



Investigation of the Wear and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P/Ni-B Coating Reinforced with Ceria Sol

Faezeh Badiiee¹, Daryush Arabian^{*1} , Hossein Jamali² and Shahab Torkian²

1- Faculty of Applied Sciences, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Isfahan

2- Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Isfahan

* Corresponding author, Email: daryush_arabian@yahoo.com

(Received: 18 October 2025; Revised: 15 December 2025; Accepted: 16 December 2025; Available online: 12 January 2026)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Wear and corrosion are among the primary challenges that reduce the service life and performance of industrial components. In this study, a sol-enhanced method is employed to incorporate ceria into electroless Ni-P/Ni-B coatings to improve mechanical, tribological, and corrosion properties.

Materials and Methods: A uniform distribution of ceria nanoparticles was achieved by introducing ceria sol derived from an alkoxide precursor into the Ni-B electroless bath. Characterization was performed by XRD and FE-SEM, DLS, potentiodynamic polarization test, and pin-on-disk wear tests.

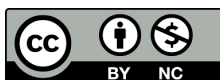
Results: The results showed that the use of ceria sol improved the uniformity of the distribution of reinforcing particles and formed a relatively dense Ni-B coating with good surface quality and no real surface cracks. The surface features were mainly related to the boundaries of cauliflower nodules. The polarization curve indicates a more stable with slower rate of corrosion for the CeO₂-containing coating compared to the substrate, due to the formation of a protective layer and increased surface chemical stability. Using the Ni-P/Ni-B-CeO₂ coating on the aluminum substrate resulted in a 21% reduction in the friction coefficient and a 70% reduction in the specific wear rate compared to the substrate.

Conclusion: Using sol of ceria in Ni-B coatings, due to the prevention of particle accumulation in the coating, led to a significant increase in corrosion resistance, reduced friction coefficient, and improved wear resistance of the coating.

Keywords: Electroless, Coating, Wear, Ceria, Sol.

How to Cite: Badiiee F, Arabian D, Jamali H, Torkian Sh. Investigation of the wear and corrosion resistance of electroless Ni-P/Ni-B coating reinforced with ceria sol. J Adv Mater Eng. 2026;45(2):135–149. <https://doi.org/10.47176/jame.45.2.1159>

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی مقاومت به سایش و خوردگی پوشش الکترولس Ni-P/Ni-B تقویت شده با محلول حاوی سریا

فائزه بدیعی^۱، داریوش عربیان^{۱*}، حسین جمالی^۲ و شهاب ترکیان^۲

۱- دانشکده علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: daryush_arabian@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۵، انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲)

چکیده

مقدمه و اهداف: سایش و خوردگی، از جمله چالش‌های اصلی هستند که عمر مفید و عملکرد اجزای صنعتی را کاهش می‌دهند. در این مطالعه، یک فرایند بهبودیافته با محلول حاوی سریا در پوشش‌های الکترولس Ni-P/Ni-B به منظور بهبود خواص مکانیکی، تریبولژیکی و خوردگی اعمال شده است.

مواد و روش‌ها: توزیع یکنواخت نانوذرات سریا با وارد کردن محلول حاوی سریا مشتق شده از پیش‌ساز آلکوکسیدی بوتوکسید سریم به حمام الکترولس Ni-B، ایجاد شد. مشخصه‌یابی با استفاده از آزمون‌های XRD، FESEM، DLS، آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و سایش پین روی دیسک انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که استفاده از محلول حاوی سریا موجب بهبود یکنواختی توزیع ذرات تقویت‌کننده و تشکیل پوشش Ni-B با کیفیت سطحی مناسب شد، به طوری که ترک سطحی واقعی مشاهده نشده و ویژگی‌های سطحی عمدتاً به مرز ندول‌های گل کلمی مربوط است. منحنی پلاریزاسیون نشان‌دهنده رفتار خوردگی پایدار و کندتر پوشش لایه‌نشانی شده با محلول حاوی نسبت به زیرلایه است که ناشی از تشکیل لایه محافظ و افزایش پایداری شیمیایی سطحی است. استفاده از پوشش Ni-P/Ni-B-CeO₂ روی زیرلایه آلومینیومی موجب کاهش ۲۱٪ ضریب اصطکاک و همچنین کاهش ۷۰٪ نرخ سایش ویژه نسبت به زیرلایه شده است.

نتیجه‌گیری: استفاده از محلول حاوی سریا در پوشش‌های Ni-B، به دلیل جلوگیری از تجمع ذرات در پوشش منجر به افزایش قابل توجه مقاومت در برابر خوردگی و بهبود خواص مکانیکی مانند کاهش ضریب اصطکاک و بهبود مقاومت به سایش پوشش شد.

واژه‌های کلیدی: الکترولس، پوشش، سایش، سریا، سل.



۱- مقدمه

سطوح مواد همواره در معرض تماس مستقیم با عوامل محیطی نظیر رطوبت، اکسیژن، یون‌های خورنده و ذرات ساینده قرار دارند که این شرایط می‌تواند منجر به بروز فرایندهای نامطلوبی همچون سایش، خوردگی و تخریب شیمیایی گردد. این نوع آسیب‌ها معمولاً باعث افت عملکرد اجزای صنعتی شده، عمر مفید آن‌ها را کاهش داده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، یکی از آلیاژهای پرکاربرد آلومینیوم است که به‌دلیل استحکام بالا و نسبت استحکام به وزن مناسب، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف به‌ویژه هوافضا دارد (۱). باین‌حال، حضور مس در ترکیب این آلیاژ موجب کاهش مقاومت به خوردگی و سایش سطحی شده است. به‌همین دلیل، طی سال‌های اخیر پژوهشگران تلاش‌های گسترده‌ای را برای توسعه روش‌های مؤثر جهت بهبود خواص سطحی مواد انجام داده‌اند (۲). در بین روش‌های گوناگون مهندسی سطح، پوشش‌های الکتروسل به دلیل مزایای متعددشان، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع پوشش‌ها، یکنواختی ضخامت در سراسر سطح زیرلایه حتی در قطعات با شکل‌های پیچیده و غیرمنظم است. این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌ای بسیار مناسب برای پوشش‌دهی قطعات صنعتی با هندسه‌های دشوار تبدیل کرده است. علاوه‌براین، پوشش‌های الکتروسل بدون نیاز به جریان الکتریکی انجام می‌شوند و در نتیجه محدودیت‌های ناشی از طراحی آندی/کاتدی را ندارند. همچنین، خواص مکانیکی مناسب مانند سختی بالا، چسبندگی خوب به زیرلایه و مقاومت در برابر خوردگی و سایش از دیگر مزایای قابل‌توجه این پوشش‌ها به‌شمار می‌روند (۳ و ۴). پوشش‌های الکتروسل پایه نیکل مانند نیکل-فسفر^۱ (Ni-P) و نیکل-بور^۲ (Ni-B)، از جمله پرکاربردترین سیستم‌های پوشش‌دهی در این زمینه هستند. پوشش‌های Ni-P، به‌دلیل مقاومت مناسب در برابر خوردگی در صنایع مختلف کاربرد دارند. درمقابل، پوشش‌های Ni-B به‌خاطر سختی ذاتی بالا و مقاومت سایشی مطلوب، برای کاربردهای

مهندسی در محیط‌های سایشی مناسب‌تر هستند، اما در مقایسه با Ni-P از مقاومت به خوردگی کمتری برخوردار هستند؛ بنابراین، ترکیب این دو پوشش در قالب یک ساختار دولایه Ni-P/Ni-B می‌تواند موجب هم‌افزایی خواص حفاظتی گردد، به‌طوری‌که لایه زیرین مقاومت به خوردگی و لایه بالایی مقاومت به سایش را فراهم کند. این ترکیب، پتانسیل ایجاد پوششی با عملکرد بهینه و خواص چندمنظوره برای کاربردهای صنعتی را فراهم می‌کند (۵-۷). در سال‌های اخیر، تلاش‌های متعددی برای بهبود فرایند پوشش‌دهی الکتروسل نیکل و افزایش کارایی آن انجام شده است. به‌عنوان نمونه، وردی و همکاران (۴)، با معرفی روش نوین گرمایش موضعی زیرلایه (پایه داغ) نشان دادند که با تمرکز انرژی حرارتی در نزدیکی سطح زیرلایه، می‌توان بدون ناپایداری حمام، نرخ رسوب پوشش Ni-P را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد و هم‌زمان امکان پوشش‌دهی موضعی و ایجاد پوشش‌های با خواص گرادیانی را فراهم نمود. باین‌حال، بررسی رفتار مقاومت به سایش و خوردگی پوشش‌های الکتروسل کامپوزیتی همچنان نیازمند مطالعات تکمیلی است. به‌منظور بهبود بیشتر عملکرد پوشش‌های الکتروسل، نانوذرات سرامیکی مانند Si_3N_4 (۸)، TiO_2 (۹)، Al_2O_3 (۱۰ و ۱۱)، SiC (۱۲)، BN (۱۳) و CeO_2 (۱۴ و ۱۷) به حمام الکتروسل اضافه شده‌اند که منجر به بهبود خواص نهایی پوشش مانند سختی، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی شده است. این افزایش سختی را می‌توان به سازوکارهای مقاوم‌سازی اوراوان^۳ و هال-پیچ^۴ نسبت داد. این دو سازوکار نقش کلیدی در محدودسازی حرکت نابجایی‌ها ایفا می‌کنند که عامل اصلی در تغییر شکل پلاستیک است. براساس سازوکار هال-پیچ، کاهش اندازه دانه باعث افزایش مقاومت در برابر لغزش نابجایی‌ها شده و بنابراین سختی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در سازوکار اوراوان، نانوذراتی که در مسیر حرکت نابجایی‌ها قرار می‌گیرند به‌عنوان موانعی عمل کرده و باعث انحنای مسیر نابجایی و افزایش انرژی لازم برای حرکت آن‌ها می‌شوند. نتیجه این فرایندها، افزایش چشمگیر سختی و مقاومت مکانیکی در پوشش‌های نهایی است. در میان ذرات

تقویت‌کننده‌ها، اکسید سریم^۵ (CeO_2) به دلیل ویژگی‌هایی مانند پایداری شیمیایی، خواص ضدسایش و ضدخوردگی، اهمیت ویژه‌ای دارد. مطالعات مختلف، بهبود چشمگیر در سختی، مقاومت به سایش و خوردگی را در پوشش‌های پایه Ni-CeO_2 گزارش کرده‌اند (۱۴). روش‌های مختلفی برای سنتز نانوذرات CeO_2 وجود دارد که شامل رسوب شیمیایی، هیدروترمال، احتراق خودبه‌خودی و روش سل-ژل هستند. روش سل-ژل، با استفاده از انتخاب مناسب پیش‌سازهایی مانند نیترات سریم، کلرید سریم یا نیترات آمونیوم سریم، مزایای چشمگیری در کنترل ترکیب و ریخت‌شناسی فراهم می‌آورد (۱۸ و ۱۹). استفاده از این ترکیبات در محیط مناسب، منجر به تشکیل محلول شفاف، پایدار و حاوی نانوذرات یکنواخت می‌گردد که قابلیت پراکندگی مناسبی در حمام‌های الکترولس دارند. درمقایسه با افزودن مستقیم نانوذرات پودری به حمام الکترولس که معمولاً منجر به کلوخه‌ای شدن ذرات، پراکندگی ضعیف و چسبندگی نامناسب می‌شود، روش تقویت‌شده با محلول حاوی سریم به توزیع یکنواخت‌تر و ایجاد پوشش مناسب‌تر کمک می‌کند. این رویکرد ترکیبی، که شامل استفاده همزمان از محلول حاوی ذرات تقویت‌کننده در حمام‌های الکترولس است، نخستین‌بار در سال ۲۰۱۰ برای ساخت پوشش‌های کامپوزیتی Ni-P تقویت‌شده با TiO_2 مورد استفاده قرار گرفت (۲۰). هدف از این روش، غلبه بر مشکلاتی مانند کلوخه‌شدن و توزیع غیریکنواخت نانوذرات در پوشش نهایی بود که در روش‌های قبلی (افزودن مستقیم نانوذرات پودری به حمام) رخ می‌داد. نتایج حاصل از این فرایند نواورانه نشان داد که استفاده از محلول حاوی TiO_2 به‌عنوان منبع پراکندگی نانوذرات، منجر به افزایش قابل‌توجه سختی پوشش در حدود HV_{200} ۱۰۲۵ شده است (۲۰). از آن زمان، مطالعات متعددی توسط پژوهشگران در زمینه استفاده از محلول‌های حاوی ذرات مختلف مانند TiO_2 ، ZrO_2 و SiO_2 در پوشش‌های لایه‌نشانی‌شده با روش‌های مختلف آبکاری به‌کار گرفته شده است (۲۶-۲۱).

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه استفاده از نانوذرات تقویت‌کننده در پوشش‌های الکترولس، کاربرد اکسید سریم

به‌صورت محلول در این نوع پوشش‌ها هنوز مورد مطالعه قرار نگرفته است. بیشتر مطالعات پیشین بر افزودن مستقیم پودر نانوذرات CeO_2 به حمام‌های الکترولس متمرکز بوده‌اند، که اغلب با چالش‌هایی مانند تجمع ذرات، پراکندگی غیریکنواخت و پیوند بین‌فازی ضعیف بین نانوذره و زمینه فلزی مواجه هستند. این محدودیت‌ها، موجب توزیع غیریکنواخت ذرات و کاهش کارایی تقویتی آن‌ها در پوشش نهایی شده است. استفاده از سریم به‌صورت محلول، علاوه بر جلوگیری از کلوخه‌شدن ذرات، امکان توزیع یکنواخت‌تر نانوذرات در حمام الکترولس و برهم‌کنش مؤثرتر با زمینه فلزی را فراهم می‌کند. افزون بر این، پایداری شیمیایی بالای CeO_2 موجب می‌شود که این فاز تقویت‌کننده، برخلاف بسیاری از محلول‌ها و ذرات متداول که صرفاً نقش مکانیکی دارند، به‌طور هم‌زمان در بهبود ریزساختار، افزایش مقاومت به سایش و کنترل فرایندهای تریبوشیمیایی مؤثر باشد. در پژوهش حاضر، از روش ترکیبی محلول حاوی سریم و الکترولس استفاده شده است که در آن، محلول حاوی سریم از پیش‌ساز آلکوکسیدی تهیه و سپس به حمام پوشش‌دهی الکترولس Ni-B اضافه شده است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر حضور محلول حاوی سریم بر خواص ساختاری و عملکردی پوشش دولایه الکترولس Ni-P/Ni-B است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محلول حاوی سریم

برای تهیه پیش‌ساز آلکوکسیدی بوتوکسید سریم Ce(OBu)_4 به‌عنوان ماده اولیه محلول حاوی CeO_2 ، از نمک نیترات آمونیوم سریم $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ و هیدرید سدیم (NaH) استفاده شد. این دو ترکیب ابتدا در یک مخلوط حلال شامل دی‌متوکسی‌تان^۶ و دی‌بوتانول در شرایط همگن‌سازی کامل حل شدند تا واکنش بین آن‌ها به‌طور یکنواخت صورت گیرد. پس از آن، محلول حاصل چندین نوبت با DME تازه شست‌وشو داده شد تا محصولات جانبی ناخواسته و ناخالصی‌های احتمالی به‌طور مؤثری حذف شوند. در ادامه، برای تهیه محلول حاوی سریم،

جدول ۱- درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴

عناصر	آلومینیوم	تیتانیوم	مس	آهن	منیزیم	روی	سیلیکون	منگنز
درصد	۹۲٫۵	۰٫۱۵	۴٫۱	۰٫۵	۱٫۴	۰٫۲۵	۰٫۵	۰٫۶

جدول ۲- ترکیب شیمیایی برای لایه‌نشانی مقدماتی پوشش Ni-P/Ni-B

نیکل کلرید	سدیم بورهیدرید	نیترات سرب	سدیم هیدروکسید	اتیلن دیامین
۳۰ g/L	۱ g/L	۰/۰۰۱ g/L	۴۰ g/L	۶ mL/L

پیش‌ساز بوتوکسید سریم در دوبوتانول حل شد و به‌منظور جلوگیری از واکنش‌های ناخواسته، استیل‌استون^۷ به‌عنوان عامل کلات‌کننده و آب به‌عنوان عامل هیدرولیز مورد استفاده قرار گرفت. نسبت‌های مولی اجزای واکنش به‌صورت زیر تنظیم شدند (۲۷).

$$\frac{\text{Ce}(\text{OBu})_4}{2 - \text{BuOH}} = 0.01$$

$$\frac{\text{Ce}(\text{OBu})_4}{\text{ACAC}} = 2$$

$$\frac{\text{Ce}(\text{OBu})_4}{\text{H}_2\text{O}} = 0.4$$

درنهایت، محلول حاوی سریا حاصل در دسیکاتور خلأ نگهداری شد تا از جذب رطوبت محیط جلوگیری شده و تا زمان استفاده در فرایند پوشش‌دهی پایدار باقی بماند.

۲-۲- آماده‌سازی زیرلایه

زیرلایه‌های آلومینیومی با ترکیب مندرج در جدول (۱)، به‌صورت مستطیل‌هایی با ابعاد مشخص برش داده شدند و با استفاده از سنباده‌هایی با زبری بین ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ تحت فرایند پولیش مکانیکی قرار گرفتند. سپس برای حذف آلودگی‌های سطحی و چربی‌ها، نمونه‌ها به‌مدت مشخص درون حمام اولتراسونیک حاوی استون قرار گرفتند. مراحل پیش‌تصفیه شامل چربی‌زدایی قلیایی و اسیدشویی با محلول اسیدسولفوریک (H_2SO_4) با غلظت مشخص انجام شد تا سطح برای انجام فرایند پوشش‌دهی فعال شود. لازم به ذکر است که زیرلایه‌های آلومینیومی تمایل زیادی به اکسیدشدن برای تشکیل لایه Al_2O_3 دارند؛ بنابراین قبل از

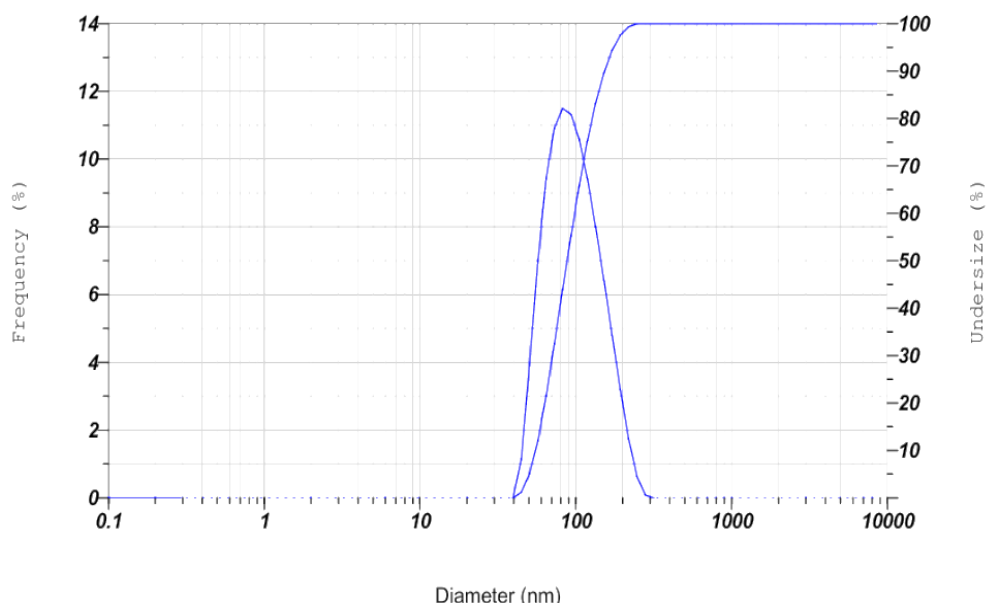
شروع لایه‌نشانی برای چسبندگی مناسب بین پوشش و زیرلایه، لایه‌نشانی روی در دو مرحله با استفاده از محلول زینکاته آماده انجام شد.

۲-۳- آماده‌سازی حمام‌های الکترولس

فرایند پوشش‌دهی به‌صورت دولایه انجام شد. در ابتدا، پوشش Ni-P با استفاده از محلول تجاری آماده SLOTONIP-70A ساخت شرکت اشلوتر^۸ آلمان در دمای معین 90°C اعمال شد. سپس، نمونه‌های پوشش‌داده‌شده در حمام الکترولس Ni-B قرار گرفتند. در این حمام، عوامل مختلف براساس مقادیر ذکر شده در جدول (۲)، استفاده شدند.

به‌دلیل قدرت احیای بالای سدیم بورهیدرید نسبت به سایر عوامل کاهنده، این ترکیب در شرایط کاری با $\text{pH} \sim 14$ و دمای 85°C به‌کار گرفته شد. هم‌زدن مغناطیسی با سرعت 300 دور بر دقیقه انجام شد تا یکنواختی محلول حفظ شود. پس از گذشت 10 دقیقه از شروع فرایند Ni-B، محلول حاوی CeO_2 با غلظت 10 mL/L به حمام اضافه شد.

آزمون تفرق نور پویا^۹ با استفاده از دستگاه HORIBASZ-100 برای بررسی توزیع اندازه ذرات محلول حاوی سریا سنتز شده با زاویه پراکندگی 90° درجه مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی ساختار فازی پوشش‌ها، از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس^{۱۰} با زاویه کم، گریزینگ، با طیف تابش Cu-K α و زاویه تابش سه درجه انجام شد. برای بررسی میکروساختاری پوشش‌ها، از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی^{۱۱} مدل QUANTA FEG 450 استفاده شد. خصوصیات سایشی با استفاده از دستگاه آزمون



شکل ۱- توزیع اندازه ذرات CeO_2 را به روش DLS.

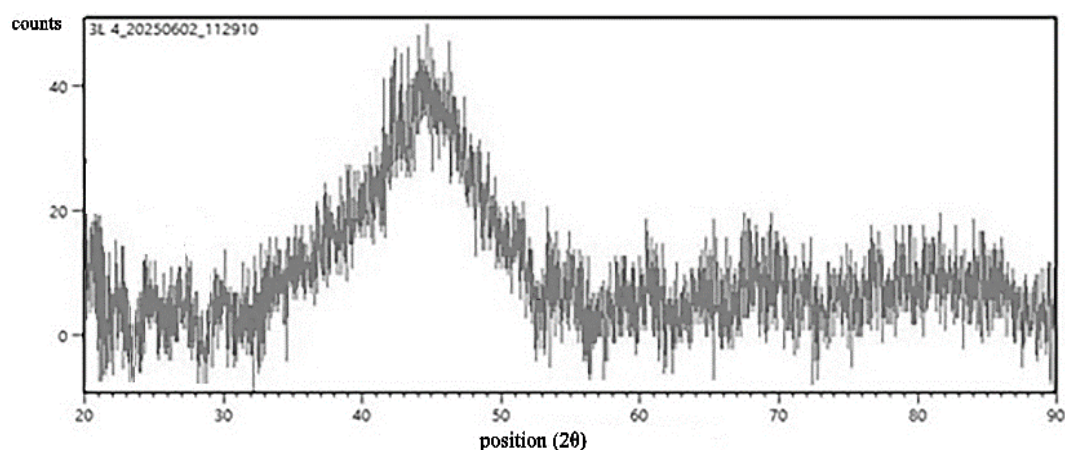
نانوذرات پایدار با ابعاد قابل قبول برای کاربرد در پوشش‌های نانوکامپوزیتی است. لازم به ذکر است که اندازه به دست آمده برای ذرات، از نظر ترمودینامیکی به عنوان اندازه هیدرودینامیکی شناخته می‌شود که شامل لایه‌ای از حلال اطراف ذره نیز هست؛ بنابراین، اندازه واقعی هسته سرامیکی ممکن است اندکی کمتر از مقدار گزارش شده باشد. باین حال، نتایج گزارش شده، بیانگر پایداری بالای ذرات در محیط الکلی و آبی محلول می‌باشد که در نهایت به توزیع یکنواخت‌تر در حمام الکترولس و اتصال بهتر به زمینه فلزی منجر خواهد شد. پراکندگی محدود ذرات و تمرکز پیک در یک بازه مشخص نشان می‌دهد که ذرات تشکیل شده، تمایل کمی به کلوخه شدن داشته‌اند (۱۶). این مسئله به خوبی صحت روش سنتز محلول حاوی سریا با استفاده از پیش ساز آلکوکسیدی را تأیید می‌کند. بررسی مقالات مختلف در این زمینه نشان داد که استفاده از ذرات تقویت کننده در حالت پودری در حمام الکترولس منجر به کلوخه شدن ذرات و نیز ته نشینی آن‌ها در حمام الکترولس می‌شود (۱۴، ۱۶ و ۲۸). این موضوع می‌تواند بر ریخت شناسی پوشش و خواص نهایی آن تأثیر بگذارد. در مجموع، نتایج آزمون DLS، موفقیت آمیز بودن فرآیند سنتز محلول حاوی سریا و مناسب بودن آن برای استفاده به عنوان فاز

سایش پین روی دیسک ارزیابی شد که در آن از پین فولادی AISI 52100 با سختی RC ۶۳ استفاده شد. شرایط آزمون شامل نیروی ۱۰ نیوتن، سرعت لغزش ۱۶۰ دور در دقیقه و مسافت ۵۰۰ متر بود. اندازه گیری زبری سطح با دستگاه پروفیلومتر میتوئیو^{۱۲} انجام گرفت. برای ارزیابی مقاومت به خوردگی نیز از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک تافل استفاده شد. آزمون در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl در دمای محیط و با نرخ اسکن ۱ mV/s از بازه ولتاژ ۲۵۰- میلی ولت تا ۲۵۰+ میلی ولت نسبت به الکتروود مرجع انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اندازه ذرات سریا

به منظور تعیین اندازه میانگین ذرات موجود در محلول حاوی CeO_2 ، از آزمون DLS استفاده شد که نمودار به دست آمده از این آزمون در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده توزیع یکنواخت با اندازه میانگین ذرات برابر با ۹۳ نانومتر و شاخص پراکندگی^{۱۳} برابر ۰/۳ است که نشان از یکنواختی مناسب در توزیع اندازه ذرات در محلول دارد. بیشینه اندازه ذرات ۹۷ نانومتر مشاهده شد. این نتایج بیانگر کنترل مؤثر رشد ذرات و تشکیل



شکل ۲- الگوی XRD ارائه شده برای پوشش دولایه الکترولس Ni-P/Ni-B-CeO₂ (Sol).

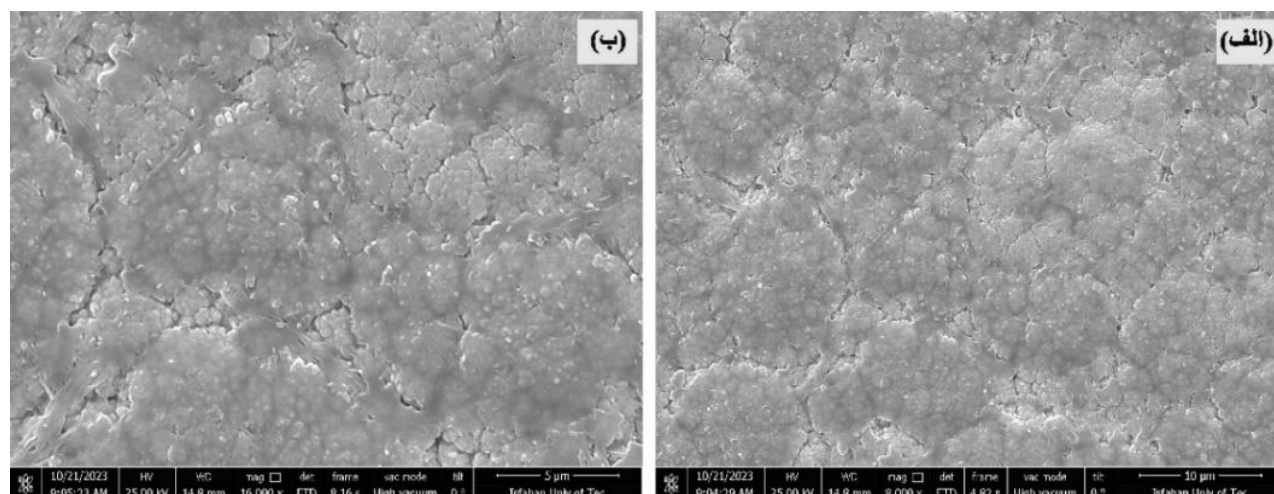
مقدار ذرات تقویت کننده در پوشش کم بوده یا این ذرات به صورت بسیار ریز و نانومتری پراکنده شده اند، به طوری که شدت پراش آن ها در الگو قابل تشخیص نیست (۳۴). همچنین، در فرایند لایه نشانی الکترولس با افزودن محلول حاوی سریا، توزیع همگن نانوذرات در زمینه فلزی ممکن است منجر به مخفی شدن پیک های اختصاصی آن ها شود؛ بنابراین عدم شناسایی این فازها را می توان به محدودیت های حد تشخیص XRD و وابستگی به نظم دوربرد نسبت داد که با نتایج به دست آمده در سایر مطالعات همخوانی دارد (۳۵).

شکل (۳)، تصاویر ریخت شناسی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح پوشش های دولایه Ni-P/Ni-B تقویت شده با محلول حاوی سریا را در دو بزرگنمایی متفاوت ۸۰۰۰ برابر (۳-) الف) و ۱۶۰۰۰ برابر (۳-ب) نشان می دهد. ریخت شناسی غالب پوشش در هر دو تصویر، به وضوح از نوع گل کلمی است؛ این بافت معمولاً ناشی از جوانه زنی پر شمار، رشد سطحی محدود شده و هم جوشی تدریجی جزایر نیکل است که در حضور عوامل کاهنده قوی و نرخ رسوب بالا رخ می دهد. این نوع ریخت شناسی در بسیاری از مقالات مرتبط با پوشش های الکترولس Ni-B نیز گزارش شده است (۱۶ و ۲۹). تاثیر حضور ذرات تقویت کننده نیز بر ریخت شناسی پوشش ها در مقالات مختلف بررسی شده است و نتایج نشان داده است که حضور نانوذرات منجر به

تقویت کننده در پوشش های Ni-P و Ni-B را نشان می دهد. این ویژگی، می تواند نقش کلیدی در بهبود خواص مکانیکی و خوردگی پوشش نهایی ایفا کند.

۲-۳- ریز ساختار و ریخت شناسی

پوشش های الکترولس Ni-P/Ni-B در حالت رسوب گذاری شده، معمولاً دارای ساختار آمورف یا نیمه آمورف هستند که این موضوع منجر به پهن شدگی پیک ها و محدودیت در شناسایی دقیق فازها در آزمون XRD می شود. از این رو، هدف از انجام آزمون XRD در پژوهش حاضر، بررسی ماهیت کلی ساختاری پوشش ها در حالت لایه نشانی بوده است. تصویری از الگوی پراش پرتو ایکس برای پوشش دولایه الکترولس Ni-P/Ni-B حاوی نانوذرات اکسید سریم در شکل (۲) نشان داده شده است. این الگو منعکس کننده ساختار، فازهای تشکیل دهنده و ویژگی های بلوری پوشش های ساختاریافته است. این الگو در بازه زاویه ای ۲θ از ۲۰ تا ۹۰ درجه ثبت شده و یک پیک پراش پهن و کم ارتفاع در ۴۴ ≈ ۲θ دارد که شاخصه بارز برای ساختار آمورف یا نیمه بلورین محسوب می شود (۱۴، ۲۹ و ۳۰). این پیک پهن متعلق به فاز Ni (۱۱۱) بوده که در حالت آمورف گسترش یافته است (۳۱-۳۳). از طرف دیگر، نبود پیک های مشخص و تیز مرتبط با فازهای بلوری Ni-B یا CeO₂ نیز نشان می دهد که یا



شکل ۳- تصاویر FESEM از سطح پوشش دولایه الکترولس Ni-P/Ni-B-CeO₂ (Sol) در دو بزرگنمایی مختلف.

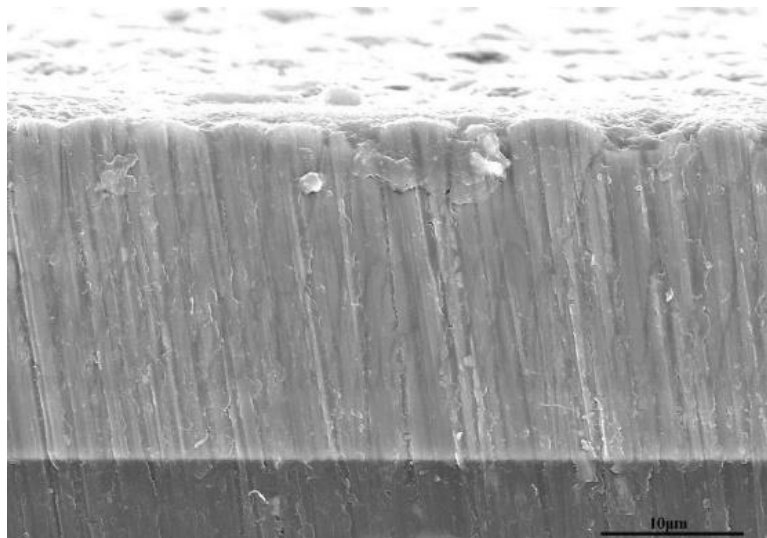
امتداد سطح زیرلایه رشد کرده است. ضخامت متوسط پوشش متوسط $24 \mu\text{m}$ اندازه گیری شد. عدم مشاهده جدایش، ترک‌های سراسری یا ناپیوستگی قابل توجه در فصل مشترک پوشش و زیرلایه، بیانگر تشکیل یکنواخت لایه پوششی و اتصال مناسب آن به زیرلایه آلومینیومی است.

۳-۳- مقاومت به خوردگی

نمودار منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک تافل پوشش Ni-P/Ni-B-CeO₂ در مقایسه با زیرلایه آلومینیومی در شکل (۵) نشان داده شده است. اهمیت طراحی دقیق ساختار لایه‌ای و توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده برای دستیابی به حداکثر مقاومت به خوردگی در محیط‌های مهاجم از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی پژوهش‌ها نشان داد که ذرات CeO₂ با بهره‌گیری از ظرفیت بافر اکسیژن در واکنش‌های سطحی، ضمن ممانعت از نفوذ یون‌های مهاجم، به ایجاد و ترمیم دینامیک لایه‌های غیرفعال سطح نیکل کمک می‌کنند (۱۴، ۱۷ و ۴۱)؛ بنابراین انتظار می‌رود که در پوشش‌های الکترولس نیز افزودن نانوذرات سریا باعث ایجاد یک لایه غیرفعال فعال روی سطح شده که از نفوذ یون‌های خورنده جلوگیری کند (۱۴). همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، پوشش حاوی محلول حاوی CeO₂ جریان خوردگی پایین‌تر و پتانسیل خوردگی بالاتری را

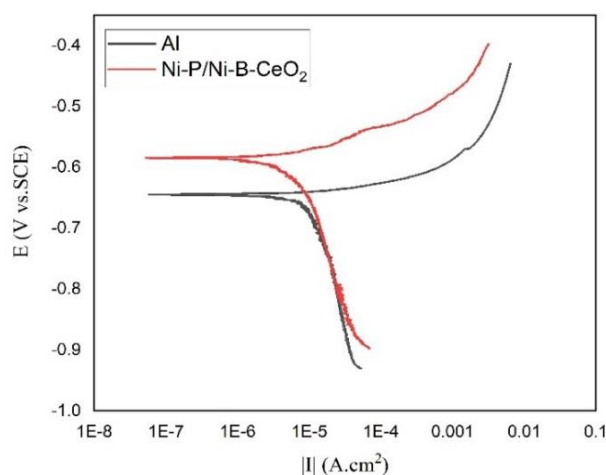
ریز شدن دانه‌ها و متراکم شدن ریزساختار پوشش می‌شود (۳۶ و ۳۷). این ساختار دانه‌ریز و متراکم در پوشش حاضر نیز ناشی از حضور نانوذرات CeO₂ به صورت محلول در حمام پوشش‌دهی می‌باشد. در این پوشش‌ها نیروهای پیوندی بین ذرات نیکل و اکسید سریم به عنوان تقویت‌کننده، قوی بوده و توزیع ذرات در زمینه فلزی به صورت یکنواخت انجام شده است. از طرفی دیگر، بررسی مطالعات انجام‌شده روی پوشش‌های تقویت‌شده با نانوذرات نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات به صورت پودر در حمام می‌تواند منجر به کلوخه شدن و توزیع نامناسب ذرات در زمینه فلزی شود. این موضوع نه تنها باعث کاهش خواص مکانیکی بلکه موجب ایجاد نواحی تخلخل‌دار در پوشش می‌گردد (۳۸). بررسی‌ها نشان داد که استفاده از نانوذرات در حالت محلول حاوی سریا که با پیش‌سازهای آلکوکسیدی تهیه شده‌اند، به دلیل اندازه کوچک، پراکندگی یکنواخت و واکنش‌پذیری مناسب، منجر به ایجاد ساختاری فشرده، همگن و بدون تخلخل‌های واضح می‌شوند (۲۴، ۳۹ و ۴۰). نتایج مشابه در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (۱۶).

تصویر ریخت‌شناسی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح مقطع عرضی پوشش الکترولس Ni-P/Ni-B-CeO₂ روی زیرلایه آلومینیومی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، پوشش به صورت پیوسته و یکنواخت در



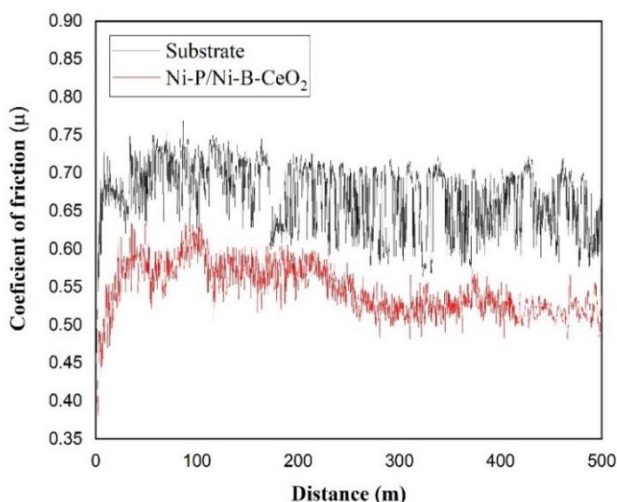
شکل ۴- تصویر ریزشیمی الکترونی روشی گسیل میدانی از سطح مقطع عرضی پوشش الکتروکاتالیز Ni-P/Ni-B-CeO_2 روی زیرلایه آلومینیومی.

نشان می‌دهد (۴۲). افزون بر این، چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) پوشش دولایه به شکل قابل توجهی کمتر از نمونه آلومینیوم و در حدود $8 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ می‌باشد. این مقدار در مقایسه با پوشش تک‌لایه Ni-B که چگالی جریان خوردگی نسبتاً بالاتر (حدود $17 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) دارد، نشان‌دهنده بهبود چشمگیر مقاومت به خوردگی در پوشش دولایه است (۲). روند منحنی‌ها نشان می‌دهد که پوشش کامپوزیتی در ناحیه جریان‌های پایین‌تر قرار دارد و یک تا دو مرتبه بزرگی کاهش در مقدار I_{corr} را نسبت به زیرلایه آلومینیومی تجربه می‌کند. با این افت معنادار در جریان خوردگی حاکی از کندشدن فرایندهای اکسایش و کاهش سطحی و کاهش نفوذ یون‌های مهاجم به پوشش است. این رفتار برتر را می‌توان به اثر هم‌افزایی ساختار دولایه پوشش Ni-P/Ni-B ، حضور نانوذرات CeO_2 و مکانیسم‌های حفاظت سطحی ناشی از آن‌ها مرتبط دانست. از طرف دیگر می‌دانیم که استفاده از CeO_2 به صورت محلول به جای پودر باعث افزایش یکنواختی پراکندگی ذرات، کاهش کلوخه‌شدن و در نتیجه بهبود خواص ضد خوردگی پوشش می‌شود. این توزیع یکنواخت از ذرات تقویت‌کننده باعث شده است که نانوذرات CeO_2 علاوه بر بافر اکسیژن، ضمن شرکت فعال در تشکیل و ترمیم دینامیک لایه‌های غیرفعال با توزیع



شکل ۵- منحنی‌های پلاریزاسیون به دست آمده برای پوشش الکتروکاتالیز Ni-P/Ni-B تقویت شده با محلول CeO_2 در مقایسه با زیرلایه.

نسبت به زیرلایه نشان داده است. پتانسیل خوردگی پوشش Ni-P/Ni-B-CeO_2 در حدود 0.58 V و برای نمونه آلومینیوم نزدیک به 0.66 V است. مثبت‌تر بودن پتانسیل خوردگی این پوشش دلالت بر پایداری الکتروشیمیایی بالاتر و تمایل کمتر به آغاز و پیشرفت خوردگی در شرایط مشابه دارد. در مقایسه با پوشش Ni-P-TiO_2 تقویت شده با محلول حاوی TiO_2 که پتانسیل خوردگی 0.72 V را گزارش کرده است بهبود $8/3\%$ را



شکل ۶- ضریب اصطکاک پوشش الکترولس Ni-P/Ni-B

تقویت شده با محلول CeO_2 در مقایسه با زیرلایه.

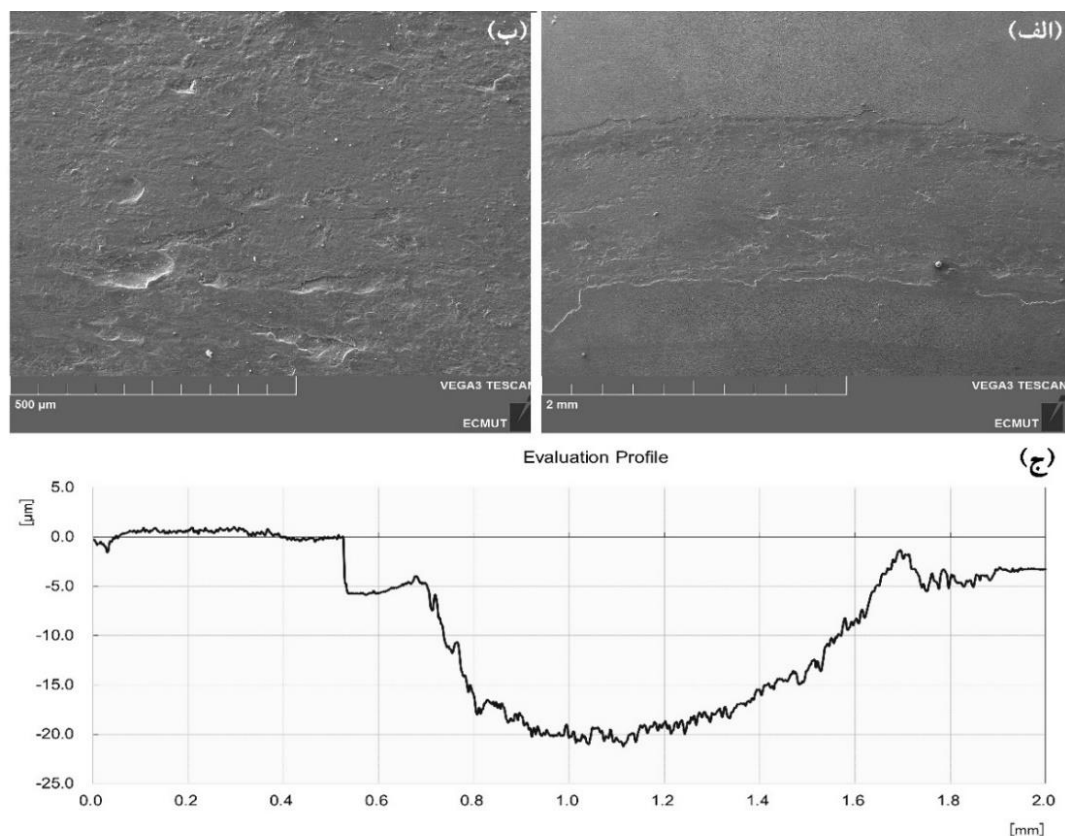
چسبندگی و اصطکاک نسبی می شود. حضور نانوذرات اکسید سریم در ساختار دولایه Ni-P/Ni-B با افزایش سختی و هموارسازی سطح، نقشی کلیدی در کاهش ضریب اصطکاک و تثبیت رفتار سایشی ایفا می کند.

جرم از دست رفته در آزمون سایش به عنوان یک شاخص کلیدی عملکرد تریبولژیکی با ریزساختار و سازوکارهای مهندسی سطح پوشش، ارتباط مستقیم دارد. با توجه به ضخامت متوسط پوشش الکترولس Ni-P/Ni-B- CeO_2 (حدود $24 \mu\text{m}$)، تحلیل نتایج نرخ سایش ویژه می تواند به عنوان شاخصی از بارپذیری واقعی لایه پوشش در شرایط آزمون در نظر گرفته شود. نتایج به دست آمده از آزمون سایش، افزایش قابل توجه مقاومت در برابر سایش در اثر اعمال پوشش الکترولس Ni-P/Ni-B- CeO_2 بر سطح آلومینیوم است. پوشش های الکترولس خاصیت سختی بالا، یکپارچگی ریزدانه و قابلیت هموارسازی سطح را ارائه می دهند که نسبت به زیرلایه پایه (آلومینیوم)، به شکل موثرتری مقاومت به سایش را افزایش می دهند. افزودن نانوذرات اکسید سریم، باعث تقویت سختی از طریق جلوگیری از حرکت نابجایی ها می شود و اثرات سایش چسبنده و ساینده را محدود می کند. از طرف دیگر، استفاده محلول حاوی سریم به جای پودر سریم به دلیل توزیع یکنواخت و غیرکلوخه ای، باعث کاهش نرخ

یکنواخت موجب کاهش نقاط تمرکز تنش و پرشدگی خلل و فرج سطحی شوند. همین ویژگی ها کیفیت فیلم محافظتی، چسبندگی بین دانه ای و استحکام ساختار را ارتقاء بخشیده و به طور مستقیم نرخ واکنش های خوردگی را کاهش می دهد؛ بنابراین می توان گفت که استفاده از ذرات سریم به دلیل بر خورداری از ویژگی های برجسته ای نظیر پایداری شیمیایی مناسب و ساختار بلوری پایدار از نوع فلوریت مکعبی، به عنوان یک افزودنی مؤثر و نیز استفاده از محلول حاوی سریم به منظور توزیع یکنواخت سریم در پوشش می تواند باعث بهبود عملکرد ضد خوردگی پوشش های الکترولس شوند (۴۳-۴۵).

۳-۴- سایش

شکل (۶)، تغییرات ضریب اصطکاک (μ) را بر حسب مسافت طی شده در آزمون پین روی دیسک برای پوشش دولایه الکترولس Ni-P/Ni-B- CeO_2 و زیرلایه نشان می دهد. نتایج به روشنی بیانگر تفاوت عملکرد تریبولژیکی قابل توجه این پوشش نانوکامپوزیتی نسبت به زیرلایه آلومینیومی است. در آغاز آزمون، ضریب اصطکاک پوشش دولایه Ni-P/Ni-B- CeO_2 از مقدار اولیه حدود 0.4° به سرعت به مقدار پایداری در حوالی 0.55° می رسد و در طول فاصله 500 متر روندی یکنواخت و بدون نوسانات شدید حفظ می کند. پایداری ضریب اصطکاک مشاهده شده با در نظر گرفتن ضخامت پوشش، بیانگر آن است که فرآیند اصطکاک در طول آزمون عمدتاً در داخل لایه پوشش کنترل شده است. در حالی که زیرلایه بدون پوشش رفتار نوسانی تر با مقادیر بالاتر ($0.65^\circ - 0.7^\circ$) و پایداری کمتر نشان می دهد. شایان ذکر است که مقدار ضریب اصطکاک پایدار حاصل در پژوهش حاضر، به طور محسوسی کمتر از مقدار گزارش شده برای پوشش دولایه Ni-P/Ni-B بدون حضور فاز تقویت کننده است که در مطالعات پیشین ضریبی در حدود 0.8° گزارش شده است (۷). این کاهش واضح ضریب اصطکاک، ریشه در ساختار ریزدانه و یکنواخت پوشش الکترولس دولایه و پراکندگی مؤثر نانوذرات اکسید سریم دارد که منجر به تشکیل فیلم انتقال پایدار بر سطح تماس و کاهش



شکل ۷- الف) و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی گسیل میدانی از مسیر سایش در بزرگنمایی‌های مختلف و ج) نتایج آزمایش زبری از مسیر سایش پوشش‌های الکترولس Ni-P/Ni-B-CeO₂.

میکروسکوپی الکترونی رویشی گسیل میدانی از مسیر سایش در بزرگنمایی‌های مختلف در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب)، نشان می‌دهد که نبود ترک‌های ریخت‌شناسی حاکی از چسبندگی مناسب لایه و توزیع همگن فشارهای سایشی است. شیارهای نسبتاً صاف و خطوط کشیده در راستای حرکت بین روی دیسک نشان‌دهنده نقش غالب ذرات سخت پوشش در جلوگیری از کنده‌شدن شدید می‌باشد. در پوشش‌های Ni-B تقویت‌شده، وجود ساختار نانوکریستالی و حضور فازهای ثانویه (مانند سریا) باعث افزایش سختی، بهبود انسجام ساختار و محدودیت در رشد ترک می‌شوند که در این تصاویر به وضوح قابل مشاهده است. مطالعات فراوان نشان داده‌اند که استفاده از ذراتی نظیر CeO₂ و TiO₂ در بستر Ni-B، با پرکردن خلل و فرج و تقویت مرزخانه‌ها، سازوکار سایش را به سمت سایش خراشان منتقل می‌کند و از

سایش ویژه (10^{-13} kg/N.m ، $7/76$)، ایجاد سد حرکتی برای حرکت نابجایی‌ها و افزایش سختی شده است. این درحالی است که میزان نرخ سایش ویژه برای پوشش دولایه الکترولس Ni-P/Ni-B، به مقدار 10^{-10} kg/N.m گزارش شده است (۴۶). مقایسه این پژوهش با پژوهش انجام‌شده در زمینه استفاده از پودر ذرات تقویت‌کننده سریا نیز نشان دهنده بهبود ۴۷٪ جرم کاهش یافته در هنگام استفاده از محلول حاوی سریا به جای پودر آن می‌باشد که اهمیت توزیع یکنواخت ذرات در زمینه را نشان می‌دهد (۱۶).

نتایج تست زبری‌سنجی از مسیر سایش به همراه تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی گسیل میدانی آن برای پوشش الکترولس دولایه Ni-P/Ni-B-CeO₂ در غلظت ۱۰ mL/L محلول حاوی CeO₂ در شکل (۷) نشان داده شده است. بررسی تصاویر

مؤثرتر ذرات تقویت‌کننده به زمینه فلزی شد. نتایج آزمون‌های خوردگی حاکی از آن بود که این پوشش منجر به کاهش چگالی جریان خوردگی تا $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \times 8$ شده است. تصاویر ریخت‌شناسی نیز حاکی از ریزساختار گل‌کلمی شکل هستند که بیانگر جوانه‌زنی گسترده، رشد سطحی محدود و جوش خوردگی تدریجی جزایر نیکل است. نرخ سایش ویژه 10^{-13} kg/N.m $\times 7/76$ نیز نشان‌دهنده عملکرد فوق العاده مطلوب پوشش ناشی از افزایش سختی، پایداری ساختاری، تشکیل فیلم انتقال پایدار و کاهش احتمال جدایش موضعی پوشش دانست. همچنین، الگوهای XRD ساختار آمورف پوشش را تأیید کرده که با افزایش مقاومت به خوردگی و کاهش مسیر نفوذ یون‌های مهاجم همخوانی دارد. این یافته‌ها نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن رویکرد ترکیبی سل-الکترولس هستند و مسیر جدیدی برای توسعه پوشش‌های نانوکامپوزیتی با خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بالا، توزیع ذرات یکنواخت‌تر و قابلیت کاربرد در شرایط کاری سخت ایجاد می‌کند.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه صنعتی مالک اشتر بابت همکاری برای انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌نوع تضاد منافع با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

فائزه بدیعی: گردآوری داده‌ها، روش‌شناسی، نوشتن پیش‌نویس اصلی. **داریوش عربیان:** مفهوم‌سازی، نظارت. **حسین جمالی:** تحلیل رسمی، اعتبارسنجی. **شهاب ترکیان:** بررسی و ویرایش نوشته.

سایش چسبنده و ایجاد خرده‌های سایش جلوگیری می‌کند (۴۷ و ۴۸). در پوشش تقویت‌شده با محلول حاوی سریا به دلیل کلوخه نشدن ذرات در زمینه و پراکندگی یکنواخت با اندازه کوچک ذرات، موجب پرشدگی خلل و فرج و توسعه سطحی هموارتر می‌شود که باعث کاهش زبری و افزایش سازگاری سطحی می‌گردد. همان‌گونه که در شکل (۷-ج) نشان داده شده است، پروفایل زبری عمق حداکثر حدود $20 \mu\text{m}$ میکرومتر را نشان می‌دهد که بیانگر مقاومت نسبتاً بالای پوشش در برابر حذف ماده طی سایش است و در مقایسه با ضخامت پوشش نشان‌دهنده وقوع سایش در داخل لایه و بارپذیری مناسب پوشش است. سطح کف شیار سایشی، با کمترین میزان موج و ناهمواری مؤید یکنواختی مکانیسم سایش و عملکرد مؤثر ساختار پوشش در کاهش زبری پس از آزمون است. درمقابل، بررسی رد سایش زیرلایه آلومینیومی بدون پوشش که در مطالعه پیشین نویسندگان گزارش شده است (۱۶)، نشان‌دهنده تشکیل شیارهای عمیق و ناهموار همراه با تخریب شدید سطح بوده که بیانگر غالب بودن سازوکار سایش چسبنده و تغییر شکل شدید پلاستیک است. همچنین، عمق شیار سایش در زیرلایه بدون پوشش به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری‌شده برای پوشش حاضر گزارش شده است که این موضوع اختلاف چشمگیر عملکرد سایشی بین زیرلایه و پوشش Ni-P/Ni-B-CeO_2 را به‌وضوح تأیید می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای نخستین بار از محلول نانوذرات اکسید سریم سنتز شده با استفاده از پیش‌ساز آلکوکسیدی در ترکیب با فرایند پوشش‌دهی الکترولس Ni-B استفاده شد. آنالیز DLS نشان داد که محلول تهیه‌شده دارای اندازه میانگین ذرات حدود 93 nm نانومتر با شاخص توزیع حدود 0.3 است که بیانگر توزیع یکنواخت نانوذرات و پایداری بالای محلول حاوی سریا در محیط آبی-آبی می‌باشد. این ویژگی موجب جلوگیری از کلوخه‌شدن ذرات، توزیع همگن در حمام پوشش‌دهی و اتصال

واژه‌نامه

1. nickel-phosphorus
2. nickel-boron
3. Orowan
4. Hall-Petch
5. cerium oxide
6. dimethoxymethane (DME)
7. acetylacetone (ACAC)
8. Schlotter's solution
9. dynamic light scattering (DLS)
10. X-ray diffractometer (XRD)
11. field emission electron microscope (FESEM)
12. Mitutoyo profilometer
13. polydispersity index (PDI)

مراجع

1. Sharifalhoseini Z, Davoodi A. Uniform nucleation of zincate layer through the optimized etching process to prevent failure in electroless plating on 2024 aluminum alloy. *Eng Fail Anal.* 2021;124:105326. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105326>
2. Waware US, Nazir R, Prasad A, Hamouda AMS, Pradhan AK, Alshehri M, et al. Preparation and properties of electrodeposited Ni-B-V₂O₅ composite coatings. *Surf Coatings Technol.* 2021;409:126888. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126888>
3. Madah F, Dehghanian C, Amadeh A. Investigations on the wear mechanisms of electroless Ni-B coating during dry sliding and endurance life of the worn surfaces. *Surf Coatings Technol.* 2015;282:6–15. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.003>
4. Verdi P, Monirvaghefi SM, Ashrafizadeh F. Electroless nickel-phosphorus coating via the novel substrate local heating (hot substrate) technique. *J Adv Mater Eng.* 2021;40(3):1–16. <https://doi.org/10.47176/JAME.40.3.23011> (In Persian)
5. Narayanan TSNS, Krishnaveni K, Seshadri SK. Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings: preparation and evaluation of microhardness, wear, and corrosion resistance. *Mater Chem Phys.* 2003;82(3):771–9. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00390-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00390-0)
6. Sudagar J, Lian J, Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings—A critical review. *J Alloys Compd.* 2013;571:183–204. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107>
7. Mindivan F, Mindivan H, Bayram A. The Electroless monolayer and duplex Ni-B and Ni-P coatings for 316L stainless steel in synergistic combination of mechanical (wear) and chemical (corrosion) processes. *Adv Eng Mater.* 2023;25(10):220. <https://doi.org/10.1002/adem.202201501>
8. Krishnaveni K, Sankara Narayanan TSNN, Seshadri SK. Electroless Ni-B-Si₃N₄ composite coating: deposition and evaluation of its characteristic properties. *Synth React Inorganic, Met Nano-Metal Chem.* 2012;42(7):920–7. <https://doi.org/10.1080/15533174.2011.618475>
9. Sayyad F, Senanayake R. Improving the deposit efficiency of nano composite deposits on AZ91 magnesium alloy by using a suitable bath composition and operating conditions. *Mater Today Proc.* 2021; 47:2990–2993. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.311>
10. Ghaderi M, Rezagholizadeh M, Heidary A, Monirvaghefi SM. The effect of Al₂O₃ nanoparticles on tribological and corrosion behavior of electroless Ni-B-Al₂O₃ composite coating. *Prot Met Phys Chem Surfaces.* 2016;52(5):854–8. <https://doi.org/10.1134/S2070205116050087>
11. Ürdem Ş, Duru E, Algül H, Uysal M, Akbulut H. Evaluation of high temperature tribological behavior of electroless deposited Ni-B-Al₂O₃ coating. *Wear* 2021;482–483:203928. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203960>
12. Georgiza E, Gouda V, Vassiliou P. Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings. *Surf Coatings Technol.* 2017;325:46–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.019>
13. Baibordi A, Amini K, Bina MH, Dehghan A. The effect of heat treatment temperature on the properties of the composite duplex electroless coating of Ni-P/Ni-B-BN containing boron nitride nanoparticles. *Kov Mater.* 2014;52(5):263–8. <https://doi.org/10.4149/km.2014.5.263>
14. Gültekin D, Duru E, Akbulut H. Improved wear behaviors of lead-free electroless Ni-B and Ni-B/CeO₂ composite coatings. *Surf Coatings Technol.* 2021;422: 127525. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127525>
15. Xiao N, Zhang C, Yin X, Yang K, Zhang F, Xiong B. Soft metal micro/nanolubricant in tribology. *Mater Sci Eng B* 2023;295:116600. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116600>
16. Badiee F, Arabian D, Jamali H, Torkian S. Investigation of wear behavior of Ni-P/Ni-B-CeO₂ composite coating. *Results Surf Interfaces* 2025; 100482. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2025.100482>
17. Soleimani Roodi K, Ebrahimifar H, Mohsenifar F. Effect of pH of the electroless bath on microstructure and corrosion behavior of Ni-Co-La₂O₃-CeO₂ coating. *Adv Ceram Prog.* 2024;10(2):9–16. <https://doi.org/10.30501/acp.2024.478445.1163>
18. Nosrati H, Heydari M, Khodaei M. Cerium oxide nanoparticles: synthesis methods and applications in

- wound healing. *Mater Today Bio.* 2023;23:100823. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100823>
19. Yang J, Lukashuk L, Li H, Föttinger K, Rupprechter G, Schubert U. High surface area ceria for CO oxidation prepared from cerium t-butoxide by combined sol-gel and solvothermal processing. *Catal Letters* 2014;144:403–12. <https://doi.org/10.1007/s10562-013-1162-8>
 20. Chen W, Gao W, He Y. A novel electroless plating of Ni-P-TiO₂ nano-composite coatings. *Surf Coatings Technol.* 2010;204(15):2493–8. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.01.032>
 21. Chakrabarti R, Hota SB, Mandal PB. Synthesis and comparative characterization of electroless Ni-P, Ni-P-nanoAl₂O₃, and duplex Ni-P/Ni-P-nano-Al₂O₃ coatings on aerospace-graded AA2024 alloy. In: *Advances in Structural Integrity: Structural Integrity Over Multiple Length Scales.* Springer; 2022. p. 73–81. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8724-2_7
 22. Kallel M, Masseoud M, Vesco S, Barletta M, Elleuch K. The effects of TiO₂ sol concentration on single-and multiple-scratch damage in electroplated Ni-B-TiO₂ sol composite coating. *Ceram Int.* 2020;46(3):3767–76. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.099>
 23. Wang Y, Tay SL, Wei S, Xiong C, Gao W, Shakoor RA, et al. Microstructure and properties of sol-enhanced Ni-Co-TiO₂ nano-composite coatings on mild steel. *J Alloys Compd.* 2015;649:222–8. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.147>
 24. Sadeghzadeh-Attar A, AyubiKia G, Ehteshamzadeh M. Improvement in tribological behavior of novel sol-enhanced electroless Ni-P-SiO₂ nanocomposite coatings. *Surf Coatings Technol.* 2016;307:837–48. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.026>
 25. Wang Y, Shu X, Wei S, Liu C, Gao W, Shakoor RA, et al. Duplex Ni-P-ZrO₂/Ni-P electroless coating on stainless steel. *J Alloys Compd.* 2015;630:189–94. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.064>
 26. Ghaziof S, Gao W. Zn-Ni-Al₂O₃ nano-composite coatings prepared by sol-enhanced electroplating. *Appl Surf Sci.* 2015;351:869–79. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.010>
 27. Ferrara MC, Piscopiello E, Laera AM, Pilloni L, Mazzarelli S, Tapfer L. Preparation and characterization of close-packed nanostructured sol-gel ceria thin films prepared using cerium-sec-butoxide as precursor. *Sol-Gel Sci Technol.* 2011; 60(3):333–339. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2529-1>
 28. Chen W, He Y, Gao W. Electrodeposition of sol-enhanced nanostructured Ni-TiO₂ composite coatings. *Surf Coatings Technol.* 2010;204(15):2487–92. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.01.036>
 29. Niksefat V, Mahboubi F. Tribological performance of plasma-nitrided self-lubricant electroless Ni-B-graphite composite coatings. *Tribol Int.* 2024;109905. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109905>
 30. Hamid ZA, Hassan HB, Attyia AM. Influence of deposition temperature and heat treatment on the performance of electroless Ni-B films. *Surf Coatings Technol.* 2010;205(7):2348–54. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.09.025>
 31. Nemane V, Chatterjee S. Effect of silicon carbide incorporation and heat treatment on tribological properties of electroless Ni-B-W alloy coating. *Mater Chem Phys.* 2024;311:128500. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128500>
 32. Eraslan S, Ürgen M. Oxidation behavior of electroless Ni-P, Ni-B, and Ni-W-B coatings deposited on steel substrates. *Surf Coatings Technol.* 2015;265:46–52. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.064>
 33. Zhu Y, Wang J, Liu H, Ren P, Yan F. Improvement in the corrosion and wear properties of Monel 400 alloy by electroless Ni-P deposition in seawater. *Mater Chem Phys.* 2024;324:129684. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129684>
 34. Li W, Liu B, Guo Q, Guo W, Zhang S, Qu Y. Reaction-induced regioselective reconstruction of Ni-doped Ce (OH)₃/CeO₂ enables exceptional activity and selectivity for reverse water-shift reaction. *Nat Commun.* 2025;16(1):7335. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62771-1>
 35. Vitry V, Delaunois F, Dumortier C. Mechanical properties and scratch test resistance of nickel-boron coated aluminium alloy after heat treatments. *Surf Coatings Technol.* 2008;202(14):3316–24. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.12.001>
 36. Saeidpour F, Ebrahimi T. Evaluation of Ni-Co/TiO₂-CeO₂ nanocomposite coatings fabricated by electro-co-deposition. *Surf Eng.* 2025;41(1). <https://doi.org/10.1177/02670844241301418>
 37. Mandal BB, Kumar V, Sahoo S, Oraon B, Mukherjee S. Nanoparticle-reinforced electroless composite coatings for pipeline steel: Synthesis and characterization. *Materials (Basel)* 2025;18(17):3949. <https://doi.org/10.3390/ma18173949>
 38. Sadreddini S, Afshar A. Corrosion resistance enhancement of Ni-P-nano SiO₂ composite coatings on aluminum. *Appl Surf Sci.* 2014;303:125–30. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.109>
 39. Zielińska K, Stankiewicz A, Szczygieł I. Electroless deposition of Ni-P-nano-ZrO₂ composite coatings in the presence of various types of surfactants. *J Colloid Interface Sci.* 2012;377(1):362–7. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.03.049>
 40. Promphet N, Rattanawaleedirojn P, Rodthongkum N. Electroless Ni-P-TiO₂ sol-RGO: A smart coating for enhanced corrosion resistance and conductivity of steel. *Surf Coatings Technol.* 2017;325:604–10. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.018>
 41. Li D, Cui X, Wen X, Feng L, Hu Y, Jin G, et al. Effect of CeO₂ nanoparticles modified graphene oxide on electroless Ni-P coating for Mg-Li alloys. *Appl Surf Sci.* 2022;593:153381.

- <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153381>
42. Wu X, Mao J, Zhang Z, Che Y. Improving the properties of 211Z Al alloy by enhanced electroless Ni-P-TiO₂ nanocomposite coatings with TiO₂ sol. *Surf Coatings Technol.* 2015;270:170-4. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.006>
 43. Rajendran P, Muthuraj A, Rajagounder NE. Review on CeO₂-based corrosion coatings. *Trans Indian Ceram Soc.* 2022;81(4):158-74. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2022.2149623>
 44. Yan Y, Wu Y, Wu Y, Weng Z, Liu S, Liu Z, et al. Recent advances of CeO₂-based composite materials for photocatalytic applications. *ChemSusChem.* 2024;17(14). <https://doi.org/10.1002/cssc.202301778>
 45. Wang L, Chen M, Liu H, Jiang C, Ji V, Moreira F. Optimisation of microstructure and corrosion resistance of Ni-Ti composite coatings by the addition of CeO₂ nanoparticles. *Surf Coatings Technol.* 2017; 331:196-205. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.049>
 46. Narayanan TSNS, Krishnaveni K, Seshadri SK. Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings: Preparation and evaluation of microhardness, wear, and corrosion resistance. *Mater Chem Phys.* 2003;82(3):771-9. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00390-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00390-0)
 47. Mohanty D, Barman TK, Sahoo P. Tribological behavior, mechanical properties and electrochemical corrosion response of ultrasonically assisted TiO₂ reinforced electroless Ni-B coatings. *J Inst Eng Ser D* 2024;105(2):1231-42. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00390-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00390-0)
 48. Tafreshi M, Allahkaram S, Mahdavi S. Investigation of properties and comparison of corrosion and wear of Zn-Ni and Zn-Ni/PTFE coatings. *J Adv Mater Eng.* 2018;37(3):49-62. <https://doi.org/10.29252/JAME.37.3.49> (In Persian)