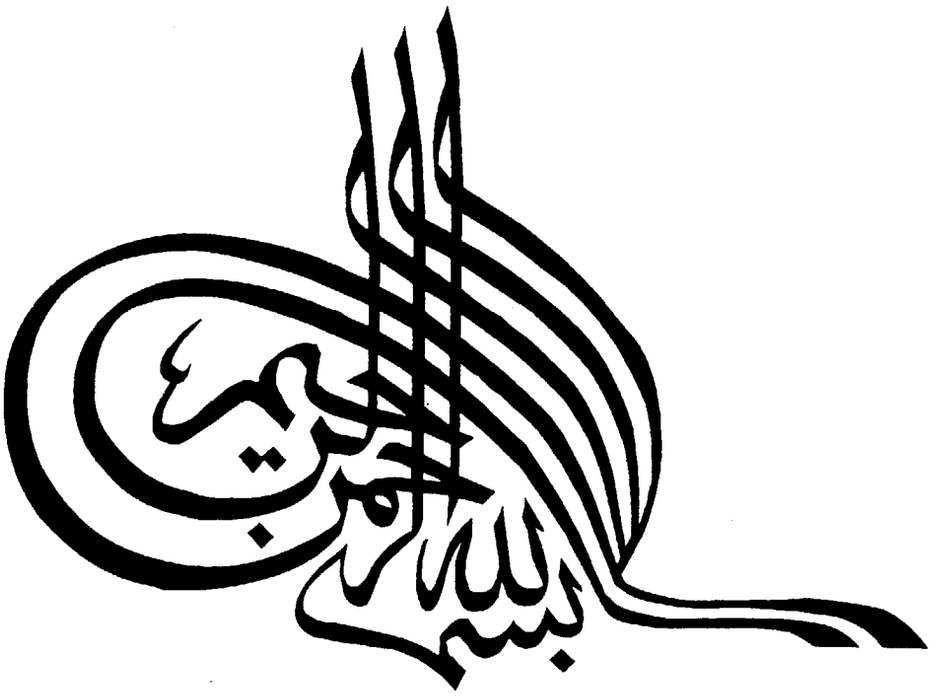

لل٣٢١

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
کمیته مدارک

۱۳۷۹/۹/۲۰

9470

دانشگاه مازندران

دانشکدهٔ علوم پایه

موضوع:

تهیه الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با آنتراکینون و برخی از مشتقات آن به منظور بررسی رفتار آنها در محیط آبی

جهت اخذ درجه کارشناسی‌ارشد شیمی گرایش تجزیه

اساتید راهنما:

آقای دکتر جهانبخش رئوف و آقای دکتررضا اوجانی

استاد مشاور:

آقای دکتر عباسعلی رستمی

نگارش: منوچهر ابراهیمی

تیر ماه ۱۳۷۹

۳۲۱۵۱

جمهوری اسلامی ایران

دانشگاه مازندران
دانشکده علوم پایه

ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو منوچهر ابراهیمی شماره دانشجوئی ۷۶۵۲۴۷۹۱۷

رشته تحصیلی: شیمی تجزیه سال تحصیلی: ۷۹-۷۸

موضوع پایان نامه : تهیه الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با آنتراکینون و برخی مشقات آن به منظور بررسی رفتار آنها در محیط آبی .

تاریخ دفاع: ۷۹/۴/۸

نمره پایان نامه به عدد ۱۹ نمره پایان نامه به حروف نوزده تمام

امتیاز: عالی

کمیته داوران :

استاد راهنما: دکتر جهانبخش رئوف - دکتر رضا اوجانی

استاد مشاور: دکتر عباسعلی رستمی

استاد مدعو : دکتر عبدالرئوف صمدی

رئیس دانشکده علوم پایه

تشکر و قدردانی

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

منت خدای را که به من توفیق بهره گیری از اقیانوس بیکران دانش خویش عطا فرمود تا من نیز قطره کوچکی ازاین دریا باشم.

وظیفه خود میدانم از اساتید محترم راهنما، آقایان دکتر جهانبخش رئوف و دکتر رضا اوجانی که با رهنمودهای ارزنده همواره مرا مورد لطف خویش قرار دادند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

از آقای دکتر عباسعلی رستمی که استاد مشاور اینجانب در انجام پروژه بودند کمال تشکر را دارم.

از آقای دکتر عبدالرئوف صمدی که با سمت استاد مدعو در جلسه دفاعیه حضور داشتند بسیار متشکرم.

از خانواده خود که در کلیه مراحل تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند، صمیمانه قدردانی مینمایم.

از کلیه دوستانی که مرا مورد لطف خویش قرار دادند بسیار سپاسگزارم.

همچنین از کارمندان محترم و زحمتکش انتشارات، انبار مواد شیمیایی، شیشه گری و کتابخانه گروه شیمی که صمیمانه با اینجانب همکاری نمودند تشکر می‌نمایم.

منوچهر ابراهیمی

تیر ماه ۱۳۷۹

تقدیم به
همسر و فرزندان عزیزم

چکیده

کینون‌ها ترکیباتی هستند که به طور گسترده در طبیعت وجود دارند و به عنوان حدّ واسط در فرآیند انتقال الکترون ایفای نقش می‌کنند. جذابیّت نقش بیولوژیکی و دارویی این مواد موجب تحقیقات بیوشیمیایی و شیمیایی وسیعی در بررسی رفتار و خواص این مواد شده است.

در این کار تحقیقاتی، دسته‌ای از کینون‌ها یعنی آنتراکینون‌ها را مورد بررسی قرار داده‌ایم و خواص الکتروشیمیایی آنتراکینون و برخی از مشتقات آن را با تهیه الکترودهای اصلاح شده مربوطه بررسی نموده‌ایم.

فصل اول، شامل اطلاعاتی در باره اهمیت آنتراکینون‌ها، خواص دارویی آن‌ها و نقش آن‌ها در تسهیل واکنش‌های الکتروشیمیایی کند است. در این فصل شمایی از کاربرد ترکیبات آنتراکینونی در تهیه آب اکسیژنه به روش صنعتی آمده است و مراحل تولید آب اکسیژنه به وسیله فرآیند آنتراکینونی ذکر گردیده است.

فصل دوم، شامل اطلاعات تئوریکی در مورد روش ولتامتری چرخه‌ای، انواع فرآیندهای الکتروشیمیایی، سیستم‌ها، دیاگرام‌های پتانسیل-pH و راههای تهیه آن، مکانیسم‌های الکتروشیمیایی، الکترودهای اصلاح شده خمیر کربنی و نحوه تهیه آن‌ها می‌باشد.

فصل سوم، شامل اطلاعاتی در مورد مواد مصرفی با ذکر شرکت‌های آن، الکترودها و محلول‌های به کار رفته، دستگاه پتانسیواستات و pH متر می‌باشد.

در فصل چهارم به تهیه الکترودهای اصلاح شده با مواد آنتراکینونی و هم‌چنین مطالعه رفتار الکتروشیمیایی آن‌ها با استفاده از تکنیک ولتامتری چرخه‌ای در محیط

آبی می‌پردازیم. با محاسبه پتانسیل‌های نیم‌موج برحسب pH، نمودارهای پتانسیل-pH برای هر ترکیب رسم شده است. مقادیر پتانسیل‌های فرمال و PK'_a زوج ردوکس‌ها و زوج اسید-بازهای ایجاد شده در pHهای مختلف، به دست آمده‌اند. برای بررسی تکرارپذیری ساخت الکترود خمیر کربن اصلاح شده، شش الکترود مجزا تهیه نموده و ولتاموگرام آن‌ها را با هم مقایسه نموده‌ایم. هم‌چنین برای تأیید تکرارپذیر بودن جریان در طی چرخه‌های متوالی، ولتاموگرام مربوط به شش چرخه مختلف را با هم مقایسه نموده‌ایم و میزان r.s.d را محاسبه کرده‌ایم.

فصل پنجم، شامل اطلاعاتی در مورد فرآیندهای الکتروکاتالیزی، تست‌های تأییدکننده کاتالیزی بودن یک فرآیند خاص، به کارگیری الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با برخی از مشتقات آنتراکینونی در تهیه آب اکسیژنه یا آب، تعقیب ولتاموگرام‌های الکترود اصلاح شده در pHهای گوناگون و در حضور اکسیژن، رسم نمودارهای مربوطه می‌باشد.

فصل ششم، شامل نتیجه‌گیری کلی از کارهای انجام شده در این پایان نامه می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

I-مقدمه ۱

فصل دوم: مبانی تئوری

II- مبانی تئوری ۱۱

II-۱-فرآیندهای الکتروشیمیایی ۱۱

II-۲-واکنش الکتروشیمیایی ساده ۱۲

II-۳-اهداف مطالعات الکتروشیمیایی و روش‌های آن ۱۳

II-۴- ولتامتری چرخه‌ای ۱۴

II-۵-نگرش سینتیکی به سیستم‌های الکتروشیمیایی ۱۶

II-۵-۱- سیستم‌های برگشت‌پذیر ۱۶

II-۵-۲- سیستم‌های برگشت‌ناپذیر ۱۹

II-۵-۳- سیستم‌های شبه برگشت‌پذیر ۲۱

II-۶-تأثیر واکنش‌های ثانوی بر فعالیت سیستم‌های ردوکس ۲۳

II-۶-۱-پتانسیل نرمال مشروط ۲۳

II-۶-۲-دیاگرام‌های پتانسیل-pH ۲۴

II-۷-مکانیسم‌های الکتروشیمیایی ۳۱

II-۲-۸-مکانیسم‌های شامل جذب سطحی ۳۴

II-۹-الکترودهای اصلاح شده به طور شیمیایی ۳۵

II-۱۰-الکترود خمیر کربن ۳۹

فصل سوم:تجربی

III-بخش تجربی ۴۵

III-۱-مواد شیمیایی ۴۵

III-۲-وسایل و تجهیزات ۴۶

III-۳-بافرهای مورد استفاده برای تثبیت pH ۴۷

III-۴-الکترودها ۴۷

فصل چهارم: بحث و بررسی نتایج

IV-بحث و بررسی نتایج ۵۲

IV-۱- مقدمه ۵۲
IV-۲-رفتار الکتروشیمیایی الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با بعضی از مشتقات۹-۱۰-آنتراکینون ۵۳
IV-۲-۱-الکترود خمیر کربن اصلاح شده با آنتراکینون (AMCPE) ۵۳
IV-۲-۱-الف- ولتامتری چرخه‌ای (CV) ۵۳
IV-۲-۱- ب-پتانسیل های فرمال و ثابت های تفکیک اسیدی وابسته به آنتراکینون ۶۰
IV-۲-۲-الکترود خمیر کربن اصلاح شده با ۲-متیل-آنتراکینون (MACPE) ۶۳
IV-۲-۲-الف - ولتامتری چرخه‌ای (CV) ۶۳
IV-۲-۲- ب- پتانسیل‌های فرمال و ثابت‌های تفکیک اسیدی وابسته به ۲-متیل-آنتراکینون ۶۸
IV-۲-۳-الکترود خمیر کربن اصلاح شده با ۲-آمینو-آنتراکینون (MAMCPE) .. ۶۹
IV-۲-۳-الف- ولتامتری چرخه‌ای ۶۹
IV-۲-۳-ب- پتانسیل‌های فرمال و ثابت‌های تفکیک اسیدی وابسته به ۲-آمینو-آنتراکینون ۷۳
IV-۲-۴-الکترود خمیر کربن اصلاح شده با ۱ و ۲-دی آمینو-آنتراکینون (DAAMCPE) ۷۴
IV-۲-۴-الف- ولتامتری چرخه‌ای
IV-۲-۴- ب-پتانسیل‌های فرمال و ثابت‌های تفکیک اسیدی وابسته به ۱ و ۲-دی‌آمینو-آنتراکینون ۷۸
IV-۳-بررسی رفتار الکتروشیمیایی محلول بعضی از مشتقات آنتراکینون در سطح الکترود خمیر کربن ۷۹
IV-۳-۱-بررسی رفتار الکتروشیمیایی محلول آنتراکینون-۲-کربوکسیلیک اسید در سطح الکترود خمیر کربن(CPE) ۸۰
IV-۳-۱-الف- ولتامتری چرخه‌ای ۸۰
IV-۳-۱- ب-پتانسیل‌های فرمال و ثابت‌های تفکیک اسیدی وابسته به آنتراکینون-۲-کربوکسیلیک اسید ۸۴
IV-۳-۲-بررسی رفتار الکتروشیمیایی نمک منو هیدراته سدیم آنتراکینون-۲-سولفونیک اسید در سطح CPE ۸۶
IV-۳-۲-الف-ولتامتری چرخه‌ای ۸۶
IV-۳-۲- ب -پتانسیل‌های فرمال و ثابت‌های تفکیک اسیدی وابسته به ترکیب نمک

سدیمی منو هیدراته آنتراکینون-۲-سولفونیک اسید ۹۰
IV-۳-۳-بررسی رفتار الکتروشیمیایی آلیزارین در سطح (CPE)..... ۹۲
IV-۳-۳-الف-ولتامتری چرخه‌ای: ۹۲
IV-۳-۳- ب- پتانسیل‌های فرمال و ثابت تفکیک اسیدی وابسته به آلیزارین ۹۶
IV-۴-الف- بررسی تکرارپذیری ساخت الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با مشتقات آنتراکینونی ۹۷
IV-۴- ب -بررسی تأثیر چرخه‌های متوالی بر کارآیی الکترودهای خمیر کربن..... ۹۹
فصل پنجم
V-به کارگیری الکترودهای خمیرکربن اصلاح شده با ترکیبات آنتراکینون در الکتروکاتالیز احیای اکسیژن ۱۰۳
V-۱-مقدمه ۱۰۳
V-۲-نگرشی بر فرآیندهای الکتروکاتالیزی..... ۱۰۴
V-۲-۱-الکتروکاتالیز ناهمگن ۱۰۴
V-۲-۲-الکتروکاتالیز ردوکس ناهمگن ۱۰۵
V-۲-۳-الکتروکاتالیز ردوکس همگن ۱۰۶
V-۳-ویژگی‌های مهم الکتروکاتالیست‌های واسطه‌ای..... ۱۰۷
V-۴-واکنش‌های الکتروکاتالیز واسطه‌ای ۱۰۸
V-۵-آزمون‌های تشخیصی برای بررسی واکنش‌های الکتروکاتالیزی ۱۰۹
V-۶-بررسی الکترولیز احیای اکسیژن به آب اکسیژنه توسط ترکیبات آنتراکینونی ۱۱۰
V-۷-بررسی الکتروکاتالیز احیای اکسیژن در سطح الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با بعضی از مشتقات آنتراکینونی ۱۱۲
V-۷-۱-بررسی الکتروکاتالیز احیای اکسیژن در سطح الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با ۲-متیل-آنتراکینون ۱۱۲
V-۷-۲-بررسی الکتروکاتالیز احیای اکسیژن در سطح الکترود خمیر کربن اصلاح شده با ۲-کربوکسیلیک اسید-آنتراکینون ۱۱۵
فصل ششم
VI-نتیجه‌گیری کلی ۱۲۰
VI-منابع..... ۱۲۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

۱-فرمول ساختمانی و خواص برخی از ترکیبات آنتراکینونی..... ۳

۲-۱-ملاک‌های تشخیص برگشت‌پذیری سیستم الکتروشیمیایی ۱۹

۲-۲-ملاک‌های تشخیص برگشت‌ناپذیر بودن سیستم الکتروشیمیایی ۲۱

۲-۳-ملاک‌های تشخیص شبه برگشت‌پذیر بودن سیستم الکتروشیمیایی..... ۲۳

۲-۴-برخی از مکانیسم‌های الکتروشیمیایی معمول که توسط نیکولسون و شاین بررسی شده‌اند. ۳۲

۲-۵-محدوده پتانسیل‌های کاری الکترودهای خمیر کربن..... ۴۳

۳-۱-مواد شیمیایی مورد استفاده در کار تحقیقاتی ۴۵

۴-۱-داده‌های به کار رفته برای محاسبه حدود اطمینان PK'_a و E'° وابسته به زوج ردوکس A/H_2A براساس قطعه خط واقع شده در $۵/۷۵ \geq pH \geq ۰/۵$ از شکل (۴-۷)..... ۶۲

۴-۲-داده‌های مربوط به زوج ردوکس‌های فعال در سطح الکترود خمیر کربن اصلاح شده با آنتراکینون شناور در محلول آبی با pHهای مختلف در غیاب اکسیژن ۶۲

۴-۳-داده‌های مربوط به زوج اسید-باز فعال در سطح الکترود AMCPE..... ۶۳

۴-۴-داده‌های مربوط به زوج ردوکس‌های فعال در سطح MACPE در محلول آبی در pHهای مختلف در غیاب اکسیژن..... ۶۹

۴-۵-داده‌های مربوط به زوج اسید-بازهای فعال در سطح الکترود MACPE..... ۶۹

۴-۶-داده‌های وابسته به زوج ردوکس‌های فعال در سطح AAMCPE در محلول آبی بافری شده با pHهای مختلف و در غیاب اکسیژن ۷۴

۴-۷-داده‌های مربوط به زوج اسید-بازهای فعال در سطح الکترود AAMCPE ۷۴

۴-۸-داده‌های وابسته به زوج ردوکس‌های فعال در سطح DAAMCPE در محلول آبی بافری شده با pHهای مختلف و در غیاب اکسیژن ۷۹

۴-۹-داده‌های مربوط به زوج اسید-بازهای فعال در سطح الکترود AAMCPE ۷۹

وابسته به زوج ردوکس‌های فعال در سطح الکترود خمیر کربن در محلول آبی بافری شده با pHهای مختلف در غیاب اکسیژن..... ۷۴

۴-۱۰-داده‌های وابسته به زوج ردوکس‌های فعال در سطح الکترود خمیر کربن در محلول آبی بافری شده با pHهای مختلف در غیاب اکسیژن ۸۵

۴-۱۱-داده‌های مربوط به زوج اسید-بازهای فعال در سطح الکترود خمیر کربن (CPE)..... ۸۵

۴-۱۲-داده‌های وابسته به زوج ردوکس فعال در سطح الکترود خمیر کربن در محلول آبی بافری شده

با pHهای مختلف و در غیاب اکسیژن ۹۱
۴-۱۳-داده‌های وابسته به زوج اسید-بازهای فعال در سطح الکترود خمیر کربن (CPE) ۹۱
۴-۱۴-داده‌های وابسته به زوج ردوکس فعال در سطح الکترود خمیر کربن در محلول آبی بافری شده با pHهای مختلف و در غیاب اکسیژن ۹۶
۴-۱۵-داده‌های مربوط به زوج اسید-بازهای فعال در سطح الکترود خمیر کربن..... ۷۴
۴-۱۶-داده‌های ولتامتری چرخه‌ای به همراه انحراف استاندارد نسبی در شش الکترود اصلاح شده ۹۹
۴-۱۷-داده‌های ولتامتری چرخه‌ای مربوط به یک الکترود خمیر کربن‌اصلاح شده در دورهای مختلف ۱۰۱
جدول-۵-۱-داده‌های مربوط به جابه جایی پتانسیل احیای اکسیژن در حضور ترکیبات مختلف ۱۱۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

۱-۱-نمودار تئوری مراحل تولید H_2O_2 از اثر هوا بر مشتق آنتراکینون ۷

۱-۲-مراحل تولید صنعتی H_2O_2 [15] ۸

۲-۱-مدل مرز مشترک الکترود-محلول [16] ۱۱

۲-۲-واکنش الکتروشیمیایی ساده ۱۲

۲-۳-نمودار تغییرات پتانسیل نسبت به زمان در روش ولتامتری چرخه‌ای ۱۴

۲-۴-نحوه انجام ولتامتری چرخه‌ای با استفاده از یک سیستم سه الکترودی ۱۶

۲-۵-ولتاموگرام چرخه‌ای برگشت‌پذیر و پروفیل غلظتی برای مراحل مختلف آن ۱۷

۲-۶-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای نرمال شده در سرعت‌های روبش پتانسیل مختلف ۲۰

۲-۷-منحنی وابستگی جریان دماغه به جذر سرعت روبش پتانسیل هنگام گذر از رفتار برگشت‌پذیر به برگشت‌ناپذیر ۲۲

۲-۸-محدودیت اشل پتانسیل-pH در آب ۲۷

۲-۹-نمودار پتانسیل-pH برای سیستم کینون و هیدروکینون ۳۰

۲-۱۰-نسبت جریان دماغه‌های کاتدی و آندی به صورت تابعی از سرعت روبش پتانسیل برای مکانیسم‌های الکتروشیمیایی مختلف ۳۳

۲-۱۱-سرعت جا به جایی پتانسیل به صورت تابعی از سرعت روبش پتانسیل برای مکانیسم‌های الکتروشیمیایی مختلف ۳۴

۲-۱۲-شمای یک مکانیسم الکتروشیمیایی شامل گونه‌های الکتروفعال جذب سطحی شده ۳۵

۲-۱۳-فرآیند کاهش اکسیژن در سطح الکترودهای مختلف ۳۵

۲-۱۴-الکتروکاتالیز واکنش الکترودی کند توسط زوج ردوکس در لایه‌های مختلف ۳۸

۲-۱۵-الف-الکترود خمیر کربن سمی‌میکرو و معمولی ۳۹

۳-۱- سل الکتروشیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌های CV ۴۶

۳-۲-الکترود خمیر کربن اصلاح شده‌با بعضی از مشتقات آنتراکینون ۴۹

۳-۳-الکترود خمیر کربن اصلاح شده ۴۹

۴-۱-ولتامتری چرخه‌ای الکترود خمیر کربن اصلاح شده‌باآنتراکینون‌و الکترود خمیر کربن تنهادر حالتهای مختلف (اکسیژن) ۵۴

۴-۲-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای الکترود خمیر کربن اصلاح شده‌با آنتراکینون در سرعت‌های روبش پتانسیل‌مختلف ۵۵

۴-۳-نمودار تغییرات جریان دماغه‌ها نسبت به سرعت روبش پتانسیلAMCPE ۵۶
۴-۴-نمودار تغییرات I_{pc} نسبت به سرعت روبش پتانسیلAMCPE ۵۶
۴-۵-منحنی تغییرات I_{pc}/V نسبت به سرعت روبش پتانسیلAMCPE ۵۶
۴-۶-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای AMCPE در pHهای مختلف ۵۷
۴-۷-نمودار پتانسیل-pH، برای AMCPE ۵۸
۴-۸-ولتاموگرام‌های چرخه‌ایCPE و MAMCPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۶۴
۴-۹-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای MAMCPE در سرعت روبش‌های مختلف ۶۴
۴-۱۰-نمودار تغییرات جریان دماغه نسبت به سرعت روبش‌پتانسیل‌وتغییرات جریان دماغه نسبت به جذر سرعت روبش‌پتانسیل ۶۵
۴-۱۱-تغییرات ΔE_p و ب) I_{pc}/V نسبت به سرعت روبش پتانسیل ۶۶
۴-۱۲-نمودار پتانسیل-pH برای MAMCPE ۶۷
۴-۱۳-ولتاموگرام‌های چرخه‌ایCPE و AAMCPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۷۰
۴-۱۴-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای AAMCPE در سرعت روبش‌های مختلف پتانسیل ۷۰
۴-۱۵-نمودار تغییرات Q_c ,Q_a ,I_{pc},I_{pa},I_{pc}/V,ΔE_pنسبت به سرعت روبش پتانسیل‌و نمودار تغییرات I_{pc} نسبت به$V^{1/2}$ ۷۱
۴-۱۶-نمودار پتانسیل-pHبرای (AAMCPE) ۷۲
۴-۱۷-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای DAAMCPE و CPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۷۵
۴-۱۸-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای DAAMCPEدر سرعت روبش‌های مختلف ۷۵
۴-۱۹-نمودار تغییرات I_{pc} ,ΔE_p ,Q_c ,Q_a ,I_{pc}/V نسبت به سرعت روبش پتانسیل و نمودار تغییرات I_{pc}نسبت به$V^{1/2}$ ۷۶
۴-۲۰-نمودار پتانسیل-pH برای DAAMCPE ۷۷
۴-۲۱-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای CPE و CAMCPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۸۱
۴-۲۲-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای CAMCPE در سرعت روبش‌های مختلف ۸۱
۴-۲۳-نمودار تغییرات I_{pc},I_{pa},Q_c,Q_a,I_{pc}/V,ΔE_pنسبت به V و نمودار تغییرات I_{pc}نسبت به$V^{1/2}$ ۸۲
۴-۲۴-نموار پتانسیل-pH برای CAMCPE ۸۳
۴-۲۵-ولتاموگرام چرخه‌ای CPE و SAMCPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۸۶
۴-۲۶-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای SAMCPE در سرعت روبش‌های مختلف ۸۷
۴-۲۷-نمودار تغییرات I_{pc},I_{pa},Q_c,Q_a,ΔE_p,I_{pc}/V نسبت به V و نمودار تغییرات I_{pc} نسبت به$V^{1/2}$ ۸۸
۴-۲۸-نمودار پتانسیل-pH برای SAMCPE ۸۹

۴-۲۹-ولتاموگرام‌های ALMCPE و CPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۹۲
۴-۳۰-ولتاموگرام‌های ALMCPE در سرعت روبش‌های مختلف ۹۳
۴-۳۱-نمودار تغییرات $I_{pc}/V, \Delta E_p, I_{pa}, I_{pc}$ نسبت به V و نمودار تغییرات I_{pc} نسبت به $V^{1/2}$ ۹۴
۴-۳۲-نمودار پتانسیل-pH برای ALMCPE ۹۵
۴-۳۳-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای MAMCPE تهیه شده در ۶ مرحله جداگانه ۹۸
۴-۳۴-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای MAMCPE در طی چرخه‌های گوناگون ۱۰۰
۴-۳۵-مقایسه ولتاموگرام چرخه‌ای MAMCPE در دور اول و شصت ۱۰۱
۵-۱-فرآیند الکتروکاتالیز ناهمگن ۱۰۴
۵-۲-فرآیند الکتروکاتالیز ردوکس ناهمگن ۱۰۷
۵-۳-طرح شماتیک الکتروکاتالیز واسطه‌ای ۱۰۹
۵-۴-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای محلول ۱۶μM سیتوکروم C_3 در بافر سیترات ۵۰μmM ۱۱۱
۵-۵- ساختار نمک آنتراکینونی (PQ) ۱۱۳
۵-۶-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای CPE و SAMCPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۱۱۴
۵-۷-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای MAMCPE در محلول اشباع از اکسیژن در pHهای مختلف ۱۴۴
۵-۸-منحنی تغییرات نسبت I_{pa}/I_{pc} نسبت به pH برای MAMCPE ۱۱۵
۵-۹- شمای فرآیند کاتالیزی احیای O_2 توسط اصلاح‌گر آنتراکینونی ۱۱۶
۵-۱۰-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای CPE و SAMCPE در حالت‌های مختلف (اکسیژن) ۱۱۷
۵-۱۱-ولتاموگرام‌های چرخه‌ای CAMCPE در محلول اشباع از اکسیژن در pHهای مختلف ۱۱۷
۵-۱۲-منحنی تغییرات نسبت به pH برای CAMCPE ۱۱۷