تاثیر افزودنی‌های سریم نیترات و آدپیک اسید بر رفتار مقاومت به خوردگی و ریزساختار پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم

لیلا ممی زاده جانقور[۱]، علی اصغر سرابی[۲*]، شمیم روشن[۳]

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲ دانشیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

* نویسنده مسئول: sarabi@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰٤

چکیده

در این پژوهش، تاثیر افزودنی معدنی سریم نیترات و هم‌چنین افزودنی آلی آدپیک اسید بر رفتار مقاومت به خوردگی و ریزساختار پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی زمینه‌ی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بررسی شد. ابتدا غلظت بهینه از هر دو افزودنی آلی و معدنی در شرایط بهینه‌ی پوشش‌دهی در عدم حضور افزودنی‌ها، با استفاده از نتایج آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون جریان مستقیم (DC) تعیین شد. سپس به منظور بررسی مناسب تاثیر این دو افزودنی بهینه‌سازی مجدد سه پارامتر زمان، دما وpH محلول پوشش‌دهی در حضور افزودنی‌ها انجام شد. براساس نتایج حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون جریان مستقیم و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشمیایی، نمونه‌ی پوشش شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از نمک سریم نیترات، pH برابر ۴، زمان غوطه‌وری ۲۵ دقیقه و در دمای محیط بالاترین میزان مقاومت به خوردگی را نشان داد. این میزان از مقاومت در برابر خوردگی (جریان خوردگی ۰/۰۲۶ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع و میزان امپدانس در فرکانس‌های پایین برابر با ۸۵۲۰۰اهم.سانتی‌متر مربع)، نشان دهنده‌ی افزایش چشم‌گیر مقاومت به خوردگی زمینه‌ی آلومینیوم (جریان خوردگی ۲/۲۸ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع و میزان امپدانس در فرکانس‌های پایین برابر با ۱۸۵۱۰ اهم.سانتی‌متر مربع) با اعمال پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور سریم نیترات است. هم‌چنین در حضور افزودنی آدپیک اسید مقاومت به خوردگی زمینه‌ی فلزی زیاد شد. برای بررسی ویژگی‌های سطح پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور افزودنی‌ها از آزمون‌های زاویه تماس آب، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراکنش انرژی اشعه‌ی ایکس استفاده شد.

کلیدواژه: پوشش تبدیلی وانادیوم، سریم نیترات، آدپیک اسید، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشمیایی، آلیاژ ۲۰۲۴آلومینیوم.

Effect of Cerium Nitrate and Adipic Acid Additives on Anti-Corrosion Resistance and Microstructure of Vanadium Conversion Coating on 2024 Aluminum Alloy

Leila Mamizadeh Janqour[1], Ali Asghar Sarabi[2*], Shamim Roshan[3]

1. Faculty of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
2. Faculty of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
3. Faculty of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

* **Corresponding Author:** sarabi@aut.ac.ir

Submission: 2019, 01, 01 Acceptance: 2019, 05, 25

Abstract

In this research, the effect of inorganic and organic additives of cerium nitrate and adipic acid on anti-corrosion resistance and microstructure of vanadium conversion coating on 2024 aluminum alloy was investigated. First, using the results of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and direct current polarization (DC), optimum value of concentration of both organic and inorganic additives under optimum coating conditions in the absence of additives was determined. Then, in order to properly evaluate the effect of additives, practical process parameters such as immersion time, solution pH and solution temperature were optimized in the presence of additives. Based on the results of direct current polarization and electrochemical impedance spectroscopy, the coated sample with vanadium conversion coating in the presence of 2 gr/lit of cerium nitrate, solution pH of 4, immersion time of 25 minutes and at ambient temperature showed the highest anti-corrosion resistance. This anti-corrosion performance (corrosion current density of 0.026 µA/cm2 and impedance at low frequencies of 85,200 Ω.cm2), displayed significant improvement in anti-corrosion resistance of bare substrate (corrosion current density of 2.28 µA/cm2 and impedance at low frequencies of 18,510 Ω.cm2) by develpoing vanadium conversion coating in the percense of cerium nitrate. Also, in the presence of adipic acid additive the anti-corrosion resistance of substrate increased. In order to investigate the surface characteristics of the vanadium conversion coating in the presence of additives, water contact angle measurment, scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy were used.

Keywords: Vanadium conversion coating, Cerium nitrate, Adipic acid, Scanning electron microscopy, Electrochemical impedance spectroscopy, 2024 aluminum alloy.

۱ـ مقدمه

به منظور آماده‌سازی و اصلاح سطحی فلزات با هدف بهبود خواص ضدخوردگی و چسبندگی به پوشش آلی از روش‌ها و فن‌آوری‌های گوناگونی استفاده می‌شود. در این میان، استفاده از پوشش‌های تبدیلی به دلیل افزایش مقاومت به خوردگی فلز، بهبود چسبندگی لایه‌ی اعمالی بعدی، کاربرد آسان و مقرون به صرفه بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۵-۱]. هم‌چنین، این پوشش‌ها مانند یک سد فیزیکی بین زیرلایه و محیط خورنده عمل کرده و علاوه بر محافظت در برابر خوردگی، در برخی موارد با افزایش انرژی سطحی و زبری، چسبندگی پوشش آلی به زیرآیند فلزی را بهبود می‌بخشند[۱۰-۶]. پوشش تبدیلی کروماته یکی از مهم‌ترین پوشش‌های تبدیلی است که استفاده از آن کاهش سرعت خوردگی قابل قبول بر روی زیرآیند فلزی را در پی دارد [۱۱و۱۲]. اما استفاده از این پوشش به دلیل سمیت بالای ترکیبات کروم شش ظرفیتی و سرطان‌زا بودن آن در حال محدود شدن است [۱۳-۱۵]. از این رو، انواع مختلف پوشش-های تبدیلی برپایه‌ی فسفات پرمنگنات، فلوراید، استانات، فیتیک اسید و وانادیوم در حال جایگزین شدن با پوشش تبدیلی کروماته و فسفاته می‌باشند [۲۰-۱۶]. پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی زمینه‌ی فلزی آلیاژ آلومینیوم دارای مقاومت به خوردگی بالا و هم‌چنین خاصیت خود ترمیم‌شوندگی است [۲۲-۲۱]. در سال ۲۰۱۱ خاصیت خودترمیم‌شوندگی پوشش تبدیلی وانادیوم برروی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ توسط حمدی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳]. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش آنها، در غلظت ۱۰ گرم بر لیتر از نمک سدیم وانادات یک پوشش عاری از ترک (با ضخامت ۱ تا ۱/۲ میکرومتر) بر روی سطح فلز تشکیل شد و پوشش ایجاد شده در غلظت کم وانادیوم توانایی غیرفعال ساختن مکان‌های فعال بر روی سطح فلز و ترمیم ترک‌های ایجاد شده بر روی سطح را نشان داد.

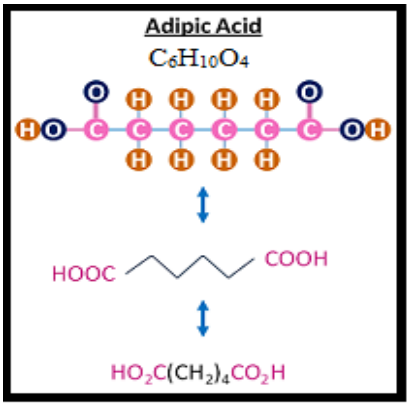
نتایج تحقیقات اخیر نشان داده است که پوشش‌های جایگزین کروماته نتوانسته‌اند به تنهایی خواص مشابه این پوشش را ایجاد نمایند. در سال‌های اخیر تلاش شده است تا با اضافه نمودن انواع افزودنی‌ها، خواص پوشش‌های تبدیلی بر روی سطوح فلزی از قبیل فولاد، روی، گالوانیزه، آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم بهبود داده شود. در این راستا افزودنی‌هایی به صورت عناصر خاکی کمیاب به دلیل سازگار بودن با محیط زیست، بازدارنده‌ها و مواد فعال سطحی به پوشش‌های تبدیلی افزوده شده‌اند تا مقاومت در برابر خوردگی آن را افزایش دهند[۲۷-۲۴]. در سال ۲۰۱۳ پوشش تبدیلی زیرکونیوم در حضور افزودنی وانادیوم بر روی آلیاژهای آلومینیوم تو سط یالی لیو و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۲۸]. با توجه به نتایج مقاله‌ی آن‌ها، پوشش تبدیلی دارای ساختار مشبک از زیرکونیوم‌اکسید بوده که یون‌های پنج ظرفیتی وانادیوم‌اکسید و وانادیوم‌اکسید هیدارته درون این ساختار مشبک حضور دارند. در مراحل اولیه غوطه‌وری، خوردگی موضعی در محلول سدیم‌کلرید شروع شده ولی با افزایش زمان غوطه‌وری مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد که این بدلیل خارج شدن ذرات وا نادیوم از دا خل پوشش و رسوب آن در مناطق آسیب‌دیده‌ی پوشش است.

نقطه‌ی ضعف پوشش‌های تبدیلی بر پایه‌ی عناصر خاکی کمیاب، خواص ضدخوردگی نامطلوب آنها به دلیل وجود ترک فراوان در ساختمان آن‌ها می‌باشد [۳۵-۲۹]. برای بهبود این خواص، از افزودنی‌های متفاوتی در فرمولاسیون این پوشش‌ها استفاده شده است [۴۰-۳۶]. سریم به دلیل سازگاری با محیط زیست، فراوانی در طبیعت و مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی می‌تواند به عنوان افزودنی موثر در محلول پوشش‌های تبدیلی استفاده شود [۴۱-۴۲]. در سال ۲۰۱۶ قابلیت خودترمیم شوندگی پو شش تبدیلی وانادیوم در حضور افزودنی سریم بر روی آلیاژAZ31 منیزیم توسط روگیانگ چو و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۴۳]. با توجه به نتایج حاصل از این مقاله پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب سریم‌نیترات ظاهری هموار دا شته و دارای ترک‌های بسیار ریز است. با افزایش غلظت سریم نیترات ضخامت پو شش افزایش یافته و تعداد و عمق ترک‌های ایجاد شده بر روی سطح پوشش افزایش می‌یابد و در یک غلظت مشخص از سریم نیترات میزان مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی به مقدار حداکثر می‌رسد.

برخی از تحقیقات برای نشان دادن تاثیر لایه‌ی تبدیلی آلی بر خواص الکتروشیمیایی پوشش‌ها اختصاص داده شده است [۴۴-۴۵]. با این حال، تعداد معدودی از مطالعات در مورد تاثیر افزودنی‌های آلی بر خواص پوشش تبدیلی گزارش شده است. در سال ۲۰۱۶، عیوض محمدلو و همکارانش خواص پوشش تبدیلی تیتانیوم را در حضور افزودنی فیتیک اسید بر روی زمینه‌ی فولاد نورد سرد بررسی کردند. آنها از فیتیک اسید به عنوان یک افزودنی آلی استفاده کرده و نشان دادند که حضور آن می‌تواند چسبندگی پوشش آلی را روی نمونه‌های پوشش شده با پوشش تبدیلی تیتانیوم افزایش دهد [۲۰].

آدیپک اسید (C6H10O4) (که به عنوان یک افزودنی آلی در این پژوهش استفاده شده است)، یک مولکول آلی دارای دو گروه کربوکسیل است که قادر به تشکیل نمک نامحلول، رسوب در سطح فلز و بهبود مقاومت به خوردگی آن است [۴۶]. ساختار شیمیایی آدیپک اسید در شکل ۱ نشان داده شده است [۴۶].

براساس بررسی‌های صورت گرفته تا به امروز از دو افزودنی آلی و معدنی جهت بهبود خواص ضدخوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیوم استفاده نشده است. این درحالی است که هر یک از افزودنی‌های معدنی و آلی می‌تواند موجب تغییر خاصی در رفتار مقاومت به خوردگی و ریزساختار پوشش تبدیلی شود. در مقاله حاضر تاثیر افزودنی معدنی سریم نیترات و هم‌چنین افزودنی آلی آدیپک اسید بر رفتار مقاومت به خوردگی و ریزساختار پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیوم بررسی شده است.



شکل ۱: ساختار شیمیایی آدیپک اسید [٤٦].

۲ـ مواد و روش آزمایش

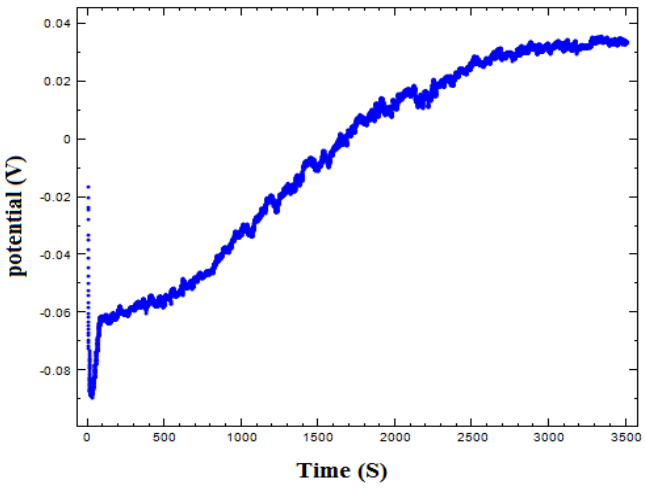
۲ ـ ۱ ـ مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

ورقه‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ با ابعاد ۳ میلی متر × ۴ سانتی متر × ۲ سانتی متر به عنوان زیرآیند در این پژوهش استفاده شد. ترکیب عناصر موجود در این آلیاژ شامل ۴/۴ درصد وزنی مس، ۳/۱ درصد وزنی منیزیم، ۰/۶ درصد وزنی منگنز، ۰/۳ درصد وزنی آهن و ۹۳/۳ درصد وزنی آلومینیوم است. محلول‌های آماده‌سازی مورد استفاده در این پژوهش شامل سدیم-هیدروکسید تهیه شده از شرکت مرک و نیتریک اسید تهیه شده از شرکت نیوترن می‌باشند. جهت آماده‌سازی مکانیکی، ورقه-های آلومینیومی با کاغذ کاربید سیلیسیم با مش‌بندی ۸۰۰ سمباده زده شد. در مرحله‌ی بعد نمونه‌ها به منظور حذف روغن و آلودگی‌های موجود در سطح به مدت ۶ دقیقه در سدیم هیدروکسید ۲ مولار و ۵ دقیقه در محلول نیتریک اسید ۵۰ درصد وزنی جهت حذف لایه‌ی اکسیدی قرار داده شد. بین تمامی مراحل آماده‌سازی، نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و تمامی مراحل در دمای محیط انجام شد [۴۷]. محلول پوشش تبدیلی شامل نمک سدیم‌وانادات، سریم نیترات و آدیپک اسید است. از سدیم‌هیدروکسید و نیتریک اسید به عنوان تنظیم کننده pH استفاده شده است. براساس نتایج حاصل از پژوهش قبلی ما، شرایط بهینه‌ی پوشش‌دهی در عدم حضور افزودنی‌ها شامل غلظت ۱۰ گرم بر لیتر از نمک سدیم وانادات، pH محلول برابر ۴، مدت زمان پوشش‌دهی ۲۵ دقیقه و دمای محیط است. در این شرایط پوشش‌دهی به منظور تعیین غلظت بهینه از هر دو افزودنی، غلظت‌های مختلف از افزودنی‌های سریم نیترات و آدیپک اسید به محلول پوشش تبدیلی وانادیوم اضافه شد. سپس بهینه‌سازی مجدد سه پارامتر زمان غوطه‌وری، دما و pH محلول پوشش‌دهی در حضور افزودنی‌ها انجام شد.

۲ ـ ۲ ـ مشخصات آزمون‌ها

به منظور بررسی رفتار مقاومت به خوردگی از آزمون‌های پلاریزاسیون جریان مستقیم و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. آزمون پلاریزاسیون جریان مستقیم با استفاده از دستگاه AUTOLAB PG-STAT302N با آهنگ روبش ۱ میلی‌ولت بر ثانیه با محدوده پتانسیل ۸۰۰ میلی‌ولت

نسبت به پتانسیل مدار باز در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم-کلرید انجام شد .آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نیز با استفاده از دستگاه مشابه با دامنه سینوسی ۱۰ میلی‌ولت و در محدوده فرکانس ۰/۰۱ تا ۱۰ کیلوهرتز صورت گرفت (هر نمونه شامل ۵۰ نقطه فرکانسی). این آزمون‌ها در یک دسته‌بندی الکترودی که الکترود کار، الکترود مرجع و الکترود کمکی به ترتیب نمونه‌ی پوشش شده، الکترود نقره/کلرید نقره و الکترود پلاتین بودند، انجام شد. برای این آزمون‌ها مساحت ۱ سانتی‌مترمربع از سطح آلومینیوم پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در معرض الکترولیت قرارگرفت و سایر قسمت‌ها با مخلوط مذاب بیزوکس وکلوفونی پوشانده شد. قبل از انجام هر آزمون الکتروشیمیایی نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید به منظور پایدارشدن پتانسیل قرار گرفتند. آزمون پلاریزاسیون جریان مستقیم بلافاصله بعد از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (بعد از ۱۰ دقیقه قرارگیری در محلول سدیم کلرید) انجام شد. چگالی جریان خوردگی توسط روش برون‌یابی تافل در محدوده‌ی ۵۰ ±میلی-ولت اطراف پتانسیل مدار باز به دست آمد. نرم افزار Nova ۱٫۱۱ برای ارزیابی نتایج آزمون پلاریزاسیون جریان مستقیم و تحلیل داده‌ای آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. به منظور اطمینان از قابلیت تکرارپذیری، آزمون‌های الکتروشیمیایی سه بار تکرار شد. دامنه‌ی تغییرات برای تمامی داده‌ها بین ۱تا ۵ درصد بوده است. دمای محیط در این پژوهش ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی ریزساختار سطح پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور افزودنی‌ها و زمینه‌ی بدون پوشش از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای شناسایی عناصر موجود در پوشش تبدیلی تشکیل شده بر روی زمینه آلومینیوم ۲۰۲۴، از طیف‌سنجی پراکنش انرژی اشعه‌ی ایکس استفاده شد. این آزمون‌ها در یک دستگاه با مدل VEGA/TESCAN-XMU انجام شد. جهت انجام این آزمون نمونه‌ی پوشش شده در شرایط بهینه‌ی پوشش‌دهی در حضور افزودنی‌ها و نمونه بدون پوشش در یک محفظه‌ی خلا قرار گفته و با برخورد اشعه‌ی الکترونی به نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپی به دست آمد. برای بررسی خاصیت آب‌دوستی و یا آب‌گریزی سطح نمونه‌ها از آزمون زاویه تماس آب استفاده شد. نمودار تغییرات پتانسیل طی زمان قبل از انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی درشکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ : روند تغییرات پتانسیل مدار باز آلومینیوم ۲۰۲٤ طی غوطه وری در محلول پوشش تبدیلی وانادیوم (در شرایط بهینه‌ی پوشش دهی: غلظت ۱۰ گرم بر لیتر از سدیم وانادات، pH برابر٤، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دمای محیط).

۳ـ نتایج و بحث

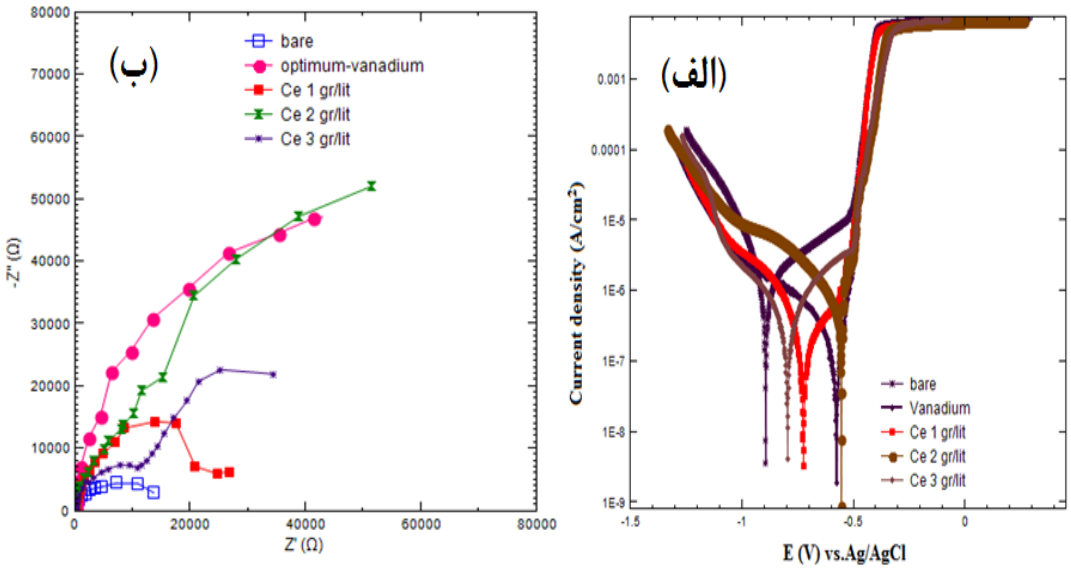
۳ـ۱ـ آزمون‌های الکتروشیمیایی/ بررسی اثر سریم ـ نیترات بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم

۳ـ ۱ ـ ۱ ـ تعیین غلظت بهینه‌ی افزودنی سریم‌نیترات

منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه‌های پوشش شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۱، ۲ و ۳ گرم بر لیتر از نمک سریم نیترات، دمای محیط، مدت زمان ۲۵ دقیقه و pH محلول برابر ۴ به همراه نمونه‌ی بدون پوشش و نمونه‌ی پوشش شده در شرایط بهینه‌ی وانادیوم (در غیاب سریم نیترات) در شکل۳-الف آورده شده است. با توجه به این شکل، دانسیته‌ی جریان خوردگی نمونه‌ی پوشش شده در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات کمتر از نمونه‌های پوشش‌شده در حضور ۱ و۳ گرم بر لیتر از این نمک است. نتایج حاصل از برون-یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون این نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این جدول، دانسیته‌ی جریان خوردگی نمونه‌ی پوشش‌شده در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات (۰/۰۲۶ میکروآمپر بر سانتی-مترمربع) نسبت به دانسیته‌ی جریان خوردگی نمونه‌ی بدون پوشش (۲/۲۶ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع) بسیار پایین است. بنابراین بالاترین مقاومت پلاریزاسیون پوشش تبدیلی وانادیوم (۱۷۸۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع) در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات حاصل می‌شود. با کاهش غلظت سریم نیترات به ۱ گرم بر لیتر پوشش‌دهی مناسبی بر روی سطح زمینهی فلزی انجام نشده و مقاومت پلاریزاسیون نمونه‌ی پوشش‌شده کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش غلظت سریم‌نیترات به ۳ گرم بر لیتر احتمالا موجب ترک برداشتن سطح پوشش تبدیلی وانادیوم و کاهش مقاومت به خوردگی آن می‌شود [۴۸]. همچنین مشاهده می‌شود که افزودن سریم-نیترات موجب جابه‌جایی پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر مثبت‌تر شده است. در واقع حضور سریم نیترات موجب کاهش سرعت واکنش‌های آندی مربوط به فرآیند خوردگی می‌شود [۴۹]. این در حالی است که در غلظت‌های کمتر یا بیشتر از این میزان، پتانسیل زمینه‌ی فلزی فعال‌تر شده و موجب کاهش مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم می‌شود. این امر را می‌توان در ارتباط با رسوب نامناسب پوشش در این غلظت‌ها دانست که موجب کاهش عملکرد ضد خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم شده است. در حضور ۲ گرم بر لیتر از نمک سریم‌نیترات در محلول پوشش‌دهی وانادیوم شیب شاخه‌ی آندی منحنی تافل از ۱۳۴ میلی‌ولت (در غیاب سریم نیترات) به ۱۴۱ میلی‌ولت افزایش یافته است. این امر نشان‌دهنده‌ی سخت‌تر انجام شدن واکنش‌های آندی بر روی سطح نمونه‌ی پوشش شده در حضور سریم‌نیترات و در نتیجه افزایش مقاومت به خوردگی آن است.

به منظور بررسی بیشتر تاثیر غلظت سریم‌نیترات بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. شکل ۳-ب منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش شده در حضور ۰، ۱، ۲ و ۳ گرم بر لیتر از سریم نیترات و نمونه‌ی بدون پوشش را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، نمونه‌ی پوشش‌شده در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات مقاومت پلاریزاسیون (امپدانس کل) بالاتری نسبت به پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب سریم‌نیترات و نمونه‌ی بدون پوشش دارد. دلیل کم‌بودن مقاومت پوشش در غلظت ۱ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات می‌تواند به پوشش‌دهی نامناسب سطح زمینه در غلظت کم نمک نسبت داده شود [۵۰]. این در حالی است که سریم‌نیترات در غلظت ۲ گرم بر لیتر توانسته است با افزایش احتمال پوشش‌دهی زمینه‌ی فلزی موجب بالا رفتن مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم شود. با افزایش غلظت سریم نیترات به ۳ گرم بر لیتر، اثر معکوس رخ داده و حضور مقدار بیش از حد سریم احتمالا موجب ترک برداشتن سطح پوشش تبدیلی وانادیوم و کاهش مقاومت به خوردگی آن شده است. به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج به‌دست آمده از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، از مدار معادل الکتریکی تک ثابته و دوثابته ارائه شده در شکل ۴ استفاده شد. پوشش‌ها به دلایل مختلفی از جمله غیرهمگن بودن ترکیب پوشش، ناهموار و غیریکنواخت بودن سطح فلز و نایکنواخت بودن ضخامت پوشش، مانند خازن ایده‌آل رفتار

نمی‌کنند [۵۱]. به‌همین دلیل هنگام استفاده از مدار معادل، از عنصر فاز ثابت (CPE) به جای خازن (C) استفاده¬می¬شود. متغیرهای Rs، Rct و CPEdl به ترتیب بیانگر مقاومت محلول، مقاومت انتقال بار و عنصر فاز ثابت لایه دوگانه‌ی الکتریکی هستند. همچنین متغیرهای CPEc و Rc عنصر فاز ثابت و مقاومت مربوط به لایه‌ی آلومینیوم اکسید در نمونه بدون پوشش و یا مربوط به پوشش تبدیلی در نمونه‌های پوشش‌شده هستند. در منحنی‌های نایکویست، مقدار امپدانس کل در فرکانس‌های پائین به عنوان مجموع مقاومت‌های سیستم در نظر گرفته می‌شود که مجموع مقاومت محلول، پوشش و مقاومت انتقال بار است. پارامتر n نشان دهنده‌ی میزان ناهمواری سطح نمونه است به طوری‌که هر چقدر این مقدار به سمت ۱ میل کند نشان دهنده تشکیل پوششی با یکنواختی بیشتر بر روی سطح فلز است [۵۲]. پارمتر Y_0 به عنوان معیاری از میزان مقاومت نمونه در برابر عبور محلول خورنده به فصل مشترک پوشش و فلز است. هر چه مقدار این پارامتر کم‌تر باشد نفوذپذیری پوشش در برابر محلول خورنده کم‌تر است [۵۳]. در جدول ۲ نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده در حضور غلظت‌های مختلف از سریم‌نیترات با مدار معادل الکتریکی نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول، نمونه‌ی پوشش شده در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات مقاومت انتقال بار بیشتری (۷۳۰۶۲ اهم.سانتی‌مترمربع) نسبت به نمونه‌ی پوشش شده در غیاب سریم نیترات (۶۲۱۲۳ اهم.سانتی‌مترمربع) و نمونه‌ی بدون پوشش دارد. هم‌چنین با افزودن سریم نیترات در غلظت ۲ گرم بر لیتر به محلول پوشش‌دهی مقدار پارامتر n از ۰/۹۵ به ۰/۸۵ کاهش می‌یابد که این امر نشان دهنده‌ی ناهموار شدن سطح پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور افزودنی معدنی سریم‌نیترات است. در واقع سریم نیترات موجب افزایش زبری و ناهموار شدن سطح پوشش تبدیلی وانادیوم شده است.



شکل ۳: الف) منحنی‌های پلاریزاسیون، ب) منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲٤ پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۰، ۱، ۲ و ۳ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH محلول برابر ٤، دمای محیط و در مدت زمان ۲۵ دقیقه به همراه نمونه بدون پوشش.

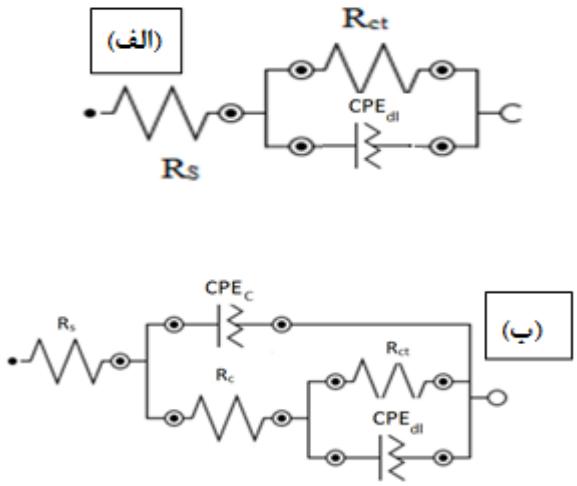
جدول۱ : داده‌های حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دهی شده در محلول پوشش تبدیلی بر پایه‌ی وانادیوم در حضور ۰، ۱، ۲ و ۳ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH محلول برابر ٤ ، زمان غوطه‌وری ۲۵ دقیقه و در دمای محیط بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤.

C(gr/lit) $Ce(NO_3)_3$	b_c (mV/decade)	b_a (mV/decade)	R_p ($\Omega.cm^2$)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)
زمینه بدون پوشش	-٦٩	٥٢	٢٦٠٠٠	٢/٢٨	-٨٩٥
۰	-٦٣	١٣٤	١٤٧٠٠٠	۰/١٣٩	-٥٧٨
۱	-٩٦	٩٩	١٠٠٠٠٠	۰/٦٦٨	-٧٢٦
۲	-٤٨	١٤١	١٧٨٠٠٠	۰/۰٢٦٥	-٥٧٠
۳	-٨٧	٨٩	٩٧٠٠٠	۰/٧٦٦	-٧٩٧

جدول ۲: نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده در حضور۰، ۱، ۲ و ۳ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH برابر ٤، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دمای محیط بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه‌ی بدون پوشش.

C (gr/lit) $Ce(NO_3)_3$	R_c ($\Omega.cm^2$)	Y_0 (μMho)	n	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	R_s ($\Omega.cm^2$)	Z_{lf}[1] ($\Omega.cm^2$)
زمینه بدون پوشش	-	٢٣/٤	۰/٨٧	١٨٥٠٢	٧/٨٧	١٨٥١٠
۰	-	٦/٠٧	۰/٩٥	٦٢١٢٣	٦/٨٠	٦٢١٣٠
۱	٨٢٠٠	٥/٨٧	۰/٩٣	٢١٧٨٦	١٣/٩	٣٠٠٠٠
۲	١٢١٣٠	١٢/١	۰/٨٥	٧٣٠٦٢	٨/٩٨	٨٥٢٠٠
۳	١١٤٠٠	٨٥/١	۰/٦٦	٢٢٨٩٣	١٠/٦	٣٤٣٠٢

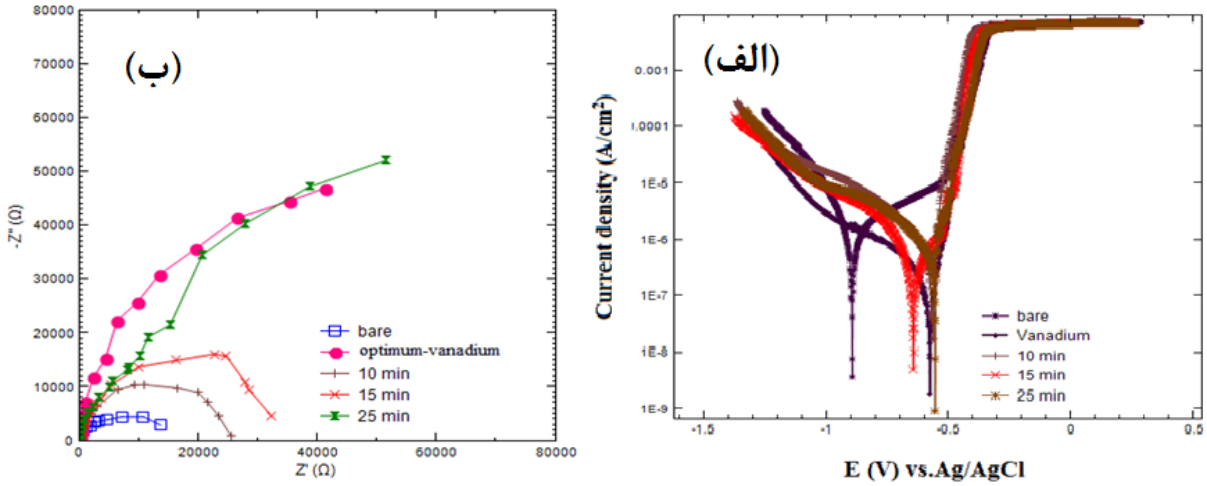
[1] Impedance at low frequences



شکل ٤ : مدارمعادل الف) تک‌ثابته و ب) دوثابته برای شبیه‌سازی رفتار پوشش‌های تبدیلی اعمالی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤.

۳ـ ۱ ـ ۲ ـ بررسی اثر زمان غوطه‌وری در حضور سریم نیترات

در شکل ۵-الف منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر سریم نیترات، در دمای محیط، pH محلول برابر ۴ و در مدت زمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۵ دقیقه به همراه نمونه‌ی پوشش شده در غیاب سریم‌نیترات و نمونه‌ی بدون پوشش نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون، نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه نسبت به نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان‌های پایین‌تر (۱۰ و ۱۵ دقیقه) جریان خوردگی کم‌تری دارد. نتایج حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه جریان خوردگی پایین‌تری نسبت به نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان ۱۰ دقیقه و در مدت زمان ۱۵ دقیقه دارد. در واقع بدلیل این‌که یون سریم فعالیت کم‌تری داشته و انجام فرایند پوشش‌دهی در حضور آن به زمان طولانی نیاز دارد با افزایش زمان پوشش‌دهی به ۲۵ دقیقه عملکرد پوشش تبدیلی وانادیوم بهتر شده و مقاومت به خوردگی آن افزایش می‌یابد. در شکل ۵-ب منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور سریم نیترات و در مدت زمان‌های ۱۰، ۱۵و ۲۵ دقیقه نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه میزان امپدانس در فرکانس‌های پایین بیشتری نسبت به نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان‌های پایین‌تر (۱۰ و ۱۵ دقیقه) دارد. نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان‌های مختلف با مدار معادل الکتریکی در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه دارای مقاومت انتقال بار بیشتری (۷۳۰۶۲ اهم.سانتی‌مترمربع) نسبت به نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان‌های ۱۰ و ۱۵ دقیقه (به ترتیب ۲۵۹۹۱ و ۳۱۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع) است. در واقع با کاهش زمان پوشش‌دهی مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور سریم نیترات کاهش پیدا کرده است.



شکل ۵: الف) منحنی‌های پلاریزاسیون، ب) منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲٤ پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH محلول برابر ٤ ، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان‌های ۱۰، ۱۵و ۲۵ دقیقه به همراه نمونه‌ی بدون پوشش و نمونه‌ی پوشش‌شده در شرایط بهینه‌ی وانادیوم (در غیاب سریم نیترات).

جدول ۳: داده های حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌شده در محلول پوشش تبدیلی بر پایه‌ی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH محلول برابر ٤، زمان‌های غوطه‌وری ۱۰، ۱۵ و ۲۵ دقیقه و در دمای محیط بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤.

Time(min)	b_c (mV/decade)	b_a (mV/decade)	R_p ($\Omega.cm^2$)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)
زمینه بدون پوشش	-٦٩	٥٢	٢٦٠٠٠	٢/٢٨	-٨٩٥
وانادیوم	-٦٣	١٣٤	١٤٧٠٠٠	٠/١٣٩	-٥٧٨
١٠	-٢٨	٦٥	٣٤٠٠٠	٠/٢٨٨	-٥٦٤
١٥	-١٠٣	٨٢	٨٥٠٠٠	٠/٣٧٥	-٦٤٥
٢٥	-٤٨	١٤١	١٧٨٠٠٠	٠/٠٢٦٥	-٥٧٠

جدول ٤: نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH برابر ٤، در دمای محیط و درمدت زمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۵ دقیقه به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده در شرایط بهینه‌ی وانادیوم (در غیاب سریم نیترات) بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه‌ی بدون پوشش.

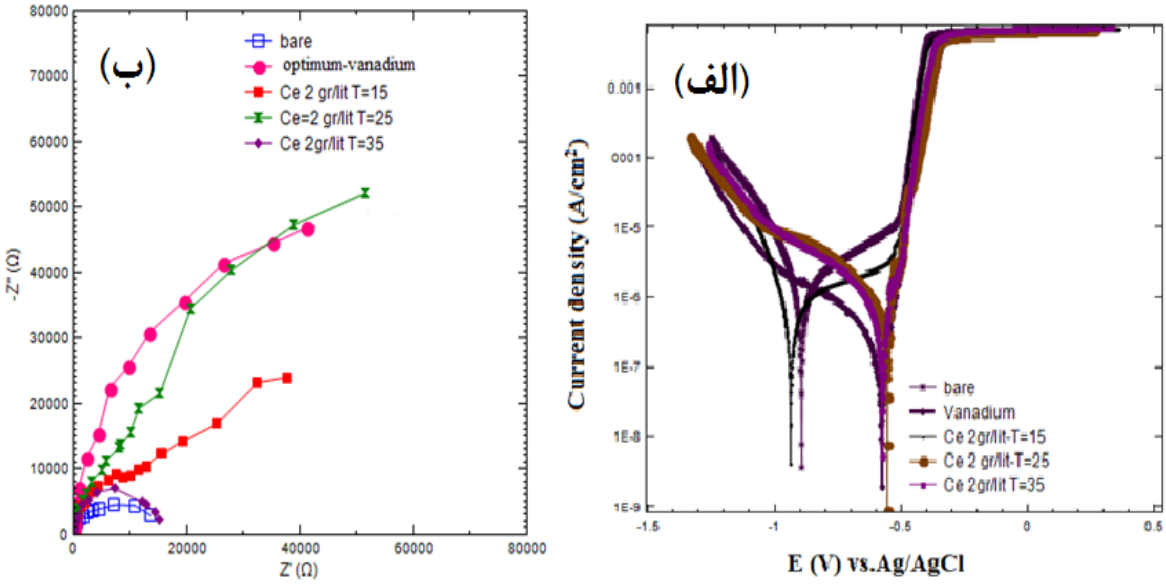
Time(min)	R_c ($\Omega.cm^2$)	Y_0 (μMho)	n	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	R_s ($\Omega.cm^2$)	Z_{lf} ($\Omega.cm^2$)
زمینه بدون پوشش	-	۲۳/٤	۰/۸۷	۱۸۵۰۲	۷/۸۷	۱۸۵۱۰
وانادیوم	-	٦/۰۷	۰/۹۵	٦۲۱۲۳	٦/۸۰	٦۲۱۳۰
۱۰	-	۸/۲٤	۰/۹۲	۲۵۹۹۱	۹/۵۱	۲٦۰۰۰
۱۵	۲۹۹۰	۳/۵۷	۰/۸۸	۳۱۰۰۰	۱۰/۳	۳٤۰۰۰
۲۵	۱۲۱۳۰	۱۲/۱	۰/۸۵	۷۳۰٦۲	۸/۹۸	۸۵۲۰۰

۳ـ ۱ ـ ۳ـ بررسی اثر دمای محلول پوشش‌دهی در حضور سریم نیترات

شکل ۶-الف منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH برابر ۴، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دماهای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد، به همراه نمونه‌ی بدون پوشش و پوشش‌شده در غیاب سریم نیترات را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون، نمونه‌ی پوشش شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد دارای جریان خوردگی کم‌تری نسبت به نمونه‌های پوشش‌شده در دمای ۱۵و ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. نتایج حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های پوشش‌شده در دماهای مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، نمونه‌ی پوشش‌شده در دمای محیط دارای جریان خوردگی پایینی نسبت به نمونه‌ی پوشش‌شده در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و نمونه پوشش شده در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. در واقع با پایین بردن دمای محلول پوشش-دهی امکان پوشش‌دهی مناسب سطح محیا نشده و جریان خوردگی بالا می‌باشد. هم‌چنین افزایش بیش از حد دمای محلول پوشش‌دهی موجب ترک برداشتن سطح پوشش وکاهش مقاومت به خوردگی آن می‌شود. مقاومت پلاریزاسیون نمونه‌ی پوشش شده در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد ۵۲۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع بوده و مقاومت به خوردگی آن پایین است. هم‌چنین نمونه‌ی پوشش‌شده در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد دارای مقاومت پلاریزاسیون پایینی (۷۱۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع) می‌باشد. در واقع افزایش یا کاهش دمای محلول پوشش‌دهی از دمای محیط موجب پایین آمدن عملکرد ضدخوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم شده است.

به منظور بررسی بیشتر تاثیر دمای محلول پوشش‌دهی بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور سریم‌نیترات از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. در شکل ۶-ب منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات، pH محلول برابر ۴، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دماهای ۱۵، ۲۵و ۳۵ درجه سانتی‌گراد به همراه نمونه‌ی بدون پوشش و پوشش‌شده در غیاب سریم‌نیترات نشان داده شده است. با توجه به این شکل، امپدانس کل نمونه‌ی پوشش‌شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بوده و مقاومت این نمونه در برابر خوردگی بالاتر است. نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکوست نمونه‌های پوشش‌شده در دماهای مختلف با مدار معادل الکتریکی در جدول ۶ آورده شده است. با توجه به این جدول، با انجام فرایند پوشش‌دهی در دمای محیط مقاومت انتقال بار نمونه (۷۳۰۶۲ اهم.سانتی‌مترمربع) به‌شدت افزایش

پیدا کرده است. این در حالی است که کاهش و یا افزایش دمای محلول پوشش‌دهی به ۱۵ و یا ۳۵ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش مقاومت انتقال بار به‌ترتیب به ۲۱۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع و ۱۹۰۹۳ اهم.سانتی‌مترمربع شده است.



شکل ٦: الف) منحنی‌های پلاریزاسیون، ب) منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲٤ پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH محلول برابر ٤ ، دماهای ۱۵، ۲۵و ۳۵ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان ۲۵ دقیقه به همراه نمونه‌ی بدون پوشش و نمونه‌ی پوشش‌شده بهینه‌ی وانادیوم در غیاب سریم نیترات.

جدول ۵: داده های حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه های بدون پوشش و پوشش‌شده در محلول پوشش تبدیلی بر پایه‌ی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات، pH محلول برابر ٤، زمان غوطه‌وری ۲۵ دقیقه و در دماهای ۱۵، ۲۵و ۳۵ درجه سانتی‌گراد به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده در غیاب سریم‌نیترات بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤.

T(^{0}C)	b_c (mV/decade)	b_a (mV/decade)	R_p (Ω.cm^2)	i_{corr} (μA/cm^2)	E_{corr} (mV)
زمینه بدون پوشش	-٦٩	٥٢	٢٦٠٠٠	٢/٢٨	-٨٩٥
وانادیوم	-٦٣	١٣٤	١٤٧٠٠٠	٠/١٣٩	-٥٧٨
١٥	-٥٦	٣٩	٥٢٠٠٠	٠/٦٢١	-٩٣٩
٢٥	-٤٨	١٤١	١٧٨٠٠٠	٠/٠٢٦٥	-٥٧٠
٣٥	-٢٨	٤١	٧١٠٠٠	٠/١٠٠	-٥٧٨

جدول ٦ :نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pH برابر ٤، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دماهای ۱۵، ۲۵و ۳۵ درجه سانتی‌گراد به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده در غیاب سریم نیترات بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه‌ی بدون پوشش.

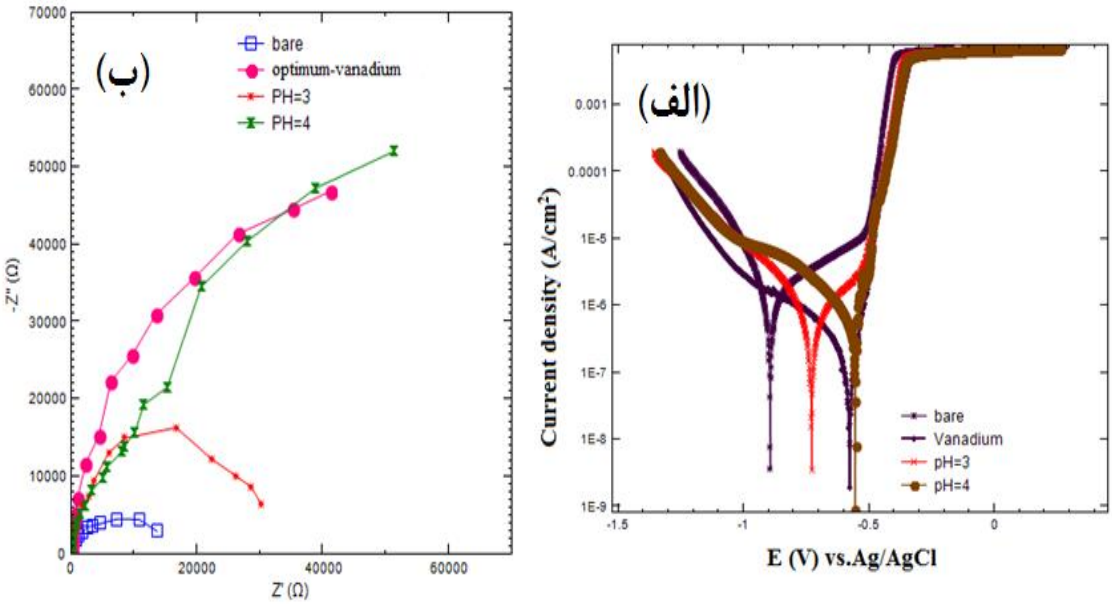
$T(^0C)$	R_c ($\Omega.cm^2$)	Y_0 (μMho)	n	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	R_s ($\Omega.cm^2$)	Z_{lf} ($\Omega.cm^2$)
زمینه بدون پوشش	-	۲۳/٤	۰/۸۷	۱۸۵۰۲	۷/۸۷	۱۸۵۱۰
وانادیوم	-	٦/۰۷	۰/۹۵	٦۲۱۲۳	٦/۸۰	٦۲۱۳۰
۱۵	۷۳۹٦	۱۲/۳	۰/۸۹	۲۱۰۰۰	٤/۷۸	۲۸٤۰۰
۲۵	۱۲۱۳۰	۱۲/۱	۰/۸۵	۷۳۰٦۲	۸/۹۸	۸۵۲۰۰
۳۵	-	۵/۵۲	۰/۸۹	۱۹۰۹۳	۷/۵۰	۱۹۱۰۰

۳ـ ۱ ـ ٤ بررسی اثر pH محلول پوشش‌دهی در حضور سریم نیترات

در شکل ۷-الف منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه-های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات، درpH های برابر ۳ و ۴، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دمای محیط به همراه نمونه‌ی بدون پوشش و پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب سریم‌نیترات نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نمونه‌ی پوشش-شده در pH برابر ۴ دارای جریان خوردگی کم‌تری نسبت به نمونه‌ی پوشش‌شده در pH برابر ۳ و نمونه‌ی پوشش‌شده در غیاب سریم نیترات است. نتایج حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده درpHهای مختلف در جدول ۷ آورده شده است. با توجه به این جدول، نمونه‌ی پوشش‌شده در pH برابر ۴ دارای کم-ترین جریان خوردگی (۰/۰۲۶ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع) نسبت به نمونه‌ی پوشش‌شده در pH برابر ۳ (۰/۵۰۰ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع) و هم‌چنین نمونه‌ی پوشش‌شده در غیاب سریم‌نیترات (۰/۱۳ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع) است. مقاومت پلاریزاسیون نمونه‌ی پوشش‌شده در pH برابر ۴ (۱۷۸۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع) نسبت به سایر نمونه‌ها بالا می‌باشد. این امر می‌تواند ناشی از ساختار مناسب پوشش تشکیل شده در این pH باشد. از آن جایی که pH بهینه‌ی محلول پوشش‌دهی وانادیوم در غیاب سریم نیترات برابر ۴ بود، می‌توان این طور استدلال کرد که احتمالا در حضور سریم نیترات تغییر pH تاثیری در بهترشدن عملکرد پوشش تبدیلی وانادیوم نداشته است.

به منظور بررسی بیشتر تاثیر pH محلول پوشش‌دهی در حضور سریم‌نیترات بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. شکل ۷-ب منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر سریم‌نیترات، pHهای ۳ و۴، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دمای محیط را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، امپدانس در فرکانس‌های پایین نمونه‌ی پوشش شده در pH برابر ۴ نسبت به نمونه‌ی پوشش شده در pH برابر۳ بیشتر است. در واقع با انجام فرایند پوشش‌دهی در pH برابر ۴ مقاومت پلاریزاسیون و یا امپدانس کل نمونه در برابر خوردگی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از برازش‌های منحنی‌های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده در pHهای مختلف با مدار معادل الکتریکی در جدول ۸ آورده شده است. با توجه به این جدول، نمونه‌ی پوشش‌شده در pH برابر ۴ مقاومت انتقال بار بیشتری (۷۳۰۶۲ اهم.سانتی‌مترمربع)

نسبت به نمونه‌ی پوشش شده در غیاب سریم‌نیترات (۶۲۱۲۳ اهم.سانتی‌مترمربع) و نمونه‌ی پوشش‌شده در pH برابر ۳ (۲۰۶۰۰ اهم.سانتیمترمربع) دارد. این امر نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر پوشش تشکیل شده در حضور سریم نیترات در برابر نفوذ عوامل خورنده است.



شکل ۷ : الف) منحنی‌های پلاریزاسیون، ب) منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲٤ پوشش‌شده با پوشش های برابر ٤ و۳ ، دمای محیط و در مدت زمان ۲۵ دقیقه به همراه pHتبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، نمونه‌ی بدون پوشش و نمونه‌ی پوشش‌شده در شراط بهینه‌ی وانادیوم (در غیاب سریم نیترات).

جدول ۷: داده های حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌شده در محلول پوشش تبدیلی بر پایه‌ی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات، pHهای محلول برابر۳و٤، زمان غوطه‌وری ۲۵ دقیقه و در دمای محیط بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤.

pH	b_c (mV/decade)	b_a (mV/decade)	R_p ($\Omega.cm^2$)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)
زمینه بدون پوشش	-٦٩	٥٢	٢٦٠٠٠	٢/٢٨	-٨٩٥
وانادیوم	-٦٣	١٣٤	١٤٧٠٠٠	٠/١٣٩	-٥٧٨
٣	-٥٩	٥٤	٦٤٠٠٠	٠/٥٠٠	-٧٢٩
٤	-٤٨	١٤١	١٧٨٠٠٠	٠/٠٢٦	-٥٧٠

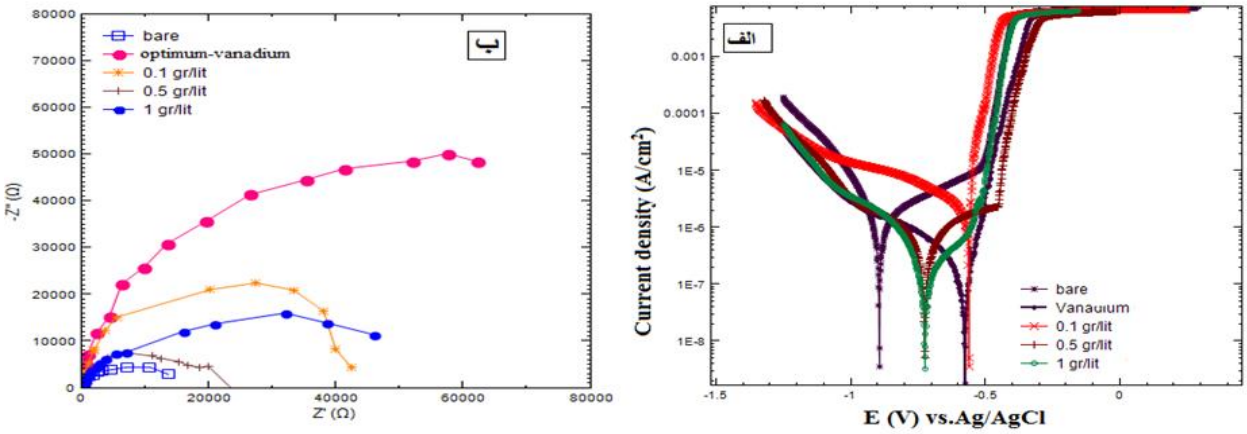
جدول ۸: نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات، pH برابر ۳و٤، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در دمای محیط به همراه نمونه‌ی پوشش شده در شرایط بهینه‌ی وانادیوم (در غیاب سریم نیترات) بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه‌ی بدون پوشش.

pH	R_c ($\Omega.cm^2$)	Y_0 (μMho)	n	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	R_s ($\Omega.cm^2$)	Z_{lf} ($\Omega.cm^2$)
زمینه بدون پوشش	-	۲۳/٤	۰/۸۷	۱۸۵۰۲	۷/۸۷	۱۸۵۱۰
وانادیوم	-	٦/۰۷	۰/۹۵	٦۲۱۲۳	٦/۸۰	٦۲۱۳۰
۳	۷۰۹۳	۷/۷۸	۰/۹۲	۲۰٦۰۰	٦/۸۱	۲۷۷۰۰
٤	۱۲۱۳۰	۱۲/۱	۰/۸۵	۷۳۰٦۲	۸/۹۸	۸۵۲۰۰

۳ـ۲ـ آزمون‌های الکتروشیمیایی/ بررسی تأثیر افزودنی آلی آدیپک اسید بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم

۳ ـ ۲ ـ ۱ ـ تعیین غلظت بهینه‌ی افزدنی آدیپک اسید

به منظور بررسی تاثیر غلظت آدیپک اسید بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم انجام فرایند پوشش‌دهی در حضور ۰/۱، ۰/۵و ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، pH برابر ۴، مدت زمان ۱۰ دقیقه و در دمای محیط انجام شد. منحنی‌های پلاریزاسیون و نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده در حضور غلظت‌های مختلف از آدیپک اسید در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به منحنی-های پلاریزاسیون نمونه‌های پوشش‌شده در غلظت‌های مختلف آدیپک اسید در شکل ۸-الف، نمونه‌ی پوشش‌شده در غلظت ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید دانسیته جریان خوردگی پایین‌تری نسبت به نمونه‌های پوشش‌شده در حضور ۰/۵ و ۰/۱ گرم بر لیتر از این اسید آلی دارد. در واقع با افزایش غلظت آدیپک اسید میزان جذب آن بر روی سطح بیشتر شده و جریان خوردگی نمونه‌ی پوشش-شده در حضور ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید (با توجه به نتایج حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون در جدول ۹) به ۰/۳۸۴ میکروآمپر بر سانتی‌مترکاهش می‌یابد. این درحالی است که جریان خوردگی نمونه‌های پوشش‌شده در حضور ۰/۵ و ۰/۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید به ترتیب ۰/۴۵۰ و۰/۶۳۴ میکروآمپر بر سانتی‌متراست. هم‌چنین با توجه به نتایج حاصل از برازش منحنی-های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور غلظت‌های مختلف آدیپک اسید در جدول ۱۰، مقاومت انتقال بار نمونه‌ی پوشش‌شده در غلظت ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید نسبت به نمونه‌های پوشش‌شده در حضور ۰/۵ و ۰/۱ گرم بر لیتر از این اسید بیشتر است. هم‌چنین با توجه به این نتایج مشخص است که با وجود این که آدیپک اسید موجب کاهش جریان خوردگی نمونه‌ی پوشش‌شده نسبت به نمونه بدون پوشش می‌شود ولی پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور افزودنی آدیپک اسید مقاومت به خوردگی بالایی نشان نمی‌دهد. با توجه به جدول ۹، مقاومت پلاریزاسیون نمونه‌ی پوشش شده در شرایط بهینه‌ی وانادیوم ۱۴۷۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع بوده در حالی که مقاومت پلاریزاسیون در حضور آدیپک اسید ۸۲۰۰۰ اهم.سانتی‌متر مربع است. کاهش مقاومت پوشش در حضور آدیپک اسید نسبت به خود پوشش تبدیلی وانادیوم می‌تواند به ماهیت آلی این اسید نسبت داده شود. در واقع جذب این اسید به دلیل گروه‌های شیمیایی آن (گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل) به سمت سطح فلز بوده و این گروه‌ها بدلیل ماهیت قطبی خود موجب افزایش جذب آب و یا عوامل خورنده شده و از این طریق باعث افزایش احتمال خوردگی می‌شوند.



شکل ۸ : منحنی‌های الف) پلاریزاسیون،ب) نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۰/۱، ۰/۵و ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، pH برابر٤، دمای محیط و مدت زمان ۱۰ دقیقه به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده در شرایط بهینه‌ی وانادیوم (در غیاب آدیپک اسید) بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه‌ی بدون پوشش.

جدول ۹: نتایج حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۰/۱، ۰/۵و ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، مدت زمان ۱۰ دقیقه، pH برابر ٤ و در دمای محیط به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده در شرایط بهینه‌ی وانادیوم (در غیاب آدیپک اسید) بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه بدون پوشش.

C(gr/lit) Adipic Acid	b_c (mV/decade)	b_a (mV/decade)	R_p ($\Omega.cm^2$)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)
زمینه بدون پوشش	-٦٩	٥٢	٢٦٠٠٠	٢/٢٨	-٨٩٥
۰	-٦٣	١٣٤	١٤٧٠٠٠	۰/١٣٩	-٥٧٨
١	-٥٢	٤٢	٨١٠٠٠	۰/٣٨٤	-٧٢٦
۰/٥	-٤٦	٤٤	٢٣٠٠٠	۰/٤٥٠	-٦٥٠
۰/١	-١٧	١٣٤	٥٨٠٠٠	۰/٦٣٤	-٥٥٨

جدول ۱۰: نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده با وانادیوم در حضور ۰/۱، ۰/۵و ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، مدت زمان ۱۰دقیقه، pH برابر ٤ و در دمای محیط به همراه نمونه‌ی بهینه‌ی وانادیوم در غیاب آدیپک اسید بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه بدون پوشش.

C(gr/lit) Adipic Acid	R_c ($\Omega.cm^2$)	Y_0 (μMho)	n	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	R_s ($\Omega.cm^2$)	Z_{lf} ($\Omega.cm^2$)
زمینه بدون پوشش	-	۲۳/٤	۰/۸۷	۱۸۵۰۲	۷/۸۷	۱۸۵۱۰
۰	-	٦/۰۷	۰/۹۵	٦۲۱۲۳	٦/۸۰	٦۲۱۳۰
۱	۱۳۷۰۰	۵۱/۳	۰/۷۲	۳۲۱۹٦	۱۲/۱	٤۵۹۰۸
۰/۵	۳۰۸۵	٤/٤۰	۰/۹۱	۲۰٦۰۰	۱۵/٤	۲٤۷۰۰
۰/۱	۵۰۱۷	۹۹/۲	۰/۷٦	۳۷٤۰۰	۱۲/۷	٤۲٤۲۹

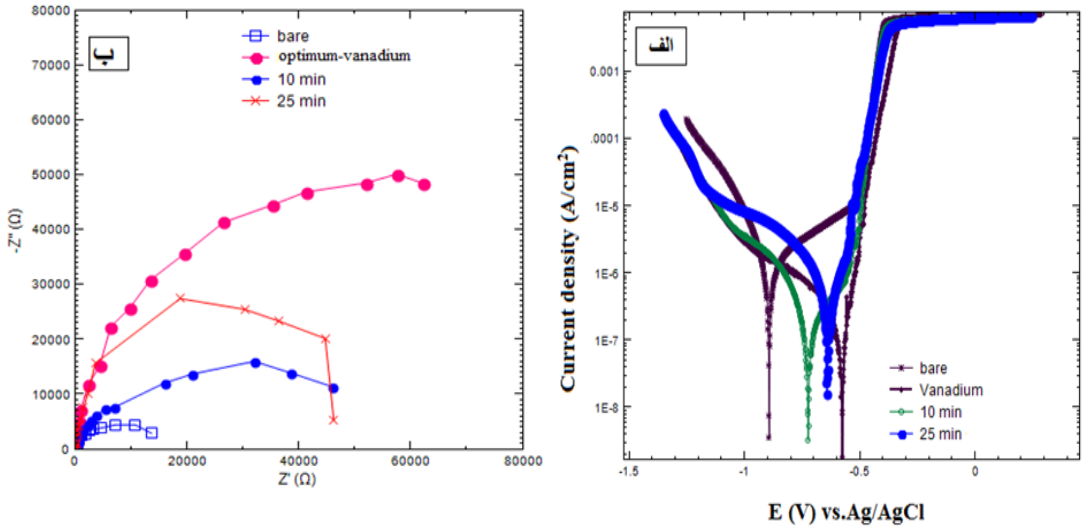
۳ـ۲ـ۲ـ بررسی تاثیر زمان غوطه‌وری در حضور آدیپک اسید

به منظور بررسی تاثیر زمان غوطه‌وری بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم، فرایند پوشش‌دهی در حضور ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، در مدت زمان‌های ۱۰ و ۲۵ دقیقه، pH برابر ۴، و در دمای محیط انجام شد. منحنی‌های پلاریزاسیون و نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های پوشش‌شده در دو مدت زمان مختلف (۱۰ و ۲۵ دقیقه) در شکل ۹-الف، مشاهده می‌شود که نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۱۰ دقیقه دانسیته جریان خوردگی پایین‌تری نسبت به نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه دارد. هم‌چنین با توجه به منحنی‌های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده در شکل ۹-ب، مقدار امپدانس در فرکانس پایین مربوط به نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۱۰ دقیقه نسبت به نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه بیشتر است. این امر نشان‌دهنده‌ی مقاومت به خوردگی بالای نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان کم (۱۰ دقیقه) می‌باشد. با توجه به نتایج برون‌یابی تافل در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود که نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۱۰ دقیقه، جریان خوردگی کمتری نسبت به نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه دارد. هم‌چنین با توجه به نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده در مدت زمان‌های مختلف در جدول ۱۲، مقاومت انتقال بار نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۱۰ دقیقه حدود ۳۲۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع بوده و نسبت به نمونه‌ی پوشش‌شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه (۳۱۲۰۰ اهم.سانتی‌متر مربع) بیشتر است. بنابراین با توجه به این نتایج، فرایند پوشش‌دهی در حضور آدیپک اسید در مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام شد.

با مشخص شدن دانسیته جریان خوردگی نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب و حضور افزودنی‌ها راندمان پوشش‌دهی از نظر افزایش مقاومت به خوردگی زمینه فلزی از رابطه‌ی زیر (۳-۱) محاسبه می‌شود [۵۴]. که در آن i_{corr}^0 دانسیته جریان خوردگی زمینه‌ی بدون پوشش و i_{corr} دانسیته جریان خوردگی نمونه‌ی پوشش‌شده است. با توجه به مقادیر این پارامترها راندمان

پوشش‌دهی در غیاب افزودنی‌ها ۹۴ درصد بوده و در حضور افزودنی سریم نیترات و آدیپک اسید به ترتیب به ۹۸ و ۸۴ درصد می‌رسد.

$$P = ((i_{corr}^{0}-i_{corr})/i_{corr}^{0}) \times 100 \quad (1.3)$$



شکل۹: منحنی‌های الف) پلاریزاسیون، ب) نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، pH برابر ٤، دمای محیط و در مدت زمان‌های ۱۰ و ۲۵ دقیقه به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده با وانادیوم در غیاب آدیپک اسید بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه‌ی بدون پوشش.

جدول ۱۱: نتایج حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های پوشش‌شده با وانادیوم در حضور ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، در دو مدت زمان ۱۰ و ۲۵ دقیقه، pH برابر ٤ و در دمای محیط به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب آدیپک اسید بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه بدون پوشش.

Time(min)	b_c (mV/decade)	b_a (mV/decade)	R_p (Ω.cm²)	i_{corr} (μA/cm²)	E_{corr} (mV)
زمینه بدون پوشش	-٦٩	٥٢	٢٦٠٠٠	٢/٢٨	-٨٩٥
وانادیوم	-٦٣	١٣٤	١٤٧٠٠٠	٠/١٣٩	-٥٧٨
١٠	-٥٢	٤٢	٨١٠٠٠	٠/٣٨٤	-٧٢٦
٢٥	-٦٨	٦٩	٥٨٠٠٠	٠/٦٣٥	-٦٤٣

جدول ۱۲: نتایج حاصل از برازش منحنی‌های نایکویست نمونه‌های پوشش‌شده با وانادیوم در حضور ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید، در دو مدت زمان ۱۰ و ۲۵ دقیقه، pH برابر ٤ و در دمای محیط به همراه نمونه‌ی پوشش‌شده با وانادیوم در غیاب آدیپک اسید بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ و نمونه بدون پوشش.

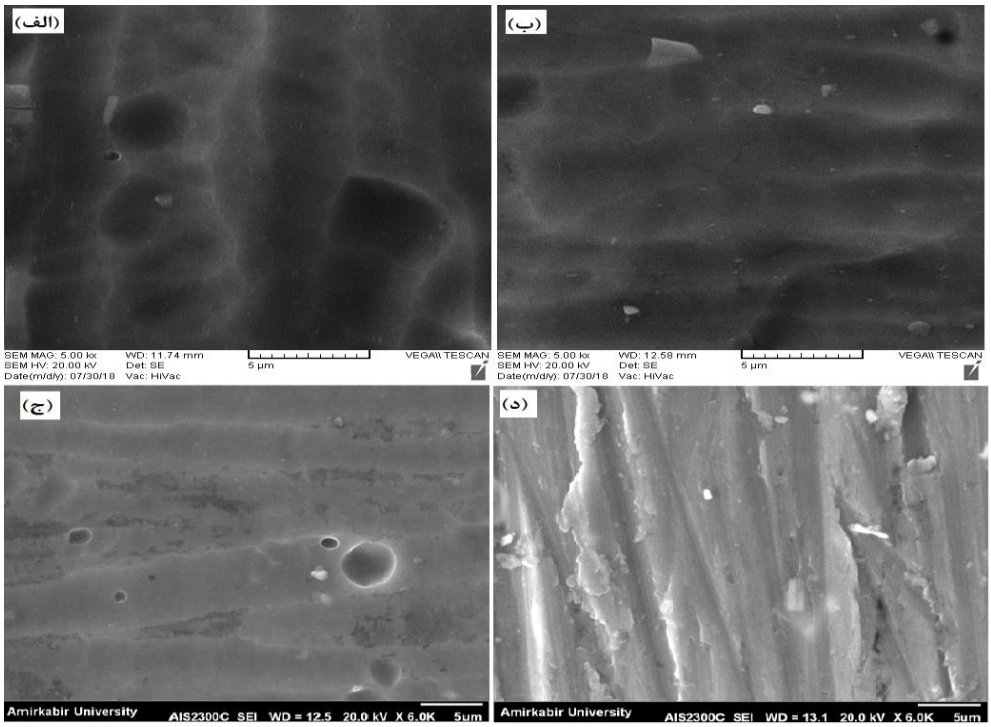
Time(min)	R_c ($\Omega.cm^2$)	Y_0 (μMho)	n	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	R_s ($\Omega.cm^2$)	Z_{lf} ($\Omega.cm^2$)
زمینه بدون پوشش	-	۲۳/٤	۰/۸۷	۱۸۵۰۲	۷/۸۷	۱۸۵۱۰
وانادیوم	-	٦/۰۷	۰/۹۵	٦۲۱۲۳	٦/۸۰	٦۲۱۳۰
۱۰	۱۳۷۰۰	۵۱/۳	۰/۷۲	۳۲۱۹٦	۱۲/۱	٤۵۹۰۸
۲۵	۱۳٤۵۰	۵٦/٤	۰/۷۹	۳۱۲۰۰	۱۱/۲	٤٤٦٦۷

۳ ـ ۳ ـ بررسی ریخت‌شناسی سطح

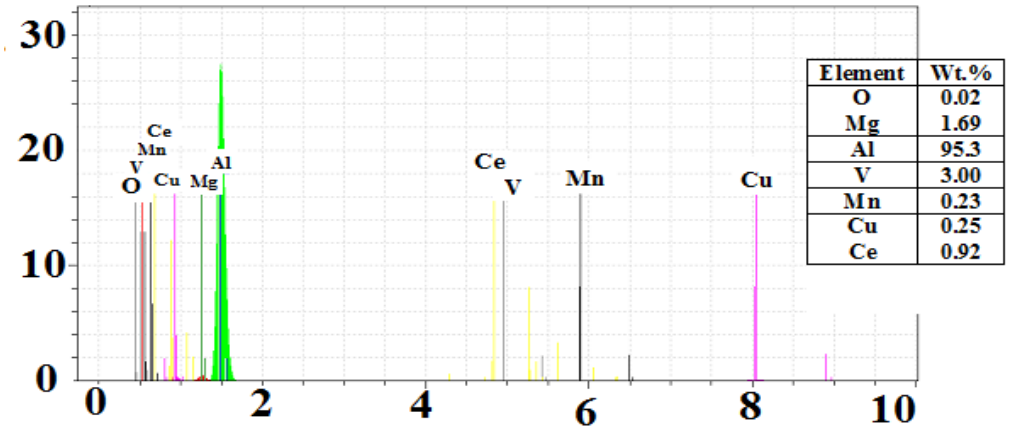
۳ ـ ۳ ـ ۱ ـ میکروسکوپ الکترونی روبشی ـ طیف‌سنجی پراکنش انرژی اشعه‌ی ایکس

ـ بررسی تاثیر افزودنی‌های سریم نیترات و آدیپک اسید بر ریزساختار سطح و ترکیب پوشش تبدیلی وانادیوم

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور آدیپک اسید و سریم نیترات در شکل ۱۰ نشان داده شده است. فرایند پوشش‌دهی در شرایط بهینه در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات و ۱ گرم بر لیتر از آدیپک اسید انجام شده است. با توجه به شکل ۱۰، حضور آدیپک اسید و سریم‌نیترات موجب تشکیل متراکم‌تر پوشش تبدیلی وانادیوم می‌شود. در شکل ۱۰-الف که مربوط به نمونه‌ی پوشش‌شده در حضور آدیپک اسید است، مشاهده می‌شود که حضور آدیپک اسید موجب پوشش‌دهی بهتر سطح زمینه‌ی فلزی شده است. هم‌چنین حضور سریم‌نیترات نیز موجب تشکیل متراکم‌تر پوشش تبدیلی وانادیوم شده است. نتایج حاصل از آنالیز عنصری نمونه پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم نیترات و در شرایط بهینه‌ی پوشش‌دهی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌ی پوشش‌شده در حضور سریم‌نیترات حاوی تقریبا ۰/۹۲ درصد وزنی عنصر سریم است. این امر نشان از مشارکت ترکیب سریم نیترات در تشکیل متراکم‌تر و مناسب‌تر پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی زمینه‌ی فلزی است که موجب افزایش مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی با توجه به نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی شده است.



شکل ۱۰ : تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (با بزرگ‌نمایی ۵ میکرومتر) نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم الف) در حضور آدپیک اسید، ب) در حضور سریم نیترات، ج) در غیاب افزودنی‌ها و د) بدون پوشش.



شکل۱۱: نتایج حاصل از آنالیز عنصری نمونه‌ی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ پوشش‌شده در غلظت ۱۰گرم بر لیتر از نمک سدیم وانادات، pH برابر ٤، دمای محیط، مدت زمان ۲۵ دقیقه و در حضور ۲ گرم بر لیتر از سریم‌نیترات.

۳ ـ ۳ ـ ۲ ـ آزمون زاویه تماس آب

ـ بررسی تاثیر افزودنی‌های سریم‌نیترات و آدپیک اسید بر خاصیت آب‌دوستی و یا آب‌گریزی سطح پوشش تبدیلی وانادیوم

به منظور بررسی تاثیر آدپیک اسید و سریم‌نیترات بر میزان آب‌دوستی و انرژی سطحی پوشش تبدیلی وانادیوم از آزمون زاویه تماس آب استفاده شد.

شکل۱۲ تصاویر زاویه تماس آب مربوط به نمونه‌های پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم را در حضور آدپیک اسید و سریم نیترات نشان می‌دهد. با توجه به شکل۱۲-الف مشاهده می‌شود که با افزودن آدپیک اسید به محلول پوشش‌دهی وانادیوم خاصیت آب-دوستی سطح نمونه‌ی فلزی افزایش یافته و زاویه

تماس آب به ۴۸ درجه کاهش می‌یابد. این در حالی است که زاویه تماس آب بر روی سطح نمونه‌ی پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب افزودنی‌ها ۵۸ درجه می‌باشد. کاهش زاویه تماس آب و افزایش انرژی سطحی می‌تواند موجب پخش راحت‌تر پوشش آلی و چسبندگی بهتر آن به سطح زمینه‌ی پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور آدیپک اسید گردد. با توجه به این‌که گروه‌های شیمیایی موجود در ساختار آدیپک اسید عمدتا گروه‌های قطبی (هیدروکسیل و کربوکسیل) هستند. بنابراین افزایش خاصیت آب‌دوستی سطح در اثر جهت‌گیری این گروه‌ها به سمت سطح پوشش تبدیلی وانادیوم قابل توجیه است[۴۶]. هم‌چنین با توجه به شکل ۱۲-ب، پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور سریم‌نیترات آب‌گریزتر شده و زاویه تماس آب در سطح نمونه به ۷۹ درجه افزایش می‌یابد. بنابراین با افزودن سریم نیترات به محلول پوشش‌دهی وانادیوم میزان انرژی سطحی نمونه کاهش یافته و مقاومت در برابر نفوذ عوامل خورنده افزایش می‌یابد [۵۵]. این امر با نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی که نشان از بالا رفتن مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور سریم نیترات بودند، در توافق است.

شکل ۱۲: تصاویر زاویه تماس آب مربوط به نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲٤ پوشش‌شده با پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور الف) آدیپک اسید، ب) سریم نیترات، ج) در غیاب افزودنی‌ها.

نتیجه‌گیری

- افزودن سریم‌نیترات به محلول پوشش‌دهی وانادیوم موجب افزایش مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم می‌شود. به طوری‌که موجب کاهش دانسیته‌ی جریان خوردگی از ۰/۱۳ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع برای پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب سریم نیترات به ۰/۰۲۶ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع برای پوشش تبدیلی وانادیوم در حضور سریم نیترات می‌شود.
- حضور سریم‌نیترات موجب تشکیل متراکم‌تر پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی زمینه‌ی فلزی می‌شود. هم‌چنین طبق تصاویر زاویه تماس آب، با افزودن سریم نیترات به محلول پوشش‌تبدیلی وانادیوم میزان انرژی سطحی نمونه‌ی فلزی کاهش یافته و سطح پوشش تبدیلی وانادیوم آب‌گریزتر می‌شود.

- افزودن آدپیک اسید به محلول پوشش‌دهی وانادیوم موجب افزایش مقاومت پلاریزاسیون زمینه‌ی فلزی از ۲۶۰۰۰اهم.سانتیمترمربع به ۸۱۰۰۰ اهم.سانتی‌مترمربع می‌شود. این در حالی است که مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی وانادیوم در غیاب آدپیک اسید بیشتر است.
- آدپیک اسید به عنوان یک افزودنی آلی موجب افزایش انرژی سطحی و خاصیت آب‌دوستی سطح پوشش تبدیلی وانادیوم شده است. هم‌چنین آدپیک اسید موجب بهبود فرایند پوشش‌دهی و تشکیل متراکم‌تر پوشش تبدیلی وانادیوم بر روی سطح زمینه فلزی می‌شود.

مراجع

[1] Qi Liu, Xiaoming Cao, An Du, Ruina Ma, Xiaoran Zhang, Tingting Shi, Yongzhe Fan, Xue Zhao, Investigation on adhesion strength and corrosion resistance of Ti-Zr aminotrimethylene phosphonic acid composite conversion coating on 7A52 aluminum alloy, Applied Surface Science. 458 (2018) 350–359.

[2] Rémi Viroulauda, Jolanta S´wiatowska, Antoine Seyeuxa, Sandrine Zannaa, Joffrey Tardelli b, Philippe Marcusa, Influence of surface pretreatments on the quality of trivalent chromium process coatings on aluminum alloy, Applied Surface Science 423 (2017) 927–938.

[3] Kalaivanan Thirupathi, Pál Bárczy, Kálmán Vad, Attila Csik, Béla Márton Somosvári, Effects of vacuum and ageing on Zr_4/Cr_3 based conversion coatings on aluminium alloys, Applied Surface Science 441 (2018) 1043-1047.

[4] Catherine A. Munson, Sarah A. McFall-Boegeman, Greg M. Swain, Cross comparison of TCP conversion coating performance on aluminum alloys during neutral salt-spray and thin-layer mist accelerated degradation testing, Electrochimica Acta 282 (2018) 171-184.

[5] Maryam Eslami, Michele Fedel, Giorgio Speranza, Flavio Deflorian, Nils-Eric Andersson, Caterina Zanella, Study of selective deposition mechanism of cerium-based conversion coating on Rheo-HPDC aluminium-silicon alloys, Electrochimica Acta 255 (2017) 449–462.

[6] Nafise Parhizkar, Bahram Ramezanzadeh, Taghi Shahrabi, The epoxy coating interfacial adhesion and corrosion protection properties enhancement through deposition of cerium oxide nanofilm modified by graphene oxide, Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 64 (2018) 402–419.

[7] A. Ghanbari, M.M. Attar, Surface free energy characterization and adhesion performance of mild steel treated based on zirconium conversion coating: A comparative study, Surface & Coatings Technology. 246 (2014) 26–33.

[8] R. Saillard, B. Viguier, G. Odemer, A. Pugliara, B. Fori, C. Blanc, Influence of the microstructure on the corrosion behavior of 2024 aluminum alloy coated with a trivalent chromium conversion layer, Corrosion Science. (2018) 1-14.

[9] S. Sharifi Golru, M.M. Attar, B. Ramezanzadeh, Effects of surface treatment of aluminum alloy 1050 on the adhesion and anticorrosion properties of the epoxy coating, Applied Surface Science. 345 (2015) 360–368.

[10] B. Ramezanzadeh, M.M. Attar, M. Farzam, Corrosion performance of a hot-dip galvanized steel treated by different kinds of conversion coatings, Surface & Coatings Technology. 205 (2010) 874–884.

[11] Chunyan Du, Hui Zhao, Zhiyong Dai, Zhiyu Tian, Jinchuan Wang, Zhen Wang, The preparation and properties of black coating by micro arc oxidation on 2A12 aluminum alloy, Materials Letters. 236 (2019) 723–726.

[12] Chang-Sheng Liang, Zhong-Fei Lv, Ye-Ling Zhu, Shi-Ai Xu, Hong Wang, Protection of aluminium foil AA8021 by molybdate-basedconversion coating, Applied Surface Science. 288 (2014) 497– 502.

[13] H. Ardelean, I. Frateur, S. Zanna, A. Atrens, P. Marcus, Corrosion protection of AZ91 magnesium alloy by anodizing in niobium and zirconium-containing electrolytes, Corros. Sci. 51 (2009) 3030–3038.

[14] A.S. Hamdy, Enhancing the corrosion resistance of magnesium alloy AZ91D in 3.5 percent NaCl solution by cerate conversion coatings, Anti-Corros. Methods Mater. 53 (2006) 367–373.

[15] S. Ono, K. Asami, N. Masuko, Mechanism of chemical conversion coating film growth on magnesium and magnesium alloys, Mater. Trans. 42 (2001) 1225–1231.

[16] H. Eivaz Mohammadloo, A.A.Sarabi, A.A.Sabbagh, Nano-ceramic hexafluorozirconic acid based conversion thin film: Surface characterization and electrochemical study, Surface & Coatings Technology. 206 (2012) 4132–4139.

[17] H. Eivaz Mohammadlooa, A.A. Sarabia, R. Mohammad Hosseinia, A comprehensive study of the green hexafluorozirconic acid-based conversion coating, Progress in Organic Coatings. 77 (2014) 322– 330.

[18] R. Amini, A.A. Sarabi, The corrosion properties of phosphate coating on AZ31 magnesium alloy: The effect of sodium dodecyl sulfate (SDS) as an eco-friendly accelerating agent, Applied Surface Science 257 (2011) 7134-7139.

[19] H. Eivaz Mohammadloo, A.A. Sarabi, Titanium composite conversion coating formation on CRS in the presence of Mo and Ni ions: electrochemical and microstructure characterizations, Appl. Surf. Sci. 387 (2016) 252–259.

[20] H. Eivaz Mohammadloo, A.A. Sarabi, Titanium-phytic acid nano structured conversion coating formation on CRS substrate, Prog. Org. Coat. 101 (2016) 391–399.

[21] J. Livage, J. Livage, Sol-gel chemistry and electrochemical properties of vanadium oxide gels, Solid State Ionics 86-88 (1996) 935–942.

[22] Abdel Salam Hamdy, I. Doench, H. Möhwald, Chrome-free self-healing protective coating for AA2024 in chloride containing solution, NACE (2012) 1-14.

[23] Abdel Salam Hamdy, I. Doench, H. Möhwald, Intelligent self-healing corrosion resistant vanadia coating for AA2024, Thin Solid Films, vol 520, Pp. 1668–1678 , (2011).

[24] Hossein Hassannejad, Mohsen Moghaddasi, Ehsan Saebnoori, Amin Rabiei Baboukani, Microstructure, deposition mechanism and corrosion behavior of nanostructured cerium oxide conversion coating modified with chitosan on AA2024 aluminum alloy, Journal of Alloys and Compounds. 725 (2017) 968-975.

[25] Xiang Gao, Weihua Li, Ru Yan, Huiwen Tian, HouyiMa, Effect of zinc ion on the microstructure and electrochemical behavior of phytic acid based conversion coatings on Q235 steels, Surface & Coatings Technology 325 (2017) 248–256.

[26] Nguyen Van PHUONG, Manoj GUPTA, Sungmo MOON, Enhanced corrosion performance of magnesium phosphate conversion coating on AZ31 magnesium alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 27 (2017) 1087−1095.

[27] M. Golabadi, M. Aliofkhazraei, M. Toorani, A. Sabour Rouhaghdam, Corrosion and cathodic disbondment resistance of epoxy coating on zinc phosphate conversion coating containing Ni^{2+} and Co^{2+}, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 47 (2017) 154–168.

[28] Xin Zhong, Xiaosong Wu, Yuyu Jia, Yali Liu, Self-repairing vanadium–zirconium composite conversion coating for aluminum alloys, Surface & Coatings Technology. 280 (2013) 489-493.

[29] A. Francis, Y. Yang, A.R. Boccaccini, A new strategy for developing chitosan conversion coating on magnesium substrates for orthopedic implants, Applied Surface Science 466 (2019) 854–862.

[30] Rita Maury, Abdul Rahim Siddiqu, Kantesh Balani, An environment-friendly phosphate chemical conversion coating on novel Mg-9Li-7Al-1Sn and Mg-9Li-5Al-3Sn-1Zn alloys with remarkable corrosion protection, Applied Surface Science 443 (2018) 429–440.

[31] M. Nabizadeh, A.A. Sarabi, H. Eivaz Mohammadloo, Comparative investigation of Cu ion and adipic acid addition on electrochemical and microstructure characteristics of vanadium conversion coating on AZ31 Mg alloy, Surface & Coatings Technology 357 (2019) 1–11.

[32] J. Livage, J. Livage, Sol-gel chemistry and electrochemical properties of vanadium oxide gels, Solid State Ionics 86-88 (1996) 935–942.

[33] M. Henry, J.P. Jolivet, J. Livage, Aqueous chemistry of metal cations: Hydrolysis, condensation and complexation, Chem. Spectrosc. Appl. Sol-Gel Glas. Springer- Verlag, Berlin/Heidelberg (1992) 153–206.

[34] Z. Zou, N. Li, D. Li, H. Liu, S. Mu, A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electro galvanized steel substrates, J. Alloys Compd. 509 (2011) 503–507.

[35] Daimon K Heller, William G. Fahrenholtz, Matthew J. O'Keefe, The effect of post-treatment time and temperature on cerium-based conversion coatings on Al 2024-T3, Corrosion Science. 52 (2010) 360–368.

[36] Quentin Boyer, Maria R. Ortega Vega, Célia de Fraga Malfatti, Sandrine Duluard, Florence Ansart, Correlation between morphology and electrochemical behavior of chromium-free conversion coatings for aluminum alloys corrosion protection, Surface & Coatings Technology. 351 (2018) 115–127.

[37] D. Susac, X. Sun, R.Y. Li, K.C. Wong, P.C. Wong, K.A.R. Mitchell, R. Champaneria, Microstructural effects on the initiation of zinc phosphate coatings on 2024-T3 aluminum alloy, Appl. Surf. Sci. 239 (2004) 45–59.

[38] R. Zeng, Z. Lan, L. Kong, Y. Huang, H. Cui, Characterization of calcium-modified zinc phosphate conversion coatings and their influences on corrosion resistance of AZ31 alloy, Surf. Coat. Technol. 205 (2011) 3347–3355.

[39] G.Y. Li, J.S. Lian, L.Y. Niu, Z.H. Jiang, Q. Jiang, Growth of zinc phosphate coatings on AZ91D magnesium alloy, Surf. Coat. Technol. 201 (2006) 1814–1820.

[40] W.-C. Kim, J.-G. Kim, J.-Y. Lee, H.-K. Seok, Influence of Ca on the corrosion properties of magnesium for biomaterials, Mater. Lett. 62 (2008) 4146–4148.

[41] B. Ramezanzadeh, M. M. Attar, M. Farzam, Corrosion Performance of a Hot- Dip Galvanized Steel Treated by Different Kinds of Conversion Coatings, Surf. Coat. Technol. 205 (2010) 874–884.

[42] T. Bellezze, G. Roventi, R. Fratesi, Electrochemical Study on the Corrosion Resistance of Cr III-based Conversion Layers on Zinc Coatings, Surf. Coat. Techno. 155 (2002) 221–230.

[43] Xiao Jiang, Ruiguang Guo, Shuqin Jiang, Evaluation of self-healing ability of Ce–V conversion coating on AZ31 magnesium alloy, Surface & Coatings Technology. (2016) 230-241.

[44] H.W. Liu Jianrui, Guo Yin, Study on the corrosion resistance of phytic acid conversion coating for magnesium alloys, Surface & Coatings Technology. 201 (2006) 1536–1541.

[45] Y. Ma, N. Li, D. Li, M. Zhang, X. Huang, Characteristics and corrosion studies of vanadate conversion coating formed on Mg–14 wt%Li–1 wt%Al–0.1 wt%Ce alloy, Applied Surface Science. 261 (2012) 59–67.

[46] Y. Li, Y.Zhang, Influence of adipic acid on anodic film formation and corrosion resistance of 2024 aluminum alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 26 (2016) 492−500.

[47] M. Castro, J. Nogueira, G. Thim, and M. Oliveira, Adhesion and corrosion studies of a lithium based conversion coating film on the 2024 aluminum alloy, Thin solid films. 457 (2004) 307-312.

[48] Joshi, S; Kulp, E.A; Fahrenholtz, W.G., O'Keefe, M.J, Dissolution of cerium from cerium-based conversion coatings on Al 7075-T6 in 0.1M NaCl solutions, Corros. Sci. 60 (2012) 290–295.

[49] G. Yoganandan, K. Pradeep Premkumar, J.N. Balaraju, Evaluation of corrosion resistance and self-healing behavior of zirconium–cerium conversion coating developed on AA2024 alloy, Surface & Coatings Technology (2015) 249-258.

[50] ZHAO Dan Corrosion behavior of rare earth cerium based conversion coating on Aluminum alloy; JOURNAL OF RARE EARTHS (2010) 371-382.

[51] M. Kazemi, I. Danaee, D. Zaarei, The effect of pre-anodizing on corrosion behavior of silicate conversion coating on AA2024, Materials Chemistry and Physics. (2014) 223-229.

[52] R. Mohammad Hosseini, A.A. Sarabi, H. Eivaz Mohammadloo, M. Sarayloo, The performance improvement of Zr conversion coating through Mn incorporation: With and without organic coating, Surface & Coatings Technology. (2014) 437-446.

[53] B. Valdez, S. Kiyota, M. Stoytcheva, R. Zlatev, J.M. Bastidas, Cerium-based conversion coatings to improve the corrosion resistance of aluminium alloy 6061-T6, Corrosion Science. (2014) 141-149.

[54] Y. Kobayashi and Y. Fujiwara, Effect of SO_4^{2-} on the corrosion behavior of cerium-based conversion coatings on galvanized steel, Electrochim. Acta. 51 (2006) 4236–4242.

[55] Z. Mahidashti, B. Ramezanzadeh; Influence of lanthanum as additive and post-treatment on the corrosion protection properties and surface morphology of mild steel chemically treated by a cerium conversion coating; Journal of Rare Earths. (2018) 1-9.