

# بررسی تاثیر کیفیت سطحی پوشش‌های آبکاری رودیم بر خواص الکتروشیمیایی و خوردگی آنها

ویدا غیور، شاهین خامنه اصل

گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، کد پستی: ۵۱۶۶۶-۱۴۷۶۶

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۱۹- پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۲۹)

## چکیده

در این پژوهش به بهینه‌سازی و مطالعات خوردگی پوشش‌های آبکاری رودیم پرداخته شده است. ابتدا پوششی از رودیم روی زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ در مدت زمان‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ دقیقه، از طریق فرایند آبکاری از محلول پایه سولفاتی اعمال شد. با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) و طیف سنجی انرژی اشعه ایکس (EDS) به بررسی ضخامت، مورفولوژی و آنالیز عنصری پوشش‌های سطح پرداخته شد و تاثیر زمان آبکاری رودیم روی ضخامت و زبری سطح پوشش مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از آزمون‌های الکتروشیمیایی به ترتیب پتانسیل مدار باز (ocp)، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون تافلی مقاومت به خوردگی پوشش‌های رودیم در محلول ۳wt% NaCl مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعات SEM و زبری سنجی در مقایسه با نتایج الکتروشیمیایی پوشش رودیم نشان دادند که پوشش رودیم آبکاری شده در زمان ۱۰ دقیقه از بیشترین مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی برخوردار بوده که مقدار ضخامت پوشش ۱/۲۷ میکرومتر تشکیل شد و مقدار جریان خوردگی ۶/۲۵ نانوامپر بر سانتی متر مربع و پتانسل خوردگی ۱۹۳ میلی ولت تعیین شد. تغییرات مقدار زبری سطح نمونه‌ها، با نتایج حاصل از برازش مدار معادل شبیه سازی شده برای ظرفیت خازنی لایه دوگانه (CPE-P) آزمون امپدانس الکتروشیمیایی پوشش‌ها مطابقت داشت.

واژه‌های کلیدی: رودیم، آبکاری، خوردگی الکتروشیمیایی، زبری

## Investigating the effect of surface quality of Rhodium electroplating coatings on their electrochemical and corrosion properties

Vida, Ghayour, Shahin, Khameneh Asl

Department of Metallurgy, Tabriz, Iran, P. O. Box: 51666-14766

### Abstract

this research focused on investigating the optimization and corrosion studies of rhodium plating coatings. Firstly, a rhodium coating was applied to the Inconel 600 super alloy substrate for 2, 5, 10, 20 and 50 minutes, using the electroplating process of sulfate solution. Using scanning electron microscope (SEM) and X-ray energy spectroscopy (EDS) images, the thickness, morphology and elemental analysis of the surface coatings were investigated and effect of rhodium plating time on the thickness and surface roughness of the coating was investigated. Finally, the corrosion resistance of rhodium coatings in 3.5% wt NaCl solution was evaluated using electrochemical tests: open circuit potential (OCP), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and tafel polarization, respectively. The results of SEM and roughness measurement studies in comparison results of rhodium coating showed that the electroplated rhodium coating had the highest resistance to electrochemical corrosion in 10 minutes, the thickness of the coating was 1.27 $\mu$ m and the corrosion current was 6.25nA/cm<sup>2</sup> and the corrosion potential was determined to be 193mV vs SCE. the changes in the surface roughness were similar to the results of fitting the simulated electrical equivalent circuit for the double layer capacitance of the electrochemical impedance test.

**Keywords:** Rhodium, Electroplating, Electrochemical corrosion, Roughness

\*Corresponding author: khameneh@tabriz.ac.ir

## مقدمه

ذوب فلز و صنایع شیشه اشاره کرد [۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. همچنین، عنصر رودیم به دلیل رنگ سفید و درخشانی که دارد به عنوان عنصر تزئینی بر روی انواع جواهرات استفاده می‌شود که حتی یک لایه بسیار نازک رودیم درخشش قابل توجه و مقاومت بالایی در مقابل تیرگی به جواهرات می‌دهد [۱۳ و ۱۴].

روش‌های مختلفی برای پوشش‌دهی فلزات نجیب وجود دارد که در بین آن‌ها، فرایند آبرکاری به عنوان یک روش ساده، کارآمد و مقرون به صرفه برای ایجاد پوشش فلزات نجیب است و منجر به کاهش هزینه، زمان و بهبود کیفیت پوشش می‌شود [۱۵]. بر همین اساس، در سال ۱۹۱۲ شخصی به نام مارینو<sup>۳</sup> توانست فرایند پوشش‌دهی رودیم با استفاده از محلول کلریدی را به ثبت رساند [۱۶]. از گذشته تاکنون حمام‌های مختلفی برای آبرکاری رودیم پیشنهاد شده است ولی امروزه از حمام‌های سولفاتی، فسفاتی یا مخلوط سولفات-فسفات برای آبرکاری رودیم استفاده می‌شود [۱۷]. بای و همکارانش [۱۸] پوشش رودیم آبرکاری شده روی سوپراآلیاز اینکونل LC ۷۳۸ در محلول الکترولیت سولفاتی در دمای اتاق با دانسیته جریان ۰/۰۳ آمپر بر سانتی متر مربع به مدت ۵ دقیقه ایجاد کردند و گزارش دادند که پوشش رودیم بدون تخلخل بوده و چسبندگی خوبی به سطح زیرلایه داشته است و با انجام آزمون‌های مرتبط با اکسیداسیون روی نمونه‌ای با پوشش آلومیناید اصلاح شده با رودیم دریافتند که لایه اکسید نازک پیوسته و متراکم  $Al_2O_3$  روی نمونه تشکیل شده است و رودیم مقاومت اکسیداسیون بالایی تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد از خود نشان داده است. در پژوهش دیگری که توسط ناگاراچ [۱۹] به ثبت رسیده گزارش شده است که در پوشش‌های سد حرارتی<sup>۴</sup> استفاده از عناصری مانند پلاتین، پالادیوم یا رودیم به عنوان پوشش میانی<sup>۵</sup> سبب بهبود مقاومت خوردگی و اکسیداسیون شده و

عنصر رودیم، یکی از شش فلز خانواده پلاتین که به رنگ نقره‌ای سفید است [۱]. حالت فیزیکی این عنصر در شرایط استاندارد به صورت جامد بوده و ساختار بلوری آن مکعبی با وجوه مرکز پر<sup>۱</sup> می‌باشد. نماد شیمیایی آن  $Rh^2$  با عدد اتمی ۴۵ است. رودیم فلزی بادوام و بسیار گران‌بهاست که از قابلیت انعکاسی و مقاومت به خوردگی بالایی برخوردار است [۲]. نقطه ذوب رودیم در مقایسه با پلاتین بالاتر بوده و چگالی کمتری دارد و در برابر حمله اسیدها از جمله تیزاب سلطانی تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد مقاوم است. رودیم توانایی جذب اکسیژن از اتمسفر، بدون اکسید شدن، را دارد بطوریکه وقتی رودیم ذوب می‌شود اکسیژن را در خود حبس کرده و هنگام انجماد آن را آزاد می‌کند که این از ویژگی‌های عجیب عنصر رودیم به حساب می‌آید [۳ و ۴]. رودیم به دلیل عضویت در گروه فلزات پلاتین بسیار مقاوم در برابر خوردگی است و به عنوان فلز نجیب، مقدار پتانسیل مثبت و نرخ خوردگی پایینی دارد و مقاومت عالی در محیط‌های خورنده اسیدی سبب شده است که از کاربردهای متنوعی برخوردار باشد [۵ و ۶].

رودیم دارای خواص عالی زیادی از جمله سختی بالا، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون و مقاومت به سایش در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷ و ۸]. یکی از کاربردهای اصلی رودیم در مبدل‌های کاتالیستی است که آلاینده‌های مضر از آگزوز خودروها را به مواد کم آلاینده تبدیل می‌کند [۹]. عنصر رودیم به دلیل درخشندگی، قابلیت انعکاس، سختی پوشش‌ها به طور گسترده در فیبرهای نوری، آینه‌های گران‌بها و رفلکتورهای چراغ ماشین و مهندسی برق و الکترونیک استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای این عنصر می‌توان به اجزا ترموکوپل‌ها، الکترودهای سیستم جرقه‌زنی هواپیما، ظروف حرارتی آزمایشگاه‌ها، بوت‌های آهنگری

<sup>3</sup> Marino

<sup>4</sup> Thermal Barrier Coating (TBC)

<sup>5</sup> bond coat

<sup>1</sup> Face-Centered Cubic (FCC)

<sup>2</sup> Rhodium

وزن سیستم پوشش سد حرارتی به حداقل رسیده است. همچنین، در پژوهش‌های انجام شده توسط تاوانسی و همکارانش [۲۱ و ۲۰] که تاثیر عناصر گروه پلاتین در پوشش‌های سد حرارتی بررسی شده و گزارش شده است که در پوشش‌های میانی حاوی عناصر گروه پلاتین سرعت رشد لایه اکسیدی در شرایط کاری دما بالا بسیار کمتر است و با محدود کردن نفوذ عناصر زیرلایه به ویژه تیتانیوم، گوگرد و تانتالیوم مقاومت به اکسیداسیون بهبود یافته و سبب تشکیل لایه اکسید حرارتی<sup>۱</sup> خالص‌تر با سرعت رشد کمتر و افزایش طول عمر پوشش‌های سد حرارتی شده است.

در این پژوهش ضمن به دست آوردن شرایط بهینه برای پوشش‌دهی رودیم با استفاده از فرایند آبکاری، خواص الکتروشیمیایی خوردگی و زبری سطح هر یک از نمونه‌های پوشش‌دار به همراه زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ مقایسه شد و تاثیر زمان آبکاری بر مورفولوژی و ضخامت پوشش مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲. شرایط حمام چربی‌گیری

کاتد	آند	ولتاژ	دما	حداکثر زمان
اینکونل ۶۰۰	فولاد زنگ نزن	۶۷	۴۰°C	۱min

برای تهیه حمام آبکاری رودیم از ۵۰ سی سی محلول سولفات رودیم دو گرمی با خلوص ۹۹/۹۹ درصد، ساخت شرکت آبکاری والتر گارهورفر اتریش<sup>۲</sup>، با ۱ لیتر آب مقطر استفاده شد. برای انجام پوشش‌دهی رودیم، نمونه‌های زیرلایه اینکونل به قطب منفی دستگاه منبع تغذیه متصل شد و در مقابل آند نامحلول از جنس مش تیتانیوم پلاتینیز شده به قطب مثبت وصل شد. با برقراری جریان توسط دستگاه منبع تغذیه فرایند آبکاری رودیم بر روی زیرلایه انجام گرفت که بعد از اتمام آبکاری و ایجاد پوشش، سطح نمونه‌ها خشک شده و با آب مقطر شسته شدند. مشخصات دقیق محلول و فرایند آبکاری در جدول ۳ آورده شده است.

## مواد و روش آزمایش

در این پژوهش پوششی از عنصر رودیم بر روی سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ اعمال شد که ترکیب شیمیایی زیرلایه مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات حمام و فرایند آبکاری

نوع حمام	سولفاتی	مدت زمان	دما
فرمول	$Rh_2(SO_4)_3$	چگالی	۶۰°C
شیمیایی		جریان	
مقدار رودیم	۱-۴g/l		
مقدار اسید سولفوریک	۱۶-۲۷ml/l	مقدار pH	۱

جدول ۱. عناصر تشکیل دهنده سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Ni	۷۴/۱۱	Mn	۰/۲۸
Cr	۱۵/۸۸	Si	۰/۲۱
Fe	۹/۳۷	C	۰/۰۴۶
		S	۰/۰۰۲
		Cu	۰/۰۲۶
		P	۰/۰۱۵

به منظور آماده سازی، ابتدا نمونه‌ها به شکل ربعی از دایره با شعاع ۱۵ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر برش داده شدند

<sup>2</sup> Ing. Walter Garhofer (IWG Plating)

<sup>1</sup> thermally grown oxide (TGO)

برگشتی به رنگ روشن تر دیده می شود. همچنین، از تصاویر ۱-الف و ب مشاهده می شود که برخی از نواحی سطح پوشش غیر یکنواخت است و به صورت تغییر رنگ های تیره تر دیده می شود. شکل ۱-ج و د تصاویر SEM از مقطع پوشش رودیم در زمان آبرکاری ۲ دقیقه را در حالت الکترون های برگشتی و ثانویه را نشان می دهد. مشاهده می شود پوشش رودیم ضخامتی به اندازه ۰/۲۴ میکرومتر دارد که به دلیل سنگینی عنصر رودیم در تصویر ۱-ج به رنگ روشن تری دیده می شود و مطابق با تصویر ۱-د مورفولوژی سطح مقطع پوشش رودیم به حالت کنده شده از سطح زیرلایه دیده می شود.

در شکل ۲-الف و ب تصاویری از سطح نمونه آبرکاری شده در زمان ۱۰ دقیقه در حالت الکترون های برگشتی و الکترون های ثانویه نشان داده شده است. مشاهده می شود که پوشش رودیم به طور کامل روی سطح زیرلایه را پوشانده است و پوشش به صورت متراکم و یکنواخت بر روی سطح تشکیل شده است و مورفولوژی پوشش صاف بوده و تغییر رنگ تیره ای دیده نمی شود. شکل ۲-ج و د تصاویر SEM از سطح مقطع نمونه آبرکاری شده در زمان ۱۰ دقیقه را نشان می دهد و همان طور که مشاهده می شود در تصویر ۱-ج عنصر رودیم به دلیل سنگینی نسبت به عناصر زیرلایه به رنگ روشن تری است و ضخامت پوشش رودیم به اندازه ۱/۲۷ میکرومتر بوده است که نسبت به زمان آبرکاری ۲ دقیقه پوشش ضخیم تری تشکیل شده است. همچنین، در شکل ۳-الف و ب آنالیز EDS از سطح و مقطع نمونه آبرکاری شده رودیم در زمان ۱۰ دقیقه به همراه مقادیر درصد وزنی و اتمی عناصر اصلی زیرلایه و پوشش رودیم نیز ارائه شده است.

به منظور بررسی پارامترهای زبری سطح نمونه ها، از دستگاه زبری سنج مدل TR200 استفاده شد. نتایج مطابق با استاندارد ایزو<sup>۱</sup> و با طول نمونه برداری<sup>۲</sup> ۰/۸ میلی متر حاصل شد.

جهت بررسی تاثیر پارامترها بر روی خواص الکتروشیمیایی و مطالعه رفتار خوردگی نمونه ها، آزمون های الکتروشیمیایی از جمله پتانسیل مدار باز به مدت زمان ۱ ساعت، آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با محدوده فرکانس ۰/۱ هرتز تا ۲ کیلو هرتز و دامنه موج سینوسی ۵ میلی ولت انجام شد و با استفاده از نرم افزار ZView-Impedance Software شبیه سازی مدار معادل انجام گرفت. همچنین، آزمون پلاریزاسیون تافلی از پتانسیل ۵۰- میلی ولت تا ۱۵۰۰+ میلی ولت و نرخ روبش ۲ میلی ولت بر ثانیه انجام شد. هر یک از این آزمون ها در یک سیستم سه الکترودی شامل الکتروود کاری از جنس نمونه های تهیه شده، الکتروود کمکی پلاتین به مساحت ۱ سانتی متر مربع و الکتروود مرجع کالومل، متصل به یک دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید انجام گرفت.

## نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر زمان آبرکاری روی مورفولوژی سطحی و ضخامت پوشش رودیم، تصاویر SEM در حالت الکترون های ثانویه<sup>۳</sup> و الکترون های برگشتی<sup>۴</sup> به همراه آنالیز طیف سنجی انرژی اشعه ایکس<sup>۵</sup> بررسی شدند.

در شکل ۱-الف و ب تصاویر SEM از سطح پوشش رودیم آبرکاری شده در زمان ۲ دقیقه ارائه شده است. نکته ای که باید به آن توجه کرد این است که عنصر رودیم نسبت به عناصر زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ مانند نیکل، کروم و آهن، فلزی سنگین است. بنابراین، رودیم در تصاویر الکترون

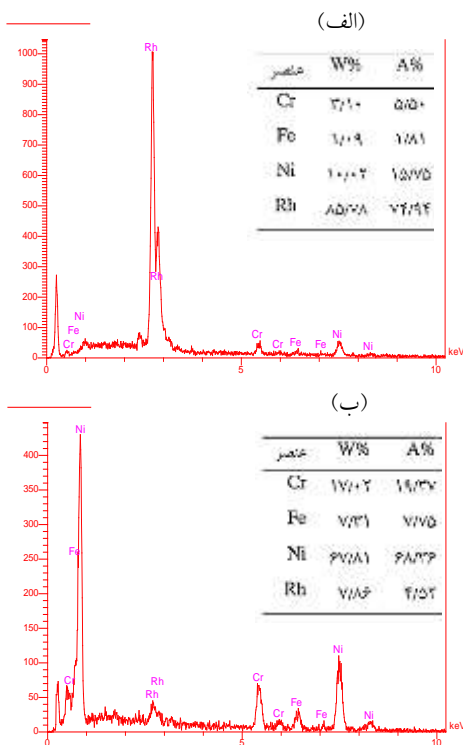
<sup>4</sup> Backscattered electron (BSE)

<sup>5</sup> Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

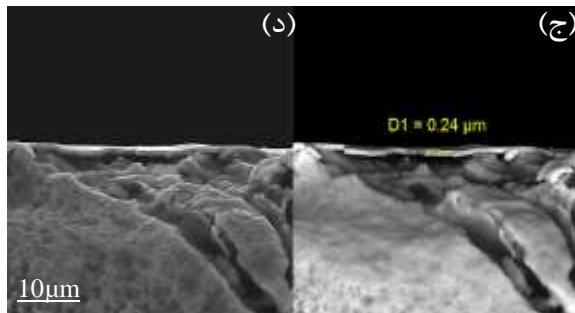
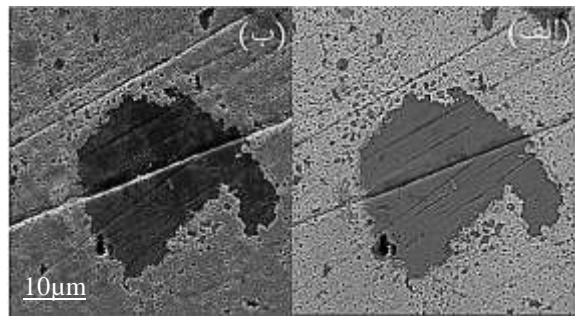
<sup>1</sup> ISO

<sup>2</sup> Cutoff

<sup>3</sup> Secondary electron (SE)

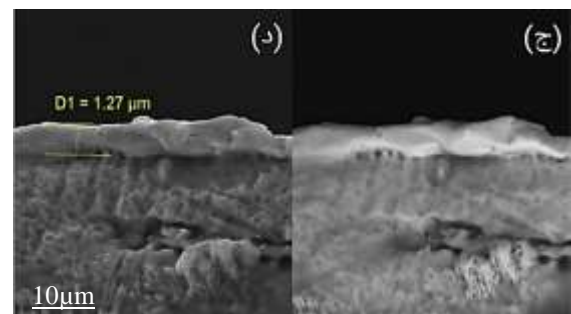
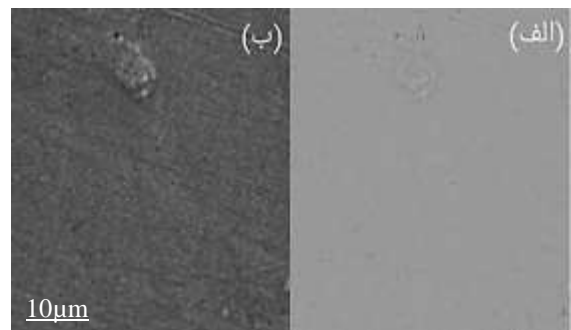


شکل ۳. نتایج آنالیز EDS از: الف) سطح و ب) مقطع برای نمونه آبکاری شده در زمان ۱۰ min.



شکل ۱. تصاویر SEM برای نمونه آبکاری شده در زمان ۲ min از: الف) سطح در حالت الکترون برگشتی، ب) سطح در حالت الکترون ثانویه، ج) مقطع در حالت الکترون برگشتی، د) مقطع در حالت الکترون ثانویه.

در شکل ۴ تصویری از تخلخل و حفرات سطحی پوشش رودیم آبکاری شده در زمان ۵۰ دقیقه آورده شده است. مشاهده می‌شود که در زمان آبکاری ۵۰ دقیقه، در مقایسه با تصاویر SEM حاصل از زمان‌های پوشش دهی ۲ و ۱۰ دقیقه مورفولوژی و ساختار پوشش تشکیل شده دارای عیوب و تخلخل زیادی است. در شکل ۵-الف پوشش رودیم در حالت الکترون‌های برگشتی به رنگ روشن‌تری دیده می‌شود. از تصویر ۵-ب در حالت الکترون‌های ثانویه مشاهده می‌شود که مورفولوژی سطح به صورت گرد و کروی است و پوشش تشکیل شده حالت توده‌ای دارد. مشابه چنین ساختاری از پوشش رودیم با توده‌های گرد و کروی در پژوهش انجام شده توسط وو و همکارانش [۸] نیز مشاهده شده است. در شکل ۵-ج و د تصاویری از مقطع پوشش رودیم در زمان آبکاری ۵۰ دقیقه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در تصویر ۵-ج پوشش رودیم با رنگ روشن‌تری، به ضخامت ۱/۰۴ میکرومتر تشکیل شده



شکل ۲. تصاویر SEM برای نمونه آبکاری شده در زمان ۱۰ min از: الف) سطح در حالت الکترون برگشتی، ب) سطح در حالت الکترون ثانویه، ج) مقطع در حالت الکترون برگشتی، د) مقطع در حالت الکترون ثانویه.

جهت مقایسه با نتایج حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی، آزمون زبری سنجی بر روی نمونه‌های آبکاری شده در زمان‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ دقیقه و زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل انجام گرفت که پارامترهای زبری حاصل از آن برای هر یک از زمان‌های پوشش‌دهی در جدول ۴ آورده شده است. پارامتر زبری Ra به عنوان میانگین انحرافات زبری سطح است و رایج‌ترین پارامتر برای کنترل کیفیت سطح به شمار می‌آید و می‌تواند توصیف خوبی برای تغییرات سطحی باشد و Rq مجذور میانگین مربعات زبری سطح بوده که در مقایسه با Ra نسبت به انحرافات سطحی حساس است. همچنین، Rz به عنوان اختلاف بین مقدار میانگینی از پنج قله عمیق با پنج دره عمیق تعریف می‌شود:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

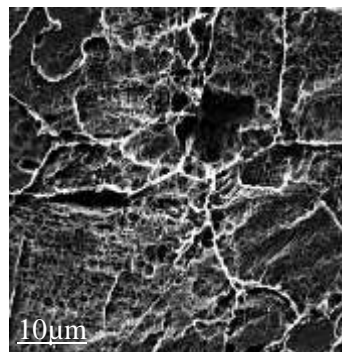
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (2)$$

$$R_z = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n V_i) \quad (3)$$

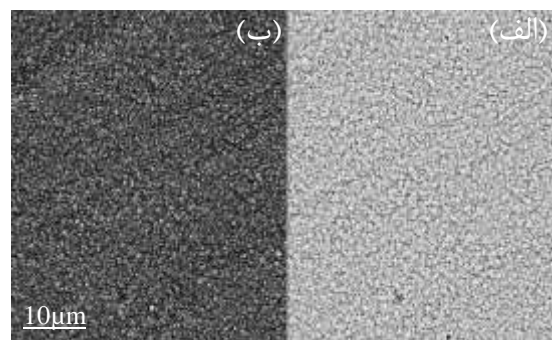
که n تعداد پیک‌ها،  $y_i$  ارتفاع پیک،  $P_i$  ارتفاع قله و  $V_i$  عمق دره در نقطه i است [۲۲].

مطابق با پارامترهای حاصل از زبری سنجی، مشاهده می‌شود که با ایجاد پوششی از رودیم بر روی زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ مقدار پارامترهای مختلف زبری سطح کاهش می‌یابد که برای نمونه‌های پوشش داده شده و سطح زیرلایه، مقادیر زبری سطح در زمان‌های آبکاری ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه نسبت به سطح زیرلایه کمتر شده است که این موضوع دلالت بر صافی و یکنواختی سطح پوشش رودیم و بهبود کیفیت سطحی دارد. همچنین، با مقایسه نمونه‌های آبکاری شده با یکدیگر مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آبکاری مقدار پارامترهای زبری افزایش می‌یابد که در زمان‌های آبکاری ۲۰ و ۵۰ دقیقه مقدار پارامترهای زبری در مقایسه با زیرلایه اینکونل ۶۰۰ افزایش یافته است بطوریکه، مقدار پارامتر Ra برای زمان آبکاری ۵۰ دقیقه به ۰/۹۰ میکرومتر

است که در مقایسه با مقدار ضخامت پوشش تشکیل شده در زمان ۱۰ دقیقه کمتر است.



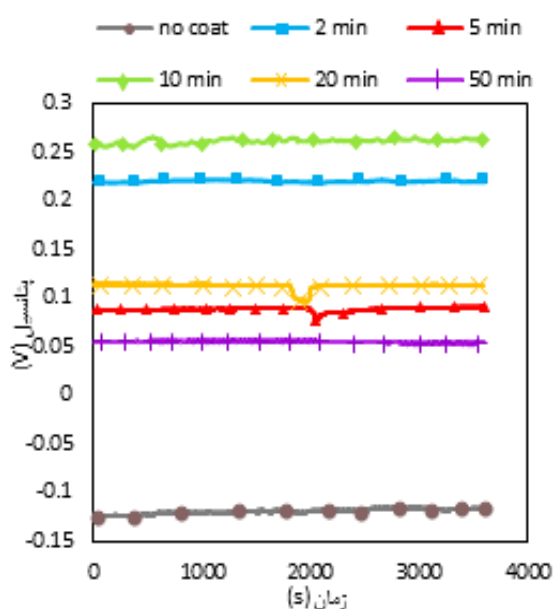
شکل ۴. تصویر SEM از تخلخل و حفرات سطح پوشش رودیم در زمان آبکاری ۵۰ min.



شکل ۵. تصاویر SEM برای نمونه آبکاری شده در زمان ۵۰ min از: (الف) سطح در حالت الکترون برگشتی، (ب) سطح در حالت الکترون ثانویه، (ج) مقطع در حالت الکترون برگشتی، (د) مقطع در حالت الکترون ثانویه.

به منظور ارزیابی و اطمینان از کیفیت پوشش‌های سطحی و تاثیر زمان آبکاری بر بافت سطحی پوشش‌ها و همچنین

رودیم با ایجاد یک سد محافظتی در برابر نفوذ یون‌های خورنده محلول الکترولیت، منجر به افزایش مقدار پتانسیل مدار باز پوشش شده است. در پژوهش مشابه دیگری توسط دوندرا و همکارانش [۱۶] که برای رودیم آبکاری شده با جریان مستقیم و پالسی بر روی زیرلایه فولاد ۳۰۴ انجام شده است؛ با انجام آزمون پتانسیل مدار باز در محلول ۰/۵ مولار اسید سولفوریک، گزارش شده است که پوشش تشکیل شده به روش آبکاری جریان پالسی با چرخه کاری ۷۵ درصد در مقدار پتانسیل بالاتری به تعادل رسیده است و از مقاومت به خوردگی بالایی برخوردار بوده است.



شکل ۶. منحنی تغییرات پتانسیل مدار باز در محلول ۳/۵٪ NaCl.

نتایج آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل و نمونه‌های آبکاری شده رودیم در زمان‌های مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ دقیقه در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود که منحنی‌های نایکوئست از نظر ظاهری رفتار مشابهی دارند. برای نمونه‌های آبکاری شده در زمان ۲ و ۱۰ دقیقه شیب منحنی افزایش یافته است که دلالت بر مقاومت خوردگی بالای آن‌ها دارد. نمونه آبکاری شده در زمان ۵۰ دقیقه شیب

رسیده است که این موضوع به دلیل ناصافی و ناهمواری‌های سطح بوده که با افزایش زمان آبکاری ساختار پوشش نیز درشت‌تر شده است.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای زبری سطح

زمان پوشش‌دهی	پارامترهای زبری		
	R <sub>z</sub> (μm)	R <sub>q</sub> (μm)	R <sub>a</sub> (μm)
زیرلایه	۰/۱۵۶	۰/۰۴۰	۰/۰۲۴
۲min	۰/۱۱۹	۰/۰۲۵	۰/۰۱۳
۵min	۰/۱۲۵	۰/۰۲۸	۰/۰۱۵
۱۰min	۰/۱۱۵	۰/۰۳۱	۰/۰۱۷
۲۰min	۰/۱۹۲	۰/۰۵۲	۰/۰۳۱
۵۰min	۰/۶۵۱	۰/۱۷۶	۰/۰۹۰

شکل ۶ تغییرات پتانسیل مدار باز با زمان در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید برای زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل و پوشش‌های رودیم حاصل از آبکاری در زمان‌های مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ دقیقه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که منحنی پتانسیل مدار باز برای هر یک از نمونه‌ها با گذشت زمان، با مقدار پتانسیل ثابت و با نوسانات کمی همراه است که این موضوع نشان دهنده برقراری تعادل و پایداری در سیستم الکتروشیمیایی است. همچنین، مطابق با شکل ۶ مشاهده می‌شود که با ایجاد پوشش رودیم، پتانسیل مدار باز نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به زیرلایه، مقادیر پتانسیل مثبتی نشان دادند که این موضوع می‌تواند مربوط به نجیب بودن فلز رودیم و افزایش مقاومت به خوردگی پوشش‌های رودیم در مقایسه با سطح زیرلایه باشد. به دلیل اینکه در آزمون پتانسیل مدار باز، پوششی که در برابر یون‌های خورنده محلول الکترولیت مقاومت بالاتری داشته باشد، در پتانسیل‌های بالاتر به پایداری می‌رسد؛ بر همین اساس منحنی پوشش رودیم حاصل از زمان آبکاری ۱۰ دقیقه، بیشترین مقدار پتانسیل را دارد و این موضوع دلالت بر مقاومت خوردگی بالای این پوشش در مقایسه با پوشش‌های آبکاری شده در مدت زمان‌های مختلف دارد. بنابراین، عنصر

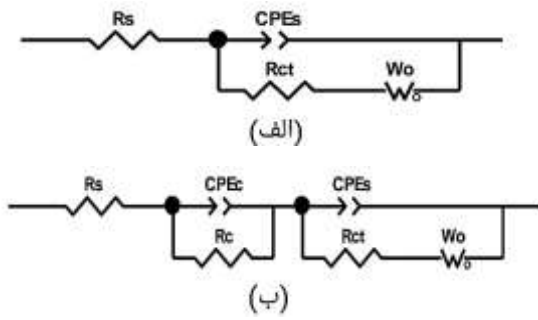
به منظور تحلیل و تفسیر داده‌های حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی و شبیه سازی رفتار خوردگی باید نتایج به دست آمده را با یک مدار الکتریکی معادل مطابقت داد. با بررسی مدارهای معادل الکتریکی ارائه شده در پژوهش‌های مربوط به پوشش‌های رودیم از جمله پژوهش دوندرا و همکارانش [۲۳] که برای پوشش آلیاژی پلاتین-رودیم روی زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به روش آبکاری پالسی انجام شده است و همچنین در پژوهش دیگری که توسط تیلور و همکارانش [۲۴] برای پوشش اکسید رودیم روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به روش کندوپاش اعمال شده است و در پژوهشی که توسط نوری و همکارانش [۲۵] برای پوشش پلاتین روی زیرلایه نیویوم به روش آبکاری الکتریکی بوده است؛ در نهایت مشخص شد بهترین مدار معادلی که می‌تواند انطباق مناسبی بین منحنی‌های تجربی و شبیه سازی شده در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی ارائه دهد شکل ۸ است.

در مدار معادل ارائه شده از یک مقاومت  $R_s$  استفاده شده است که نشان‌دهنده مقاومت محلول الکترولیت می‌باشد. مقاومت دیگر  $R_{ct}$  با CPEs به صورت موازی قرار گرفته است که  $R_{ct}$  به عنوان مقاومت انتقال بار خوردگی و CPEs به عنوان ظرفیت لایه دو گانه الکتریکی در فصل مشترک فلز زیرلایه با محلول الکترولیت بوده و برای بررسی رفتار الکتریکی سطح زیرلایه است. از طرفی، به منظور بررسی مقاومت پوشش رودیم در برابر عوامل خوردنده محلول الکترولیت از دو عنصر  $R_c$  و CPEC استفاده شد که برای ارزیابی خواص پوشش به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته است که  $R_c$  به عنوان مقاومت پوشش رودیم و CPEC به عنوان ظرفیت لایه دو گانه الکتریکی در فصل مشترک پوشش رودیم با محلول الکترولیت است. همچنین، مطابق با نمودار نایکوئست بخش خطی مربوط به امپدانس واربرگ است که در نتیجه فرایند نفوذ بوده و در نمودار نایکوئست به صورت یک خط کج با شیب ۴۵ درجه نمایان می‌شود که برای ایجاد تطابق مناسب بین داده‌های تجربی و شبیه سازی

منحنی پایینی از خود نشان داده است که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف این پوشش در برابر یون‌های خوردنده محلول الکترولیت است و شیب کوچک منحنی نسبت به نمونه‌های دیگر نشان از هدایت بالا و مقاومت به خوردگی پایین نمونه آبکاری شده در زمان ۵۰ دقیقه می‌باشد. همچنین، منحنی‌های مربوط به زمان‌های آبکاری ۲ و ۱۰ دقیقه با شیب خطی بالاتر، نشان دهنده کم بودن تخلخل و حفرات پوشش است که نفوذ عوامل خوردنده الکترولیت به داخل پوشش را مختل می‌کند و این به دلیل حضور موثر پوشش رودیم بر روی سطح زیرلایه است. از طرفی مطابق با شکل ۷-الف مشاهده می‌شود که شیب منحنی‌های نمونه‌های آبکاری شده در زمان‌های ۲۰ و ۵ دقیقه نسبت به منحنی زیرلایه کمتر است که مشابه چنین حالتی در پژوهش انجام شده توسط دوندرا و همکارانش [۲۳] برای پوشش آلیاژی پلاتین-رودیم آبکاری شده با جریان مستقیم و پالسی روی زیرلایه فولاد ۳۰۴ مشاهده شده است و با انجام آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۰/۱ مولار سولفات سدیم، گزارش شده است که پوشش تشکیل شده به روش آبکاری جریان پالسی با چرخه کاری ۷۵ درصد نسبت به چرخه پالسی ۲۵ و ۵۰ درصد، نیم حلقه امپدانس کوچکتری نشان می‌دهد که مرتبط با تبادلات الکتروشیمیایی در داخل محلول الکترولیت بوده؛ در حالیکه با برآزش مدار معادل الکتریکی معادل نمونه آبکاری شده با چرخه پالسی ۷۵ درصد از مقاومت خوردگی بالایی برخوردار بوده است.

در شکل ۷-ب و ج به ترتیب نمودار بد و فاز آورده شده است. وجود قله در نمودارهای فاز نشان دهنده وجود ناپیوستگی‌هایی بر روی سطح پوشش است که در اثر تماس محیط خوردنده با سطح زیرلایه، یک سل الکتروشیمیایی فعال بر روی سطح پوشش تشکیل می‌شود و به رفتار مقاومتی نقص‌های پوشش از جمله حفرات و تخلخل‌های سطح نسبت داده می‌شود که این قله به وضوح در زمان آبکاری ۵۰ دقیقه قابل مشاهده است.





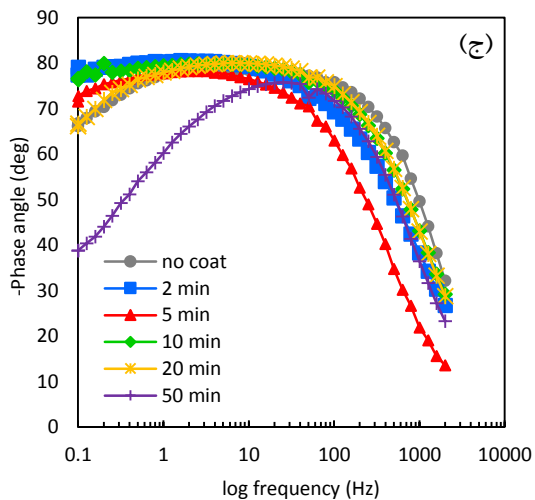
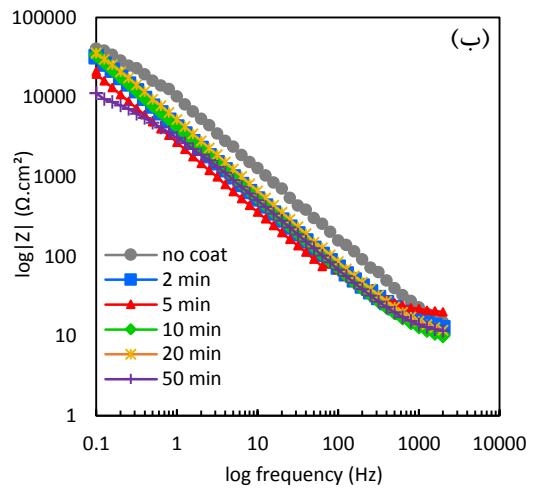
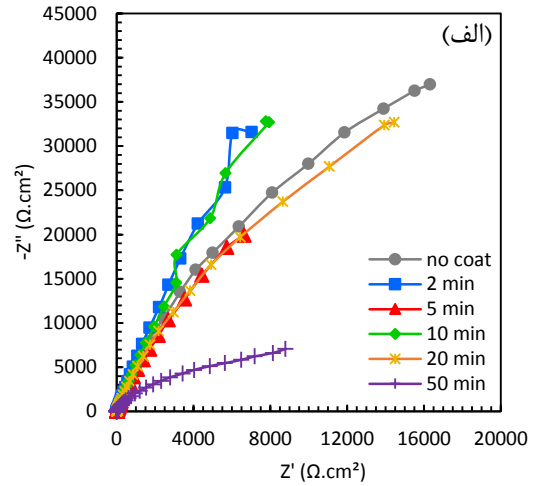
شکل ۸. مدار معادل الکتریکی برای: الف) زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ و ب) پوشش آبکاری شده رودیم.

در جدول ۵ پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از انطباق نمودار تجربی آزمون امپدانس الکتروشیمیایی با نمودار تئوری مدار معادل الکتریکی، آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت انتقال بار خوردگی،  $R_{ct}$ ، با ایجاد پوششی از رودیم در زمان‌های پوشش‌دهی ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه در مقایسه با سطح زیرلایه، بیشتر شده است که دلالت بر بهبود سطح زیرلایه با اعمال پوشش رودیم دارد. از طرفی، مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آبکاری در ۲۰ و ۵۰ دقیقه مقدار مقاومت انتقال بار کمتر است که بیشترین مقدار کاهش مربوط به زمان آبکاری ۵۰ دقیقه است که علت این موضوع را می‌توان به تغییرات مورفولوژی پوشش در زمان‌های آبکاری بالاتر نسبت داد.

همچنین، مقدار مقاومت فصل مشترک پوشش رودیم با محلول الکترولیت با  $RC$  نشان داده شده است. هر چه پوشش رودیم متراکم و یکنواخت باشد در این حالت مقدار مقاومت بیشتر می‌شود. مطابق با جدول ۵ مشاهده می‌شود که در زمان آبکاری ۱۰ دقیقه پوشش رودیم از مقاومت بالایی برخوردار است که دلالت بر تراکم بالای پوشش و کاهش عیوب سطحی دارد.

زمانی که سطح الکتروود دارای ناهمواری و ناهمگنی باشد، در این حالت عملکرد خازن ایده آل مشاهده نمی‌شود. بنابراین، یک عنصر فاز ثابت، جایگزین خازن می‌شود تا

شده در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی به مدار معادل الکتریکی اضافه شده است.



شکل ۷. منحنی‌های حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در محلول  $NaCl$  ۳/۵٪: الف) نایکوئست، ب) بد و ج) فاز.

تناسب دقیقی برای مدل سازی رفتار خازن غیر ایده آل ارائه دهد:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (۴)$$

در این رابطه،  $Y_0$  ادمیتانس و  $n$  توان CPE است که می تواند به عنوان سنجشی از ناهمگنی و ناهمواری سطح استفاده شود و مقدار آن بین صفر و یک است که اگر برابر با مقدار عددی یک باشد این عنصر فازی به یک خازن خالص و اگر صفر باشد به یک مقاومت خالص تبدیل می شود. به همین دلیل با وجود ترک، تخلخل، ناهمواری و سایر عیوب سطحی دیگر در سطح پوشش، رفتار خازن غیر ایده آل به وجود می آید. که به همین منظور در مدار معادل از عنصر فاز ثابت به جای خازن استفاده می شود. همچنین، مطابق با رابطه (۱) برای امیدانس عنصر فاز ثابت، توان  $n$  به مورفولوژی سطح ربط داده می شود که در جدول ۵ به صورت CPE-P گزارش شده است. هرچه مقدار  $n$  به یک نزدیکتر باشد میزان زبری سطح کمتر است و هر چه مقدار آن به ۰/۵ نزدیکتر باشد دلالت بر ناصافی سطح و وجود خلل و فرج در سطح دارد [۲۶].

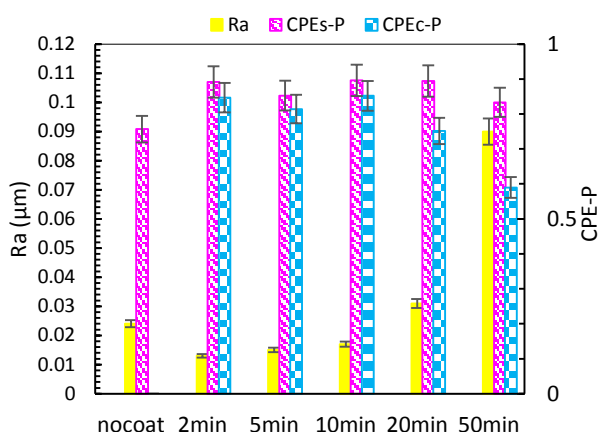
در مدار معادل الکتریکی از عنصر CPEs برای ارزیابی رفتار غیرایده آل ظرفیت خازن لایه دو گانه الکتریکی در مرز مشترک الکترولیت و فلز زیرلایه استفاده شد. مطابق با نتایج جدول ۵ مشاهده می شود که با تشکیل پوشش رودیم بر روی سطح زیرلایه مقدار CPEs-P افزایش یافته است که این موضوع نشان دهنده تاثیر مثبت آبکاری رودیم بر روی زیرلایه اینکونل ۶۰۰ است و پوشش رودیم به عنوان مانعی در برابر نفوذ یون های خورنده الکترولیت به سطح زیرلایه عمل کرده است. از طرفی، مقدار CPEc-P معیار مناسبی برای ارزیابی رفتار پوشش رودیم بر روی سطح زیرلایه است که می تواند در جهت بررسی بهتر مقدار زبری سطح پوشش رودیم نیز باشد. مطابق با جدول ۵ مشاهده می شود مقدار CPEc-P در زمان های آبکاری ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه بیشتر از ۰/۸ است که بیانگر عملکرد بهتر و کاهش مقدار زبری سطح پوشش رودیم است.

جدول ۵. مقادیر حاصل از برازش منحنی های امیدانس الکتروشیمیایی با مدار معادل الکتریکی در محلول الکترولیت ۳/۵% NaCl

پارامترها	زیرلایه	۲min	۵min	۱۰min	۲۰min	۵۰min
$R_s (\Omega.cm^2)$	۷/۱۶	۱۲/۶۲	۱۷/۵۲	۸/۳۶	۹/۱۲	۵/۶۹
$R_{ct} (\Omega.cm^2)$	۱۹۷۵۹۰	۷۴۰۲۲۰	۳۶۵۳۴۰	۴۲۰۰۴۰	۱۷۶۲۶۰	۱۵۲۵۶
CPEs-T (F/cm <sup>2</sup> )	$۴/۶۴ \times 10^{-۵}$	$۳/۴۱ \times 10^{-۵}$	$۳/۱۸ \times 10^{-۵}$	$۳/۴۴ \times 10^{-۵}$	$۲/۶۴ \times 10^{-۵}$	$۴/۶۹ \times 10^{-۵}$
CPEs-P	۰/۷۶	۰/۸۹	۰/۸۵	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۳
W-R ( $\Omega.cm^2$ )	۱۱۷۱۶۰	۱۰۰۱۰	۱۳۰۷۷	۱۰۲۰۹	۸۲۱۴۳	۳۳۰۴۶
W-T (S/s <sup>1/2</sup> )	۳/۸۹	۰/۶۵	۱/۲۴	۰/۶۵	۴/۹۱	۳/۹۶
W-P	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۸۴	۰/۷۸
CPEc-T (F/cm <sup>2</sup> )	-	$۲/۶۸ \times 10^{-۴}$	$۰/۶۳ \times 10^{-۴}$	$۲/۷۱ \times 10^{-۴}$	$۴/۷۶ \times 10^{-۴}$	$۱/۳۷ \times 10^{-۳}$
CPEc-P	-	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۵۹
Rc ( $\Omega.cm^2$ )	-	۳/۰۹	۲۹/۵۷	۷۹/۴	۶۶/۷۵	۱/۵۵

با مقایسه مقادیر حاصل از آزمون زبری سنجی در جدول ۴ و نتایج به دست آمده از برازش مدار معادل الکتریکی از

جدول ۵ مشخص می شود که مقادیر CPE-P با پارامتر Ra آزمون زبری سنجی که رایج ترین پارامتر برای کنترل کیفیت



شکل ۹. مقایسه پارامتر زبری سنجی با نتایج مدار معادل الکتریکی.

شکل ۱۰ منحنی‌های پلاریزاسیون تافلی مربوط به رفتار خوردگی پوشش‌های آبکاری رودیم در زمان‌های مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ دقیقه و زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ را در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید نشان می‌دهد. مطابق با نتایج حاصل و داده‌های به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون تافلی که در جدول ۶ آورده شده است؛ مشاهده می‌شود مقدار پتانسیل خوردگی نمونه‌های پوشش داده شده در زمان‌های مختلف آبکاری، نسبت به زیرلایه بیشتر است که نشان دهنده افزایش مقاومت به خوردگی پوشش رودیم است و در زمان آبکاری ۱۰ دقیقه مقدار پتانسیل خوردگی بیشترین مقدار را دارد که بیانگر بهبود مقاومت به خوردگی این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌های پوشش دار و زیرلایه است. چرا که رودیم عنصر بسیار نجیبی است و سبب افزایش مقدار پتانسیل خوردگی می‌شود.

همچنین، چگالی جریان خوردگی یک پارامتر مهم برای بررسی سینتیک فرایند خوردگی فلزات است و با مقاومت به خوردگی رابطه معکوسی دارد. مطابق با جدول ۶ مشاهده می‌شود که در نمونه‌هایی با پوشش رودیم مقدار جریان خوردگی نسبت به زیرلایه کاهش یافته است که این موضوع بیانگر اثر مثبت پوشش‌های رودیم در جهت بهبود فرایند مقاومت به خوردگی زیرلایه است و پوشش رودیم با زمان

سطح به شمار می‌آید مطابقت بالایی دارد. برای درک بهتر این تطابق در نمودار شکل ۹ نتایج زبری سنجی با CPE-P رسم شده است. همانطور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود مقدار زبری Ra با ایجاد پوششی از عنصر رودیم در زمان‌های آبکاری ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه کاهش یافته است ولی در زمان‌های آبکاری ۲۰ و ۵۰ دقیقه مقدار زبری بالایی را نشان می‌دهد که دلالت بر ناصافی سطح پوشش دارد. از طرفی، مطابق با شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقدار CPE-P، که به عنوان معیاری برای ارزیابی سطح زیرلایه است، با ایجاد پوششی از رودیم مقادیر CPE-P بیشتر شده و به مقدار عددی ۱ نزدیک‌تر شده است که بیانگر عملکرد بهتر پوشش رودیم در برابر نفوذ یون‌های خورنده به سطح زیرلایه و کاهش مقدار زبری سطح است. اما به منظور بررسی بهتر و دقیق‌تر، در نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقدار CPE-P، به عنوان معیاری برای بررسی پوشش رودیم، در زمان‌های آبکاری ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه به مقدار عددی ۱ نزدیک‌تر است که بیانگر کاهش زبری سطح پوشش است و نشان دهنده تطابق آزمون زبری سنجی با نتایج برازش مدار معادل الکتریکی در آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی است. همچنین، مطابق با شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقدار CPE-P برای نمونه آبکاری شده در زمان ۵۰ دقیقه بسیار نزدیک به مقدار ۰/۵ بوده که نشان دهنده افزایش زبری و ناصافی سطح پوشش است.

زبر شدن پوشش با توجه به مقادیر CPE-P سبب افزایش سطح ویژه پوشش می‌شود و افزایش مساحت با توجه به رابطه  $R = \rho L/A$  کاهش مقاومت را در پی دارد. بنابراین، سطح ویژه بالاتر می‌تواند مکان‌های بیشتری را برای خوردگی فراهم کند و یون‌های خورنده محلول الکترولیت از جمله کلر، با نفوذ به سطح زیرلایه از طریق خلل و فرج پوشش منجر به خوردگی می‌شوند.

خوردگی الکتروشیمیایی پوشش پرداخته شد که با بررسی تاثیر زمان آبکاری رودیم در حمام سولفاتی نتایج زیر حاصل شد:

با افزایش زمان آبکاری تا ۱۰ دقیقه پوشش یکنواخت و متراکمی با ضخامت ۱/۲۷ میکرومتر تشکیل شد و روی سطح پوشش عیوبی مانند تخلخل، حفره و ذراتی به شکل گرد و کروی از عنصر رودیم دیده نشد.

با افزایش زمان پوشش‌دهی رودیم تا ۱۰ دقیقه، مقدار پارامترهای مختلف زبری سطح پوشش در مقایسه با زبری زیرلایه کاهش یافت که نشان دهنده بهبود کیفیت سطح بوده است.

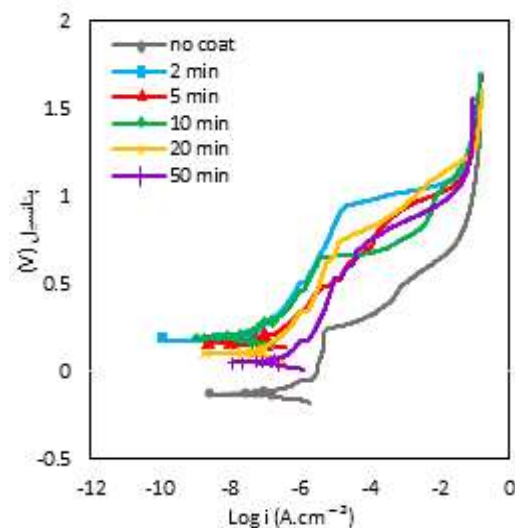
مطالعات خوردگی الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون تافلی نشان دادند که نمونه آبکاری شده در زمان ۱۰ دقیقه بیشترین مقاومت به خوردگی را دارد که مقدار جریان خوردگی ۶/۲۵ نانو آمپر بر سانتی متر مربع و مقدار پتانسیل خوردگی ۱۹۳ میلی ولت تعیین شد.

پوشش آبکاری شده در زمان ۵۰ دقیقه دارای ذرات رودیم گرد و کروی بود و تخلخل‌ها و حفراتی بر روی سطح پوشش ایجاد شد؛ که ناهمواری‌ها و تخلخل‌های سطح منجر به افزایش پارامترهای زبری و کاهش مقاومت به خوردگی شد.

### منابع

1. A. M. Weisberg, *Rhodium plating*, Metal Finishing, 1(2002) 278-282.
2. v. ghayour, Sh. Khameneh asl, *A Review on Rhodium Electrodeposition from Different Electrolytes*, Journal of Studies in Color Word, 12(2022) 253-262.
3. P. Parsons, G. Dixon, *The Periodic Table: A Visual Guide to the Elements*, Quercus Publishing Inc, New York, (2014).

آبکاری ۱۰ دقیقه کمترین چگالی جریان خوردگی را دارد که ذرات رودیم در سطح پوشش با ایجاد لایه محافظ، از تشکیل و گسترش حفرات ناشی از خوردگی جلوگیری می‌کند و سبب بهبود مقاومت به خوردگی فلز زیرلایه می‌شود.



شکل ۱۰. منحنی‌های حاصل از آزمون پلاریزاسیون تافلی در محلول ۳/۵٪ NaCl

جدول ۶. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون تافلی در محلول ۳/۵٪ NaCl

زمان آبکاری	$i_{corr}$ (nA/cm <sup>2</sup> )	$E_{corr}$ (mV vs SCE)	$\beta_a$ (mV/dec)	$\beta_c$ (mV/dec)	$C_R$ (mpy)
زیرلایه	۶۰/۲	-۱۹۱	۳۵/۲	۲۸/۹	۲۱۵/۶۳
۲min	۹/۰۶	۱۷۶	۴۷	۲۴	۹۰/۳۶
۵min	۱۴/۹	۱۶۶	۳۴/۹	۱۴/۱	۱۳۵/۵۴
۱۰min	۶/۲۵	۱۹۳	۴۲/۵	۳۰/۵	۷۶/۳۸
۲۰min	۲۵/۹	۱۰۶	۲۷/۱	۲۶/۲	۱۳۸/۷۷
۵۰min	۷۷/۶	۵۳/۱	۳۹/۸	۳۰/۵	۲۰۳/۳۲

### نتیجه گیری

در این پژوهش پس از اعمال پوشش رودیم بر روی زیرلایه سوپرآلیاژ اینکونل ۶۰۰ به بررسی مورفولوژی، زبری و

17. N. Eliaz, E. Gileadi, *Physical Electrochemistry: Fundamental, Techniques and Application 2 Edition*, John Wiley & Sons, US, (2019).
18. C. Y. Bai, Y. J. Luo, C. H. Koo, *Improvement of High Temperature Oxidation and Corrosion Resistance of Superalloy IN-738LC by Pack Cementation*, Surface and Coatings Technology, 138(2004) 74-88.
19. B. A. Nagaraj, W. B. Connor, R. W. Jendrix, D. J. Wortman, L. W. Plemmons, *Platinum, Rhodium, or Palladium Protective Coatings in Thermal Barrier Systems*, US Patent, 5(1995) 427-866.
20. H. M. Tawancy, A. Hamid, N. M. Abbas, M. O. Aboelfotoh, *Effect of Platinum on the Oxide-to-Metal Adhesion in Thermal Barrier Coating Systems*, Journal of Materials Science, 43(2008) 2978-2989.
21. H. M. Tawancy, L. M. Hadhrami, *Role of Platinum in Thermal Barrier Coatings Used in Gas Turbine Blade Applications*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 132(2010) 1-6.
22. E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, H. Soliman, *Roughness Parameters*, Journal of Materials Processing Technology, 123(2002) 133-145.
23. B. K. Devendra, B. M. Praveen, V. S. Tripathi, G. Nagaraju, D. H. Nagaraju, K. O. Nayana, *Highly Corrosion Resistant Platinum-Rhodium Alloy Coating and its Photocatalytic Activity*, Inorganic Chemistry Communications, 134(2021) 1-9.
24. G. Taylor, R. Paladines, A. Marti, D. Jacobs, S. Tint, A. Fones, H. Hamiiton, L. Yu, Sh. Amini, J. Hettinger, *Electrochemical Enhancement of Reactively Sputtered Rhodium, Ruthenium, and Iridium Oxide Thin Films for Neural Modulation, Sensing, and Recording Applications*, Electrochimica Acta, 394(2021), 1-14.
۲۵. نوری محسن، جعفرزاده کوروش، کاشی ابوالفضل، شیرافکن غلامحسین، بررسی اثر دما و زمان آبهکاری الکتریکی بر رفتار خوردگی آندهای Pt/Nb در محیطهای کلر-قلیا با استفاده از روش امیدانوس الکتروشیمیایی، دومین همایش بین المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته‌گری، دانشگاه سمنان، (۱۳۹۲).
26. H. Hernandez, A. M. Reynoso, J. C. Gonzalez, C. O. Moran, J. G. Hernandez, A. M. Ruiz, J. M. Hernandez, R. O. Cruz, *Electrochemical Impedance of the Corrosion Mechanism Applied to Steels*, Electrochemical Impedance Spectroscopy, (2020) 137-144.
4. G. F. Nordberg, B. A. Fowler, M. Nordberg, *Handbook on the Toxicology of Metals*, Elsevier Science Academic Press, USA, 2 (2015).
5. S. B. Lyon, *Corrosion of Noble Metals*, Shreir's Corrosion, 3 (2010) 2205-2223.
6. S. Cherev, *Electrochemical dissolution of Noble Metals Native Oxide*, Journal of Electroanalytical chemistry, 787(2017) 11-13.
7. M. Pushpavanam, V. Raman, B. A. Sheno, *Rhodium-Electrodeposition and applications*, Surface Technology, 12(1981) 351-360.
8. W. Wu, J. Liu, Y. Zhang, X. Wang, Y. i. Zhang, *The Influence of Current Density and Bath Temperature on Electrodeposition of Rhodium Film From Sulfate-Phosphate Aqueous Solution*, Journal of Applied Electrochemistry, 49(2019) 1043-1054.
9. B. K. Devendra, B. M. Praveen, V. S. Tripathi, G. Nagaraju, B. M. Prasanna, M. Shashank, *Development of Rhodium coatings by electrodeposition for photocatalytic dye degradation*, Vacuum, 205(2022) 1-7.
10. G. F. Nordberg, B. A. Fowler, M. Nordberg, *Handbook on the Toxicology of Metals*, Elsevier Science Academic Press, USA, 2(2015).
11. B. K. Devendra, B. M. Praveen, V. S. Tripathi, D. H. Nagaraju, K. O. Nayana, *Pt-Rh Alloy Catalysts for Hydrogen Generation Developed by Direct Current/Pulsed Current Method*, Journal of the Iranian Chemical Society, (2022) 1-10.
12. E. P. Shtapenko, V. A. Zabludovsky, V.V. Tytarenko, R. P. Garnich, *Pulse current electric rhodium plating*, Eugen G. Leuze Verlag, (2021) 173-179.
13. T. Jackson, *The Periodic Table Book: Visual Encyclopedia of the Elements*, Dorling Kindersley, London, 81(2017).
14. J. J. Mcewan, M. Scott, F. E. Goodwin, *Coatings to Improve the Tarnish Resistance of Sterling Silver*, 16th ICC, Beijing, (2005).
15. N. Kanani, *Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice*, Elsevier, Berlin, Germany, (2004).
16. B. K. Devendra, B. M. Praveen, V. S. Tripathi, D. H. Nagaraju, M. Padaki, H. P. Nagaswarupa, R. H. Krishna, *Advanced strategies for hydrogen generation by Rhodium metal catalysts coated by the electrodeposition method*, Applied Surface Science Advances, 12(2022) 1-6.