

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده فنی و مهندسی  
گروه مواد و متالورژی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد  
گرایش خوردگی و حفاظت از مواد

---

ارزیابی پتانسیل زقا و تاثیر آن در همنشست ذرات در حمام آبکاری

نیکل

---

استاد راهنما :  
دکتر عبدالحمید جعفری

مؤلف :  
علی لطفی

تیر ماه ۱۳۸۹



این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

**گروه مواد و متالورژی**

**دانشکده فنی و مهندسی**

**دانشگاه شهید باهنر کرمان**

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: علی لطفی

استاد راهنما: دکتر عبدالحمید جعفری

استاد مشاور:

داور ۱: دکتر صرافی

داور ۲: دکتر حسینی

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه دفاع:

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: مهندس اسماعیل دره زرشکی

**حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.**

**تقدیم به:**

**پدر و مادر مهربان به خواهر و برادران عزیزم و همسر خوب  
و خانواده محترم همسرم.**

## تشکر و قدردانی:

خدای بزرگ را شاکرم که در طول مدت تحصیل همواره یاری دهنده من بوده و به من صبر و شکیبایی در برابر مشکلات و ناملايمات عنایت فرمود.

پاک‌ترین و صادقانه‌ترین سپاس و قدردانی خود را از **پدر** و **مادر** فداکارم دارم که دعای خیرشان همواره، همراه و پشتیبان من بودند و دریای بیکران مهر خویش را بی دریغ بر من ارزانی داشتند. از **خواهر** و **برادران** عزیزم از صمیم قلب تشکر می‌نمایم. از **همسر**م که جملات از تشکر صبر او قاصرند.

برترین سپاس‌ها را تقدیم اساتید ارجمندم جناب آقای **دکتر عبدالحمید جعفری** و آقای **مهندس علیرضا نصر اصفهانی** می‌نمایم که در انجام این پایان‌نامه صمیمانه مرا یاری فرمودند. از تمامی اساتید محترم بخش مواد و متالورژی دانشگاه شهید باهنر کرمان و از گروه مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر که تجهیزات آزمایشگاهی را بصورت رایگان در اختیار من قرار دادند و از جناب آقای **دکتر صرافی** و جناب آقای **دکتر حسینی** که زحمت داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند کمال تشکر را دارم.

در نهایت جا دارد که از دوستان گرامی آقایان مهندس جمال صفری، محمد اسکندری، مجید آریافر، غفار محمدی، سلمان علمی، محمدرضا کمالی، بهاءالدین نیک‌روز، محمد حسین شفیعی، حسین دین‌پناه، سعید کرمی، رضا قربانی، تقی قربانزاده، امیرفرزانه، احمد رضا نصر اصفهانی، جواد دانشی، آرشداده‌خانی، سعید کمیزی و دیگر کسانی که در طول دوره‌ی کارشناسی ارشد همواره مورد لطف ایشان بوده‌ام صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

علی لطفی

تیر ماه ۸۹

## چکیده

آبکاری الکتریکی منقطع یک روش سودمند در تولید پوشش نانو کامپوزیت زمینه فلزی است. پارامترهای زیادی که در روش آبکاری الکتریکی وجود دارد طیف گسترده‌ای از خواص را برای پوششهای تولید شده ایجاد می‌کند. پتانسیل زتا یکی از عوامل موثر در پخش یکنواخت ذرات سرامیکی در زمینه‌ی فلزی است. در این پژوهش نانو کامپوزیت زمینه‌ی نیکلی با ذرات تقویت کننده نانو سیلیس آمورف تولید و اثر پتانسیل زتا بر میزان هم‌نشست ذرات و نحوه پخش آن مورد بررسی قرار گرفت. پوششهای کامپوزیتی از هم‌نشست ذرات در حمام واتر به روش آبکاری منقطع بر روی زیر لایه مس بدست آمد. حمام در حین عملیات آبکاری توسط یک دستگاه همزن التراسونیک تحت تلاطم قرار داشت. مورفولوژی سطح با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM بررسی شد و برای تعیین ترکیب شیمیایی پوشش از روش آنالیز خطی EDS استفاده شد. فازهای تشکیل شده در پوشش با استفاده از تفرق اشعه ایکس XRD تعیین شد و اندازه کریستالی نیکل در پوشش توسط روش دی و شرر محاسبه شد. نتایج SEM نشان داد که وجود سیلیس در پوشش باعث صافی و انسجام پوشش شده و نقش جوانه زایی و عامل کاهش اندازه دانه‌ی نیکل است. همچنین نتایج XRD ایجاد یک پوشش نانومتری با اندازه‌ی دانه‌هایی در محدوده‌ی ۳۲ تا ۶۲ نانومتر را نشان داد. همچنین پتانسیل زتا پودر نانو سیلیس با استفاده از روش الکتروفوریتیک در محدوده ۱۲-۱ pH بوسیله تیتراسیون محلول با استفاده از اسید سولفوریک  $H_2SO_4$  (۰/۱M) و سود سوزآور NaOH (۰/۱M) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که پتانسیل زتا ذرات نانو سیلیس در صورت استفاده از همزن التراسونیک در محدوده‌های pH پایینتر از ۶ کمتر و در pH بالاتر از ۶ بیشتر از حالت هموزن شده بصورت مکانیکی است. نتایج آنالیز عنصری بدست آمده و مقدار پتانسیل زتای ذرات بر روی مقدار هم‌نشست ذرات در پوشش موثر و با کنترل پارامترهای آبکاری می‌توان میزان ذرات تقویت کننده در پوشش را کنترل کرد.

کلمات کلیدی: پتانسیل زتا، نانو کامپوزیت زمینه نیکل، آبکاری منقطع، همزن التراسونیک، نانو

سیلیس

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵	تشکر و قدردانی.....
و	چکیده.....
ز	فهرست مطالب.....
ک	فهرست شکل ها.....
ق	فهرست جدول ها.....
۱	<b>فصل یک: مقدمه.....</b>
۵	<b>فصل دو: مروری بر منابع.....</b>
۶	۱-۲ مقدمه.....
۶	۲-۲ همنشست در آبرکاری الکتریکی.....
۶	۳-۲ خواص پوششهای نیکل.....
۷	۴-۲ حمامهای پوشش نیکل.....
۷	۱-۴-۲ حمامهای اصلی پوشش نیکل.....
۸	۵-۲ متغیرهای عملی حمام.....
۸	۱-۵-۲ نوع جریان و دانسیته جریان.....
۹	۲-۵-۲ دما.....
۹	۳-۵-۲ زمان.....
۱۰	۴-۵-۲ تلاطم.....
۱۱	۵-۵-۲ نقش ترکیب شیمیائی حمام.....
۱۲	۶-۲ پوششهای کامپوزیتی زمینه نیکلی به روش آبرکاری.....
۱۳	۱-۶-۲ تکنیکهای همنشست ذرات به روش آبرکاری الکتریکی.....
۱۴	۲-۶-۲ تاثیر پارامترهای مختلف در همنشست ذرات مختلف به روش آبرکاری الکتریکی.....
۱۶	۳-۶-۲ تاثیر اندازه ذرات و دانه بندی آنها بر خواص لایه همنشست شده.....

۱۶	۴-۶-۲ تاثیر همنشست ذرات مختلف به روش آبرکاری الکتریکی در سختی.....
۱۷	۷-۲ پدیده جذب در محلولهای کلئیدی.....
۱۹	۱-۷-۲ بار سطح (Surface Charge).....
۱۹	۱-۱-۷-۲ جذب شیمیایی.....
۱۹	۲-۱-۷-۲ قابلیت تجزیه شدن ترجیحی یونها (هیدراتاسیون سطحی) ...
۲۰	۳-۱-۷-۲ جانشینی شبکه ای (Lattice Substitution).....
۲۰	۲-۷-۲ مدل بارها و پتانسیلها در نزدیکی سطح.....
۲۲	۳-۷-۲ سطح برش، پتانسیل الکتروستتیک و دانسیته بار سطح.....
۲۳	۸-۲ پتانسیل زتا و مشکلات محاسبه آن.....
۲۵	۹-۲ تئوری مقدماتی پدیده الکتروستتیک ( Electro Kinetics Phenomenon ) ..... (EKP)
۲۶	۱۰-۲ اندازه گیری پتانسیل زتا با روش الکترو اسمزی (Electro-osmosis).....
۲۷	۱۱-۲ اندازه گیری پتانسیل زتا با روش الکتروفورسیس (Electrophoresis Method)
۲۸	۱۲-۲ هدایت سطح و پدیده‌ی الکتروستتیک.....
۳۱	۱-۱۲-۲ محاسبه ka برای سوسپانسیون.....
۳۲	۱۳-۲ اندازه گیری پتانسیل زتا با روش جریان جاری (Streaming Current).....
۳۴	۱۴-۲ اندازه گیری پتانسیل زتا با روش پتانسیل ته نشینی.....
۳۴	۱۵-۲ تکنیک حرکت مرزها.....
۳۴	۱۶-۲ تکنیک انتقال جرم.....
۳۵	۱۷-۲ میکرو الکتروفورسیس میکروسکوپی (مرئی).....
۳۶	۱۸-۲ تکنیک تفرق نور الکتروفورتیک ( Electrokinetic Light Scattering. ) ..... (ELS)
۳۷	۱-۱۸-۲ ویژگی های نمونه های قابل بررسی.....
۳۷	۱-۱-۱۸-۲ ترکیب نمونه ها.....
۳۷	۲-۱-۱۸-۲ محدوده ی اندازه نمونه ها.....



۳۷	..... ۳-۱-۱۸-۲ قابلیت هدایت الکتریکی نمونه
۳۷	..... ۳-۱-۱۸-۲ محدوده ویسکوزیته نمونه
۳۷	..... ۴-۱-۱۸-۲ قابلیت نفوذپذیری
۳۸	..... ۵-۱-۱۸-۲ اثر پدیده فلورسنس
۳۸	..... ۲-۱۸-۲ آماده سازی نمونه
۳۸	..... ۱۹-۲ تعیین نقطه ایزو الکتریک IEP
۳۸	..... ۲۰-۲ کاربردهای پتانسیل زتا
۴۰	..... ۲۱-۲ نمودارهای پتانسیل زتا برای ذرات مختلف
۴۲	..... <b>فصل سه: مواد و روش تحقیق</b>
۴۳	..... ۱-۳ مقدمه
۴۳	..... ۲-۳ روش آبکاری
۴۳	..... ۱-۲-۳ حمامهای واتر نیکل
۴۴	..... ۲-۲-۳ آماده سازی حمام و مشخصات حمام واتر
۴۴	..... ۳-۳ مواد مورد استفاده
۴۴	..... ۴-۳ مراحل آماده سازی نمونه های فلزی
۴۵	..... ۵-۳ مشخصات آند
۴۶	..... ۶-۳ مدار آبکاری و نحوه ی اعمال جریان
۴۶	..... ۷-۳ پارامترهای موثر در فرایند آبکاری
۴۷	..... ۸-۳ ایجاد تلاطم با استفاده از سلول پیزوالکتریک التراسونیک
۴۸	..... ۷-۳ آزمایشات انجام شده بر روی پوششها
۴۸	..... ۱-۷-۳ اندازه گیری میکرو سختی
۴۹	..... ۲-۷-۳ آنالیز تفرق اشعه ایکس (XRD)
۴۹	..... ۳-۷-۳ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۴۹	..... ۴-۷-۳ آزمایش امپدانس و پلاریزاسیون الکتروشیمیایی
۵۰	..... ۸-۳ آزمایش اندازه گیری پتانسیل زتا

۵۰	..... ۹-۳ تبدیل درصد اتمی به وزنی و حجمی
۵۲	..... <b>فصل چهار: نتایج</b>
۵۳	..... ۱-۴ نتایج آزمایش بررسی عنصری توسط EDS
۵۶	..... ۲-۴ تصاویر مورفولوژی سطح میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
۶۲	..... ۳-۴ بررسی پخش ذرات
۶۳	..... ۴-۴ نتایج آزمایش تفرق اشعه ایکس XRD
۶۷	..... ۵-۴ نتایج آزمایش امپدانس و پلاریزاسیون الکتروشیمیایی
۷۴	..... ۶-۴ نتایج بدست آمده از آزمایشهای اندازه گیری پتانسیل زتا
۷۸	..... ۷-۴ نتایج بدست آمده از آزمایشهای میکروسختی سنجی
۷۹	..... <b>فصل پنج: بحث</b>
۹۳	..... <b>فصل شش: نتیجه گیری</b>
۹۵	..... <b>فصل هفت: منابع</b>
	..... چکیده انگلیسی

## فهرست شکلها

### عنوان شکل

صفحه

- شکل ۱-۲ تغییرات جریان نسبت به زمان در جریان پالسی ..... ۸
- شکل ۲-۲ شماتیک مدار آبکاری و نحوه اتصال آند و کاتد در روش همنشست ته نشینی (SCD) Sediment Co-Deposition (a) و همنشست معمول الکتریکی (CECD) Conventional Electro Co-Deposition (b) (۱) منبع توان، (۲) آند، (۳) کاتد، (۴) محلول آبکاری، (۵) ذرات و (۶) میله تهیج همزن مغناطیسی ..... ۱۳
- شکل ۳-۲ شماتیک حرکت نابجایی در هنگام رسیدن به ذرات پخش شده و عبور از آنها ..... ۱۷
- شکل ۴-۲ نمایی شماتیک از پدیده‌ی جذب سطحی ..... ۱۸
- شکل ۵-۲ نمایش شماتیکی رشد بار سطحی در سطح کوارتز (a) سطح شکست (b) جذب سطحی آب (c) تفکیک (تجزیه) شدن یون هیدروژن از گروه سیلانول ..... ۱۹
- شکل ۶-۲ نمای شماتیک مدل‌های مختلف دولایه‌ی الکتریکی ..... ۲۱
- شکل ۷-۲ نمای شماتیک لایه استرن به زیر تقسیم‌های لایه هلموتز داخلی IHL و صفحه هلموتز داخلی IHP و یک لایه هلموتز بیرونی OHL و صفحه هلموتز بیرونی OHP ..... ۲۱
- شکل ۸-۲ شماتیک دستگاه اندازه‌گیری الکترواسموزی ۱- جرم متخلخل که از داخل آن سیلان محلول صورت می‌پذیرد ۲- الکترودهای اندازه‌گیری ۳- الکترودهای عمل‌کننده ۴- ولت‌متر ۵- لوله موین ۶- منبع نیرو ..... ۲۷
- شکل ۹-۲ نمای شماتیک دستگاه اندازه‌گیری الکترو فورسیس ۱- لوله استوانه‌ای شامل قسمتهای از سوسپانسیون ۲- الکترودهای تولید کننده جریان مستقیم ۳- منبع توان ۴- میکروسکوپ برای تعیین سرعت ذرات ۵- دستگاه اندازه‌گیری پتانسیل ..... ۲۸
- شکل ۱۰-۲ شماتیک وسایل برای دستگاه اندازه‌گیری پتانسیل جاری ۱- جرم متخلخل که از داخل آن سیلان محلول صورت می‌پذیرد ۲- الکترودهای اندازه‌گیری ۳- دستگاه اندازه‌گیری پتانسیل ۴- اندازه‌گیری فشار و تحریک کننده ..... ۳۳

- شکل ۲-۱۱ شماتیک وسایل برای دستگاه اندازه گیری پتانسیل ته نشینی ۱- ظرف جمع- ۳۴  
کننده با امکان خروج ذرات حرکت کننده به سمت الکترودها ۲- الکترودهای کاری ۳-  
الکترودهای اندازه گیری ۴- ظرف سوسپانسیون ۵- منبع توان ۶- دستگاه اندازه گیری  
پتانسیل.....
- شکل ۲-۱۲ نمودار تغییرات پتانسیل زتا نسبت به تغییرات pH در حمام واتز برای ذرات  
ZrO<sub>2</sub> با قطر ۴۰ و ۲۰۰ نانومتر..... ۴۰
- شکل ۲-۱۳ نمودار تغییرات پتانسیل زتا نسبت به تغییرات pH در حمام واتز برای ذرات  
SiC با قطر ۱۰۰nm نوع A و قطر ۰/۸μm نوع B..... ۴۰
- شکل ۲-۱۴ نمودار تغییرات پتانسیل زتا نسبت به تغییرات pH برای ذرات TiO<sub>2</sub>..... ۴۱
- شکل ۲-۱۵ نمودار تغییرات پتانسیل زتا نسبت به تغییرات pH برای ذرات SiC در  
دو غاب با اندازه مش ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰..... ۴۱
- شکل ۳-۱ شماتیک مدار آبکاری و نحوه اتصال آند و کاتد (۱) منبع توان، (۲) آند،  
(۳) کاتد، (۴) محلول آبکاری، (۵) ذرات و (۶) الکترودهمزن التراسونیک..... ۴۵
- شکل ۴-۱ آنالیز کیفی پوشش نیکل خالص با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی  
SEM روش EDX حاصل از حمام وات و حمامهای با غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر..... ۵۳
- شکل ۴-۲ آنالیز کیفی پوشش کامپوزیتی نیکل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی  
رویشی SEM روش EDX حاصل از حمام وات با نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر... ۵۳
- شکل ۴-۳ مقدار درصد اتمی عنصر سیلیسیم در پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام  
وات حاوی نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای مختلف..... ۵۴
- شکل ۴-۴ مقدار درصد اتمی عنصر نیکل در پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام وات  
حاوی نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای مختلف..... ۵۴
- شکل ۴-۵ مقدار درصد اتمی عنصر اکسیژن در پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام  
وات حاوی نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای مختلف..... ۵۵
- شکل ۴-۶ مقدار درصد وزنی سیلیس در پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام وات  
حاوی نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای مختلف..... ۵۵
- شکل ۴-۷ مقدار درصد وزنی نیکل در پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام وات حاوی  
..... ۵۵

- ..... نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای مختلف.....
- ۵۶ شکل ۴-۸ مقدار درصد حجمی نیکل در پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام واتر حاوی نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای مختلف.....
- ۵۶ شکل ۴-۹ مقدار درصد حجمی سیلیس در پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام واتر حاوی نانو سیلیس آمورف ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای مختلف.....
- ۵۷ شکل ۴-۱۰ تصویر SEM از نمونه ۸ از حمام واتر ۱۰ g/l پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $4 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنماییهای (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر.....
- ۵۷ شکل ۴-۱۱ تصویر SEM از نمونه ۱۰ از حمام واتر ۱۰ g/l پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنماییهای (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر.....
- ۵۷ شکل ۴-۱۲ تصویر SEM از نمونه ۱۱ از حمام واتر ۱۰ g/l پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $1 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنماییهای (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر.....
- ۵۸ شکل ۴-۱۳ تصویر SEM از نمونه ۱۶ از حمام واتر ۲۰ g/l پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $4 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنماییهای (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر.....
- ۵۸ شکل ۴-۱۴ تصویر SEM از نمونه ۱۷ از حمام واتر ۲۰ g/l پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $3 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنماییهای (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر.....
- ۵۸ شکل ۴-۱۵ تصویر SEM از نمونه ۱۸ از حمام واتر ۲۰ g/l پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنماییهای (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر.....
- ۵۹ شکل ۴-۱۶ تصویر SEM از نمونه ۲۲ از حمام واتر دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  با فرکانس ۵۰ در بزرگنماییهای (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر.....
- ۵۹ شکل ۴-۱۷ تصویر SEM از نمونه ۲۲ از حمام واتر دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  در

- بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر بعد از دو هفته .....
- شکل ۴-۱۸ تصویر SEM از نمونه ۲۴ از حمام واتر دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  با فرکانس ۵۹ در بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر .....
- شکل ۴-۱۹ تصویر SEM از نمونه ۲۵ از حمام واتر دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  با فرکانس ۶۰ در بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر .....
- شکل ۴-۲۰ تصویر SEM از نمونه ۲۶ از حمام واتر  $40 \text{ g/l}$  پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $4 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر .....
- شکل ۴-۲۱ تصویر SEM از نمونه ۲۶ از حمام واتر  $40 \text{ g/l}$  پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $4 \text{ A/dm}^2$  بعد از دو هفته در بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر .....
- شکل ۴-۲۲ تصویر SEM از نمونه ۲۸ از حمام واتر  $40 \text{ g/l}$  پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $3 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر .....
- شکل ۴-۲۳ تصویر SEM از نمونه ۳۲ از حمام واتر  $40 \text{ g/l}$  پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر .....
- شکل ۴-۲۴ تصویر SEM از نمونه ۳۴ از حمام واتر  $40 \text{ g/l}$  پودر نانو  $\text{SiO}_2$  آمورف با دانسیته جریان  $1 \text{ A/dm}^2$  در بزرگنمایی‌های (a) ۱۰۰۰، (b) ۳۰۰۰ و (c) ۵۰۰۰ برابر .....
- شکل ۴-۲۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM در بزرگنمایی ۵۰۰ از نمونه‌های شماره ۲۶ (a) و ۳۴ (b) به ترتیب در دانسیته جریانهای ۱ و  $4 \text{ A/dm}^2$  حمام حاوی  $40 \text{ g/l}$  نانو سیلیس .....
- شکل ۴-۲۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نشان‌دهنده نقشه بخش عنصری ناشی از طیف‌سنجی اشعه X برای عنصر نیکل موجود در پوشش کامپوزیتی نیکل از نمونه

- های شماره ۲۶ (a) و ۳۴ (b) به ترتیب در دانسیته جریانهای ۱ و ۴ A/dm<sup>۲</sup> حمام حاوی ۴۰ g/l نانو سیلیس).....
- ۶۳ شکل ۴-۲۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نشان‌دهنده نقشه بخش عنصری ناشی از طیف‌سنجی اشعه X برای عنصر سیلیس موجود در پوشش کامپوزیتی نیکل از نمونه های شماره ۲۶ (a) و ۳۴ (b) به ترتیب در دانسیته جریانهای ۱ و ۴ A/dm<sup>۲</sup> حمام حاوی ۴۰ g/l نانو سیلیس).....
- ۶۳ شکل ۴-۲۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نشان‌دهنده نقشه بخش عنصری ناشی از طیف‌سنجی اشعه X برای عنصر اکسیژن موجود در پوشش کامپوزیتی نیکل از نمونه های شماره ۲۶ (a) و ۳۴ (b) به ترتیب در دانسیته جریانهای ۱ و ۴ A/dm<sup>۲</sup> حمام حاوی ۴۰ g/l نانو سیلیس.....
- ۶۴ شکل ۴-۲۹ طیف XRD پودر آمورف سیلیس در مقیاس نانو.....
- ۶۴ شکل ۴-۳۰ طیف XRD نمونه‌ی شماره ۲۳ پوشش نیکل خالص در دانسیته جریان ۲ A/dm<sup>۲</sup>.....
- ۶۴ شکل ۴-۳۱ طیف XRD نمونه‌ی شماره ۸ پوشش کامپوزیتی نیکل - سیلیس از حمام ۱۰ گرم در لیتر در دانسیته جریان ۴ A/dm<sup>۲</sup>.....
- ۶۵ شکل ۴-۳۲ طیف XRD نمونه‌ی شماره ۱۷ پوشش کامپوزیتی نیکل - سیلیس از حمام ۲۰ گرم در لیتر در دانسیته جریان ۳ A/dm<sup>۲</sup>.....
- ۶۵ شکل ۴-۳۳ طیف XRD نمونه‌ی شماره ۲۸ پوشش کامپوزیتی نیکل - سیلیس از حمام ۴۰ گرم در لیتر در دانسیته جریان ۳ A/dm<sup>۲</sup>.....
- ۶۵ شکل ۴-۳۴ طیف XRD نمونه‌ی شماره ۳۲ پوشش کامپوزیتی نیکل - سیلیس از حمام ۴۰ گرم در لیتر در دانسیته جریان ۲ A/dm<sup>۲</sup>.....
- ۶۶ شکل ۴-۳۵ مقایسه طیف XRD پودر نانو سیلیس آمورف و نمونه‌ی نیکل خالص شماره

- ۲۳ با دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  و پوشش کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس نمونه‌ی ۱۷ از حمام ۲۰ گرم در لیتر با دانسیته جریان  $3 \text{ A/dm}^2$  و نمونه‌های ۲۸ و ۳۲ از حمام ۴۰ گرم در لیتر به ترتیب با دانسیته جریانهای  $2-3 \text{ A/dm}^2$  .....
- ۶۶ شکل ۴-۳۶ اندازه دانه‌ی نیکل با استفاده از روش شرر (Sherer) از نتایج طیف XRD نمونه‌ی نیکل خالص شماره ۲۳ با دانسیته جریان  $2 \text{ A/dm}^2$  و پوشش کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس نمونه‌ی ۱۷ از حمام ۲۰ گرم در لیتر با دانسیته جریان  $3 \text{ A/dm}^2$  و نمونه‌های ۲۸ و ۳۲ از حمام ۴۰ گرم در لیتر به ترتیب با دانسیته جریانهای  $2-3 \text{ A/dm}^2$  .....
- ۶۶ شکل ۴-۳۷ طیف امپدانس نمونه‌ی نیکل خالص ۲۱ در دانسیته جریان  $3 \text{ A/dm}^2$  با نمونه‌های شماره ۱۲، ۱۳ و ۱۴ پوشش کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس از حمام ۲۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای ۱، ۳ و  $4 \text{ A/dm}^2$  در پتانسیل مدار باز و محلول ۵٪ NaCl ....
- ۶۶ شکل ۴-۳۸ طیف امپدانس نمونه‌ی نیکل خالص ۲۱ در دانسیته جریان  $3 \text{ A/dm}^2$  با نمونه‌های شماره ۲۷، ۳۰، ۳۳ و ۳۵ پوشش کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس از حمام ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای ۱، ۲، ۳ و  $4 \text{ A/dm}^2$  در پتانسیل مدار باز و محلول ۵٪ NaCl .....
- ۶۹ شکل ۴-۳۹ مقایسه منحنیهای پلاریزاسیون نمونه‌ی نیکل خالص ۲۱ با نمونه‌های شماره ۱۲، ۱۳ و ۱۴ پوشش کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس از حمام ۲۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای ۱، ۳ و  $4 \text{ A/dm}^2$  بر اساس الکتروود مرجع کالومل (SCE) در الکترولیت ۵٪ NaCl .....
- ۷۰ شکل ۴-۴۰ مقایسه منحنیهای پلاریزاسیون نمونه‌ی نیکل خالص ۲۱ با نمونه‌های شماره ۲۷، ۳۰، ۳۳ و ۳۵ پوشش کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس از حمام ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریانهای ۱، ۲، ۳ و  $4 \text{ A/dm}^2$  بر اساس الکتروود مرجع کالومل (SCE) در الکترولیت ۵٪ NaCl .....
- ۷۱ شکل ۴-۴۱ مقایسه منحنیهای پلاریزاسیون نمونه‌ی نیکل خالص ۲۱ با نمونه‌های شماره



- ۱۳ و ۳۰ پوشش کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس از حمامهای نیکل خالص و ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر در دانسیته جریان  $3 \text{ A/dm}^2$  بر اساس الکترومد مرجع کالومل (SCE) در الکترولیت ۳/۵% NaCl .....
- ۷۱ شکل ۴-۴۲ مقایسه پتانسیل تعادلی در منحنی های پلاریزاسیون پوشش نیکل خالص و پوششهای کلمپوزیتی بدست آمده از حمامهای ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر نانو سیلیس به ترتیب در دانسیته جریانهای ۳ و ۱، ۳، ۴ و ۱، ۲، ۳، ۴  $\text{A/dm}^2$  بر حسب الکترومد مرجع اشباع کالومل (SCE) در الکترولیت ۳/۵% NaCl .....
- ۷۲ شکل ۴-۴۳ مقایسه جریان تعادلی در منحنی های پلاریزاسیون پوشش نیکل خالص و پوششهای کلمپوزیتی بدست آمده از حمامهای ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر نانو سیلیس به ترتیب در دانسیته جریانهای ۳ و ۱، ۳، ۴ و ۱، ۲، ۳، ۴  $\text{A/dm}^2$  بر حسب الکترومد مرجع اشباع کالومل (SCE) در الکترولیت ۳/۵% NaCl .....
- ۷۳ شکل ۴-۴۴ مقایسه ی شیب شاخه های آنودی در منحنیهای پلاریزاسیون الکتروشیمیایی پوشش نیکل و پوششهای کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس بدست آمده از حمامهای ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر به ترتیب در دانسیته جریانهای ۳ و ۱، ۳، ۴ و ۱، ۲، ۳، ۴  $\text{A/dm}^2$  بر حسب الکترومد مرجع اشباع کالومل (SCE) در الکترولیت ۳/۵% NaCl .....
- ۷۴ شکل ۴-۴۵ مقایسه ی شیب شاخه های کاتدی در منحنیهای پلاریزاسیون الکتروشیمیایی پوشش نیکل و پوششهای کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس بدست آمده از حمامهای ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر به ترتیب در دانسیته جریانهای ۳ و ۱، ۳، ۴ و ۱، ۲، ۳، ۴  $\text{A/dm}^2$  بر حسب الکترومد مرجع اشباع کالومل (SCE) در الکترولیت ۳/۵% NaCl .....
- ۷۶ شکل ۴-۴۶ تغییر اختلاف پتانسیل در حین آبرکاری در رابطه با دانسیته جریان اعمالی ....
- ۷۶ شکل ۴-۴۷ تغییرات پتانسیل زتا نسبت به pH الکترولیت همگن شده با همزن التراسونیک (الف) و هموزن شده مکانیکی (ب) با غلظت ۰/۰۰۱ مولار و ۰/۲ گرم بر

- لیتر از ماده نانو سیلیس.....
- ۷۷ شکل ۴-۴۸ تغییرات مویلیته‌ی نسبت به pH در الکترولیت هموژن شده با همزن التراسونیک (الف) و هموژن شده مکانیکی (ب) با غلظت ۰/۰۰۱ مولار و ۰/۲ گرم بر لیتر نانو سیلیس آمورف.....
- ۷۷ شکل ۴-۴۹ نسبت پتانسیل زتا به مویلیته در آزمایشات انجام شده پتانسیل زتا برای ذرات نانو سیلیس.....
- ۷۸ شکل ۴-۵۰ مقایسه سختی پوشش نیکل خالص با پوششهای کامپوزیتی نیکل - نانو سیلیس آمورف هم‌نشست شده از حمامهای با غلظتهای ۲۰ گرم بر لیتر.....

## فهرست جدولها

صفحه	عنوان
۷	جدول ۱-۲ خواص پوششهای نیکل .....
۳۹	جدول ۲-۲ تغییرات پایداری سوسپانسیونها وابسته به مقدار پتانسیل زتا.....
۴۳	جدول ۱-۳ ترکیب حمامهای واتز نیکل با pH زیاد و کم.....
۴۴	جدول ۲-۳ مواد و مقدار مورد استفاده در حمام واتز .....
۴۷	جدول ۳-۳ حمام واتز حاوی ۱۰ g/l پودر نانوسیلیس و بدون استفاده از همزن التراسونیک .....
۴۷	جدول ۴-۳ حمام واتز با غلظتهای متفاوت از پودر نانو SiO <sub>2</sub> و شدت توان همزن التراسونیک با ۵۰% توان اسمی برابر با ۲۰۰ W .....
۵۴	جدول ۱-۴ مقادیر کمی درصد وزنی و اتمی عناصر سیلیسیم، اکسیژن و نیکل را برای پوششهای کامپوزیتی حاصل از حمام ۴۰ گرم بر لیتر نیکل بر حسب دانسیته جریان کاتدی A/dm <sup>2</sup> با استفاده از آنالیز EDS .....
۶۹	جدول ۲-۴ نقاط مهم پتانسیل و جریان در منحنیهای پلاریزاسیون برای نمونههای نیکل خالص و نمونههای حاصل از حمام ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر .....
۷۲	جدول ۳-۴ مقایسه شیب شاخههای آندی و کاتدی در منحنیهای پلاریزاسیون الکتروشیمیایی پوشش نیکل و پوششهای کامپوزیتی نیکل- نانو سیلیس بدست آمده از حمامهای ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر .....
۷۴	جدول ۴-۴ نتایج آزمایشهای اندازه گیری پتانسیل زتا برای نانو سیلیس در الکترولیت هموزن شده با التراسونیک و همزدن معمولی با غلظت ۰/۰۰۱ مولار و ۰/۲ گرم بر لیتر نانو سیلیس آمورف .....
۷۵	جدول ۵-۴ میانگین بدست آمده از نتایج اندازه گیری پتانسیل زتا دمای ۲۵ °C .....
۷۸	جدول ۶-۴ مقادیر میکروسختی و یکرز مربوط به پوششهای نیکل خالص شماره ۲۱ از حمام واتز در دانسیته جریان ۳ A/dm <sup>2</sup> ، پوششهای کامپوزیتی از حمام واتز با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر نمونههای ۱۶ تا ۱۹ در دانسیته جریانهای ۱، ۲، ۳، ۴ A/dm <sup>2</sup> .....

فصل يك

مقدمه