



بررسی تاثیر غلظت بوراکس بر رفتار الکتروشیمیایی لایه رویین تشکیل شده روی مس خالص تجاری

آرش فتاح الحسینی^۱، عباس صالحی^۲، سید علیرضا موسوی شوشتری^۲

^۱. همدان، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد (استادیار)

^۲. همدان، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد (فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی مواد)

چکیده

مس به علت رفتار رویین مناسب در محلول‌های قلیایی به طور گسترده در صنایع شیمیایی و پتروشیمی استفاده می‌شود. در این میان غلظت محلول قلیایی و در نتیجه تغییرات pH اثرات مستقیمی بر رفتار لایه رویین خواهد داشت. در این پژوهش، تاثیر غلظت بوراکس بر رفتار رویین مس خالص تجاری بررسی شد. برای این منظور در ابتدا الکترودهای کاری از جنس مس خالص تجاری به مدت ۱۲۰۰ ثانیه در محلول‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس غوطه‌ور و سپس آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و موت-شاتکی انجام شدند. نتایج حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد که چگالی جریان خوردگی مس خالص تجاری در محلول ۰/۰۱۰ مولار بوراکس در کمترین مقدار و در حدود ۰/۰۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع است. آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که در منحنی‌های نایکویست، دو ثابت زمانی مربوط به تشکیل لایه رویین و لایه دوگانه الکتریکی به ترتیب در فرکانس‌های کم و زیاد وجود دارد. هم‌چنین نتایج حاصل از آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی آشکار ساخت که در محلول ۰/۰۱۰ مولار بوراکس، مقاومت لایه رویین و مقاومت انتقال بار و به تبع آن مقاومت پلاریزاسیون بیشترین مقدار را نشان می‌دهد. آزمون‌های موت-شاتکی آشکار ساخت که رفتار لایه رویین تشکیل شده روی مس خالص تجاری در هر چهار محلول از نوع p- است که به علت غلبه جاهای خالی کاتیونی (نسبت به جاهای خالی اکسیژنی و بین‌نشین‌های کاتیونی) است. هم‌چنین آزمون‌های موت-شاتکی نشان داد که چگالی گیرنده‌های الکترونی در محدوده ۱۰^{۲۱} بر سانتی‌متر مکعب قرار دارند که در محلول ۰/۰۱۰ مولار بوراکس در کمترین مقدار و برابر ۱۰^{۲۱} × ۱/۳۸۰۷ بر سانتی‌متر مکعب است.

واژه‌های کلیدی: مس خالص تجاری، بوراکس، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، موت-شاتکی، رفتار رویین.

^۱. arash.fattah@gmail.com

مقدمه

مس فلزی است که به دلیل مقاومت خوب در برابر خوردگی، کارپذیری مکانیکی، هدایت الکتریکی و حرارتی عالی و سهولت در لحیم کاری یا فرایندهای جوشکاری به صورت گسترده استفاده می‌شود. این فلز از لحاظ ترمودینامیکی تمایلی به خوردگی در آب و در اسیدهای اکسیژن‌دار ندارد. در اسیدهای اکسیدکننده و در محلول‌های شیمیایی یونی که از مس تشکیل شده‌اند خوردگی این فلز می‌تواند تشدید شود. فلز مس در آب دریا و آب‌های شیرین مقاوم است و مقاومت به خوردگی آن به حضور لایه سطحی اکسیدی بستگی دارد. پس از قرار گرفتن در آب مقطر و در دمای اتاق، لایه اکسیدی که در مس یافت می‌شود ترکیبی از Cu_2O و CuO است. نور مرئی به صورت مشخصی نرخ تشکیل لایه اکسیدی را کاهش می‌دهد. این لایه به آسانی در آب‌های خروشان، اسید کربنیک یا اسیدهای آلی حل شده که در بعضی از آب‌های شیرین و خاک وجود دارند و منجر به نرخ خوردگی بالا می‌شوند، از بین می‌رود. به‌طور کلی مس و آلیاژهای آن (به‌خصوص برنج‌ها) به‌علت رفتار روئین عالی در محلول‌های قلیایی در صنایع پتروشیمی دارای کاربردهای گسترده‌ای هستند. هم‌چنین این فلز به‌علت دارا بودن مقاومت به خوردگی مناسب در محلول‌های خنثی و هم‌چنین داشتن خاصیت ضد باکتریایی، به‌طور گسترده در ساخت لوله‌های سیستم توزیع آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۵].

از لحاظ عوامل محیطی، آب آشامیدنی مهم‌ترین راه ورود مس به بدن انسان است. اگرچه فلز مس عنصری مفید و لازم برای بدن انسان است، اما مقدار زیاد آن می‌تواند مضر و باعث آلوده شدن آب آشامیدنی شود. به‌طور کلی قانون‌ها و استانداردهای زیادی در کشورهای مختلف میزان مس در آب را کنترل می‌کنند و میزان مس در مرحله نهایی تصفیه آب آشامیدنی نباید از $\frac{1}{3}$ میلی گرم بر لیتر فراتر رود [۶]. در چندین دهه اخیر مطالعات زیادی روی رفتار خوردگی و روئین مس در محلول‌های خنثی، محلول‌های بازی و حتی محلول‌های اسیدی صورت گرفته است. برخی از تلاش‌ها در مورد رفتار خوردگی مس در ترکیبی از آب و موادی با رسانایی پایین بوده است، گرچه مکانیزم خوردگی مس در محلول‌ها و محیط‌های خنثی، آب آشامیدنی یا آب‌های خنک‌کننده به‌طور کامل بحث نشده است [۷-۱۴].

پژوهش‌های گوناگونی در مورد بررسی رفتار خوردگی مس و آلیاژهای آن در محلول‌هایی مانند محلول‌های اسیدی و بازی انجام شده است، در حالی که در مورد بررسی رفتار روئین شدن مس و آلیاژهای آن پژوهش‌ها بسیار اندک است. هدف از این تحقیق، بررسی رفتار الکتروشیمیایی مس خالص تجاری در شرایط پتانسیل مدار باز در چهار محلول $0/001$ ، $0/005$ ، $0/010$ و $0/050$ مولار بوراکس است که برای این منظور از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و موت-شاتکی استفاده شد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از مس خالص تجاری (با خلوص $99/96$ درصد وزنی) با مساحت 1 سانتی‌متر مربع به‌عنوان الکتروود کاری استفاده شد. برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی، پس از اتصال سیم مسی روکش‌دار به نمونه‌ها

و مانت، عملیات سنباده‌زنی تر تا سنباده ۱۲۰۰ و عملیات چربی‌زدایی انجام شد. سپس نمونه‌ها با آب دوبار تقطیر شسته و پس از خشک کردن با دمش هوا، به سرعت تحت آزمون‌های مختلف الکتروشیمیایی قرار گرفتند. تمامی آزمون‌ها با استفاده از سل استاندارد سه الکترودی که شامل یک عدد الکتروود کار، یک عدد الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود کمکی و الکتروود نقره/کلرید نقره به عنوان الکتروود مرجع انجام شدند. به منظور ارزیابی تاثیر غلظت بوراکس بر رفتار الکتروشیمیایی لایه رویین مس خالص تجاری، از چهار غلظت ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار استفاده شد. برای این منظور ابتدا هر نمونه در پتانسیل مدار باز به مدت زمان ۱۲۰۰ ثانیه نگهداری شد. سپس آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (با نرخ روبش ۱ میلی‌ولت بر ثانیه) و هم‌چنین طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (در پتانسیل مدار باز و در محدوده فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز با دامنه طول موج ۱۰ میلی‌ولت) انجام شدند. برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی، از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات میکرواتولب استفاده شد. هم‌چنین جهت تعیین نوع رفتار نیمه هادی لایه رویین تشکیل شده روی سطح مس خالص تجاری، آزمون‌های موت-شاتکی انجام شد و برای این منظور، ابتدا هر نمونه در پتانسیل مدار باز به مدت ۱۲۰۰ ثانیه غوطه‌ور و سپس با نرخ روبش ۲۵ میلی‌ولت بر ثانیه، تغییرات ظرفیت خازنی آن بر حسب پتانسیل اعمالی از پتانسیل ۱/۰ تا ۰/۰ ولت رسم شد.

نتایج و بحث

به‌طور کلی یکی از روش‌های مناسب جهت ارزیابی چگالی جریان خوردگی و در نتیجه سرعت خوردگی، استفاده از برون‌یابی^۱ مناطق خطی شاخه‌های آندی و کاتدی منحنی‌های پلاریزاسیون تافل و یا پتانسیودینامیک است [۱۵]. در شکل ۱ منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مس خالص تجاری در چهار محلول ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس نشان داده شده است. در جدول ۱ مقادیر چگالی جریان خوردگی به دست آمده از این منحنی‌های پلاریزاسیون نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود چگالی جریان خوردگی مس خالص تجاری در محلول ۰/۰۱۰ مولار بوراکس در کمترین مقدار و در حدود ۰/۰۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع است.

در شکل ۲ منحنی‌های نایکوئیست^۲ حاصل از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مس خالص تجاری در چهار محلول ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس تحت شرایط پتانسیل مدار باز نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود دو ثابت زمانی مجزا به ترتیب در فرکانس‌های کم و زیاد وجود دارد که به ترتیب مرتبط با تشکیل لایه رویین و لایه دوگانه الکتریکی می‌باشد. در حقیقت در فرکانس‌های کم یک نیم‌دایره ناقص با قطر بسیار کم تر از نیم‌دایره دوم وجود دارد.

¹ Extrapolation

² Nyquist Plot

همچنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود که منحنی‌های نایکویست دارای رفتار مشابهی هستند و افزایش غلظت بوراکس از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۱۰ مولار باعث افزایش قطر نیم‌دایره ناقص شده که نشان‌دهنده افزایش مقدار مقاومت پلاریزاسیون (کاهش چگالی جریان خوردگی) می‌باشد.

با توجه به منحنی‌های نایکویست، از مدار معادل شکل ۳ برای یافتن بهترین برازش استفاده شد [۲ و ۱۶]. در این مدار معادل، Q_p : المان فاز ثابت^۱ مربوط به لایه رویین، R_p : مقاومت لایه رویین، Q_{dl} : المان فاز ثابت مربوط به لایه دوگانه الکتریکی در فصل مشترک مس / محلول، R_{ct} : مقاومت انتقال بار و R_s : مقاومت جبران ناپذیر محلول است. نتایج مدل‌سازی با این مدار معادل نشان می‌دهد که انطباق بسیار ایده‌آلی بین منحنی نایکویست و مدل‌سازی شده برای تمامی زمان‌ها وجود دارد.

روند تغییرات مقاومت پلاریزاسیون (که از جمع مقاومت لایه رویین و مقاومت انتقال بار به دست می‌آید) با تغییرات غلظت بوراکس در جدول ۲ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت پلاریزاسیون در ابتدا با افزایش غلظت بوراکس از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۱۰ مولار افزایش و سپس کاهش یافته است که تاییدکننده روند کاهشی و افزایشی چگالی جریان خوردگی به دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون است.

آزمون موت-شاتکی یکی از روش‌های تعیین رفتار نیمه‌هادی نوع-n و یا نوع-p لایه رویین و هم‌چنین بررسی عیوب موجود در آن است. شکل ۴ منحنی‌های موت-شاتکی برای لایه رویین تشکیل شده روی مس خالص تجاری در چهار محلول ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس تحت شرایط پتانسیل مدار باز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود منحنی‌های موت-شاتکی دارای رفتار مشابهی هستند و برای آن‌ها یک ناحیه خطی با شیب منفی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده لایه رویین تشکیل شده با رفتار نیمه‌هادی از نوع-p است. برای رفتار نوع-p، شیب به‌طور معکوس با چگالی گیرنده‌های الکترون^۲ (N_A) متناسب است. منحنی‌های موت-شاتکی در شکل ۴ مانند منحنی‌های گزارش شده برای لایه رویین تشکیل شده روی مس در محیط‌های مشابه است. به‌طور کلی برای رفتار نیمه‌هادی نوع-p معادله موت-شاتکی به صورت رابطه ۱ است:

$$\frac{1}{C_{sc}^2} = -\frac{2}{\varepsilon \varepsilon_0 e N_D} \left(E - E_{fb} - \frac{k_B T}{e} \right) \quad (1)$$

در این معادله، ε ثابت دی‌الکتریک لایه رویین، ε_0 نفوذپذیری خلا (8.85×10^{-14} F/cm)، e بار الکتریکی الکترون (1.6021×10^{-19} C)، N_A برحسب m^{-3} ، E پتانسیل اعمالی برحسب ولت، E_{fb} پتانسیل فلت، k_B ثابت بولتزمن (1.3807×10^{-23} J/K) و T دما برحسب درجه کلوین است [۱۷-۱۹]. در جدول ۳ مقادیر چگالی گیرنده‌های الکترونی برای لایه رویین مس خالص تجاری در چهار محلول ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده شد چگالی گیرنده‌های الکترونی در محدوده 10^{19} بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد که به مقادیر چگالی گیرنده‌های الکترونی گزارش شده برای مس خالص تجاری در محیط‌های مشابه دیگر بسیار نزدیک است [۲۰ و ۲۱]. در جدول ۳ هم‌چنین مشاهده شد که با افزایش

¹ Constant Phase Element

² Donor density (N_D)

غلظت محلول، چگالی گیرنده‌های الکترونی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش خواص محافظتی لایه رویین است. در انتها با توجه به مدل عیوب نقطه‌ای، رفتار نیمه‌هادی نوع-p لایه‌های رویین تشکیل شده روی مس خالص تجاری به غلبه کسر حجمی جاهای خالی کاتیونی نسبت به جاهای خالی اکسیژنی و بین‌نشین‌های کاتیونی مرتبط می‌شود.

نتیجه‌گیری

۱) منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان دادند که مس خالص در هر چهار محلول ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس رفتار رویین عالی نشان می‌دهند. همچنین نتایج حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون نشان دادند که چگالی جریان خوردگی مس خالص تجاری در محلول ۰/۰۱۰ مولار بوراکس در کمترین مقدار و در حدود ۰/۰۲ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع است.

۲) در منحنی‌های نایکویست مس خالص در هر چهار محلول ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس دو ثابت زمانی مربوط به تشکیل لایه رویین و لایه دوگانه الکتریکی به ترتیب در فرکانس‌های کم و زیاد مشاهده شد. همچنین آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که مقدار مقاومت پلاریزاسیون در ابتدا با افزایش غلظت بوراکس از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۱۰ مولار افزایش و سپس کاهش یافته است که تاییدکننده روند کاهش و افزایش چگالی جریان خوردگی به‌دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون است.

۳) آزمون‌های موت-شاتکی نشان دادند که رفتار نیمه‌هادی مس خالص در چهار محلول ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ مولار بوراکس، از نوع-p است که مانند منحنی‌های موت-شاتکی مس خالص در محیط‌های مشابه است. همچنین نتایج آزمون‌های موت-شاتکی نشان دادند که چگالی گیرنده‌های الکترونی به‌دست آمده برای مس خالص، در محدوده 10^{21} بر سانتی متر مکعب قرار دارد که با افزایش غلظت محلول، چگالی گیرنده‌های الکترونی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش خواص محافظتی لایه رویین است.

مراجع

1. P. Shi, Q. Wang, Y. Xu and W. Luo, "Corrosion behavior of bulk nanocrystalline copper in ammonia solution", *Materials Letters*, 65, 2011, 857–859.
2. J.J. Shim and J.G. Kim, "Copper corrosion in potable water distribution systems: influence of copper products on the corrosion behavior", *Materials Letters*, 58, 2004, 2002–2006.
3. Q. Zhong, L. Yu, Y. Xiao, Y. Wang, Q. Zhou and Q. Zhong, "The effect of grain size and Cl⁻ concentration on the passive behavior of Cu in borate buffer solution", *Advanced Materials Research*, 785, 2013, 928–932.
4. M.M. Antonijevic, S.C. Alagic, M.B. Petrovic, M.B. Radovanovic and A.T. Stamenkovic, "The influence of pH on electrochemical behavior of copper in presence of chloride ions", *International Journal of the Electrochemical Society*, 4, 2009, 516–524.
5. A.M. Alfantazi, T.M. Ahmed and D. Tromans, "Corrosion behavior of copper alloys in chloride media", *Materials Design*, 30, 2009, 2425–2430.

6. X. Zhang, S. O. Pehkonen, N. Kocherginsky and G. Andrew Ellis, "Copper corrosion in mildly alkaline water with the disinfectant monochloramine", *Corrosion Science*, 44, 2002, 2507–2528.
7. G. Kear, B.D. Barker and F.C. Walsh, "Electrochemical corrosion of unalloyed copper in chloride media—a critical review", *Corrosion Science*, 46, 2004, 109–135.
8. D.W. Shoesmith, T.E. Rummery, D. Owen and W. Lee, "Anodic oxidation of copper in alkaline solutions: I. Nucleation and growth of cupric Hydroxide films", *Journal of the Electrochemical Society*, 123, 1976, 790–799.
9. Y. Ashworth and D. Fairhurst, "The anodic formation of Cu₂O in alkaline solutions", *Journal of the Electrochemical Society*, 124, 1977, 506–517.
10. R.M. Souto, S. Gonzalez, R.C. Salvarezza and A.J. Arvia, "Kinetics of copper passivation and pitting corrosion in Na₂SO₄ containing dilute NaOH aqueous solution", *Electrochimica Acta*, 39, 1994, 2619–2628.
11. M. Pérez Sánchez, M. Barrera, S. González, R.M. Souto, R.C. Salvarezza and A.J. Arvia, "Electrochemical behaviour of copper in aqueous moderate alkaline media, containing sodium carbonate and bicarbonate, and sodium perchlorate", *Electrochimica Acta*, 35, 1990, 1337–1343.
12. M.M. Laz, R.M. Souto, S. González, R.C. Salvarezza and A.J. Arvia, "The formation of anodic layers on annealed copper surfaces in phosphate-containing solutions at different pH", *Electrochimica Acta*, 37, 1992, 655–663.
13. D.W. Soesmith, T.E. Rummery, D. Owen and W. Lee, "Anodic oxidation of copper in alkaline solutions", *Journal of the Electrochemical Society*, 123, 1976, 790–799.
14. J. Kunze, V. Maurice, L.H. Klein, H.H. Strehblow and P. Marcus, "In situ STM study of the duplex passive films formed on Cu(111) and Cu(001) in 0.1 M NaOH", *Corrosion Science*, 46, 2004, 245–264.
15. G.T. Burstein, "A hundred years of Tafel's Equation: 1905–2005", *Corrosion Science*, 47 (2005), 2858–2870.
16. C. Liu, Q. Bi, A. Leyland and A. Matthews, "An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in 0.5 N NaCl aqueous solution: Part I. Establishment of equivalent circuits for EIS data modelling", *Corrosion Science*, 45, 2003, 1243–1256.
17. H. Wu, Y. Wang, Q. Zhong, M. Sheng, H. Du and Z. Li, "The semi-conductor property and corrosion resistance of passive film on electroplated Ni and Cu–Ni alloys", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 663, 2011, 59–66.
18. K. Nakaoka, J. Ueyama and K. Ogura, "Photoelectrochemical behavior of electrodeposited CuO and Cu₂O thin films on conducting substrates", *Journal of the Electrochemical Society*, 151, 2004, C661–C665.
19. Y.-K. Hsu, C.-H. Yu, Y.-C. Chen and Y.-G. Lin, "Fabrication of coral-like Cu₂O nanoelectrode for solar hydrogen generation", *Journal of Power Sources*, 242, 2013, 541–547.
20. A. Fattah-alhosseini and O. Imantalab, "Effect of accumulative roll bonding process on the electrochemical behavior of pure copper", *Journal of Alloys and Compounds*, 632, 2015, 48–52.
21. O. Imantalab and A. Fattah-alhosseini, "Electrochemical and passive behavior of pure copper fabricated by accumulative roll bonding (ARB) process", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 2015, 2579–2585.

جدول ۱: مقادیر چگالی جریان خوردگی به دست آمده از منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (شکل ۱).

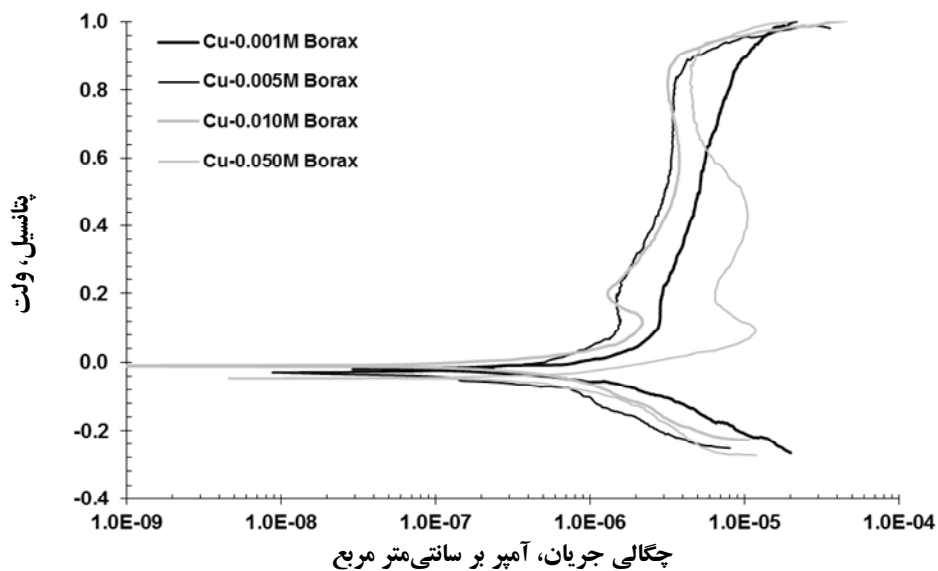
چگالی جریان خوردگی (میکروآمپر بر سانتی متر مربع)	غلظت محلول بوراکس (مولار)
۰/۱۱	۰/۰۰۱
۰/۰۶	۰/۰۰۵
۰/۰۲	۰/۰۱۰
۰/۲۱	۰/۰۵۰

جدول ۲: مقادیر مقاومت لایه رویین و مقاومت انتقال بار به دست آمده از منحنی های نایکویست (شکل ۲).

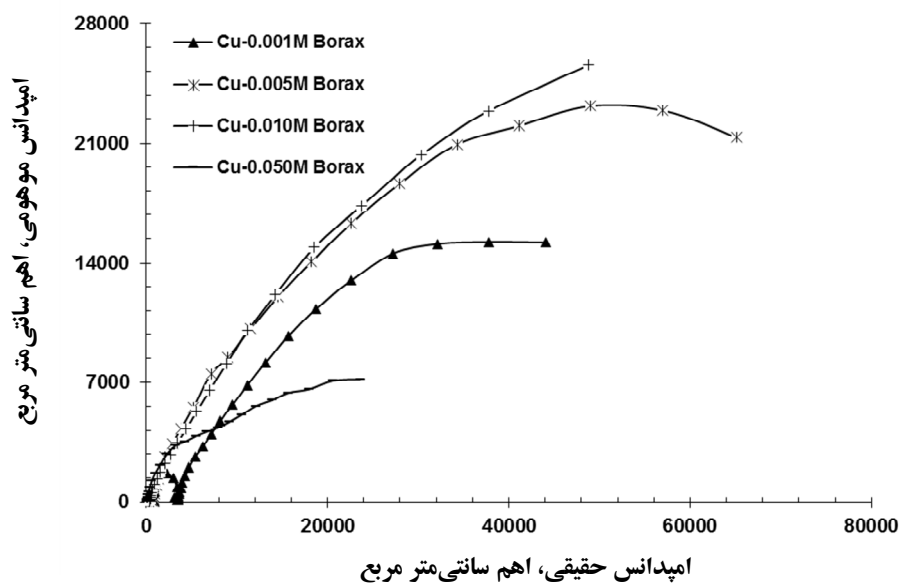
مقاومت پلاریزاسیون (اهم در سانتی متر مربع)	غلظت محلول بوراکس (مولار)
۶۵/۵۴۴	۰/۰۰۱
۹۷/۹۲۸	۰/۰۰۵
۱۳۵/۲۰	۰/۰۱۰
۴۳/۰۸	۰/۰۵۰

جدول ۳: تاثیر غلظت محلول بوراکس بر چگالی گیرنده های الکترونی در لایه رویین مس خالص.

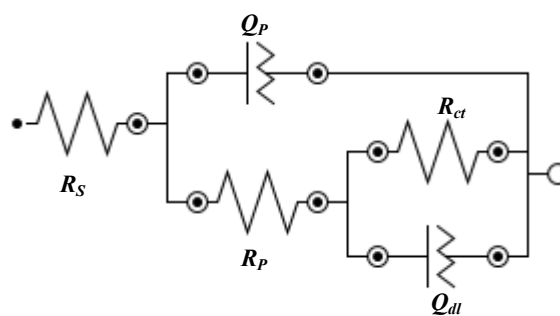
چگالی گیرنده های الکترونی (بر سانتی متر مکعب)	غلظت محلول بوراکس (مولار)
$۰/۱۰۲ \times ۱۰^{۲۱}$	۰/۰۰۱
$۰/۱۸۸ \times ۱۰^{۲۱}$	۰/۰۰۵
$۰/۲۶۱ \times ۱۰^{۲۱}$	۰/۰۱۰
$۰/۳۸۷ \times ۱۰^{۲۱}$	۰/۰۵۰



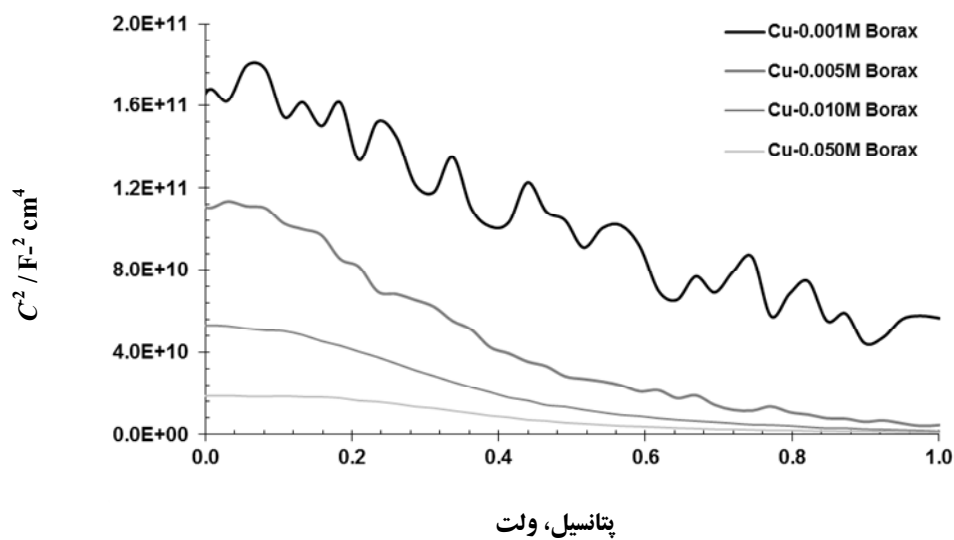
شکل ۱: تاثیر غلظت محلول بوراکس بر منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مس خالص.



شکل ۲: تاثیر غلظت محلول بوراکس بر منحنی‌های نایکویست مس خالص.



شکل ۳: بهترین مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی رفتار روین مس خالص تجاری.



شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

شکل ۴: تاثیر غلظت محلول بوراکس بر منحنی های موت-شاتکی مس خالص.