

Research Paper

Investigation of the Synergistic Effect of Soft and Hard Particles on Corrosion and Wear Resistance Behavior of Ni-B-PTFE-Si₃N₄ Electroless Coating on Carbon Steel

Danial Behroozi¹, Nahid Pirhady Tavandashti^{1,*}

1-Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2020/10/27

Revised:

Accepted: 2021/06/29

Use your device to scan and read the article online



DOI: [10.30495/JNM.2021.4675](https://doi.org/10.30495/JNM.2021.4675)

Keywords:

Corrosion; wear; Ni-B electroless coating; PTFE particles; Si₃N₄ nanoparticles.

Abstract

In this study, soft PTFE particles and hard Si₃N₄ nanoparticles were simultaneously introduced into the Ni-B electroless coating and the Ni-B-PTFE-Si₃N₄ nanocomposite coating was prepared on plain carbon steel. The microstructure and morphology of the coatings were examined by scanning electron microscopy, and the corrosion resistance was investigated by potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy. The results showed that by introducing PTFE particles into the coating bath, Ni-B-PTFE composite coating was successfully prepared. The best corrosion resistance of Ni-B-PTFE coating was achieved when a concentration of 3 g/L PTFE particles were used. The corrosion current density was 2.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. However, introduction of Si₃N₄ nanoparticles into the Ni-B coating can also improve the corrosion resistance of the coating. The best corrosion resistance of Ni-B-Si₃N₄ coating was obtained at a concentration of 4 g/L Si₃N₄ nanoparticles, with a corrosion current density of 2.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Simultaneous application of hard and soft particles in the coating increased corrosion resistance, and the corrosion current density was 0.76 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ for Ni-B-PTFE-Si₃N₄ coating. The results of hardness and abrasion tests showed that the addition of Si₃N₄ nanoparticles leads to an increase in the hardness and friction coefficient of Ni-B coating from 847 Vickers and 0.6 to 963 Vickers and 0.78, respectively. Nevertheless, the incorporation of PTFE particles reduces the hardness and coefficient of friction to 572 Vickers and 0.35, respectively. Simultaneous application of hard and soft particles resulted a hardness of 871 Vickers and friction coefficient of 0.6.

Citation: Danial Behroozi, Nahid Pirhady Tavandashti. Investigation of the Synergistic Effect of Soft and Hard Particles on Corrosion and Wear Resistance Behavior of Ni-B-PTFE-Si₃N₄ Electroless Coating on Carbon Steel. Journal of New Materials, 2021; 11 (43):1-22

Corresponding author: Nahid Pirhady Tavandashti

Address: Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Tell:

Email: Pirhady@srbiau.ac.ir

Extended Abstract

1. Introduction

In the last decade, electroless nickel coatings including Ni-P and Ni-B coatings have received great attention due to their suitable properties. Some studies have shown that the combined use of hard and soft particles such as Al_2O_3 and PTFE [1] and SiC and PTFE [2] can not only increase the corrosion resistance of electroless nickel coatings, but also improve tribological properties. In tribological behavior, high hardness and low friction coefficient are preferred. Studies have shown that the application of soft particles in coatings reduces the hardness as well as the coefficient of friction; While incorporation of hard particles into the coating, increases both hardness and friction coefficient. It seems that the simultaneous application of soft and hard particles can create appropriate tribological properties in the coating, including high hardness and low friction coefficient. In this research, for the first time hard Si_3N_4 nanoparticles and soft PTFE particles were introduced simultaneously in the electroless Ni-B coating, in order to increase both corrosion resistance and tribological properties.

2. Materials and methods

Nickel chloride ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and Si_3N_4 nanoparticles were purchased from Merck Chemicals and NaBH_4 , $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$ and PTFE particles were prepared from Sigma Aldrich. Plain carbon steel CK45 with dimensions of $20 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ was used as substrates. After surface preparation (including polishing, degreasing and acid washing), the samples were immediately placed in a plating bath. The composition of the bath was adjusted with 30 g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1 g/L NaBH_4 , 90 g/L $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$, 90 g/L NaOH, and 0.018 g/L CH_3COOH . The temperature and pH of the bath was maintained at 85 °C and 14, respectively. The coating deposition time was 60 minutes. In order to investigate the effect of different nanoparticles on the coating properties, three types of composite coatings

were prepared: including Ni-B- Si_3N_4 nanocomposite coating (using 2, 4 and 6 g/L nanoparticles in the coating bath), Ni-B-PTFE composite coating (using 1, 3 and 5 g/L PTFE particles in the coating bath) and Ni-B- Si_3N_4 -PTFE composite coating (in optimal concentrations of both types of particles).

To study the microstructure and morphology of the coatings, a field emission scanning electron microscope (model MIRA3 by TESCAN) was used. To evaluate the corrosion resistance of the coatings potentiodynamic polarization test and electrochemical impedance spectroscopy were conducted using EG&G model 1025. The microhardness of the coatings was determined using the Vickers microhardness test (Instron-Walper). The coefficient of friction and wear tests were performed using pin on the disk method. In this test, a tungsten carbide pin with a diameter of 7 mm was used, and the applied load was 20 N. The velocity was 10 cm/s.

3. Results and discussion

First, a uniform Ni-B electroless coating with a nodular structure was prepared. Then the effect of concentration of Si_3N_4 nanoparticles and PTFE particles on the coating properties were separately investigated. FESEM images of the surface of the coatings showed successful participation and evenly distribution of the particles in the coatings. The results from corrosion tests showed that when the concentration of PTFE particles in the deposition bath was 3 g/L, the best corrosion resistance was achieved, and the corrosion current density was $2.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Addition of Si_3N_4 nanoparticles to the deposition bath also led to the incorporation of these particles in the coating, and the best corrosion resistance for Ni-B- Si_3N_4 coating was achieved at concentration of 4 g/L with a corrosion current density of $2.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Simultaneous application of hard and soft particles in the coating led to an increase in corrosion resistance, and the lowest corrosion

current density of $0.76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ was obtained. These particles act as a barrier against the entry of corrosive ions and prevent their access to the substrate. The results of the electrochemical impedance spectroscopy test were in good agreement with the results of the polarization curves.

The results of Vickers microhardness test and study of friction coefficient curves as a function of wear distance for Ni-B, Ni-B-PTFE, Ni-B-Si₃N₄ and Ni-B-PTFE-Si₃N₄ samples showed that by applying Ni-B coating on the surface of the steel substrate, the hardness increased to 847 HV and the average coefficient of friction was about 0.6. Incorporation of PTFE particles into the coating reduced the coefficient of friction and the hardness of the coating; and the lowest hardness for the coating containing 3 g/L of PTFE particles was 572 HV and the coefficient of friction was about 0.35. It can be concluded that the presence of PTFE particles has resulted a lubrication effect in the coating. The results also showed that the addition of hard nanoparticles to the coating increased the hardness and coefficient of friction. The highest hardness was obtained in the coating containing 4 g/L of Si₃N₄ nanoparticles, which was 962 HV and the friction coefficient was about 0.78. Simultaneous application of both hard and soft particles, resulted in a hardness of 871 HV and a coefficient of friction of 0.6. Wear rate studies also showed that the lowest wear rate was related to Ni-B-Si₃N₄ sample (3.2×10^{-3} mg/N.m). By addition of PTFE particles to the Ni-B coating, the wear rate increased to 12.3×10^{-3} mg/N.m. Therefore, it is suggested that presence of soft particles increases the wear rate of the coating, and incorporation of hard particles reduces the wear rate. However, in the hybrid sample, the wear rate was 4.9×10^{-3} mg/N.m.

4. Conclusion

In this study, Ni-B composite coatings with hard Si₃N₄ and soft PTFE particles were deposited on the surface of plain carbon steel samples and the properties of the coatings were investigated. The corrosion tests showed that simultaneous application of hard and soft particles in the Ni-B coating increased the corrosion protection performance. The hardness and abrasion test results showed that the addition of Si₃N₄ hard nanoparticles increased the hardness and friction coefficient of Ni-B coating, while the addition of PTFE particles reduced the hardness and coefficient of friction. Simultaneous application of hard and soft particles resulted in an increased hardness and a decreased coefficient of friction.

References

- A. Sharma, A. K. Singh, "Electroless Ni-P-PTFE-Al₂O₃ Dispersion Nanocomposite Coating for Corrosion and Wear Resistance", *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 23, pp. 142-151, 2014. [<https://doi.org/10.1007/s11665-013-0710-0>]
- Y. Wu, H. Liu, B. Shen, L. Liu, W. Hu, "The friction and wear of electroless Ni-P matrix with PTFE and/or SiC particles composite", *Tribology International*, Vol. 39, pp. 553-559, 2006. [<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.04.032>]

مقاله پژوهشی

بررسی اثر هم‌افزایی ذرات نرم و سخت بر رفتار مقاومت به خوردگی و سایش پوشش الکترولس Ni-B-PTFE-Si₃N₄ روی فولاد ساده کربنی

دانیال بهروزی^۱، ناهید پیرهادی توندشت^{۱*}

۱-دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش، ذرات نرم PTFE و نانوذرات سخت Si₃N₄ بطور همزمان در پوشش الکترولس Ni-B وارد شدند و پوشش نانوکامپوزیتی Ni-B-PTFE-Si₃N₄ روی فولاد ساده کربنی تهیه شد. ریزساختار و مورفولوژی پوشش‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و مقاومت به خوردگی توسط پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف-سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزودن ذرات PTFE به حمام پوشش‌دهی، این ذرات بطور موفقیت آمیزی در تشکیل پوشش شرکت می‌کنند. بهترین مقاومت به خوردگی در پوشش Ni-B-PTFE در غلظت ۳ g/L و با چگالی جریان خوردگی ۲/۳ μA/cm² به دست آمد. همچنین، افزودن نانوذرات سخت Si₃N₄ به پوشش Ni-B می‌تواند منجر به افزایش تراکم پوشش و بهبود مقاومت به خوردگی گردد. بهترین مقاومت به خوردگی در پوشش Ni-B-Si₃N₄ در غلظت ۴ g/L و با چگالی جریان خوردگی ۲/۲ μA/cm² به دست آمد. به کار بردن همزمان ذرات سخت و نرم در پوشش منجر به افزایش مقاومت به خوردگی شده و کمترین چگالی جریان خوردگی برابر با ۰/۷۶ μA/cm² حاصل شد. نتایج سختی‌سنجی و آزمون سایش نشان داد که افزودن نانوذرات سخت Si₃N₄ منجر به افزایش سختی و ضریب اصطکاک پوشش Ni-B از ۸۴۷ HV و ۰/۶ به ۹۶۳ HV و ۰/۷۸ می‌گردد. همچنین افزودن ذرات PTFE منجر به کاهش سختی و ضریب اصطکاک به ۵۷۲ HV و ۰/۳۵ می‌شود. به کار بردن همزمان ذرات سخت و نرم، میزان سختی HV ۸۷۱ و ضریب اصطکاک ۰/۶ را نتیجه داد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

تاریخ داوری:

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:10.30495/JNM.2021.4675

واژه‌های کلیدی:

مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، پوشش الکترولس Ni-B، ذرات PTFE، نانوذرات Si₃N₄

* نویسنده مسئول: ناهید پیرهادی توندشت

نشانی: دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تلفن:

پست الکترونیکی: Pirhady@srbiau.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از نانوذرات در ایجاد پوشش‌های نانوکامپوزیتی مقاوم به خوردگی مورد توجه است [۱۸]. در برخی پژوهش‌ها نشان داده است که استفاده توأمان از ذرات سخت و نرم مانند SiC و WS₂ [۱۹]، Al₂O₃ و PTFE [۲۰] و SiC و PTFE [۲۱] می‌تواند علاوه بر افزایش مقاومت به خوردگی پوشش‌های الکتروکلس نیکل-فسفر، باعث بهبود خواص تریبولوژیکی نیز بشود. در رفتار تریبولوژیکی، سختی بالا و ضریب اصطکاک پایین مورد ترجیح است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که با به کار بردن ذرات نرم در پوشش، سختی و همچنین ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. با افزودن ذرات سخت به پوشش، سختی افزایش یافته و از طرفی ضریب اصطکاک نیز افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد که به کار بردن همزمان ذرات نرم و سخت، می‌تواند خواص تریبولوژیکی مطلوب در پوشش شامل سختی بالا و ضریب اصطکاک کم، در کنار مقاومت به خوردگی خوب را ایجاد کند. با توجه به مطالب بیان شده، هدف از انجام این پژوهش ایجاد پوشش الکتروکلس نانوکامپوزیتی Ni-B با نانوذرات سخت Si₃N₄ و ذرات نرم PTFE است، به طوری که علاوه بر مقاومت به خوردگی از خواص تریبولوژیکی مناسبی هم برخوردار باشند. در این مطالعه برای اولین بار در پوشش‌های الکتروکلس Ni-B به صورت همزمان از ذرات نرم و سخت استفاده شده است.

۲- روش تحقیق

۱-۲- مواد آزمایشگاهی

در این پژوهش کلرید نیکل (NiCl₂·6H₂O) و نانوذرات Si₃N₄ از شرکت مرک و C₂H₈N₂، NaBH₄ و ذرات PTFE از شرکت سیگما آلدریج تهیه شدند. تمامی مواد مورد استفاده به صورت آزمایشگاهی با بیشترین خلوص بودند.

۲-۲- آماده سازی نمونه ها جهت پوشش دهی

از فولاد ساده کربنی CK45 با ابعاد ۱mm³ × ۱۰ × ۲۰ به عنوان زیرلایه استفاده شد. یکی از مهمترین مراحل پوشش‌دهی، آماده‌سازی نمونه‌ها می‌باشد. آماده‌سازی نمونه‌ها به ترتیب مراحل زیر انجام پذیرفت. در ابتدا، سنباده زنی از سنباده شماره ۶۰۰ تا ۲۵۰۰ صورت پذیرفت. سپس، به منظور از بین بردن چربی‌های موجود بر روی سطح، چربی‌گیری انجام گرفت. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در استون، تحت امواج التراسونیک، چربی‌گیری شدند.

سطح محصولات یکی از مهمترین قسمت‌های آن است، زیرا همیشه در معرض برهم‌کنش با محیط اطراف قرار دارد. تماس اجزاء مختلف با یکدیگر موجب سایش و تخریب قطعات می‌شود، همچنین تماس جسم با محیط خورنده موجب خوردگی قطعات و انهدام آن‌ها می‌شود. پس می‌توان گفت مقاومت به خوردگی و سایش از مهمترین ویژگی‌های سطحی هستند که باید بدان توجه نمود. افزایش مقاومت به خوردگی و همچنین مقاومت به سایش در کنار یکدیگر موجب بهبود عملکرد قطعات مهندسی می‌شوند. راههای زیادی جهت افزایش همزمان مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش پیشنهاد شده است. در دهه اخیر پوشش‌های الکتروکلس نیکل شامل پوشش الکتروکلس نیکل-فسفر و نیکل-بور به دلیل ویژگی‌های مناسب، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و روی خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها به طور گسترده‌ای در مراجع بحث شده است [۱، ۲]. یکی از مهمترین خواص پوشش‌های الکتروکلس نیکل، مقاومت به خوردگی آنها است. مطالعات زیادی در جهت بهبود مقاومت به خوردگی پوشش‌های الکتروکلس نیکل-فسفر انجام شده است که می‌توان به استفاده از نانوذرات مختلف مانند ZrO₂ [۳]، SiO₂ [۴]، PTFE [۵]، TiC [۶] و الماس [۷] اشاره نمود. اما پوشش‌های نیکل-بور به دلیل خواص تریبولوژیکی بسیار خوب نسبت به پوشش‌های نیکل-فسفر، در بسیاری از کاربردها ترجیح داده می‌شوند. همچنین گزارش‌ها نشان داده است که استفاده از نانوذرات Al₂O₃ [۸، ۹]، BN [۱۰]، الماس [۱۱]، SiC [۱۲]، CNT [۱۳] و CeO₂ [۱۴] نیز موجب بهبود مقاومت به خوردگی، سایش و سختی این پوشش‌ها به مقدار قابل توجهی می‌شود.

محققین زیادی به مطالعه تاثیر ترکیب شیمیایی حمام پوشش-دهی، پارامترهای رسوب‌دهی و تاثیر عملیات حرارتی بر مقاومت به خوردگی پوشش‌های الکتروکلس نیکل-بور پرداخته‌اند [۱۵]، [۱۶]. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده، می‌توان دریافت که عیب اصلی پوشش‌های مذکور، مقاومت به خوردگی ضعیف آن‌ها در محیط‌های مختلف است. در برخی گزارش‌ها استفاده از پوشش‌های دوگانه و همچنین عملیات ترمومکانیکی برای بهبود مقاومت به خوردگی پوشش‌های الکتروکلس نیکل-بور پیشنهاد شده است [۱۷]. به هرحال، این روش‌ها بسیار گران قیمت و پیچیده هستند. بنابراین لازم است که از روش‌های ساده‌تر و ارزان‌تر برای بهبود مقاومت به خوردگی استفاده شود. از این رو

جدول ۱- ترکیب شیمیایی حمام پایه مورد استفاده جهت انجام پوشش دهی.

ترکیب	غلظت (g/L)
NiCl ₂ .6H ₂ O	۳۰
NaBH ₄	۱
C ₂ H ₈ N ₂	۹۰
NaOH	۹۰
CH ₃ COOH	۰/۰۱۸

توزیع بهتر ذرات PTFE از عامل فعال سطحی CTAB استفاده شد. قبل از اعمال پوشش عملیات هم زدن و قرارگیری در معرض امواج التراسونیک مشابه قسمت قبلی انجام شد. در هنگام پوشش دهی نیز سوسپانسیون مورد نظر با سرعت ۲۰۰ rpm در حال هم زدن بود.

۳-۲-۳- پوشش نانوکامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄-PTFE

پس از ایجاد پوشش های نانوکامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄ و پوشش Ni-B-PTFE و به دست آوردن غلظت های بهینه، پوشش نانوکامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄-PTFE در غلظت های بهینه نانوذرات Si₃N₄ و ذرات PTFE مطابق روش ذکر شده ایجاد شد.

۴-۲- مشخصه یابی

جهت بررسی ریزساختار، مورفولوژی و ترکیب شیمیایی پوشش های مختلف ایجاد شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به آنالیزگر طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۲ و نقشه عنصری استفاده شد. جهت بررسی ساختار فازی از آزمون پراش اشعه ایکس^۳ استفاده شد. این آزمون به وسیله دستگاه Bruker 2D با سرعت روبش ۰/۰۲ درجه در ثانیه انجام شدند. برای تولید پرتو ایکس در این دستگاه از تیوب کبالت با طول موج (λ=۱/۷۸۹۰۱Å) Co K_α استفاده شد.

آزمون های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی جهت ارزیابی مقاومت به خوردگی پوشش ها با استفاده از دستگاه EG & G مدل ۱۰۲۵ استفاده شدند. جهت انجام این آزمون ها از سل استاندارد سه الکترودی که در آن از الکترود کالومل اشباع^۴ (SCE) به عنوان الکترود مرجع، از الکترود پلاتین به منظور الکترود کمکی^۵ استفاده گردید و در نهایت از پوشش ایجاد شده به

پس از مرحله چربی گیری، مرحله اسیدشویی صورت گرفت. این مرحله به منظور زدودن اکسیدهای سطحی بر روی سطح زیرلایه بود. اسیدشویی در اسید هیدروکلریدریک ۲۰ درصد به مدت ۲۰ ثانیه غوطه وری انجام شد. لازم به ذکر است که در بین تمامی مراحل ذکر شده، شستشو با آب مقطر صورت گرفت. پس از آماده سازی، نمونه ها بلافاصله در حمام آبکاری قرار گرفتند.

۳-۲-۳- پوشش دهی

ترکیب شیمیایی حمام پایه مورد استفاده در این پژوهش جهت پوشش دهی، در جدول ۱ نشان داده شده است. هم چنین، مقدار pH حمام پوشش دهی ۱۴، دمای پوشش دهی ۸۵ درجه سانتی گراد و زمان پوشش دهی ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر نانوذرات مختلف بر روی پوشش، سه نوع پوشش کامپوزیتی تهیه شد که شامل پوشش نانوکامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄، پوشش کامپوزیتی Ni-B-PTFE و پوشش کامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄-PTFE بود. در ادامه چگونگی تهیه این پوشش ها بیان خواهد شد.

۱-۳-۲- پوشش نانوکامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄

جهت ایجاد پوشش نانوکامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄ از مقادیر مختلف نانوذرات (۲، ۴ و ۶ g/L) در حمام پوشش دهی استفاده شد. نانوذرات به صورت مستقیم وارد حمام پوشش دهی شدند. به منظور توزیع شدن یکنواخت نانوذرات در حمام پوشش دهی، محلول حمام حاوی نانوذرات به مدت ۲۴ ساعت بر روی دستگاه همزن مغناطیسی با سرعت ۶۰۰ rpm هم زده شد. سپس قبل از پوشش دهی، حمام به مدت ۲۰ دقیقه تحت امواج التراسونیک قرار گرفت. علاوه بر این، در حین پوشش دهی، حمام پوشش دهی با سرعت ۲۰۰ rpm مورد هم زدن قرار گرفت.

۲-۳-۲- پوشش کامپوزیتی Ni-B-PTFE

جهت ایجاد پوشش کامپوزیتی Ni-B-PTFE از غلظت های مختلف ذرات PTFE (۱، ۳ و ۵ g/L) استفاده شد. برای کمک به

^۱FESEM

^۲EDS

^۳XRD

^۴Saturated calomel electrode.

^۵Counter electrode

ذرات PTFE در مکانیزم رسوب نشانی تاثیرگذار بوده و منجر به افزایش مراکز جوانه‌زنی در رسوب الکتروکلس شده که می‌تواند باعث متراکم‌تر شدن پوشش Ni-B-PTFE در مقایسه با پوشش Ni-B شود.

جهت بررسی ترکیب شیمیایی پوشش، نقشه عنصری مربوط به پوشش Ni-B-PTFE با غلظت ۳ g/L در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به تصویر می‌توان دید که عناصر اصلی تشکیل دهنده پوشش شامل نیکل، بور و فلئور هستند که به صورت یکنواخت در سرتاسر پوشش توزیع شده‌اند. حضور نیکل و بور نشان دهنده تشکیل موفق پوشش Ni-B و همچنین حضور F نشان دهنده جذب موفق ذرات PTFE در پوشش می‌باشد.

میزان فلئور در پوشش می‌تواند به عنوان معیاری از درصد PTFE در نظر گرفته شود. شکل ۴ تغییرات درصد فلئور در پوشش (با استفاده از آنالیز EDS) را بر حسب درصد PTFE در حمام پوشش دهی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت ذرات از مقدار ۱ g/L تا مقدار ۳ g/L در حمام پوشش‌دهی، مقدار جذب ذرات در پوشش افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر غلظت ذرات تا مقدار ۵ g/L، مقدار جذب آنها در پوشش نسبتاً کاهش می‌یابد. تفاوت در مقدار جذب ذرات از حمام پوشش‌دهی را می‌توان در مکانیزم جذب این ذرات به پوشش توضیح داد. به صورت کلی، ذرات PTFE ذرات خنثی هستند و در حمام پوشش‌دهی یونیزه نمی‌شوند. بنابراین، جذب ذرات PTFE نمی‌تواند ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی و یا شیمیایی در حمام پوشش‌دهی باشد، بلکه می‌توان گفت که جذب این ذرات در پوشش می‌تواند ناشی از قفل شدن فیزیکی در حین ایجاد پوشش باشد. قفل شدن فیزیکی نیز ناشی از هم‌زدن محلول در حین پوشش‌دهی است. با افزایش غلظت ذرات در حمام پوشش‌دهی، احتمال برخورد و درگیر شدن و جذب آن‌ها در پوشش افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش غلظت ذرات در پوشش با افزایش غلظت در حمام پوشش‌دهی از مقدار ۱ تا ۳ g/L است. از طرفی کاهش جذب با افزایش غلظت ذرات در حمام پوشش‌دهی را می‌توان ناشی از آگلومره شدن ذرات در غلظت ۵ g/L در حمام پوشش‌دهی دانست. با افزایش غلظت ذرات در حمام پوشش‌دهی، تمایل به آگلومره شدن افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند منجر به کاهش جذب ذرات در پوشش گردد. همچنین در شکل ۲(ه-و) دیده می‌شود که در غلظت زیاد PTFE، ذرات سفید رنگ بیشتری به صورت آگلومره بر روی سطح جذب شده اند که نشان از افزایش

منظور الکتروکلس کاری^۱ استفاده شد. از پتانسیل ۲۵۰ mV کاتدی تر نسبت به پتانسیل مدار باز تا ۷۵۰ mV آندی تر نسبت به پتانسیل مدار باز در نرخ روبش ۱ mV/s جهت رسم منحنی‌های پلاریزاسیون استفاده شد. زمان دستیابی به پتانسیل مدار باز حدود ۱ ساعت بود. برای به دست آوردن داده‌های الکتروشیمیایی از روش پلاریزاسیون Tafel و به منظور انجام آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی از محدوده فرکانس اعمالی ۱۰۰ KHz تا ۱۰ mHz در محدوده پتانسیل +۱۰ تا -۱۰ نسبت به پتانسیل مدار باز استفاده گردید.

ریزسختی پوشش‌های مختلف با استفاده از آزمون میکروسختی سنجی ویکرز انجام شد. بدین منظور، از ۷ نقطه از سطح پوشش سختی گرفته شد و میانگین سختی به عنوان سختی نهایی گزارش شد. از دستگاه سختی سنج مدل Instron-Walper استفاده شد. بار اعمالی ۱۰۰ g بود. همچنین ضریب اصطکاک و تست سایش پوشش‌ها با استفاده از تست پین بر روی دیسک اندازه‌گیری شد. در این تست از پین از جنس کاربید تنگستن با قطر ۷ mm استفاده شد و بار اعمالی ۲۰ N نیوتن بود. سرعت ۱۰ cm/s بود. همچنین ترشوندگی سطح نمونه‌ها با استفاده از اندازه‌گیری زاویه تماس سطح به دست آمد. بدین منظور از سرنگ همیتون و دوربین Dino-Lite استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی مورفولوژی، ریزساختار و ترکیب شیمیایی

تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی و الگوی تفرق اشعه ایکس مربوط به پوشش Ni-B در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱(الف) مشاهده می‌شود که پوشش الکتروکلس نیکل-بور به صورت نسبتاً یکنواخت و بدون ترک روی زیرلایه ایجاد شده است. همچنین، ساختار این پوشش به صورت نودولار می‌باشد. با توجه به شکل ۱(ب) ملاحظه می‌گردد که الگوی پراش مربوط به این نمونه دارای یک پیک پهن در $2\theta=45^\circ$ است، که نشان‌دهنده آمورف بودن ساختار Ni-B می‌باشد. معمولاً ساختار آمورف برای پوشش‌های Ni-B حالت غالب است. نتایج آزمون EDS نشان داده است که این پوشش دارای ۶/۲ درصد وزنی بور و ۹۳/۸ درصد وزنی نیکل است.

۳-۱-۱- تاثیر غلظت ذرات PTFE

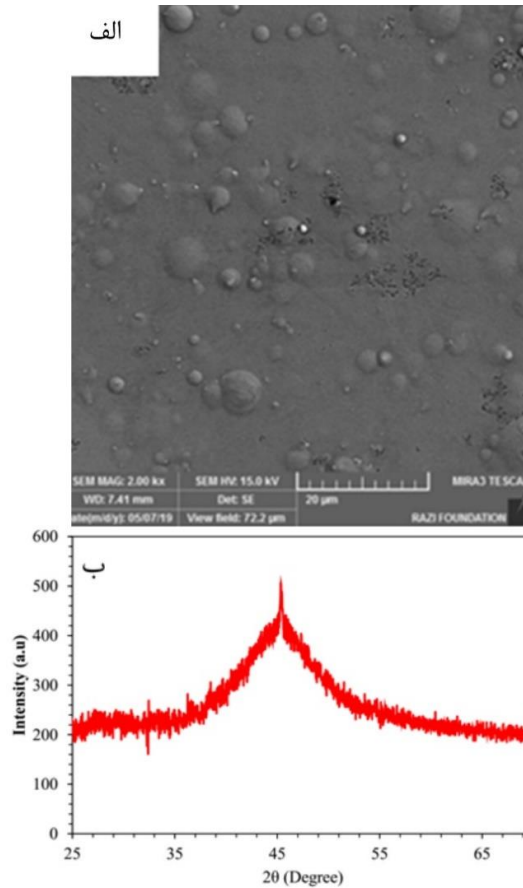
تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پوشش‌های Ni-B-PTFE تهیه شده در غلظت‌های مختلف PTFE در شکل ۲ آمده است. افزودن

Working electrode^۱

۵ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با ایجاد پوشش کامپوزیتی، زاویه تماس افزایش یافته و به مقدار ۸۷ درجه رسیده است. با توجه به ماهیت آگریزی ذرات PTFE، این امر می‌تواند اثبات کننده جذب PTFE در پوشش باشد.

آگومراسیون دارد. این امر توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۲۲].

همچنین به منظور بررسی اثر حضور PTFE در پوشش، آزمون ترشوندگی از پوشش Ni-B-PTFE و Ni-B گرفته شد که در شکل



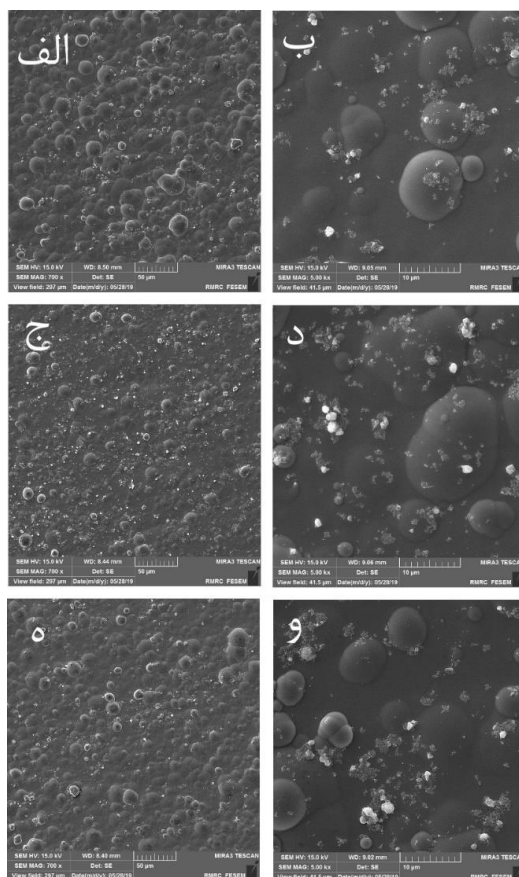
شکل ۱- (الف) تصویر FESEM و (ب) الگوی تفرق اشعه ایکس مربوط به پوشش Ni-B.

۲-۱-۳- تاثیر غلظت نانوذرات Si_3N_4

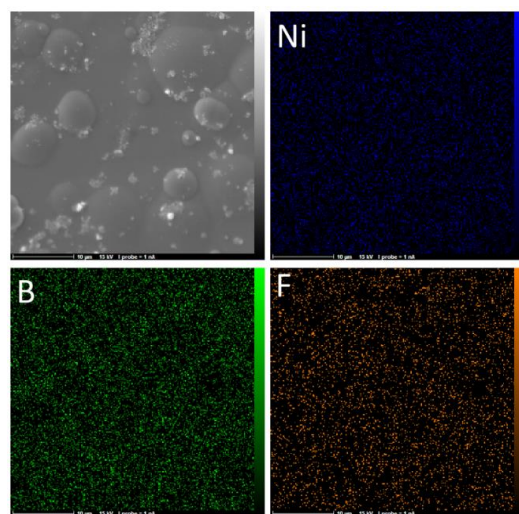
شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دید که عناصر نیکل، بور، سیلیسیم و نیتروژن به صورت موفقیت آمیزی در سطح پوشش شرکت داشته‌اند و به صورت یکنواخت در پوشش توزیع شده‌اند. وجود عناصر نیکل و بور ناشی از پوشش نیکل- بور بوده و وجود عناصر سیلیسیم و نیتروژن ناشی از نانوذرات Si_3N_4 می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات به صورت موفقیت آمیزی در تشکیل پوشش شرکت داشته‌اند و به صورت یکنواخت در سرتاسر پوشش توزیع شده اند.

در این قسمت، پوشش نانوکامپوزیتی Ni-B- Si_3N_4 ایجاد شده و تاثیر غلظت نانوذرات Si_3N_4 بر ریزساختار و مورفولوژی پوشش مورد مطالعه قرار گرفته است. تصاویر FESEM از سطح پوشش‌های ایجاد شده در غلظت‌های مختلف نانوذرات Si_3N_4 در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به تصاویر می‌توان دید که در تمامی غلظت‌ها، نانوذرات با موفقیت در تشکیل پوشش شرکت داشته و به صورت یکنواخت در پوشش توزیع شده اند.

همچنین جهت بررسی ترکیب شیمیایی و نحوه توزیع ذرات و عناصر در این پوشش نانوکامپوزیتی، نقشه عنصری مربوط به عناصر مختلف در



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از سطح پوشش‌های ایجاد شده در غلظت‌های مختلف ذرات PTFE در حمام پوشش‌دهی: (الف - ب) ۱، (ج - د) ۳، (ه - و) ۵ g/L.



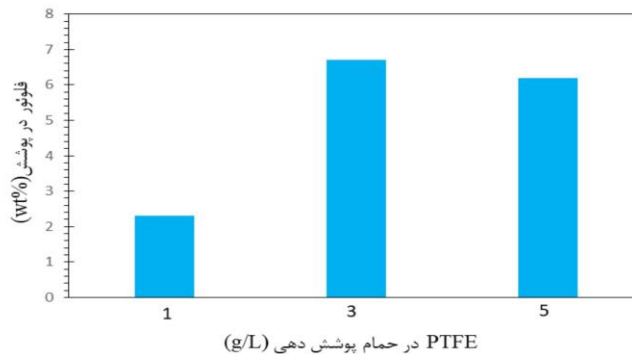
شکل ۳- نقشه عنصری مربوط به پوشش Ni-B-PTFE در غلظت ۳ g/L PTFE.

دهی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش غلظت نانوذرات در حمام پوشش‌دهی، ابتدا مقدار جذب نانوذرات در پوشش افزایش یافته و بیشترین جذب نانوذرات در غلظت ۴ g/L رخ می‌دهد. اما با افزایش

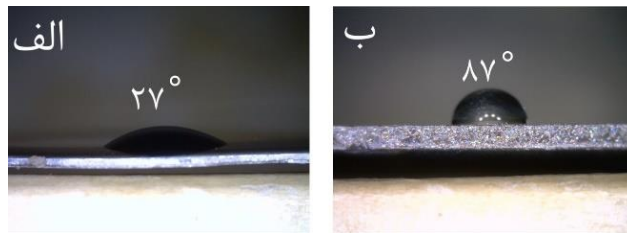
میزان سیلیسیم در پوشش می‌تواند به عنوان معیاری از درصد Si_3N_4 در نظر گرفته شود. شکل ۸ تغییرات درصد سیلیسیم در پوشش (با استفاده از آنالیز EDS) را بر حسب درصد Si_3N_4 در حمام پوشش

شدن نانوذرات در حمام پوشش‌دهی و در نتیجه کاهش جذب آنها در پوشش می‌باشد.

غلظت نانوذرات در حمام پوشش‌دهی از ۴ به ۶ g/L، می‌توان دید که مقدار جذب آنها کاهش می‌یابد. همان طور که گفته شد، کاهش مقدار جذب در غلظت‌های زیاد نانوذرات در حمام پوشش‌دهی ناشی از آگلومره



شکل ۴- تغییرات درصد فلوئور در پوشش به عنوان تابعی از غلظت PTFE در حمام پوشش دهی.



شکل ۵- زاویه تماس مربوط به الف) پوشش Ni-B و ب) پوشش Ni-B-PTFE.

طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه‌های ایجاد شده در حمام‌های حاوی مقادیر مختلف ذرات PTFE در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همچنین داده‌های الکتروشیمیایی این منحنی‌ها نیز توسط روش برون یابی تافلی به دست آمد و در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون و داده‌های جدول ۲ می‌توان به این نتیجه رسید که با اعمال پوشش الکتروکاتالیز نیکل-بور روی فولاد ساده کربنی، مقدار پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر مثبت‌تر و همچنین چگالی جریان خوردگی نیز به سمت مقادیر کمتر میل می‌کند. در نتیجه می‌توان گفت که با اعمال پوشش الکتروکاتالیز نیکل-بور بر روی سطح فولاد ساده کربنی، سطح نمونه از لحاظ ترمودینامیکی پایدارتر شده و مقاومت به خوردگی آن بهبود می‌یابد. همچنین، کامپوزیتی کردن پوشش باعث تغییر مقاومت به خوردگی آن می‌شود. با توجه به داده‌ها مشاهده می‌شود که در پوشش حاوی ۱ g/L ذرات PTFE، پتانسیل خوردگی از ۵۰۶- میلی‌ولت نسبت به الکتروکاتالیز کالومل اشباع برای پوشش الکتروکاتالیز نیکل-بور، تا ۴۷۰- میلی‌ولت تغییر کرده و مثبت‌تر شده است.

۳-۱-۳- اثر هم افزایی

پس از مطالعه ریزساختار و مورفولوژی پوشش‌های کامپوزیتی Ni-B-PTFE و نانوکامپوزیتی Ni-B-Si₃N₄، پوشش هیبریدی Ni-B-PTFE-Si₃N₄ در غلظت‌های بهینه ذرات PTFE و Si₃N₄ ایجاد و ریزساختار و مورفولوژی آن بررسی شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه هیبریدی در دو بزرگنمایی در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دید که نانوذرات سخت Si₃N₄ و ذرات نرم PTFE به صورت موفقیت آمیزی در تشکیل پوشش شرکت داشته‌اند، که در شکل ۹ توسط پیکان مشخص شده است.

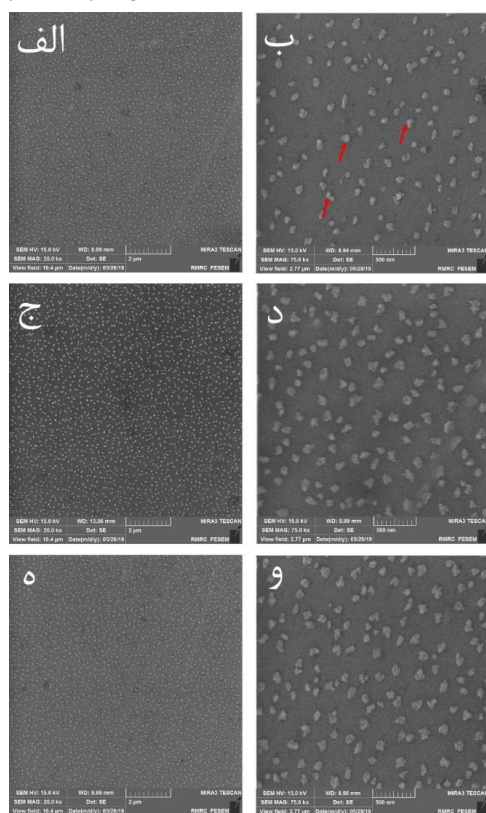
۳-۲- بررسی رفتار خوردگی

۳-۲-۱- تاثیر غلظت ذرات PTFE

در ابتدا تاثیر غلظت ذرات PTFE بر رفتار خوردگی پوشش الکتروکاتالیز Ni-B-PTFE مورد بررسی قرار گرفت. رفتار خوردگی پوشش‌های مختلف توسط روش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و

ها برداشت نمود، تغییرات مقاومت به خوردگی در اثر تغییرات غلظت PTFE در حمام پوشش‌دهی می‌باشد. ملاحظه می‌شود که بهترین مقاومت به خوردگی، در غلظت ۳ g/L ذرات PTFE ایجاد شده که در آن پتانسیل خوردگی برابر با ۴۳۸- میلی ولت نسبت به الکتروود کالومل اشباع و چگالی جریان خوردگی آن برابر با ۲/۳ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ می‌باشد. دلیل تفاوت مقاومت به خوردگی پوشش‌ها در غلظت‌های مختلف ذرات PTFE حمام را می‌توان ناشی از مقدار جذب ذرات در پوشش دانست. با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که غلظت بهینه ذرات PTFE در حمام پوشش‌دهی برای رسیدن به پوششی که بیشترین مقاومت به خوردگی را داشته باشد ۳ g/L بوده است.

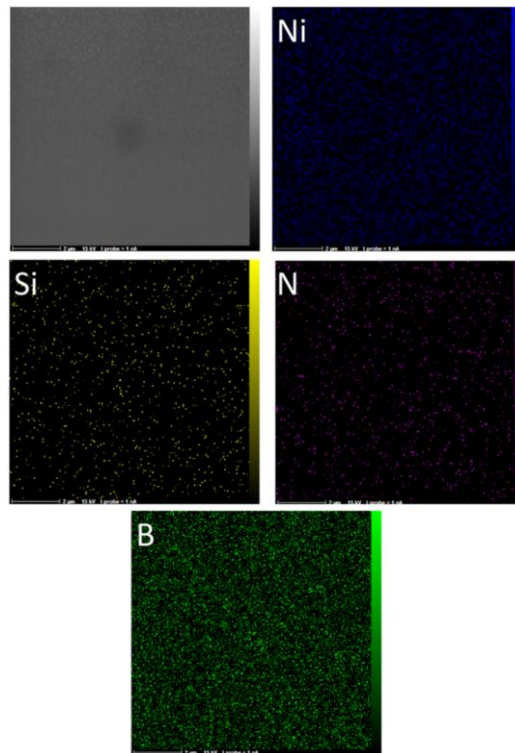
همچنین ملاحظه می‌گردد که چگالی جریان خوردگی از مقدار ۲۱/۳ به $5/3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ کاهش یافته است، که این امر به معنای بهبود مقاومت به خوردگی در اثر کامپوزیتی کردن پوشش می‌باشد. به طور کلی، مقدار افزایش مقاومت به خوردگی یک پوشش به ریزساختار پوشش بستگی دارد. هرچقدر پوشش متراکم‌تر باشد، آنگاه مسیر عبور یون‌های خورنده به زیرلایه سخت‌تر شده و مقاومت به خوردگی بهبود می‌یابد. در این پژوهش، ذرات PTFE به عنوان ذرات خنثی از لحاظ الکتروشیمیایی در زمینه پوشش توزیع می‌شوند، که مانند یک سد در برابر حرکت یون‌های خورنده به زیرلایه عمل کرده و منجر به بهبود مقاومت به خوردگی پوشش می‌گردند. نکته دیگری که می‌توان از داده-



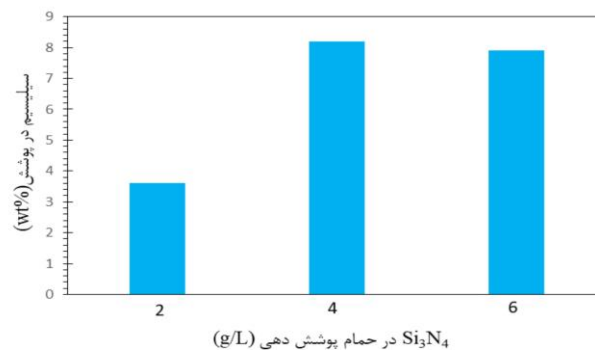
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی از سطح پوشش‌های ایجاد شده در غلظت‌های مختلف Si₃N₄: (الف - ب) ۲، (ج - د) ۴، (ه - و) ۶ g/L.

یون‌ها به زیرلایه شده و باعث بهبود مقاومت به خوردگی گردد. هم چنین، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده شد، حضور ذرات PTFE در پوشش می‌تواند باعث کاهش ترشوندگی آن شود که این امر نیز به نوبه خود می‌تواند به بهبود مقاومت خوردگی پوشش به دلیل دفع آب و یون‌های خورنده کمک کند.

با افزایش غلظت ذرات در حمام به ۵ g/L، همان‌طور که در قسمت بررسی ریزساختار و مورفولوژی نیز دیده شد، به دلیل آگلومره شدن ذرات PTFE احتمالاً مشارکت آن‌ها در پوشش کم شده و مقاومت به خوردگی پوشش نسبت به نمونه ۳ g/L کاهش یافته است. مشارکت بیشتر ذرات در پوشش می‌تواند منجر به سخت‌تر کردن مسیر حرکت



شکل ۷- نقشه عنصری مربوط به پوشش $\text{Ni-B-Si}_3\text{N}_4$ در غلظت Si_3N_4 ۴ g/L

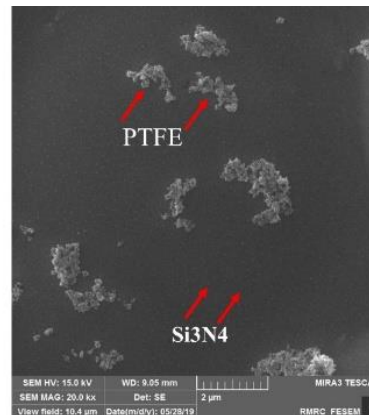
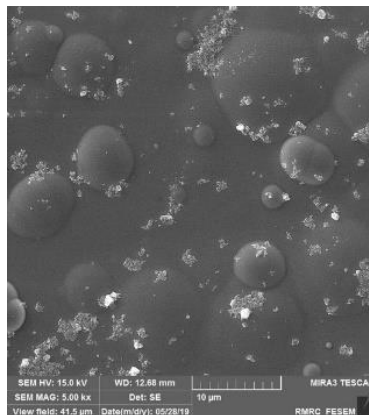


شکل ۸- تغییرات درصد سیلیسیم در پوشش به عنوان تابعی از غلظت Si_3N_4 در حمام پوشش دهی.

آورده شده است. به طور کلی، در منحنی‌های نایکوئیست قطر منحنی برابر با مقاومت پلاریزاسیون می‌باشد. بنابراین، هرچه قطر منحنی نایکوئیست بیشتر باشد، مقاومت به خوردگی بیشتر است. با توجه به منحنی‌ها دیده می‌شود که با اعمال پوشش بر روی سطح زیرلایه، قطر منحنی افزایش یافته که این امر نشان دهنده افزایش مقاومت به خوردگی در اثر اعمال پوشش بر روی سطح می‌باشد. همچنین دیده می‌شود که با اعمال پوشش کامپوزیتی، قطر دایره افزایش بیشتری یافته که این امر نیز به منزله افزایش بیشتر مقاومت به خوردگی پوشش در اثر ورود ذرات PTFE به درون پوشش می‌باشد. همچنین بیشترین

رفتار خوردگی پوشش‌ها همچنین توسط آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نیز بررسی شد. منحنی‌های نایکوئیست مربوط به پوشش‌های ایجاد شده در غلظت‌های مختلف ذرات PTFE در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین مدار معادل مورد استفاده جهت برازش منحنی‌ها نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این مدار معادل، R_s مقاومت محلول، R_c مقاومت پوشش، CPE_c عنصر فازی ثابت مربوط به پوشش، R_p مقاومت انتقال بار، CPE_{dl} عنصر فازی ثابت مربوط به لایه دوگانه الکتریکی می‌باشد. همچنین داده‌های استخراج شده از منحنی‌های امپدانس الکتروشیمیایی نیز در جدول ۳

مرتبط باشد. همچنین حلقه برگشتی در فرکانس‌های پایین می‌تواند مربوط به ظرفیت لایه دوگانه یا پدیده نفوذ گونه‌های شیمیایی اکسیدکننده به داخل پوشش باشد [۲۳]. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی به خوبی با نتایج منحنی‌های پلاریزاسیون تطابق دارد.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح پوشش هیبریدی در دو بزرگنمایی.

۲-۲-۳- تاثیر غلظت ذرات Si_3N_4

نانوذرات Si_3N_4 منجر به افزایش تمایل به خوردگی یکنواخت شده و از این طریق از خوردگی موضعی و در نتیجه از انهدام‌های ناگهانی جلوگیری می‌نماید. مکانیزم افزایش تمایل به خوردگی یکنواخت را می‌توان به این صورت توجیه کرد که ذرات خنثی Si_3N_4 در پوشش به صورت یکنواخت توزیع می‌شوند؛ این امر باعث می‌شود که نانوذرات به علت پتانسیل ترمودینامیکی مثبت به عنوان مناطق موضعی کاتدی و زمینه فلزی به صورت آندهای موضعی عمل کند. این امر منجر به افزایش تمایل به خوردگی یکنواخت می‌شود. دلیل تفاوت در مقاومت به خوردگی مربوط به نمونه‌های ایجاد شده در غلظت‌های مختلف نانوذرات را نیز می‌توان ناشی از جذب بیشتر نانوذرات در غلظت بهینه 4 g/L و در نتیجه عملکرد بهتر این پوشش در جلوگیری از خوردگی زیرلایه دانست [۲۴، ۲۵].

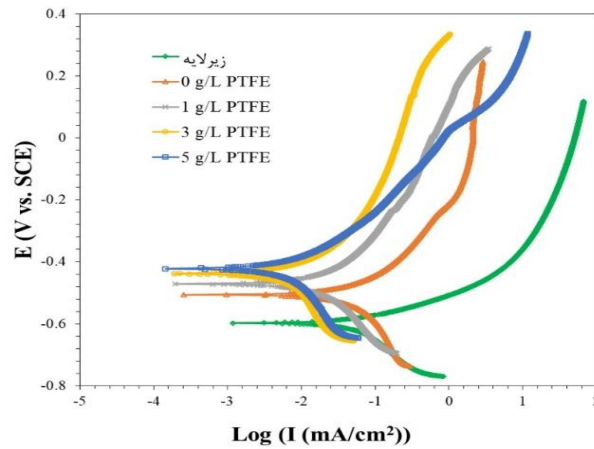
همچنین مقاومت به خوردگی این پوشش‌ها توسط روش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نیز بررسی شد. منحنی‌های نایکوئیست مربوط به پوشش‌های مختلف ایجاد شده در غلظت‌های مختلف نانوذرات Si_3N_4 در شکل ۱۴ نشان داده شده است. منحنی‌های امپدانس الکتروشیمیایی توسط مدار معادل ارائه شده در شکل ۱۲ فیت شدند. داده‌های استخراج شده از منحنی‌ها در جدول ۵ آورده شده است. نتایج این آزمایش نیز در تطابق با داده‌های پلاریزاسیون و نشان دهنده

قطر دایره مربوط به پوشش ایجاد شده در غلظت 3 g/L ذرات PTFE می‌باشد که نشان دهنده بیشترین مقاومت به خوردگی مربوط به پوشش ایجاد شده در این غلظت است. لازم به ذکر است که مشاهده حلقه برگشتی در نمودارهای نایکوئیست می‌تواند به پدیده‌های فیزیکی شیمیایی که در فصل مشترک فلز/پوشش/محلول اتفاق می‌افتد

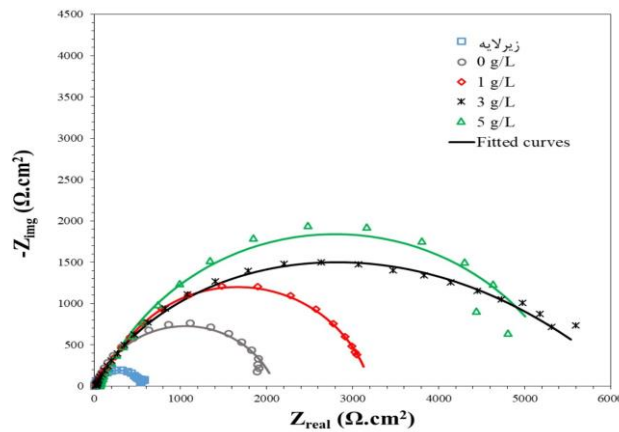
در این قسمت، تاثیر غلظت نانوذرات Si_3N_4 بر رفتار خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی $Ni-B-Si_3N_4$ بررسی خواهد شد. منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به پوشش‌های ایجاد شده در حمام‌های پوشش‌دهی حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات Si_3N_4 در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همچنین داده‌های استخراج شده از منحنی‌ها نیز در جدول ۴ آورده شده است. در این مورد نیز دیده می‌شود که با ورود ذرات خنثی Si_3N_4 به درون پوشش الکترولس $Ni-B$ و ایجاد پوشش نانوکامپوزیتی $Ni-B-Si_3N_4$ مقاومت به خوردگی پوشش بهبود یافته و چگالی جریان خوردگی در کمترین مقدار به مقدار $2/2 \mu\text{A/cm}^2$ رسیده است. این مقدار بهینه در غلظت 4 g/L نانوذرات Si_3N_4 به دست آمده است. همچنین دیده می‌شود که با افزایش غلظت نانوذرات Si_3N_4 به 6 g/L در حمام پوشش‌دهی، مقاومت به خوردگی پوشش کاهش یافته است. نانوذرات Si_3N_4 به صورت یک سد در برابر حرکت یون‌های خورنده به زیرلایه عمل می‌کنند و از این طریق منجر به بهبود مقاومت به خوردگی پوشش نانوکامپوزیتی می‌شوند. از طرفی، این نانوذرات در زمان تشکیل پوشش الکترولس به عنوان مکان‌هایی برای جوانه‌زنی عمل می‌کنند. با افزایش مکان‌های جوانه‌زنی، پوشش متراکم‌تری به دست می‌آید. افزایش تراکم و کاهش تخلخل پوشش منجر به بهبود مقاومت به خوردگی پوشش می‌شود. همچنین،

به معنای بیشترین مقاومت به خوردگی در این فرمولاسیون بهینه می-
باشد.

بهبود مقاومت به خوردگی در اثر ورود نانوذرات Si_3N_4 به درون پوشش
می‌باشد. همچنین می‌توان دید که بیشترین مقاومت انتقال بار مربوط به
پوشش ایجاد شده در غلظت ۴ g/L نانوذرات Si_3N_4 بوده که این امر



شکل ۱۰- منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده در حمام حاوی غلظت‌های مختلف ذرات PTFE.



شکل ۱۱- منحنی‌های نایکوئیست مربوط به پوشش‌های ایجاد شده در غلظت‌های مختلف ذرات PTFE.

جدول ۲- داده‌های خوردگی مربوط به نمونه‌های Ni-B-PTFE (با استفاده از روش برون یابی تافلی).

PTFE (g/L)	β_a (mv/decade)	β_c (mv/decade)	پتانسیل خوردگی (mv. vs. SCE)	دانسیته جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$)
فلز زیرلایه	۷۸	۱۲۷	-۵۹۷	۵۸/۲
۰	۷۳	۸۰/۷	-۵۰۶	۲۱/۳
۱	۸۲	۱۲۳	-۴۷۰	۵/۳
۳	۷۲	۱۲۵	-۴۳۸	۲/۳
۵	۸۴	۱۳۲	-۴۲۲	۲/۹

جدول ۳- داده‌های استخراج شده از منحنی‌های نایکوئیست مربوط به نمونه‌های Ni-B-PTFE.

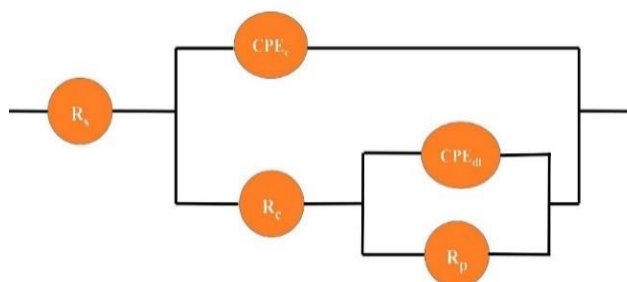
PTFE (g/L)	R _s (Ω.cm ²)	CPE _c (F/cm ²)	n ₁	R _c (Ω.cm ²)	CPE _{dl} (F/cm ²)	n ₂	R _p (Ω.cm ²)
زیرلایه	۷/۹	۰/۰۰۰۷۶۴	۰/۷	۲۵/۶	۰/۰۰۰۰۸۲۴	۰/۹	۷۲۵
۰	۱۰/۱۷	۰/۰۰۰۰۶۲	۰/۶	۲۵۶	۰/۰۰۰۰۶۶۲	۰/۸۱	۱۸۹۷
۱	۹/۵۹	۰/۰۰۰۰۴۶۲	۰/۷	۴۷۲	۰/۰۰۰۰۴۳۳	۰/۸۵	۲۹۷۸
۳	۹/۳۵	۰/۰۰۰۰۳۷۶	۰/۸	۱۲۵۶	۰/۰۰۰۰۳۸۴	۰/۹۱	۵۲۳۱
۵	۹/۸۲	۰/۰۰۰۰۴۹	۰/۷	۹۸۲	۰/۰۰۰۰۴۰۶	۰/۷۶	۴۷۹۸

۳-۲-۳- پوشش هیبریدی

در این قسمت، مقاومت به خوردگی پوشش هیبریدی Ni-B-PTFE-Si₃N₄ در غلظت‌های بهینه ذرات PTFE و نانوذرات Si₃N₄ با استفاده از پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شده است. منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به پوشش‌های بهینه حالت های Ni-B-PTFE و Ni-B-Si₃N₄ و پوشش هیبریدی در شکل ۱۵ نشان داده شده و همچنین منحنی‌های نایکوئیست نیز در شکل ۱۶ آمده است.

با توجه به شکل ۱۵ دیده می‌شود که در پوشش هیبریدی، پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر مثبت تر نسبت به پوشش‌های حالت بهینه جایجا شده است. همچنین مقاومت به خوردگی پوشش به $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ۰/۷۶ کاهش یافته، که این امر نشانگر بهبود مقاومت به خوردگی در اثر هیبریدی کردن پوشش و به کاربردن همزمان ذرات سخت و نرم در پوشش می‌باشد. بهبود مقاومت به خوردگی را می‌توان به دلیل اثر هم

افزایی بین ذرات PTFE و Si₃N₄ در پوشش دانست. همچنین منحنی‌های نایکوئیست در شکل ۱۶ بهبود مقاومت به خوردگی در اثر هیبریدی کردن پوشش و به کار بردن همزمان ذرات سخت و نرم در پوشش را تایید می‌کند. با هیبریدی کردن پوشش دیده می‌شود که مقاومت پلاریزاسیون تا مقدار ۸۱۵۶ اهم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد که در مقایسه با پوشش Ni-B-PTFE (۵۲۳۱ اهم بر سانتی‌متر مربع) و همچنین پوشش Ni-B-Si₃N₄ (۴۹۸۶ اهم بر سانتی‌متر مربع) مقدار بیشتری دارد. این امر به منزله افزایش مقاومت در برابر واکنش خوردگی و در نتیجه بهبود مقاومت به خوردگی است. هنگامیکه ذرات سخت و ذرات نرم به صورت همزمان در پوشش وجود داشته باشند، عملکرد همزمان هر دو ذرات سخت و نرم منجر به بهبود قابل توجه در مقاومت به خوردگی می‌گردد و این ذرات به عنوان سدی در برابر ورود یون‌های خورنده عمل کرده و از ورود یون‌های خورنده به زیرلایه جلوگیری می‌کنند.



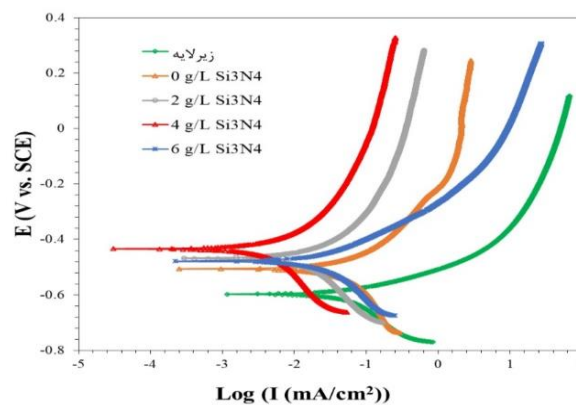
شکل ۱۲- مدار معادل به کار برده شده جهت تطبیق دادن داده‌های الکتروشیمیایی.

۳-۳- بررسی خواص تریبولوژیکی

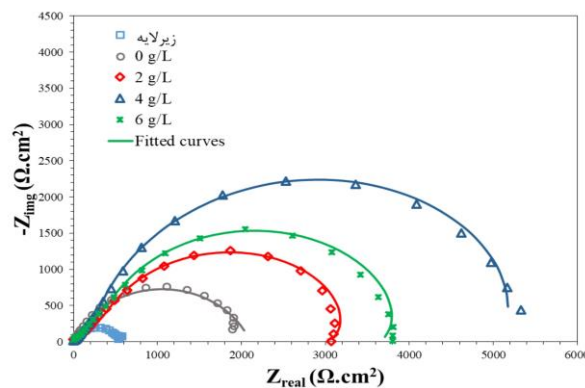
۳-۳-۱- سختی

کاهش سختی آن می‌گردد. کمترین سختی برای پوشش حاوی ۳ g/L ذرات PTFE مشاهده شده است. دلیل این امر ورود ذرات نرم به ساختار پوشش بوده که منجر به کاهش سختی آن می‌گردد. همچنین علت افزایش مقدار سختی در پوشش ایجاد شده در غلظت ۵ g/L ذرات PTFE نسبت به پوشش حاوی ۳ g/L ذرات PTFE، احتمالاً می‌تواند کاهش ورود این ذرات به درون پوشش با افزایش غلظت به دلیل آگلومره شدن باشد که در شکل ۴ و با توجه به نتایج آزمون EDS به آن اشاره شد.

نتایج آزمون سختی سنجی ویکرز مربوط به نمونه های مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مقایسه میزان سختی ویکرز مربوط به نمونه های Ni-B، زیرلایه بدون پوشش و پوشش های ایجاد شده در غلظت های مختلف ذرات PTFE در شکل ۱۷ (الف) نشان می‌دهد که با اعمال پوشش Ni-B بر روی سطح زیرلایه فولادی، سختی تا مقدار HV ۸۴۷ افزایش یافته و افزودن ذرات نرم PTFE به پوشش، موجب



شکل ۱۳- منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به نمونه های پوشش داده شده در حمام های مختلف های نانوذرات Si₃N₄.



شکل ۱۴- منحنی های نایکویست مربوط به پوشش های ایجاد شده در غلظت های مختلف نانوذرات Si₃N₄.

کوچک، مانند رسوب نیکل- بور نانوکریستالی، سخت تر از مواد با اندازه دانه های بزرگ می باشد. دلیل این امر این است که مواد با اندازه دانه های کوچک مرز دانه های بیشتری دارند که این مرز دانه ها از حرکت نابجایی ها جلوگیری می کنند؛ در نتیجه سختی ساختار افزایش می یابد. افزایش سختی ناشی از ورود نانوذرات سخت به درون پوشش را می-

تاثیر غلظت نانوذرات Si₃N₄ بر سختی پوشش در شکل ۱۷ (ب) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزودن ذرات سخت به پوشش، سختی آن نسبت به پوشش Ni-B افزایش یافته و بیشترین سختی برابر با HV ۹۶۳ و مربوط به پوشش ایجاد شده در غلظت ۴ g/L نانوذرات سخت می‌باشد. به طور کلی، مواد با اندازه دانه های

بنابراین با وارد کردن نانوذرات سخت با توزیع یکنواخت به درون پوشش، می‌توان پوشش با سختی بالا تهیه کرد. در شکل ۱۵ (ج) سختی پوشش هیبریدی متشکل از ذرات سخت و نرم با حالت‌های بهینه پوشش‌های دیگر مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که سختی پوشش هیبریدی برابر با HV ۸۷۱ است، که بیشتر از پوشش Ni-B و کمتر از پوشش Ni-B-Si₃N₄ می‌باشد. دلیل این امر وجود ذرات نرم در کنار ذرات سخت می‌باشد که منجر به کاهش سختی پوشش گردیده است.

توان به صورت زیر توجیه نمود: هر گاه یک نایجایی به یک ذره برسد، برای عبور کردن از ذره دو مکانیزم را می‌تواند در پیش گیرد. مکانیزم اول عبور از نانوذره و مکانیزم دوم دور زدن نانوذره می‌باشد. مکانیزم اول زمانی غالب است که فصل مشترک بین ذره و زمینه به صورت هم‌سیما باشد. این امر باعث می‌شود یک مانع جدید بر سر راه عبور از ذره به وجود آید. مکانیزم دوم نیز زمانی غالب است که ذره بزرگ باشد و فصل مشترک بین ذره و زمینه به صورت غیر هم‌سیما باشد [۲۶].

جدول ۴- داده‌های خوردگی مربوط به نمونه‌های Ni-B- Si₃N₄ (با استفاده از روش برون یابی تافل).

Si ₃ N ₄ (g/L)	β_a (mV/decade)	β_c (mV/decade)	پتانسیل خوردگی (mv. vs. SCE)	دانشیته جریان خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
زیرلایه	۷۸	۱۲۷	-۵۹۷	۵۸/۲
۰	۷۳	۸۰/۷	-۵۰۶	۲۱/۳
۲	۷۹	۱۱۸	-۴۶۷	۶/۴
۴	۸۳	۱۱۹	-۴۳۳	۲/۲
۶	۷۳	۱۲۹	-۴۷۸	۴/۱

جدول ۵- داده‌های استخراج شده از منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های Ni-B- Si₃N₄

Si ₃ N ₄ (g/L)	R _s ($\Omega.\text{cm}^2$)	CPE _c (F/ cm ²)	n ₁	R _c ($\Omega.\text{cm}^2$)	CPE _{d1} (F/ cm ²)	n ₂	R _{ct} ($\Omega.\text{cm}^2$)
زیرلایه	۷/۹	۰/۰۰۰۷۶۴	۰/۷	۲۵/۶	۰/۰۰۰۰۸۲۴	۰/۹	۷۲۵
۰	۱۰/۱۷	۰/۰۰۰۶۲	۰/۶	۲۵۶	۰/۰۰۰۰۶۶۲	۰/۸۱	۱۸۹۷
۲	۱۱/۲	۰/۰۰۰۵۶۲	۰/۶۷	۳۷۲	۰/۰۰۰۰۳۶۷	۰/۸۱	۲۸۹۶
۴	۱۲/۳	۰/۰۰۰۲۷۶	۰/۷۱	۸۹۶	۰/۰۰۰۰۲۹۶	۰/۹۴	۴۹۸۶
۶	۱۰/۳	۰/۰۰۰۴۲۶	۰/۶۹	۷۴۲	۰/۰۰۰۰۴۲۶	۰/۹۲	۳۸۵۲

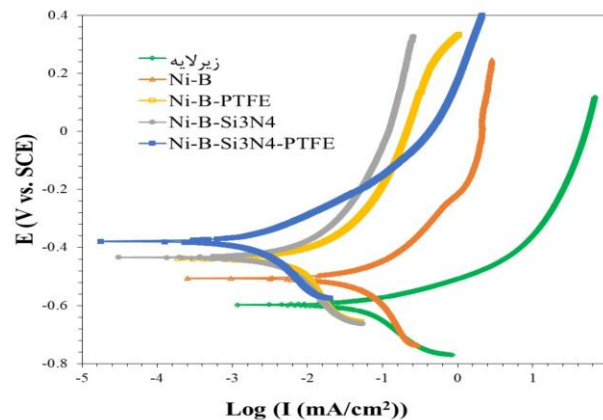
حضور ذرات PTFE نقش موثری در کنترل نوسان و ایجاد ثبات در ضریب اصطکاک داشته است، که می‌توان نتیجه گرفت باعث ایجاد روانکاری در پوشش شده است. همچنین با افزودن ذرات سخت Si₃N₄ به پوشش، ضریب اصطکاک افزایش یافته و به مقدار حدود ۰/۷۸ می‌رسد. حضور ذرات سخت باعث افزایش نوسانات ضریب اصطکاک نیز شده است. به صورت کلی، در رفتار تریبولوژیکی، سختی بالا و ضریب اصطکاک پایین ترجیح داده می‌شود. دیده شد که با به کار بردن ذرات نرم در پوشش، سختی و همچنین ضریب اصطکاک کاهش می‌یابند. با افزودن ذرات سخت به پوشش، سختی افزایش می‌یابد و از طرفی ضریب اصطکاک نیز افزایش پیدا می‌کند. در این مطالعه برای

۲-۳-۳- ضریب اصطکاک و نرخ سایش

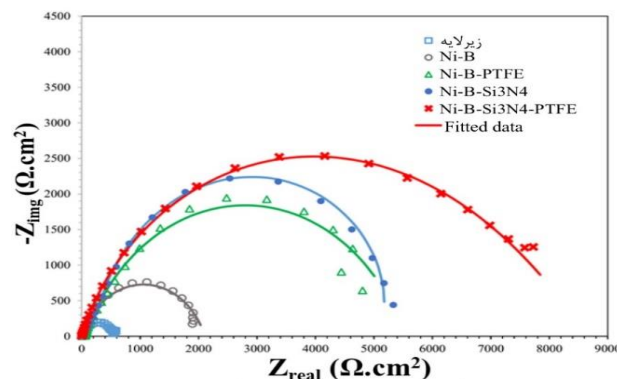
منحنی‌های ضریب اصطکاک بر حسب تابعی از فاصله سایش برای نمونه‌های Ni-B، Ni-B-PTFE، Ni-B-Si₃N₄ و Ni-B-PTFE-Si₃N₄ در شکل ۱۸ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که وارد کردن نانوذرات نرم و سخت در پوشش بر ضریب اصطکاک تاثیرگذار بوده و منجر به تغییر آن خواهد شد. میانگین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه Ni-B در حدود ۰/۶ می‌باشد. هم چنین ضریب اصطکاک در ابتدا نوسان زیادی داشته و بعد از حدود ۸۰۰-۱۰۰۰ cm تقریباً ثابت شده است. با افزودن ذرات نرم PTFE مقدار ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و به حدود ۰/۳۵ می‌رسد. مشاهده می‌شود که

نرم و سخت به صورت همزمان، هم می‌توان از خواص افزایش سختی نانوذرات سخت در پوشش و هم از خواص کاهش ضریب اصطکاک ذرات نرم استفاده نمود و به یک حالت بهینه در خواص تریبولوژیکی دست یافت. از طرفی به دلیل این که PTFE از لحاظ شیمیایی خنثی می‌باشد، از اکسیداسیون پوشش Ni-B در حین سایش جلوگیری خواهد نمود. همچنین نانوذرات سخت Si_3N_4 در حین سایش به دلیل سختی بالا، به عنوان یک مانع در مقابل تغییر شکل شدید عمل کرده و منجر به بهبود رفتار تریبولوژیکی پوشش می‌گردد.

پوشش‌های الکتروکلس Ni-B به صورت همزمان از ذرات نرم و سخت به منظور بهبود رفتار تریبولوژیکی استفاده شده است. همان طور که در شکل ۱۸ دیده می‌شود با به کار بردن ذرات نرم و سخت به صورت همزمان، ضریب اصطکاک نسبت به پوشش $\text{Ni-B-Si}_3\text{N}_4$ کاهش یافته و به مقدار ۰/۶ می‌رسد. هرچند که نوسانات ضریب اصطکاک کاهش اندکی داشته است. شاید به دلیل حضور نانوذرات سخت، وجود نوسان در ضریب اصطکاک اجتناب ناپذیر بوده است. به هر حال، در بررسی سختی دیده شد که سختی پوشش هیبریدی نسبت به پوشش Ni-B بیشتر است. پس می‌توان نتیجه گرفت که با به کار بردن ذرات



شکل ۱۵- منحنی‌های پلاریزاسیون مقایسه حالت‌های بهینه پوشش‌های کامپوزیتی و پوشش هیبریدی $\text{Ni-B-PTFE-Si}_3\text{N}_4$.



شکل ۱۶- منحنی‌های نایکوئیست مقایسه حالت‌های بهینه پوشش‌های کامپوزیتی و پوشش هیبریدی $\text{Ni-B-PTFE-Si}_3\text{N}_4$.

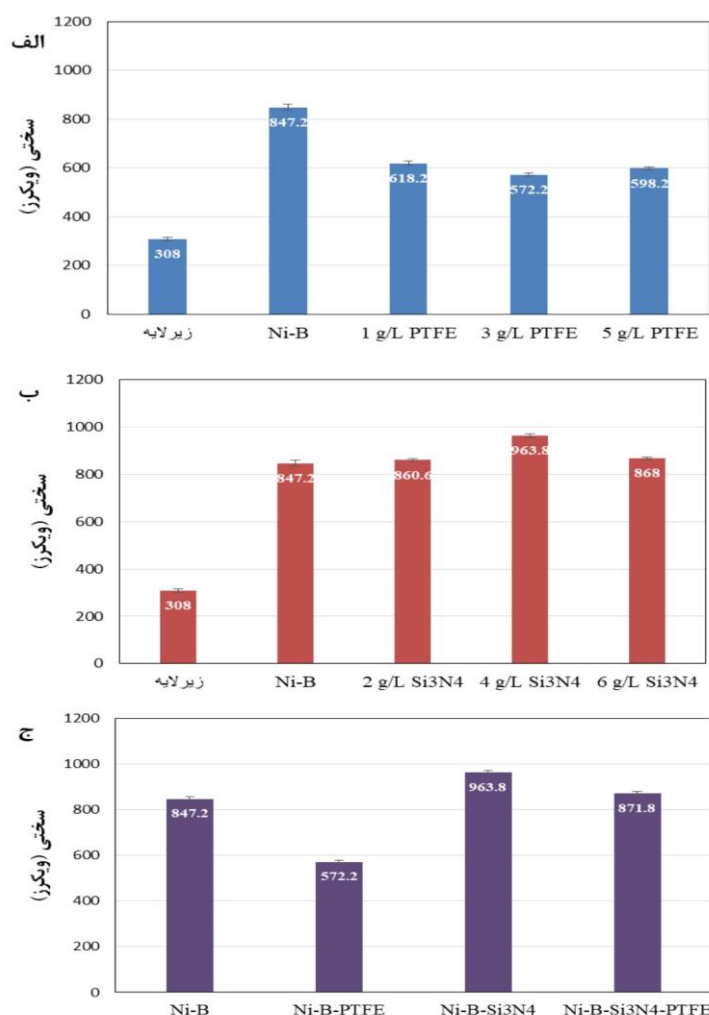
ذرات نرم به درون پوشش باعث افزایش نرخ سایش و افزودن ذرات سخت به درون پوشش باعث کاهش نرخ سایش می‌گردد. در نمونه هیبریدی نرخ سایش برابر با $10^{-3} \times 4/9$ (mg/N.m) است که در حد وسط نمونه‌های حاوی نانوذرات سخت و نرم می‌باشد.

بررسی نرخ سایش مربوط به نمونه‌های مختلف (جدول ۶) نیز نشان داد که نرخ سایش مربوط به نمونه Ni-B برابر با $10^{-3} \times 6/4$ (mg/N.m) است. کمترین نرخ سایش مربوط به نمونه Ni-B-Si₃N₄ است که برابر با $10^{-3} \times 3/2$ (mg/N.m) می‌باشد. همچنین با اضافه نمودن PTFE نرخ سایش افزایش یافته و به مقدار $10^{-3} \times 12/3$ (mg/N.m) می‌رسد. پس می‌توان گفت که افزودن

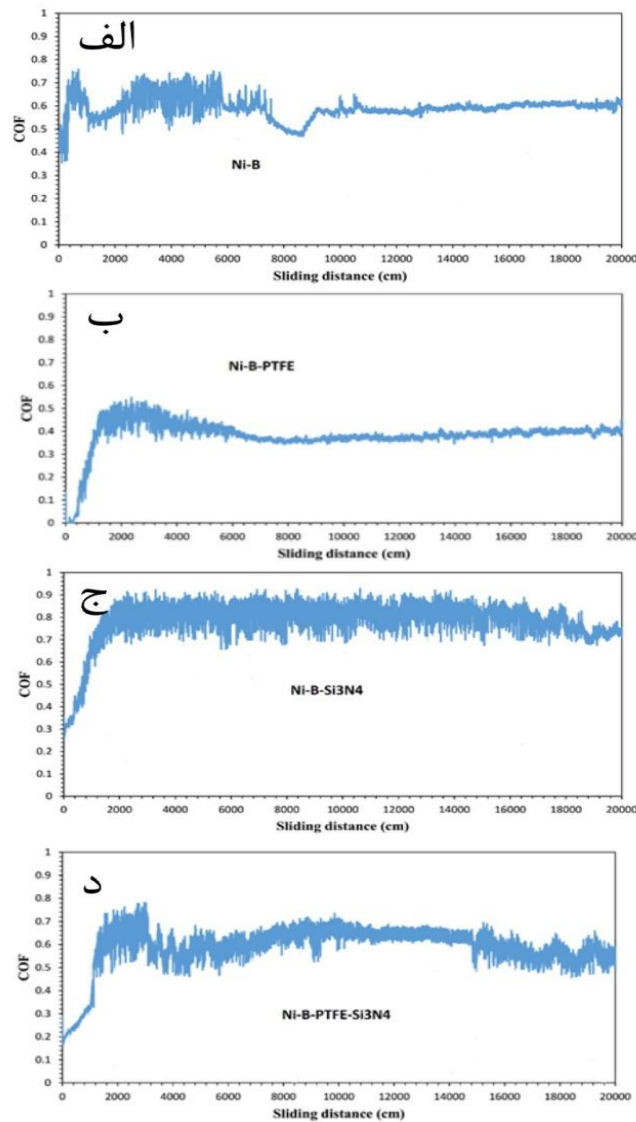
۴- نتیجه‌گیری

همزمان ذرات سخت و نرم در پوشش منجر به افزایش مقاومت به خوردگی می‌گردد، که در این مورد کمترین چگالی جریان خوردگی برابر با $0.76 \mu A/cm^2$ به دست آمده است. همچنین نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات سخت به پوشش منجر به افزایش سختی و ضریب اصطکاک می‌شود. بیشترین سختی در پوشش حاوی $4 g/L$ نانوذرات سخت به دست آمد که برابر با $962 HV$ بود. افزودن ذرات $PTFE$ به حمام پوشش‌دهی منجر به کاهش ضریب اصطکاک و کاهش سختی پوشش شده و سختی پوشش $Ni-B$ از مقدار $841 HV$ تا $571 HV$ کاهش یافته است. همچنین به کار بردن همزمان این ذرات منجر به کاهش ضریب اصطکاک و افزایش سختی می‌شود که این امر استفاده از این پوشش‌ها را برای کاربردهای صنعتی مانند صنایع خودرو سازی و تجهیزات نظامی مناسب می‌نماید.

در این مطالعه پوشش‌های کامپوزیتی $Ni-B$ با نانوذرات سخت Si_3N_4 و ذرات نرم $PTFE$ بر روی سطح فولاد ساده کربنی ایجاد شد و خواص پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج میکروسکوپی نشان داد که با اضافه نمودن ذرات $PTFE$ به حمام پوشش‌دهی این ذرات به صورت موفقیت آمیز در تشکیل پوشش شرکت می‌کنند. بهترین مقاومت به خوردگی در پوشش $Ni-B-PTFE$ در غلظت $3 g/L$ بود که چگالی جریان خوردگی در آن برابر با $2/3 \mu A/cm^2$ بود. افزودن نانوذرات سخت Si_3N_4 به حمام پوشش-دهی نیز منجر به رسوب همزمان این ذرات در پوشش شده و بهترین مقاومت به خوردگی در پوشش $Ni-B-Si_3N_4$ در غلظت $4 g/L$ و با چگالی جریان خوردگی $2/2 \mu A/cm^2$ بوده است. به کار بردن



شکل ۱۷- نتایج آزمون سختی سنجی ویکرز: (الف) تاثیر غلظت ذرات $PTFE$ ، (ب) تاثیر غلظت نانوذرات Si_3N_4 ، (ج) مقایسه حالت‌های بهینه.



شکل ۱۸- منحنی‌های ضریب اصطکاک مربوط به: (الف) پوشش Ni-B، (ب) پوشش Ni-B-PTFE، (ج) پوشش Ni-B-Si₃N₄، (د) پوشش Ni-B-PTFE-Si₃N₄

جدول ۶- نرخ سایش مربوط به نمونه های مختلف.

نرخ سایش (mg/N.m)	عنوان نمونه
$6/4 \times 10^{-3}$	Ni-B
$3/2 \times 10^{-3}$	Ni-B-Si ₃ N ₄
$12/3 \times 10^{-3}$	Ni-B-PTFE
$4/9 \times 10^{-3}$	Ni-B-PTFE-Si ₃ N ₄

References

- P. Sahoo, S.K. Das, "Tribology of electroless nickel coatings - A review", *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 1760-1775, 2011. [https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.013]
- J. Sudagar, J. Lian, W. Sha, "Electroless nickel alloy, composite and nano coatings - A critical review", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 571, pp. 183-204, 2013. [https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107]
- Y.W. Song, D.Y. Shan, E.H. Han, "High corrosion resistance of electroless composite plating coatings on AZ91D magnesium alloys", *Electrochimica Acta*, Vol. 53, pp. 2135-2143, 2008. [https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.09.026]
- T. Rabizadeh, S.R. Allahkaram, "Corrosion resistance enhancement of Ni-P electroless coatings by incorporation of nano-SiO₂ particles", *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 133-138, 2011. [https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.021]
- I.R. Mafi, C. Dehghanian, "Comparison of the coating properties and corrosion rates in electroless Ni-P/PTFE composites prepared by different types of surfactants", *Applied Surface Science*, Vol. 257, pp. 8653-8658, 2011. [https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.05.043]
- S. Afroukhteh, C. Dehghanian, M. Emany, "Preparation of the Ni-P composite coating co-deposited by nano TiC particles and evaluation of its corrosion property", *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 2597-2601, 2012. [https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.101]
- م نیک نژاد، م میرجانی، س برجی، "بررسی تاثیر افزودن نانوالماس و عملیات حرارتی بر سختی و مقاومت سایشی پوشش های نانوکامپوزیتی نیکل فسفر-نانوالماس"، *مجله مواد نوین*، جلد ۷ (۲)، ۷۴-۵۹، ۱۳۹۵.
- Z. Guo, X. Yang, H. Lin, Z. Wang, M. Wang, "STRUCTURE AND PROPERTIES OF RE-Ni-B-Al₂O₃ COATING MATERIAL", *Acta Metallurgica Sinica (English letters)*, Vol.10, pp. 56-60, 2009.
- B. Li, X. Li, Y. Huan, W. Xia, W. Zhang, "Influence of alumina nanoparticles on microstructure and properties of Ni-B composite coating", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 762, pp. 133-142, 2018. [https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.227]
- R.-r. SHEN, J.-y. XIAO, "Fretting wear behavior of Ni-B and Ni-B/BN electroless plating", *Transactions of Materials and Heat Treatment*, Vol. 3, p. 027, 2007.
- H. Ogihara, K. Miyamoto, K. Udagawa, T. Saji, "Electrodeposition of super hard Ni-B/diamond composite coatings", *Chemistry Letters*, Vol. 40, pp. 1072-1073, 2011. [https://doi.org/10.1246/cl.2011.1072]
- E. Georgiza, V. Gouda, P. Vassiliou. "Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 325, pp. 46-51, 2017. [https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.019]
- S. Yazdani, R. Tima, F. Mahboubi. "Investigation of wear behavior of as-plated and plasma-nitrided Ni-B-CNT electroless having different CNTs concentration", *Applied Surface Science*, Vol. 457, pp. 942-955, 2018. [https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.020]
- J.K. Pancrecius, J. P. Deepa, V. Jayan, U. S. Bill, T. P. D. Rajan, B. C. Pai. "Nanoceria induced grain refinement in electroless Ni-B-CeO₂ composite coating for enhanced wear and corrosion resistance of Aluminium alloy", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 356, pp. 29-37, 2018. [https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.046]
- M. Anik, E. Körpe, E. Şen, "Effect of coating bath composition on the properties of electroless nickel-boron films", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 1718-1727, 2008. [https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.07.031]
- A.-F. Kanta, M. Poelman, V. Vitry, F. Delaunois, "Nickel-boron electrochemical properties investigations", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 505, pp. 151-

- 156, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.05.168>]
17. A.-F. Kanta, V. Vitry, F. Delaunoy, "Effect of thermochemical and heat treatments on electroless nickel-boron", *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 2662-2665, 2009. [<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.09.031>]
 18. Q. Barati, S.M.M. Hadavi, "Electroless Ni-B and Composite Coatings: A Critical Review on Formation mechanism, Properties, Applications and Future trends", *Surfaces and Interfaces*, p. 100702, 2020. [<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100702>]
 19. Y. Lixia, L. Ying, L. Guannan, L. Zhenghui, W. Guixiang, "Preparation and properties of electroless plating wear-resistant and antifriction composite coatings Ni-P-SiC-WS₂", *Rare Metal Materials and Engineering*, Vol. 44, pp. 28-31, 2015. [[https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(15\)30006-0](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(15)30006-0)]
 20. A. Sharma, A. K. Singh, "Electroless Ni-P-PTFE-Al₂O₃ Dispersion Nanocomposite Coating for Corrosion and Wear Resistance", *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 23, pp. 142-151, 2014. [<https://doi.org/10.1007/s11665-013-0710-0>]
 21. Y. Wu, H. Liu, B. Shen, L. Liu, W. Hu, "The friction and wear of electroless Ni-P matrix with PTFE and/or SiC particles composite", *Tribology International*, Vol. 39, pp. 553-559, 2006. [<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.04.032>]
 22. S. Sadreddini, A. Afshar, "Corrosion resistance enhancement of Ni-P-nano SiO₂ composite coatings on aluminum", *Applied Surface Science*, Vol. 303, pp. 125-130, 2014. [<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.109>]
 23. I. Baskaran, T.S.N. Sankara Narayanan, A. Stephen, "Corrosion resistance of electroless Ni-low B coatings", *Transactions of the IMF*, Vol. 87, pp. 221-224, 2009. [<https://doi.org/10.1179/174591909X438848>]
 24. O. Khalifa, E.A. El-Wahab, A. Tilp, "The corrosion behavior of electroless Ni-P-SiC and Ni-Sn-P-SiC nano-composite coating", *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 6, pp. 2280-2289, 2010.
 25. A. Farzaneh, M. Mohammadi, M. Ehteshamzadeh, F. Mohammadi, "Electrochemical and structural properties of electroless Ni-P-SiC nanocomposite coatings", *Applied Surface Science*, Vol. 276, pp. 697-704, 2013. [<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.03.156>]
 26. M. Momenzadeh, S. Sanjabi, "The effect of TiO₂ nanoparticle codeposition on microstructure and corrosion resistance of electroless Ni-P coating", *Materials and Corrosion*, Vol. 63, pp. 614-619, 2012. [<https://doi.org/10.1002/mac.201005985>]