



## تشکیل و بررسی رفتار خوردگی پوشش نانوساختار اکسید سریم بر روی آلیاژ ۲۰۲۴ در محیط ۳/۵٪ NaCl

محسن مقدسی<sup>۱</sup>، حسین حسن نژاد<sup>۲</sup>، احسان صائب نوری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>. مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران (کارشناسی ارشد)

<sup>۲</sup>. گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران (استادیار)

<sup>۳</sup>. مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران (استادیار)

### چکیده

در سال‌های اخیر، عناصر کمیاب به عنوان جایگزین مناسب برای پوشش‌های سمی کرومات‌ها جهت جلوگیری از خوردگی آلیاژهای آلومینیوم استفاده شده است. در این پژوهش، اکسید سریم به روش غوطه‌وری، بر سطح آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ اعمال شده و رفتار خوردگی در حضور و غیاب پوشش، در محلول ۳/۵٪ NaCl مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل نشان می‌دهد، دانسیته جریان خوردگی برای نمونه بدون پوشش برابر  $10^{-6} \times 4/35$  آمپر بر سانتیمتر مربع و این مقدار برای نمونه پوشش دار برابر  $10^{-7} \times 2/25$  است که دانسیته جریان خوردگی نمونه پوشش دار حدود ۱۰ برابر کمتر از نمونه بدون پوشش است و مقاومت به خوردگی بالاتری را از خود نشان می‌دهد. مطابق با نتایج آزمون و امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، نمونه بدون پوشش با توجه به مدار معادل، شامل یک ثابت زمانی است که مربوط به لایه پسیو موجود بر روی آلومینیوم می‌باشد. اما در نمونه همراه با پوشش اکسید سریم، دو ثابت زمانی وجود دارد که مربوط به پوشش و فصل مشترک لایه پسیو و پوشش می‌باشد و مقاومت آن مقاومت انتقال بار را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج بدست آمده، پوشش اکسید سریم توسط روش غوطه‌وری بر روی سطح قرار گرفته و مقاومت به خوردگی بالایی را در محلول خورنده ۳/۵٪ NaCl نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** اکسید سریم؛ خوردگی؛ آلیاژ آلومینیوم؛ پوشش؛ پلاریزاسیون؛ امپدانس الکتروشیمیایی.

## مقدمه

پوشش های تبدیلی کروماته، علیرغم ویژگی های بسیار مناسب مثل مقاومت به خوردگی بالا، ارزان بودن و سادگی فرآیند، برای سلامتی انسان، مضر هستند و منجر به سرطان می شوند. در سال های اخیر، عناصر نادر به عنوان جایگزین مناسب برای پوشش های سمی کروماته استفاده شده است. این مواد در pH های بالا بازده مناسبی دارند و در محیط های قلیایی نیز شرایط خوبی ایجاد می کنند. یون های لانتانید مانند  $Pr^{3+}$ ،  $La^{3+}$ ،  $Y^{3+}$ ،  $Ce^{3+}$  و  $Nd^{3+}$  تشکیل هیدروکسیدهای غیر قابل حلی را می دهند که این هیدروکسیدها، دارای سمیت بسیار پایینی می باشند که برای سلامتی انسان، ضرری ندارند. عناصر نادر جزو بهترین بازدارنده های سازگار با محیط زیست برای آلیاژهای مختلف هستند که در سال های اخیر، مورد توجه محققین قرار گرفته است. اکسید سریم یکی از پایدارترین حالات اکسید سریم می باشد. به این ترکیب، اکسید سربیک و یا سربا گفته می شود. سریم دومین عضو گروه لانتانیدهای می باشد و دومین سری عنصر فعال لانتانیدها می باشد [۱]. سریم در صنایع مختلف به عنوان کاتالیزور، هادی الکتریکی، فوتوکاتالیست، ساینده و رنگ دانه، استفاده می شود [۲،۳،۴].

پوشش های بر پایه سریم، مقاومت به خوردگی خوبی در آلیاژهای مختلف، نشان داده است. عموماً بهتر کردن خواص سطح می تواند برای افزایش مقاومت به خوردگی بسیاری از فلزات حائز اهمیت باشد. ترکیبات سریم نه تنها منجر به افزایش مقاومت به خوردگی قابل مقایسه با کرومات می شوند، بلکه مشخص شده است که سریم سمی و سرطان زا نمی باشد. نمونه های سریم همچنین می توانند بصورت آندی مانع خوردگی شوند. کراسلند و همکارانش<sup>۱</sup> نشان دادند که آلومینیوم هنگامی که با سریم آلیاژ می شود، آلیاژ بصورت آندی اکسید و تشکیل لایه ای از اکسید می دهد. علاوه بر مقاومت به خوردگی مناسب پوشش های بر پایه سریم، کاربرد اپتیکی و الکترونیکی این پوشش ها و استفاده از آن ها در سنسورها، در صنایع مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته است [۵،۶،۷،۸].

روش های مختلفی برای تشکیل پوشش های اکسید سریم در سال های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است که از میان این روش ها، روش های غوطه وری، الکترولیتی، اسپری کردن، روش رسوب بخار شیمیایی و همچنین روش سل-ژل، بیشتر مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. اولین تلاش های محققین برای تشکیل پوشش اکسید سریم شامل غوطه وری نمونه ها در محلول حاوی یون سریم برای مدت زمانهای بسیار طولانی بود. دو تئوری مختلف بر پایه مطالعات دانشمندان مورد بررسی قرار گرفت. بر طبق تئوری اول افزایش موضعی pH، باعث انجام واکنش احیاء اکسیژن می شود که در ادامه فرآیند منجر به رسوب هیدروکسید  $Ce(III)$  جامد می شود و در نهایت در اثر واکنش اکسیداسیون،  $CeO_2$  هیدراته، تشکیل می شود. دانشمندان به تئوری دومی معتقد بودند که بر طبق نظریات آنها، اولین مرحله از مراحل تشکیل رسوب، شامل اکسیداسیون  $Ce(III)$  به  $Ce(IV)$  در محلول می باشد که می تواند در ادامه فرآیند، منجر به رسوب  $CeO_2$  که مقتضی افزایش موضعی pH می باشد، توسط واکنش های کاتدی اکسیژن بشود [۹].

<sup>۱</sup>. Crossland et al.

در سال‌های اخیر، از پوشش‌های بر پایه سریم، جهت بررسی مقاومت به خوردگی آلیاژهای مختلف، استفاده شده است. آبال<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۱، از مخلوط دو عنصر لانتانیدی شامل  $\text{CeCl}_3$  و  $\text{LaCl}_3$  برای جلوگیری از خوردگی آلیاژ 5083 در محیط‌های خورنده استفاده کرد [۱۰]. هیل<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۱، از سریم دفنیل فسفات  $(\text{Ce}(\text{dpp})_3)$  برای جلوگیری از خوردگی آلیاژهای آلومینیوم سری 7000 استفاده کرد [۱۱]. نقش اصلی پوشش‌های بر پایه سریم، تشکیل رسوب نامحلول در ناخالصی‌ها جهت جلوگیری از افزایش pH است. دان<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۰، با استفاده از روش پاسیواسیون الکترولیز کاتدی، پوشش سریم را بر سطح آلیاژ اعمال کرد [۱۲]. رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ همراه با پوشش اکسید سریم اعمال شده به روش غوطه‌وری، مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر، رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، پس از اعمال پوشش اکسید سریم به روش غوطه‌وری، مورد ارزیابی خوردگی الکتروشیمیایی در محلول نمک طعام قرار می‌گیرد.

### مواد و روش تحقیق

در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با ترکیب شیمیایی مشخص شده در جدول ۱، به عنوان زیرلایه انتخاب شد. جهت اعمال پوشش اکسید سریم، محلول پوشش تبدیلی اکسید سریم، از انحلال ۰/۰۰۵ مول از نمک کلرید سریم هپتاهیدرال ( $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) در آب دیونیزه شده به دست می‌آید. پس از انحلال نمک کلرید سریم هپتاهیدرال در آب دیونیزه شده، ۱/۸ گرم در لیتر آب اکسیژنه ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ، ۳۰٪)، که نقش کاتالیزوری در تشکیل پوشش اکسید سریم دارد به آن اضافه می‌شود. در انتها مقداری گلیسرول برای یکنواختی و ریزدانگی بیشتر پوشش‌های اکسید سریم به محلول پوشش‌دهی اضافه شد. برای نگه داشتن pH در یک رنج مشخص ۴-۴/۵ از اسید استیک و استات سدیم که بصورت یک محلول بافری عمل می‌کنند، استفاده شد.

فرآیند آماده سازی نمونه‌های آلیاژی برای انجام فرآیند پوشش‌دهی شامل سنباده‌زنی نمونه‌ها تا سنباده ۱۰۰۰، چربی‌گیری با استون برای مدت زمان ۵ دقیقه، شستشو با آب دیونیزه شده برای مدت زمان ۵ دقیقه شستشو با محلول قلیایی  $\text{NaOH}$  (۳/۵٪) به مدت زمان ۱ دقیقه، شستشو با آب دیونیزه شده به مدت زمان ۵ دقیقه، شستشو با محلول اسیدی (اسید کلریدریک ۱۰٪) و در نهایت، شستشو با آب دیونیزه شده به مدت زمان ۵ دقیقه بود. پس از آماده سازی نمونه‌ها، نمونه‌های آلومینیومی ۲۰ دقیقه در محلول پوشش‌دهی اکسید سریم غوطه‌ور شدند. پس از طی شدن مدت زمان‌های ذکر شده، نمونه‌ها از محلول خارج می‌شوند و پس از خارج شدن با آب دیونیزه شده برای مدت زمان ۵ دقیقه شسته می‌شوند. برای خشک شدن، نمونه‌ها پس از پوشش‌دهی در دمای محیط برای مدت زمان ۲۴ ساعت قرار می‌گیرند.

<sup>1</sup>. A. Aballe

<sup>2</sup>. Julie-Anne Hill

<sup>3</sup>. Cerium diphenyl phosphate

<sup>2</sup>. Z. Dan

پس از اعمال پوشش اکسید سریم، ریزساختار پوشش بدست آمده، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCAN مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، رفتار خوردگی نمونه‌ی آلیاژ آلومینیوم در غیاب و حضور پوشش اکسید سریم، توسط دستگاه پتانسیواستات مدل Parstat 2273 مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی، در این مرحله بر روی نمونه انجام گرفت و رفتار خوردگی در غیاب و حضور پوشش، مورد مقایسه قرار گرفت. برای رسیدن به شرایط پایا قبل از انجام آزمون پلاریزاسیون تافل، هر نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در محلول ۳/۵٪ از NaCl قرار گرفت و سپس آزمون انجام شد. آزمون‌های پلاریزاسیون تافل در محدوده پتانسیل ۲۵۰mV کمتر و ۵۰۰mV بیشتر از پتانسیل مدار باز انجام شد. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نیز، در محدوده فرکانس ۱۰۰ کیلو هرتز تا ۱۰ میلی هرتز صورت پذیرفت. داده‌های کمتر از ۹۰ میلی هرتز به دلیل وجود خطا و نویز حذف گردید.

### نتایج و بحث

پس از اعمال پوشش اکسید سریم به روش غوطه‌وری بر سطح آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، تصاویر میکروسکوپی از پوشش ایجاد شده بر روی سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱، تصاویر SEM از پوشش اعمالی بر سطح آلیاژ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، ساختار پوشش مشابه با دیگر تحقیقات صورت گرفته در رابطه با پوشش‌های اکسید سریم، ترک‌دار است [۴۴].

در ادامه، رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در غیاب و حضور پوشش اکسید سریم، مورد بررسی قرار گرفت. با وجود پوشش بر روی آلومینیوم مشخص می‌شود که نمودار تافل به سمت چپ شیف‌ت کرده که نشان دهنده کاهش دانسیته جریان خوردگی می‌باشد. همچنین نمودار تافل با وجود پوشش بر روی آلومینیوم به سمت بالا شیف‌ت پیدا کرده است که می‌توان به پتانسیل تعادلی اکسید سریم نسبت داد به صورتی که پتانسیل تعادلی اکسید سریم در محیط مورد نظر، نجیب‌تر از اکسید آلومینیوم است به همین دلیل نمودار آن بالاتر از نمودار نمونه بدون پوشش است. شکل ۲، منحنی‌های پلاریزاسیون تافل از نمونه‌های آلیاژی در محلول ۳/۵٪ از NaCl را نشان می‌دهد. پارامترهای الکتروشیمیایی بدست آمده ناشی از آزمون پلاریزاسیون نیز، در جدول ۲، آورده شده است. با توجه نتایج بدست آمده در مورد نمودارهای تافل، دانسیته جریان خوردگی برای نمونه پوشش دار ( $2/25 \times 10^{-7}$  آمپر بر سانتیمتر مربع) کمتر از نمونه بدون پوشش ( $4/35 \times 10^{-6}$  آمپر بر سانتیمتر مربع) است. نکته قابل توجه دیگر را می‌توان به پتانسیل شکست این دو نمونه نسبت داد به صورتی که نمونه پوشش دار دارای پتانسیل بالاتر و مثبت‌تر ( $543/6$  میلی ولت) نسبت به نمونه بدون پوشش ( $575/8$  میلی ولت) دارد که این توضیح، مقاومت بیشتر به جوانه زنی حفره در مورد نمونه پوشش دار را نسبت به نمونه بدون پوشش نشان می‌دهد.

شکل ۳، منحنی‌های نایکوئیست از نمونه‌ی آلیاژی در غیاب و حضور پوشش اکسید سریم را نشان می‌دهد. برای تحلیل داده‌های حاصل از منحنی‌های نایکوئیست و شبیه‌سازی رفتار خوردگی، بایستی نتایج بدست آمده را با

یک مدار الکتریکی معادل، مطابقت داد. مدار معادل بدست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در شکل ۴ (a و b)، نشان داده شده است. در قسمت a که مربوط به نمونه بدون پوشش است ابتدا مقاومت محلول مشاهده می شود و با رسیدن به فصل مشترک زیرلایه و محلول یک خازن مشاهده می شود که بایک خازن غیر ایده آل و یک مقاومت موازی با آن نشان داده می شود. و در قسمت b که مدار معادل نمونه پوشش دار را نشان می دهد دو مدار معادل مشاهده می شود که در ابتدا مقاومت محلول را نمایانگر میکند و سپس با رسیدن به فصل مشترک پوشش و محلول یک خازن نمایانگر میشود و سپس به دلیل اینکه پوشش دارای حفره است محلول به درون حفره نفوذ کرده و به فصل مشترک زیرلایه و پوشش می رسد که آن هم بیانگر یک خازن دیگر است. پارامترهای الکتروشیمیایی بدست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نیز، در جدول ۳ آورده شده است. در نمونه بدون پوشش با توجه به اطلاعات بدست آمده از مدار معادل نمودارهای امپدانس مشخص می شود که شامل یک ثابت زمانی است و آن هم مربوط به لایه پاسیو موجود بر روی آلومینیوم می باشد (لایه دوگانه در فصل مشترک لایه پاسیو و محلول) و مقاومت آن مقاومت انتقال بار را نشان می دهد.

در نمونه پوشش دار، دو ثابت زمانی مشخص می شود که اولی مربوط به پوشش روی آلیاژ آلومینیوم می باشد و مقاومت آن مقاومت داخل تخلخل را نشان می دهد و ثابت زمانی دوم مربوط به فصل مشترک لایه پاسیو و پوشش است و مقاومت آن مقاومت انتقال بار را نشان می دهد که برابر  $93253$  اهم می باشد که نشان دهنده ی افزایش مقاومت انتقال بار است این در حالی است که مقاومت انتقال بار در نمونه بدون پوشش برابر  $5000$  اهم بود. پس هرچه پوشش وظیفه خود را به خوبی انجام دهد، مقاومت انتقال بار افزایش می یابد. پس نتایج بدست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی، نتایج آزمون پلاریزاسیون را تایید می کند. قطر نیم دایره در منحنی های نیکویست نیز، از دیگر روش های ارزیابی مقاومت به خوردگی پوشش است. مطابق با شکل ۳، قطر نیم دایره برای نمونه ی آلیاژی همراه با پوشش اکسید سریم، بسیرت بیشتر از نمونه ی بدون پوشش است و مقاومت به خوردگی بالاتر نمونه همراه با پوشش را تایید می کند.

### نتیجه گیری

(۱) مطابق با بررسی های میکروسکوپی، روش پوشش دهی غوطه وری، پوشش متراکم و یکنواختی از اکسید سریم بر سطح آلیاژ آلومینیوم  $2024$ ، ایجاد می کند.

(۲) مطابق با نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل، دانسیته جریان خوردگی پوشش اکسید سریم برابر  $2/25 \times 10^{-7}$  آمپر بر سانتیمتر مربع و برای نمونه بدون پوشش برابر  $4/35 \times 10^{-6}$  است، در همین راستا می توان نتیجه گرفت که نمونه پوشش دار در مقایسه با نمونه بدون پوشش، مقاومت به خوردگی بالاتری را نتیجه می دهد.

(۳) بر اساس نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی امپدانس کل برای نمونه پوشش دار برابر  $10^4$  اهم و برای نمونه بدون پوشش  $7 \times 10^3$  اهم است و نشان می دهد که پوشش اکسید سریم، مقاومت به خوردگی زیرلایه ی آلومینیومی را در محلول  $3/5\%$  NaCl را افزایش می دهد.

## مراجع

1. M. Bethencourt, F. Botana, J. Calvino and M. Marcos, "Lanthanide compounds as environmentally friendly corrosion inhibitors of aluminum alloys: A review", *Corrosion Science*, 39, 1998, 1803-1819.
2. R. Narayanan and S. K. Seshadri, "Chromium-ceria electro co-deposition using nitrate additives", *Metal Finishing*, 99, 2001, 84-91.
3. G. Carac, L. Benea, C. Iticescu, T. Lampke, S. Steinha and B. Wielage, "Co-deposition of cerium oxide with nickel and cobalt: Correlation between microstructure and micro hardness", *Surface Engineering*, 20, 2004, 353-359.
4. D. S. Xiong, "The effect of rare earth compounds on the mechanical and high-temperature tribological properties of Ni-based self-lubricating alloy", *Rare Metal Materials Engineering*, 31, 2002, 144-147.
5. Özer, N, "Optical properties and electrochromic characterization of sol-gel deposited ceria films", *Solar Energy Materials Solar Cells*, 68, 2001, 391-400.
6. Kang, J., Liu, X., Lian, G. and Zhang, Z., *Microelectronic Engineering*, 56, 2001, 191-194.
7. N. Izu, T. Itoh, M. Nishibori, I. Matsubara and W. Shin, "Effects of noble metal addition on response of ceria thick film CO sensors", *Sensors And Actuators B*, 2012, 350-353.
8. A. Khodadadi, S. Mohajerzadeh, Y. Mortazavi and A. Miri, "Cerium oxide/SnO<sub>2</sub>-based semiconductor gas sensors with improved sensitivity to CO", *Sensors and Actuators B*, 80, 2001, 267-271.
9. F. Scholes, C. Soste, A. Hughes, S. Hardin and P. Curtis, "The role of hydrogen peroxide in the deposition of cerium-based conversion coating", *Applied Surface Science* 253, 2006, 1770-1780.
10. A. Aballe, M. Bethencourt, F.J. Botana and M. Marcos, "CeCl and LaCl binary solutions as environment-friendly corrosion inhibitors of AA5083 Al-Mg alloy in NaCl solutions", *Journal of Alloys and Compounds* 323-324, 2001, 855-858.
11. Julie-Anne Hill, Tracey Markley and Maria Forsyth, "Corrosion inhibition of 7000 series aluminium alloys with cerium diphenyl phosphate", *Journal of Alloys and Compounds* 509, 2011, 1683-1690.
12. Z. Dan, S. Jie, Z. Lili, T. Yong and L. Ji, "Corrosion behavior of rare earth cerium based conversion coating on aluminum alloy", *Journal of rare earths*, 28, 2010, 371.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴

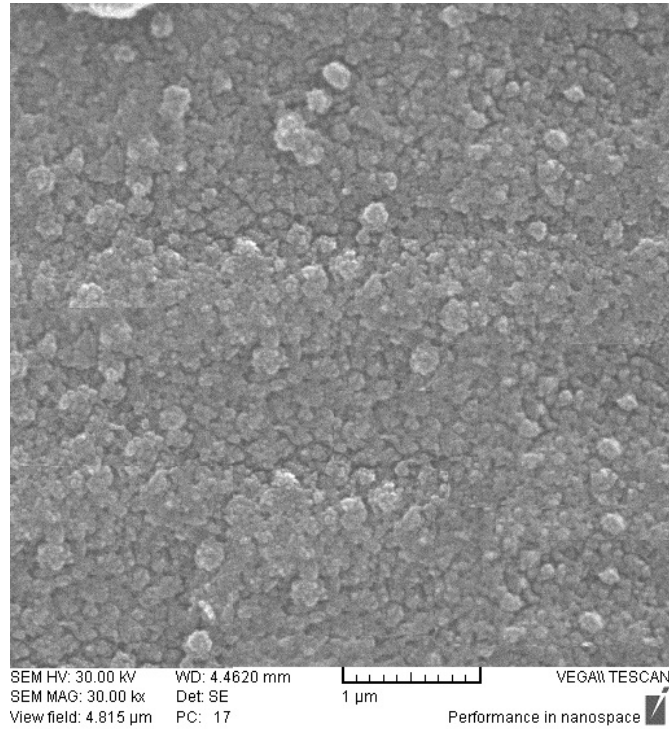
آلیاژ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Al
۲۰۲۴	۰/۵	۰/۵	۴/۵	۰/۵۳	۱/۴	۰/۳	۰/۱	باقیمانده

جدول ۲: پارامترهای الکتروشیمیایی از آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول ۳/۵٪ از نمک طعام

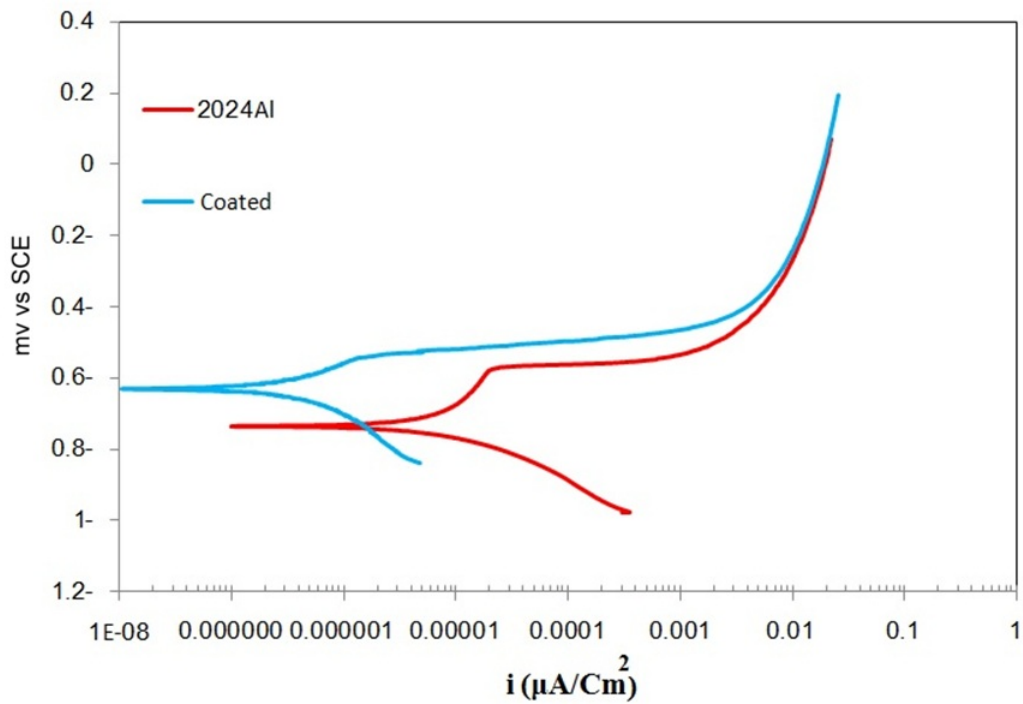
	E <sub>corr</sub> (mV vs. SCE)	I <sub>corr</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	β <sub>a</sub> (v/decade)	β <sub>c</sub> (v/decade)	E <sub>b</sub> (V vs. SCE)
آلیاژ ۲۰۲۴ بدون پوشش	-۷۲۹/۸۶۵	۴/۳۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۱/۶۰	۰/۹۷	-۵۷۵
آلیاژ ۲۰۲۴ با پوشش	-۶۲۷/۲۳۲	۲/۲۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۰/۹۱	۰/۸۱	-۵۴۳

جدول ۳: پارامترهای الکتروشیمیایی از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳/۵٪ از نمک طعام

	R <sub>s</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	Q <sub>coat</sub> (F.cm <sup>-2</sup> )	α	R <sub>por</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (F.cm <sup>-2</sup> )	α	R <sub>ch</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )
آلیاژ ۲۰۲۴ بدون پوشش	۲۷/۸۲	---	---	---	۳/۹۵×۱۰ <sup>-۵</sup>	۰/۸۶	۵۰۰۰
آلیاژ ۲۰۲۴ با پوشش	۳۰/۶۴	۳/۶۱×۱۰ <sup>-۵</sup>	۰/۶۲	۶۰/۵۴	۶/۹۳×۱۰ <sup>-۵</sup>	۰/۵۸	۹۳۲۵۳

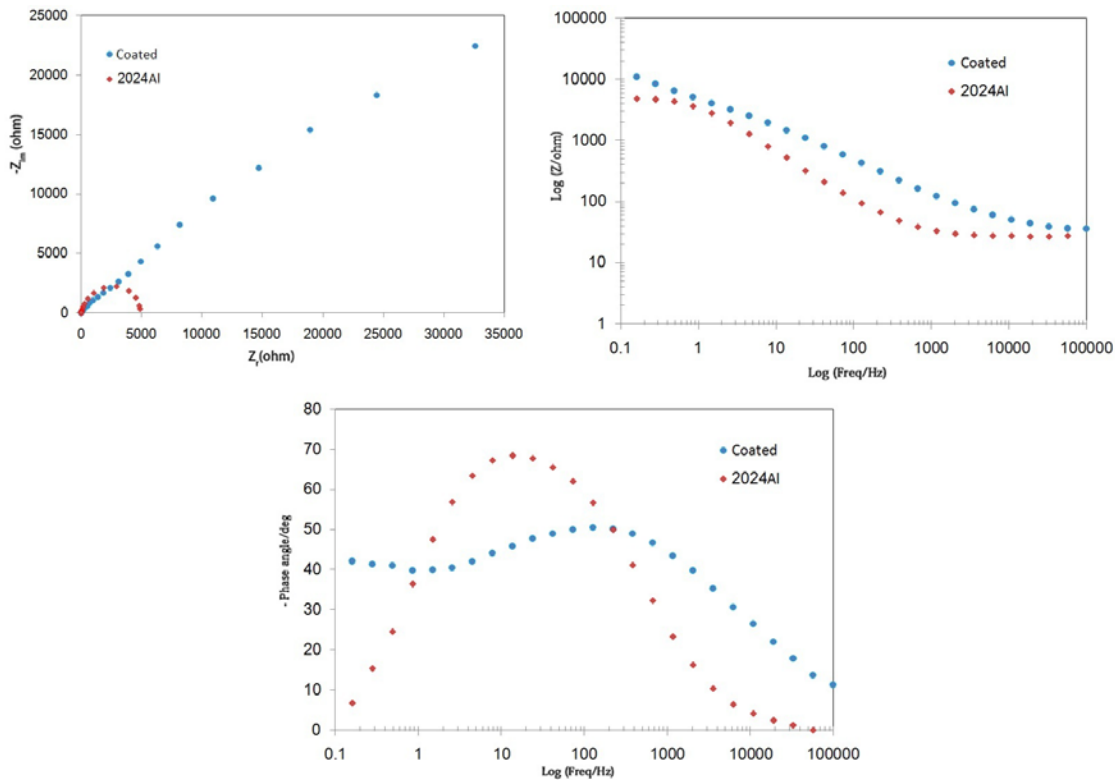


شکل ۱: تصاویر SEM از زیرلایه ی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در حضور پوشش اکسید سریم

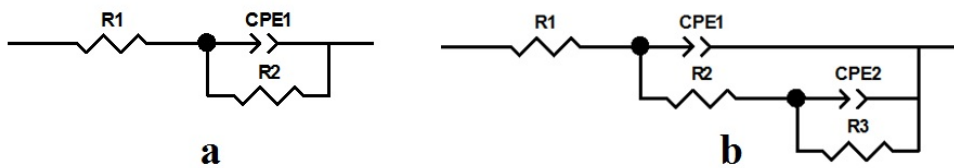


شکل ۲: منحنی پلاریزاسیون تافل از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در غیاب و حضور پوشش اکسید سریم





شکل ۳: منحنی‌های نایکویست، باد-فاز و باد-زد از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در غیاب و حضور پوشش اکسید سریم



شکل ۴: مدار معادل از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در (a) غیاب و (b) حضور پوشش اکسید سریم