



بررسی مقاومت به خوردگی پوشش غیر استوکیومتری آلومینیم فسفات بر روی فولاد ضد زنگ ۳۰۴

تارا بازدار^۱، عبدالمجید اسلامی^۲، احمد منشی^۳، فاطمه سادات سیدان^۴، علیرضا عباسلو^۵

^۱. دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد (دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی خوردگی)

^۲. دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد (دانشیار و مدیر گروه مهندسی خوردگی سطح)

^۳. دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، گروه مهندسی مواد (استاد)

^۴. دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد (دکترای مهندسی مواد)

^۵. تحقیق و توسعه مجتمع مس شهر بابک (کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

چکیده

پوشش‌های سرامیکی به ویژه سرامیک‌های با پیوند شیمیایی فسفاتی (CBPC) به عنوان یک راهکار مناسب برای جلوگیری از خسارات ناشی از خوردگی بسیار مورد توجه قرار دارند. آلومینیم فسفات که نوعی از CBPC ها است، دارای ویژگی‌های مناسبی از جمله پایداری شیمیایی خوب می‌باشد. در این تحقیق در کنار پتانسیل بالقوه آلومینیم فسفات، برای بهره‌مندی از مزایای ساختارهای آمورف نسبت به ساختارهای بلوری از نسبت‌های غیر استوکیومتری در ساخت این ماده به منظور دستیابی به یک ساختار آمورف پایدار استفاده شد. پس از مشخصه‌یابی پوشش، رفتار خوردگی الکتروشیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاکی از کاهش چگالی جریان خوردگی از مقدار $3/5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ به مقدار $1/12 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ بود. همچنین اثر بخشی پوشش در برابر خوردگی با استفاده از ضریب اثر بخشی، $96/57\%$ محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: آلومینیم فسفات؛ پوشش؛ خوردگی؛ فولاد ضد زنگ.

مقدمه

تخریب در قطعات صنعتی به دلایل مختلفی از جمله خوردگی، سایش، خوردگی خستگی، خوردگی سایشی و... اتفاق می‌افتد. در دنیا به طور میانگین ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ میلیارد دلار برای خسارات سالانه ناشی از خوردگی فلزات هزینه می‌شود [۱, ۲]. در حال حاضر استفاده از پوشش‌های مقاوم به خوردگی بیش از هر راه دیگری مورد توجه قرار دارد. سرامیک‌ها در سال‌های اخیر به دلیل پتانسیل زیاد در زمینه‌های شیمیایی مکانیکی و الکتروشیمیایی برای کاهش حجم خسارات ناشی از خوردگی مورد استفاده و تحقیق قرار می‌گیرند [۳, ۴]. در این بین، به پوشش‌های سرامیکی معدنی به ویژه سرامیک‌های با پیوند شیمیایی فسفاتی^۱ (CBPC) توجه ویژه‌ای شده است. CBPC‌ها در دمای پایین و با هزینه کم تولید می‌شوند و همچنین چسبندگی و خواص مکانیکی خوبی دارند. آلومینیم فسفات که یکی از انواع CBPC‌ها است در صنایع مختلف مانند نسوزها، پوشش‌های سد حرارتی، پوشش‌های دما بالا و مقاوم به اکسیداسیون و... مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. تا کنون تحقیقات بسیاری در رابطه با پوشش‌های آلومینیم فسفات صورت گرفته است؛ در این راستا دوان و همکارانش [۶]، مقاومت به اکسیداسیون آلومینیم فسفات را بر روی فولاد ساده کربنی بررسی کردند و دریافتند که مقاومت به اکسیداسیون افزایش پیدا کرده است. لیو همکارانش [۷]، از آلومینیم فسفات برای آب بندی پوشش آمورف و متخلخل بر پایه آهن استفاده کرده و با توجه به نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی دریافتند که مقاومت به خوردگی پوشش به میزان قابل قبولی افزایش یافته است. گوگتیه و همکارانش [۸]، از پوشش آلومینیم فسفات به روش فرایند الکتروشیمیایی کاتدی^۲ بر روی گرافیت استفاده کرده و دریافتند، پوشش آلومینیم فسفات تخلخل‌ها و حفرات گرافیت را پوشانده و مقاومت به اکسیداسیون را افزایش می‌دهد.

خواص فیزیکی و شیمیایی آلومینیم فسفات وابستگی زیادی به نسبت مولی آلومینیم به فسفر دارد، به طوری که با تغییر این نسبت می‌توان به خواص متفاوتی دست پیدا کرد. به طور مثال در نسبت‌های بزرگتر از یک P:Al می‌توان آبگریزی پوشش را افزایش داد. به طور کلی در نسبت‌های استوکیومتری، آلومینیم فسفات به دلیل تغییر حجم ناشی از تغییرات پلی مورفیک وابسته به دما دقیقاً مطابق با ساختار کوارتز، در محیط‌های با دمای بالا دارای محدودیت در استفاده می‌باشد. به همین دلیل با استفاده از نسبت‌های غیر استوکیومتری می‌توان از بلوری شدن ساختار و در پی آن تغییرات حجمی مذکور جلوگیری کرد [۹, ۱۰]. از طرفی ساختارهای آمورف به دلیل نداشتن مرزخانه و عیوب مربوط به ساختارهای بلوری، عموماً در محیط‌های خورنده رفتار بهتری نشان می‌دهند. به همین دلیل دستیابی به یک ساختار آمورف پایدار در این مواد اهمیت بسیاری دارد [۱۱]. وانگ و همکارانش [۱۲]، از آلومینیم فسفات آمورف به عنوان پوشش برای مقاومت به اکسیداسیون کامپوزیت زمینه Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V استفاده و مشاهده کردند پوشش آلومینیم فسفات باعث کاهش قابل ملاحظه اکسیداسیون در نمونه شده است. همچنین سیدان و همکارانش [۱۳]، دریافتند که پوشش آلومینیم فسفات آمورف بر روی فولاد ضد زنگ ۳۰۴، مقاومت خوبی در برابر

¹ Chemically-bonded phosphate ceramics

² Cathodic Electrochemical treatment

اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد نشان می‌دهد. هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار مقاومت به خوردگی الکترو شیمیایی پوشش آلومینیم فسفات بر روی زیر لایه فولاد ضد زنگ ۳۰۴ می‌باشد.

مواد و روش تحقیق

ورق فولاد ضد زنگ ۳۰۴ در ابعاد $20 \times 20 \times 4$ میلی‌متر برش داده و قطعات با استفاده از کاغذ سنباده کاربرد سیلیسیم تا مش ۲۵۰۰ سنباده زده شدند. در مرحله بعد سطح قطعات با استفاده از خمیر آلومینا کاملاً صیقلی شد. سل آلومینیم فسفات آمورف با استفاده از پیش ساز آلومینیم و پیش ساز فسفر سنتز شد، به طوری که در پیش ساز اول $40.8/92$ گرم آلومینیم نترات نه آبه در 382 میلی لیتر اتانول و در پیش ساز دوم $23/25$ گرم پنتاکسید فسفر در 300 میلی لیتر اتانول حل و سپس محلول پیش ساز دوم به محلول اول اضافه شد. پس از انحلال کامل و پس از گذشت زمان مناسب سل حاصل به مدت ۵ دقیقه تا قبل از رسیدن به نقطه جوش حرارت داده و پس از خشک شدن تا دمای محیط ۵٪ وزنی پودر پلی وینیل پیرولیدون^۱ (PVP) به آن اضافه شد [۱۴، ۱۵]. قطعه‌های فولادی قبل از پوشش دهی به مدت ۲۰ دقیقه به ترتیب در استون و آب دو بار تقطیر در حمام آلتراسونیک شسته و سپس خشک شدند. پس از آن در محلول اسیدی شامل هیدروکلریک اسید، نیتریک اسید و آب دو بار تقطیر با نسبت‌های حجمی $7:3:10$ به مدت ۵ ثانیه برای از بین بردن لایه‌های اکسید سطحی غوطه‌ور و سپس آبکشی شدند [۱۶]. پوشش دهی به روش غوطه‌وری^۲ و با سرعت ورود و خروج کنترل شده در سه مرحله انجام شد، به طوری که نمونه‌ها پس از داخل شدن به سل و یک دقیقه غوطه‌وری با همان سرعت خارج و با دمش هوای گرم خشک شدند. پس از تکرار سه مرحله در آون با دمای 65°C به مدت ۲۴ ساعت نگهداری و به دنبال آن در دمای 500°C به مدت ۱۵ دقیقه کلسینه شدند. برای کلسیناسیون نمونه‌ها از کوره با نرخ گرمایش و سرمایش $1^\circ\text{C}/\text{min}$ استفاده شد [۱۵].

آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) در زوایای $20 < \theta < 90$ برای مشخصه یابی پودر آلومینیم فسفات آمورف تهیه شده از سل خشک و کلسینه شده و مورد استفاده قرار گرفت. مورفولوژی سطحی پوشش با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز عنصری پوشش با استفاده از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی رفتار مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی پوشش با استفاده از آزمون‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس 100 kHz تا 10 mHz و به دنبال آن آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده پتانسیل -250 تا $+500$ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز در محلول آبی $3/5\%$ وزنی NaCl با استفاده از سل خوردگی سه الکترودی انجام و پارامترهای مورد نیاز محاسبه و اثر بخشی پوشش در برابر خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. در این سل از الکتروود Ag/AgCl به عنوان الکتروود مرجع و از الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود مقابل استفاده شد.

¹ Polyvinylpyrrolidone

² Dip-Coating

نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی XRD آلومینیم فسفات آمورف را نشان می‌دهد که وجود الگوی تپه مانند در زوایای ۲۰ تا ۳۰ درجه حاکی از آمورف بودن ساختار پودر پس از عملیات حرارتی در دمای ۵۰۰ °C می‌باشد که مطابق با پژوهش انجام شده توسط سیدان و همکارانش می‌باشد [۱۴].

شکل ۲ تصاویر SEM پوشش AlPO_4 را نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر قابل مشاهده است پوشش AlPO_4 متخلخل و کاملاً عاری از هرگونه رسوب و ترک می‌باشد. AlPO_4 و به طور کلی CBPC ها بسته به نوع فرایند سنتز و پوشش دهی می‌توانند ساختاری کاملاً متخلخل یا کاملاً متراکم داشته باشند [۱۷]. در این مورد به دلیل وجود یک پلیمر در ساختار سل و تبخیر کامل آن تا قبل از دمای کلسیناسیون وجود تخلخل در پوشش کاملاً طبیعی و قابل پیش بینی بود [۱۸]. همچنین وجود پیک های Al, P و O در الگوی EDS، وجود پوشش بر روی سطح را اثبات می‌کند.

برای بررسی کیفیت پوشش و همچنین رفتار مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی پوشش از آزمون EIS بر روی پوشش و زیر لایه در محدوده فرکانس ۱۰۰kHz تا ۱۰mHz استفاده شده و نتایج در نمودارهای نایکوئیست^۱ طبق شکل ۳ نشان داده شده است. مدار معادل مورد استفاده در مدلسازی نتایج طبق شکل ۴ و پارامترهای R_s ، R_c ، R_{ct} ، CPE_c و CPE_{dl} به ترتیب مربوط به مقاومت الکتروولیت، مقاومت پوشش، مقاومت انتقال بار، ظرفیت عنصر ثابت فازی^۲ پوشش و ظرفیت عنصر ثابت فازی لایه دوگانه الکتریکی می‌باشند. به دلیل وجود تخلخل و ناهمگنی در سطح و در نتیجه انحراف از حالت خازن ایده‌آل، از CPE به جای ظرفیت خازنی (C) در مدار معادل استفاده شده و مقدار n میزان انحراف از حالت خازن ایده‌آل را نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای مربوط به آزمون EIS در جدول ۱ نشان داده است [۱۹].

با توجه به نمودار نایکوئیست پوشش و زیر لایه در شکل ۳ وجود یک نیم دایره نشان دهنده این است که مکانیزم اصلی مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر انتقال بار توسط لایه دوگانه الکتریکی است و قطر این نیم دایره نشان دهنده میزان مقاومت در برابر انتقال بار است که در فرکانس های پایین تنها مکانیزم کنترل کننده خوردگی می‌باشد. اما از آنجایی که قطر نیم دایره مربوط به پوشش به مراتب بزرگتر از مقدار مربوط به پوشش است این مقاومت در مورد پوشش بسیار بیشتر از زیر لایه است. در فرکانس های متوسط پوشش در برابر خوردگی مقاومت نشان می‌دهد. با کاهش فرکانس پوشش خورده شده و رسوبات خوردگی تخلخل های پوشش را پر کرده و مانع از رسیدن الکتروولیت و یون های خورنده به سطح زیر لایه و انتقال الکترون از سطح زیر لایه به الکتروولیت می‌شود به بیانی دیگر سرعت واکنش خوردگی را کاهش می‌دهد. در مجموع می‌توان نتیجه گیری

¹ Nyquist

² Constant-Phase Element

کرد که پوشش مقاومت امپدانس مناسبی در محیط ۳/۵٪ NaCl نشان داده است که در تطابق با نتایج هوانگ و همکارانش می‌باشد [۲۰].

آزمون پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک در محلول آبی ۳/۵٪ NaCl در محدوده پتانسیل ۲۵۰- تا ۵۰۰+ نسبت به پتانسیل مدار باز بر روی پوشش و زیر لایه انجام شد. با توجه به نمودار پلاریزاسیون شکل ۴، در پوشش $AlPO_4$ پتانسیل خوردگی (E_{corr}) از مقدار ۰/۲۹۳- ولت مربوط به زیر لایه به مقدار ۰/۳۷۳- ولت کاهش داشته که نشان دهنده فعال تر بودن پوشش نسبت به فولاد ضد زنگ ۳۰۴ از نظر ترمودینامیکی است. چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) نیز از مقدار $3/5 \times 10^{-7} A/cm^2$ به مقدار $1/12 \times 10^{-7} A/cm^2$ کاهش پیدا کرده است که عملکرد بهتر پوشش در محدوده پتانسیل OCP را نشان می‌دهد. شیب شاخه آندی در زیر لایه فولادی با افزایش پتانسیل تقریباً نزدیک به صفر است که نشان دهنده رفتار پسیو فولاد می‌باشد. اما در مورد پوشش جریان خوردگی در شاخه آندی به شکل تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند. این رفتار بیانگر عدم وجود هرگونه رسوبات خوردگی محافظت کننده و پایدار است. در نتیجه در پتانسیل‌هایی بالاتر از پتانسیل خوردگی، نرخ انحلال پوشش $AlPO_4$ افزایش پیدا می‌کند و در مقایسه با فولاد ضد زنگ ۳۰۴ مقاومت مناسبی نشان نمی‌دهد. مقاومت پلاریزاسیون طبق معادله ۱ محاسبه و به همراه سایر پارامترهای مربوط به پلاریزاسیون در جدول ۱ آورده شده است. در این معادله R_p نشان دهنده مقاومت پلاریزاسیون، β_a و β_c به ترتیب شیب شاخه آندی و شیب شاخه کاتدی می‌باشد.

$$R_p = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \times \frac{1}{i_{corr}} \quad (1)$$

ضریب اثر حفاظتی پوشش که به طور کمی اثر پوشش دهی بر روی مقاومت به خوردگی زیر لایه را نشان می‌دهد، با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد. با توجه به اینکه ضریب حفاظتی پوشش ۹۶/۵۷ و، پوشش آلومینیم فسفات عملکرد حفاظتی مناسبی را در محدوده پتانسیل خوردگی نشان می‌دهد که بهتر از نتایج به دست آمده از پژوهش‌های لیو و همکارانش [۲۱]، همچنین هوانگ و همکارانش می‌باشد [۲۰].

$$PE\% = \frac{i_{corr}^s - i_{corr}}{i_{corr}^s} \times 100 \quad (2)$$

نتیجه گیری

- ۱) استفاده از آلومینیم فسفات آمورف پایدار به عنوان پوشش با استفاده از نسبت‌های غیر استوکیومتری Al/P قابل دستیابی است.
- ۲) با عملیات حرارتی مناسب می‌توان به پوشش آلومینیم فسفات با ساختار یکنواخت و عاری از ترک دست پیدا کرد.

۳) مقاومت امیدانس پوشش بسیار بیشتر از زیر لایه است و همین امر کارایی مناسب این پوشش در شرایط غوطه‌وری را نشان می‌دهد.

۴) مقدار کمتر چگالی جریان خوردگی پوشش نسبت به زیر لایه و در نتیجه افزایش ضریب اثر حفاظتی پوشش، کارآمدی این پوشش در برابر خوردگی در محیط خورنده را نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان از دانشگاه صنعتی اصفهان و مجتمع مس شهر بابک بخاطر حمایت‌های انجام شده کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

1. B. Praveen and T. Venkatesha, "Electrodeposition and properties of Zn-Ni-CNT composite coatings", Journal of alloys and compounds, 482, 2009, 53-57.
2. S. Deng, et al., "Preparation and characterization of fiber-reinforced aluminum phosphate/silica composites with interpenetrating phase structures", International Journal of Applied Ceramic Technology, 8, 2011, 360-365.
3. F. Wu, et al., "Multifunctional AlPO₄ coating for improving electrochemical properties of low-cost Li [Li_{0.2}Fe_{0.1}Ni_{0.15}Mn_{0.55}] O₂ cathode materials for lithium-ion batteries", ACS applied materials & interfaces, 7, 2015, 3773-3781.
4. G. Meetham, "Use of protective coatings in aero gas turbine engines", Materials science and technology, 2, 1986, 290-294.
5. D. Bian, et al., "Improving tribological performance of chemically bonded phosphate ceramic coatings reinforced by graphene nano-platelets", Ceramics International, 43, 2017, 12466-12471.
6. W. Duan, et al., "Surface functionalization of carbonyl iron with aluminum phosphate coating toward enhanced anti-oxidative ability and microwave absorption properties", Applied Surface Science, 427, 2018, 594-602.
7. M. Liu, H. Hu, and Y. Zheng, "Effects of three sealing methods of aluminum phosphate sealant on corrosion resistance of the Fe-based amorphous coating", Surface and Coatings Technology, 309, 2017, 579-589.
8. H.S. Gugtaph, K. Jafarzadeh, and Z. Valefi, "Oxidation protection of aluminum metaphosphate coating prepared by cathodic electrochemical treatment for graphite", Ceramics International, 45, 2019, 15815-15823.
9. N. Van Tuan, et al., "USE OF ALUMINUM PHOSPHATE FOR SEALING THE ELECTRIC ARC THERMAL SPRAY NICKEL CHROMIUM ALLOY COATING", Malaysian J. of Chemistry, 19, 2017, 124-130.
10. S. sambasivan and K. Steiner, High Temperature Amorphous Composition Based on Aluminium Phosphate, US Patent, 2004.
11. F. Gutiérrez-Mora, et al., "High-temperature deformation of amorphous AlPO₄-based nano-composites", Journal of the European Ceramic Society, 26, 2006, 1179-1183.
12. Y. Wang, et al., "Amorphous AlPO₄ coating formed on titanium alloy for high temperature oxidation protection: oxidation kinetics and microstructure", Surface and Coatings Technology, 252, 2014, 134-141.

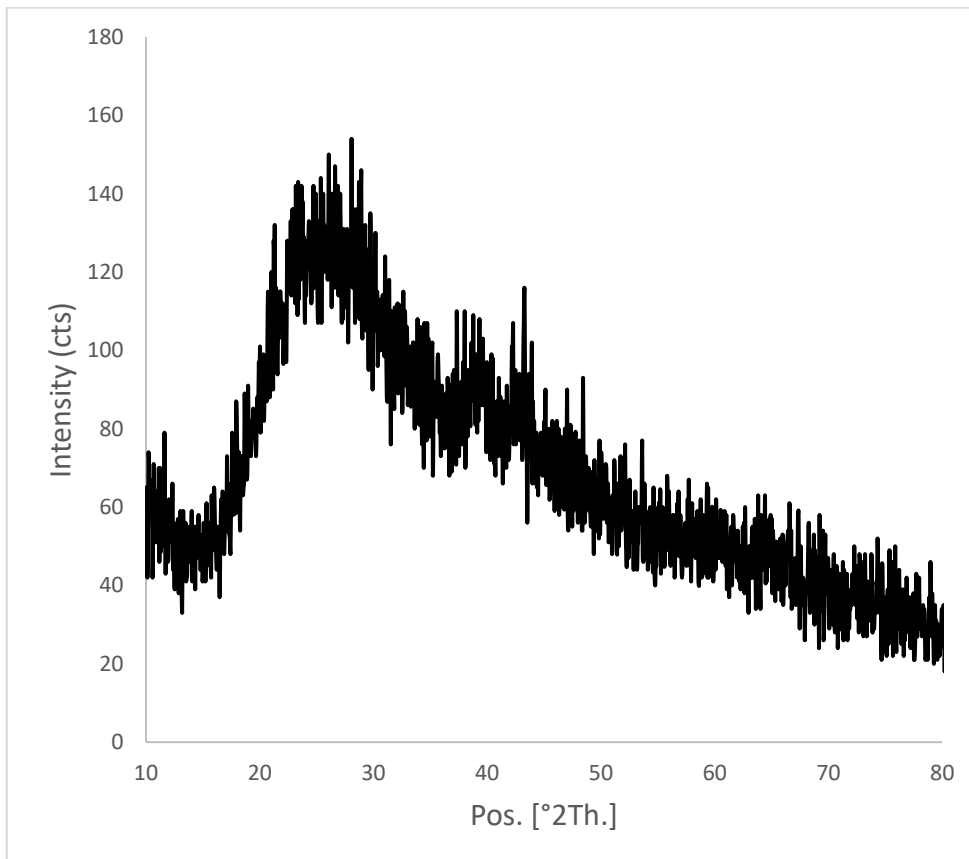
13. F. Sayyedani and M. Enayati, "*Evaluating oxidation behavior of amorphous aluminum phosphate coating*", Applied Surface Science, 455, 2018, 821-830.
14. F. Sayyedani, et al., "*Synthesis and characterization of sol-gel derived non-stoichiometric aluminum phosphate coating*", Surface and Coatings Technology, 351, 2018, 128-135.
15. S. sambasivan, K. Steiner, and K. Rangan, *Aluminum Phosphate Coatings*, US Patent, 2010.
16. B.L. Bramfitt and A.O. Benscoter, "*Metallographer's guide: practice and procedures for irons and steels*", 2001, Asm International,
17. G. Liu, et al., "*Synthesis and pore formation study of amorphous mesoporous aluminophosphates in the presence of citric acid*", Journal of colloid and interface science, 302, 2006, 278-286.
18. J. Du, et al., "*PVP-assisted preparation of nitrogen doped mesoporous carbon materials for supercapacitors*", Journal of Materials Science & Technology, 58, 2020, 197-204.
19. J. Huang, "*Diffusion impedance of electroactive materials, electrolytic solutions and porous electrodes: Warburg impedance and beyond*", Electrochimica Acta, 281, 2018, 170-188.
20. X. Huang, D. Wang, and Y. Dong, "*Corrosion resistance phosphate coating formed by steam assisted curing on cast AlSi alloy*", Surface and Coatings Technology, 382, 2020, 125242.
21. Y. Liu, et al., "*Influence of curing temperature on corrosion protection property of chemically bonded phosphate ceramic coatings with nano-titanium dioxide reinforcement*", Ceramics International, 45, 2019, 1595-1604.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای الکتروشیمیایی آزمون EIS

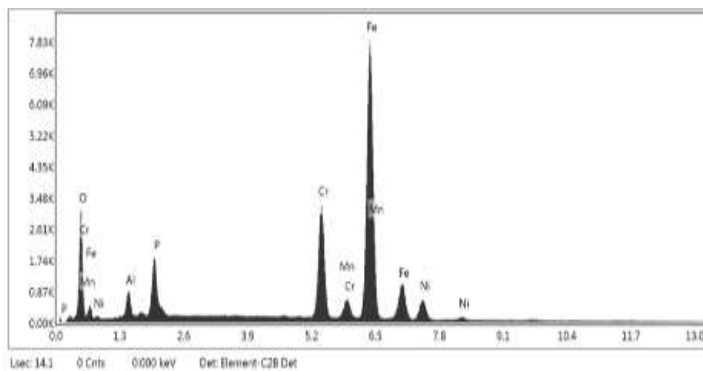
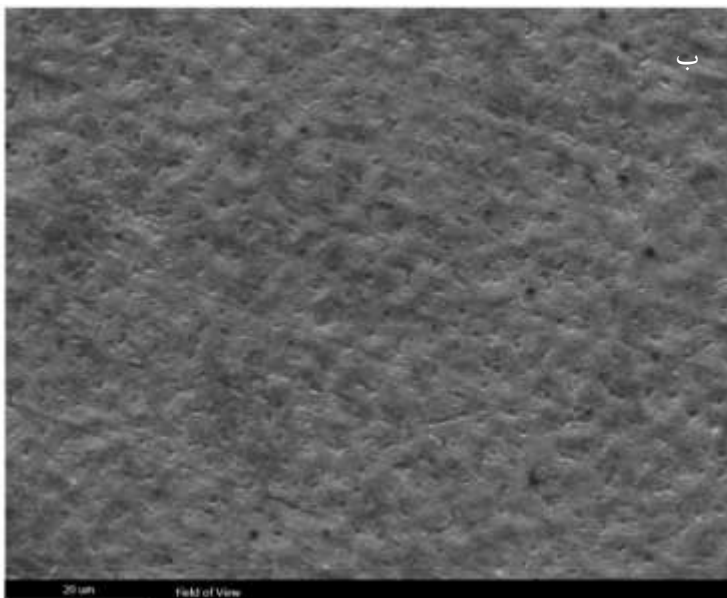
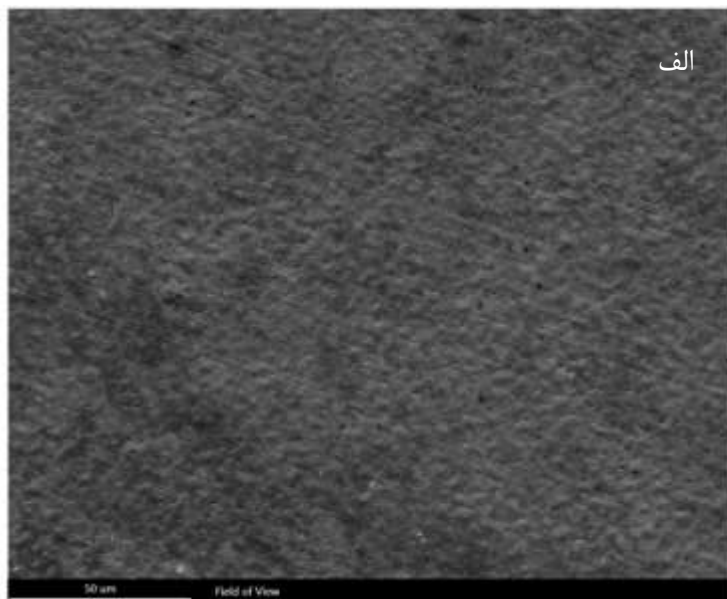
| نمونه | R_s (ohm cm ²) | CPE_C (s ^o ohm ⁻¹ cm ⁻²) | n_C | R_C (ohm cm ²) | CPE_{dl} (s ^o ohm ⁻¹ cm ⁻²) | n_{dl} | R_{ct} (ohm cm ²) |
|---------|---------------------------------|---|-------|---------------------------------|--|----------|------------------------------------|
| زیرلایه | ۵/۰۸۶ | - | - | - | $۴/۹۴ \times ۱۰^{-۵}$ | ۰/۸۳۸ | $۳/۲۶ \times ۱۰^۵$ |
| پوشش | ۲۵ | $۲/۵۱ \times ۱۰^{-۸}$ | ۱/۰۰۱ | ۱۶۱/۷ | $۲/۲۵ \times ۱۰^{-۶}$ | ۰/۶ | $۱/۲۵ \times ۱۰^۶$ |

جدول ۲: مقادیر پارامترهای محاسبه شده با استفاده از آزمون پلاریزاسیون

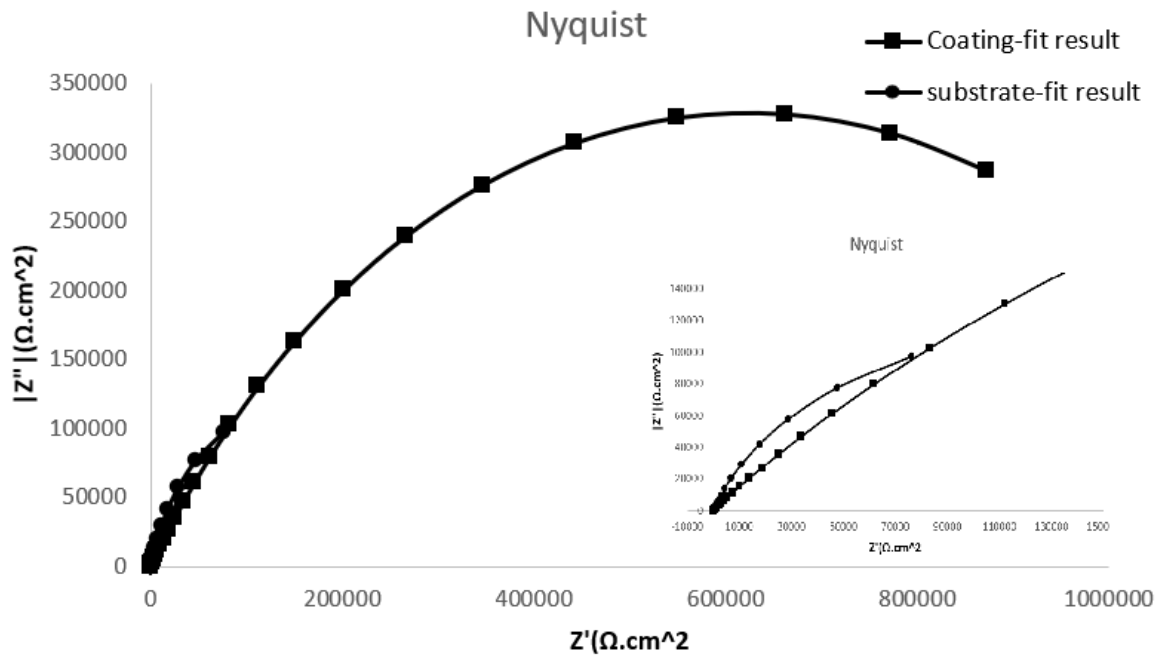
| نمونه | E_{corr} (v) | i_{corr} (A/cm ²) | R_p (Ωcm ²) | PE% |
|---------|-------------------|------------------------------------|------------------------------|-------|
| زیرلایه | -۰/۲۹۳ | $۳/۵ \times ۱۰^{-۷}$ | $۰/۱۲ \times ۱۰^۶$ | - |
| پوشش | -۰/۳۷۳ | $۱/۱۲ \times ۱۰^{-۸}$ | $۲/۴ \times ۱۰^۶$ | ۹۶/۵۷ |



شکل ۱: الگوی XRD پودر کلسینه شده AIPO



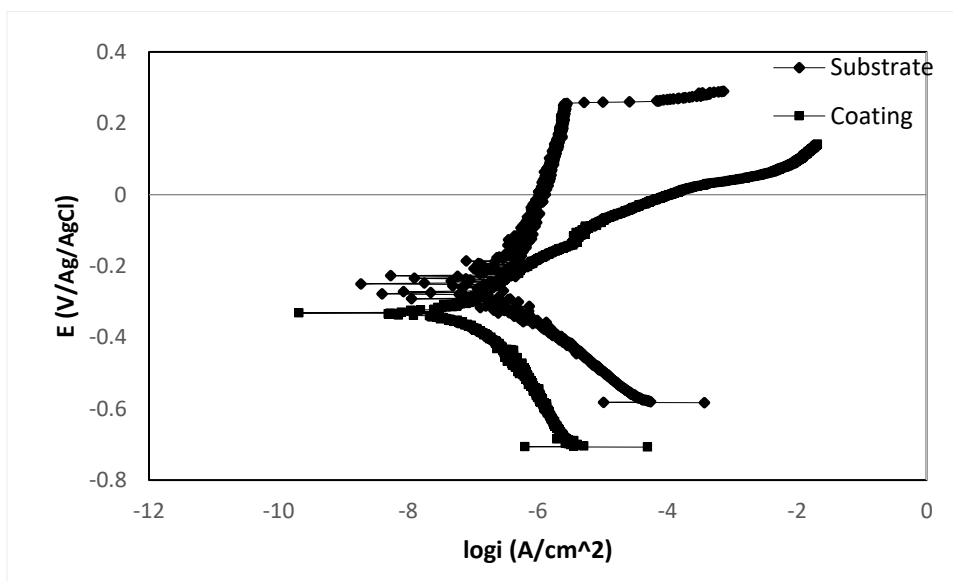
شکل ۲: تصاویر SEM از سطح پوشش با بزرگنمایی های الف- ۲۰۰۰ و ب- ۴۰۰۰ برابر ج- الگوی EDS از سطح پوشش



شکل ۳: نمودار نایکوئیست پوشش $AlPO_4$ و زیر لایه در محلول آبی ۳/۵٪ $NaCl$



شکل ۴: مدار معادل مورد استفاده در مدل کردن الف-زیر لایه ضد زنگ ۳۰۴؛ ب- پوشش $AlPO_4$



شکل ۵: نمودار پلاریزاسیون زیر لایه ۳۰۴ فولاد ضد زنگ و پوشش $AlPO_4$