



ارزیابی رفتار الکتروشیمیایی و مقاومت به خوردگی شیاری پوشش نیکل بر روی زیرلایه فولاد A216 در محلول کلریدی

فائزه ذوالقدر^۱، شاهین خامنه اصل^۲

^۱ دانشگاه تبریز، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد و متالورژی (فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مواد)
^۲ دانشگاه تبریز، دانشکده مکانیک (دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی)

چکیده

مقاومت به خوردگی شیاری پوشش نیکل بر روی زیرلایه فولاد A216 در محیط حاوی یون کلر بررسی شد. آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و کرونوآمپرومتري جهت ارزیابی رفتار الکتروشیمیایی و آزمون پلاریزاسیون سیکلی جهت بررسی حساسیت به خوردگی شیاری نمونه‌های شیاردار در محلول ۳/۵٪ NaCl استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد پوشش نیکل با کاهش جریان خوردگی منجر به کاهش خوردگی فولاد A216 شده است. نتایج آزمون ارزیابی خوردگی شیاری نشان داد که پوشش نیکل در برابر خوردگی شیاری حساس است و علت آن جذب یون کلر بر روی سطح و تشکیل ترکیبات انحلال‌پذیر در ناحیه شیار است اما خوردگی در پوشش نیکل به علت طولانی‌تر بودن زمان نهفتگی نسبت به فولاد دیرتر آغاز می‌شود. بررسی مورفولوژی سطوح نشان می‌دهد که خوردگی شیاری در پوشش نیکل از طریق تشکیل حفرات موضعی در دهانه شیار رخ می‌دهد اما در فولاد به دلیل پایداری اندک فیلم‌های اکسیدی و انحلال کلی آن‌ها خوردگی به صورت وسیع در ناحیه درون شیار رخ داده و حفرات منفرد موضعی دیده نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: خوردگی شیاری؛ پوشش نیکل؛ پلاریزاسیون تافل؛ پلاریزاسیون سیکلی؛ کرونوآمپرمتري.

¹. zolghadrft@gmail.com

مقدمه

نیکل و آلیاژهای آن مقاومت عالی در برابر خوردگی در محیط‌های آبی نشان می‌دهند که علت آن تشکیل فیلم‌های غیرفعال پایدار بر روی سطح فلز است [۱]. ماهیت و مکانیسم شکل‌گیری فیلم‌های غیرفعال به عواملی مانند ترکیب شیمیایی و pH الکتروولیت و همچنین ساختار سطح فلز بستگی دارد [۲-۳]. فیلم‌های غیرفعال تشکیل‌شده بر روی سطح نیکل معمولاً دارای ساختار دولایه هستند و از لایه داخلی NiO کریستالی و لایه بیرونی Ni(OH)_2 آمورف تشکیل شده‌اند [۴-۵]. خوردگی شیاری یکی از انواع خوردگی موضعی است که در شیارها و نواحی مرده سطحی رخ داده و منجر به خسارات قابل توجهی می‌شود. در این نوع خوردگی بروز فعل و انفعالاتی در ناحیه درون و بیرون شیار منجر به افزایش موضعی غلظت یون کلر و کاهش pH در شیار شده و شرایط لازم برای شکست فیلم‌های غیرفعال سطحی فراهم می‌شود [۶].

عوامل محیطی مانند دما، pH و غلظت یون کلر بر رفتار خوردگی موضعی نیکل اثر می‌گذارند. دما بر ویژگی‌های الکتروشیمیایی فیلم‌های غیرفعال سطحی اثر گذاشته و منجر به تسریع شروع خوردگی و افزایش پیشروی آن می‌شود [۷] همچنین به دلیل افزایش فعالیت آنیون‌های مهاجم با افزایش دما، نرخ انحلال افزایش می‌یابد [۸]. افزایش pH منجر به افزایش نرخ تشکیل فیلم اکسید سطحی در اثر افزایش غلظت آنیون‌های OH^- می‌شود [۸]. خوردگی موضعی فلزات معمولاً در حضور آنیون‌های مهاجم و به ویژه یون کلر رخ می‌دهد. میزان خوردگی آنیون‌ها به قابلیت آن‌ها برای جذب و نفوذ از طریق نقایص موجود در سطح بستگی دارد و هر چه شعاع آنیون کوچک‌تر باشد (مانند Cl^-) نفوذ آن راحت‌تر رخ می‌دهد [۹]. با جذب این آنیون‌ها بر روی سطوح فیلم‌های غیرفعال، نفوذ آن‌ها در داخل فیلم و تضعیف خواص و پایداری آن منجر به کاهش سرعت تشکیل فیلم‌های غیرفعال و افزایش قابلیت انحلال سطحی می‌شود [۸]. حساسیت هر فلزی در برابر خوردگی شیاری در یک محیط توسط پتانسیل شکست اندازه‌گیری می‌شود و هر چه مقدار این پتانسیل منفی‌تر باشد، احتمال وقوع خوردگی شیاری بیشتر است. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که با افزایش دما، پتانسیل و همچنین غلظت یون‌های مهاجم، پتانسیل شکست کاهش می‌یابد همچنین با افزایش pH به دلیل افزایش پایداری فیلم سطحی، پتانسیل شکست افزایش می‌یابد [۶-۸]. در اکثر تحقیقاتی که تاکنون انجام شده خوردگی شیاری الکترودهای نیکلی بررسی شده است اما مطالعات جامعی در زمینه خوردگی شیاری پوشش نیکل صورت نگرفته است بنابراین در مقاله حاضر سعی بر آن است تا با به کارگیری روش‌های الکتروشیمیایی اعم از پلاریزاسیون سیکنی و کروماتوآمپرتری و همچنین آنالیز سطح SEM، حساسیت به خوردگی شیاری پوشش نیکل تهیه‌شده به روش آبکاری الکتریکی و تأثیر این پوشش بر مقاومت به خوردگی شیاری فولاد A216 مورد مطالعه قرار گیرد.

مواد و روش تحقیق

از صفحات فولادی A216 به ابعاد $2/5 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ به عنوان زیر لایه جهت انجام فرایند پوشش دهی استفاده شد. رسوب دهی الکتریکی نیکل از محلول شامل 240 g/Lit NiSO_4 ، 45 g/Lit NiCl_2 و $30 \text{ g/Lit H}_3\text{BO}_3$ با استفاده از دانسیته جریان 3 A/dm^2 در دمای $55-60^\circ\text{C}$ و به مدت ۲۰ دقیقه انجام شد. حجم حمام مورد استفاده ۲۵۰ میلی لیتر بوده و از یک همزن مغناطیسی برای چرخش محلول استفاده شد. پس از اتمام فرایند پوشش دهی نمونه ها از محلول پوشش دهی خارج و با آب مقطر شسته شدند. آزمون های الکتروشیمیایی توسط دستگاه SAMA500 همراه با سه الکترود مرجع (کالومل اشباع)، الکترود کمکی (پلاتین) و الکترود کاری انجام شد. جهت ارزیابی رفتار الکتروشیمیایی پوشش ها در محلول $3/5 \text{ NaCl}$ از آزمون های پلاریزاسیون Tafel (در محدوده -250 تا $+500$ میلی ولت در اطراف پتانسیل مدار باز) و کرونوآمپرمتری (با اعمال پتانسیل $+0/3$ ولت به مدت یک ساعت) بر روی سطحی با ابعاد $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ استفاده شد. همچنین جهت بررسی مقاومت در برابر خوردگی شیاری آزمون های پلاریزاسیون سیکلی مطابق استاندارد ASTM G61 [۱۰] بر روی نمونه هایی با ابعاد $3 \text{ cm} \times 2/5 \text{ cm}$ انجام شد. در وسط این نمونه ها سوراخی تعبیه شد تا امکان اتصال واشر پلاستیکی بر روی سطح و ایجاد شیاری مصنوعی فراهم باشد. آماده سازی نمونه های شیاردار بر اساس استاندارد ASTM G48 انجام شد [۱۱]. شکل ۱ آماده سازی نمونه های شیاردار را نشان می دهد. در آزمون پلاریزاسیون سیکلی روبش پتانسیل در مسیر رفت از -150 میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز آغاز و سرعت روبش پتانسیل در مسیر رفت و برگشت 1 mv/sec انتخاب شده و سطح نمونه ها پس از آزمون پلاریزاسیون سیکلی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد.

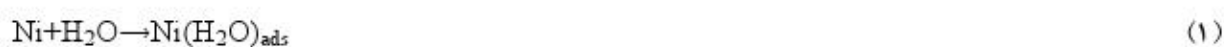
نتایج و بحث

شکل ۲ تغییرات پتانسیل مدار باز فولاد A216 و پوشش نیکل را بر حسب زمان در محلول $3/5 \text{ NaCl}$ نشان می دهد. با توجه به شکل ۲ مشاهده می شود که با افزایش زمان غوطه وری، پتانسیل مدار باز نمونه ها به علت بروز انحلال به سمت مقادیر منفی کاهش می یابد. همچنین منحنی های تغییرات پتانسیل نمونه ها با گذشت زمان را می توان به سه ناحیه تقسیم کرد: کاهش پتانسیل به دلیل وقوع انحلال در سطح نمونه، کاهش سرعت افت پتانسیل به دلیل رقابت بین فرایند انحلال و محافظت از سطح در اثر تشکیل لایه اکسیدی، برقراری تعادل بین واکنش های انحلالی و محافظت از سطح و ایجاد حالت پایا. ثابت شدن پتانسیل مدار باز نشانه تشکیل فیلم اکسیدی پایدار بر روی سطح است.

شکل ۳ نتایج آزمون کرونوآمپرمتری پوشش نیکل و نمونه فولادی بدون پوشش را در محلول $3/5 \text{ NaCl}$ نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می شود که با اعمال پتانسیل $+0/3 \text{ V}$ به پوشش نیکل، در لحظات ابتدایی غوطه وری جریان به سرعت افزایش یافته و به مقدار $15000 \mu\text{A}$ می رسد. این رفتار می تواند ناشی از انحلال سریع

نیکل و ناپایداری فیلم سطحی در اثر جوانه‌زنی حفرات باشد. در ادامه جریان به مقدار اندکی کاهش یافته و پس از ده دقیقه غوطه‌وری حالت پایا برقرار می‌شود. حالت پایا به معنای برقراری تعادل بین تشکیل فیلم محافظ سطحی و حفره‌دار شدن است. در نمونه فولادی در اثر تشکیل لایه‌ای از محصولات خوردگی بر روی سطح جریان کاهش یافته و سپس ثابت باقی می‌ماند و نشانه‌ای از افزایش ناگهانی جریان و تشکیل حفرات موضعی دیده نمی‌شود.

شکل ۴ نمودار پلاریزاسیون نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در اثر قرارگیری نمونه فولادی با پوشش نیکل در محلول NaCl، مولکول‌های آب جذب سطح نیکل شده و واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی زیر در مرحله پلاریزاسیون آندی رخ داده و منجر به انحلال نیکل و تشکیل محصولات خوردگی می‌شوند [۱۲-۱۳]:



هم‌چنین اکسید نیکل نیز می‌تواند مطابق واکنش ۴ تشکیل شود:



در محلول‌های کلریدی یون‌های Cl^- موجود در الکترولیت می‌توانند با یون‌های OH^- جهت جذب بر روی سطح رقابت می‌کنند [۱۴]. در مورد پوشش نیکل حضور این یون‌ها می‌تواند منجر به تشکیل کلرید نیکل شود. افزایش جریان در پتانسیل حدود $7/0.3 -$ احتمالاً ناشی از وجود یون‌های کلر و شکسته شدن فیلم‌های اکسیدی یا هیدروکسیدی سطح و بروز خوردگی موضعی است. نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون تافل در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حضور پوشش نیکل، مقاومت پلاریزاسیون تا ده برابر افزایش یافته و جریان خوردگی از $28/0.2$ به $2/952$ کاهش یافته است بنابراین پوشش نیکل منجر به بهبود مقاومت در برابر خوردگی فولاد A216 شده است.

شکل ۵ منحنی پلاریزاسیون سیکلی نمونه‌های شیاردار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که در نمونه فولادی در محدوده پتانسیل اعمالی انتقال از حالت فعال به غیرفعال دیده نمی‌شود. تشکیل حلقه هیستریزس مثبت نشان‌دهنده حساسیت نمونه فولادی به خوردگی شیاری است. حلقه هیستریزس در اثر وجود اختلاف دانسیته جریان در مسیر رفت و برگشت در یک پتانسیل یکسان ایجاد می‌شود و علت آن بروز اختلال در ساختار پایدار سطح با افزایش پتانسیل است [۱۵]. در واقع تشکیل چنین حلقه‌ای نشان‌دهنده آن است که پس از معکوس شدن اسکن، خوردگی موضعی همچنان ادامه می‌یابد و رکود مجدد حفرات به تأخیر می‌افتد. در پوشش نیکل نیز رویش پتانسیل در جهت عکس منجر به ایجاد حلقه هیستریزس مثبت شده است. علت بروز خوردگی شیاری در پوشش نیکل را می‌توان این‌گونه بیان کرد: در محلول‌های کلریدی یون‌های کلر با یون‌های

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

OH^- جهت جذب بر روی سطح رقابت می‌کنند. در صورت وجود شیار بر روی سطح، به دلیل تشکیل پیل‌های اختلاف هوادمی در نواحی شیار غلظت یون‌های کلر نسبت به یون‌های OH^- افزایش یافته و یون‌های کلر بیشتری بر روی زمینه پوشش نیکل جذب می‌شوند. جذب آنیون‌های هالیدی X^- مانند کلر بر روی سطح نیکل منجر به بروز واکنش‌های زیر می‌شود [۸]:



بنابراین جذب یون‌های کلر منجر به تشکیل کمپلکس‌های سطحی $\text{Ni}-\text{Cl}$ یا $\text{Ni}(\text{OH})-\text{Cl}$ می‌شود. این ترکیبات پیوند ضعیفی با زمینه اکسیدی داشته و انرژی اکتیواسیون انتقال آن‌ها به الکترولیت کم است در نتیجه نرخ انحلال موضعی افزایش می‌یابد و لایه $\text{Ni}(\text{OH})_2$ به‌طور موضعی نازک شده و در نواحی با مقاومت کمتر دچار شکست می‌شود [۱۴].

در پژوهش حاضر، پتانسیل شروع خوردگی شیاری به‌صورت پتانسیلی تعریف شده که در آن دانسیته جریان در اسکن رفت به مقدار $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ می‌رسد [۶]. جدول ۲ نتایج آزمون پلاریزاسیون سیکنی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. اختلاف پتانسیل خوردگی شیاری (E_{crev}) و پتانسیل خوردگی در مسیر رفت (E_{corr}) معیاری از شروع خوردگی شیاری است. هرچه این اختلاف کمتر باشد خوردگی شیاری سریع‌تر می‌تواند رخ دهد [۱۶]. از سویی دیگر پهنای حلقه معیاری از شدت پیشروی خوردگی شیاری است و هر چه حلقه پهن‌تر باشد به معنای تشکیل حفرات عمیق‌تر در طی پیشروی خوردگی است [۱۷]. مقایسه مقدار $E_{\text{corr}} - E_{\text{crev}}$ نشان می‌دهد که خوردگی شیاری در پوشش نیکل نسبت به فولاد A216 دیرتر آغاز شده است زیرا در پوشش نیکل به دلیل مقاومت بالاتر در برابر خوردگی، مدت زمان لازم برای وقوع تغییرات محیطی و بحرانی شدن شرایط درون شیار طولانی‌تر است. شکل‌های ۶ و ۷ مورفولوژی سطوح را نشان می‌دهد. آنالیز سطح بیانگر آن است که در پوشش نیکل خوردگی در قسمت‌های بیرون شیار رخ نداده اما تشکیل حفرات موضعی در لبه شیار ساز مشهود بوده و نشانه آغاز خوردگی شیاری است. در فولاد A216 خوردگی در ناحیه درون شیار به‌صورت وسیعی رخ داده و حفرات در سرتاسر ناحیه درون شیار توزیع شده‌اند و حفرات موضعی منفرد دیده نمی‌شود. علت این رفتار را می‌توان به پایداری اندک فیلم‌های اکسیدی و انحلال کلی آن‌ها در درون شیار نسبت داد. درشت‌تر بودن حفرات تشکیل شده در پوشش نیکل نشانه پیشروی شدیدتر خوردگی شیاری در این نمونه است.

نتیجه گیری

- (۱) پوشش نیکل با کاهش جریان خوردگی و افزایش مقاومت پلاریزاسیون به میزان ده برابر فولاد A216، منجر به کاهش سرعت خوردگی شد.
- (۲) اعمال پتانسیل آندی $+0.3$ ولت به پوشش نیکل منجر به انحلال سریع نیکل و جوانه زنی حفرات می شود اما در فولاد A216 نشانه‌ای از افزایش ناگهانی جریان و تشکیل حفرات موضعی دیده نشد.
- (۳) پوشش نیکل در برابر خوردگی شیاری در محیط حاوی یون کلر حساس است و علت آن جذب یون‌های کلر بر روی سطح و افزایش نرخ انحلال موضعی در اثر تشکیل ترکیبات انحلال‌پذیر مانند $Ni-Cl$ و $Ni(OH)-Cl$ است.
- (۴) در پوشش نیکل به دلیل مقاومت بالاتر در برابر خوردگی و طولانی‌تر بودن زمان نهفتگی، خوردگی شیاری نسبت به فولاد دیرتر آغاز می‌شود اما با توجه به پهنای حلقه هیستریزس تشکیل شده، شدت پیشروی خوردگی شیاری در پوشش نیکل بیشتر است و حفرات درشت‌تری تشکیل می‌شود.
- (۵) خوردگی شیاری در پوشش نیکل از طریق تشکیل حفرات در دهانه شیاری رخ می‌دهد اما در فولاد A216 به دلیل پایداری اندک فیلم‌های اکسیدی و انحلال کلی آن‌ها خوردگی به صورت وسیع در درون شیاری رخ داده و حفرات موضعی منفرد دیده نمی‌شود.

مراجع

1. S. Singh, S. Basu, A.K. Poswal, R.B. Tokas, and S.K. Ghosh , "Electrochemically Controlled Pitting Corrosion in Ni Film: A Study of AFM and Neutron Reflectometry" , *Corrosion Science*, 51, 2009, 575-580.
2. A.I. Munoz, J.G. Anton, J.L. Guinon and V.P. Herranz , "Effects of Solution Temperature on Localized Corrosion of High Nickel Content Stainless Steels and Nickel in Chromated LiBr Solution" , *Corrosion Science*, 48, 2006, 3349-3374.
3. E. Sikora and D.D. Macdonald , "Nature of the Passive Film on Nickel" , *Electrochimica Acta*, 48, 2002, 69-77.
4. J.L. Trompette, L. Massot and H. Vergnes , "Influence of the Oxyanion Nature of the Electrolyte on the Corrosion/Passivation Behavior of Nickel" , *Corrosion Science*, 74, 2013, 187-193.
5. B. Macdougall , "Effect of Chloride Ion the on the Localized Breakdown of Nickel Oxide Films" , *Journal of Electrochemical Society*, 126, 1979, 919-925.
6. D. Han, Y.M. Jiang, C. Shi, B. Deng and J. Li , "Effect of Temperature, Chloride Ion and pH on the Crevice Corrosion Behavior of SAF 2205 Duplex Stainless Steel in Chloride Solutions" , *Material Science*, 47, 2012, 1018-1025.

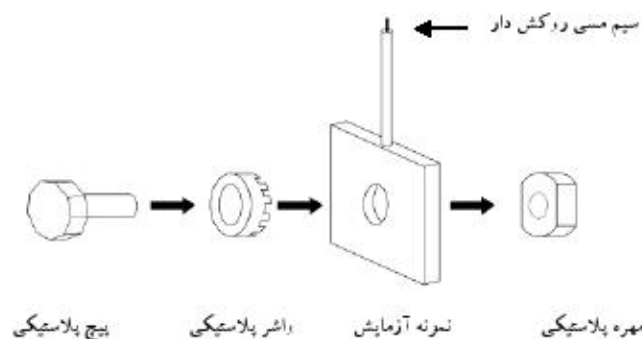
7. S.E. Lott and R.C. Alkire , "The Role of Inclusions on Initiation of Crevice of Stainless Steel: I. Experimental Studies" , *Journal of Electrochemical Society*, 136, 1989, 973-979.
8. E.E. Abd El Aal , "Breakdown of Passive Film on Nickel in Borate Solutions Containing Halide Anions" , *Corrosion Science*, 45, 2003, 759-775.
9. S. Ahn, H. Kwon and D.D. Macdonald , "Role of Chloride Ion on Passivity Breakdown on Iron and Nickel" , *Journal of Electrochemical Society*, 152, 2005, 482-490.
10. Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys, *ASTM G61-86(2003)*.
11. Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution, *ASTM G48-11(2009)*.
12. L. Qin, J.S. Lian and Q. Jiang , "Effect of Grain Size on Corrosion Behavior of Electrodeposited Bulk Nanocrystalline Ni" , *Transactions of nonferrous metals society of china*, 20, 2010, 82-89.
13. J.L. Ord, J.C. Clayton and D.J. Smedt , "An Ellipsometric Study of the Anodic Oxidation of Nickel in Neutral Electrolyte" , *Journal of Electrochemical Society*, 124, 1977, 1714-1719.
14. P.V. Marcu and M. Strehblow , "Localized Corrosion: A Model of Passivity Breakdown Including the Role of Oxide Layer Nanostructure" , *Corrosion Science*, 50, 2008, 2698-2704.
15. A.H. Kandil, A.A. Fahmy Waheed and M.H. Tawfik , "Water Chemistry Effect on Corrosion of Nuclear Fuel Cladding Material, Zircaloy-4 (Zr-4)" , *International Journal of Advanced Research*, 2, 2014, 149-162.
16. Y. Li, P. Kumar, X. Shi, T.A. Nguyen, Zh. Xiao and J. Wu , "Electroless Synthesis of Ni-P and Ni-P-Zn Alloy Coatings for Protecting Steel Rebar from Chloride-Induced Corrosion" , *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 2012, 8151-8169.
17. M.A. Amin, N. El-Bagoury and H. Shokry , "Corrosion and Electrochemical Behavior of Ni₅₁Fe_{22-x}Ga₂₇Ti_x Magnetic Shape Memory Alloys in 0.1 M NaCl Solution at Different Temperatures" , *International Journal of Electrochemical Science*, 8 , 2013, 2791-2805.

جدول ۱: نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون تافل نمونه فولادی و پوشش نیکل.

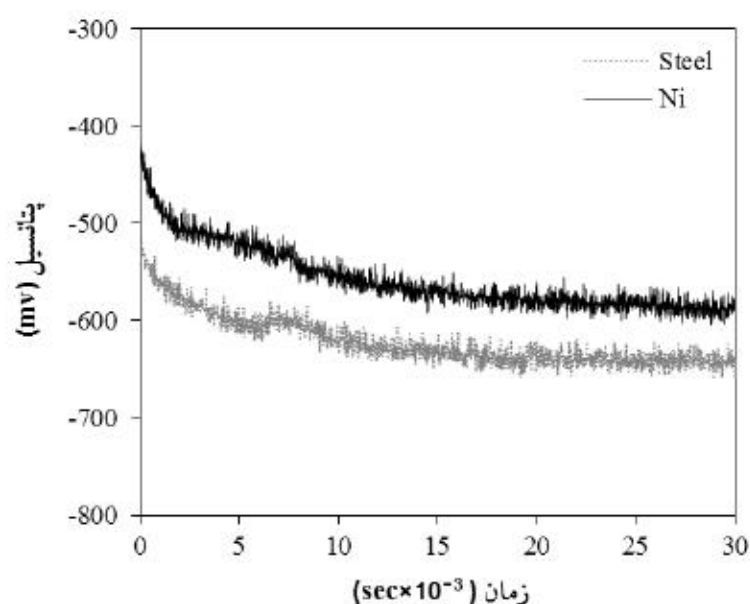
نمونه	E_{cor} (V vs.SCE)	I_{cor} ($\mu A/cm^2$)
فولاد A216	۰/۵۱۶	۲۸/۰۲
پوشش نیکل	۰/۳۸۲	۲/۹۵۲

جدول ۲: نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون سیکلی نمونه فولادی و پوشش نیکل.

نمونه	E_{cor} (V vs.SCE)	E_{rev} (V vs.SCE)	$E_{cor} - E_{rev}$ (V vs.SCE)
فولاد A216	۰/۷۲۸	۰/۶۶۳	۰/۰۶۵
پوشش نیکل	۰/۵۶۱	۰/۲۴۱	۰/۳۲

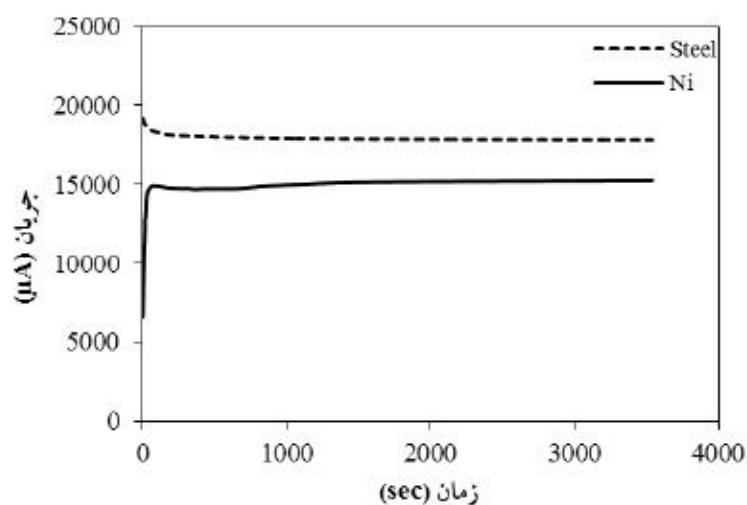


شکل ۱: نمایی از نمونه‌های شیاردار مورد استفاده در آزمون‌های خوردگی شیاری

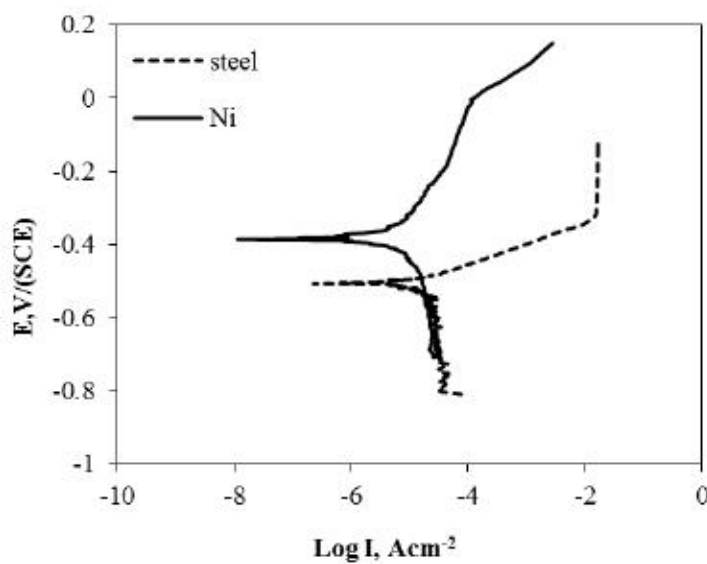


شکل ۲: منحنی تغییرات پتانسیل مدار باز نمونه فولادی و پوشش نیکل بر حسب زمان در محلول ۳/۵٪ NaCl

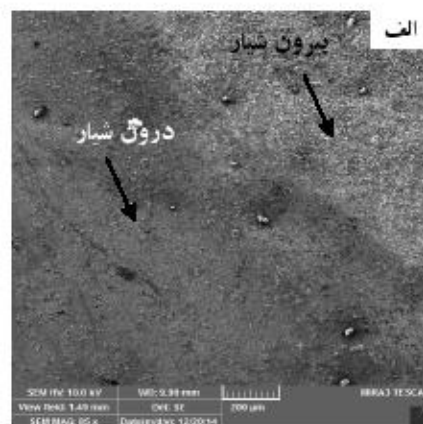
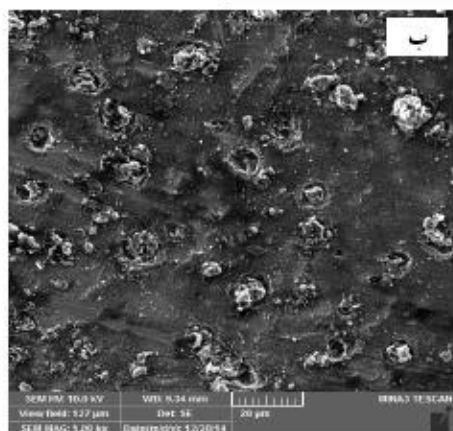
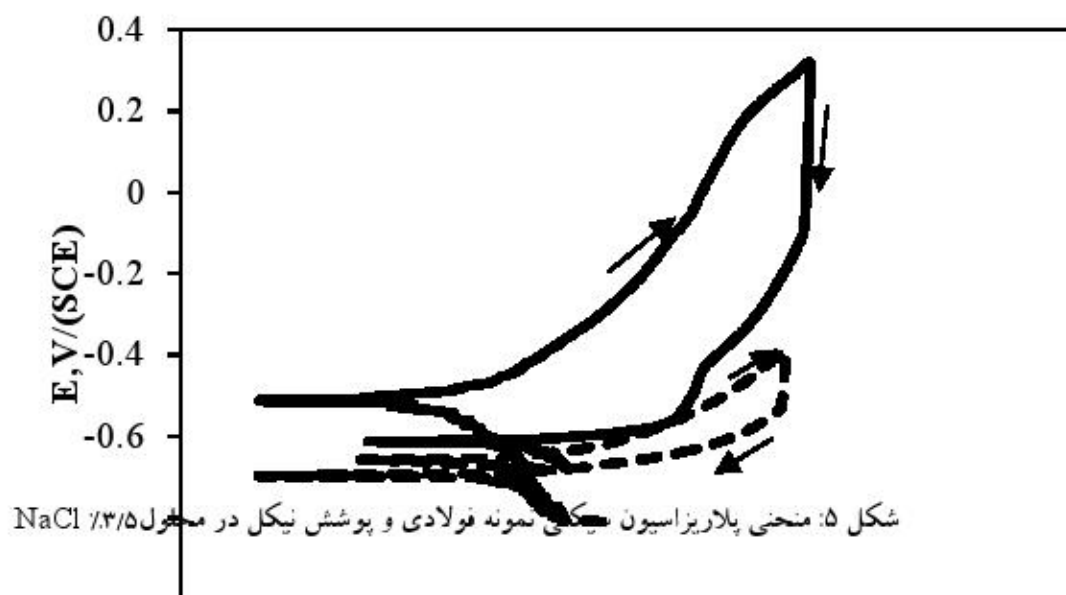
شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۳: منحنی کروآمپمتری نمونه فولادی و پوشش نیکل در محلول ۳/۵٪ NaCl

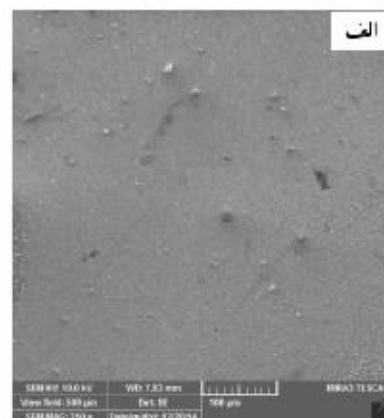
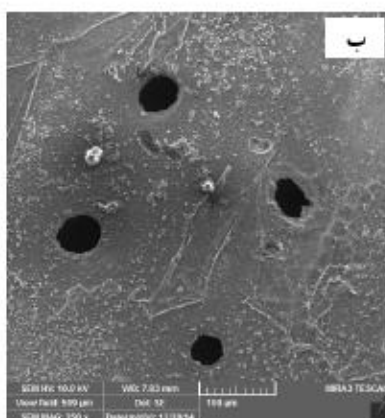
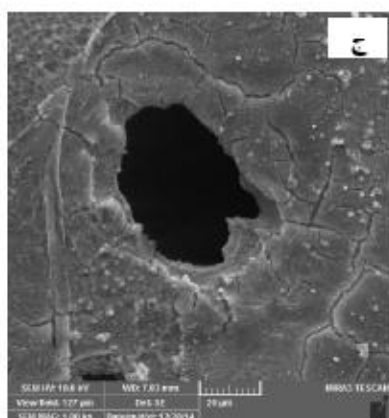


شکل ۴: منحنی پلاریزاسیون Tafel نمونه فولادی و پوشش نیکل در محلول ۳/۵٪ NaCl



شکل ۶: تصویر SEM از سطح فولاد A216 پس از آزمون پلاریزاسیون سیکی در محلول ۳/۵ NaCl (الف) ناحیه لبه

شیار ساز (ب) ناحیه درون شیار



شکل ۷: تصویر SEM از سطح نمونه فولادی با پوشش نیکل پس از یک ماه غوطه‌وری در محلول ۳/۵ NaCl

(الف) ناحیه بیرون شیار (ب) و (ج) تشکیل حفرات در دهانه شیار