



## تولید پوشش کامپوزیتی - هیبریدی زمینه نیکل بوسیله آبکاری الکتریکی

مهدی قبیتهی حسب<sup>۱</sup>، پریسا چناری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

<sup>۲\*</sup>کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد-سرامیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول (parisachenari97@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۲-۲۵ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹-۲-۱۹

**چکیده:** در این مقاله، تولید پوشش های کامپوزیتی- هیبریدی زمینه نیکل همراه ذرات تقویت کننده سرامیکی ( آلومینا و کاربید سیلیسیم) جهت تولید بر روی ورقه های مس پولیش شده با ضخامت ۱ میلی متر، و نیکل /کاربید سیلیسیم و گرافیت بروی فولاد St37 با استفاده از حمام واتس (سولفات نیکل شش آبه، کلرید نیکل شش آبه، اسید بوریک، بررسی شده اند. دانسیته جریان متفاوت، pH، متغیر، و دما متغیر حاوی میکروذرات آلومینا و کاربید سیلیسیم و گرافیت رسوب دهی الکتریکی شدند. مورفولوژی، خواص سایشی و مقاومت به خوردگی پوشش ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، بررسی شدند. نتایج نشان داد که با استفاده از پوشش کامپوزیتی هیبریدی زمینه نیکل همراه با ذرات تقویت کننده آلومینا و کاربید سیلیسیم؛ خواص سایشی (نرخ سایش و ضریب اصطکاک) بهبود قابل توجهی داشته است؛ ولی مقاومت به خوردگی افت داشته است.

**واژه های کلیدی:** پوشش کامپوزیتی هیبریدی، آبکاری، مورفولوژی سطح، نرخ سایش، ضریب اصطکاک.

### ۱. مقدمه

در این مقاله پوشش های نانو کامپوزیتی پایه نیکل جهت تولید مورد بررسی قرار می گیرد. کامپوزیت های زمینه فلزی موادی هستند که در آنها خواص میزبان فلزی با افزودن ذره دومی (معمولا سرامیک) اصلاح می شود. ذرات دومی می توانند اکسیدها مثل آلومینا، اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیم و.. کاربیدها مثل کاربید تنگستن، کاربید سیلیسیم، الماس و یا حتی میکرو کپسولهای حاوی مایع باشند. کامپوزیت های پایه فلزی با ذرات تقویت کننده اکنون از چنان کارایی زیادی در صنایع مختلف برخوردار شده اند که جزیی اجتناب ناپذیر از این صنایع به شمار می روند. از آنجایی که تولید یک قطعه صنعتی بطور کامل از یک کامپوزیت پایه فلزی ممکن است دشواری های خاصی داشته یا اساسا نیاز به این کار نباشد، اعمال این کامپوزیت ها در قالب یک پوشش سطحی بسیار رایج است، بطوریکه بدنه قطعه صنعتی از یک آلیاژ معمولی با خواص متداول تری برخوردار بوده و سطح آن، بدلیل نیاز به دارا بودن خواص متفاوت از پوشش خاص پوشانده می شود. قطعات صنعتی که در معرض سایش یا خوردگی هستند. مثالهای خوبی از قطعاتی هستند که لایه سطحی آنها در معرض محیط ساینده یا خورنده قرار دارد، نیاز به مقاومت به خوردگی مقاومت به سایش و ضریب اصطکاک پایین دارد.

در اینگونه موارد اعمال یک پوشش سطحی کار آمد که خواص مور نظر را دارا باشد بهترین و مقرون به صرفه ترین راهکار است. یکی از مهمترین کاربردهای پوشش های کامپوزیتی، پوشش دادن ولو های فشار بالا در صنایع نفت و گاز است که باعث افزایش مقاومت به خوردگی آنها می شود. بنابراین پوشش های کامپوزیتی زمینه فلزی نسل جدیدی از کامپوزیت ها هستند که دارای مزایایی چون نگهداری آسان، دمای کاری پایین، قیمت ارزان و مهمتر از همه داشتن ترکیبی از خواص متنوع می باشد. بعلاوه این پوشش ها دارای خواص هستند چون رسوب سختی، خود روانکاری، مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا، مقاومت به خوردگی، و مقاومت به سایش عالی می باشند. از سوی دیگر، مواد با ساختار نانو بدلیل ساختار ریز شان به طور گسترده ای برای بهبود خواص تکنولوژیکی مورد استفاده قرار می گیرند. در این پژوهش سعی شده است پژوهش های مختلف بروی خواص مقاومت به سایش، ضریب اصطکاک، سختی، استحکام و مورفولوژی پوشش های کامپوزیتی پایه نیکل با ذرات تقویت کننده آلومینا گرد آوری شده است. [۱]

نیکل بدلیل سازگاری بالایی که با اکثر مواد پایه دارد و همچنین به دلیل سختی بالا، مقاومت به خوردگی و سایش خوب و خنثی بودن از نظر شیمیایی بعنوان ماده مناسبی برای پوشش شناخته شده است. پوشش های کامپوزیتی زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سرامیکی به علت سختی بیشتر و مقاومت به سایش و خوردگی بهتر نسبت به پوشش های آلیاژی یا فلزی خالص، کاربرد های بسیاری در صنایع مختلف پیدا کرده اند. روش آبکاری الکتریکی به علت سادگی و ارزانی، روش مناسب برای تولید این دسته از پوشش ها است. در این روش ذرات معلق در حمام آبکاری در حین فرآیند پوشش دهی الکتریکی به داخل پوشش وارد می شوند و ذرات سرامیکی توسط مکانیزم پراکنده سختی با سد کردن حرکت نابجایی ها باعث افزایش سختی و استحکام زمینه می شوند افزایش سختی باعث کاهش نرخ سایش و در نتیجه افزایش مقاومت به سایش می شود. هنگامیکه قطر ذرات سرامیکی از ابعاد میکرو متری به نانومتری کاهش پیدا می کند خواص کامپوزیت بطور چشمگیری بهبود پیدا میکند و همین امر باعث توسعه مواد نانو کامپوزیتی در سال های اخیر شده است. ذرات سرامیکی علاوه بر افزایش سختی باعث کاهش تماس فلز با فلز در بین سطوح فلزی در حال تماس می شوند و این مسئله به کاهش ضریب اصطکاک و افزایش بیشتر مقاومت به سایش منجر خواهد شد. علاوه بر ذرات سرامیکی طبیعت زمینه نیز تاثیر زیادی در افزایش مقاومت به سایش بازی می کند. در روش آبکاری الکتریکی پالسی نسبت به روش آبکاری الکتریکی مستقیم ذرات به مقدار بیشتر و با یکنواختی بالاتری در زمینه وارد می شوند و از طرفی علت بیشتر بودن پارامتر های فرآیند تولید، کنترل بهتر خواص پوشش در این روش امکان پذیر است. [۲] پارامتر های تولید، مثل دانسیته جریان، سیکل کاری، فرکانس، سرعت چرخش محلول و افزودنی ها تاثیر زیادی در مقدار ذرات استحکام دهنده و همچنین توزیع آنها در زمینه دارند. تاکنون تحقیقات فراوانی بروی تاثیر پارامتر های آبکاری مستقیم، پالسی مربعی و مثلثی بر هم رسوبی ذرات صورت گرفته اما بررسی چندانی بر روی پارامتر های جریان پالسی معکوس صورت نگرفته است [۳] آبکاری نیکل برای کاربرد های تزئینی فنی مهندسی و شکل دهی الکتریکی به کار می رود. آبکاری نیکل برای مواد تزئینی و ۲۰ درصد از آن برای اهداف مهندسی و شکل دهی الکتریکی است. مصرف سالانه نیکل برای آبکاری تقریباً ۸۱۷۰۰ تن در سال است که حدود ۱۲ درصد مصرف سالانه نیکل است. از آنجایی که پوشش های کامپوزیتی زمینه فلزی تقویت شده ذرات سرامیکی به علت سختی بیشتر و مقاومت به سایش و خوردگی بهتر نسبت به پوشش های آلیاژی با فلزی خالص، کاربرد های بسیاری در صنایع مختلف پیدا کرده اند. روش آبکاری الکتریکی بدلیل سادگی و ارزانی روش مناسبی برای تولید این دسته از پوشش ها است.

## ۲. روش کار تجربی

برای ایجاد پوشش کامپوزیتی Ni-SiC-Gr با متغیر قرار دادن ذرات SiC می باشد. یکی از عوامل بسیار مهم در پوشش دهی، آماده سازی سطح قبل از فرآیند آبکاری الکتروشیمیایی می باشد. در اینجا پوشش ها بر زیر لایه هایی از جنس فولاد St37 اعمال گردیدند. به طور کلی آماده سازی سطح زیر لایه شامل سه مرحله می باشد که عبارتند از: چربی گیری، اسید شویی، پولیش کاری. جهت ایجاد

پوشش های کامپوزیتی Ni-SiC-Gr، از زیر لایه فولادی استفاده شده است. پوشش ها در مراحل بعدی می توانند تحت بررسی های فازی، مورفولوژیکی، میکروسختی، ریز ساختاری و عنصری، قرار گیرند. [۱]

جدول (۱) ترکیب حمام واتس [۱]

مقدار ( گرم بر لیتر )	مواد اولیه
سولفات نیکل	200
کلرید نیکل	20
اسید بوریک	40
نانو پودر Sic	12
پودر گرافیت	1
پودر CTAB	5
پودر SDS	5
ساخارین	1

جهت تنظیم PH، از سود سوز آور و اسید سولفوریک پنج درصد استفاده شد. پس از انجام مراحل آماده سازی مواد و فرآیند، با استفاده از جریان مستقیم رکتی فایر، فرآیند راه اندازی شد، به گونه ای که آند گرافیتی به قطب مثبت و کاتدی فولادی (st37) به قطب منفی رکتی فایر متصل گردیدند. مدت زمان انجام هر آزمایش ۲۰ دقیقه انتخاب شد. با متغیر قرار دادن مقدار پودر کاربرد سیلسیم در حمام واتس از ۱۰ تا ۲۵ گرم بر لیتر مبادرت به ایجاد پوشش های کامپوزیتی

Ni-SiC-Gr گردید. از آنجایی که ذرات دارای انرژی سطحی بالایی هستند تمایل دارند با کلوخه ای شدن انرژی سطحی خود را کاهش دهند در حین زمان روشنایی کلوخه های با قطر های متفاوت به سطح کاتد می رسند با احیا یون های نیکل در سطح کاتد، ذرات و کلوخه ها به مرور در پوشش دفن می شوند. در نتیجه کلوخه های با قطر کمتر زودتر و کلوخه های با قطر بیشتر دیر تر در پوشش دفن می شوند. در تحقیقی دیگر برای تولید پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا از حمام آبکاری واتس با ترکیب ۳۰۰ گرم بر لیتر (سولفات نیکل شش آبه)، ۴۵ گرم بر لیتر NiCl<sub>2</sub> و ۴۵ گرم بر لیتر H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> استفاده شد. ذرات آلومینا با قطر متوسط ۵۰ نانومتر به مقدار ۵۰ گرم بر لیتر و ساخارین به مقدار ۱ گرم بر لیتر به عنوان ریز کننده، SDS به مقدار ۰.۷۵ گرم بر لیتر به عنوان فعال کننده سطحی به حمام اضافه شدند. از فلز نیکل با خلوص ۹۹.۹۹٪ با مساحت ۴۰ سانتی متر مربع به عنوان آند و فولاد St37 با سطح مقطع ۲۰ سانتی متر مربع به عنوان کاتد استفاده شد. برای زدودن آلودگی ها و لایه های اکسیدی از سطح کاتد، آن را با کاغذ سمباده های ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ پالیش شده و سپس در محلول ۷۰ درصد حجمی اسید سولفوریک و ۳۰ درصد حجمی اسید نیتریک فعال سازی گردید. برای اعمال پوشش از منبع جریان پالسی با

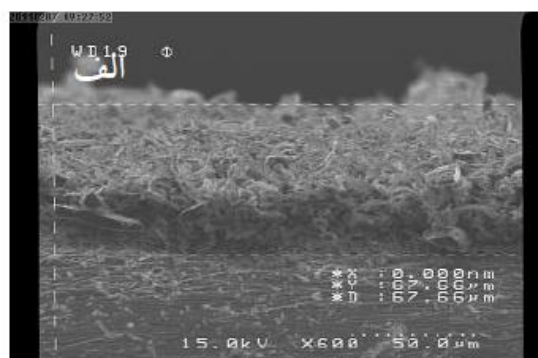
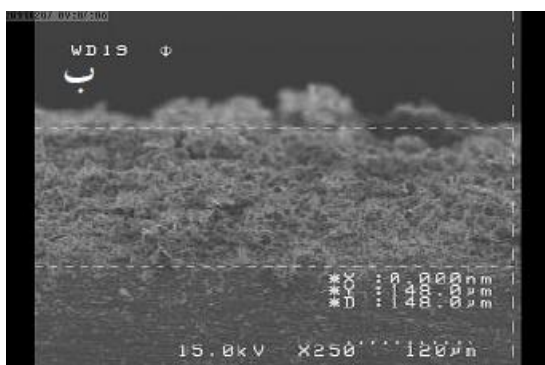
قابلیت تولید پالس مربعی با جریان حداکثر ۵۰ آمپر و فرکانس ها و درصد زمان روشنایی متفاوت استفاده شده است. مورفولوژی پوشش و توزیع ذرات آلومینا در آن با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین درصد وزنی ذرات آلومینا در پوشش آنالیز EDX استفاده کرده است. [۱]

در تولید پوشش های کامپوزیتی نیکل - آلومینا و نیکل - کاربید سیلیسیم، به روش آبکاری الکتریکی می توان تاثیر نوع جریان (پالسی یا مستقیم) بر مورفولوژی و خواص سایشی کامپوزیت ها را بررسی کرد. این دو پوشش کامپوزیتی مقاومت به خوردگی و سایشی بالایی دارند از این رو در صنایع مختلف کاربرد های وسیعی دارند. در این همانند تحقیق های ذکر شده در بالا از حمام آبکاری واتس حاوی ذرات سرامیکی استفاده شده است. پوشش ها با جریان مستقیم تولید شدند. برای مقاومت به سایش و بررسی های ریز ساختاری بررسی شدند. نوع جریان تاثیر مهمی بر رفتار سایشی و بافت کریستالوگرافی سختی، مقدار توزیع ذرات سرامیکی در پوشش دارد. در این تحقیق نیز از همان موادی که در بالا ذکر شده با غلظت و اندازه متفاوت استفاده کرده است. [۲]

علاوه بر موارد ذکر شده پوشش کامپوزیتی زمینه نیکل به همراه عناصری همچون p و Co و مواد سرامیکی همچون، کاربید بور ( $B_4C$ ) و اکسید تیتانیوم ( $TiO_2$ ) بررسی و تولید شده است.

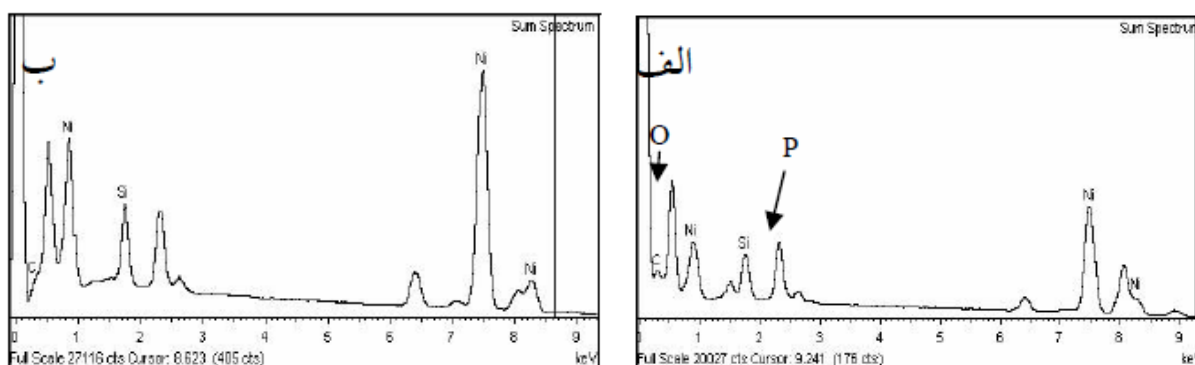
### ۳. نتیجه و بحث

در شکل زیر (شکل ۱) تصویر سطح مقطع پوشش های کامپوزیتی به ترتیب ۱۲ گرم بر لیتر و ۱۸ گرم بر لیتر ذرات کاربید سیلیسیم، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش مقدار ذرات کاربید سیلیسیم در حمام، ضخامت پوشش نیز افزایش می دهد. دلیل این موضوع را می توان در افزایش مشارکت و انباشتگی لایه های کامپوزیتی بر سطح کاتد جست و جو نمود. با توجه به اینکه حمام واتس، حاوی ذرات Gr و SiC می باشد، مکانهای کنج و لبه ای جدید، امکان جوانه زنی بیشتر و با ریز دانه شدن پوشش را فراهم می کنند.



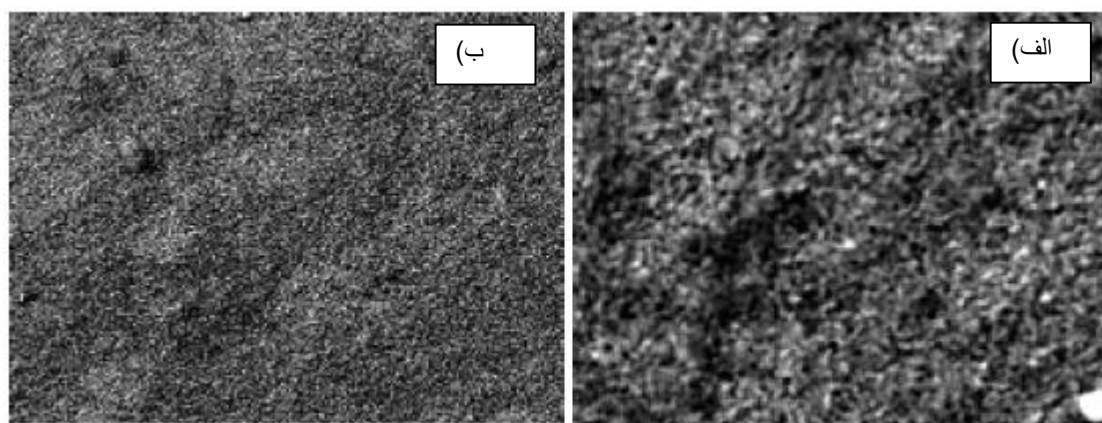
شکل ۱) تصویر FESEM از سطح مقطع پوشش های کامپوزیتی: الف) ۱۲ گرم بر لیتر پودر کاربید سیلیسیم ب) ۱۸ گرم بر لیتر پودر کاربید سیلیسیم

[۱]



شکل ۲) آنالیز عنصری از پوشش های کامپوزیتی : الف) ۱۲ گرم بر لیتر پودر کاربید سیلیسیم ب) ۱۸ گرم بر لیتر کاربید سیلیسیم [۱]

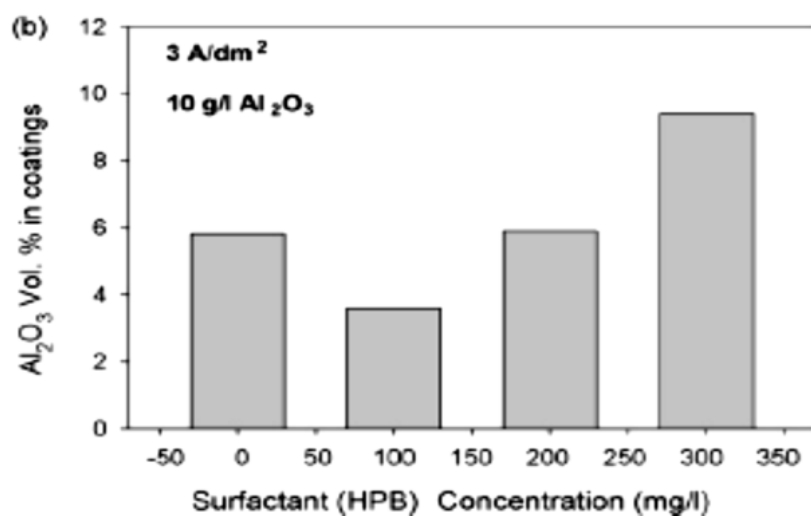
در شکل ۲ نمودار حاصل از آنالیز عنصری از دو پوشش کامپوزیتی به ترتیب ۱۲ گرم بر لیتر و ۱۸ گرم بر لیتر ذرات کاربید سیلیسیم نشان داده شده است. در شکل الف پیک گرافیت (C) نسبت به شکل (ب) قویتر است. همینطور پیک عنصر سیلیسیم (Si)، در شکل ۲ (ب) نسبت به شکل (الف) قویتر می باشد. [۱]



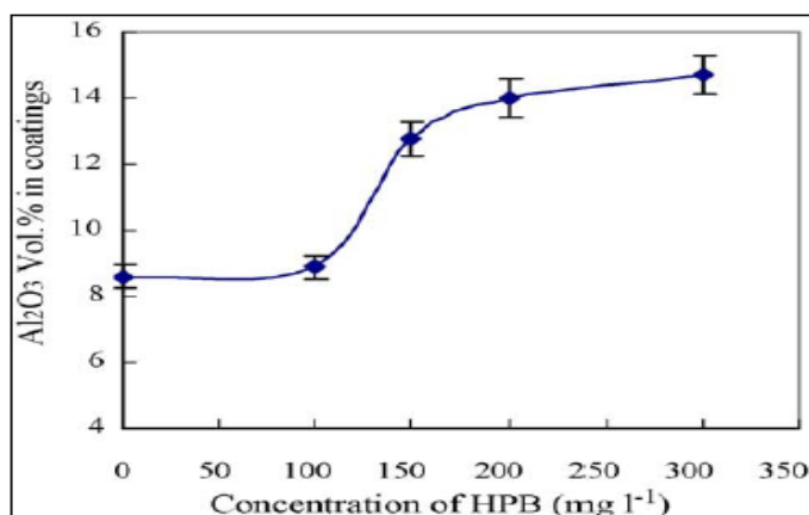
شکل ۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح پوشش نانو کامپوزیتی نیکل - آلومینا : الف) بزرگنمایی (1000x) و ب) بزرگنمایی (2000x) [۴]

در شکل بالا ساختار منسجم و پراکندگی یکنواخت ذرات سرامیکی آلومینا در پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا قابل رویت است.

**تاثیر سرفکتانت بر غلظت آلومینا:** گول و همکارانش پوشش نیکل - آلومینا رسوبدهی الکتریکی DC با دمای حمام ۴۵ درجه سانتی گراد بر روی پایه فولاد اعمال کرد. در شکل ۴ تغییرات غلظت آلومینا در پوشش با تغییر غلظت سرفکتانت آلی HPB ( هگزا دسیل پیریدینیوم برومید ) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می شود بیشترین غلظت آلومینا در پوشش که معادل ۹ درصد حجمی است در غلظت ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر از سرفکتانت اتفاق افتاده است.

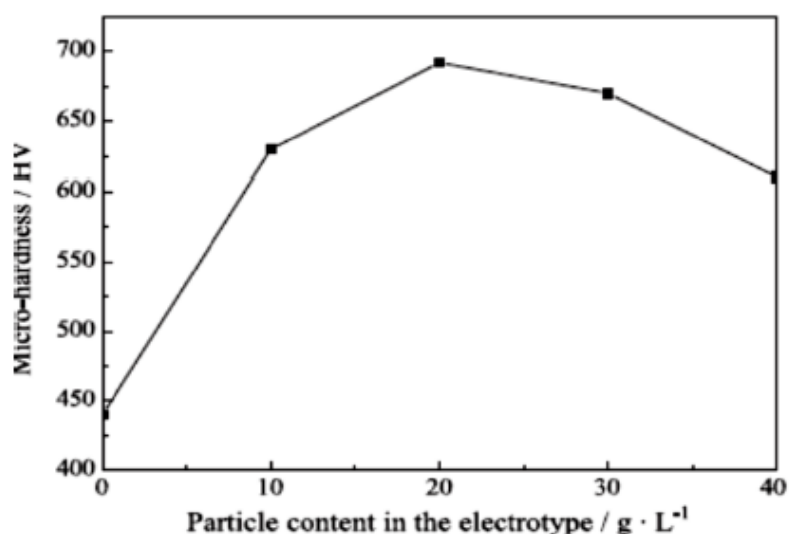


شکل ۴) تغییرات غلظت آلومینا در پوشش با تغییرات غلظت سرفکتانت آلی HPB ( هگزا دسیل پیریدینیوم برمید ) [۳]



شکل ۵) درصد حجمی آلومینای راسب در پوشش با غلظت های مختلف سرفکتانت [۳]

**تأثیر سرفکتانت بر خواص سایشی و اصطکاکی پوشش نیکل - آلومینا :** همانطور که قبلاً اشاره شد حضور هرچه بیشتر ( تا حد بهینه ) ذرات تقویت کننده آلومینا در زمینه نیکلی باعث افزایش سختی و به تبع آن بهبود رفتار سایشی پوشش می شود . [۱۷] در شکل زیر می توان مشاهده نمود که در کامپوزیتها در تمام غلظت های فاز تقویت کننده مکانیزم غالب سایش ، ترکیبی از سایش چسبان و سایش خراشان بوده و کمترین مقدار سایش در نمونه تهیه شده با ۲۰۰ گرم بر لیتر HPB گزارش شده است .

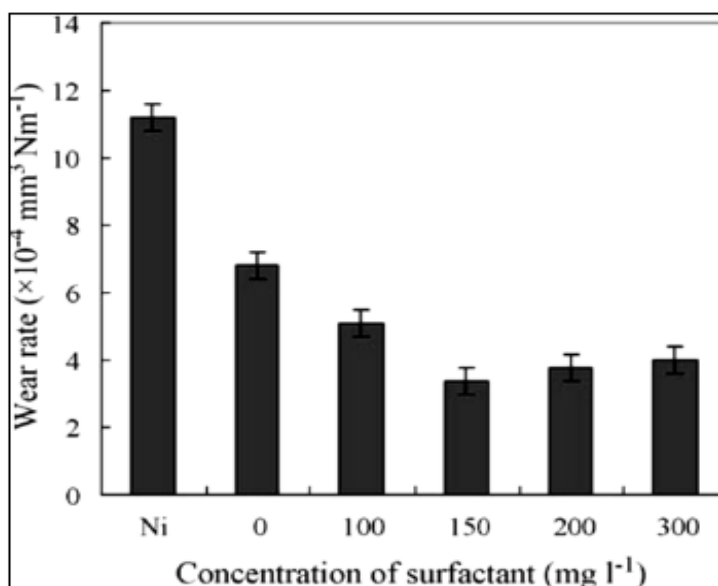


شکل ۶) تغییرات ریز سختی با مقدار ذرات الکترولیت برای پوشش با اندازه ذرات آلومینای حدود ۴۰ نانومتر بوسیله روش رسوبدهی با برس (brush plating) بروی فولاد ۱۰۴۵ [۳]

در پوشش نیکل خالص مسیر سایشی مشابه پوشش بدون سرفکتانت اتفاق افتاده و سایشی با مکانیزم چسبان به همراه لایه لایه شدن شدید تحت نیروهای تنشی و برشی حاصل شده است. در مطالعه دیگری که چن و همکارانش بروی تاثیر افزایش غلظت سرفکتانت روی مقاومت به سایش پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا (با اندازه ذرات 0.8 میکرومتر، بروی فولاد ۱۰۴۵ به روش آبکاری با جریان مستقیم، دانسیته جریان ۳ آمپر بر دسیمتر مربع و دمای حمام ۴۵ درجه (سلسیوس) انجام داده اند به این نتیجه رسیدند که به طور کلی مقاومت سایشی پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا با افزایش مقدار سرفکتانت تا مقداری بهینه

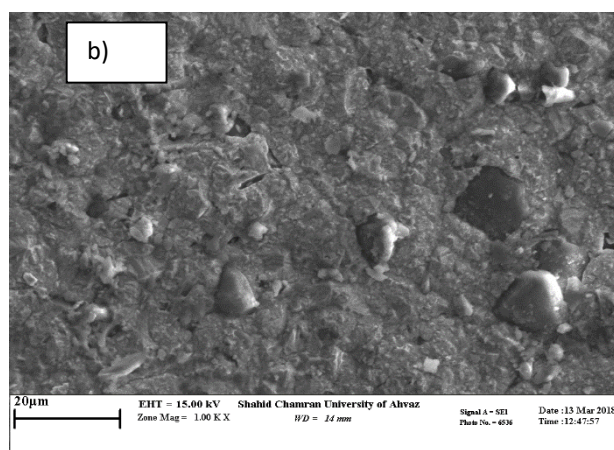
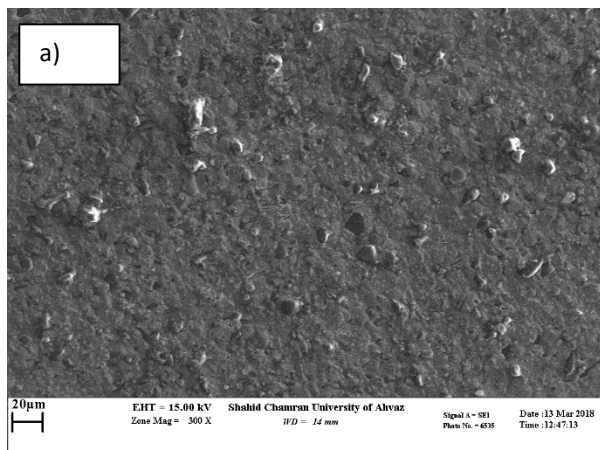
یابد .

افزایش می

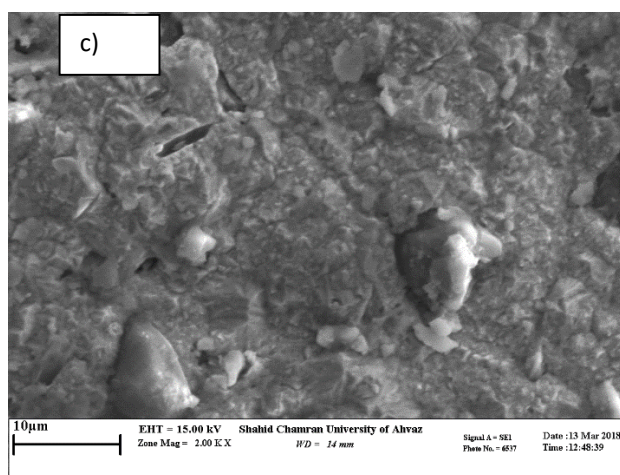


شکل ۷) تاثیر غلظت سرفکتانت بر نرخ سایش پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا، دانسیته جریان ۳ آمپر بر دسیمتر مربع و دمای حمام ۴۵ درجه سلسیوس و پوشش نیکل خالص [۳]

**تاثیر دمای الکترولیت:** به منظور بررسی اثر دما بر روی میزان و نحوه توزیع ذرات آلومینا در پوشش کامپوزیتی، پوشش‌های مختلفی در دماهای ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و PH، 4.5 تولید شده است. در شکل ۸ تصویر SEM پوشش به دست آمده در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که در تصویر a دیده می‌شود توزیع ذرات در پوشش تولید شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد غیر یکنواخت است بصورتیکه توزیع ذرات در بعضی نقاط بصورت متراکم و ریز در بعضی از نقاط، سطح



پوشش خالی از ذره است.



شکل ۸) تصویر SEM پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا، در دانسیته جریان ۵ آمپر بر دسیمتر مربع، سیکل کاری ۳۰ درصد فرکانس ۱۰ هرتز، تلاطم متوسط و PH= 4.5 و در دمای a 30 و b 50 و c 70 درجه سانتیگراد. [۲]

از مقایسه شکل‌های a و b نتیجه می‌شود که با افزایش دما از ۳۰ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد تعداد ذرات اعمال شده در پوشش اندکی کمتر شده اما در عوض توزیع آنها در سطح پوشش یکنواخت‌تر می‌شود. بصورتیکه ذرات در سر تا سر سطح پوشش بصورت ریز و یکنواخت توزیع شده‌اند.

تصویر SEM پوشش بدست آمده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۸ قسمت C نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، شدت آگلومراسیون در این پوشش نسبت به پوشش تولید شده در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر شده و ذرات بصورت کلوخه‌های بسیار درشت و بصورت غیر یکنواخت در سطح پخش شده‌اند.

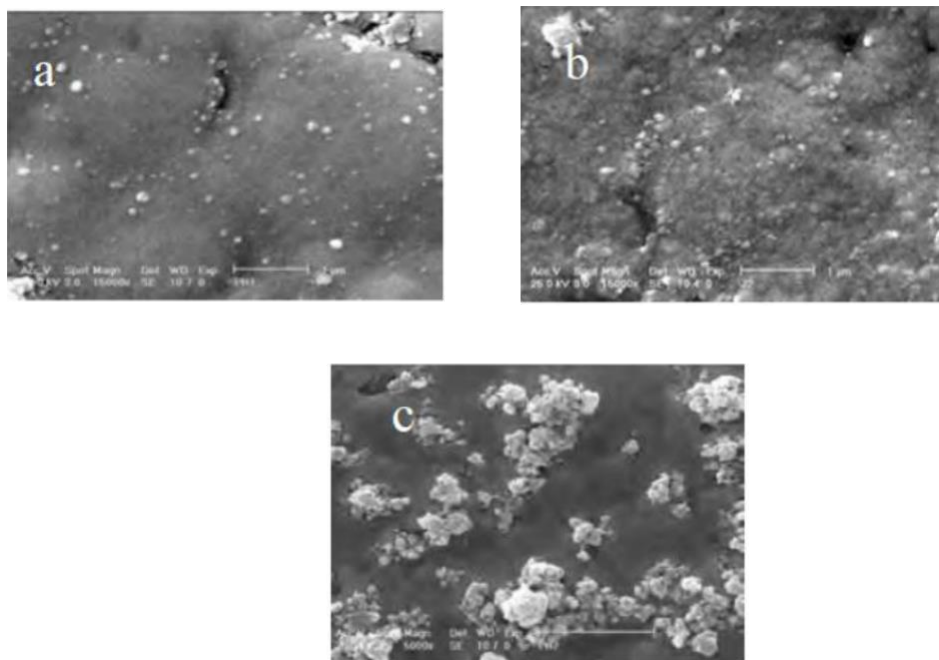


برای کنده نشدن در اثر نیروی برشی محلول و قرار گیری ناقص و یا کامل ( جذب قوی ) در پوششی که با سرعت آهسته در حال رشد است، برخوردار هستند. این مسئله باعث توزیع متراکم ذرات آلومینا در این نقاط و در عین حال توزیع غیر یکنواخت ذرات در سطح کل پوشش می شود. در نتیجه کاهش سرعت رشد فصل مشترک و از طرفی تجمع ذرات در پشت موانع موجود در سطح پوشش در پوشش تولید شده در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد باعث افزایش جزئی درصد وزنی ذرات جذب شده در پوشش نسبت به پوشش تولید شده در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد می شود.

**تاثیر PH الکتروولیت :** به منظور بررسی اثر PH بروی میزان مشارکت و توزیع ذرات آلومینا در پوشش کامپوزیتی ، پوشش هایی در مقادیر مختلف  $PH=2.5$  و  $PH=4.5$  و  $PH=6.5$  تولید شد . در شکل زیر پوشش به دست آمده در PH های مختلف را نشان می دهد . در  $PH=2.5$  ، ذرات بسیار ریز و یکنواخت با قطر متوسط ۹۰ نانومتر در پوشش توزیع شده اند .

با مشاهده این شکل دیده شده که در  $PH=4.5$  ، نیز مانند  $PH=2.5$  توزیع ذرات آلومینا ریز و یکنواخت است و فقط حضور ذرات در پوشش اندکی بیشتر و فاصله بین آنها کمتر شده است . همانگونه که در این تصویر دیده می شود و در  $PH=6.5$  ، ذرات به شدت آگلومره شده اند و حضور آنها در پوشش افزایش پیدا کرده است .

کاهش PH باعث کاهش قطر آگلومره ها و حضور بیشتر ذرات ریز تر در سطح پوشش می شود . علت این امر ، افزایش بار سطحی ذرات با کاهش PH و در نتیجه جلوگیری از آگلومراسیون آنها در محلول می باشد . بر اساس آنچه که در مراجع ذکر شده کاهش PH محلول سبب افزایش پتانسیل زتای ذرات آلومینا می شود ، که در محلول معلق هستند .

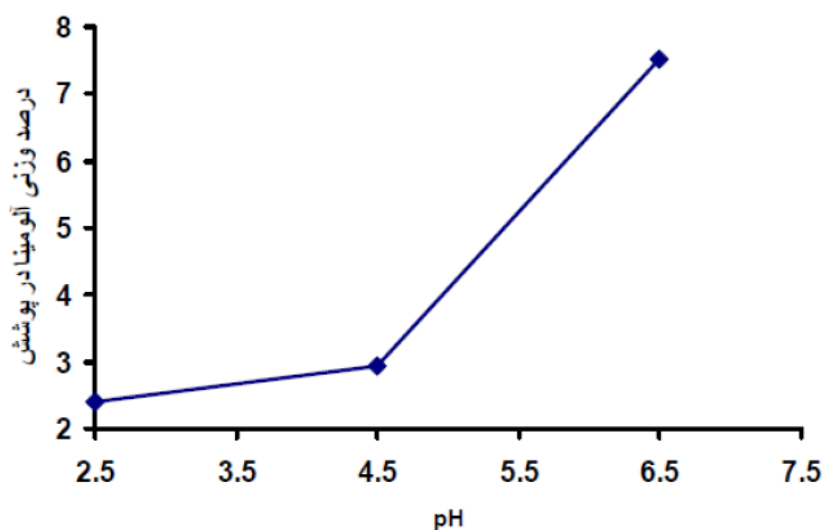


شکل ۹) تصویر SEM پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا ، در دانسیته جریان ۵ آمپر بر دسیمتر مربع ، سیکل کاری ۳۰ درصد ، فرکانس ۱۰ هرتز ، دمای ۵۰ درجه سانتی گراد ، تلاطم در PH های (a) 2.5 و (b) 4.5 و (c) 6.5 [۲]

در شکل ۱۰ درصد وزنی ذرات آلومینا ی پوشش های تولید شده در مقادیر مختلف PH محلول را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که افزایش PH به افزایش درصد وزنی اعمال شده در پوشش منجر می شود. به طور کلی رابطه مستقیمی بین بار سطحی ذرات ( پتانسیل زتا ) و تحرک ذرات وجود دارد با تغییر PH محلول بار سطحی ذرات تغییر می کند. مقادیری از PH که سبب ایجاد بار سطحی مثبت قابل توجه بر روی سطح ذرات می شود، در آبکاری پوشش های کامپوزیتی فلز - ذره مطلوب می باشد، به این ترتیب که ذراتی که دارای بار مثبت زیاد هستند، می توانند در میدان الکتریکی اعمال شده در محلول با سرعت بیشتری به سمت کاتد حرکت کرده و در نتیجه و در نتیجه بیشتر در پوشش قرار بگیرند. از طرفی افزایش بار مثبت سطحی ذرات باعث افزایش نیروی دافعه بین ذرات می شود و به این صورت از آگلومره شدن ذرات جلوگیری می کند. برای تعیین سرعت الکتروفوریتیک ذرات کلوییدی که دارای شکل کروی هستند، ذرات آلومینا به کار رفته در این بررسی، بر اساس فرمول Stokes فرمول زیر قابل کاربرد است.

که در آن E میدان الکتریکی اعمالی، ویسکوزیته محلول، شعاع ذرات، و Z بار سطحی است. بر اساس این فرمول، بار سطحی بالاتر ذره سبب افزایش سرعت حرکت ذره به سمت کاتد می شود.

$$v = \frac{zE}{6\pi\eta r} \quad (1)$$



شکل ۱۰) تاثیر PH بر درصد وزنی آلومینا در پوشش، در دانسیته جریان ۵ آمپر بر دسیمتر مربع، سیکل کاری کاری ۳۰ درصد، فرکانس ۱۰ هرتز، دمای ۵۰ درجه سانتیگراد، تلاطم متوسط [۳]

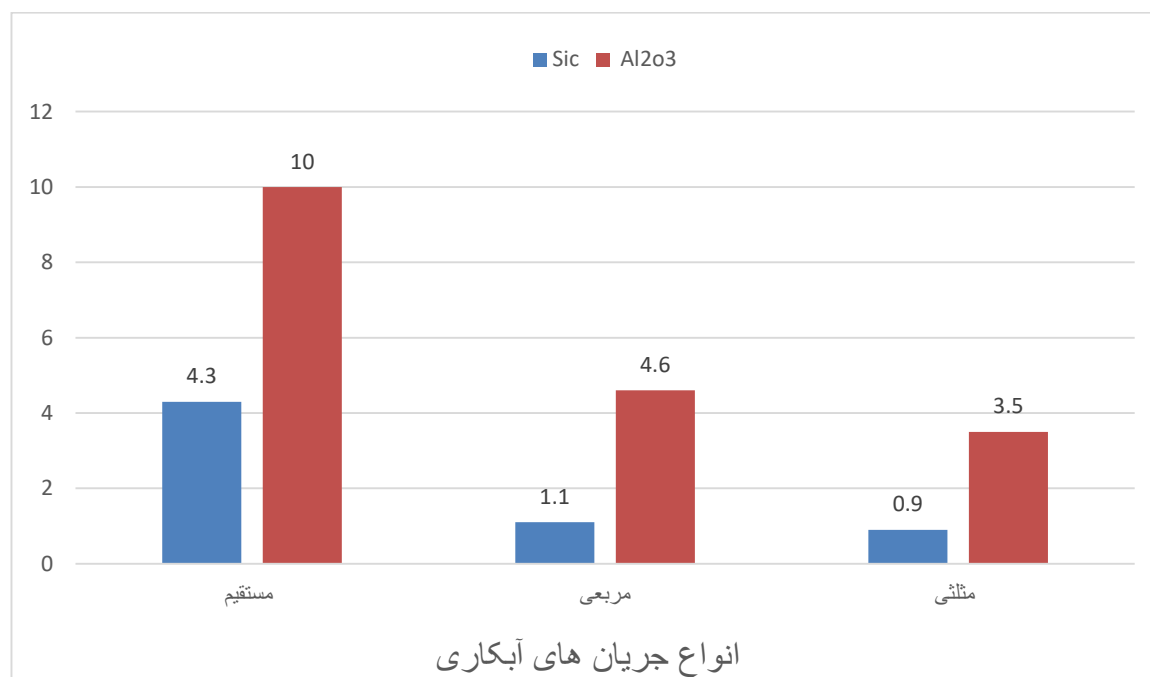
**بررسی نوع جریان بر مورفولوژی:** رسوب همزمان ذرات سرامیکی در پوشش در حال رشد شامل ۵ مرحله متوالی زیر است

- پوشیده شدن ذرات توسط ابر یونی
- حرکت انتقالی ذرات به لایه مرزی هیدرو دینامیکی
- رسیدن ذرات به سطح کاتد بوسیله نفوذ

- احیا یون های آزاد و یون های موجود در سطح ذرات در مجاور کاتد
- جذب قوی ذرات توسط احیای مناسبی از یون های موجود در سطح کاتد

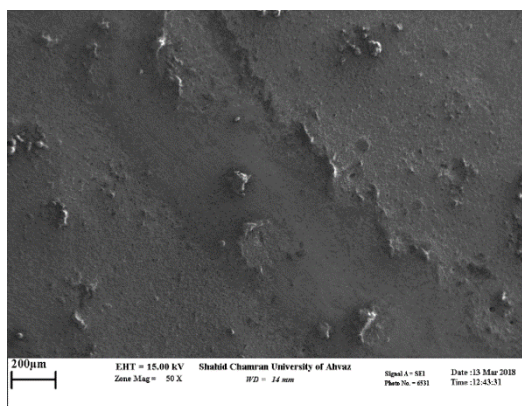
از آنجایی که ذرات دارای انرژی سطحی بالایی هستند تمایل دارند با کلوخه ای شدن انرژی سطحی خود را کاهش دهند. در حین زمان روشنایی کلوخه های با قطر های متفاوت به سطح کاتد می رسند با احیا یون های نیکل در سطح کاتد ، ذرات و کلوخه ها به مرور در پوشش دفن می شوند [۶۰]. در نتیجه کلوخه های با قطر کمتر زودتر و کلوخه های با قطر بیشتر دیر تر در پوشش دفن می شوند .

در شکل بعدی می نتوان مشاهده کرد که درصد وزنی ذرات سرامیکی در پوشش در پالس مثلثی به طور جزئی از پالس مربعی کمتر است [۹۰]. علت این رویداد به احتمال زیاد به زبری کمتر سطح پوشش های تولید شده با پالس مثلثی مربوط است . [۱۰] زیرا زبری کمتری سطح پوشش باعث اعمال نیروی برشی بیشتری بر ذرات موجود در سطح کاتد از طرف محلول می شود و در نتیجه احتمال کنده شدن ذرات بیشتر می شود و این مسئله باعث کاهش مقدار ذرات گیر افتاده در پوشش می شود . [۱۲]

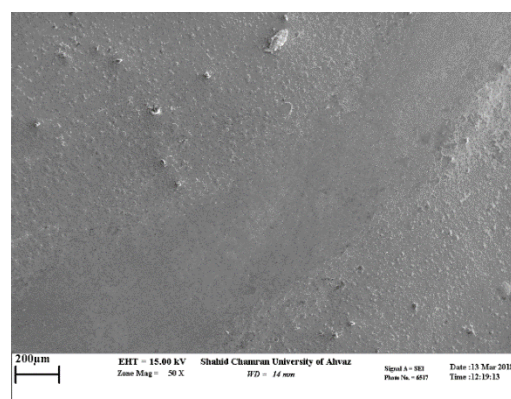


شکل ۱۱) تاثیر نوع جریان بر درصد وزنی ذرات سرامیکی در پوشش های نیکل - آلومینا و نیکل - کاربید سیلیسیم در سیکل کاری ۳۰ درصد و دانسیته جریان ۴ آمپر بر دسی متر مربع و فرکانس ۱۰ هرتز [۲]

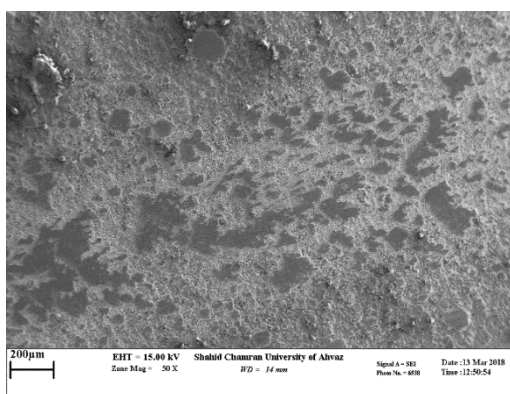
همانطور که در شکل های زیر مشهود است ؛ پوشش کامپوزیتی هیبریدی نیکل / آلومینا-کاربید سیلیسیم مقاومت به سایش بهتری نسبت به سایر پوشش ها، و همچنین ضریب اصطکاک پایین این پوشش کاربرد آن را در پوشش دهی قطعاتی که در معرض اصطکاک هستند ، پیشنهاد می شود ، تا از این طریق از گرمای ناشی از اصطکاک کاسته شود. مورفولوژی سطح سایش یافته نمونه ها در شکل ۱۲ الف تا د نشان داده شده است. کاهش میزان ساییدگی پوشش های کامپوزیتی بخوبی قابل رویت است. مکانیزم سایش در پوشش نیکل / آلومینا از نوع سایش خراشان و در سایر پوشش ها از نوع سایش چسبان است.



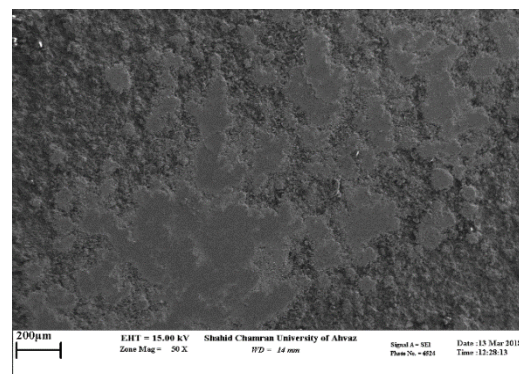
(ب)



(الف)



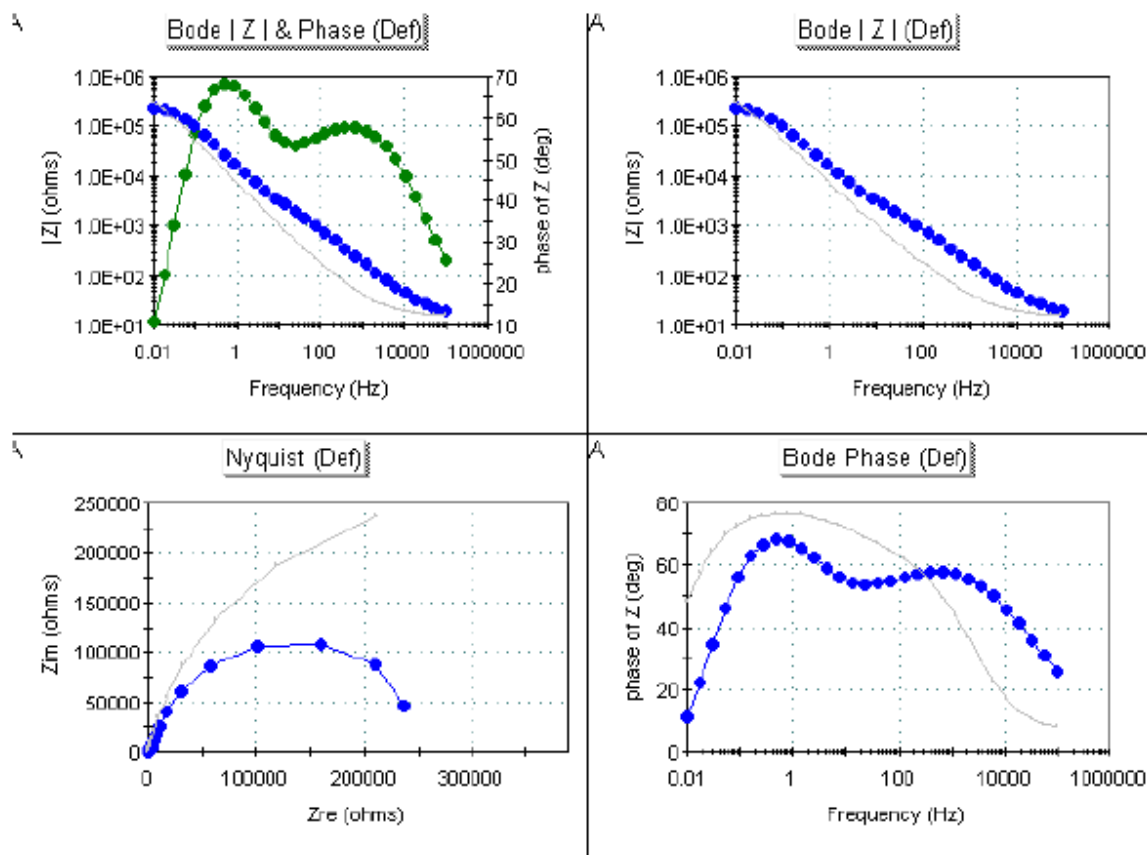
(د)



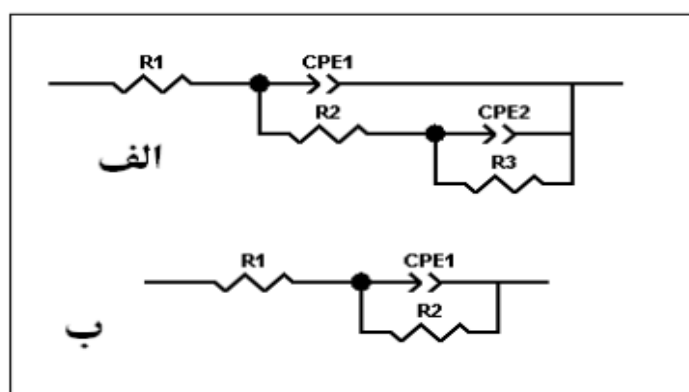
(ج)

شکل ۱۲) مورفولوژی ناحیه سایش: الف) نیکل، ب) نیکل / آلومینا، ج) نیکل / کاربید سیلیسیوم، د) نیکل / آلومینا-کاربید سیلیسیوم [۱۴]

**بررسی مکانیزم واکنش خوردگی توسط آزمون های امیدانس الکتروشیمیایی:** در شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب منحنی های نایکوئیست،  $\theta$  بد و  $\theta$  بد - فاز و مدار معادل پوشش های کامپوزیتی و نیکل خالص را نشان می دهد. همانگونه که در شکل ۱۳ ملاحظه می شود، منحنی های  $\theta$  بد برای پوشش های نیکلی دو نقطه عطف و منحنی های  $\theta$  بد - فاز دو ماکزیمم زاویه فاز را نشان می دهد. بنابراین در این پوشش ها واکنش دارای دو ثابت زمانی است. دلیل این امر شاید به علت وجود میکرو ترک های موجود در پوشش های نیکلی باشد. بنابراین مدار شکل ۱۴ برای واکنش خوردگی در نظر گرفته شد که مدار معادلی مشابه پوشش های معیوب ( حاوی ترک ) برای نیکل می باشد. از طرف دیگر با توجه به شکل ۱۳ منحنی های  $\theta$  بد برای پوشش های یک نقطه عطف داشته و منحنی های  $\theta$  بد - فاز یک ماکزیمم زاویه فاز دارد بنابراین واکنش دارای یک ثابت زمانی خواهد بود. در نتیجه این پوشش ها فاقد میکرو ترک ها و عیوب موجود در پوشش های نیکلی می باشند. همچنین مقادیر ماکزیمم زاویه فاز در پوشش های کامپوزیتی نزدیک به  $80^\circ$  درجه می باشد و نشان دهنده خوردگی یکنواخت در این پوشش ها نسبت به پوشش های نیکل است. مقادیر مقاومت انتقال بار در پوشش های کامپوزیتی  $899 \text{ k}\Omega\text{Cm}^2$  است که بالا تر از مقدار مقاومت انتقال بار به دست آمده برای پوشش نیکلی  $308 \text{ k}\Omega\text{Cm}^2$  می باشد. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که پوشش های کامپوزیتی دارای مقاومت خوردگی بالاتری نسبت به پوشش های نیکلی هستند. [۴]



شکل ۱۳) تصویر منحنی EIS پوشش کامپوزیتی و نیکل خالص ( منحنی پیوسته مربوط به نمودار نانو کامپوزیت با شرایط بهینه و منحنی نقطه چین مربوط به نیکل خالص ) (۴)



شکل ۱۴) مدار معادل به دست آمده برای الف ( پوشش نیکلی ترک دار ب ) شش های نانو کامپوزیت نیکل - آلومینا [۴]

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش با بررسی مطالعات انجام شده نتایج زیر بدست آمد :

- پوشش های نیکل / آلومینا، نیکل / کاربید سیلیسیوم و نیکل / آلومینا-کاربید سیلیسیوم ، توسط فرآیند آبکاری بر روی ورقه مسی و همچنین پوشش نیکل / کاربید سیلیسیم -گرافیت بروی فولاد St37 با موفقیت ایجاد شدند.
- تحت شرایط آبکاری مورد استفاده در این تحقیق، پوشش هایی با زمینه متراکم و عاری از هر گونه ترک و با توزیع یکنواخت ذرات سرامیکی به دست آمدند.
- با افزایش مقدار نانو ذرات SiC در حمام واتس با توجه به مشارکت بیشتر ذرات در پوشش دهی ، مشاهده گردید ، درصد وزنی Si و متعاقب آن سختی پوشش های نانو کامپوزیتی Ni-SiC-Gr به طور پیوسته افزایش یافته و در مقدار نانو ذرات SiC ۲۵ گرم بر لیتر به بیشینه مقدار خود رسید .
- مقدار ۲۵ گرم بر لیتر نانو ذرات SiC میزان بهینه جهت اعمال پوشش نانو کامپوزیتی Ni-SiC-Gr است.
- درصد وزنی ذرات سرامیکی در پوشش های تولید شده با جریان مستقیم بیشتر از پوشش های تولید شده با جریان های پالسی مثلثی و مربعی است .
- کاهش PH باعث کاهش قطر آگلومره ها و حضور بیشتر ذرات ریز تر در سطح پوشش می شود . علت این امر ، افزایش بار سطحی ذرات با کاهش PH و در نتیجه جلوگیری از آگلومراسیون آنها در محلول می باشد .
- در پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا کاهش سرعت رشد فصل مشترک و از طرفی تجمع ذرات در پشت موانع موجود در سطح پوشش در پوشش تولید شده در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد باعث افزایش جزئی درصد وزنی ذرات جذب شده در پوشش نسبت به پوشش تولید شده در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد می شود.
- نرخ سایش پوشش نیکل / آلومینا کمتر از نیکل تنها، نرخ سایش پوشش نیکل / کاربید سیلیسیوم کمتر از نیکل / آلومینا و نرخ سایش پوشش هیبریدی نیکل / آلومینا-کاربید سیلیسیوم تحت شرایط تست سایش مورد استفاده صفر بود.
- ضریب اصطکاک پوشش نیکل / آلومینا کمتر از نیکل تنها، ضریب اصطکاک پوشش نیکل / کاربید سیلیسیوم کمتر از نیکل / آلومینا و ضریب اصطکاک پوشش هیبریدی نیکل / آلومینا-کاربید سیلیسیوم از سایر نمونه ها کمتر بود، لذا پوشش هیبریدی جهت استفاده در قطعات تحت اصطکاک به دلیل کاهش حرارت حاصل از اصطکاک پیشنهاد می گردد.
- استفاده از نانو ذرات آلومینا در پوشش های پایه نیکل منجر به ریز دانه شدن ریز ساختار و نتیجه افزایش سختی و استحکام می شود .
- با افزایش میزان سر فکانت و ذرات آلومینا موجود در حمام رسوبدهی غلظت آلومینا در پوشش افزایش یافته که منجر به افزایش سختی پوشش می شود .
- باتوجه به بررسی مکانیزم واکنش خوردگی توسط آزمون های امپدانس الکتروشیمیایی نمونه پوشش کامپوزیتی نیکل - آلومینا و نیکل خالص به دلیل میکرو ترک های موجود در پوشش های نیکلی این پوشش ها ، واکنش دارای دو ثابت زمانی است .

## مراجع

- [۱] رستمی، محسن، ابراهیمی، رضا، ساعتچی، محسن، "اثر افزایش مقدار مقدار نانو ذرات SiC، بر سختی پوشش های نانو کامپوزیتی Ni-SiC-Gr حاصل از آبکاری الکتریکی" اردیبهشت ۱۳۹۲
- [۲] لاری بقال، محمد، رحیمی، علی، آماده، احمد علی، مرادی، هادی، "تاثیر نوع جریان آبکاری بر مورفولوژی و خواص سایشی نانو کامپوزیت های Ni-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Ni-SiC"، هشتمین همایش ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه شهید با هنر کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۶
- [۳] خرسند، حمید، کیایی، نسیم، "پوشش های نانو کامپوزیتی نیکل - آلومینا"، دومین همایش ملی هیدرات گازی ایران، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه سمنان، اردیبهشت سال ۱۳۹۲
- [۴] دانشی، جواد، نصر اصفهانی، علیرضا، جعفری، عبدالحمید، گردانی، علیرضا، "بررسی رفتار خوردگی پوشش های نانو کامپوزیتی نیکل - آلومینا حاصل از آبکاری الکتریکی منقطع" خرداد ۱۳۹۱
- [۵] سیادت چراغی، محسن، اله کرم، سعید رضا، توحیدی، ناصر، "تاثیر نوع جریان رسوب گذاری الکتریکی بر ریز ساختار و مقاومت به خوردگی پوشش نانو کبالت"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران، اردیبهشت ۱۳۹۴
- [۶] آل آقا، احسان، لاری بقال، محمد، آماده، احمد علی، حیدر زاده سهی، محمود، "بررسی تاثیر پارامتر های جریان پالسی معکوس بر ریز ساختار و سختی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-CO/SiC"، ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و انجمن علمی ریخته گری ایران، خرداد ۱۳۹۳
- [۷] سیفی، سیف اله، شفیعی، علی، نوزاد گلی کند، احمد، نجفی زاده، عباس، "تاثیر افزودن نانو ذرات TiO<sub>2</sub> بر سختی پوشش های کامپوزیتی الکترولس نیکیل - فسفر" سمپوزیوم فولاد ۹۳، انجمن آهن و فولاد ایران، شهریور ۱۳۹۵
- [۸] قاسمی، احمد رضا، عامری، بهنام، "استفاده از نانو کامپوزیت ها در کنترل خوردگی فلزات"، چهارمین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی، شهریور ۱۳۹۵
- [۹] نصر اصفهانی، علیرضا، دانشی فر، جواد، فرمنش، "تاثیر پتانسیل زتا بر نحوه رسوب نانو ذرات خنثی در پوشش های نانو کامپوزیتی حاصل از آبکاری الکتریکی منقطع"، خرداد ۱۳۹۴
- [۱۰] صادقی، امیر، آذری فروشاهی، رسول "مقایسه ریز سختی، مقاومت به خوردگی و نفوذ هیدروژنی پوشش نیکل و پوشش کامپوزیتی Ni-nano.TiO<sub>2</sub> تولید شده به روش رسوب دهی الکتریکی"، همایش علوم و مهندسی سطح، سال ۱۳۹۰

[۱۱] کاظمی خالیدی، مهدی، آماده، احمد علی، مرادی، هادی، لاری بقال، محمد، " بررسی عوامل موثر بر بافت کریستالوگرافی پوشش های نانو ساختار نیکل - کبالت به روش آبرکاری الکتریکی، " چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران، "دی ماه ۱۳۹۲

[۱۲] نوروزیان کرمانی، ایران، رحیمی، مرتضی، ابراهیمی فر، هادی، " تاثیر PH بر میکرو ساختار خوردگی پوشش کامپوزیتی CO-P-nanoAL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، " اردیبهشت ۱۳۹۷

[۱۳] زراعی نژاد، سارا، ثانی، راضیه، " ارزیابی رفتار مکانیکی پوشش کامپوزیتی نانو ساختار Ni-P/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiC، " مجله مواد نوین، جلد ۱۰، شماره ۳، بهار ۱۳۹۹

[۱۴] چناری، پریسا، " ساخت پوشش کامپوزیتی هیبریدی Ni / AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC با فرآیند آبرکاری و مقایسه مقاومت به سایش آن با پوشش های همگن، " M.SC، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، شهریور ۱۳۹۷

[15] Wang W., Hou F.Y., Wang H., Guo H.T., 2005, *Fabrication and characterization of Ni-ZrO<sub>2</sub> composite nano-coatings by pulse electrodeposition*, Scripta Materialia, 53, 613-618.

[16] Chen L., Wang L., Zeng Z., Xu T., 2006, *Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings*, Surface and Coatings Technology, 201, 599-605.

[17] Feng Q., Li T., Tang H., Zhang X., Zhang Y., Liu C., Jinn J., 2008, *Investigation on the corrosion and oxidation resistance of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-composite coatings prepared by sediment code position*, Surface and Coatings Technology, 202, 4137-4144.

[18] Thiamin D., Bund A., 2008, *Characterization of electrodeposited Ni-TiO<sub>2</sub> nanocomposite coatings*, Surface and Coatings Technology, 202, 2976-2984.

[19] Kim M.J., 2009, *Oxide-dispersed nickel composites and the behavior of their mechanical properties*, Metals and Materials International, 15, 789-795.

[20] Raiding X., July W., Zhongcheng G., Hua W., 2008, *Effects of rare earth on microstructures and properties of Ni-W-P-CeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Nano-composite coatings*, Journal of Rare Earths, 26, 579-583.

[21] Vaezi M.R., Sadrnezhaad S.K., Nikzad L., 2008, *Electrodeposition of Ni-Sic Nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 315, 176-182.