



Semnan University

Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

Investigation of the Corrosion Resistance of Copper Substrates Electrodeposited with Ni-Zn-P/B₄C Nanocomposites

Saeid Mohammadian Hamraz, Mehdi Abdolmaleki ^{*}, Younes Hanifehpour ^{*}

Department of Chemistry, Sayyed Jamaledin Asadabadi University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 08/Feb/2025

Revised: 01/Dec/2025

Accepted: 24/Dec/2025

Keywords:

Electrodeposition,
Nanocomposite,
Ni-Zn-P/B₄C,
Electrochemical Impedance
Spectroscopy.

ABSTRACT

In the present study, nickel-zinc-phosphorus/boron carbide nanocomposite coatings were synthesized via electrodeposition from an electrolyte containing different concentrations of boron carbide as reinforcing particles, using an optimized current density of 50 mA/cm². In subsequent investigations, the surface morphology, phase structure, and elemental composition of the coatings were conducted using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), respectively. The corrosion resistance of the fabricated coatings was evaluated by electrochemical impedance spectroscopy (EIS), open-circuit potential (OCP) measurements, and Tafel-polarization studies in a 3.5 % NaCl solution. These studies demonstrated that composite coatings with smooth and uniform surfaces have higher corrosion resistance than pure Ni-P-Zn alloy coatings, and the lowest corrosion current density and highest corrosion resistance were obtained for the coating produced from a solution containing 6 g/L B₄C. Co-deposition at this optimal B₄C concentration yielded a uniform, defect-free, dense microstructure, thereby enhancing the corrosion behavior of the coatings.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.40006.2415>

© 2026 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

^{*}.Corresponding authors: Associate Professor of Physical Chemistry. E-mail address: m.abdolmaleki@sjau.ac.ir

^{*}.Corresponding authors: Associate Professor of Inorganic Chemistry. E-mail address: hanifehpour@sjau.ac.ir

How to cite this article: Mohammadian Hamraz, S., Abdolmaleki, M. & Hanifehpour, Y. (2026). Investigation of the Corrosion Resistance of Copper Substrates Electrodeposited with Ni-Zn-P/B₄C Nanocomposites. *Applied Chemistry Today*, 21(78), 37-54. (in Persian)

بررسی مقاومت به خوردگی زیر لایه‌های مسی رسوب‌دهی الکتریکی شده با

نانوکامپوزیت‌های نیکل-روی-فسفر/بور کربید

سعید محمدیان همراز، مهدی عبدالملکی*، یونس حنیفه پور*

گروه شیمی، دانشگاه سید جمال الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰	در تحقیق حاضر، پوشش‌های نانوکامپوزیتی نیکل-روی-فسفر/بور کربید از طریق رسوب الکتریکی از الکترولیت حاوی غلظت‌های مختلف بور کربید به عنوان ذرات تقویت‌کننده، با استفاده از چگالی جریان بهینه‌شده 50 mA/cm^2 سنتز شدند. در بررسی‌های بعدی مورفولوژی سطح، ساختار فازی و ترکیب عنصری پوشش‌ها به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) انجام شد. مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های ساخته شده با استفاده از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، اندازه‌گیری‌های پتانسیل مدار باز (OCP) و مطالعات پلاریزاسیون Tafel در محلول $3\%/5\% \text{ NaCl}$ ارزیابی شد. این بررسی‌ها نشان داد که پوشش‌های کامپوزیتی با سطوحی صاف و یکنواخت، مقاومت در برابر خوردگی بالاتری نسبت به پوشش آلیاژی خالص Ni-P-Zn دارند و کمترین چگالی جریان خوردگی و بالاترین مقاومت در برابر خوردگی برای پوشش تولید شده از محلول حاوی 6 g/L از B_4C حاصل شده است. هم‌رسوبی در این غلظت بهینه از B_4C ریزساختاری یکنواخت، بدون نقص و متراکم ایجاد کرد و در نتیجه رفتار خوردگی پوشش‌ها را بهبود بخشید.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳	
کلمات کلیدی: ترسیب الکتروشیمیایی، نانوکامپوزیت، نیکل-روی-فسفر/بور کربید، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.40006.2415>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

سایش، اصطکاک و خوردگی پدیده‌های سطحی هستند که به‌عنوان مکانیزم‌های مخربی شناخته می‌شوند که منجر به کاهش عملکرد و چرخه‌ی عمر اجزا و تجهیزات صنعتی مختلف تحت شرایط سخت می‌شود. توسعه‌ی پوشش‌ها به‌عنوان یکی از مطمئن‌ترین و مؤثرترین گزینه‌ها برای جلوگیری از آثار زیان‌بار این مکانیزم‌های سطحی مخرب در نظر گرفته می‌شود [۵-۱]. مس و آلیاژهای آن به دلیل مقاومت در برابر خوردگی بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی عالی و قابلیت کارکرد مکانیکی مطلوب، به طور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یون‌های کلرید یون‌های بسیار خورنده‌ای برای مس و آلیاژهای آن هستند [۸-۶]. مکانیسم انحلال الکتریکی مس و آلیاژهای پایه مس در محیط‌های کلریدی توسط میلیچ و همکارانش بررسی شده است [۹]. یکی از روش‌های محافظت از مس و آلیاژهای آن استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی است. برای کاربردهای مهندسی، پوشش‌های نانوکامپوزیتی از سختی، مقاومت در برابر سایش و خوردگی بالاتری نسبت به فلزهای خالص و آلیاژها برخوردارند. روش‌های آبکاری الکتریکی و شیمیایی رایج‌ترین روش‌ها برای تهیه پوشش‌های نانوکامپوزیتی هستند [۱۶-۱۰].

پوشش‌های نیکل-فسفر سختی بالا دارند و نسبت به خوردگی بسیار مقاوم هستند که باعث شده جایگزین‌های خوبی برای پوشش‌های کروم سخت باشند [۱۷-۱۹]. مقاومت به سایش و خوردگی عالی پوشش‌های Ni-P از آنها کاندیداهای خوبی برای کاربرد در جایی ساخته که سطح تحت شرایط بار و محیط خوردنده قرار دارد [۱۷-۱۹].

اگر نانوذراتی به پوشش‌های نیکل-فسفر افزوده شوند به آنها پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-P می‌گویند که بسته به خواص نانوذرات گنجانده شده در آنها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-P سخت که گنجاندن برخی نانوذرات سخت مانند TiO_2 , Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , TiC , ZnO , B_4C ، الماس و غیره می‌تواند مقاومت به سختی و خوردگی این پوشش‌ها را افزایش دهد [۲۰-۳۳]. دسته دوم پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-P نرم که نانوذرات نرم یا روان پلی‌تترافلوروئورواتیلن (PTFE)، پلی کلرو تری فلئورواتیلن (PCTFE)، WS_2 ، MoS_2 ، نانو لوله‌های کربنی، گرافیت و غیره باعث کاهش ضریب اصطکاک این پوشش‌ها می‌شود. علاوه بر گنجاندن نانوذرات، هم‌رسوبی با عناصر فلزی مانند Cu ، W و Zn نیز می‌تواند خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی این پوشش‌ها را افزایش دهد [۸، ۱۶، ۳۸-۳۴].

در این پژوهش، پوشش‌های نانوکامپوزیتی نیکل-روی-فسفر/بورکربید با غلظت‌های مختلفی از B_4C به روش ترسیب الکتروشیمیایی سنتز شده‌اند و خواص ریزساختاری، ترکیب فازی و مقاومت به خوردگی این پوشش‌ها به کمک SEM، EDS، XRD، آزمون‌های پتانسیل مدار باز (OCP)، پلاریزاسیون Tafel و امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شده‌اند. نتایج آزمون‌های خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی با پوشش آلیاژی نیکل-روی-فسفر خالص مقایسه شد و مقدار بهینه B_4C برای ایجاد پوشش نانوکامپوزیتی با بالاترین مقاومت خوردگی تعیین گردید.

۲- بخش تجربی

قبل از پوشش‌دهی، صفحات مسی با خلوص ۹۹/۹٪ در ابعاد $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$ بریده شدند. سپس این صفحات به منظور ایجاد سطوح آینه‌ای با کاغذ سنباده‌های سیلیسیم کربید به ترتیب در گریدهای ۸۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۵۰۰ پولیش داده شدند. پس از چربی‌گیری به مدت ۱۰ دقیقه در محلول سدیم هیدروکسید ۳۰٪ و شستشو در آب مقطر، این صفحات به منظور حذف لایه اکسیدی حاصل از آلاینده‌ها از روی سطح‌شان، در محلول سولفوریک اسید ۱۰٪/هیدروژن پراکسید ۱۵٪ به مدت ۱ دقیقه اسیدشویی شدند. در نهایت پس از شستشو در آب مقطر، به منظور ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی وارد محلول پوشش‌دهی شدند. ترکیب شیمیایی و شرایط محلول پوشش‌دهی در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همه محلول‌های مورد نیاز از آب مقطر دو بار تقطیر شده تهیه شده‌اند. تلاطم در محلول در زمان پوشش‌دهی توسط یک همزن مغناطیسی ایجاد شد و دمای محلول در حین پوشش‌دهی در حدود 50°C کنترل و نگهداری شد.

جدول ۱. ترکیب و شرایط محلول پوشش دهی الکتروشیمیایی Ni-Zn-P/B₄C

ترکیب شیمیایی	غلظت (g/L)	شرایط آبراری
NiCl ₂ ·6H ₂ O	۳۴	چگالی جریان اعمالی: ۵۰ mA/cm ²
ZnCl ₂ ·6H ₂ O	۳۷	دما: ۵۰ °C
H ₃ PO ₃	۱۲	pH: ۴/۵
NH ₄ Cl	۲/۲۴	مدت زمان: ۳۰ دقیقه
KCl	۱/۶۱	آند: Ni (۵۰ cm ²)
B ₄ C (70 nm)	۰-۹	کاتد: Cu

مورفولوژی سطح پوشش‌ها، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی (FE-SEM) مدل Mira 2 TESCAN ساخت کشور جمهوری چک بررسی شد. برای تعیین درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده زمینه آلیاژی و ذرات تقویت کننده درون پوشش‌ها، از آنالیزگر ترکیب شیمیایی (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) متصل به دستگاه FE-SEM استفاده شد. همچنین برای ارزیابی ساختار پوشش‌ها از دستگاه پراش ایکس (XRD) مدل Philips با تابش $K\alpha$ Cu ($\lambda = 0.1542 \text{ nm}$) استفاده شد.

یک دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات پیشرفته Ivium (مدل Vertex 1A) مجهز به نرم افزار Iviumsoft برای انجام تستهای الکتروشیمیایی خوردگی شامل پتانسیل مدار باز (OCP)، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون Tafel در محلول NaCl ۳/۵٪ استفاده شده است. تستهای الکتروشیمیایی در یک سل سه الکترودی (نیم پیل) شامل الکترودم مرجع کالومل (SCE)، یک توری پلاتینی با مساحت سطح تقریبی ۲۰ cm² به عنوان الکترودم کمکی و الکترودهای مس پوشش داده شده با کامپوزیت Ni-Zn-P/B₄C با مساحت سطح ۱ cm² به عنوان الکترودم کار استفاده شد. پیش از تستهای الکتروشیمیایی، نمونه‌ها جهت بدست آوردن پتانسیل مدار باز (OCP) در محلول NaCl ۳/۵٪ به مدت ۱ h غوطه‌ور می‌شوند. منحنی‌های پلاریزاسیون در محدوده پتانسیل ۰/۲۵ V ± نسبت به OCP و با سرعت اسکن ۰/۲ mV/s ثبت شدند. تستهای امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس ۱۰۰ KHz - ۱ mHz ثبت گردید و داده‌های EIS حاصله با استفاده از نرم افزار ZView II فیت و آنالیز شدند.

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بررسی مورفولوژی سطح و ساختار پوشش‌های کامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C

شکل ۱، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پوشش‌های کامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C با غلظت‌های مختلف از ذرات تقویت کننده بورکربید (B₄C = ۰ g/L, B₄C = ۳ g/L, B₄C = ۶ g/L و B₄C = ۹ g/L) را نشان می‌دهد. همانگونه که در تصاویر ملاحظه می‌شود با اضافه شدن ذرات تقویت کننده بورکربید، مورفولوژی پوشش Ni-Zn-P خالص تغییر قابل توجهی یافته است. مورفولوژی سطح پوشش آلیاژی خالص Ni-Zn-P شامل عیوب سطحی ترک و منافذ می باشد که به راحتی الکترولیت خورنده

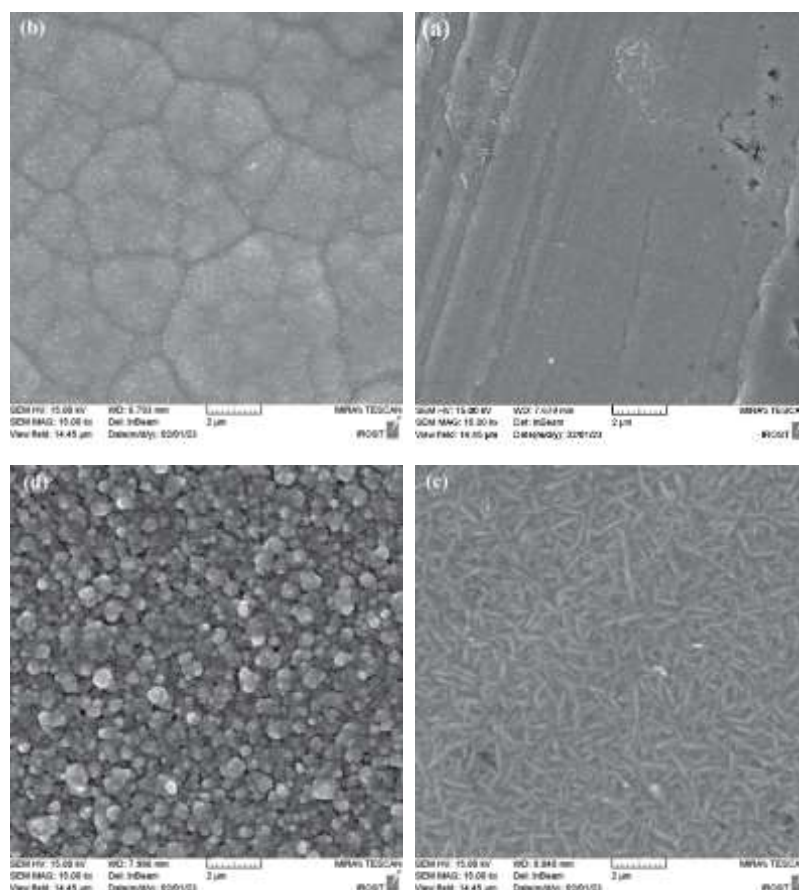
می‌تواند به زیر لایه مسی پوشش نفوذ کند (شکل a ۱). با افزودن ۳ g/L از نانوذرات B₄C، مورفولوژی پوشش یکنواخت‌تر شده اما مرز دانه‌ها هنوز مشخص است (شکل b ۱) با افزایش بیشتر B₄C تا غلظت ۶ g/L، ساختار به ایده‌آل‌ترین حالت ممکن خود میل می‌کند و بسیار یکنواخت و بدون ترک‌ها و عیوب سطحی خواهد شد (شکل c ۱). با افزایش بیشتر غلظت B₄C (۹ g/L) نوع دانه‌بندی پوشش عوض شده و به صورت ذرات کروی نسبتاً متخلخل نمایان خواهد شد که این تخلخل‌های ریز مکان مناسبی برای ورود الکترولیت خورنده و در نتیجه افت مقاومت به خوردگی پوشش خواهد شد (شکل d ۱).

در فرایند رسوب‌دهی الکتریکی و با جذب ذرات فاز تقویت کننده بر سطح کاتد چون چگالی جریان در اطراف این ذرات بیشتر است، یون‌های نیکل تمایل دارند بر این ذرات رسوب کنند و ساختار نامنظم رشد بیشتری خواهد داشت. به این ترتیب با روند اضافه شدن مقادیر کافی بورکربید به عنوان تقویت کننده به پوشش، جهت گیری رشد بلورهای نیکل به طور کامل تغییر کرده و رشد رونشینی غالب می‌شود. همچنین نرخ جوانه زنی افزایش و نرخ رشد پوشش کاهش می‌یابد [۱۹-۱۰].

بنابراین، ذرات فاز تقویت کننده به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی عمل می‌کنند، در نتیجه با افزایش درصد ذرات در محلول در صد مشارکت این ذرات در پوشش بیشتر شده، نرخ جوانه‌زنی نسبت به رشد ذرات افزایش یافته و ساختار ریزدانه‌تر و متراکم‌تر خواهد شد. بنابراین همانطور که پیش بینی شد با افزایش درصد ذرات تقویت کننده در محلول، ساختار پوشش محکم و غیر قابل نفوذ خواهد شد.

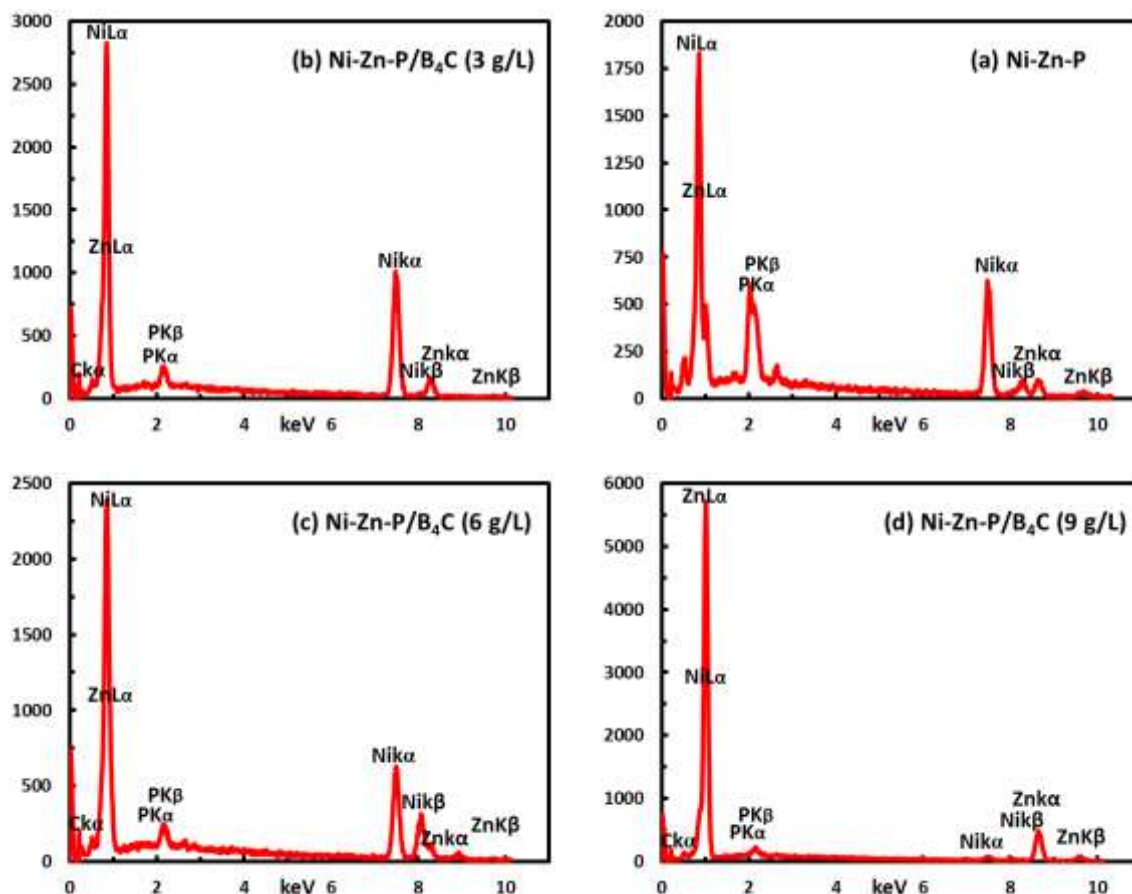
بطور کلی می‌توان گفت، در طول فرآیند رسوب الکتریکی، ذرات فاز تقویت کننده با یون‌های فلزی برای رسوب رقابت می‌کند، به سطح کاتد می‌چسبند و مکان‌های هسته‌زایی متعددی برای رشد فلز ایجاد می‌کنند. این اثر تقویت کننده، رشد کریستال را محدود می‌کند، در نتیجه سرعت رسوب نیکل و روی را کاهش می‌دهد و منجر به اندازه‌های کریستالی ریزتر در پوشش کامپوزیتی، به ویژه در غلظت بهینه ۶ g/L می‌شود. بنابراین، پوششی با ساختار متراکم‌تر و یکنواخت‌تر حاصل می‌شود [۴۳-۳۹]. با این حال، هنگامی که غلظت B₄C در محلول رسوب‌گذاری بیش از حد بالا می‌رود (در نمونه ۹ g/L)، آگلومره شدن یا تجمع را افزایش و ترکیب مؤثر B₄C را در پوشش کاهش می‌دهد. این تجمع مانع از پراکندگی یکنواخت این ذرات تقویت کننده می‌شود و می‌تواند بر یکپارچگی ساختاری پوشش‌های کامپوزیتی و عملکرد آن تأثیر منفی بگذارد [۴۳-۳۹].

علت دیگر کاهش تراکم پوشش در نمونه حاصل از محلولی با غلظت ۹ g/L از بورکربید می‌تواند افت درصد مشارکت این ذرات در اثر افزایش گرانیوی محلول باشد. زیرا با افزایش گرانیوی الکترولیت، جدا شدن یونهای H⁺ از سطح کاتد سخت‌تر شده و ایجاد حباب‌های هیدروژنی در سطح را در پی خواهد داشت. حال در غلظت‌های بالای الکترولیت، این حباب‌ها توانایی جدا شدن از سطح کاتد را ندارند و از جذب ذرات جلوگیری کرده و باعث کاهش تراکم و یکنواختی پوشش می‌شوند [۲۹].



شکل ۱. تصاویر FE-SEM پوشش های (a) Ni-Zn-P خالص، (b) Ni-Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولی با غلظت ۳ g/L بورکربید، Ni-(c) Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولی با غلظت ۶ g/L بورکربید و (d) Ni-Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولی با غلظت ۹ g/L بورکربید.

نتایج حاصل از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) پوشش های Ni-Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولهای با غلظت مختلف بورکربید در شکل ۲ نشان داده شده است. در آنالیز EDS پوشش Ni-Zn-P، پیک های نیکل، روی و فسفر در مقادیر مختلف انرژی پراش قابل مشاهده است (شکل ۲ a). در جدول ۲ درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در پوششهای سنتز شده نشان داده شده است. با اضافه شدن ۳ گرم بر لیتر از بورکربید به محلول پوشش دهی، درصد روی و فسفر در پوشش به شدت کاهش می یابد. همچنین پیک مربوط به K α کربن برای پوششهای نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C در مجاورت پیک مربوط به L α نیکل ایجاد شده است که نشان دهنده سنتز صحیح پوششهای نانوکامپوزیتی است.



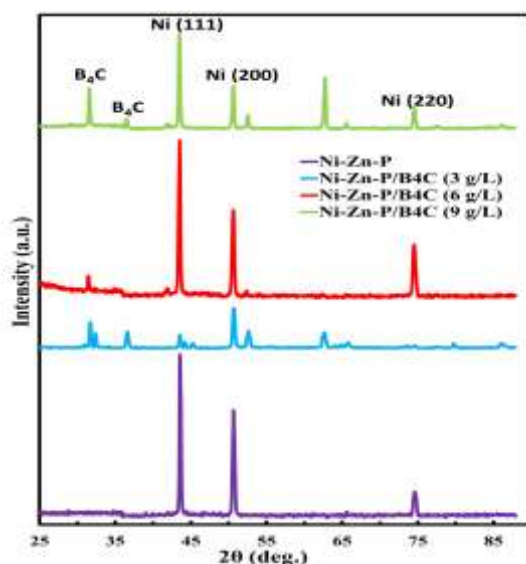
شکل ۲. آنالیز پراش انرژی اشعه ایکس (EDS) پوشش‌های (a) Ni-Zn-P خالص، (b) Ni-Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولی با غلظت ۳ g/L بورکربید، (c) Ni-Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولی با غلظت ۶ g/L بورکربید و (d) Ni-Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولی با غلظت ۹ g/L بورکربید.

با افزایش مقدار نانوذرات بورکربید در محلول به ۶ گرم بر لیتر (شکل ۲c)، شدت پیک ایجاد شده برای کربن افزایش می‌یابد که حاکی از افزایش مقدار بورکربید در ریزساختار به مقدار ۴۱/۷۳ درصد اتمی می‌باشد. همچنین درصد عناصر روی و فسفر هم نسبت به پوشش ترسیب شده از محلولی با غلظت ۳ g/L از بورکربید افزایش یافته است. در طی روند اضافه نمودن بیشتر نانو ذرات بورکربید به محلول تا مقدار ۹ گرم بر لیتر، شدت پیک مربوط به کربن تا حدودی کاهش یافته و مقدار آن در ترکیب شیمیایی نیز به ۳۰/۷۵ درصد اتمی کاهش می‌یابد. همچنین درصد عناصر نیکل و روی در پوشش نانوکامپوزیتی به ترتیب کاهش و افزایش شدیدی داشته است. این اتفاق به دلیل آگلومره شدن نانوذرات B₄C در محلول و ممانعت به جذب یونهای نیکل می‌باشد. بطور کلی مشاهده پیک کربن و نتایج آنالیز عنصری (EDS) در جدول ۲، وجود نانوذرات B₄C را در ساختار پوشش‌های نانوکامپوزیتی تأیید می‌کند.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C

B		C		P		Zn		Ni		پوشش
A%	Wt%	A%	Wt%	A%	Wt%	A%	Wt%	A%	Wt%	
-	-	-	-	۱۸/۸۳	۱۰/۶۹	۱۶/۱۵	۱۹/۳۵	۶۵/۰۲	۶۹/۹۶	Ni-Zn-P
۱۹/۳۸	۵/۵۹	۲۵/۲۵	۸/۰۹	۰/۵۴	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۶۵	۵۴/۴۶	۸۵/۲۳	Ni-Zn-P/B ₄ C (۳ g/L)
۱۵/۴۱	۵/۱۸	۴۱/۷۳	۱۵/۳۲	۱/۲۳	۱/۰۱	۱۱/۹۱	۲۴/۲۳	۲۹/۷۲	۵۴/۲۷	Ni-Zn-P/B ₄ C (۶ g/L)
۲۰/۲۹	۵/۸۲	۳۰/۷۵	۱۰/۱۵	۰/۵۴	۰/۴۴	۴۶/۱۸	۸۰/۱۰	۲/۲۴	۳/۴۹	Ni-Zn-P/B ₄ C (۹ g/L)

شکل ۳، الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C را که از محلول‌هایی با غلظت‌های مختلف B₄C ترسیب شده اند نشان می‌دهد. صفحات کریستالی (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) ساختار مکعبی وجوه مراکز پر (FCC)، نشان دهنده پیکهای پراش ویژه نمونه‌ها ست. این پیکها به ترتیب در زاویه پراشهای ۴۳/۵۴°، ۵۰/۴۳° و ۷۴/۵۲° ظاهر شده‌اند. این سه پیک در هر چهار ترکیب مشاهده می‌شود. با ورود B₄C به ساختار پوشش آلیاژی Ni-Zn-P اولاً یک جابجایی در جهت منفی در زاویه پراش‌های فوق اتفاق می‌افتد و دوماً پیکهایی در زاویه پراش‌های کمتر از ۴۰° در الگوهای پراش سه ترکیب نانوکامپوزیتی پدیدار شده است (۳۱/۶۸° و ۳۶/۵۶°). این پیکها مربوط به ذرات B₄C است. با استفاده معادله شرر [۱۱، ۱۶] و اندازه‌گیری پهنای پیک واقع در زاویه پراش ۴۳/۵۹° در نصف ارتفاع ماکزیم آن برای پوشش‌های نانوکامپوزیتی، اندازه متوسط ذرات ۴۰ نانومتر خواهد شد که در توافق با نتایج آنالیز FESEM می‌باشد.

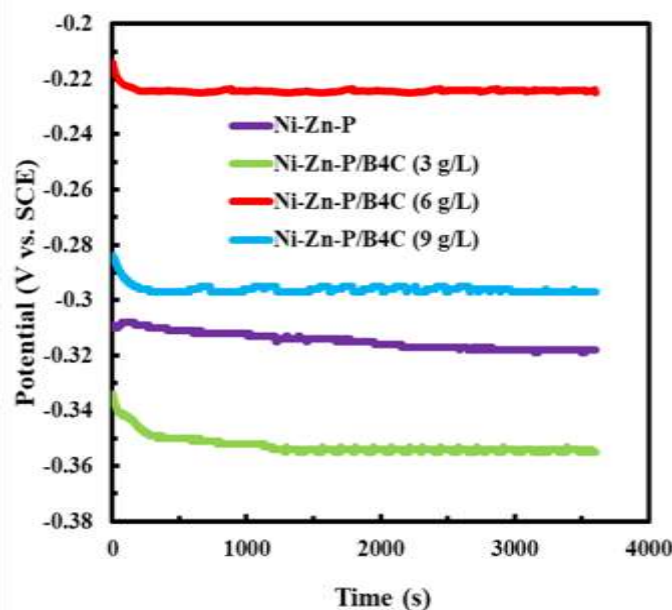
شکل ۳. الگوهای XRD پوشش‌های مورد مطالعه (آلیاژی Ni-Zn-P و نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C).

۳-۲- بررسی رفتار خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C

رفتار خوردگی پوشش‌های سنتز شده در محلول NaCl ۳/۵٪ و با استفاده از تکنیک‌های پتانسیل مدار باز، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و تست پلاریزاسیون Tafel بررسی شد که نتایج این آنالیزها در ذیل بطور مفصل بیان شده است.

۳-۲-۱- اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز با زمان

قبل از انجام تست‌های پلاریزاسیون تافلی و امیدانس الکتروشیمیایی، به جهت تثبیت پتانسیل الکترودها در محلول خوردگی تست غیرمخرب پتانسیل مدار باز با زمان ثبت می‌شود. این پتانسیل، پارامتری ترمودینامیکی است و ارتباطی با مقاومت به خوردگی ندارد در واقع معیار دقیقی برای ارزیابی مقاومت خوردگی فلزات نمی‌باشد [۸، ۱۰]. تغییرات پتانسیل مدار باز نسبت به زمان (EOCP) برای پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C در محلول NaCl ۳/۵٪ در شکل ۴، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پتانسیل مدار باز برای همه الکترودها پس از یک ساعت غوطه‌وری در محلول NaCl ۳/۵٪ تثبیت شده است اما مقادیر این پتانسیل و مدت زمان تثبیت آن برای این الکترودها متفاوت است. این مقدار برای پوشش آلیاژی خالص Ni-Zn-P بعد از تثبیت شدن در مدت زمان نزدیک به ۳۰۰۰ ثانیه، حدوداً ۳۱۸ mV- است. با افزودن نانو ذرات B₄C به محلول پوشش‌دهی و ورود آن به داخل ماتریکس فلزی، مدت زمان تثبیت پتانسیل مدار باز کمتر و مقدار این پتانسیل بجز برای پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C (۳ g/L) برای دو پوشش دیگر به سمت مقادیر مثبت‌تر شیفت می‌کند. این مقادیر برای پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C ترسیب داده شده از محلول‌های با غلظت ۳ g/L، ۶ g/L و ۹ g/L از B₄C به ترتیب ۳۵۵ mV-، ۲۲۴ mV- و ۲۹۷ mV- می‌باشد. مدت زمان تثبیت پتانسیل مدار باز برای این پوشش‌های نانوکامپوزیتی هم کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه است. این تکنیک بطور کلی برای اطمینان از تثبیت پتانسیل الکترودها در محلول خورنده است. پس از رسیدن به این پتانسیل تثبیت، برای تعیین مقاومت به خوردگی و چگالی جریان خوردگی باید سایر تست‌های غیرمخرب مانند تست‌های امیدانس الکتروشیمیایی و مخرب پلاریزاسیون تافلی از پوشش‌ها در محلول خورنده ثبت شود که در ادامه نتایج این دو تست آورده شده است.



شکل ۴. نمودار تغییرات پتانسیل مدار باز با زمان پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C مختلف در محلول NaCl ۳/۵٪.

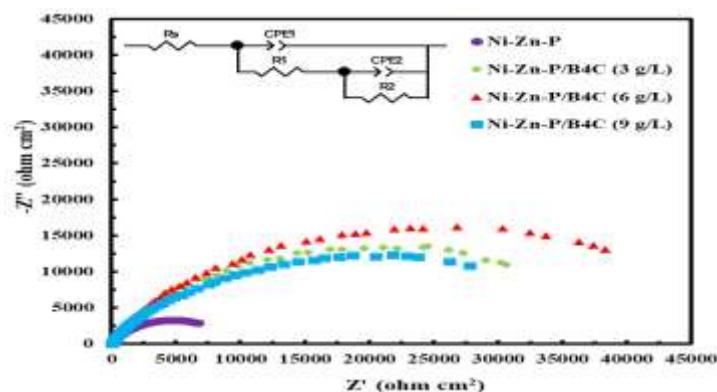
۳-۲-۲- اندازه گیری امپدانس الکتروشیمیایی

در شکل ۵، منحنی‌های نایکویست امپدانس الکتروشیمیایی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C مختلف به همراه مدار معادل پیشنهادی که با اطلاعات تجربی تطابق دارد، نشان داده شده است. در واقع منحنی‌های نایکویست از دو لوپ خازنی در هم فرورفته تشکیل شده‌اند. این دو لوپ خازنی نشان دهنده دو سطح مشترک است. لوپ خازنی در فرکانسهای بالا وجود یک لایه سطحی (پوشش آلیاژی یا نانوکامپوزیتی) و لوپ خازنی در فرکانسهای پایین مربوط به انتقال بار در سطح مشترک پوشش و فلز پایه (لایه دوگانه) را نشان می‌دهد. در مدار معادل پیشنهادی R_s، R₁ و R₂ به ترتیب مقاومت بالک محلول، مقاومت فصل مشترک محلول/پوشش و همچنین مقاومت فصل مشترک پوشش/زیرلایه است. همچنین CPE1 و CPE2 عناصر فاز ثابت به ترتیب مربوط به محلول/پوشش و پوشش/زیرلایه است.

مقدار امپدانس عنصر فاز ثابت (Z)، با دو پارامتر P و T و مقدار آن با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۸]:

$$Z = \frac{1}{T(j\omega)^P} \quad (1)$$

در این رابطه، ω فرکانس زاویه‌ای، T (CPE-T) ظرفیت خازنی و P (CPE-P) ضریب غیریکنواختی سطح است. به طور کلی هرچه قدر P به صفر نزدیک‌تر باشد، میزان زبری سطح بیشتر بوده و CPE از حالت خازن ایده‌آل دورتر می‌شود. در نمودارهای نایکویست، قطر نیم‌دایره نشان‌دهنده R₁+R₂ است پس هر چقدر قطر نیم‌دایره بیشتر باشد، در واقع مجموع مقاومت‌های محلول/پوشش و انتقال بار (R₁+R₂) بیشتر بوده و نمونه از مقاومت به خوردگی بالاتری برخوردار است. مقادیر عناصر مدار معادل که از فیت کردن و انطباق نمودارهای نایکویست و با استفاده از نرم افزار ZView II به دست آمده است در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین، درجه فیتینگ داده‌های EIS پوشش‌های سنتز شده با استفاده از فاکتور آماري Chi-square ارزیابی شده است. بدیهی است هرچه این مقدار کوچک‌تر باشد دقت فیتینگ (برازش) بالاتر است. اما به طور کلی اعتقاد بر این است که وقتی مقدار آن از نظر بزرگی از مرتبه ۱۰^{-۳} و کمتر باشد، قابل قبول است. مقادیر Chi-square داده‌های EIS پوشش‌های سنتز شده در محدوده‌ی ۱۰^{-۴} (مرتبه‌ی بزرگی) هستند که بهترین تطابق مدل مدار معادل الکتریکی پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. منحنی‌های نایکویست امپدانس الکتروشیمیایی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C سنتز شده در محلول NaCl ۳/۵٪

جدول ۳. نتایج حاصل از از فیت کردن منحنی‌های نایکویست پوشش‌های نانوکامپوزیتی مختلف با مدار معادل الکتریکی پیشنهادی.

Coatings	R_s (Ω cm^2)	CPE1-T (F cm^{-2})	CPE1-P	R_1 (Ω cm^2)	CPE2-T (F cm^{-2})	CPE2-P	R_2 (Ω cm^2)	Chi-square
Ni-Zn-P	۷/۲۴۴	۰/۰۰۰۹۶۵	۰/۷۳۶۹	۷۲۲/۶	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۵۶۷۵۱	۱۱۱۷۹	۰/۰۰۰۱۵۲۲
Ni-Zn-P/B ₄ C ۳ g/L	۴/۵۶۹	۰/۰۰۰۴۷۲	۰/۷۴۶۱	۴۵/۶	۰/۰۰۰۴۳۱	۰/۷۰۳۸۷	۴۲۱۲۴	۰/۰۰۰۶۹۳۲
Ni-Zn-P/B ₄ C ۶ g/L	۶/۲۹۲	۰/۰۰۰۲۶۱	۰/۹۰۷۹۳	۱۱۵/۳	۰/۰۰۰۸۳۳	۰/۷۵۷۴۵	۵۵۳۴۵	۰/۰۰۰۵۰۲۱
Ni-Zn-P/B ₄ C ۹ g/L	۶/۳۴۸	۰/۰۰۰۵۷۹	۰/۸۸۰۳۸	۸۲۹/۲	۰/۰۰۰۸۶۳	۰/۶۴۳۱۶	۳۷۱۵۰	۰/۰۰۰۱۳۳۱

همان‌طوری که از شکل ۵ و داده‌های جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقاومت انتقال بار پوشش‌های نانوکامپوزیتی سنتز شده از پوشش آلیاژی خالص Ni-Zn-P بیشتر است (حدود سه الی چهار برابر). همچنین مقدار عنصر فاز ثابت (CPE2-P) در پوشش‌های نانوکامپوزیتی از پوشش آلیاژی بالاتر است. بالا بودن این پارامتر نشان‌دهنده سطوح صاف و یکنواخت‌تر برای پوشش‌های نانوکامپوزیتی نسبت به پوشش آلیاژی خالص است. یعنی نتایج FESEM را تأیید می‌کند. بالا بودن (CPE2-P) و سطحی صاف و بدون عیوب سطحی، مانع نفوذ محلول خورنده به پوشش شده و در نتیجه موجب افزایش مقاومت به خوردگی خواهد شد [۸].

۱۴، ۱۶، ۴۴-۴۶].

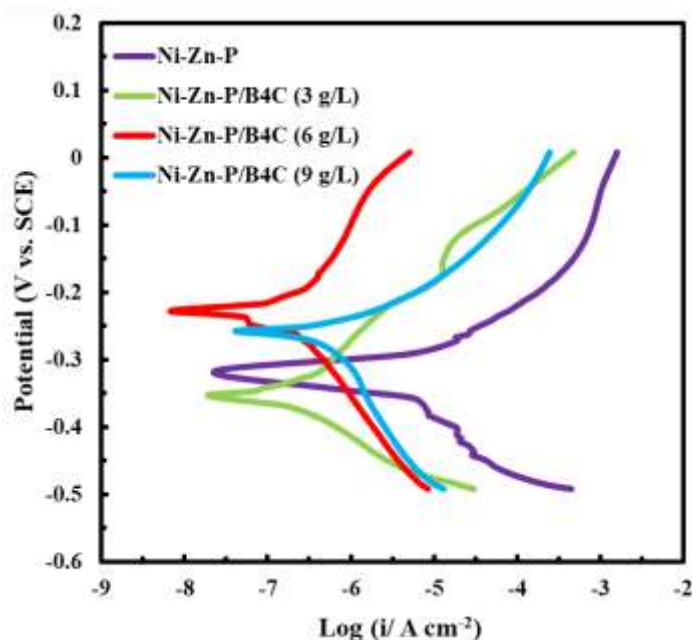
همانطور که از نتایج EIS مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت B₄C در محلول پوشش‌دهی از ۰ به ۳ g/L، مقاومت انتقال بار از $11179 \Omega cm^2$ به مقدار $42124 \Omega cm^2$ افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر این ذرات تقویت‌کننده در محلول، مقاومت انتقال بار بیشتر شده بطوری که بیشترین مقاومت انتقال بار مربوط به پوشش نانوکامپوزیتی ترسیب شده از محلولی با غلظت ۶ g/L از B₄C میباشد ($55345 \Omega cm^2$). با افزایش بیشتر غلظت نانو ذرات B₄C در محلول پوشش‌دهی به ۹ g/L، مقاومت انتقال بار کاهش می‌یابد که با توجه به نتایج FESEM ساختار غیریکنواخت و متخلخل حاوی میکرو حفره‌ها در پوشش موجب نفوذ محلول خورنده کلریدی به زیرلایه می‌شود.

بطور کلی، از میان پوشش‌های سنتز شده، پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C که از محلولی با غلظت ۶ g/L بصورت الکتروشیمیایی ترسیب شده است با داشتن بیشترین مقدار مقاومت انتقال بار (R_2)، بالاترین مقاومت به خوردگی را دارد. این افزایش مقاومت به خوردگی بالای پوشش مذکور می‌تواند بخاطر تشکیل سطحی یکنواخت، متراکم، صاف و براق در نتیجه هم‌رسوبی ذرات B₄C است که نفوذ محلول خورنده به زیر لایه مسی را کاهش می‌دهد. دلیل دیگر افزایش مقاومت به خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی این است که پخش ذرات B₄C در سطح پوشش، مانع از بوجود آمدن پیل‌های گالوانیک سطحی شده و شکل خوردگی احتمالی بصورت یکنواخت خواهد شد نه خوردگی‌های حاد حفره‌ای یا موضعی [۴۴-۴۶].

۳-۲-۳- اندازه گیری پلاریزاسیون تافلی

در شکل ۶، منحنی‌های پلاریزاسیون تافلی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C در محلول NaCl ۳/۵٪ نشان داده شده است. با استفاده از برون‌یابی منحنی‌های پلاریزاسیون، مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) مشخص گردید و در جدول ۴ نشان داده شده است.

بر اساس منحنی‌های پلاریزاسیون تافلی و داده‌های جدول ۴، کاملاً مشخص است که اضافه کردن ذرات B₄C به محلول و ورود آن به شبکه فلزی پوشش آلیاژی Ni-Zn-P موجب کاهش چگالی جریان خوردگی و جابجایی پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر نجیب‌تر شده است. بعنوان مثال با افزودن ۳ g/L از ذرات B₄C، چگالی جریان خوردگی حدود چهارده برابر کاهش یافته است ($4/78 \mu A/cm^2$ در مقایسه با $0/346 \mu A/cm^2$). بطور کلی، کمترین مقدار چگالی جریان خوردگی و بیشترین مقدار پتانسیل خوردگی مربوط به پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C است که از محلولی با غلظت ۶ g/L از B₄C ترسیب داده شده است. افزایش بیشتر از ۶ g/L از ذرات B₄C در محلول، به خاطر افزایش گرانروی محلول و آگلومره شدن ذرات، پوششی زبر و غیریکنواخت حاوی میکروحفرات ایجاد می‌کند که در نتیجه جریان خوردگی بیشتر و مقاومت به پوشش کاهش خواهد یافت. بنابراین با استفاده از آنالیزهای خوردگی می‌توان نتیجه گرفت که غلظت ۶ g/L از B₄C مقدار غلظت ایده‌آل این نانوذره برای ورود به پوشش آلیاژی Ni-Zn-P است. نتایج آزمون پلاریزاسیون تافلی در توافق با نتایج EIS است.



شکل ۶ منحنی‌های پلاریزاسیون تافلی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C مختلف در محلول NaCl ۳/۵٪.

جدول ۴. مقادیر چگالی جریان و پتانسیل خوردگی بدست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون تافلی برای پوشش‌های مورد مطالعه.

Coatings	E_{corr} (mV vs. SCE)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)
Ni-Zn-P	-۳۱۷	۴/۷۸
Ni-Zn-P/B ₄ C (۳ g/L)	-۳۵۷	۰/۳۴۶

Ni-Zn-P/B ₄ C (۶ g/L)	-۲۲۷	۰/۱۴۷
Ni-Zn-P/B ₄ C (۹ g/L)	-۲۸۷	۰/۶۹۲

۴- نتیجه گیری

مطالعه حاضر، ترسیب الکتروشیمیایی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C را از محلول‌هایی با غلظت‌های مختلف از نانوذرات B₄C توصیف می‌کند. پس از بررسی مورفولوژی سطح و ساختار پوششها با تکنیک‌های تشخیصی مختلف مانند FESEM/EDS و XRD، رفتار خوردگی آنها در محلول NaCl ۳/۵٪ با استفاده از تکنیک‌های الکتروشیمیایی بررسی و با پوشش آلیاژی خالص Ni-Zn-P مقایسه گردید.

۱- نتایج بررسی‌های مورفولوژی سطح و ساختار پوشش‌ها نشان داد که وجود ذرات B₄C تا غلظت ۶ g/L در محلول پوشش‌دهی و متعاقب آن نفوذ این ذرات در ماتریکس پوشش آلیاژی Ni-Zn-P موجب تشکیل سطحی صاف، یکنواخت، متراکم و براق بدون عیوب سطحی در مقایسه با پوشش آلیاژی خالص Ni-Zn-P می‌شود. افزایش بیشتر از ۶ g/L این نانوذرات به محلول، موجب تشکیل سطحی غیریکنواخت و زیر با میکروحفره‌ها خواهد شد. نتایج EDS هم نشان می‌دهد که افزودن ذرات B₄C به محلول پوشش‌دهی تا غلظت ۶ g/L موجب افزایش درصد این نانوذرات در پوشش خواهد شد و برای پوشش نانوکامپوزیتی حاصل از محلولی با غلظت ۹ g/L از B₄C، بدلیل آگلومره شدن این ذرات در محلول، درصد این نانوذرات در پوشش کاهش خواهد یافت. نتایج XRD هم نشان داد که وجود ذرات B₄C در پوشش، موجب تغییر در ساختار خواهد شد و پیکهای جدید در زاویه پراشهای کمتر از ۴۰^o، حضور این نانوذرات در پوشش را به اثبات رساند.

۲- آزمون‌های خوردگی نشان داد مقادیر مقاومت انتقال بار پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C از پوشش آلیاژی Ni-Zn-P خالص بیشتر است بطوریکه بیشترین مقاومت انتقال بار (۵۵۳۴۵ Ω.cm²) و کمترین چگالی جریان خوردگی (۰/۱۴۷ μA/cm²) در پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Zn-P/B₄C ترسیب شده از محلولی با غلظت ۶ g/L از B₄C حاصل شده است. همه این نتایج نشان داد که درصد مناسب نانوذرات تقویت کننده در ماتریکس پوشش و توزیع یکنواخت آنها، موجب بهبود ساختار و در نتیجه افزایش مقاومت به خوردگی در برابر محلول‌های خوردنده خواهد شد.

۵- تقدیر و تشکر

از دانشگاه سید جمال الدین اسدآبادی بخاطر حمایت مالی در طول این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- فهرست منابع و ماخذ

- [1] Wang, R., Ye, W., Ma, C., & Wang, C. (2008). Preparation and characterization of nanodiamond cores coated with a thin Ni-Zn-P alloy film. *Materials Characterization*, 59(1), 108-111.
- [2] Veeraraghavan, B., Haran, B., Kumaraguru, S. P., & Popov, B. (2003). Corrosion protection of steel using nonanomalous Ni-Zn-P coatings. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(4), B131-B139.

- [3] Faraji, M., & Naderi, S. (2018). MWCNT/Co₃O₄ nanocomposite deposited onto TiO₂ nanotubes for supercapacitor applications. *Applied Chemistry Today*, 13, 35-44. (in Persian)
- [4] Rashid, S., Arab, A., & Faraji, S. (2025). Investigating the corrosion resistance of coated steel with Ni-W-P nanocomposites prepared by electroless method. *Applied Chemistry Today*, 20(74), 161–174. (in Persian)
- [5] Shabani-Nooshabadi, M., Karimian-Taheri, F., & Jafari, Y. (2016). Evaluation of anti-corrosion properties of electrosynthesized polyaniline on copper at various immersion times. *Applied Chemistry Today*, 11, 33–54. (in Persian)
- [6] Marcus, P. (1998). Surface science approach of corrosion phenomena. *Electrochimica Acta*, 43, 109-118.
- [7] Abdel Hamid, Z., Gomaa, Mona H., & Hassan, H. B. (2016). Corrosion Performance of Copper - Diamond Composites in Different Aqueous Solutions. *American Journal of Electromagnetics and Applications*. 4(2), 39.
- [8] Hosseini, M. G., Abdolmaleki, M., Ashrafpoor, S., & Najjar, R. (2012). Deposition and corrosion resistance of electroless Ni-PCTFE-P nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 206(23), 4546–4552.
- [9] Milić, S. M., Antonijević, M. M., Šerbula, S. M., & Bogdanović, G. D. (2008). Influence of benzotriazole on corrosion behaviour of CuAlNiSi alloy in alkaline medium. *Corrosion engineering, science and technology*, 43(1), 30-37.
- [10] Li, B., Zhang, W., Zhang, W., & Huan, Y. (2017). Preparation of Ni-W/SiC nanocomposite coatings by electrochemical deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 702, 38–50.
- [11] Hosseini, M. G., Abdolmaleki, M., & Ghahremani, J. (2013). Investigation of corrosion resistance of electrodeposited Ni-W/SiC composite coatings. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 49(3), 247–253.
- [12] Ahmadiyeh, S., Rasooli, A., & Hosseini, M. G. (2018). Ni-B/SiC nanocomposite coating obtained by pulse plating and evaluation of its electrochemistry and mechanical properties. *Surface Engineering*, 35(10), 861–872.
- [13] Ahmadiyeh, S., Rasooli, A., & Hosseini, M. G. (2020). Corrosion and wear study of Ni-W-B/WC composite coatings electroplated by pulse plating. *Advanced Engineering Materials*, 22(8), 2000426.
- [14] Abdolmaleki, M., Golbedaghi, R., & Ahmadiyeh, S. (2020). Synthesis of Ni-W/SiO₂ nanocomposite coatings and investigation of their corrosion behavior in 3.5% NaCl solution. *Applied Chemistry Today*, 59, 51–62. (in Persian)
- [15] Liu, H., Li, Z., Zhang, X., Chen, H., Xu, S., Fan, Y., Yuan, Q., Sun, Y., Hou, X., & He, Y. (2024). Study on corrosion resistance and tribo behavior of electrodeposited Ni-W-P/TiN composite coatings. *The Journal of Physical Chemistry C*, 128(48), 20679–20692.

- [16] Abdolmaleki, M., Ghamari, K., Ahmadiyeh, S., Azadi, B., Hanifehpour, Y., Allahgholipour, G. R., Hosseini, J., & Shafi Farhood, A. M. (2024). Electrodeposition of Ni-W/PTFE nanocomposite coating and investigation of its corrosion resistance and microhardness. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 55A, 353–359.
- [17] Zhang, H., Zou, J., & Lin, N., & Tang, B. (2014). Review on electroless plating Ni–P coatings for improving surface performance of steel. *Surface Review and Letters*, 21(4), 1430002.
- [18] Wang, C., Farhat, Z., Jarjoura, G., Hassan, M. K., & Abdullah, A. M. (2017). Indentation and erosion behavior of electroless Ni-P coating on pipeline steel. *Wear*, 376–377, 1630–1639.
- [19] Fukunaga, A., & Ueda, S. (2024). Pulse electrodeposition of Ni–P alloy coatings from Watts baths: P content, current efficiency, and internal stress. *Electrochimica Acta*, 502, 144839.
- [20] Selvan, R. A. S., Thakur, D. G., Seeman, M., & Naik, M. (2022). Surface modification of AH36 steel using ENi-P-nano TiO₂ composite coatings through ANN-based modelling and prediction. *Journal of Marine Science and Application*, 21(2), 193–203.
- [21] Sharma, A., & Singh, A. K. (2013). Electroless Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ nanocomposite coatings and their corrosion and wear resistance. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(1), 176–183.
- [22] Farzaneh, A., Mohammadi, M., Ehteshamzadeh, M., & Mohammadi, F. (2013). Electrochemical and structural properties of electroless Ni-P-SiC nanocomposite coatings. *Applied Surface Science*, 276, 697–704.
- [23] Czapczyk, K., Zawadzki, P., Wierzbicka, N., & Talar, R. (2021). Microstructure and properties of electroless Ni-P/Si₃N₄ nanocomposite coatings deposited on the AW-7075 aluminum alloy. *Materials*, 14(16), 4487.
- [24] Dhakal, D. R., Kshetri, Y. K., Gyawali, G., Kim, T. H., Choi, J. H., & Lee, S. W. (2021). Understanding the effect of Si₃N₄ nanoparticles on wear resistance behavior of electroless Nickel-Phosphorus coating through structural investigation. *Applied Surface Science*, 541, 148403.
- [25] Farhan, M., Fayyaz, O., Qamar, M. G., Shakoor, R. A., Bhadra, J., & Al-Thani, N. J. (2023). Mechanical and corrosion characteristics of TiC reinforced Ni-P based nanocomposite coatings. *Materials Today Communications*, 36, 106901.
- [26] Shashikala, A. R., & Sridhar, B. S. (2021). Codeposition of electroless Ni-P/ZnO nano composites and evaluation of corrosion resistance of the coatings. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3837–3840.
- [27] Shikalov, V. S., Vidyuk, T. M., Ukhina, A. V., & Ruktuev, A. A. (2026). Fabrication of Ni-P-B₄C coating by cold spraying with subsequent vacuum annealing. *Vacuum*, 245, 114971.
- [28] Lelevic, A., & Walsh, F. C. (2019). Electrodeposition of Ni–P alloy coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*, 369, 198–220.

- [29] Araghi, A., & Paydar, M. H. (2010). Electroless deposition of Ni–P–B4C composite coating on AZ91D magnesium alloy and investigation on its wear and corrosion resistance. *Materials & Design*, 31(6), 3095–3099.
- [30] Chen, Q., Xu, S., He, Y., Yan, S., Fan, Y., Li, Z., Zhou, H., Li, H., Wei, K., Gong, X., & Cheng, X. (2024). Enhancement of corrosion and wear resistance of Ni–P coatings stems from the synergistic effects of Cr3C2 and heat treatment. *Langmuir*, 40(30), 16400–16418.
- [31] Mafi, I. R., & Dehghanian, C. (2011). Studying the effects of the addition of TiN nanoparticles to Ni–P electroless coatings. *Applied Surface Science*, 258(5), 1876–1880.
- [32] Jin, H. M., Jiang, S. H., & Zhang, L. N. (2008). Microstructure and corrosion behavior of electroless deposited Ni–P/CeO2 coating. *Chinese Chemical Letters*, 19(11), 1367–1370.
- [33] Yang, Y., Chen, W., Zhou, C., Xu, H., & Gao, W. (2011). Fabrication and characterization of electroless Ni–P–ZrO2 nano-composite coatings. *Applied Nanoscience*, 1(1), 19–26.
- [34] Algül, H. (2025). Enhanced mechanical and corrosion performance of Ni-P coatings via pulse electrodeposition with optimized WS2 nanoplatelet reinforcement. *Advanced Engineering Materials*, 27(20), 2501392.
- [35] He, Y., Wang, S. C., Walsh, F. C., Chiu, Y.-L., & Reed, P. A. S. (2016). Self-lubricating Ni-P-MoS2 composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 307, 926–934.
- [36] Nazari, H., Barati Darband, G., & Arefinia, R. (2023). A review on electroless Ni–P nanocomposite coatings: effect of hard, soft, and synergistic nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 58(10), 4292–4358.
- [37] Zhang, Y., Wu, Y., Sun, K., & Yao, M. (1998). Characterization of electroless Ni-P-PTFE composite deposits. *Journal of Materials Science Letters*, 17(2), 119–12.
- [38] Gao, P., Xie, Z., Ouyang, C., Tao, T., Wu, X., & Huang, Q. (2018). Electrochemical characteristics and interfacial contact resistance of Ni-P/TiN/PTFE coatings on Ti bipolar plates. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 22(7), 1971–198.
- [39] Sun, D., Yang, Y., Liang, T., Ma, R., Du, A., Yang, M., Fan, Y., Zhao, X., & Cao, X. (2021). Construction and corrosion resistance of Ni-B4C superhydrophobic composite coatings on Q235 steel. *Surface and Coatings Technology*, 422, 12755.
- [40] Kose, M., Tan, S., & Uysal, M. (2025). Graphene oxide reinforced NiP-Co composite coatings: Optimum graphene oxide content for improved anticorrosion and wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, 504, 132021.
- [41] Song, J., He, Y., Li, H., Zhang, Y., Liu, B., Song, R., Zhang, Z., & He, Y. (2022). Preparation of pulse electrodeposited Ni-B/ZrC composite coatings and investigation of their mechanical properties and corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 447, Article 128845.

- [42] Duru, E., Dogan, F., Uysal, M., Akbulut, H., & Aslan, S. (2021). Fabrication and characterization of graphene oxide reinforced Ni–B composite coating by pulsed electrodeposition technique. *Diamond and Related Materials*, 120, Article 108688.
- [43] Tabish, M., Malik, M. U., Khan, M. A., Yasin, G., Asif, H. M., Anjum, M. J., Khan, W. Q., Ibraheem, S., Nguyen, T. A., Slimani, Y., & Nazir, M. T. (2021). Construction of NiCo/graphene nanocomposite coating with bulges-like morphology for enhanced mechanical properties and corrosion resistance performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 867, Article 159138.
- [44] Hosseini, M., & Ariankhah, E. (2016). Electrochemical Evaluation of Ni/RuO₂ and Ni/RuO₂/Mixed- Metal Oxide Coatings Electrodes toward Hydrogen Evolution Reaction in Alkaline Medium. *Applied Chemistry Today*, 11, 147-164. (in Persian)
- [45] Zolfaghari, M., Arab, A., & Asghari, A. (2018). On the morphology and corrosion behavior of Ni nanostructures electrodeposited in the presence of different surfactants. *Applied Chemistry Today*, 13, 37-44. (in Persian)
- [46] Ahmadiyeh, S., Rasooli, A., & Hosseini, M. G. (2018). Ni–B/SiC nanocomposite coating obtained by pulse plating and evaluation of its electrochemistry and mechanical properties. *Surface Engineering*, 35(10), 861–872.

