

## بررسی تأثیر دمای پوشش دهی بر خواص و رفتار خوردگی پوشش کامپوزیتی نیکل- گرافن ایجاد شده بر روی سطح مس

آرش رحیمی<sup>۱</sup>، محمدرضا واعظی<sup>۲\*</sup>، مهدی یاری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

<sup>۲</sup>پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشگاه فناوری نانو و مواد پیشرفته، کرج، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۱۰/۱۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۷/۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴

**چکیده** در این تحقیق تأثیر دمای حمام پوشش دهی بر رفتار پوشش های کامپوزیتی نیکل-گرافن و تأثیر آن بر روی مورفولوژی و خواص خوردگی این پوشش ها مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از حمام سولفامات نیکل عاری از مواد افزودنی به همراه ذرات گرافن استفاده شد و فرآیند آبکاری الکتریکی با استفاده از جریان DC و در سه دمای ۳۵، ۴۵، ۵۵ °C انجام پذیرفت. سپس با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی پوشش بررسی گردید. همچنین با استفاده از نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک رفتار خوردگی پوشش بررسی شد. نتایج نشان داد که رسوب تولید شده از حمام سولفامات نیکل حاوی ذرات گرافن و بدون افزودنی با استفاده جریان DC در دماهای مختلف باعث ایجاد بافت قوی (۲۰۰) و بافت سخت (۱۱۱) در پوشش می گردد. همچنین افزایش دما تا حدود ۵۰ °C باعث افزایش جذب ذرات گرافن در پوشش می شود، اما با افزایش بیشتر دما میزان جذب ذرات گرافن کاهش می یابد. همچنین با افزایش دما صفحات گرافن میل به توده ای شدن و آگلومره شدن پیدا می کنند که سبب عدم یکنواختی در پوشش شده و به همین دلیل مقاومت به خوردگی پوشش کاهش پیدا می کند.

**کلمات کلیدی:** پوشش کامپوزیتی، آبکاری الکتریکی، نیکل، گرافن، مورفولوژی، مقاومت به خوردگی.

## Effect of Temperature on Properties and Corrosion Behavior of Electroplated Nickel- Graphene Composite Coating

Arash Rahimi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Vaezi<sup>2\*</sup>, Mehdi Yari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Islamic Azad University, Department of corrosion, Science & Research Branch, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Materials & Energy research Center, Department of Nano Technology & Advanced materials, Tehran, Iran.

**Abstract** In this study the effect of electroplating bath temperature on the behavior of nickel-Graphene composite coating and also on the morphology and corrosion properties were investigated. For this reason nickel sulfamate additive free bath with graphene were used. Electroplating process was carried out with DC generator and at three temperatures (35, 45, 55 °C). surface morphology and crystallographic texture of electroplating nickel- graphene were investigated with Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM). Corrosion behavior of nickel-Graphene coating were investigated with potential dynamic polarization test results. Results shown that to increases in temperature also will cause increases in Graphene Nano particles absorption but up to 50 °C the absorption of graphene reduce. Also increases in temperature will cause Graphene Nano particles agglomerated and lack of uniformity in the coating. As a result the corrosion resistance of the coating is reduced.

**Keywords:** Composite Coating, Electroplating, Nickel, Graphene, Morphology, Corrosion Resistance.

## ۱- مقدمه

آبکاری الکتریکی یکی از روش‌های مناسب برای تولید پوشش‌های نانوکامپوزیتی است. در پوشش‌های نانو کامپوزیتی قطر ذرات تقویت کننده از ابعاد میکرومتری به نانومتری کاهش پیدا می‌کنند و این امر باعث می‌شود که سختی، استحکام، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی پوشش به مقدار قابل توجهی افزایش یابند. دستیابی به این خصوصیات باعث کاربرد وسیع پوشش‌های نانوکامپوزیتی در صنایع مختلف شده است [۱].

ایجاد پوشش‌های نانوکامپوزیتی به وسیله آبکاری الکتریکی شامل ذرات جامد به صورت اکسید سخت مانند:  $WC$ ،  $SiC$ ،  $SiO_2$ ،  $TiO_2$ ،  $Al_2O_3$  و نیتrideها مانند:  $AIN$  و ساختارهای مختلف کربن مانند: الماس، گرافیت، نانولوله‌های کربنی و حتی ذرات پلیمری در زمینه‌ای از فلز یا آلیاژ موضوعی است که در چند دهه گذشته مورد توجه خاص محققین بوده و این پوشش‌ها در طی یک مرحله عملیات آبکاری الکتریکی قابل ایجاد هستند. در این عملیات نیازی به درجه حرارت بالا، ایجاد خلاء و استفاده از تجهیزات گران قیمت نمی‌باشد. به علاوه پوشش به دست آمده عاری از هرگونه تخلخل است، از این رو نیاز به پس عملیات ندارد [۲،۱].

با تغییر پارامترهای فرآیند آبکاری میزان حضور ذرات فاز دوم در زمینه را به سادگی می‌توان کنترل کرد و به این ترتیب به خواص مطلوب دست یافت. ذرات با ابعاد نانو، رسوب‌دهی پوشش‌های لایه نازک را امکان‌پذیر ساخته‌اند. نانوذرات در مرزخانه‌ها از حرکت نابجایی‌ها و تبلور مجدد در دمای بالا جلوگیری می‌کنند. بنابراین ریز سختی و پایداری حرارتی افزایش می‌یابد. به کارگیری نانو ذرات به عنوان فاز ثانویه و ایجاد پوشش‌های نانوکامپوزیتی با بهره‌گیری از خواص ذرات و نانوساختارها، فصل جدیدی را در تاریخچه این پوشش‌ها گشود [۱].

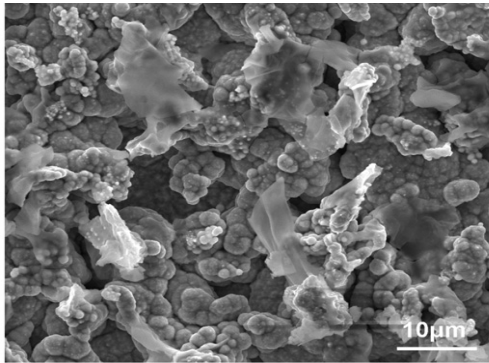
استفاده از نانولایه‌ها در کاربردهای مختلف تکنولوژی تا حد زیادی به ترکیب، مورفولوژی و ویژگی‌های ساختاری آن بستگی دارد که به طور مستقیم مربوط به شیوه آماده‌سازی و شرایط رسوب (از جمله چگالی جریان، زیرلایه، pH، غلظت

یون‌ها، اندازه و مقدار نانوذرات، تلاطم الکترولیت و غیره) بستگی دارد. بنابراین، بررسی صحیح خواص شیمیایی و فیزیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی به منظور بهینه‌سازی ترکیب و در نتیجه عملکرد آن‌ها الزامی است. خصوصیات شیمیایی سریع و درست از لایه‌های نانوساختاری، به منظور کمک به درجه پراکندگی نانوذرات در زمینه فلزی و به علاوه بررسی کیفیت تولید از اهمیت زیادی برخوردار است [۱].

میزان بهبود خواص این نوع کامپوزیت‌ها بستگی به جنس ذرات تقویت کننده، اندازه ذرات، درصد و نحوه توزیع ذرات در زمینه فلزی دارد. پوشش‌های زمینه نیکل حاوی انواع ذرات تقویت کننده کربنی اعم از ذرات گرافیت، نانولوله‌های کربنی و به تازگی گرافن، دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع اتومبیل‌سازی، هوافضا و دریایی می‌باشند. به عنوان مثال، جهت محافظت از سطوح اجزای داخلی سیستم‌ها در برابر درجه حرارت‌های بالا، ضربه، اصطکاک شدید و خوردگی کاربرد وسیعی دارند. همچنین برای محافظت از سطوحی که نیازمند هدایت الکتریکی بالا، سختی زیاد و مقاومت به خوردگی بالا هستند مانند پیل‌های سوختی و قطعات الکترونیکی کاربردی در صنایع الکترونیک دریایی و هوایی نیز کاربرد دارند. این پوشش‌ها در حقیقت جایگزین پوشش‌های حاصل از آبکاری کرم شده که به دلیل مسائل زیست‌محیطی جایگاه خود را از دست داده‌اند [۳].

نوع دیگری از این پوشش‌ها که اخیراً مورد توجه قرار گرفته، پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-گرافن می‌باشد. پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-گرافن علاوه بر کاربردهای فراوان در مواردی که مقاومت به خوردگی و سختی بالایی نیاز دارند، کاربردهای ویژه‌ای از قبیل استفاده به عنوان هادی جریان الکتریسته در صنایع الکترونیک هوایی و دریایی، حسگرها و پوشش‌دهی صفحات پیل‌های سوختی و خورشیدی را می‌توان نام برد [۴].

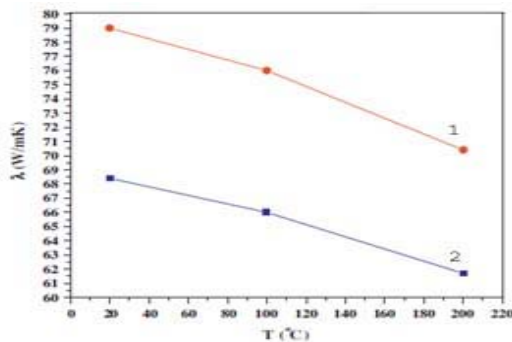
در شکل (۱) تصاویر میکروسکوپی از پوشش‌های رسوب‌دهی الکتریکی Ni-Graphene از حمام واتز در چگالی جریان  $1 \text{ A/dm}^2$  در دمای  $40^\circ \text{C}$  و مدت زمان پوشش‌دهی ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهد. در این پوشش، توزیع یکنواختی از ورقه‌های گرافن را نشان داده شده است [۵].



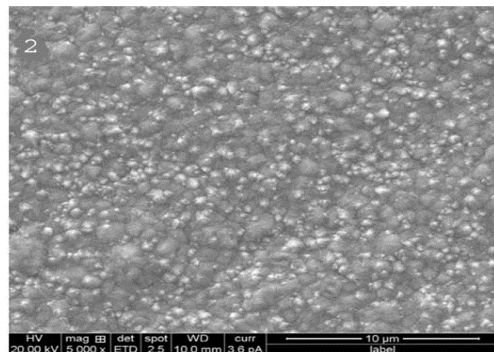
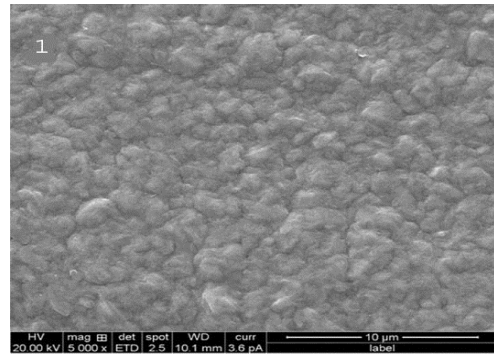
شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از پوشش‌های رسوب‌دهی الکتریکی Ni-Graphene در حمام سولفامات نیکل [۳].

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مشاهده می‌گردد که ذرات گرافن در سطح کاتد جذب شده و سپس به سرعت با رشد رسوبات مواجه می‌شود. بنابراین، پوشش‌های پراکنده Ni-Graphene محتوی ذرات سخت‌تر می‌باشد [۳،۶].

همچنین با توجه به شکل (۲) کریستال‌های نیکل کروی در بیشتر نواحی این پوشش مشاهده شده که ورقه‌های نازک گرافن سطح آن‌ها را پوشانده و در بعضی نقاط نیز ورقه‌های گرافن به صورت به هم پیوسته در سطح قرار گرفته‌اند [۳]. هدایت حرارتی پوشش‌های کامپوزیتی حاوی گرافن در حدود ۱۵٪ بیشتر از هدایت حرارتی پوشش نیکل خالص است، دلیل این موضوع نیز هدایت حرارتی بسیار خوب ورقه‌های گرافن بوده که سبب کارایی این پوشش‌ها در حسگرهایی است که در محیط‌های خورنده استفاده می‌شوند، از جمله سنسورهایی که در صنایع دریایی و هوایی کاربرد دارد [۳،۶].



شکل ۳. منحنی هدایت حرارتی پوشش‌های (۱) نیکل (۲) Ni-Graphene [۳].



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی از پوشش‌های (۱) نیکل (۲) Ni-Graphene در حمام واتر [۵].

سطح مورفولوژی پوشش نیکل-گرافن به نسبت پوشش نیکل خالص دارای دانه‌های ریزتر، روشن‌تر، یکنواخت‌تر و برآمدگی‌های کمتری است. علاوه بر این بررسی سطح نشان می‌دهد گرافن در حین جانشینی بر روی زیر لایه جذب شده که از رشد کریستال جلوگیری نموده و مکان‌های جوانه‌زنی را برای احیای یون‌های نیکل افزایش می‌دهد. این امر سبب دانه‌بندی مناسب و چیدمان یکنواخت کریستال‌های نیکل موجود در پوشش کامپوزیتی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد اندازه دانه‌های پوشش نیکل-گرافن در حدود ۲۰nm و اندازه دانه‌های پوشش نیکل خالص ۳۰nm است [۵].

شکل (۲) تصویر میکروسکوپی از پوشش‌های رسوب‌دهی الکتریکی Ni-Graphene از حمام سولفامات نیکل در چگالی جریان  $5 \text{ A/dm}^2$  در دمای  $55^\circ\text{C}$  و مدت زمان پوشش‌دهی ۲۰ دقیقه را نشان می‌دهد. در این پوشش، توزیع یکنواختی از ورقه‌های گرافن نشان داده نشده، که دلیل این موضوع نیز رفتار گرافن در دمای بالای  $50^\circ\text{C}$  و همچنین اثر افزایش چگالی جریان بر روی گرافن است که سبب کاهش یکنواختی پوشش می‌شود [۳].

همچنین بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که ضخامت یک تک لایه اکسید گرافن تولید شده برای این پژوهش برابر  $0.8245 \text{ nm}$  می‌باشد.

حمام مورد استفاده در این پژوهش از نوع حمام سولفامات نیکل بوده و ترکیب شیمیایی و میزان آن در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی محلول (حمام سولفامات نیکل).

مقدار (g/l)	نوع ماده (فرمول شیمیایی)
۳۵۰	سولفامات نیکل $\text{Ni}(\text{SO}_4 \cdot \text{NH}_4)_2$
۱۰	کلرید نیکل $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
۴۰	اسید بوریک $\text{H}_3\text{BO}_3$
۱	گرافن

در طی فرآیند آبکاری، ورقه‌ای از جنس نیکل با ضخامت  $2 \text{ mm}$  به عنوان آند استفاده شد.

در این تحقیق سعی شده پوشش نانوکامپوزیتی نیکل-گرافن به روش آبکاری الکتروشیمیایی با استفاده از جریان مستقیم (DC) و با استفاده از حمام سولفامات نیکل بر روی سطح نمونه‌های مسی ایجاد شود. در ادامه نیز اثر تغییرات دما بر روی میزان مقاومت به خوردگی، سختی، مورفولوژی و میزان ذرات موجود در پوشش بررسی شده است. برای این منظور از آنالیز XRD و EDS، میکروسکوپ‌های FESEM و AFM و همچنین دستگاه پلاریزاسیون استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل (۵) الگوهای تفرق پرتو اشعه ایکس پوشش‌های نانوکامپوزیتی نیکل-گرافن در چگالی جریان‌های  $1 \text{ A/dm}^2$  و دمای  $45^\circ \text{C}$  و در مدت زمان ۹ دقیقه نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، به دلیل این که غلظت ذرات گرافن در پوشش کمتر از ۵ درصد حجمی بوده، فاز مربوط به نانوذرات گرافن دیده نشد.

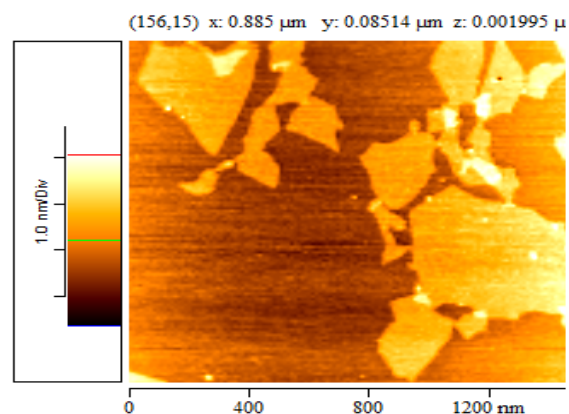
پیکهای تفرق یافته در شکل (۵) مربوط به صفحه‌های کریستالی (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) ساختار نیکل می‌باشند. این پیک‌ها مطابق با الگوی تفرق پرتو اشعه ایکس ساختارهای FCC هستند. در مقایسه سه الگوی تفرق پرتو اشعه ایکس، تغییر ترجیحی جهت‌گیری رشد Ni در کامپوزیت بعد از احیای

در این تحقیق تأثیر دمای حمام پوشش‌دهی بر رفتار پوشش‌های کامپوزیتی نیکل گرافن و نیز تأثیر آن بر روی مورفولوژی و خواص خوردگی این پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

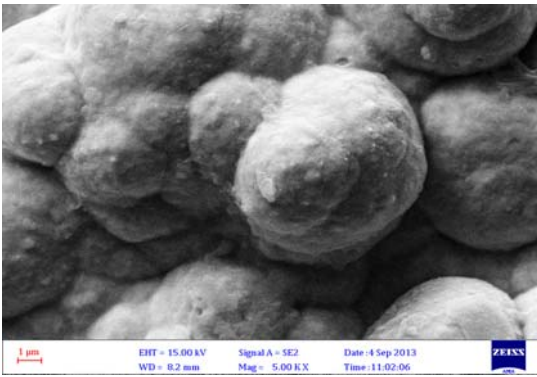
### ۲- روش تحقیق

در این پژوهش از ورق مسی با خلوص ۹۹/۹۹٪ به ابعاد  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  و ضخامت  $0.7 \text{ cm}$  (به منظور بررسی مورفولوژی سطح، تعیین ساختار، مقاومت به خوردگی و سختی) به عنوان زیرلایه استفاده شد. برای آماده‌سازی، ابتدا نمونه‌ها توسط سمباده کاربید سیلیسیمی از شماره ۳۲۰ تا ۲۰۰۰ پرداخت بعد از آن به مقدار کمی پولیش شدند. سپس براساس استاندارد ASTM B ۲۸۱ تحت عملیات چربی‌گیری و اکسیدزدایی قرار گرفتند.

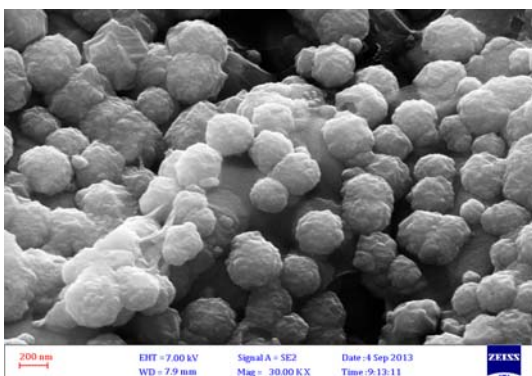
در این تحقیق یون‌های نیکل ( $\text{Ni}^{2+}$ ) و نانو صفحات اکسید گرافن به صورت الکتروشیمیایی احیا شده و کامپوزیت‌های نیکل-گرافن شکل می‌گیرند. همچنین برای انجام این پژوهش از اکسیدگرافن تولید شده به روش هامرز استفاده شده است [۷]. تصویر نانو صفحات اکسید گرافن مورد استفاده در این پژوهش توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



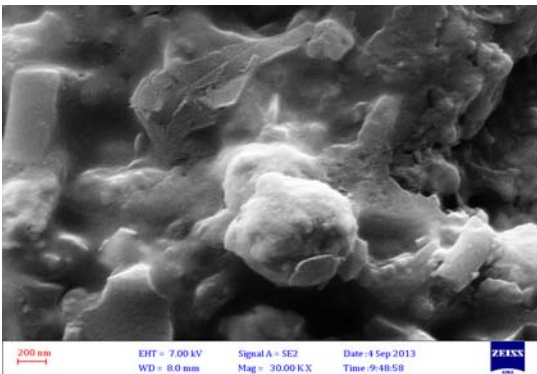
شکل ۴. تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از نمونه اکسید گرافن.



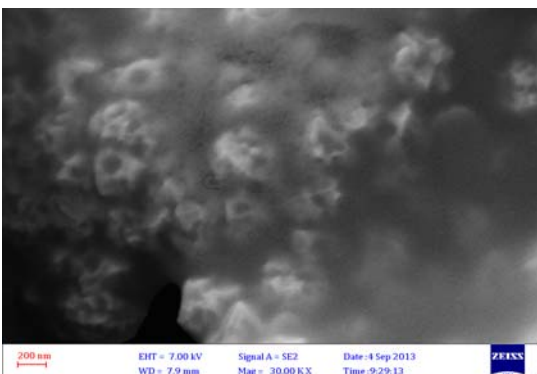
شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) نیکل خالص.



(الف)



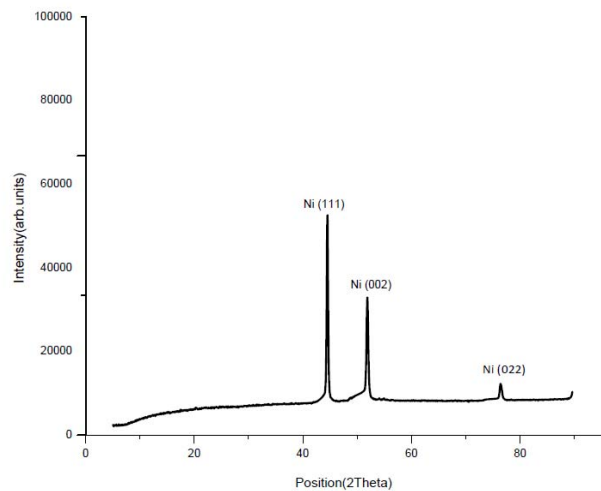
(ب)



(ج)

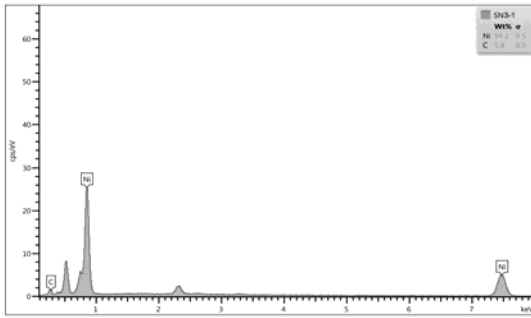
شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) نیکل خالص (الف) ۳۵°C (ب) ۴۵°C (ج) ۵۵°C.

الکتروشیمیایی گرافن با افزایش دما وجود دارد. همچنین پیک قوی (۱۱۱) نشان دهنده آن است که نیکل در آبکاری الکتریکی پوشش‌های کامپوزیتی تمایل بیشتری به رشد ساختار در جهت (۱۱۱) نسبت به جهت (۲۰۰) دارد و می‌تواند این‌گونه برداشت کرد که نیکل می‌تواند در حین آبکاری الکتریکی بر روی صفحات گرافن احیا شده و رشد کند. بنابراین، نقاط جوانه زنی جدید می‌توانند منجر به تغییر جهت گیری ترجیحی رشد نیکل از (۲۰۰) به (۱۱۱) شوند [۳].

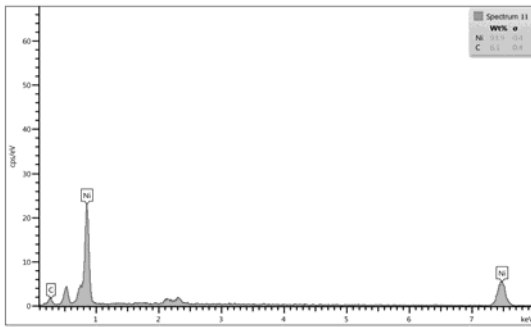


شکل ۵. الگوی تفرق پرتو اشعه ایکس (XRD) از سطح پوشش به دست آمده در چگالی جریان  $1 \text{ A/dm}^2$ ، ۳ و مدت زمان ۹ دقیقه و دمای  $45^\circ\text{C}$ .

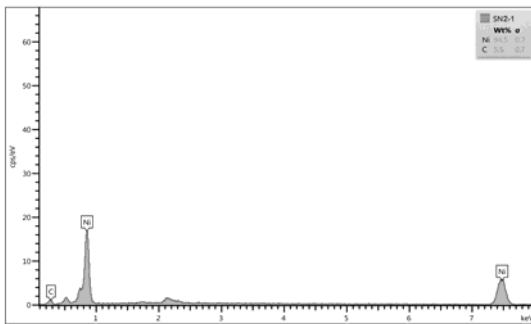
شکل (۶) تصویر FESEM سطح پوشش نیکل خالص ایجاد شده در چگالی جریان  $1 \text{ A/dm}^2$  و در مدت زمان ۹ دقیقه و دمای  $45^\circ\text{C}$  و در شکل (۷) تصاویر FESEM سطح پوشش‌های کامپوزیتی Ni-Graphene به دست آمده از محلول آبکاری حاوی  $1 \text{ g/l}$  نانوذرات گرافن، در مدت زمان پوششدهی ۹ دقیقه و چگالی جریان  $1 \text{ A/dm}^2$  و در سه دمای  $35^\circ\text{C}$ ،  $45^\circ\text{C}$ ،  $55^\circ\text{C}$  نشان داده شده است.



(الف)

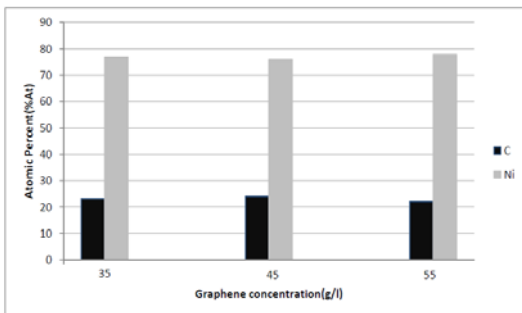


(ب)



(ج)

شکل ۸. نتایج آنالیز EDAX در دماهای الف)  $35^{\circ}\text{C}$  ب)  $45^{\circ}\text{C}$  ج)  $55^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۹. تغییر درصد اتمی گرافن در پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Graphene.

بررسی‌ها نشان داده که تشکیل پوشش‌های Ni-Graphene در یک دمای بهینه انجام‌پذیر می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۶) قابل مشاهده است، پوشش نیکل خالص دارای ذراتی با سطحی به نسبت صاف و به هم پیوسته می‌باشد. اما همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، طی فرآیند پوشش‌دهی پوشش Ni-Graphene، صفحات گرافن به دلیل ساختار نانومتری خود سبب میل به ریزدانه شدن ذرات نیکل گشته و همچنین به صورت لایه‌ای بر روی سطح ذرات نیکل می‌نشینند. اما با افزایش دما، جنبش ذرات در محلول افزایش یافته و براساس رابطه لانگمویر با افزایش دما قابلیت جذب ذرات کم می‌شود، از طرفی این موضوع یکی از رفتارهای ذاتی گرافن نیز می‌باشد، زیرا قدرت جذب گرافن در دماهای بالای  $50^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌یابد. همچنین افزایش جنبش ذرات منجر به برخورد بیشتر آن‌ها به یکدیگر شده و به دلیل میل ذرات به جذب یکدیگر، در پوشش به صورت آگلومره شده (توده‌ای) درمی‌آیند. در حالی که در دماهای پایین‌تر سطح پوشش‌ها صاف‌تر شده و محتوی توزیع یکنواخت‌تری از ذرات گرافن است [۸،۹]. به منظور بررسی اثر دما، تشکیل پوشش‌ها در سه دمای  $35^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$ ،  $55^{\circ}\text{C}$  مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که با افزایش دما مقدار گرافن در پوشش افزایش یافته، به طوری که در اولین مرحله افزایش دما ( $45^{\circ}\text{C}$ ) به ماکزیمم مقدار می‌رسد اما با افزایش بیشتر دما مقدار ذرات به تدریج کاهش می‌یابد.

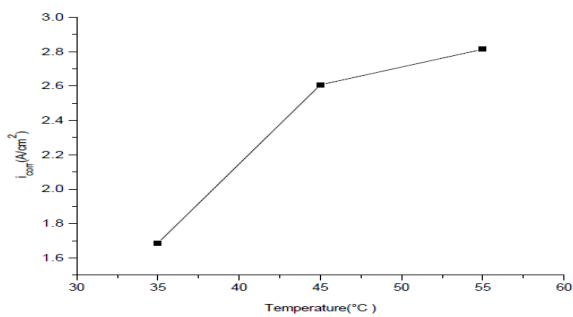
نتایج آنالیز EDAX (Map) و چگونگی توزیع ذرات گرافن در سطح پوشش‌های کامپوزیتی Ni-Graphene به دست آمده از محلول آبکاری حاوی  $1\text{ g/l}$  نانوذرات گرافن، در مدت زمان پوشش‌دهی ۹ دقیقه و چگالی جریان  $1\text{ A/dm}^2$  و در سه دمای  $35^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$ ،  $55^{\circ}\text{C}$  در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است.



جدول ۲. نتایج حاصل از پلاریزاسیون از سطح نمونه‌های پوشش داده شده با پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Graphene در دماهای ۳۵، ۴۵، ۵۵ و نمونه با پوشش نیکل خالص.

دمای پوشش دهی (°C)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )
۳۵	۱/۶۸۶۰
۴۵	۲/۶۰۷۶
۵۵	۲/۸۱۳۹
Ni-۵۵	۲۴/۹۲۳۷

منحنی تغییر جریان خوردگی بر حسب دما در حمام آبکاری حاوی ۱ g/l گرافن و مدت زمان پوششدهی ۹ دقیقه و چگالی جریان ۱ A/dm<sup>۲</sup> در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱. منحنی تغییر جریان خوردگی بر حسب دما.

تغییرات چگالی جریان خوردگی نمونه‌های مس با پوشش نیکل-گرافن آبکاری شده در دماهای مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون نشان می‌دهند که با افزایش دما سرعت خوردگی افزایش و مقاومت به خوردگی کاهش یافته است.

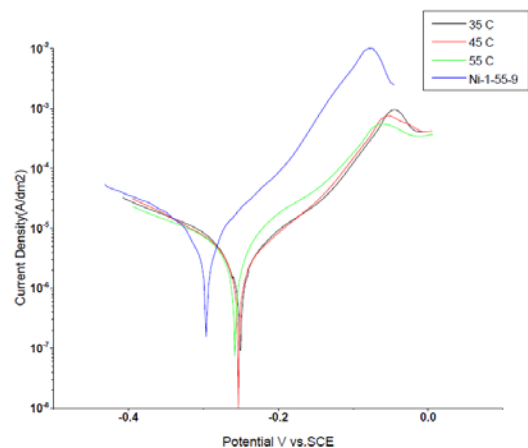
گرافن موجود در زمینه نیکل می‌تواند مانع از رشد حفرات خورنده شده و ترکیب نانوذرات می‌تواند باعث تسریع فرآیند پسیواسیون زمینه فلزی شوند. در نتیجه مقاومت به خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی می‌تواند بهبود یابد [۵].

صفحات گرافن با قرارگیری درون پوشش نیکل با تغییر مورفولوژی سطح و تبدیل آن به یک پوشش با ساختار مقاوم، مقاومت به خوردگی پوشش را افزایش می‌دهد. این رفتار گرافن به چند صورت مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد. ابتدا با ایجاد یک لایه مقاوم به خوردگی بر روی سطح ذرات پوشش باعث ایجاد یک لایه میانی بین سطح ذرات پوشش و محیط خورنده می‌گردد از طرف دیگر ذرات گرافن درون پوشش با محیط خورنده واکنش داده لایه غیرفعال (پسیو) و

بر طبق مکانیزم‌های پیشنهادی برای تشکیل پوشش‌های کامپوزیتی می‌توان گفت با توجه به این‌که افزایش دما سبب افزایش جابه جایی ذرات می‌شود، میزان بالاتری از ذرات به سطح رسیده و مکان‌های جوانه‌زنی بیشتری را ایجاد می‌کنند در نتیجه میزان ذرات در پوشش افزایش می‌یابد. اما با توجه به خصوصیات ذرات و به ویژه رفتار ذاتی گرافن افزایش زیاد دما باعث برخورد بیشتر ذرات به یکدیگر و آگلومره شدن و همچنین به دلیل کاهش میزان جذب گرافن در دماهای بالای ۵۰ درجه میزان گرافن موجود در پوشش کاهش می‌یابد [۸،۹].

با افزایش دما تا یک حد مشخص، مقدار نیکل و ذرات لازم برای ایجاد یک پوشش مناسب در سطح مهیا می‌شود. افزایش دما و ذرات لازم برای پوشش‌دهی، تنش‌هایی که در اثر آبکاری بین لایه پوشش و سطح کاتد به وجود می‌آید را کاهش داده در نتیجه پوشش با کیفیت خوب و تنش کششی کمی ایجاد می‌شود اما با افزایش دمای بیشتر به دلیل کاهش میزان جذب ذرات، میزان گرافن در پوشش کاهش می‌یابد [۸].

منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطح نمونه‌های مسی پوشش داده شده با پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Graphene در محلول سولفامات نیکل حاوی ۱ g/l گرافن در مدت زمان پوشش‌دهی ۹ دقیقه و چگالی جریان ۱ A/dm<sup>۲</sup> در دماهای ۳۵، ۴۵، ۵۵ و نمونه پوشش نیکل خالص اعمال شده در زمان ۹ دقیقه و دمای ۳۵ C و چگالی جریان ۱ A/dm<sup>۲</sup> در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، دماهای ۳۵، ۴۵، ۵۵ و نمونه پوشش نیکل خالص.

می‌باشیم. از طرفی افزایش دما باعث می‌شود تا صفحات گرافن میل به آگلومره شدن و توده‌ای شدن پیدا کنند و به همین دلیل فقر ذرات گرافن در برخی نقاط پوشش سبب عدم یکنواختی پوشش میگردد. مقدار بهینه دما برای پوشش‌دهی  $35^{\circ}\text{C}$  به دست آمده است به طوری که با افزایش دما تا این مقدار مقاومت به خوردگی بهبود یافته و در دماهای بالاتر از این مقدار جریان خوردگی افزایش و مقاومت به پلاریزاسیون کاهش یافته، از طرفی بیشترین میزان جذب گرافن در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  به دست آمده است.

### مراجع

1. S. Ghanbari, F. Mahboubi, Corrosion resistance of electrodeposited Ni-Al composite coatings on the aluminum substrate, *Materials & Design*, 32, 2011, 1859-1864.
2. A. Gomes, I. I. Pereira, B. Fernandez, R. Pereira, Electrodeposition of metal matrix nanocomposites: improvement of the chemical characterization techniques, in *Advances in Nanocomposites – Synthesis, Characterization and Industrial Applications*, In-Tech, ISBN: 978-953-307-165-7, 2011, 503-526.
3. Da. Kuang, Liye Xu, Lei Liu, Wenbin Hu, Yating Wu, Graphene-nickel composites, *Applied Surface Science*, 273, 2013, 484-490.
4. M.S. Ata, Y. Sun, X. Li, I. Zhitomirsky, Electrophoretic deposition of graphene, carbon nanotubes and composites using aluminum as charging and film forming agent, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Volume 398, 2012, *Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 398, 2012, 9-16.
5. C.M. Praveen Kumar, T.V. Venkatesha, Rajashekhara Shabadi, Preparation and corrosion behavior of Ni and Ni-graphene composite coatings, *Materials Research Bulletin*, 48, 2013, 1477-1483.
6. N.A. Koratkar, *Graphene in Composite Materials: Synthesis, Characterization and Applications*, First Edition, DEStech Publications Publish, 2013
7. محمد چوبتاشاری، "ساخت نانوکامپوزیت گرافن- $\text{WO}_3$  به عنوان فتوکاتالیست در منطقه نورمرئی"، پایان‌نامه جهت اخذ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شریف، ۱۳۹۲.
8. M. Kiani, M.E. Bahrololoom, Investigation of influence of Electrodeposition Parameters on the Morphology and Surface Roughness of Nickel-Carbon composite coatings, *Eleventh Congress of the Iranian Metallurgical Society*, 2007, Zob Ahan, Isfahan.
9. سیدعلی‌رضا علوی، "تهیه نانو کامپوزیت‌های گرافن- $\text{TiO}_2$  و بررسی برخی خواص فیزیکی و شیمیایی آن"، پایان‌نامه جهت اخذ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه آزاد واحد شهرری، ۱۳۹۲.
10. J.A. Williams, *Wear Modelling: Analytical, Computational and Mapping: a Continuum Mechanics Approach*, *Wear*, 1999, 1-17.

محافظ تشکیل می‌دهند. با تشکیل چنین لایه محافظی سطح از خوردگی شدن در امان خواهد بود. همچنین با ایجاد ذرات ریزدانه‌تر و بستن مسیر رسیدن مواد خوردنده به زیرلایه از خوردگی جلوگیری می‌کنند و سبب بهبود مقاومت به خوردگی می‌شوند [۵۸].

بهبود مکانیزم خوردگی در طی دو مکانیزم صورت می‌گیرد. اول این‌که نانوذرات به صورت حامل‌های فیزیکی خنثی عمل کرده و عیوب خوردگی را می‌پوشانند و در نتیجه مقاومت به خوردگی نیز بهبود می‌یابد. دوم این‌که توزیع نانوذرات در لایه‌های نیکل، تشکیل بسیاری از میکروسل‌ها را می‌دهند به طوری که نانوذرات به صورت آند و نیکل به صورت کاتد عمل کرده که در این حالت، پلاریزاسیون آندی را تسهیل کرده است. بنابر این در حضور نانوذرات، مانع مکان‌های خوردگی موضعی می‌شود [۱۰].

با افزایش دمای پوشش‌دهی، چگالی جریان خوردگی افزایش و مقاومت پلاریزاسیون کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش دما رفتار گرافن تغییر می‌کند. دلیل این موضوع را می‌توان به افزایش میزان جذب گرافن با افزایش دما و همچنین میل به آگلومره شدن ذرات گرافن در اثر افزایش دما به دلیل جنبش زیاد و برخورد بیشتر ذرات به یکدیگر دانست، زیرا موارد ذکر شده باعث فقر گرافن در بعضی از نقاط پوشش و عدم یکنواختی توزیع ذرات در پوشش می‌گردند. همچنین با افزایش بیشتر دما به بالای  $50^{\circ}\text{C}$  رفتار گرافن تغییر کرده و میزان جذب آن کاهش می‌یابد، از طرفی به دلیل افزایش دما و برخورد بیشتر ذرات گرافن پدیده آگلومره شدن ذرات و عدم یکنواختی توزیع ذرات در پوشش به وجود می‌آید که این دلایل سبب کاهش مقاومت به خوردگی پوشش میگردد [۵،۹].

### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دمای پوشش‌دهی از  $35^{\circ}\text{C}$  به  $45^{\circ}\text{C}$  منجر به بهبود جذب ذرات گرافن در پوشش می‌گردد. از سوی دیگر در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  به بالا شاهد کاهش جذب گرافن به دلیل رفتار ذاتی آن