۵۰۰ نانومتر). b و c تصاویر با بزرگنمایی بالاتر از تصویر a،
(مقیاس ۸۰۰ نانومتر برای b) و (مقیاس ۴۰۰ نانومتر برای c) ۶۵
شکل (۵-۱۶): (a) و (b) تصاویر SEM از سطح مقطع آلومینا به ترتیب در کمینه
(نقطه p در شکل (۵-۱۱)) و بیشینه (نقطه k در شکل (۵-۱۱)) جریان آندایز در
ولتاژ ۱۴۰ ولت (مقیاس در هر دو تصویر ۱۵۰ نانومتر است). (c) و (d) تصاویر SEM
از سطح مقطع آلومینا به ترتیب در کمینه و بیشینه جریان آندایز در ولتاژ ۱۵۵ ولت
(مقیاس در هر دو تصویر ۱۸۰ نانومتر است). (e) و (f) تصاویر SEM از سطح مقطع
آلومینا به ترتیب در کمینه و بیشینه جریان آندایز در ولتاژ ۱۷۰ ولت
(مقیاس در هر دو تصویر ۲۲۵ نانومتر است).....۶۶
شکل (۵-۱۷): نمودار زمان پاسخ و زمان بازیابی بر حسب ولتاژ آندایز در
غلظت های مختلف اسید فسفریک.....۶۷
شکل (۵-۱۸): (a) تصویر SEM از سطح پشت لایه سدی که بیانگر وجود حوزه های
منظم و عیوب بین آنها است. (b) تصویر SEM با بزرگنمایی بیشتر.....۶۹
شکل (۵-۱۹): (a) تصویر SEM از سطح مقطع آلومینا زمانی که جریان در بیشینه
مقدار خود است و حفره ها شروع به انحراف از راستای اولیه خود کرده اند (ولتاژ
آندایز ۱۵۵ ولت). (b) بردار سرعت حرکت اکسید و تنش متوسط در آن [۷۵].....۷۰
شکل (۵-۲۰): تصاویر SEM گرفته شده از نمونه های ساخته شده با ترکیب اسید

سولفوریک و یا فسفوریک با اسید اکسالیک ۰/۳مولار، (a) ۸۶ ولت و اسید سولفوریک ۰/۰۲ مولار، (b) ۱۱۰ ولت و اسید سولفوریک ۰/۰۰۵ مولار ، (c) ۱۴۰ ولت، (d) ۱۵۵ولت و اسید فسفریک ۰/۰۵ مولار و (e) ۱۷۰ولت و اسید فسفوریک ۰/۱ مولار.....۷۱

شکل (۵-۲۱): منحنی تنش متوسط بر حسب ولتاژ آندایز در حالتی که بر نمونه جریان پالسی اعمال شده و یا جریان در حالت پایا است.....۷۲

شکل (۵-۲۲): a نمودار چگالی جریان بر حسب زمان و b تصویر SEM متناسب با نمونه آندایز شده در ولتاژ ۴۷/۵ از سطح مقطع نانوحفره ها. در هر سه ولتاژ نمونه ها در ترکیب اسید اکسالیک ۰/۴ مولار با اسید سولفوریک ۰/۰۸ مولار ساخته شده اند (مقیاس ۵ میکرومتر).....۷۳

شکل (۵-۲۳): a نمودار چگالی جریان بر حسب زمان، b و c تصویر SEM متناسب با نمونه آندایز شده در ولتاژ ۴۷/۵ از سطح مقطع نانوحفره ها. نمونه در ترکیب اسید اکسالیک ۰/۴ مولار با اسید سولفوریک ۰/۰۸ مولار ساخته شده است (مقیاس b ۱ میکرومتر و c ۲۰۰ نانومتر).....۷۵

شکل (۵-۲۴): a نمودار چگالی جریان- ولتاژ بر حسب زمان، b تصویر SEM متناسب با نمونه آندایز شده تحت شرایط نمودار جریان ولتاژ شکل a. نمونه در ترکیب اسید اکسالیک ۰/۴ مولار با اسید سولفوریک ۰/۰۸ مولار ساخته شده است (مقیاس b ۱۰ میکرومتر).....۷۶

شکل (۵-۲۵): a نمودار چگالی جریان- ولتاژ بر حسب زمان، b و c تصویر SEM متناسب با نمونه آندایز شده تحت شرایط نمودار جریان ولتاژ شکل a. نمونه در ترکیب اسید اکسالیک ۰/۴ مولار با اسید سولفوریک ۰/۰۸ مولار ساخته شده است (مقیاس b ۱۰ میکرومتر و c ۲۰۰ نانومتر). d و f تصویر SEM از سطح آلومینیم بعد از حذف الومینا برای نمونه هایی که جریان آندایز آنها در نقاط k و m قطع

شده است. e و g تصاویر FFT که از تصاویر d و f به ترتیب تهیه شده اند.....۷۷
شکل (۵-۲۶): a نمودار چگالی جریان- ولتاژ بر حسب زمان، b و c تصویر SEM متناسب با نمونه آندایز شده تحت شرایط نمودار جریان ولتاژ شکل a. نمونه در ترکیب اسید اکسالیک ۰/۴ مولار با اسید سولفوریک ۰/۰۷ مولار ساخته شده است (مقیاس b ۱۰ میکرومتر و c ۲۰۰ نانومتر). d و f تصویر SEM از سطح آلومینیم بعد از حذف آلومینا برای نمونه هایی که جریان آندایز آنها در نقاط k و m قطع شده است. e و g تصاویر FFT که از تصاویر d و f به ترتیب تهیه شده اند.....۷۹
شکل (۶-۱): تصویر نمادین از رشد نانو میله ها و نانو حفره های طلا. الف:۱ افزایش قطر حفره های آلومینای شکل گرفته در آندایز سخت، ۲ حذف زیر لایه آلومینیم، ۳ حذف لایه سدی، ۴ لایه نشانی تبخیر گرمایی طلا، ۵ چسباندن لایه طلا به زیر لایه شیشه ای، ۶ حذف لایه آلومینا ب: ۱ حذف لایه آلومینای شکل گرفته در آندایز سخت، ۲ آندایز نرم، ۳ افزایش قطر حفره های آلومینای شکل گرفته در آندایز نرم، ۴ لایه نشانی تبخیر گرمایی طلا، ۵ چسباندن لایه طلا به زیر لایه شیشه ای، ۶ حذف لایه آلومینا و آزاد کردن نانو میله ها.....۸۳
شکل (۶-۲): (a) و (b) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از حفره ها قبل و بعد از حذف لایه سدی و باز شدن حفره ها. (c) و (d) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانو حفره های طلا.....۸۴
شکل (۶-۳): تصویر AFM از الگوی ایجاد شده بر روی بستر آلومینیمی.....۸۵
شکل (۶-۴): نمودار جریان- بار فرآیند آندایز در ۱۰۴ ولت آندایز نرم مرحله دوم.....۸۶
شکل (۶-۵): (a) و (b) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از حفره ها بعد از آندایز مرحله دوم. (c) و (d) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانو میله های طلا با طولهای مختلف.....۸۶

شکل (۶-۶): نانو نقطه های طلا بعد از حذف آلومینا که به خوبی نظم شش وجهی
نانوحفره را به خود گرفته است.....۸۸
شکل (۶-۷): شکل SEM از اکسید قلع لایه نشانی شده بر روی نانوحفره های آلومینا.....۹۲
شکل (۶-۸): نمایش نمادین از سامانه اندازه گیری رطوبت.....۹۳
شکل(۶- ۹): طرح مداری سامانه اندازه گیری رطوبت.....۹۴
شکل (۶-۱۰): پاسخ حسگر به مقادیر مختلف رطوبت در دمای اتاق.....۹۶
شکل (۶-۱۱): پاسخ حسگر در دمای کار ۲۵۰ درجه سانتیگراد و با اعمال ولتاژ
۴ ولت هنگامی که رطوبت از ۳٪ به ۱۳٪ تغییر می کند.....۹۷
شکل (۶-۱۲): پاسخ حسگر به مقادیر مختلف گاز هیدروژن.....۹۸
شکل (۶-۱۳): پاسخ حسگر به ppm ۱۵۰۰ گاز هیدروژن در دمای
کار ۳۲۰ درجه سانتیگراد.....۹۸
شکل (۶-۱۴) : نمودار چگالی جریان و ولتاژ بر حسب زمان، برای نمونه‌ی ساخته
شده تحت ولتاژ پالسی.....۱۰۰
شکل (۶-۱۵): تصاویرمیکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از (الف) سطح مقطع
نمونه ،(ب) تصویر با بزرگ نمایی بالاتر از ناحیه ای که
تحت آندایز پالسی قرار گرفته است.....۱۰۰
شکل (۶-۱۶): نمودار طیف عبوری نمونه های ساخته شده در پالسهای متفاوت ولتاژ.....۱۰۱
شکل (۶-۱۷): فرآیند آندایز نرم، سخت و نازک سازی لایه سدی.....۱۰۳
شکل (۶-۱۸): منحنی‌های جریان و پتانسیل لحظه ای اعمال شده
در فرآیند الکتروانباشت.....۱۰۴
شکل (۶-۱۹): نانو سیم های نقره آزاد شده از داخل نانو حفره آلومینا
با بزرگ نمایی کوچک (a) و بزرگ (b).....۱۰۵