

## رفتار خوردگی و میکروساختار پوشش سرامیکی ایجاد شده به روش

## میکروفس الکتریکی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

مجتبی وکیلی ازغندی، آرش فتاح الحسینی

گروه مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا

Mojtaba.vakili6@gmail.com

## چکیده:

در این مقاله تاثیر غلظت‌های مختلف هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم در الکترولیت پوشش‌دهی میکروفس الکتریکی بر ریزساختار و رفتار خوردگی پوشش سرامیکی ایجاد شده روی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بررسی شده است. رفتار خوردگی پوشش ایجاد شده در محلول نمک کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی توسط تکنیک پلاریزاسیون بررسی شده و با استفاده از پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس به ترتیب نوع ترکیبات سرامیکی تشکیل شده، ریزساختار و آنالیز شیمیایی پوشش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پلاریزاسیون نشان دادند که افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم در الکترولیت پوشش‌دهی باعث بهبود رفتار خوردگی پوشش سرامیکی ایجاد شده می‌گردد. تصاویر پراش اشعه ایکس حاکی از تشکیل ترکیبات سرامیکی اکسیدی و گاه بین فلزی روی سطح بوده و نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس نشان می‌دهند که افزایش هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم، با کم کردن پتانسیل شکست دی الکتریک و در نتیجه ریزتر شدن و کوچک شدن حفرات و ریزترک‌های سطحی و همچنین با جذب بیشتر سیلیسیم در پوشش باعث بهبود کیفیت پوشش سطح شده‌اند.

## اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۴ شهریور ۱۳۹۴

پذیرش: ۱ بهمن ۱۳۹۴

## کلید واژه:

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، پوشش‌های سرامیکی، ریزساختار پوشش، خوردگی الکتروشیمیایی

## ۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم که آن را در محیط‌ها و بخش‌های خورنده مورد توجه قرار داده است تشکیل لایه روئین مقاوم در برابر خوردگی آن در محیط‌های مختلف است [۱-۳]. روش‌های متعددی جهت بهبود خواص لایه تشکیل شده روی آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است به طوری که در ابتدا با بهره‌گیری از محیط‌های پسیو کننده متفاوت، خواص و در نتیجه رفتار خوردگی این لایه محافظ را بهبود داده‌اند. با

آلیاژهای آلومینیوم به علت داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی همچون سبک بودن، استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی خوب مورد توجه ویژه صنعت در بخش‌هایی همچون هوافضا، صنایع دریایی، خودرو سازی و غیره قرار گرفته‌اند. از جمله ویژگی‌های مطرح در مورد



ایجاد شده روی سطح است، به طوری که در این خصوص محیط‌های مختلفی با قابلیت‌های مختلف اکسید کنندگی با پتانسیل شکست دی‌الکتریک مختلف تحقیق و بررسی شده‌اند. در این میان محیط‌های قلیایی با pH بین ۷ تا ۱۲ بهترین کارایی را داشته‌اند و جهت بهبود رفتار جرقه‌زنی و همچنین بهبود ساختار و خواص نهایی پوشش سرامیکی از افزودنی‌هایی مانند سیلیکات‌ها، آلومینات و فسفات‌ها بهره گرفته شده است [۵-۱۴].

در این تحقیق با ایجاد پوشش‌هایی در غلظت‌های مختلف هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم در محلول قلیایی سیلیکاتی فرایند پوشش‌دهی اکسیدی میکرووقوس الکتریکی و بررسی رفتار الکتروشیمیایی، مورفولوژی و ریزساختار آن‌ها، میزان و چگونگی تاثیر غلظت این مواد بر خواص نهایی پوشش بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

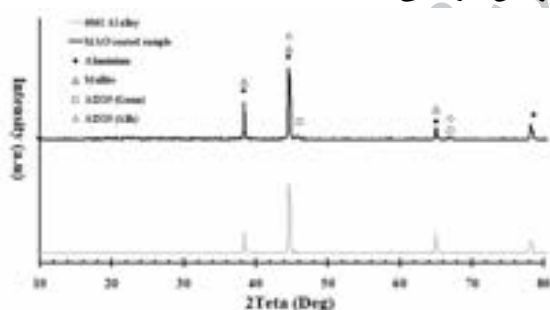
نمونه‌های مورد استفاده جهت پوشش‌دهی میکرووقوس الکتریکی از ورق‌های نوردی و آنیل شده آلیاژ آلومینوم ۶۰۶۱ با آنالیز منیزیم ۰/۹، سیلیسیم ۰/۷، آهن ۰/۳۵، مس ۰/۲۳، کروم ۰/۱۹ درصد با ابعاد  $7 \times 20 \times 20$  mm ساخته شدند. ابتدا این نمونه‌ها تا سمباد شماره ۱۲۰۰ پرداخت شده و آن را به قطب آند و ظرف حمام پوشش‌دهی از جنس فولاد زنگ نزن به قطب کاتد دستگاه اعمال پتانسیل متصل می‌شود. حال با تهیه محلول‌های پوشش‌دهی با غلظت‌های ۲ و ۴ گرم بر لیتر هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم و ریختن آن در ظرف حمام پوشش‌دهی نمونه‌ها آماده اعمال فرایند پوشش‌دهی هستند. در این فرایند از جریان ثابت  $10 \text{ A/dm}^2$  با سیکل اعمالی

توسعه تحقیقات در این زمینه فرایند آندایزینگ آلیاژهای آلومینوم جهت تشکیل لایه نازکی از اکسید آلومینوم روی سطح ابداع شد که مقاومت به خوردگی را به طور قابل توجهی بهبود بخشید. در ادامه روند تحقیقاتی در سال ۱۹۹۱ روشی با نام اکسیداسیون پلاسمای الکترولیتی (Plasma Electrolyte Oxidation) و یا معادل آن اکسیداسیون میکرووقوس الکتریکی (Micro Arc Oxidation) برای پوشش‌دهی آلیاژهای سبک مانند آلیاژهای آلومینوم، تیتانیوم و منیزیم ابداع شد که با اعمال پتانسیلی بالاتر از پتانسیل شکست دی‌الکتریک محلول اکسید کننده بین کاتد و قطعه کار، جرقه‌های کوچکی روی سطح قطعه کار که نقش آند را دارد ایجاد شده که این جرقه‌ها علاوه بر تشدید فرایند اکسیداسیون سطحی، به علت دمای بالا باعث ذوب سطحی لایه های سرامیک اکسیدی روی همدیگر شده و در نتیجه لایه سرامیکی ضخیم، سخت و با چسبندگی مناسب به زیرلایه و البته با ساختاری متخلخل به‌علت آزاد شدن اکسیژن ایجاد می‌کند [۴-۹].

محلول مورد استفاده به‌عنوان حمام پوشش‌دهی در این تکنیک تاثیر بسیار مهمی بر خواص و رفتار نهایی پوشش ایجاد شده دارد. محلول مورد استفاده در این تکنیک ضمن ایجاد شرایط اکسید کنندگی باید دارای پتانسیل شکست دی‌الکتریک قابل دسترسی و مناسب باشد. از طرفی محلول مورد استفاده می‌تواند با فراهم آوردن یون‌ها و یا ذرات مفید و جذب آنها در لایه‌های ایجاد شده به ایجاد ترکیبات اکسیدی و بین فلزی متفاوت در سطح کمک کرده و به کیفیت پوشش کمک نماید. خواص لایه سرامیکی ایجاد شده روی سطح تابعی از کیفیت مناسب ایجاد جرقه‌های



تشکیل ترکیبات سرامیکی اکسیدی مانند  $\alpha$ - $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  و مولایت ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$ ) طی فرایند پوشش دهی به روش میکرو قوس الکتریکی است. فاز مولایت از اکسیداسیون سطح آلومینیوم و جذب همزمان یون  $\text{SiO}_3^{2-}$  موجود در الکترولیت حاصل می شود. فاز  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  شبه پایدار بوده که در محدوده دمایی  $800$ – $1200$  °C به فاز پایدار  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  تبدیل می شود. از طرفی  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  در مراحل اولیه پوشش دهی و قبل از ایجاد جرقه های سطحی ایجاد می شود و هم چنین با سرد شدن سریع اکسید آلومینیوم ذوب شده روی سطح در تماس با الکترولیت خنک شرایط برای تشکیل فاز  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  فراهم می شود. علاوه بر مشاهده پیک های این ترکیبات پیک های مربوط به آلومینیوم نیز ظاهر شده است که این امر ناشی از نفوذ اشعه ایکس به زیرلایه آلیاژ آلومینیوم  $6061$  به علت نازک بودن پوشش سرامیکی است [۱۴، ۱۵].



شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس زیرلایه و پوشش ایجاد شده به روش میکرو قوس الکتریکی روی آلیاژ آلومینیوم  $6061$

جهت مشخصه یابی پوشش ایجاد شده روی زیرلایه از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است و تصویر زیرلایه آلیاژ آلومینیوم  $6061$  پرداخت شده در شکل ۲ آورده شده است.

تک قطبی مثبت مربعی با زمان اعمال و وقفه به ترتیب  $0.2$  ms و  $0.8$  ms در دمای  $30$  درجه سانتیگراد و به مدت  $30$  دقیقه توسط دستگاه اعمال پتانسیل PM700/7 PRC (IPS) جهت پوشش دهی استفاده شد.

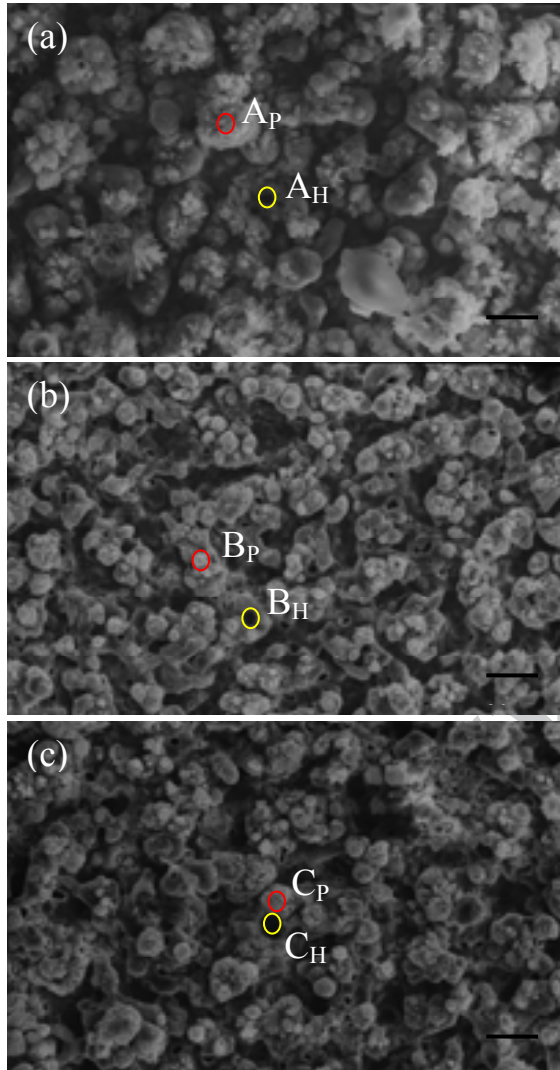
جهت بررسی رفتار خوردگی پوشش های ایجاد شده و مقایسه آن ها با نمونه بدون پوشش از تکنیک های الکتروشیمیایی پتانسیل مدار باز و پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک در محلول نمک کلرید سدیم  $3/5\%$  بهره برده شده است. در این تست ها که از دستگاه پتانسیو استات میکرو اتولب و از روش سل سه الکتروده استفاده شد، میله پلاتینی به عنوان الکترود کمکی، سیم نقره/کلرید نقره در محلول اشباع شده کلرید نقره و نمونه های مورد آزمایش بعنوان الکترود کاری به کار برده شدند. نمونه های پوشش داده شده و بدون پوشش به مدت نیم ساعت بدون اعمال پتانسیل جهت ثبت و پایداری پتانسیل مدار باز در محلول نمک کلرید سدیم  $3/5\%$  قرار گرفته و سپس با اعمال پتانسیل  $-250$  میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز تا  $4$  ولت با نرخ روبش  $2$  میلی ولت بر ثانیه مورد بررسی تست پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک قرار گرفتند. جهت بررسی ریزساختار و آنالیز نقطه ای سطح پوشش های ایجاد شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی JEOL JSM-840A استفاده شده است. برای تعیین فازها و ترکیبات تشکیل شده در سطح طی فرایند پوشش دهی از تکنیک پراش اشعه ایکس توسط پراش دهنده APD2000 در زاویه پراش  $10$  تا  $80$  درجه استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

آنالیز پراش اشعه ایکس نشان داده شده در شکل ۱ حاکی از



هیدروکسید پتاسیم و بویژه سیلیکات سدیم از تعیین آنالیز نقطه‌ای پوشش در حفره‌ها و برجستگی‌های ایجاد شده سطحی بهره گرفته شده است.



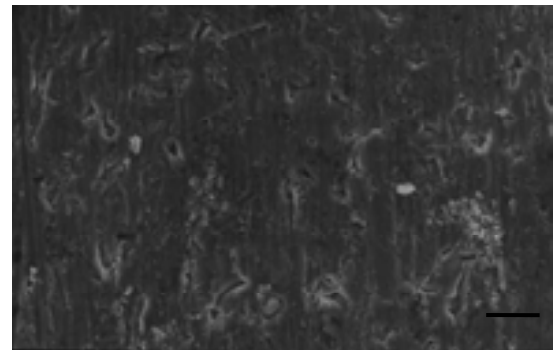
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های پوشش داده

شده در حمام‌های (a)  $\text{KOH} (2\text{gr/L}) + \text{Na}_2\text{SiO}_3 (2\text{gr/L})$

$\text{KOH} (4\text{gr/L}) + \text{Na}_2\text{SiO}_3 (2\text{gr/L})$  (b)

$\text{KOH} (2\text{gr/L}) + \text{Na}_2\text{SiO}_3 (4\text{gr/L})$  (c)

همانطور که در تصاویر نمودارهای طیف نگاری پراش انرژی اشعه ایکس ارائه شده در شکل ۴ آمده است می‌توان نتیجه

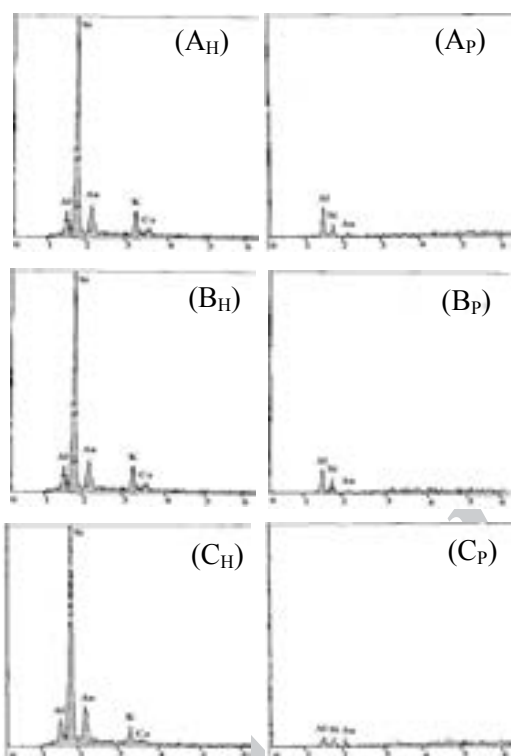


شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از زیر لایه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

این تصویر سطحی یکنواخت با خطوط و حفرات ناشی از فرایند پرداخت سطحی را نشان می‌دهد. از طرفی تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های پوشش داده شده در حمام‌های مختلف در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که مشخص است همه نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه بدون پوشش دارای سطح غیر یکنواخت و متخلخل هستند که این امر نشان دهنده ایجاد پوشش اکسیدی با سطح بیرونی متخلخل روی زیر لایه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ است. با مقایسه تصاویر گرفته شده از سطوح پوششی ایجاد شده در محیط‌های مختلف می‌توان گفت که افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم باعث افزایش فشردگی، یکنواختی سطح و همچنین کاهش ریز حفره‌های سطحی شده است که این را می‌توان ناشی از افزایش رسانندگی الکتریکی، کاهش پتانسیل شکست دی الکتریک محلول پوشش‌دهی و در نتیجه ریزتر شدن و فشردتر شدن جرقه‌های ایجاد شده روی سطح با افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم دانست. از طرفی با افزایش غلظت سیلیکات سدیم پوشش ایجاد شده بطور ظاهری در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تغییر چندانی پیدا نکرده است که جهت بررسی بهتر اثر



همچنین افزایش غلظت سیلیسیم در اطراف جرقه‌ها است. یکی دیگر از نکات ملموس در نمودارهای طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس جذب یون‌های مثبت موجود در محیط مانند  $\text{Ca}^+$  و  $\text{K}^+$  در برجستگی‌های پوشش سطحی است و این در حالی است که سیلیسیم که در محیط بصورت  $\text{SiO}_3^-$  می‌تواند بخاطر نیروی الکترونی خود به محل کانال‌های جرقه‌های سطحی نیز نفوذ کند.



شکل ۴- نمودارهای طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس از برجستگی‌ها و حفرات نمونه‌های پوشش داده شده برابر تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل ۳.

نمودار پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده جهت بررسی رفتار خوردگی در محلول نمک کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است هر دو شاخه آندی

گرفت که در همه نمونه‌های پوشش داده شده آلومینیوم و سیلیسیم تشکیل دهنده‌های اصلی پوشش سرامیکی سطح در حفرات و برجستگی‌ها هستند. از طرفی کسر غلظتی آلومینیوم در حفرات و سیلیسیم در برجستگی‌ها بیشتر است که این خود حاکی از خروج آلومینیوم در محل ایجاد جرقه‌های سطحی و جذب سیلیسیم محیط در پوشش است. حال از تغییر پیک‌های مربوط به آلومینیوم و سیلیسیم در حفره‌های سطحی سه نمونه پوشش داده شده می‌توان استنباط کرد که با افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم تغییر چندان در کسر غلظتی آلومینیوم و سیلیسیم ایجاد نمی‌شود و میزان سیلیسیم کمتر از آلومینیوم است ولی با افزایش غلظت سیلیکات سدیم کسر غلظتی سیلیسیم و آلومینیوم مشابه هم شده‌اند که نشان دهنده جذب بیشتر سیلیسیم با افزایش غلظت سیلیکات سدیم است. با مقایسه پیک‌های مربوط به برجستگی‌های سطحی نمونه‌های پوشش داده شده می‌توان گفت که با افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم به علت توزیع پراکنده تر و ریز تر شدن جرقه‌های پوشش‌دهی احتمال جذب سیلیسیم در پوشش افزایش می‌یابد و لذا کسر غلظتی آلومینیوم در این نقاط کاهش یافته است و از طرفی این میزان جذب بالای سیلیسیم در پوشش با افزایش غلظت سیلیکات سدیم در محلول پوشش‌دهی نیز مشاهده می‌شود [۱۶، ۱۷].

بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که پوشش‌دهی در محلول نهایی حاوی حداکثر مقدار هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم، پوششی با ریزترین حفرات، یکنواخت‌ترین سطح و بیشترین مقدار جذب سیلیسیم در حفرات و برجستگی‌ها را داریم که ناشی از ریزتر شدن جرقه‌ها و





جدول ۱- پارامترهای پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک

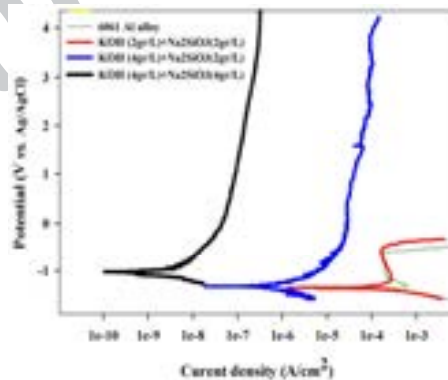
نمونه‌های پوشش داده شده در غلظت‌های مختلف

هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم

غلظت‌های محلول پوشش دهی	$E_{corr}$ (V <sub>Ag/AgCl</sub> )	$i_{corr}$ ( $\mu A cm^{-2}$ )	$i_{ox}$ ( $\mu A cm^{-2}$ )
آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱	-۱/۴۱۲	۴۲۶	۲۱۰
KOH(2gr/L)+ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (2gr/L)	-۱/۳۶۲	۱۱۲	۲۲۰
KOH(4gr/L)+ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (2gr/L)	-۱/۳۲۰	۰/۴۹۸	۱۶/۳
KOH(4gr/L)+ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (4gr/L)	-۱/۰۵۶	۰/۰۰۲	۰/۰۱۶

همانطور که از اطلاعات ارائه شده در این جدول استنباط می‌شود دانسیته جریان خوردگی نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه بدون پوشش کاهش یافته است. با افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم از ۲ gr/L به ۴ gr/L دانسیته جریان خوردگی کاهش محسوسی را پیدا کرده است که ناشی از ایجاد پوششی با ریزساختار فشرده تر با ریزترک‌ها و حفرات کمتر و ریزتر در فرایند پوشش دهی است که این خود ناشی از افزایش رسانندگی الکتریکی محلول پوشش دهی و در نتیجه کاهش پتانسیل شکست دی الکتریک محلول بوده که سبب ایجاد جرقه‌هایی با شدت کمتر ولی با دانسیته توزیع بیشتر است. لازم بذکر است که هرچه شدت جرقه‌ها کمتر باشد میزان عمق نفوذ جرقه‌ها کمتر و میزان و سرعت خروج اکسیژن آزاد شده طی فرایند اکسیداسیون، ذوب و انجماد آن کاهش یافته که در نتیجه باعث ایجاد حفرات ریزتری می‌شود [۲۱، ۲۰، ۱۵]. نکته دیگر قابل توجه در جدول ۱ کاهش دانسیته جریان خوردگی و افزایش قابل توجه پتانسیل خوردگی نمونه پوشش داده شده در محلول هیدروکسید پتاسیم ۴ gr/L و سیلیکات سدیم ۴ gr/L نسبت به نمونه بدون پوشش و

وکاتدی در نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به زیر لایه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به مقادیر دانسیته جریان کمتر منتقل شده‌اند که این امر حاکی از ایجاد پوشش سرامیکی روی زیر لایه است. از طرفی میزان تغییر در دانسیته جریان‌های کاتدی و آندی در نمونه پوشش داده شده در محلول با میزان ۲ gr/L هیدروکسید پتاسیم و ۲ gr/L سیلیکات سدیم نسبت به نمونه بدون پوشش بسیار اندک بوده که این تغییر نا محسوس بعلت ایجاد لایه اکسیدی به شدت متخلخل، نازک و با پایداری اندک است. ولی دیگر پوشش‌های ایجاد شده بعلت ایجاد لایه اکسیدی ضخیم، فشرده تر و با پایداری بیشتر، جریان آندی و کاتدی پایین تری را نسبت به نمونه بدون پوشش نشان می‌دهند [۱۹، ۱۸].



شکل ۵- نمودار پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده در غلظت‌های مختلف هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم

اطلاعات مربوط به سینتیک خوردگی شامل ( $i_{ox}$ ) دانسیته جریان خوردگی با امتداد شاخه آندی در ناحیه جریان خطی، لایه اکسید سطحی ( $i_{corr}$ ) دانسیته جریان خوردگی و ( $E_{corr}$ ) پتانسیل خوردگی که با امتداد شاخه‌های آندی و کاتدی در محدوده تحت کنترل اکتیواسیون بدست می‌آیند در جدول ۱ ارائه شده است.



سیلیکات سدیم میزان جذب سیلیسیم در پوشش

سرامیکی در حین تشکیل افزایش می‌یابد.

- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نمودارهای

طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس از برجستگی‌های

سطح پوشش نشان دادند که با افزایش غلظت

هیدروکسید پتاسیم جرقه‌های سطحی ریزتر و پراکنده تر

شده و به همین دلیل میزان جذب سیلیسیم در پوشش

سرامیکی در حین تشکیل افزایش می‌یابد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه بوعلی سینا همدان به جهت فراهم

سازی امکانات در حین انجام پروژه قدردانی می‌کنند.

### مراجع

- [1] V. Dehnavi, B. Li, D.W. Shoesmith, X. Yang, S. Rohani, Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior, *Surf. Coat. Technol.* Vol 226, pp 100–107, (2013).
- [2] C. Vargel, *Corrosion of aluminium*, Elsevier Ltd, Amsterdam, (2004).
- [3] W. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, et al., Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, *Mater. Sci. Eng. A.* Vol 280, pp 37–49, (2000).
- [4] L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S. J. Dowey, Plasma electrolysis for surface engineering, *Surf. Coatings Technol.* Vol 122, pp 73–93, (1999).
- [5] Y. M. Wang, H. Tian, X. E. Shen, L. Wen, J. H. Ouyang, Y. Zhou, et al., An elevated temperature infrared emissivity ceramic coating formed on 2024 aluminium alloy by microarc oxidation, *Ceram. Int.* Vol 39, pp 2869–2875, (2013).
- [6] H. Dong, *Surface engineering of light*

حتی دیگر نمونه‌های پوشش داده شده است. همانطور که در

بخش مربوط به مشخصه‌یابی با میکروسکوپ الکترونی

روشی آمده است افزایش در غلظت سیلیکات سدیم در حمام

پوشش دهی تغییر چندانی در اندازه و میزان حفرات و ریزترک

پوشش ایجاد نمی‌کند و با توجه به تغییر پتانسیل پوشش به

مقادیر مثبت‌تر و نتایج طیف نگاری پراش اشعه ایکس

می‌توان استنباط کرد که افزایش غلظت سیلیکات سدیم باعث

افزایش جذب سدیم در پوشش سرامیکی ایجاد شده می‌گردد

که این امر خود علاوه بر فشرده تر شدن لایه‌های سرامیکی

ایجاد شده باعث تغییر پتانسیل سطح به مقادیر مثبت‌تر در

محللول خورنده است، که در نتیجه سینتیک واکنش‌های آندی

و کاتدی روی این پوشش کاهش یافته و دانسیته جریان

خوردگی را نیز به مقادیر کمتر کاهش داده است [۱۷،۲۲].

### ۴- نتیجه گیری

- تغییر در شیمی محللول پوشش‌دهی به روش میکرو

قوس الکتریکی تاثیر مستقیمی بر مکانیزم، فرایند،

ریزساختار و خواص نهایی پوشش ایجاد شده دارد.

- با توجه به نتایج پلاریزاسیون، افزایش غلظت

هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم در محللول

پوشش‌دهی باعث بهبود رفتار خوردگی پوشش ایجاد

شده روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ می‌شود.

- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش‌های ایجاد شده

نشان دادند که با افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم

ریزترک‌ها و حفرات سطحی پوشش سرامیکی کاهش و

یکنواختی سطح افزایش می‌یابد.

- نمودارهای طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس از

حفره‌های سطح پوشش نشان دادند که با افزایش



- Influence of K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> in electrolyte on characteristics of the microarc oxidation coating on aluminum alloy, *Curr. Appl. Phys.*, Vol 12, pp 1259–1265, (2012).
- [16] V. Dehnavi, B. L. Luan, D. W. Shoesmith, X. Y. Liu, S. Rohani, Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior, *Surf. Coatings Technol.*, Vol 226, pp 100–107, (2013).
- [17] A. Voevodin, a. L. Yerokhin, V. V. Lyubimov, M. S. Donley, J. S. Zabinski, Characterization of wear protective Al-Si-O coatings formed on Al-based alloys by micro-arc discharge treatment, *Surf. Coatings Technol.*, Vol 86-87, pp 516–521, (1996).
- [18] L. Weiping, Z. Liqun, L. Yihong, Electrochemical oxidation characteristic of AZ91D magnesium alloy under the action of silica sol, *Surf. Coatings Technol.*, Vol 201, pp 1085–1092, (2006).
- [19] J. Liang, B. Guo, J. Tian, H. Liu, J. Zhou, W. Liu, et al., Effects of NaAlO<sub>2</sub> on structure and corrosion resistance of microarc oxidation coatings formed on AM60B magnesium alloy in phosphate-KOH electrolyte, *Surf. Coatings Technol.*, Vol 199 pp 121–126, (2005).
- [20] Y. J. Liu, J. Y. Xu, W. Lin, C. Gao, J. C. Zhang, X. H. Chen, Effect of different electrolyte systems on the formation of micro-arc oxidation ceramic coatings of 6061 aluminium alloy, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, Vol 33, pp 126–130, (2013).
- [21] Z. Wang, L. Wu, W. Cai, Shan A, Z. Jiang, Effects of fluoride on the structure and properties of microarc oxidation coating on aluminium alloy, *J. Alloys Compd.*, Vol 505, pp 188–193, (2010).
- [22] M. Shokouhfar, C. Dehghanian, M. Montazeri, A. Baradaran, Preparation of ceramic coating on Ti substrate by plasma electrolytic oxidation in different electrolytes and evaluation of its corrosion resistance: Part II, *Appl. Surf. Sci.*, Vol 258, pp 2416–2423, (2012).
- alloys, Woodhead Publishing Limited, Oxford, (2010).
- [7] M. M. S. Al, K. Ma, H. Chien, The effect of MAO processing time on surface properties and low temperature infrared emissivity of ceramic coating on aluminium 6061 alloy, *Infrared Phys. Technol.*, Vol 60, pp 323–334, (2013).
- [8] K. Wang, B. H. Koo, C. G. Lee, Y. J. Kim, S. Lee, E. Byon, Effects of Hybrid Voltages on Oxide Formation on 6061 Al-alloys During Plasma Electrolytic Oxidation, *Chinese J. Aeronaut.*, Vol 22 pp 564–568, (2009).
- [9] V. Raj, M. Mubarak Ali, Formation of ceramic alumina nanocomposite coatings on aluminium for enhanced corrosion resistance, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol 209, pp 5341–5352, (2009).
- [10] P. Gupta, G. Tenhundfeld, E. O. Daigle, D. Ryabkov, Electrolytic plasma technology: Science and engineering-An overview, *Surf. Coatings Technol.*, Vol 201, pp 8746–8760, (2007).
- [11] A. G. Rakoch, A. A. Gladkova, Z. Linn, D. M. Strelalina, The evidence of cathodic micro-discharges during plasma electrolytic oxidation of light metallic alloys and micro-discharge intensity depending on pH of the electrolyte, *Surf. Coat. Technol.*, Vol 269, pp 138–144, (2015).
- [12] S. Stojadinovic, N. M. Sić, N. Konjevic, Spectroscopic study of plasma during electrolytic oxidation of magnesium- and aluminium-alloy, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, Vol 113, pp 1928–1937, (2012).
- [13] C. S. Dunleavy, I. O. Golosnoy, J. a. Curran, T. W. Clyne, Characterisation of discharge events during plasma electrolytic oxidation, *Surf. Coatings Technol.*, Vol 203, pp 3410–3419, (2009).
- [14] R. O. Hussein, X. Nie, D. O. Northwood, An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing, *Electrochim. Acta*, Vol 112, pp 111–119, (2013).
- [15] M. Tang, W. Li, H. Liu, L. Zhu,