



مقاله کامل پژوهشی

اثر روش آماده‌سازی سطح زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بر فرایند پوشش‌دهی پلیمرهای رسانای پلی‌پیرول/پلی‌آنیلین و بهبود مقاومت به خوردگی

نیوشا پناهی^۱، محمدرضا افشارمقدم زنجانی^{۲*}، هادی عادل‌خانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد خوردگی و حفاظت مواد، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران، ایران

^۳ دانشیار، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، تهران، ایران

چکیده در این پژوهش، تأثیر آماده‌سازی سطح زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، بر فرایند پوشش‌دهی پلیمرهای رسانای پلی‌پیرول/پلی‌آنیلین و نیز مقاومت به خوردگی در حضور پوشش، بررسی شد. آماده‌سازی سطح زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به روش‌های الکتروپولیش، سنباده دستی و سندبلاست انجام شد. از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و دستگاه زبری‌سنجی (Roughness Tester) برای بررسی ریخت‌شناسی سطح نمونه‌ها استفاده شد. فرایند پوشش‌دهی پلیمرهای رسانای دولایه‌ای پلی‌پیرول/پلی‌آنیلین به مدت ۹۰۰ ثانیه با تکنیک پتانسیواستات در ولتاژ ۹۰۰ میلی‌ولت انجام شد. مطالعات خوردگی، با استفاده از آزمون‌های امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی، در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید انجام شد. بر اساس نتایج آزمون پول-آف (pull-off)، با آماده‌سازی سطح به روش سنباده دستی، حداکثر چسبندگی پوشش به زیرلایه، با مقدار تنش کششی ۰/۶۷ مگاپاسکال، حاصل شد. زیرلایه آماده‌شده به این روش، با مشخصات مقاومت پلاریزاسیون ۱۸۴۲۸ اهم سانتی‌متر مربع، چگالی جریان خوردگی $10^{-7} \times 1/78$ آمپر بر سانتی‌متر مربع و پتانسیل $-0/08$ ولت نسبت به الکتروود استاندارد کالومل، بهترین رفتار خوردگی را نشان داد.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳

پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

کلیدواژه‌ها:

پوشش پلیمری،

پلیمر رسانا،

پلی‌پیرول،

پلی‌آنیلین،

فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.244156.1117> URL: <https://www.jamt.ir/article/126418.html>

Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 2, (Summer 2021), 33-44

The Effect of 304 Stainless Steel Substrate Surface Preparation Method on Coating Process of Polypyrrole/Polyaniline Conductive Polymers and Corrosion Resistance Improvement

Niyoocha Panahi¹, M.Reza Afshar^{2*}, Hadi Adelhani³

¹ M. Sc. of Corrosion and Protection of Materials, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Tehran, Iran

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، تهران، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد، تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۸۴۰۴۳، دورنگار: ۰۲۱-۴۴۸۶۸۴۰۵

پیام نگار: mafshar@srbiu.ac.ir

Please cite this article as: Panahi, N., Afshar, M. R., Adelhani, H., "The effect of 304 stainless steel substrate surface preparation method on coating process of polypyrrole/polyaniline conductive polymers and corrosion resistance improvement", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 2, (2021), 33-44. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.244156.1117>).

2783-0829/© 2021 The Author(s). Published by MERC.

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



³ Associate Professor, Nuclear Fuel and Materials Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Tehran, Iran

Paper History:

Received: 2020-09-01
Revised in revised form: 2020-10-24
Accepted: 2021-09-07

Keywords:

Polymer Coating,
Conductive Polymer,
Polypyrrole,
Polyaniline,
304 Stainless Steel

Abstract

In this study, the effect of substrate surface preparation on the polypyrrole/polyaniline conductive polymers coating process and corrosion resistance in the presence of coating has been investigated. The preparation of the 304 stainless steel substrate was done by electropolishing, manual grinding, and sandblasting. Atomic force microscopy (AFM), scanning electron microscopy (SEM), and roughness tester have been used to investigate the surface morphology. The coating process for polypyrrole/polyaniline conductive polymers were carried out over a period of 900 seconds with potentiostat technique at a voltage of +900 mV. Based on pull-off test results, the most adherent coating belonged to manual grinded sample with 0.67 MPa tensile stress. According to the results of electrochemical impedance test and polarization of potentiodynamics after one hour immersion in a solution of 3.5 wt % sodium chloride, the substrate prepared by manual grinding had the highest polarization resistance of 18428 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, the least corrosion current density of $1.76 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, and the highest potential of -0.080 V vs. SCE.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.244156.1117>

URL: https://www.jamt.ir/article_126418.html

۱- مقدمه

از دهه هشتاد میلادی تا امروز، پلیمرهای رسانا، به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی نظیر هدایت الکتریکی و سهولت سنتز شیمیایی، همواره یکی از پرطرفدارترین مواد مقاوم به خوردگی شناخته شده‌اند. گونه‌های مختلف این پلیمرها به صورت تجاری عرضه شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به پلی‌آنیلین^۱، پلی‌پیرول^۲، پلی‌تیوفن^۳ و پلی‌کربازول^۴ اشاره کرد. نخستین بار، پوششی از پلی‌آنیلین و مشتقات آن در سطوح فولادی ایجاد شده است و امروزه، امکان قراردادن این پلیمرها به صورت پوشش روی سطح فلزات مختلف وجود دارد. در خصوص به‌کارگیری پلیمرهای رسانا به‌منزله پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی، مطالعات زیادی انجام شده است و اغلب تأکید بر بهبود مقاومت به خوردگی داشته‌اند. برای مثال، ایجاد پوشش پلی‌آنیلین در سطح فولاد زنگ‌نزن ۴۰۰ در محلول سولفوریک اسید، باعث باقی‌ماندن پتانسیل سطح فولاد در منطقه روئین شده و به دلیل پایداری مناسب این پوشش، زیرلایه حفاظت می‌شود و مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد [۶-۱]. پلیمرهای رسانا را می‌توان، به‌منزله پوشش آستری^۵، به‌تنهایی یا همراه یک لایه فوقانی اصلی به‌کار برد. همچنین، پلیمرهای رسانا، به‌منزله جزء بهبوددهنده مقاومت به خوردگی، به پوشش‌های دیگر اضافه می‌شوند [۷ و ۸]. مطالعات نشان داده است که عملکرد مقاومت به خوردگی پوشش‌های پلیمرهای رسانا، در محیط‌های خورنده، مشابه پوشش‌های مرسوم ساخته‌شده از کروم شش ظرفیتی (Cr^{6+}) است، با این تفاوت

که پوشش‌های پلیمری، خطرات زیست‌محیطی ناشی از Cr^{6+} را ندارند [۹].

نتایج قراردادن پوششی از پلی‌آنیلین در محیط نیتریک اسید روی فولاد زنگ نزن ۴۳۰ نشان داد که هم‌زمان با ایجاد پوشش پلیمری، لایه اکسیدی متراکمی در فصل مشترک پلیمر با فلز، در زمان لایه‌نشانی، به‌وجود می‌آید که باعث بهبود مقاومت به خوردگی زیرلایه فولادی می‌شود [۱۰]. پلی‌آنیلین را به‌منزله محافظت‌کننده از خوردگی میلگردهای فولادی موجود در بتن مسلح نیز استفاده می‌کنند [۱۱].

قراردادن پوشش پلی‌پیرول روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L، به‌منظور جلوگیری از خوردگی در دو محلول اسیدی و خنثی کلریدی، بر قابلیت پلی‌پیرول (به‌منزله پلیمر رسانا)، در جلوگیری از خوردگی زیرلایه‌های فلزی به‌ویژه فولادها، تأکید دارد [۱۲]. همچنین، ایجاد پوششی از پلی‌پیرول در سطح فولاد نرم، به روش الکتروشیمیایی، باعث بهبود مقاومت به خوردگی می‌شود. در پوشش پلی‌پیرول، علاوه بر این‌که پوشش به‌صورت مانعی فیزیکی در مقابل عوامل خورنده و آنیون‌های مهاجم عمل می‌کند، پلی‌پیرول، قابلیت انتقال پتانسیل فلز به محدوده‌هایی را دارد که نرخ خوردگی فلز در آن کمتر است [۹ و ۱۳].

مقایسه دو پوشش پلیمری پلی‌آنیلین و پلی‌پیرول نشان می‌دهد که پلی‌پیرول چسبندگی بهتری با زیرلایه فولادی دارد و پلی‌آنیلین مقاومت به خوردگی بالاتری را نشان می‌دهد [۱۴]. بنابراین، به استفاده از پوشش‌های دولایه متشکل از این دو پلیمر (برای استفاده از مزایای هر دو پلیمر) توجه شده است. مقایسه مقاومت به خوردگی پوشش دولایه متشکل از پلی‌آنیلین و پلی‌پیرول و پوشش تک‌لایه هریک این پلیمرها نشان می‌دهد که پوشش دولایه، مقاومت بیشتری در برابر

¹ Polyaniline (PANI)

² Polypyrrole (PPy)

³ Polythiophene (PTh)

⁴ Polycarbazole

⁵ Primer

۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ برای آماده سازی سطح استفاده شد و نمونه ها با عنوان G نام گذاری شدند. سندبلاست نمونه ها، به کمک سندبلاستر^۳ (مدل Pars Medical) در حضور ذرات آلومینا با قطر ۲۵۰ میکرومتر با فشار ۵ بار و مدت زمان ۳ دقیقه، انجام شد و نمونه ها با نام SB نام گذاری شدند. آزمون زبری سنجی سطح با استفاده از مدل T1000 از شرکت Hommel Etamic انجام و نتایج اندازه گیری، بر اساس استاندارد ISO 4287، گزارش شد [۱۷]. برای بررسی ریخت شناسی سطوح نیز از میکروسکوپ نیروی اتمی AFM مدل Park Scientific Instruments- Cp Auto probe، در حالت^۴ کاری تماسی^۵، استفاده شد. شایان ذکر است که ابعاد سطح روبش شده در هر تصویر، برای هر نمونه، ۱ × ۱ میکرون بوده است. همه نمونه ها قبل از پوشش دهی، در حمام فراصوت^۶ حاوی استون و اتانول در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، به مدت ۲۰ دقیقه، چربی زدایی، شست و شو و سپس خشک شدند. در پوشش دهی پلی پیرول، به منزله لایه اول، از محلولی حاوی اگزالیک اسید ۰/۳ مولار و پیرول ۰/۱ مولار و روش الکتروپلیمریزاسیون استفاده شد. در این روش، پیل الکتروشیمیایی، از یک الکترود پلاتینی در نقش کاتد، نمونه فولادی در نقش آند و یک الکترود مرجع کالومل اشباع^۷ (SCE) تشکیل شده است. الکتروپلیمریزاسیون به روش پتانسیواستات و به کمک دستگاه پتانسیواستات مدل EG&G273A، در پتانسیل ۰/۹ ولت نسبت به الکترود کالومل، برای پوشش دهی در مدت زمان ۱۵ دقیقه انجام شد. در پایان، پوششی به رنگ قهوه ای تیره روی نمونه های فولادی ظاهر شد و پوشش های مذکور، به منظور خشک شدن کامل، به مدت ۵ روز در مجاورت هوای آزاد قرار داده شدند. ایجاد پوشش پلی آنیلین، به منزله لایه دوم، کاملاً مشابه روند ذکر شده در لایه اول است. پلی آنیلین نیز در محلول متشکل از اگزالیک اسید ۰/۳ مولار و پیرول ۰/۱ مولار، با استفاده از تکنیک پتانسیواستات در پتانسیل مثبت ۰/۹ ولت و مدت زمان ۱۵ دقیقه، روی لایه اول، ایجاد شد و در نهایت، لایه ای به رنگ

آنیون های مهاجم (مخصوصاً یون کلر) دارد. بررسی عملکرد پوشش دولایه پلی پیرول/پلی آنیلین قرار گرفته در سطح فولاد ۳۰۴ مشخص کرده است که این پوشش، باعث افزایش ۵۰۰ میلی ولت پتانسیل خوردگی و پتانسیل حفره دار شدن می شود. همچنین، این پوشش سبب افزایش پتانسیل خوردگی زیرلایه مسی، تا ۲۵۰ میلی ولت می شود [۱۵].

هنگام پوشش دهی پلیمرهای رسانا، همانند سایر فرایندهای پوشش دهی، عملیات آماده سازی سطح زیرلایه، قبل از پوشش دهی، اهمیت بسیاری در چسبندگی و کارآمدی پوشش دارد. این عملیات برای از بین بردن آلودگی های سطحی و ایجاد سطوحی یکنواخت و مشابه انجام می شود. فرایندهای آماده سازی شامل روش های فیزیکی (سنباده زنی و سندبلاست) و شیمیایی (اچ کردن، پولیش شیمیایی و الکتروپولیش) است [۱] و [۹]. در این پژوهش، پوشش دولایه متشکل از پلیمرهای رسانای پلی پیرول و پلی آنیلین، روی سطح فولاد زنگ نزن ۳۰۴، با هدف بررسی تأثیر آماده سازی سطح زیرلایه قبل از پوشش دهی، بر میزان مقاومت به خوردگی و چسبندگی آن به زیرلایه، نشانده شده است و پس از انجام آزمون های پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی و همچنین آزمون چسبندگی (pull-off)، مقادیر مهمی، نظیر جریان خوردگی و پتانسیل مربوط به آن و تنش کششی لازم برای جدایش پوشش، گزارش شده اند.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴، به ضخامت ۱ میلی متر در ابعاد ۳۰ × ۳۰ میلی متر، به منزله زیرلایه انتخاب شد. آماده سازی سطح زیرلایه با سه روش الکتروپولیش، سنباده دستی و سندبلاست انجام شد. الکتروپولیش در محلولی حاوی سولفوریک اسید ۹۸ درصد و ارتوفسفوریک اسید ۸۵ درصد، با نسبت برابر، در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴ دقیقه و با اعمال چگالی جریان ۰/۹ آمپر بر سانتی متر مربع توسط یکسوکننده مگاتک^۱ (مدل Mp3003)، در حضور کاتد مسی، انجام شد و نمونه ها با عنوان EP نام گذاری شدند [۱۶]. در روش سنباده دستی، به ترتیب، از سنباده های با زبره^۲ ۴۰۰،

³ Sand Blaster

⁴ Mode

⁵ Contact

⁶ Ultrasonic

⁷ Saturated Calomel Electrode

¹ Megatec

² Grit

مقابل، نمونه الکتروپولیش شده، دارای قله‌های بسیار کوتاه‌تر و سطح نرم‌تری است؛ چراکه سطح آن به‌هنگام آماده‌سازی، به‌صورت شیمیایی توسط سولفوریک اسید و ارتوفسفریک اسید خورده شده است. در این میان، نمونه آماده‌شده به روش سنباده دستی، به‌دلیل سایش فراوان و دقیق سطح آن با سنباده‌هایی که مرحله به مرحله با نظمی خاص، نرم‌تر می‌شدند، کوتاه‌ترین قله‌ها را داراست.

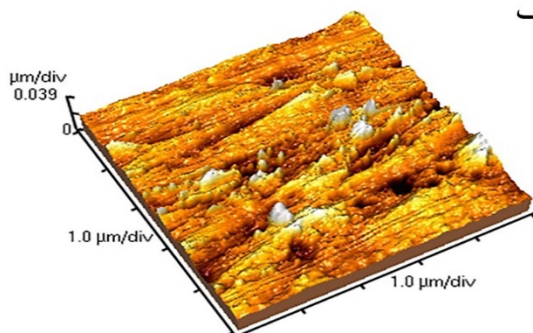
جدول ۱. زبری سطح (R_a) نمونه‌های الکتروپولیش شده (EP)،

سندبلاست شده (SB) و سنباده‌زده شده (G)

کد نمونه	EP	SB	G
R_a (میکرومتر)	۰/۱۷	۰/۹۳	۰/۰۴

شکل ۱، تصاویر AFM سطح نمونه‌های سنباده‌زده شده، الکتروپولیش شده و سندبلاست شده را در مقیاس نانومتری، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آماده‌سازی سطح، به روش سنباده دستی، باعث ایجاد ناهمواری‌های منظم‌تری، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، در طول سطح شده است. همچنین، قله‌هایی بسیار کوتاه و پراکنده در سطح این نمونه قابل ملاحظه هستند. در مقابل، سطح نمونه الکتروپولیش شده دارای حفرات مشهود، عمیق و البته قله‌هایی نرم و نسبتاً یکنواخت است. در تصویر مربوط به سطح نمونه سندبلاست شده، ناهمواری‌های ناهماهنگ ایجاد شده روی نمونه، بر اثر اصابت ذرات آلومینا، مشاهده می‌شود که سبب ایجاد سطحی ناهموار شده است. این عدم پیوستگی ناهمواری‌های موجود روی سطح نمونه یادشده را می‌توان ناشی از برخورد تصادفی و بی‌نظم ذرات آلومینا دانست، به‌طوری که در برخی مناطق، فرورفتگی‌های بسیار عمیق و در مناطقی دیگر، حفرات بسیار کم‌ارتفاع‌تر را می‌توان مشاهده کرد.

الف



سبب بسیار تیره مایل به سیاه، روی لایه اول تشکیل شد. به‌منظور بررسی ریخت‌شناسی و تعیین ضخامت پوشش‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) Cambridge مدل S-360 استفاده شد. بررسی میزان چسبندگی پوشش‌های اعمال شده روی نمونه‌ها، به روش Pull-Off و با دستگاه مدل PosiTest AT-Automatic، مطابق استاندارد ASTM D4541، انجام شد [۱۸]. میزان مقاومت به خوردگی نمونه‌های دارای پوشش‌های دولایه پلیمری که آماده‌سازی سطح آن‌ها به روش‌های الکتروپولیش، سنباده دستی و سندبلاست انجام شده، با آزمون پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی و به‌وسیله دستگاه پتانسیواستات مدل EG&G273A تعیین شد. این آزمون، پس از یک ساعت غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول ۳/۵ درصد سدیم کلرید، انجام شد. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی، در محدوده فرکانس ۱۰ میلی‌هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز و با دامنه موج ولتاژ جریان متناوب (AC) برابر با ۱۰ میلی‌ولت انجام شد. آزمون پلاریزاسیون به کمک الکتروود SCE و الکتروود پلاتینی، در محدوده ولتاژ -۰/۵- ولت تا +۰/۵ ولت با نرخ روبش ۱ میلی‌ولت در ثانیه انجام شد.

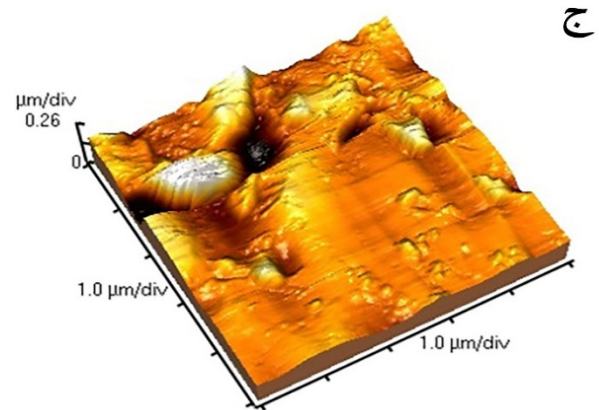
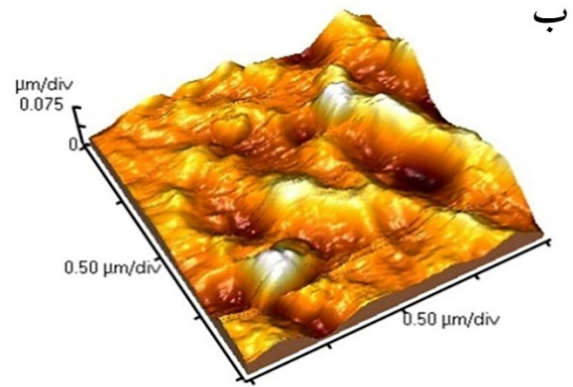
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی زبری سطح

نتایج حاصل از آزمون زبری‌سنجی سطح نمونه‌های آماده‌شده به روش‌های الکتروپولیش (EP)، سنباده دستی (G) و سندبلاست (SB) در جدول ۱ ارائه شده است. زبری سطح (R_a) بیانگر میانگین اختلاف ارتفاع قله‌ها از فرورفتگی‌های سطح است. مقایسه نتایج زبری‌سنجی نمونه‌های سنباده‌زده شده، الکتروپولیش شده و سندبلاست نشان می‌دهد که بیشترین زبری، به سطح سندبلاست شده با $R_a = 0.93$ و کمترین زبری، به نمونه سنباده‌زده شده با مقدار $R_a = 0.04$ تعلق دارد. علت بیشتر بودن زبری نمونه SB را می‌توان برخورد تصادفی و نامنظم ذرات آلومینا با سطح نمونه سندبلاست شده به‌هنگام آماده‌سازی و در نتیجه ایجاد فرورفتگی‌های نسبتاً عمیق در سطح آن دانست. بدیهی است که عمیق‌تر بودن فرورفتگی‌های ایجاد شده در نمونه مذکور، باعث افزایش R_a می‌شود. در

^۱ Scanning Electron Microscope

است. از زمان ۶۰۰ ثانیه تا ۹۰۰ ثانیه، فرایند پوشش دهی با نرخ بسیار آهسته تر انجام می شود، به طوری که شیب هر سه نمودار نزدیک به صفر است؛ چراکه سطح زیرلایه فولادی، توسط پلی پیرول، کاملاً پوشانده شده و در نتیجه، روند الکترون رسانی به مونومرها برای پلیمریزاسیون، بسیار دشوارتر شده است و ضخامت پوشش تغییر محسوسی نکرده است. همان طور که در شکل ۲ ملاحظه می شود، میزان جریان لازم برای تشکیل پلی پیرول، روی هر کدام از زیرلایه ها متفاوت است. دلیل این تفاوت را می توان روش های آماده سازی متفاوت هر کدام از زیرلایه ها دانست. مشاهده می شود که جریان پلیمریزاسیون، برای نمونه الکتروپولیش شده، از جریان مورد نیاز سایر نمونه ها کمتر است. علت این امر را می توان خوردگی سطح نمونه مذکور در محلول الکتروپولیش و متعاقباً، تشکیل لایه اکسیدی محافظ روی آن و افزایش پتانسیل سطح زیرلایه دانست؛ چراکه هنگام تشکیل پوشش پلیمری، سطح زیرلایه اکسید می شود تا الکترون های مورد نیاز برای تشکیل پلیمر تأمین شوند. از این رو، سطحی که خود پیش تر اکسید شده باشد، تأمین الکترون، برای تشکیل پوشش پلیمری و فرایند پلیمریزاسیون را به سختی میسر می سازد. در مقابل، نمونه سندبلاست شده، به دلیل وجود تمرکز تنش ناشی از برخورد ذرات آلومینا به هنگام آماده سازی و در نتیجه دارا بودن مناطق پراثرزی و مستعد خوردگی، جریان پلیمریزاسیون بسیار بیشتری دارد.

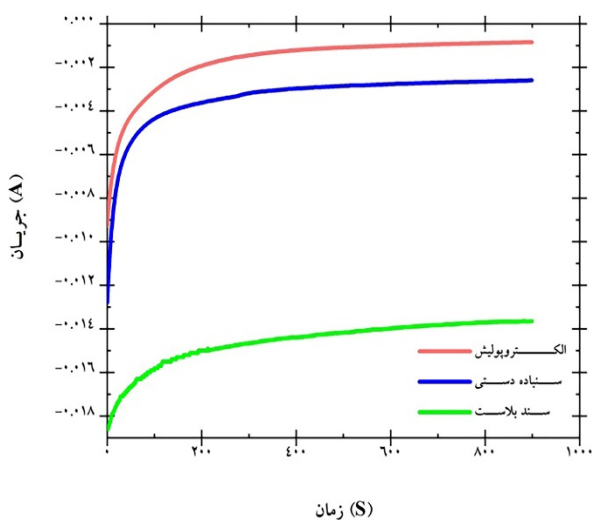


شکل ۱. تصاویر AFM نمونه با آماده سازی سطح به روش الف) سناده دستی، ب) الکتروپولیش و ج) سندبلاست

با بررسی نتایج زبری سنجی ارائه شده در جدول ۱ و تصاویر AFM، مشخص می شود که بیشترین زبری، متعلق به نمونه سندبلاست شده و کمترین زبری، مربوط به نمونه سناده زده شده است.

۳-۲- پوشش پلیمری دولایه پلی پیرول و پلی آنیلین

شکل ۲، منحنی های تغییر جریان را نسبت به زمان فرایند پلیمریزاسیون پیرول یا همان لایه اول پوشش، روی هر سه زیرلایه نشان می دهد. جریان شروع این فرایند برای سه نمونه الکتروپولیش شده، سناده زده شده و سندبلاست شده، به ترتیب، برابر با ۰/۰۰۹۲-، ۰/۰۱۲۷- و ۰/۰۱۸۶- آمپر بوده است. با توجه به شیب نمودارها در شکل مذکور، در هر سه نمونه، نرخ تغییرات جریان، از زمان شروع فرایند تا مدت ۲۰۰ ثانیه، افزایش شدیدی داشته و از آن پس، به دلیل تشکیل لایه نازک اولیه پلی پیرولی روی سطح زیرلایه فولادی و در نتیجه، کندتر شدن جریان انتقالی الکترون ها از زیرلایه به مونومرهای محلول برای پلیمریزاسیون، روند آرام تری را در پیش گرفته



شکل ۲. تغییر جریان با زمان در فرایند پلیمریزاسیون پیرول (لایه اول پوشش) روی سه نمونه

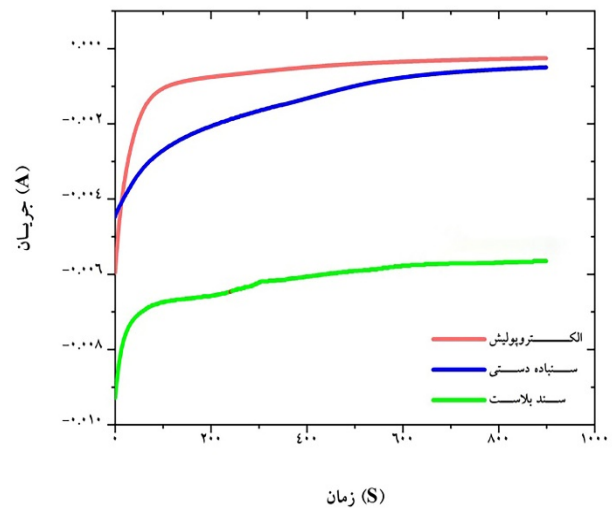
لایه پلی‌پیرول دانست. بدین ترتیب، علت بیشتر بودن مقادیر جریان‌های مورد نیاز برای تشکیل لایه اول در مقایسه با لایه دوم، می‌تواند رسانایی الکتریکی بالاتر سطح فولادی در قیاس با پلی‌پیرول باشد. گرچه از این پلیمرها به‌منزله پلیمر رسانا یاد می‌شود، توانایی هدایت الکتریکی آن‌ها از فلزات به‌مراتب، کمتر است. به همین دلیل، فرایند اکسایش سطح پلی‌پیرول و متعاقباً، شکل‌گیری پلی‌آنیلین روی آن نیز، دارای جریان کمتری است. البته، تأثیر ضخامت لایه اول پوشش در شکل‌گیری لایه دوم را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. در خصوص پوشش‌های پلیمری چندلایه، به‌طور کلی، لایه ضخیم‌تر می‌تواند آنیون‌های تقویت‌کننده بیشتری را آزاد کند و در نتیجه، توانایی بالاتری برای احیای مونومرهای پلیمر لایه فوقانی داشته باشد. بنابراین، باید تأثیر ریخت‌شناسی و میزان تخلخل لایه اول را نیز در تشکیل لایه دوم در نظر گرفت.

۳-۳- بررسی ریخت‌شناسی پوشش پلیمری دولایه پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین

در شکل ۴، تصاویر SEM پوشش دولایه پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین اعمال شده روی نمونه سنباده‌زده شده، الکتروپولیش شده و سندبلاست شده نشان داده شده است. پوشش تشکیل شده روی زیرلایه سنباده‌زده شده (شکل ۴-الف) نسبتاً یکنواخت است و با تراکم جزئی توده‌های پلیمری، در برخی نقاط، همراه است. علت تجمع این توده‌ها در برخی نواحی را می‌توان تفاوت در پتانسیل سطحی لایه زیرین در آن نقاط و متعاقباً، تمایل بیشتر آن‌ها برای انتقال الکترون و کمک به پلیمریزاسیون لایه فوقانی دانست. استفاده از اگزالیک اسید ۰/۳ مولار و مونومر آنیلین ۰/۱ مولار در حمام پوشش‌دهی، موجب تشکیل پوششی منسجم و چسبنده روی سطح زیرلایه فولادی شده است [۱۹].

شکل ۴-ب، ریخت‌شناسی پوشش پلیمری تشکیل شده روی نمونه آماده‌سازی شده به روش الکتروپولیش را نشان می‌دهد. عدم توانایی زیرلایه الکتروپولیش شده در تأمین الکترون‌های مورد نیاز برای احیای مونومرها و در نتیجه، تشکیل پوششی همگن، مشهود است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پوشش اعمال شده روی این زیرلایه، به‌صورت تکه‌تکه و غیرمنسجم شکل گرفته است؛ چراکه لایه اکسیدی ایجاد شده

شکل ۳، منحنی‌های تغییر جریان نسبت به زمان فرایند پلیمریزاسیون پلی‌آنیلین، به‌منزله لایه دوم پوشش را نمایش می‌دهد. با توجه به تفاوت جریان شروع پلیمریزاسیون برای لایه دوم پوشش در مقایسه با لایه اول، ملاحظه می‌شود که تشکیل پلی‌آنیلین روی لایه قبلی با میزان توانایی هدایت الکتریکی و میسر ساختن جریان انتقال الکترون‌ها به مونومرهای آنیلین توسط پلی‌پیرول نسبت مستقیم دارد؛ چراکه سطح زیر لایه فولادی به‌طور کامل با پلیمر پلی‌پیرول پوشیده شده است و این بار، وظیفه تأمین الکترون‌های مورد نیاز برای تشکیل پلی‌آنیلین، به عهده پلی‌پیرول است.

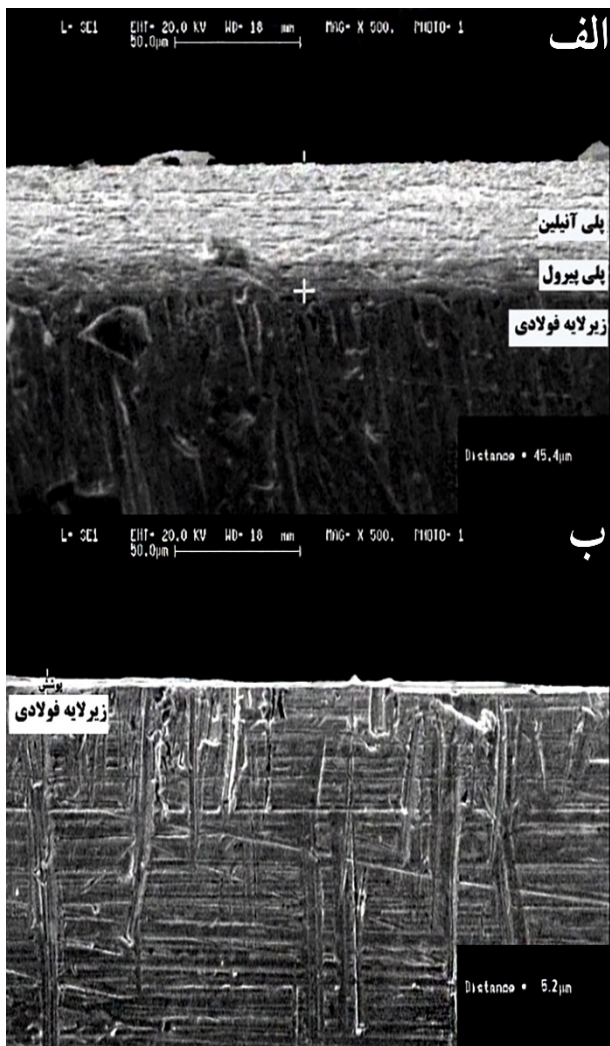


شکل ۳. تغییر جریان با زمان در فرایند پلیمریزاسیون آنیلین (لایه دوم پوشش) روی سه نمونه

بنابراین، با توجه به مطالب گفته‌شده در قسمت قبل، در این مرحله، پلی‌پیرول تا حدی اکسید می‌شود و در نتیجه الکترون‌ها و آنیون‌های موجود در شبکه خود را تا حد نیاز، برای پلیمریزاسیون مونومرهای آنیلین موجود در حمام پوشش‌دهی، آزاد می‌کند. بدین ترتیب، همانند پلی‌پیرول تشکیل شده در مرحله آغازین، لایه پلی‌آنیلین منسجم و دوپ شده با آنیون‌های اگزالات، روی لایه اول پوشش می‌نشیند.

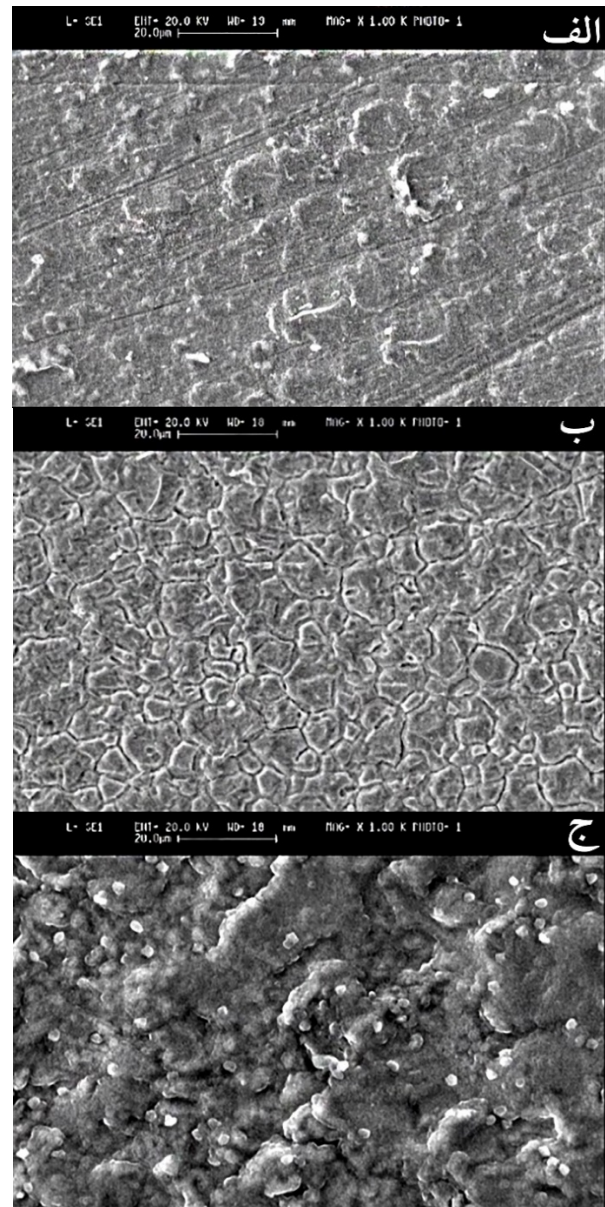
میزان جریان لازم برای شروع پلیمریزاسیون آنیلین برای سه نمونه الکتروپولیش شده، سنباده‌زده شده و سندبلاست شده، به ترتیب، ۰/۰۰۵۹، -۰/۰۰۴۴ و -۰/۰۰۹۲ آمپر بوده است. تفاوت این مقادیر با جریان‌های لازم برای شروع فرایند پلیمریزاسیون پلی‌پیرول را می‌توان ناشی از تفاوت در میزان رسانایی و توانایی تأمین الکترون زیرلایه فولادی در مقایسه با

در شکل ۵، تصاویر مقطع پوشش دولایه پلیمری اعمال شده روی سطح نمونه های فولادی سنباده زده شده، الکتروپولیش شده و سنبلاست شده ارائه شده است. مقادیر ضخامت لایه های مختلف که از تصاویر SEM استخراج شده است، در جدول ۲، ارائه شده است. به دلیل قرارگرفتن نمونه الکتروپولیش شده در محلول اسیدهای قوی در هنگام آماده سازی و در نتیجه، خوردگی مرزخانه ها، پوشش بسیار نازک و ضعیفی روی آن تشکیل شده است. لذا، تشخیص دقیق و اندازه گیری ضخامت لایه اول پوشش میسر نبوده و فقط امکان اندازه گیری ضخامت کل پوشش وجود داشت. پوشش اعمال شده روی سطح آماده سازی شده به روش سنباده دستی، با ضخامت ۴/۵ میکرون، ضخیم ترین پوشش شناخته شده و در مقابل، زیرلایه الکتروپولیش شده، با داشتن پوششی به ضخامت ۵/۲ میکرون، نازک ترین پوشش در میان سایر نمونه ها شناسایی شد.



روی سطح فولادی، به هنگام الکتروپولیش در محلول اسیدی قوی، اجازه انتقال الکترون از سطح فولاد به درون حمام پوشش دهی را نمی دهد و در نتیجه، پلیمریزاسیون کامل انجام نمی شود.

شکل ۴-ج، تصویر میکروسکوپی پوشش پلیمری روی زیرلایه سنبلاست شده را نشان می دهد. سطح این زیرلایه، به علت تمرکز تنش موجود در آن، بسیار مستعد خوردگی و در نتیجه تأمین الکترون های مورد نیاز برای پلیمریزاسیون است؛ از این رو، پوششی بسیار منسجم تر روی آن شکل گرفته است و توده های پلیمری نسبتاً مشابه شده اند.

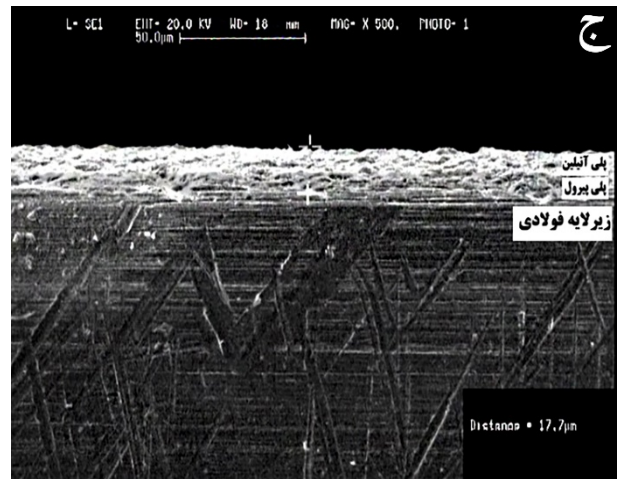
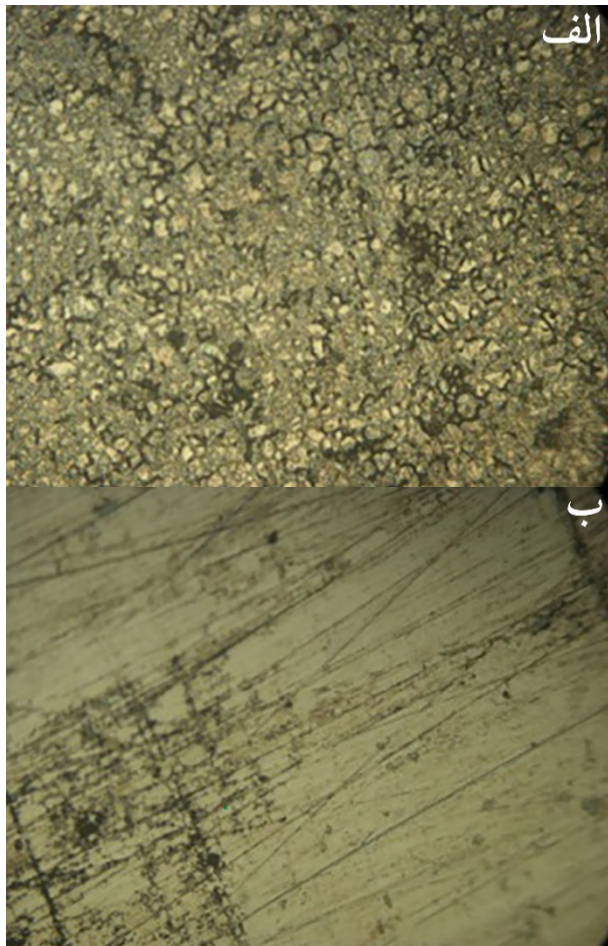


شکل ۴. تصاویر SEM سطح پوشش اعمال شده روی نمونه های آماده سازی شده به روش الف) سنباده دستی، ب) الکتروپولیش و ج) سنبلاست

می‌کند. اگرچه وجود همین عوامل می‌تواند باعث تسریع فرایند پوشش‌دهی از منظر سینتیکی باشد، تشکیل توده‌های پلیمری روی چنین سطح ناهمواری از نظر ریخت‌شناسی، شکل‌گیری پوشش را با عدم یکنواختی مواجه می‌سازد.

۳-۴- چسبندگی پوشش

برای بررسی میزان چسبندگی پوشش روی زیرلایه فولادی، از آزمون pull-off استفاده شد. در شکل ۶، تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوحی که پوشش آن‌ها کنده شده، نمایش داده شده است. مقادیر به‌دست آمده از آزمون فوق برای هر نمونه، در جدول ۳، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که چسبندگی پوشش، به نمونه سنباده‌زده شده تعلق دارد. آماده‌سازی سطح به روش سنباده دستی، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، به سطحی با ناهمواری‌های منظم به‌همراه قله‌هایی بسیار کوتاه، تیز و پراکنده منجر شده است. در این شرایط، اتصال مکانیکی بین پوشش و زیرلایه بیشتر خواهد شد.



شکل ۵. تصاویر SEM مقطع پوشش اعمال شده روی نمونه آماده‌سازی شده به روش الف) (سنباده دستی، ب) (الکتروپولیش و ج) سندبلاست

بر اساس نتایج به‌دست آمده، انتظار می‌رفت زیرلایه سندبلاست شده که دارای کمترین میزان جریان پلیمریزاسیون و سطحی مستعد برای تشکیل پوشش بود، بیشترین ضخامت را داشته باشد. اما چنین نتیجه‌ای مشاهده نشد و علت آن را هم می‌توان به صیقلی‌تر بودن سطح سنباده‌زده شده، در مقایسه با سطح نمونه سندبلاست شده، نسبت داد.

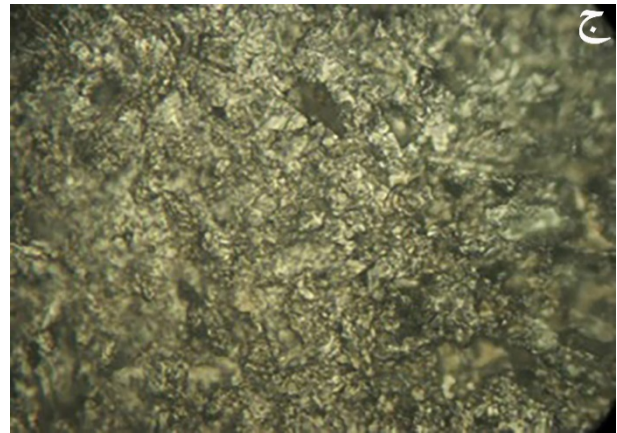
جدول ۲. ضخامت پوشش ایجاد شده روی نمونه‌ها

ضخامت کل پوشش (میکرومتر)	ضخامت لایه اول (پلی‌پیرول) (میکرومتر)	نمونه
۴۵/۴	۱۲/۷	آماده‌سازی شده به روش سنباده دستی
۵/۲	-	آماده‌سازی شده به روش الکتروپولیش
۱۷/۷	۷/۵۴	آماده‌سازی شده به روش سندبلاست

فراهم بودن بستر مناسب‌تر برای رشد و انباشت یکنواخت پلیمر روی سطح آماده شده به روش سنباده دستی، دلیل ضخامت بیشتر پوشش نشانده شده روی نمونه، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، به‌ویژه زیرلایه سندبلاست شده است. برخورد ذرات سندبلاست به سطح زیرلایه به‌هنگام آماده‌سازی، سطحی بسیار ناهموار همراه با فرورفتگی‌های فراوان ایجاد

خوردگی، واکنش داده و لایه مقاوم آهن-اکزالات ایجاد می شود. این لایه، مانند مانعی قوی در برابر نفوذ یون های مهاجم و عوامل خوردنده عمل می کند. به بیان دیگر، پوشش پلی پیرول/پلی آنیلین، در حضور اکزالات، رفتار یک پوشش خودترمیم شونده را نشان می دهد [۴].

در جدول ۴، پارامترهای به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون نمونه های مورد بررسی گزارش شده است. بدیهی است که در نمودارهای پلاریزاسیون، هرچه پتانسیل خوردگی مثبت تر و دانسیته جریان خوردگی کمتر باشد، خواص حفاظتی پوشش نیز مطلوب تر خواهد بود. بر اساس داده های جدول ۴، مقادیر جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی برای نمونه سنباده زده شده، به ترتیب، $10^{-7} \times 1/78$ آمپر بر سانتی متر مربع و $0/080$ - ولت نسبت به الکتروود استاندارد کالومل است که در مقایسه با سایر نمونه ها، بهترین رفتار خوردگی را نشان می دهد. یکی دیگر از دلایل رفتار خوردگی این نمونه را می توان تأثیر میزان چسبندگی پوشش ها به سطح زیرلایه دانست. بر اساس نتایج حاصل از آزمون چسبندگی، نمونه سنباده زده شده، بیشترین میزان چسبندگی را در مقایسه با دو نمونه دیگر داشت. از سوی دیگر، مطالعات نشان می دهد پلیمرهای هادی و لایه اکسید محافظتی سطح فلز، موجب انتقال پتانسیل فلز به مقادیر مثبت می شود. در جدول ۴ نیز مشاهده می شود نمونه دارای پوشش پلی پیرول/پلی آنیلین که آماده سازی سطح زیرلایه آن به روش سنباده زنی دستی انجام شده، بزرگ ترین پتانسیل خوردگی را دارد.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰ برابر، از سطوح تحت آزمون چسبندگی (الف) نمونه الکتروپولیش شده، (ب) نمونه سنباده زده شده و (ج) نمونه سنبلاست شده

جدول ۳. نتایج آزمون چسبندگی پوشش ها

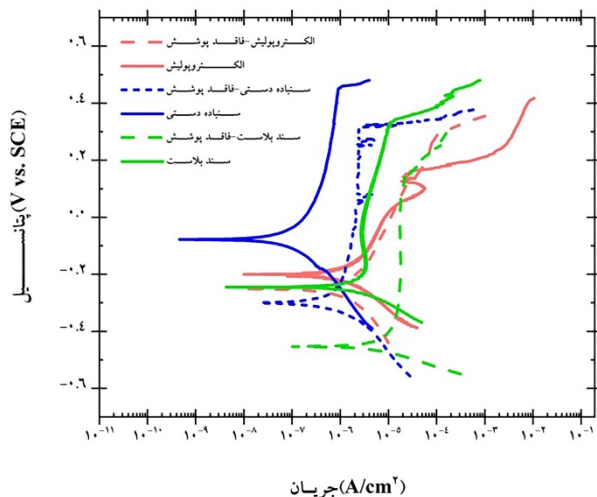
نمونه	تنش کششی لازم برای جدایش پوشش (مگاپاسکال)
آماده سازی شده به روش سنباده دستی	۰/۶۷
آماده سازی شده به روش الکتروپولیش	۰/۳۱
آماده سازی شده به روش سنبلاست	۰/۴۵

۳-۵- آزمون های خوردگی

۳-۵-۱- آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی همه نمونه ها، بعد از یک ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵ درصد سدیم کلرید، در دو حالت فاقد پوشش و دارای پوشش، در شکل ۷، نشان داده شده اند. چنین استنتاج می شود که پوشش پلیمری دولایه پلی پیرول/پلی آنیلین، در هر سه حالت آماده سازی سطحی، باعث بهبود مقاومت به خوردگی زیرلایه فولادی شده است. اما در این میان، بهترین نتایج، مربوط به نمونه های آماده سازی شده به روش سنباده دستی است.

همان طور که پیش تر نیز اشاره شد، آنیون های اکزالات، در شبکه پلیمری پوشش دولایه پلی پیرول/پلی آنیلین حضور دارند. این موضوع، باعث بهبود مقاومت به خوردگی پوشش می شود؛ چراکه آنیون های اکزالات، به هنگام ایجاد هرگونه ترک و شیار در سطح پوشش، با کاتیون های آهن آزاد شده ناشی از

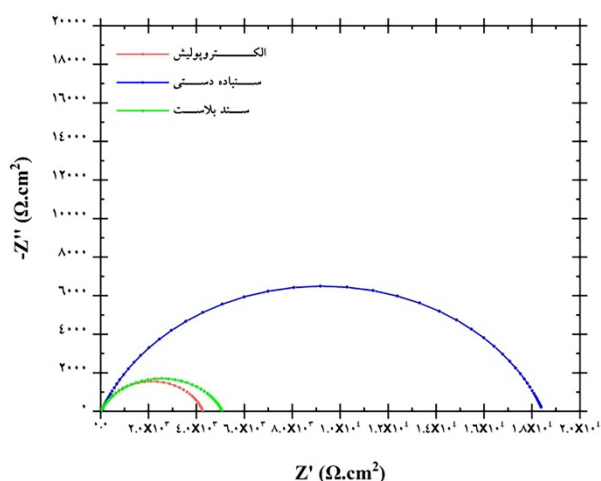


شکل ۷. منحنی های پلاریزاسیون تمامی نمونه ها در دو حالت فاقد پوشش و دارای پوشش پلیمری دولایه پلی پیرول/پلی آنیلین

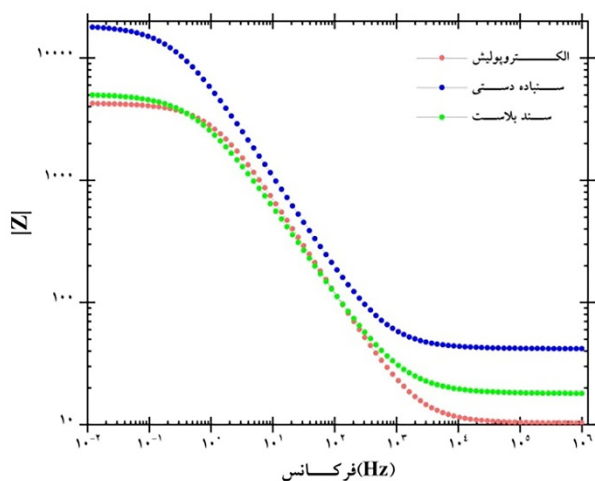
جدول ۴. پارامترهای به دست آمده از منحنی های پلاریزاسیون نمونه ها

پتانسیل خوردگی (ولتاژ نسبت به الکتروود استاندارد کالومل)	چگالی جریان خوردگی (آمپر بر سانتی متر مربع)	نمونه
-۰/۱۹۸	$1/23 \times 10^{-6}$	سندبلاست-دارای پوشش
-۰/۴۵۱	$4/22 \times 10^{-5}$	سندبلاست-فاقد پوشش
-۰/۲۴۳	$1/56 \times 10^{-6}$	الکتروپولیش-دارای پوشش
-۰/۲۵۲	$1/50 \times 10^{-6}$	الکتروپولیش-فاقد پوشش
-۰/۰۸۰	$1/78 \times 10^{-7}$	سنباده دستی-دارای پوشش
-۰/۳۰۰	$1/36 \times 10^{-6}$	سنباده دستی-فاقد پوشش

آن ها، مطابقت بیشتری داشته باشد. در شکل ۱۱، سعی شده است مفهوم فیزیکی و جایگاه واقعی هر کدام از اجزای مدار معادل یاد شده در سلول الکتروشیمیایی تحت آزمون نیز ترسیم شود.



شکل ۸. نمودارهای نایکوئیست پوشش پلیمری اعمال شده روی نمونه ها



شکل ۹. نمودارهای بُد پوشش پلیمری اعمال شده روی نمونه ها

۳-۵-۲- آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)

به منظور بررسی رفتار خوردگی پوشش پلیمری مورد نظر، آزمون امپدانس الکتروشیمیایی، در دامنه فرکانس ۱۰ میلی هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز با دامنه موج ولتاژ AC برابر با ۱۰ میلی ولت، در محلول ۳/۵ درصد سدیم کلرید انجام شد. شکل های ۸ تا ۱۰، به ترتیب، نمودارهای نایکوئیست^۱، بُد^۲ و فاز^۳ نمونه های آماده سازی شده به روش سنباده دستی، سندبلاست و الکتروپولیش را نشان می دهند. مؤلفه های حقیقی و موهومی امپدانس در نمودار نایکوئیست، لگاریتم بزرگی امپدانس در نمودار بُد و اختلاف فاز بین پاسخ جریان متناوب و محرک ولتاژ متناوب در نمودار فاز، مشاهده و محاسبه شدند. به کمک نرم افزار ZView، مدار معادل برای رفتار امپدانس هر کدام از نمونه ها تهیه و در شکل ۱۱، ارائه شده است. نکته قابل توجه این است که به دلیل شباهت ساختار پوشش های اعمالی روی هر سه نمونه، مدار معادل آن ها، مشابه با یکدیگر به دست آمده است. در جدول ۵، اجزای مدار معادل، شامل مقاومت جبران نشده محلول (R_s)، مقاومت پوشش (R_p)، عنصر فاز ثابت^۴ (CPE) یا خازن غیرایده آل و توان خازن غیرایده آل (n)، برای هر سه نمونه، ارائه شده است. N ، نشان دهنده یکنواختی سطح است. برای معادل سازی رفتار الکتریکی پوشش ها، عنصر فاز ثابت، به جای خازن غیرایده آل، در نظر گرفته شده است تا با در نظر گرفتن عامل ناهمگنی سطح، نتایج به دست آمده از معادل سازی طیف های امپدانس با مدار معادل

¹ Nyquist

² Bode

³ Phase

⁴ Constant Phase Element

که شعاع کمتر، نشان دهنده مقاومت انتقال بار کمتر در سطح زیرلایه مورد مطالعه و در نتیجه، سرعت خوردگی بیشتر است. بر این اساس، مشاهده می شود که نمونه الکتروپولیش شده، دارای کوچک ترین شعاع و در نتیجه، کمترین مقاومت انتقال بار و نمونه سنباده زده شده، دارای بزرگ ترین شعاع و در نتیجه، بالاترین مقاومت انتقال بار است. به بیان دیگر، نمونه سنباده زده شده، در مقایسه با سایر نمونه ها، سرعت خوردگی کمتری دارد. این نتیجه، منطبق با داده های حاصل از منحنی پلاریزاسیون (شکل ۷ و جدول ۴) است. بیشترین مقاومت الکتریکی، به پوشش نمونه سنباده زده شده (۱۸۴۲۸ اهم سانتی متر مربع) و کمترین مقاومت، به پوشش نمونه الکتروپولیش شده (۴۲۶۵ اهم سانتی متر مربع) تعلق دارد.

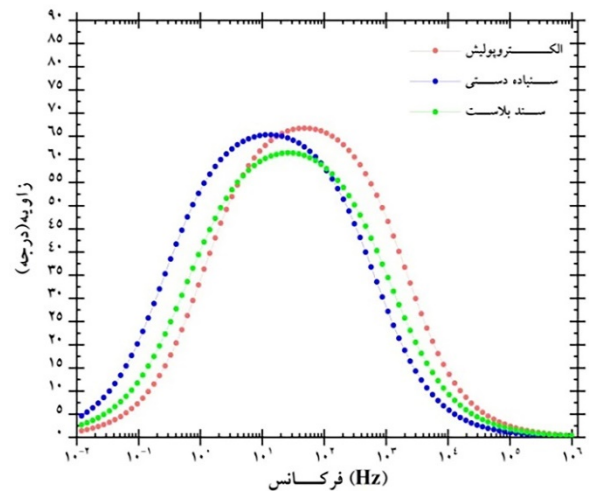
جدول ۵. نتایج معادلسازی منحنی های طیف سنجی امپدانس

الکتروشیمیایی

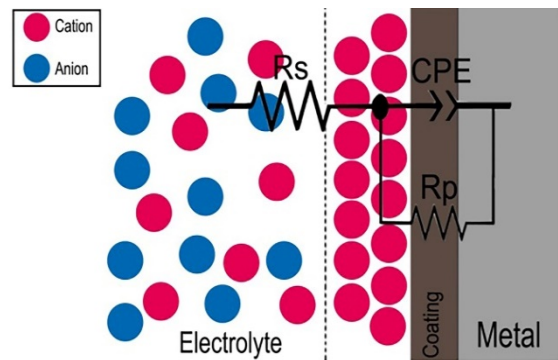
n	CPE-T ($\mu\Omega^{-1}cm^{-2}s^n$)	R _p ($\Omega.Cm^2$)	R _s ($\Omega.Cm^2$)	نمونه
۰/۷۸	۳۶/۴	۱۸۴۲۸	۴۱/۸	سنباده دستی (G)
۰/۷۵	۷۱/۳	۵۰۷۰	۱۷/۹۸	سندبلاست (SB)
۰/۸۰	۴۹/۳	۴۲۶۵	۱۰/۲۸	الکتروپولیش (EP)

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از آزمون زبری سنجی نشان داد که کمترین زبری سطح، مربوط به نمونه سنباده زده شده است. آماده سازی سطح زیرلایه، بر جریان پلیمریزاسیون الکتروشیمیایی مونومر پیرو (لایه اول)، تأثیر مستقیم دارد. بیشترین جریان پلیمریزاسیون، مربوط به نمونه الکتروپولیش شده و کمترین جریان پلیمریزاسیون، متعلق به نمونه سندبلاست شده است. در پلیمریزاسیون الکتروشیمیایی پلی آنیلین (لایه دوم) نیز، مشاهده شد که بیشترین جریان، برای نمونه الکتروپولیش شده و کمترین جریان، برای نمونه سندبلاست شده است. نتایج آزمون pull-off نشان داد که حداکثر چسبندگی پوشش، متعلق به نمونه سنباده زده شده است. از بررسی سطوح نمونه ها پس از جدا شدن پوشش ها، چنین استنباط شد که اتصال پوشش ها به



شکل ۱۰. نمودارهای فاز پوشش پلیمری اعمال شده روی نمونه ها



شکل ۱۱. مفهوم فیزیکی اجزای مدار معادل در سلول الکتروشیمیایی تحت آزمون

در واقع CPE، ظرفیت خازنی پوشش خارجی (ظرفیت

حفرات و تخلخل ها) در فصل مشترک پوشش متخلخل/الکترولیت است و مقدار آن، بیانگر رفتار لایه دی الکتریک در فصل مشترک پوشش/الکترولیت است. از این رو، هرچه مقدار CPE بیشتر باشد، پوشش دارای ضخامت کمتر، تخلخل و غیریکنواختی بیشتر و در نتیجه، چسبندگی کمتری در سطح خود خواهد بود. بر اساس جدول ۵، نمونه الکتروپولیش شده، بیشترین CPE را در مقایسه با سایر نمونه ها داراست و این امر می تواند وجود تخلخل ها و حفرات بیشتر در پوشش اعمالی روی این نمونه و همچنین ضخامت و چسبندگی کمتر این پوشش را نشان دهد. در مقابل، کمترین CPE، مربوط به نمونه سنباده دستی است که این امر خود بیانگر وجود حفرات کمتر و انسجام و یکنواختی پوشش این نمونه و ضخامت و چسبندگی بیشتر آن است. در منحنی های نایکوئیست، شعاع نیمه دایره، معیاری از مقاومت انتقال بار است. به این صورت

- Materials*, Vol. 6, No. 3, (1994), 226-228. <https://doi.org/10.1002/adma.19940060309>
8. Armelin, E., Pla, R., Liesa, F. O., Ramis, X. R., Iribarren, J. I., Aleman, C., "Corrosion protection with polyaniline and polypyrrole as anticorrosive additives for epoxy paint", *Corrosion Science*, Vol. 50, No. 3, (2008), 721-728. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.10.006>
 9. Deshpande, P. P., Jadhav, N. G., Gelling, V. J., Sazou, D., "Conducting polymers for corrosion protection: A review", *Journal of Coating Technology and Research*, Vol. 11, No. 4, (2014), 473-494. <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9586-7>
 10. Lu, H., Zhou, Y., Vongehr, S., Hu, K., Meng, X., "Electropolymerization of PANI coating in nitric acid for corrosion protection of 430 SS", *Synthetic Metals*, Vol. 161, No. 13-14, (2011), 1368-1376. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2011.05.003>
 11. Saravanan, K., Sathiyarayanan, S., Muralidharan, S., Syed Azim, S., Venkatachari, G., "Performance evaluation of polyaniline pigmented epoxy coating for corrosion protection of steel in concrete environment", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 59, No. 2, (2007), 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.03.002>
 12. González, M. B., Saidman, S. B., "Electrodeposition of bilayered polypyrrole on 316 L stainless steel for corrosion prevention", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 78, (2015), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.10.012>
 13. Ren, Y. L., Zeng, C. L., "Effect of conducting composite polypyrrole/polyaniline coatings on the corrosion resistance of type 304 stainless steel for bipolar plates of proton-exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 182, No. 2, (2008), 524-530. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.04.056>
 14. Hasanov, R., Bilgic, S., "Monolayer and bilayer conducting polymer coatings for corrosion protection of steel in 1 M H₂SO₄ solution", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 64, No. 4, (2009), 435-445. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.004>
 15. Pan, T. J., Zuo, X. W., Wang, T., Hu, J., Chen, Z. D., Ren, Y. J., "Electrodeposited conductive polypyrrole/polyaniline composite film for the corrosion protection of copper bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 302, (2016), 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.027>
 16. "Standard specification for passivation of stainless steels using electropolishing", *ASTM B912*, (2008). <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/B912-02R08E1.htm>
 17. "Geometrical product specifications (GPS)–Surface texture: Profile method–Terms, definitions and surface texture parameters", Amendment 2: Parameters Xsm and Xc, *MEN-EN-ISO 4287*, (1997). <https://standards.globalspec.com/std/10295410/nen-en-iso-4287>
 18. "Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers", *ASTM D4541*, (2002). <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D4541-02.htm>
 19. Nautiyal, A., Parida, S., "Comparison of polyaniline electrodeposition on carbon steel from oxalic acid and salicylate medium", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 94, (2016), 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.01.014>

زیرلایه‌ها، کاملاً فیزیکی بوده است. بیشترین پتانسیل خوردگی و کمترین جریان خوردگی، متعلق به پوشش نمونه سنباده‌زده شده و کمترین پتانسیل خوردگی و بیشترین جریان خوردگی، به پوشش نمونه الکتروپولیش شده تعلق دارد. نتایج حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که بیشترین مقاومت الکتریکی، متعلق به پوشش نمونه سنباده‌زده شده و کمترین مقاومت الکتریکی، به پوشش نمونه الکتروپولیش شده است.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از همکاری آزمایشگاه مهندسی سطح و خوردگی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

1. Tallman, D. E., Spinks, G., Dominis, A., Wallace, G. G., "Electroactive conducting polymers for corrosion control", *Journal of Solid State Electrochemistry*, Vol. 6, No. 2, (2002), 73-84. <https://doi.org/10.1007/s100080100211>
2. Dudukcu, M., Udum, Y. A., Ergun, Y., Koleli, F., "Electrode position of poly(4-methyl carbazole-3-carboxylic acid) on steel surfaces and corrosion protection of steel", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 111, No. 3, (2009), 1496-1500. <https://doi.org/10.1002/app.29151>
3. Camalet, J. L., Lacroix, J. C., Aeiyaich, S., Ching, K. C., Lacaze, P. C., "Electrodeposition of protective polyaniline films on mild steel", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 416, No. 1-2, (1996), 179-182. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(96\)01012-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(96)01012-1)
4. Camalet, J. L., Lacroix, J. C., Aeiyaich, S., Lacaze, P. C., "Characterization of polyaniline films electrodeposited on mild steel in aqueous p-toluenesulfonic acid solution", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 445, No. 1-2, (1998), 117-124. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(97\)00526-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(97)00526-3)
5. Bernard, M. C., Joiret, S., Hugot-Le Goff, A., Viet Phong, P., "Protection of iron against corrosion using a polyaniline layer: I. Polyaniline electrodeposit", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 148, No. 1, (2001), B12-B16. <https://doi.org/10.1149/1.1344527>
6. DeBerry, D. W., "Modification of the electrochemical and corrosion behavior of stainless steels with an electroactive coating", *Journal of The Electrochemistry Society*, Vol. 132, No. 5, (1985), 1022-1026. <https://doi.org/10.1149/1.2114008>
7. Wessling, B., "Passivation of metals by coating with polyaniline: Corrosion potential shift and morphological changes", *Advanced*