

# بررسی رفتار خوردگی و تریبولوژیکی پوشش الکترولس نانوکامپوزیتی Ni-P-SiC اعمال شده روی سطح آلومینیم Al6061

رضا سلیمانی گیلاکجانی\*<sup>۱</sup>، فرزاد محبوبی<sup>۲</sup>، مصطفی علیشاهی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی،

تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، تهران، ایران

\*rezasol\_mat\_eng@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۲۳)

## چکیده

در این پژوهش پوشش نانوکامپوزیتی نیکل-فسفر-کاربید سیلیسیوم (Ni-P-SiC) با استفاده از روش الکترولس روی زمینه ای از جنس آلومینیم Al6061 رسوب داده شد. مشخصه‌یابی پوشش‌ها به کمک طیف‌نگاری تفکیک انرژی (EDS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام گرفت. سختی پوشش‌ها به روش ریزسختی سنجی ویکرز و رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها با آزمون پین روی دیسک مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی رفتار خوردگی پوشش‌ها از آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محلول ۳/۵ درصد وزنی استفاده شد. نتایج نشان دادند که مشارکت نانوذرات کاربید سیلیسیوم در پوشش نانوکامپوزیتی، سبب بهبود خواص خوردگی و تریبولوژیکی پوشش می‌شود که این امر را می‌توان به پایداری شیمیایی و استحکام مکانیکی منحصر به فرد نانوذرات کاربید سیلیسیوم نسبت داد.

## واژه‌های کلیدی:

نانوذرات SiC، الکترولس، رفتار خوردگی، رفتار تریبولوژیکی، پلاریزاسیون، امپدانس الکتروشیمیایی

## ۱- مقدمه

روش پوشش‌دهی الکترولس به طور گسترده برای پوشش‌های کامپوزیتی پایه نیکل به کار برده می‌شود. در این روش رسوب فلز به وسیله احیاء یون‌های فلزی موجود در حمام توسط عامل احیاء کننده و بدون اعمال جریان خارجی انجام می‌شود. این پوشش به دلیل فرایند ساخت و ترکیب منحصر به فردش دارای ضخامتی یکنواخت و خواصی نظیر مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت سایشی عالی و خواص غیر مغناطیسی است [۳ و ۴].

سبکی و نسبت استحکام به وزن بالای آلیاژهای آلومینیم و همچنین خواص دیگر آنها از جمله مقاومت به خوردگی خوب این آلیاژها باعث کاربرد بسیار آنها در صنایع مختلف شده است [۱ و ۲]. اما محدودیت‌هایی در استفاده از آنها وجود دارد که در این رابطه می‌توان نرمی و مقاومت سایشی پائین آنها را نام برد. یکی از روش‌های غلبه بر این محدودیت‌ها، ایجاد پوشش الکترولس نیکل-فسفر روی این آلیاژها است [۲].

نانوکامپوزیتی Ni-P-SiC ساخته شده و نقش نانوذرات سیلیسیوم کربید در روئین شدن و بهبود رفتار خوردگی و تریبولوژیکی پوشش‌ها بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

این تحقیق روی نمونه آلومینیومی آلیاژ Al6061 به عنوان زیر لایه انجام شد. مراحل آماده سازی زیرلایه قبل از آبکاری عبارتند از: پولیش با کاغذ سنباده SiC تا درجه ۳۰۰۰، شستشو با استون به مدت ۱۰ ثانیه، شستشو در محلول اسیدی حاوی نیتریک اسید و فلوئوریک اسید، به ترتیب با نسبت ۳ به ۱، به مدت ۱۰ ثانیه، غوطه‌وری در حمام زینکاته به مدت ۳۰ ثانیه (زینکاته مرتبه اول)، شستشو با نیتریک اسید ۵٪ به مدت ۱۰ ثانیه، غوطه‌وری در حمام زینکاته به مدت ۳۰ ثانیه (زینکاته مرتبه دوم)، شستشو با آب مقطر دی‌یونیزه شده و در دمای اتاق ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ).

ترکیب حمام زینکاته در جدول شماره ۱ ذکر شده است. عملیات زینکاته کردن به منظور حذف فیلم اکسیدی تشکیل شده پس از اسید شویی و جلوگیری از اکسیداسیون مجدد و ایجاد سطح کاتالیتیکی، که برای آبکاری الکترولس نیکل ضروری است، انجام می‌گیرد.

حمام مورد استفاده برای ایجاد پوشش‌های الکترولس، شامل g/l ۴۰ سولفات نیکل، ۲۰ هیپوفسفات سدیم، ۱۰ g/l سترات سدیم و ۱۵ g/l SiC، که اندازه متوسط ذرات SiC، ۴۰ نانومتر، می‌باشد. شرایط انجام فرایند آبکاری، در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول (۱): اجزا تشکیل دهنده حمام زینکاته

۸۸-۸۵°C	دما
۴/۶-۴/۹	pH
۱۶۰ rpm	سرعت هم زدن (مگنت)
۵۰ mg/lit	Surfactant (cetyl-trimethylamine bromide)
۱۵ g/lit	SiC

پوشش‌های تجاری الکترولس کامپوزیتی به وسیله افزودن ذرات میکرومتری از قبیل Graphite، PTFE، MnS<sub>2</sub>، Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>، SiC، BN و الماس به حمام الکترولس تهیه می‌گردند. اما با توسعه و پیشرفت تکنولوژی، پوشش‌های کامپوزیتی میکرومتری نمی‌توانند نیاز کاربردهایشان را برآورده کنند، لذا پوشش‌های الکترولس کامپوزیتی با ذرات نانومتری به دلیل کارایی بالایشان از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۵ و ۶].

کربید سیلیسیوم یک ماده سرامیکی نسبتاً ارزان است که دارای پایداری شیمیایی، مقاومت به سایش و فرسایش بالا است [۵] که این خواص سبب توسعه استفاده از آن در کامپوزیت‌ها و پوشش‌های کامپوزیتی شده است. تحقیقات صورت گرفته بر روی پوشش‌های کامپوزیتی با ذرات تقویت‌کننده SiC نشان داده است که حضور ذرات SiC در این پوشش‌ها سبب افزایش سختی و بهبود خواص سایشی پوشش‌ها شده است [۷ و ۸]. با این وجود گزارشات متناقضی در ارتباط با رفتار خوردگی این پوشش‌ها وجود دارد. برخی محققین معتقدند حضور ذرات SiC در پوشش کامپوزیتی سبب کاهش مقاومت خوردگی پوشش کامپوزیتی می‌شود که این امر را به فصل مشترک ضعیف ذرات SiC زمینه، تخلخل زیاد و ترک‌های ناشی از حضور این ذرات نسبت داده‌اند [۹]. همچنین گزارشاتی نیز در ارتباط با بهبود مقاومت خوردگی پوشش‌ها در حضور ذرات SiC وجود دارد که ماهیت سرامیکی و پایداری شیمیایی عالی این ذرات به عنوان دلیل این امر ذکر شده است [۷]. بررسی بیشتر در این زمینه نشان می‌دهد که پارامترهای دیگری نظیر اندازه و غلظت ذرات تقویت‌کننده، نوع و غلظت فعال‌کننده سطح مورد استفاده، سرعت هم‌زدن و غیره به شدت در رفتار خوردگی پوشش‌های کامپوزیتی موثر است [۸ و ۹].

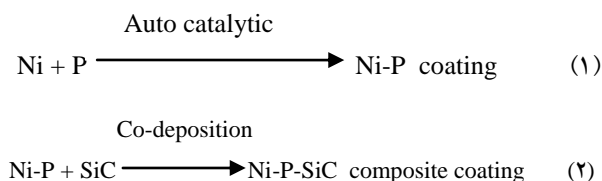
تحقیقات بسیاری در زمینه خواص خوردگی و تریبولوژیکی پوشش‌های کامپوزیتی الکترولس انجام شده است، اما با این وجود، اطلاعات کافی در مورد تاثیر نانوذرات بر خواص خوردگی و تریبولوژیکی پوشش‌های الکترولس وجود ندارد. در پژوهش حاضر با استفاده از نانوذرات SiC، پوشش الکترولس

شاهد و الکتروود Ag/AgCl به عنوان الکتروود مرجع به کار گرفته شد. پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ ) و دانسیته جریان خوردگی ( $i_{corr}$ ) با استفاده از روش برونیابی تافل، تعیین شدند. مقاومت انتقال بار ( $R_{ct}$ ) و ظرفیت لایه دوگانه ( $C_{dl}$ ) نیز از منحني‌های نایکوئیست و با استفاده از نرم افزار Zview اندازه‌گیری شدند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصه‌یابی پوشش‌ها

پس از اینکه آلومینیم توسط فرایند زینکاته کردن، برای پوشش‌دهی، آماده گردید، پوشش به صورت اتوکاتالیتیکی<sup>۱</sup> و بدون نیاز به جریان خارجی رسوب کرده و ذرات SiC معلق در حمام، درون پوشش محبوس می‌گردند. فرایند این نوع پوشش‌دهی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:



در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نوری از مورفولوژی سطح و مقطع عرضی پوشش‌های Ni- و Ni-P-SiC را نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت کامپوزیتی و غیر کامپوزیتی پوشش‌هایی بدون ترک، با چسبندگی مناسب به زمینه و فشردگی بالا را شاهد هستیم که این امر در رفتار خوردگی پوشش‌ها تاثیر بسزایی دارد. ضخامت پوشش‌ها حدود ۲۵ میکرومتر است. شکل ۱- ه نقشه توزیع EDS عنصر Si در پوشش کامپوزیتی را نشان می‌دهد، از آنجا که اتم‌های Si به صورت ترکیب SiC در پوشش وجود دارند، بنابراین توزیع اتم‌های Si، بیانگر توزیع نانو ذرات SiC در پوشش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نانو ذرات SiC توزیع نسبتاً یکنواختی در پوشش دارند.

جدول (۲): شرایط حمام الکترولس برای فرایند پوشش‌دهی نیکل

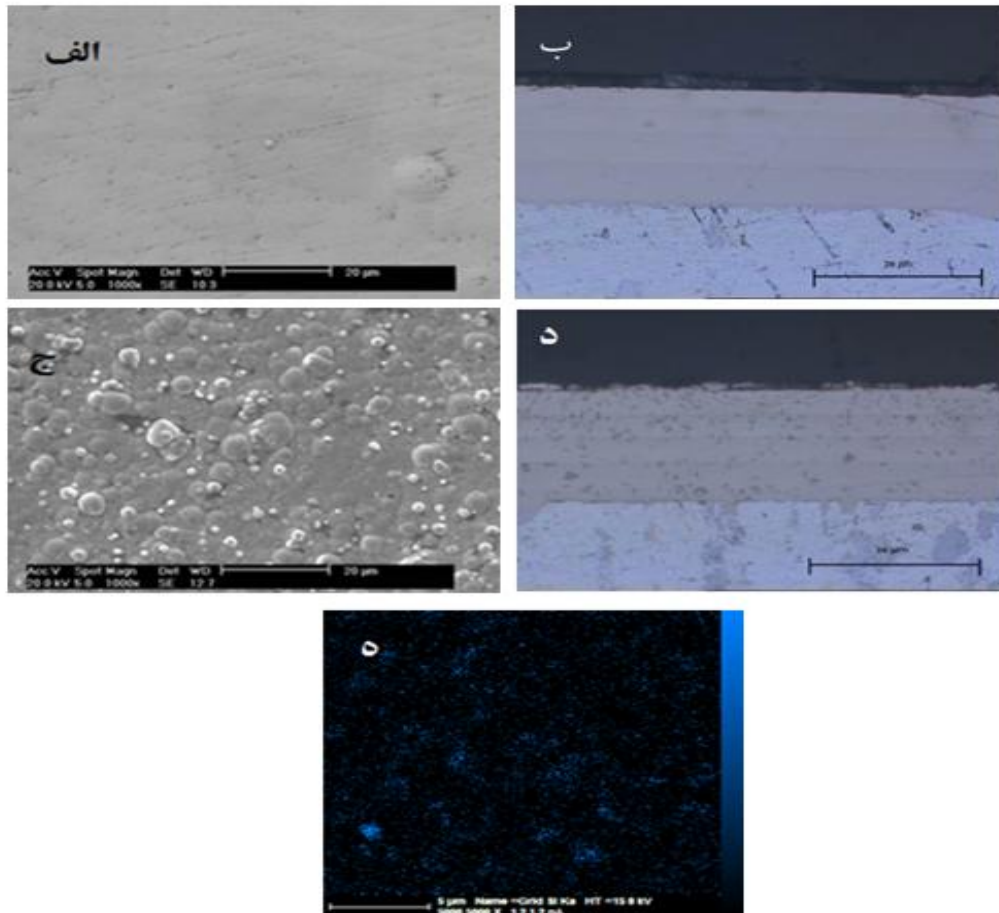
مقدار (gr/lit)	ترکیب شیمیایی	نام ماده شیمیایی
۱۰۶	NaOH	هیدروکسید سدیم
۳۰	Ni(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	سولفات نیکل
۵	CuSO <sub>4</sub>	سولفات مس
۴۰	KHC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	پتاسیم هیدروژن تارتارات
۲	FeCl <sub>2</sub>	کلرید آهن
۴۰	ZnSO <sub>4</sub>	سولفات روی
۱۰	KCN	سیانید پتاسیم

فرایند پوشش‌دهی به مدت دو ساعت انجام شد. پوشش‌ها در دو حالت کامپوزیتی به همراه نانو ذرات کاربرد سیلیسیوم و الکترولس معمولی Ni-P، بر روی سطح رسوب داده شدند.

سختی پوشش‌ها توسط دستگاه میکروسختی سنج koopa pazhoohesh، با بار اعمالی ۵۰ گرم و زمان ۵ ثانیه اندازه‌گیری شد. سختی هر پوشش، ۳ بار اندازه‌گیری و میانگین آنها گزارش شد. آزمون سایش و اصطکاک به روش پین روی دیسک در بار اعمالی ۸ نیوتن و سرعت سایش ۰/۰۵ m/s بر روی نمونه‌های دارای پوشش کامپوزیتی، الکترولس معمولی Ni-P و آلومینوم بدون پوشش در مسافت ۲۰۰ متر انجام شد. نمودار کاهش وزن- مسافت برای هر نمونه رسم شد و میانگین ضریب اصطکاک آنها گزارش شد. سطح سایش نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل XL30 برای مطالعه مورفولوژی پوشش و از آنالیز EDS جهت تعیین ترکیب شیمیایی و از میکروسکوپ نوری Olympus مدل Bh2 برای بررسی توزیع ذرات در شبکه نیکل استفاده شد.

مطالعات مربوط به مقاومت به خوردگی پوشش‌ها، توسط آزمون پلاریزاسیون تافل و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول NaCl ۳/۵٪ توسط دستگاه Autolab مدل PGstate302N انجام گرفت. نمونه‌ها با سطح ۱ cm<sup>2</sup> در تماس با الکترولیت قرار گرفتند. یک الکتروود پلاتینی به عنوان الکتروود



شکل (۱): تصاویر میکروسکوپ نوری و SEM از مورفولوژی سطح و مقطع عرضی پوشش  
الف و ب): Ni-P، ج و د): Ni-P-SiC، ه): نقشه EDS پراکندگی نانو ذرات SiC در سطح پوشش

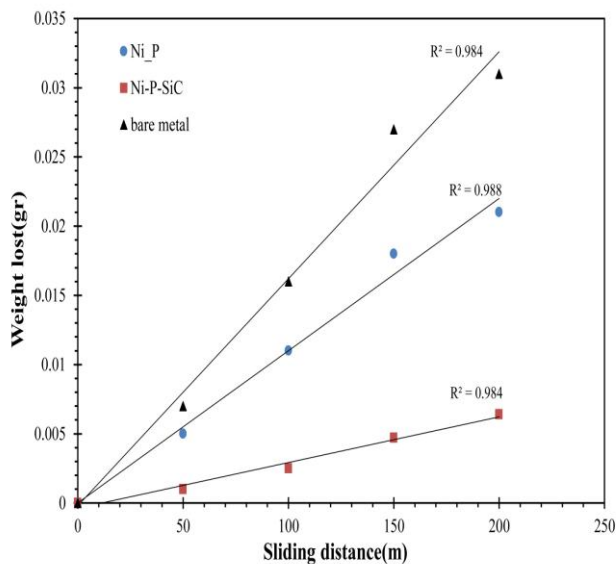
### ۳-۲- مطالعات سختی سنجی

سختی پوشش های Ni-P و Ni-P-SiC و آلومینیوم بدون پوشش توسط یک نمودار ستونی در شکل ۲ با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود، مشارکت نانو ذرات SiC در پوشش Ni-P، سختی پوشش را از ۵۶۳ ویکرز به ۶۲۳ ویکرز افزایش می دهد. این افزایش سختی را می توان سختی بالای نانو ذرات SiC و همچنین نقش آن ها در استحکام بخشی زمینه فلزی نسبت داد [۱۰].

### ۳-۳- مطالعات تریبولوژیکی

شکل ۳ نمودار کاهش وزن- مسافت را برای پوشش های Ni-P و SiC و Ni-P و آلومینیوم بدون پوشش، در شرایط بار اعمالی ۸ نیوتن و سرعت ۰/۰۵ m/s و مسافت ۲۰۰ متر نشان می دهد. محاسبه نرخ کاهش وزن با استفاده از رابطه شماره ۳ نشان داد که پس از مسافت ۲۰۰ متر نرخ کاهش وزن  $10^{-3} \times 1/5$  و  $10^{-4}$   $mm^3/Nm$ ، به ترتیب برای پوشش های Ni-P و Ni-P-SiC است. در این رابطه  $W_f$  نرخ سایش بر حسب  $(mm^3/Nm)$ ،  $\Delta m$  کاهش وزن بر حسب میلی گرم،  $\rho$  چگالی بر حسب  $(gr/cm^3)$ ،  $l$  مسافت طی شده بر حسب متر و  $F$  نیروی اعمالی بر

اصطکاک را از  $\mu=0/65$  برای پوشش Ni-P، به  $\mu=0/81$  برای پوشش Ni-P-SiC می‌رساند. که این افزایش ضریب اصطکاک ناشی از هندسه ظاهری و ماهیت سخت ذرات SiC و تاثیر آن بر زبری و مورفولوژی سطحی پوشش کامپوزیتی است. نتایج زبری سنجی، زبری سطحی پوشش کامپوزیتی را حدود  $0/046$  میکرومتر نشان می‌دهد در حالی که این مقدار برای پوشش غیر کامپوزیتی حدود  $0/02$  میکرومتر است.

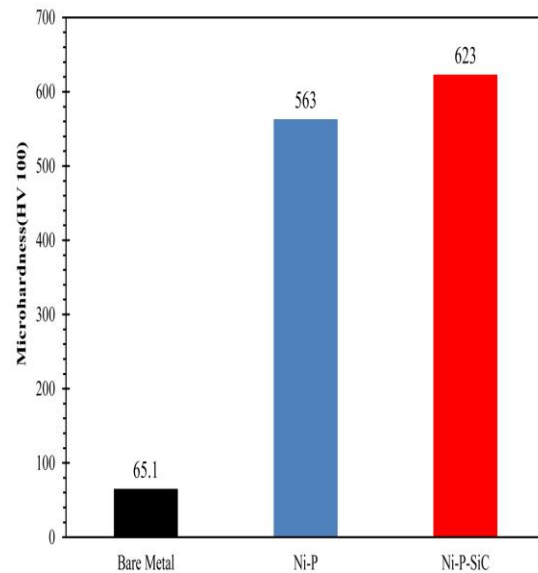


شکل (۳): منحنی کاهش وزن پوشش Ni-P و Ni-P-SiC در طی آزمون سایش

شکل ۵ تصویر SEM سطح سایش دو پوشش Ni-P و Ni-P-SiC را نشان می‌دهد. در شکل ۵- (الف، ب، ج)، کنده شدن پوشش Ni-P مشاهده می‌شود که بیانگر این مطلب است که مکانیزم سایش در این پوشش، سایش چسبان است. شکل ۵- (د، ه، و) نشان می‌دهد که حجم سایش پوشش کامپوزیتی به مراتب کمتر بوده و مقاومت سایشی به شدت افزایش یافته است. ملفاتی<sup>۲</sup> و همکاران [۱۱] بهبود رفتار تریبولژیکی پوشش کامپوزیتی را به خواص مکانیکی منحصر به فرد نانوذرات SiC و تاثیر آن بر مورفولوژی سطح پوشش نسبت داده اند. آنها بر این باورند که ذرات SiC موجود در پوشش کامپوزیتی، با ایجاد

حسب نیوتن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حضور نانوذرات SiC در شبکه نیکل سبب کاهش نرخ کاهش وزن در پوشش کامپوزیتی در مقایسه با پوشش Ni-P شده است.

$$W_r = \frac{\Delta m}{(\rho \times l \times F)} \quad (۳)$$

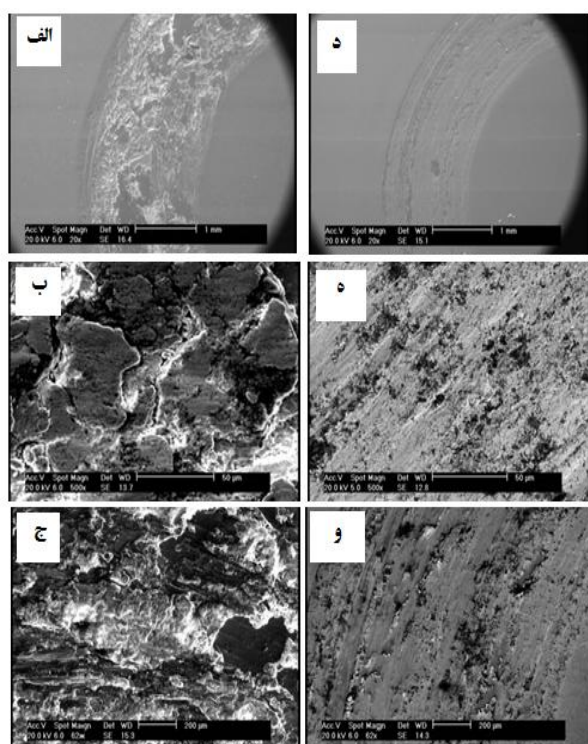


شکل (۲): نمودار ستونی نتایج میکروسختی سنجی پوشش های Ni-P-SiC، Ni-P و آلومینیوم بدون پوشش

رفتار سایشی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-P-SiC به شدت به ریزساختار آن وابسته است. ذرات SiC پراکنده در زمینه نیکل، از حرکت نابجایی‌ها ممانعت به عمل آورده یا حداقل باعث کند شدن حرکت آنها می‌شوند و بدین وسیله مانع از تغییر شکل پلاستیک در طی سایش می‌شوند. مطالعه رفتار تریبولژیکی پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-P-SiC نشان می‌دهد که نه تنها حجم ذرات SiC رسوب داده شده در شبکه پوشش، بلکه تعداد آنها در واحد سطح پوشش و اندازه آنها نیز بر روی رفتار تریبولژیکی پوشش Ni-P-SiC تاثیر دارد [۱۱].

شکل ۴ نمودار ضریب اصطکاک- مسافت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت که نانوذرات SiC، ضریب

نایکوئیست<sup>۳</sup> برای پوشش Ni-P-SiC بزرگتر از حلقه نایکوئیست پوشش Ni-P و آلومینیوم بدون پوشش است (شکل ۷). انحراف امیدانس از رفتار خازنی خالص می‌تواند بوسیله غیریکنواختی در سیستم پوشش و غیریکنواختی نفوذ توضیح داده شود. با استفاده از این مدار و نرم افزار Zview طیف‌ها شبیه‌سازی شده و داده‌های حاصل در جدول شماره ۳ آورده شدند. شکل ۸ مدار معادل مربوط به آنالیز EIS را در دو پوشش Ni-P و Ni-P-SiC را نشان می‌دهد که توسط نرم افزار Zview مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدار  $R_{ct}$ ، مقاومت انتقال بار<sup>۴</sup> و  $C_{dl}$ ، ظرفیت لایه دوگانه الکتریکی می‌باشد.



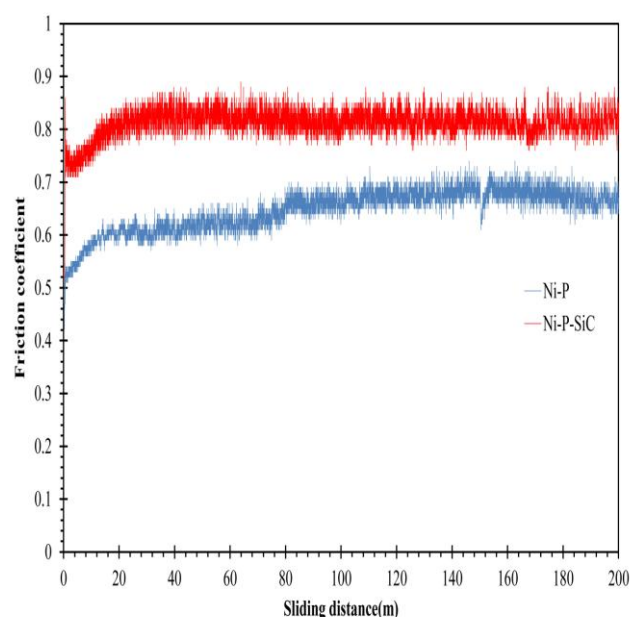
شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح سایش الف، ب، ج: (Ni-P، د، ه، و): Ni-P-SiC

محاسبه مقاومت انتقال بار نشان می‌دهد که نرخ انحلال پوشش Ni-P-SiC نسبت به پوشش Ni-P و آلومینیوم بدون پوشش، بسیار کمتر است و در نتیجه مشارکت SiC در پوشش Ni-P، منجر به افزایش مقاومت خوردگی می‌شود. نتایج حاصل با نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل همخوانی دارد.

فاصله، از تماس سخت و خشن سطح نیکل و پین در طی سایش جلوگیری کرده و نرخ سایش را کاهش می‌دهند.

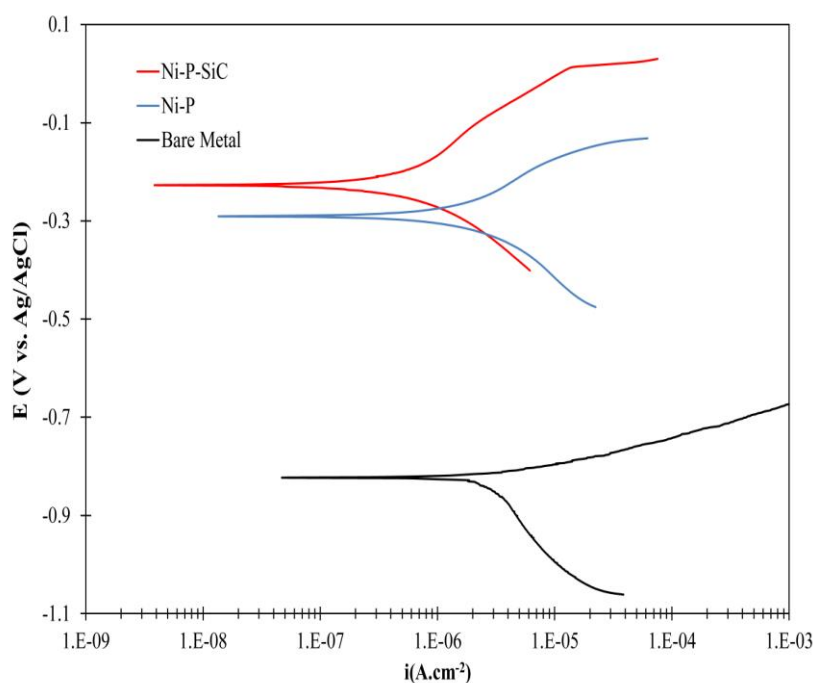
### ۳-۴- مطالعات خوردگی

شکل ۶، منحنی‌های پلاریزاسیون تافل مربوط به خوردگی پوشش‌ها در محلول NaCl ۳/۵٪ را نشان می‌دهد. پتانسیل استاندارد نجیب‌تر SiC نسبت به نیکل، سبب افزایش پتانسیل خوردگی پوشش Ni-P-SiC نسبت به پوشش Ni-P و آلومینیوم بدون پوشش شده است. با توجه به شکل ۶، پتانسیل خوردگی برای پوشش‌های Ni-P، Ni-P-SiC و آلومینیوم بدون پوشش به ترتیب برابر با  $-۲۲۶/۵۱$  mv،  $-۲۹۶/۶۶$  mv و  $-۸۲۶/۴۷$  mv است.



شکل (۴): منحنی ضریب اصطکاک پوشش Ni-P و Ni-P-SiC در طی آزمون سایش

علاوه بر این، با توجه به شکل ۶ می‌توان بیان داشت که پوشش Ni-P-SiC نرخ خوردگی کمتری ( $۰/۴۳ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) نسبت به پوشش Ni-P ( $۱/۱ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) و آلومینیوم بدون پوشش ( $۱/۷ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) دارد. به منظور بررسی بیشتر رفتار خوردگی، مطالعات امیدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل خوردگی نیز بر روی پوشش‌ها صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که حلقه



شکل (۶): منحنی های تافل پوشش های Ni-P، Ni-P-SiC و آلومینیوم بدون پوشش در محلول ۳/۵ % NaCl

جدول (۳): پارامترهای محاسبه شده از نمودارهای تافل و امپدانس برای پوشش های Ni-P و Ni-P-SiC

نوع پوشش	$E_{corr}(mV)$	$i_{corr}(\mu A/cm^2)$	$R_{ct}(k\Omega.cm^2)$	$CPE(\Omega^{-1}.s^{-n}.cm^{-2})$	$n_{dl}$
Ni-P	-۲۹۶/۶۶	۱/۱	۱۲	$۱/۹ \times 10^{-5}$	۰/۹
Ni-P-SiC	-۲۲۶/۵۱	۰/۴۳	۲۱	$۱/۵ \times 10^{-5}$	۰/۹۵

کیفیت سطح پوشش ها مقدار  $n_{dl}$  نیز افزایش می یابد (جدول ۳).  
 ب) از آنجایی که اضافه و لثاژ آزاد شدن هیدروژن روی SiC بسیار کمتر از فلز نیکل است، بنابراین حضور مقادیر بیشتر نانوذرات SiC در پوشش، نرخ آزاد شدن هیدروژن و در نتیجه نرخ انحلال آندی پوشش را افزایش می دهد. افزایش انحلال پوشش نیکل فسفر سبب افزایش خوردگی تدریجی نیکل شده و تشکیل فیلم پسیو غنی از فسفر در فصل مشترک پوشش/محیط خورنده را سرعت می بخشد و بدینوسیله نرخ خوردگی را کاهش می دهد [۱۴].

ج) از سوی دیگر افزایش میزان نانوذرات SiC در پوشش سبب می شود که سهم نانوذرات در سطحی از پوشش که در تماس با

افزایش مقاومت به خوردگی پوشش Ni-P-SiC را می توان با دلایل زیر توجیه کرد:

الف) عموماً اندازه عیوب از قبیل ترک ها و میکرو حفرات در روی سطح پوشش، زیر میکرونی<sup>۵</sup> است. بنابراین نانوذرات با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر، به آسانی می توانند آنها را پر کنند [۱۲]. بنابراین، نانوذرات SiC با اندازه متوسط ۴۰ نانومتر، در زمینه آمورف نیکل قرار گرفته و ضمن تقویت زمینه، شیارها و میکرو حفرات موجود در پوشش را پر کرده و به صورت یک سد نجیب فیزیکی در پوشش، با اصلاح ریزساختار لایه نیکل و کاهش دانسیته عیوب در آن، سبب افزایش مقاومت خوردگی پوشش شده است [۱۳]. با اضافه کردن نانوذرات SiC و افزایش

حمام الکترولس نیکل فسفر حاوی ۱۵ g/lit از نانوذرات SiC با موفقیت بر روی زمینه آلومینیومی رسوب داده شدند و نتایج زیر بدست آمد:

۱- مشارکت نانوذرات SiC سبب تقویت زمینه و افزایش سختی می گردد.

۲- پتانسیل استاندارد نجیب SiC سبب افزایش پتانسیل خوردگی پوشش Ni-P-SiC نسبت به پوشش Ni-P گردید.

۳- SiC با اصلاح پوشش، سبب کاهش نرخ خوردگی و افزایش مقاومت انتقال بار پوشش Ni-P-SiC در مقایسه با پوشش Ni-P می شود.

۴- نانوذرات SiC موجود در سطح پوشش کامپوزیتی، از یک سو، با افزایش رافنس سطح سبب افزایش ضریب اصطکاک و از سوی دیگر، با تقویت و استحکام بخشی زمینه و ایجاد فاصله، از تماس سخت و خشن سطح پوشش نیکل و پین جلوگیری کرده و سبب کاهش نرخ کاهش وزن می شود.

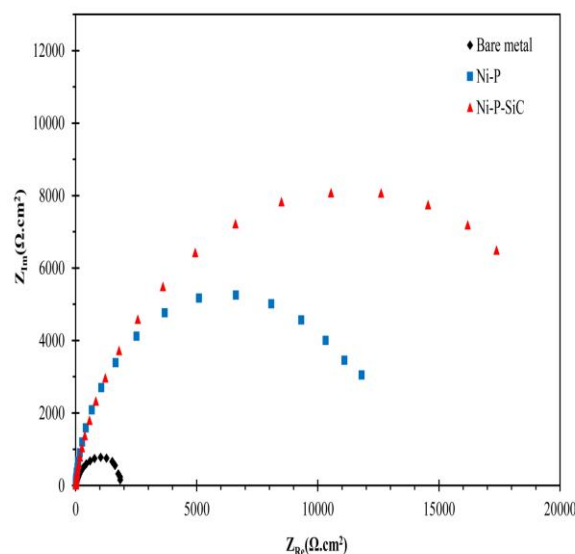
#### ۵- تشکر و قدردانی

از حمایت‌های ستاد توسعه فناوری نانو که در انجام این پژوهش محققان را یاری نمودند، نهایت تشکر و قدردانی می گردد.

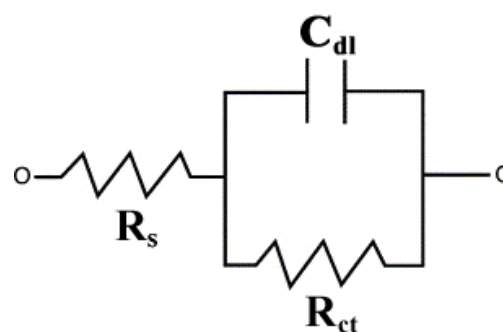
#### ۶- مراجع

- [1] V. Saxena, R. Uma Rani & A.K. Sharma, "Studies on ultra high solar absorber black electroless nickel coatings on aluminum alloys for space application", Surface & Coatings Technology 201, pp. 855-862, 2006.
- [2] H. Yong-jun, X. Ling & M. Ji-long, "Electron microscopic study on interfacial characterization of electroless Ni-W-P plating on aluminium alloy", Applied Surface Science 253, 5029-5034, 2007.
- [3] W. Riedel, Electroless Nickel Plating, ASM International, Ohio, 1991.
- [4] G.O. Mallory & J.B. Hajdu, Electroless Plating-Fundamentals and Applications, reprint ed. AESF, New York, 2002.

محیط خورنده است افزایش، و سهم پوشش الکترولس در این سطح کاهش پیدا کند. برای همین با توجه به اینکه مقاومت خوردگی و پایداری شیمیایی ذرات سیلیسیوم کاربید بسیار بیشتر از پوشش الکترولس نیکل فسفر است، بنابراین مقاومت خوردگی افزایش می یابد [۱۲ و ۱۳].



شکل (۷): منحنی‌های نایکوئست پوشش‌های Ni-P، Ni-P-SiC و آلومینیوم بدون پوشش در محلول ۳/۵٪ NaCl



شکل (۸): مدل مدار الکتریکی معادل مورد استفاده جهت آنالیز داده‌های EIS پوشش‌های Ni-P، Ni-P-SiC

#### ۴- نتیجه گیری

پوشش‌های الکترولس نانو کامپوزیتی Ni-P-SiC با استفاده از یک



[14] S. W. Watson, "Electrochemical Study of SiC Particle Occlusion during Nickel Electrodeposition", Journal of Electrochemical Society, 1993. Turbulent Flows", Scientia Iranica, Vol. 1, pp. 1-23, 1994.

[5] Z. Yang, H. Xu, Y.L. Shi, M.K. Li, Y. Huang & H.L. Li, "The fabrication and corrosion behavior of electroless Ni-P-carbon nanotube composite coatings", Materials Research Bulletin, vol. 40, pp. 1001-1009, 2005.

[6] C.S. Chen, X.H. Chen, ZhiYang, W.H. Li, L.S. Xu & B. Yi, "Effect of multi-walled carbon nanotubes as reinforced fibres on tribological behaviour of Ni P electroless coatings", Diamond & Related Materials, vol.15, 151-156, 2006.

[7] G. Jiaqiang, L. Lei, W. Yating, Sh. Bin & H. Wenbin, "Electroless Ni-P-SiC composite coatings with superfine particles", Surface & Coatings Technology, vol.200, pp.5836-5842, 2006.

[8] M. Uysal, R. Karslioglu, A. Alp & H. Akbulut, "Nanostructured core-shell Ni deposition on SiC particles by alkaline electroless coating", Applied Surface Science, vol.257, 2011.

[9] R. K. Duchaniya, A. Sharma & M. K. Totalani, "Characterization Studies of Electroless Ni-P-SiC Coating on Aluminium", ICMPAE, pp. 240-242, 2011.

[10] G. Jiaqiang, L. Lei, W. Yating, Sh. Bin & H. Wenbin, "Electroless Ni-P-SiC composite coatings with superfine particles", Surface & Coatings Technology, Vol.200, pp. 5836-5842, 2006.

[11] C. F. Malfatti, H. M. Veit, C. B. Santos, M. Metzner, H. Hololeczek & J. P. Bonino, "Heat Treated NiP-SiC Composite Coatings: Elaboration and Tribocorrosion Behaviour in NaCl Solution", Tribol Lett, vol.36, pp. 165-173, 2009.

[12] O.R.M. Khalifa, E. Abd El-Wahab & A. H. Tilp, "The Corrosion Behavior of Electroless Ni-P-SiC and Ni-Sn-P-SiC Nano-Composite Coating", Journal of Applied Sciences Research, Vol.6, pp. 2280-2289, 2010.

[13] M. Alishahi, S.M. Monirvaghefi, A. Saatchi & S.M. Hosseini, "The effect of carbon nanotubes on the corrosion and tribological behavior of electroless Ni-P-CNT composite coating", Applied Surface Science, Vol. 258, pp. 2439-2446, 2012.

#### ۷- پی نوشت

- 
- [1] Auto-catalytic
  - [2] Malfatti
  - [3] Nyquist
  - [4] Charge transfer resistance (Rt)
  - [5] Submicron