

بررسی قابلیت ال-هیدروکسی-پرولین به عنوان یک آمینو اسید قابل تجزیه در محیط زیست در ممانعت از خوردگی فولاد کم کربن

طاهر ربیع زاده^{۱*}، علی جنابزاده^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول: t.rabizadeh@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳

چکیده

در این تحقیق، اثر ال-هیدروکسی-پرولین به عنوان یک آمینو اسید زیست تخریب پذیر بر مقاومت به خوردگی فولاد کم کربن در اسید کلریدریک ۰/۱ مولار مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، روش های مختلف الکتروشیمیایی و آنالیز سطح به کار گرفته شدند. نتایج حاصل از آزمایش های کاهش وزن نشان می دهد که در دمای ۲۹۸ کلین افزایش مقدار ال-هیدروکسی-پرولین ال-هیدروکسی-پرولین در الکترولیت خورنده از ۵۰ ppm به ۵۰۰ ppm، نرخ خوردگی کوپن های فلزی را از ۳۷/۷ mpy به ۵/۴ کاهش می دهد، در حالیکه میزان خوردگی فولاد کم کربن در غیاب بازدارنده ۹۶/۸ mpy بود. همچنین مشاهده شد که افزایش دمای محلول خورنده از ۲۹۸ کلین به ۳۴۳ کلین اثرات نامطلوبی بر کارایی ال-هیدروکسی-پرولین ال-هیدروکسی-پرولین در کاهش پدیده خوردگی دارد. محاسبات ترمودینامیکی نشان داد که ال-هیدروکسی-پرولین ال-هیدروکسی-پرولین سد انرژی مورد نیاز برای آغاز فرایند خوردگی را افزایش می دهد. همچنین گزارش شد که جذب این آمینو اسید کاملاً با ایزوترم جذب لانگمویر مطابقت دارد. نمودارهای خوردگی پلاریزاسیون تافل نشان داد که ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین i_{corr} را از $\mu A.cm^{-2}$ به $9/1 \mu A.cm^{-2}$ کاهش می دهد. این موضوع با داده های طیف سنجی امپدانس $98/3^2$ بدست آمده در غیاب بازدارنده خوردگی به $9/1 \mu A.cm^{-2}$ کاهش می دهد. این موضوع با داده های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی که در آن میزان مقاومت در برابر انتقال بار از $82 \Omega.cm^2$ به $1750 \Omega.cm^2$ افزایش یافت، سازگار است. علاوه بر این، بر اساس تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی، مشاهده شد که حضور بازدارنده خوردگی میزان زبری سطح نمونه های فولاد کم کربن را که در اثر خوردگی ایجاد شده بود، کاهش می دهد.

کلیدواژه: خوردگی، ممانعت کننده سبز، امپدانس الکتروشیمیایی، محاسبات ترمودینامیکی، ایزوترم جذب.

Investigating the Potential of L-Hydroxy-Proline as a Biodegradable Amino Acid in Preventing the Corrosion of Low Carbon Steel

T. Rabizadeh^{1,*}, A. Jenabzadeh¹

¹ Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Master's student, Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding Author: t.rabizadeh@tabrizu.ac.ir

Submission: 17, 04, 2024 Acceptance: 03, 09, 2024

Abstract

Abstract: here, the potential of of L-hydroxy-proline as a biodegradable amino acid in tackling the corrosion of low carbon steel coupons immersed in 0.1 M hydrochloric acid electrolyte was illustrated. Therefore, some techniques including weight-loss, electrochemical evaluations (e.g., EIS) and surface analysis (e.g. AFM) were employed. The weight loss evaluations showed that at ambient temperature (298 K), raising the concentration of L- hydroxy-proline dissolved in the harsh electrolyte from 50 ppm to 500 ppm dropped the corrosion rate of the metallic pieces from 37.7 mpy to 5.4 mpy, while the corrosion rate of steel was in the absence of inhibitor was 96.8 mpy. It was also recorded that heating up the temperature of the harsh solution between 298 K and 343 K has dropped the ability of L- hydroxy-proline to minimize the corrosion phenomenon. Thermodynamic data showed that L- hydroxy-proline raised the energy barrier needed for the initiation of the metal dissolution. It was also calculated that the adsorption of the tested amino acid was in perfect agreement with the Langmuir adsorption isotherm. In terms of the electrochemical studies, it can be said that the Tafel polarization diagrams showed that 500 ppm L- hydroxy-proline changed the corrosion current density from $3.98 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ recorded without the tested aminod acid to $1.9 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$. This was in accordance with the Nyquist plots gathered from the electrochemical impedance spectroscopy analysis in which the resistance for the charge transfer increased from $82 \Omega.\text{cm}^2$ to $1750 \Omega.\text{cm}^2$. In addition, the 3D topography images highlighted that L- hydroxy-prolin reduced the surface roughness of the coupons immersed in the corrosive electrolyte

Keywords: corrosion, green inhibitor, electrochemical impedance spectroscopy, thermodynamics calculations, adsorption isotherm

۱ - مقدمه

امروزه فولاد کم کربن به طور گسترده در صنایع مختلف به ویژه پتروشیمی، نفت، گاز و فرآوری سنگ معدن مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. از طرفی، در بسیاری از این صنایع، اسید کلریدریک برای حذف هرگونه ناخالصی سطحی (فرآیند اسید شویی)، برای رسوب زدایی و برای فرآیند اسیدی کردن چاه های نفت و گاز به کار گرفته می شود [۲]. با این حال، قرار گرفتن در معرض محلول های اسیدی به ویژه اسید کلریدریک، خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد کم کربن را از بین می برد که منجر به از کار افتادن ادوات و آلودگی در محصولات نهایی می شود که هزینه هنگفتی را به سیستم تحمیل می کند [۳]. این پدیده نامطلوب که "خوردگی" نامیده می شود، یک نگرانی اساسی برای دانشگاهیان و صنعت بوده و جلوگیری از وقوع آن موضوع تحقیقات بسیاری قرار گرفته است. از این رو، برخی از روش ها مانند اعمال پوشش های محافظ [۴ و ۵]، استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی (انتخاب مواد) [۶]، و اعمال حفاظت کاتدی [۷]، برای به حداقل رساندن پیامدهای پرهزینه خوردگی پیشنهاد شده اند. با این حال، بر اساس بررسی های صورت گرفته، افزودن مواد شیمیایی به نام «بازدارنده های خوردگی» مقرون به صرفه ترین و موثرترین روش می باشد [۸]. بازدارنده های خوردگی صنعتی به دو گروه اصلی تقسیم می شوند: بازدارنده های معدنی (مانند کرومات ها، مولیبدات ها، فسفات ها) و بازدارنده های آلی (حاوی P، N، و/یا S در ساختار مولکولی) [۹]. اما، نشان داده شده است که کارایی ترکیبات آلی در کاهش خوردگی فولاد ملایم در اسید کلریدریک بیشتر از مواد معدنی است [۱۰]. آلکیل فنون ها، آزول ها، الکل های استیلنیک و آلدئیدها، بازدارنده های رایج خوردگی صنعتی هستند که برای کاهش اثرات مخرب خوردگی مورد استفاده قرار می گیرند [۱۱]. اما علیرغم عملکرد مناسب بازدارنده های خوردگی صنعتی، اکثر آنها سمی و دارای عوارض زیست محیطی متعدد می باشند [۱۲]. بنابراین، توسعه بازدارنده های خوردگی زیست تخریب پذیر و سازگار با محیط زیست در

سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. در این راستا، عصاره های گیاهی، داروها، پلیمرهای طبیعی و پروتئین ها گزینه های اصلی هستند [۱۴]. به عنوان مثال، مشاهده شده است که ppm ۲۰۰ پودر استخراج شده از برگ گیاه جینکو، تا ۹۰ درصد از خوردگی فولاد X70 در الکترولیت ۱ مولار اسید کلریدریک جلوگیری می کند [۱۵]. در تحقیقی دیگر، کاهش ۹۲ درصدی خوردگی فولاد ملایم در اسید کلریدریک با افزودن ppm ۵۰۰ سفالکسین به عنوان یک داروی سبز نیز ثبت شد [۱۶]. از میان پلیمرها و پروتئین های طبیعی، اثرات ممانعت از خوردگی کازئین (به عنوان پروتئین شیر) [۱۷] و کیتوزان (پروتئین موجود در اسکلت بدن خرچنگ) [۱۸] در اسید کلریدریک قبلاً بررسی شده است. ال-پرولین یک اسید آمینه مهم از نظر بیولوژیکی است. این ماده یک اسید آمینه غیرقطبی است که با ترکیب شدن در پروتئین ها یک آمید ثالی را تشکیل می دهد. ال-پرولین سازنده بسیاری از پروتئین ها است و در غلظت های بالا در کلاژن یافت می شود. کلاژن پروتئین اصلی حمایت کننده از پوست، تاندون ها و استخوان ها است و سلامت و بهبود آنها را تقویت می کند. از این رو، ترکیب پایدار و سازگار با محیط زیست می باشد [۱۹]. محققین اثر بازدارندگی ال-پرولین و برخی از مشتقات آن را بررسی کرده اند [۲۰-۲۳]. به عنوان مثال حداکثر بازده بازدارندگی ۹۳ درصد برای فولاد کربنی غوطه ور در محلول ۱ مولار اسید کلریدریک حاوی ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر پلی بوتیل ساکسینات ال پرولین گزارش شده است [۲۰]. همچنین مشاهده شده است که ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر ال-پرولین توانسته است که میزان خوردگی فولاد کربنی را در محلول نیم مولار اسید کلریدریک به میزان ۹۰ درصد کاهش می دهد. اما اثر بازدارندگی ال-هیدروکسی پرولین مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین بر اساس ساختار مولکولی ال-هیدروکسی-پرولین، این احتمال وجود دارد که این ماده بتواند از خوردگی فولاد کم کربن در محیط اسیدی جلوگیری کند. بر این اساس در تحقیق حاضر، تأثیر ال-هیدروکسی-پرولین به عنوان یک ماده دوستدار محیط زیست بر خوردگی فولاد

کم کربن در محلول ۰/۱ مولار اسید کلریدریک با برخی تکنیک‌های الکتروشیمیایی و آنالیز سطحی مورد بررسی قرار گرفت. فرض بر این بود که با توجه به ساختار مولکولی، ال-هیدروکسی-پرولین باعث کاهش نرخ خوردگی کوپن‌های فلزی در محیط اسیدی شود.

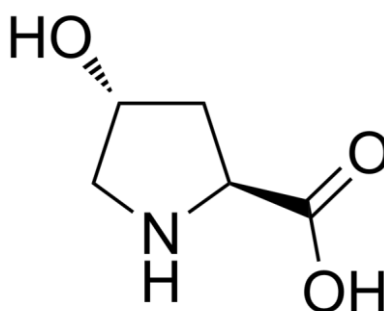
۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، نمونه‌های فولادی کم کربن به شکل مکعب مستطیل با ابعاد حدود ۳۵ میلی‌متر × ۲۰ میلی‌متر × ۲ میلی‌متر با ترکیب عنصری (درصد وزنی) مندرج در جدول ۱ (تعیین شده با آنالیز کوانتومتری) از یک صفحه بزرگ بریده و تحت فرایند آماده‌سازی سطح قرار گرفتند.

جهت آماده‌سازی سطح، ابتدا سطح کوپن‌ها با کاغذهای سمباده SiC از #۱۲۰ تا #۲۵۰ ساییده شدند، سپس به مدت ۳۰ ثانیه در استون غوطه‌ور شدند، سپس به مدت ۱۰ ثانیه با آب دیونیزه شسته شده و در نهایت بلافاصله با جت هوای خنک خشک شدند. برای تهیه محلول خورنده ۰/۱ مولار اسید کلریدریک، مقدار مناسب از این اسید (۳۷٪، VWR، Reagent ACS) با آب مقطر رقیق شد. محلول‌های حاوی ال-هیدروکسی-پرولین نیز با حل کردن ۵۰ ppm، ۱۰۰ ppm، ۲۵۰ ppm یا ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین (Sigma-Aldrich) با ساختار مولکولی مطابق شکل ۱) در محلول خورنده ۰/۱ مولار اسید کلریدریک تولید شدند.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر موجود در فولاد کم کربن مورد استفاده در این تحقیق

C	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
۰/۲۵	۰/۹۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۳	۰/۳	باقی مقادیر



شکل ۱- ساختار مولکولی ال-هیدروکسی-پرولین مورد استفاده به عنوان بازدارنده خوردگی

میلی ولت نسبت به OCP با نرخ جاروب 5 mV.s^{-1} انجام شد (توجه شود که مقدار رایج نرخ روبش 1 mV.s^{-1} می باشد). مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr})، دانسیته جریان خوردگی (i_{corr})، شیب های آندی (β_a) و کاتدی (β_c) با استفاده از روش برون یابی تافل تعیین شد.

(۳) بررسی توپوگرافی سطحی: مشخصات سطح شامل پستی و بلندی های سطح کوپن فولادی صیقل داده شده قبل از غوطه وری در محلول خورنده، کوپن غوطه ور شده در محلول خورنده به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و کوپن غوطه ور در محلول خورنده حاوی 500 ppm ال-هیدروکسی-پرویلن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (Nanosurf؛ AFM) تعیین شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبات ترمودینامیکی و سینتیکی

اندازه گیری میزان کاهش وزن کوپن های فلزی غوطه ور در محلول خورنده در حضور و غیاب بازدارنده خوردگی یک روش معتبر برای ارزیابی کارایی آن بازدارنده می باشد [۲۴]. بنابراین، در این تحقیق سرعت خوردگی (CR) بر حسب هزارم اینچ در سال (mpy)، و بازده ممانعت کننده (IE) در غیاب و حضور $500-50 \text{ ppm}$ ال-هیدروکسی-پرویلن و در دماهای مختلف $298-343$ درجه کلون با استفاده از معادلات ۱ و ۲ محاسبه شد [۱۷ و ۱۸]. نتایج به دست آمده در شکل ۲ (الف و ب) جدول ۲ نشان داده شده است.

$$\text{Corrosion rate} = \quad (1)$$

$$(K \times \Delta W) / (A \times t \times D)$$

$$IE \% = \frac{CR_0 - CR}{CR_0} \times 100 \quad (2)$$

که در آن K عدد ثابت 534 ، ΔW کاهش وزن بر حسب میلی گرم، A کل سطح کوپن غوطه ور شده بر حسب اینچ مربع و D چگالی فولاد کم کربن ($7/8$ گرم بر سانتی متر مکعب) و t زمان غوطه وری کوپن ها در محلول خوردگی (بر

شرح مفصلی از روش های انجام شده برای ارزیابی قابلیت ال-هیدروکسی-پرویلن در ممانعت از خوردگی نمونه های فلزی در زیر ارائه شده است:

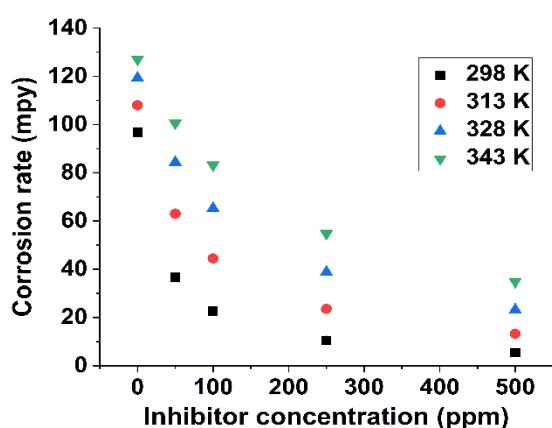
(۱) تجزیه و تحلیل کاهش وزن (آزمایش غوطه وری): این آزمایش با مقایسه وزن کوپن های فولاد کم کربن صیقلی قبل و پس از غوطه وری در محلول خورنده به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. محلول خورنده $0/1$ مولار اسید کلریدریک بود که جهت بررسی تأثیر غلظت بازدارنده خوردگی، مقادیر مختلف ال-هیدروکسی-پرویلن ($50 \text{ ppm} - 500 \text{ ppm}$) در محلول خوردگی حل شد. برای بررسی تأثیر دما بر روی بازده ممانعت از خوردگی ال پرویلن، آزمایشات غوطه وری در ۴ دمای مختلف 298 ، 313 ، 328 ، 343 درجه کلون انجام شد.

(۲) آزمایش های خوردگی الکتروشیمیایی: این آزمایشات که شامل پتانسیل مدار باز، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و روش پلاریزاسیون تافل بود، در دمای اتاق با استفاده از پتانسیواستات/گالوانوستات (Autolab PGSTAT302N) انجام شد. برای انجام آزمایشات مربوطه، سه الکتروود شامل یک الکتروود شمارنده از جنس پلاتین، یک الکتروود Hg/HgSO_4 به عنوان الکتروود مرجع، و یک الکتروود کاری که کوپن فولادی (با سطح 1 سانتی متر مربع) بود، به کار گرفته شد. آزمون پتانسیل مدار باز (OCP) بلافاصله پس از فرو بردن الکتروود کار در محلول خورنده یا الکتروولیت های حاوی غلظت های مختلف ال-هیدروکسی-پرویلن بود، انجام گرفت. هر آزمایش تا زمانی ادامه یافت که نمودار پتانسیل در مقابل زمان به یک مقدار تقریباً ثابت رسید. آنالیزهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در شرایط پتانسیل مدار باز انجام شد در حالیکه فرکانس از 100000 هرتز به $0/01$ هرتز تغییر می کرد. در طول زمان اندازه گیری EIS، یک سیگنال AC، 5 میلی ولت اعمال شد. علاوه بر این، داده های EIS الکتروشیمیایی مورد نیاز از نمودارهای امپدانس با استفاده از نرم افزار Zview2 استخراج شد. در نهایت، آزمایش های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با تغییر پتانسیل از 500 تا 50

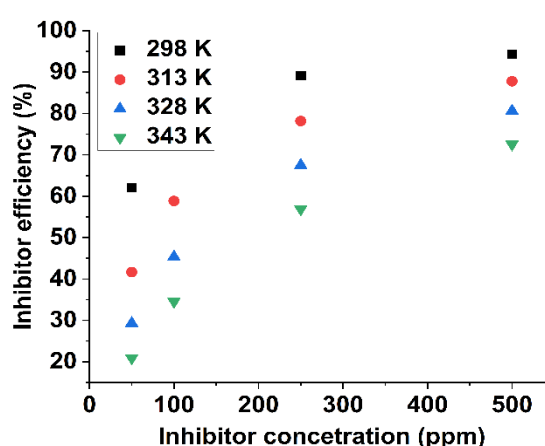
حساب ساعت) می‌باشد. CR_0 و CR نیز به ترتیب سرعت خوردگی (بر حسب mpy) در غیاب و حضور بازدارنده خوردگی می‌باشد.

مطابق جدول ۲، بازده بازدارندگی خوردگی ال-هیدروکسی-پرولین مستقیماً به غلظت بازدارنده در محلول خورنده بستگی دارد. همچنین باید توجه کرد که میزانی از سطح که توسط بازدارنده پوشیده شده (θ) نیز از تقسیم اعداد $IE\%$ به عدد ۱۰۰ بدست می‌آیند. به عنوان مثال، مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت بازدارنده از ۵۰ ppm به ۵۰۰ ppm در ۲۹۸K، بازده ال-هیدروکسی-پرولین در ممانعت از خوردگی ب از ۰/۶۲ به ۰/۹۴ افزایش می‌یابد. در حالی که، نرخ خوردگی کوپن‌های آزمایش شده به طور مطلوب از ۹۶/۸ mpy در غیاب بازدارنده به ۵/۴۹ mpy در حضور ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به جذب سطحی ماده بازدارنده خوردگی بر روی سطح نمونه‌های فولاد کم کربن و کاهش نواحی مستعد خوردگی بر روی قطعات فلزی نسبت داد [۲۵ و ۲۶]. در مقابل، افزایش دما از ۲۹۸ به ۳۴۳ کلون اثرات نامطلوبی

داشت و به طور چشمگیری نرخ خوردگی را افزایش داد. از این رو، برخلاف اثرات مثبت افزایش غلظت، افزایش دما باعث کاهش بازده ممانعت از خوردگی ال-هیدروکسی-پرولین شد که احتمالاً به دلیل واجذب و جدا شدن مولکول‌های بازدارنده از سطح فلز در دمای بالاتر باشد. از طرفی، به دلیل کاهش مقاومت الکترولیت به همراه افزایش واکنش-پذیری و نفوذ یون‌های خورنده کلر، میزان خوردگی اسید کلریدریک با افزایش دما بیشتر می‌شود که این موضوع باعث کاهش کارایی بازدارنده خوردگی می‌شود [۲۷]. همچنین گزارش شده است که یک بازدارنده خوردگی می‌تواند نرخ خوردگی قطعات فلزی را به وسیله افزایش انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای شروع فرایند خوردگی، کاهش دهد [۲۸]. برای اثبات این موضوع، در تحقیق حاضر از معادله آرنیوس و معادله نظریه حالت‌گذار برای محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی شامل انرژی فعال‌سازی خوردگی (E_{act})، آنتروپی فعال‌سازی (ΔS_{act}) و آنتالپی فعال‌سازی (ΔH_{act}) مندرج در مراجع، مربوط به خوردگی قطعات فولاد کم کربن در غیاب و حضور ال-هیدروکسی-پرولین در دماهای مختلف استفاده شد (معادلات ۳ و ۴) [۱۷].



(الف)



(ب)

شکل ۲ - (الف) سرعت خوردگی (CR)، (ب) بازده ممانعت از خوردگی ($IE\%$) فولاد کم کربن غوطه‌ور در اسید کلریدریک ۰/۱ مولار در غیاب و حضور ۵۰-۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین و در دماهای مختلف ۲۹۸-۳۴۳ درجه کلون.

جدول ۲- نتایج نرخ خوردگی (CR)، درجه پوشش سطح (θ) و بازده بازدارندگی خوردگی (IE) در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف ۵۰-۵۰۰ میلی گرم بر لیتر ال-هیدروکسی-پرولین و در دماهای مختلف ۲۹۸-۳۴۳ درجه کلوین

راندمان بازدارنده (%)	سرعت خوردگی (mpy)	غلظت بازدارنده (ppm)	دما (K)
-	۹۶/۸	۰	۲۹۸
۶۲/۰۷	۳۶/۷	۵۰	
۷۶/۶۲	۲۲/۶	۱۰۰	
۸۹/۱۷	۱۰/۴	۲۵۰	
۹۴/۳۲	۴/۵	۵۰۰	
-	۱۰۸/۱	۰	۳۱۳
۴۱/۶۴	۶۳/۰۱	۵۰	
۵۸/۸۲	۴۴/۴	۱۰۰	
۷۸/۱۶	۲۳/۵	۲۵۰	
۸۷/۷۷	۱۳/۱	۵۰۰	
-	۱۱۹/۳	۰	۳۲۸
۲۹/۲۹	۸۴/۳	۵۰	
۴۵/۳۳	۶۵/۲	۱۰۰	
۶۷/۴۸	۳۸/۷۸	۲۵۰	
۸۰/۶۱	۲۳/۱۲	۵۰۰	
-	۱۲۷/۱	۰	۳۴۳
۲۰/۸۶	۱۰۰/۵	۵۰	
۳۴/۵۳	۸۳/۲	۱۰۰	
۵۶/۸۸	۵۴/۷	۲۵۰	
۷۲/۵۴	۳۴/۸	۵۰۰	

و ΔS_{act} به ترتیب با در نظر گرفتن شیب خطوط و عرض از مبدأ نمودارهای خطی مندرج در شکل ۳ (ب) محاسبه می‌شود. مقادیر پارامترهای محاسبه شده در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، حضور بازدارنده خوردگی میزان سد انرژی مورد نیاز برای آغاز فرآیند خوردگی را افزایش داده است، این افزایش می‌تواند به دلیل جذب سطحی بازدارنده خوردگی و در نتیجه افزایش ضخامت لایه دوگانه تشکیل شده بر روی سطح کوپن‌های

$$CR = A \exp\left(-\frac{E_{act}}{RT}\right) \quad (3)$$

$$CR = \frac{RT}{Nh} \exp\left(\frac{\Delta S_{act}}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H_{act}}{RT}\right) \quad (4)$$

که در این معادلات A ضریب فرکانس، R ثابت گاز جهانی، T دمای آزمایشی بر حسب کلوین، N ثابت آووگادرو، و h ثابت پلانک است. مقادیر E_{act} از شیب خطوط رسم شده در شکل ۳ (الف) بدست می‌آیند. درحالی که مقادیر ΔH_{act}

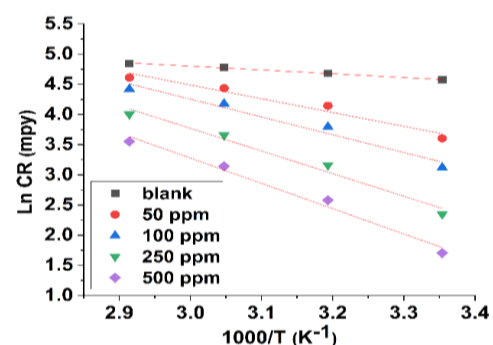
خوردگی و فولاد کربنی و همچنین تعیین مکانیسم‌هایی که بازدارنده خوردگی از طریق آن از بروز خوردگی جلوگیری می‌کند، نتایج حاصل از آزمایشات کاهش وزن توسط ایزوترم جذب لانگمویر (معادله ۵) تجزیه و تحلیل شد [۳۰]:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{k_{ads}} + C \quad (5)$$

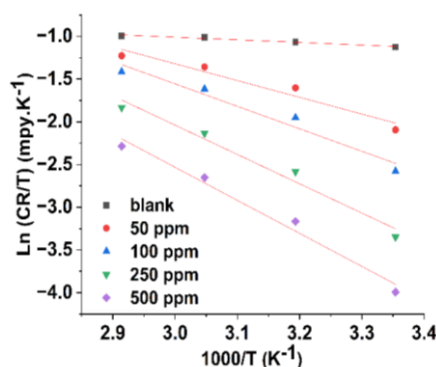
که در این معادله C غلظت بازدارنده را در محلول نشان می‌دهد، θ میزانی از سطح می‌باشد که توسط بازدارنده پوشیده می‌شود، K_{ads} ثابت تعادل جذب است.

فولادی غوطه‌ور در محلول خورنده باشد. علاوه بر این، با افزودن ال پرولین، مقدار آنتالپی فعال‌سازی فرایند خوردگی افزایش یافت که ممانعت از خوردگی نمونه‌ها را تأیید می‌کند. همچنین، از جدول ۳ مشهود است که آنتروپی فعال‌سازی فرایند خوردگی محاسبه شده برای محلول بدون بازدارنده خوردگی منفی بود و با افزایش غلظت ال-هیدروکسی-پرولین تمایل به مثبت شدن در اعداد محاسبه شده مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده کاهش بی‌نظمی در اثر جذب سطحی بازدارنده خوردگی و جانشینی مولکول‌های آب حاضر در سطح قطعات فلزی غوطه‌ور در محلول خورنده با مولکول‌های بازدارنده خوردگی می‌باشد [۲۹].

به منظور بررسی فعل و انفعالات اتفاق افتاده مابین بازدارنده



(الف)

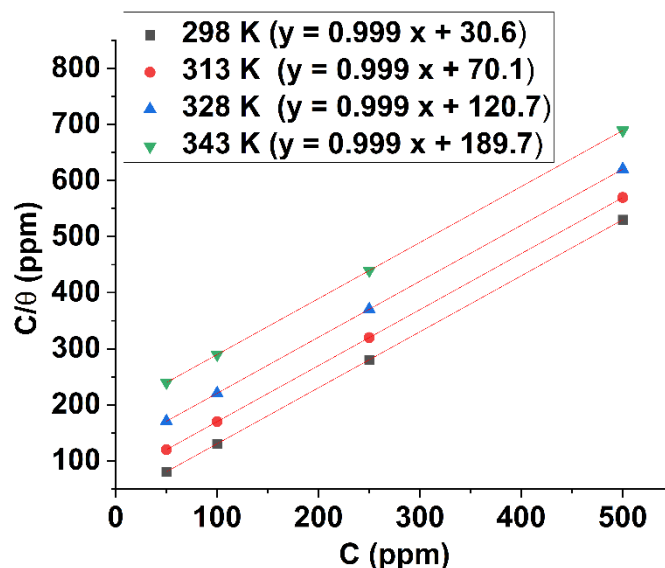


(ب)

شکل ۳ - نمودار خطی (الف) $\ln CR$ در برابر $1/T$ و (ب) $\ln(CR/T)$ بدست آمده در غیاب و حضور ۵۰-۵۰۰ میلی گرم بر لیتر ال-هیدروکسی-پرولین و در دماهای مختلف ۲۹۸-۳۴۳ درجه کلوین

جدول ۳ - مقادیر مطالعه ترمودینامیکی مربوط به خوردگی فولاد کم کربن در محیط خورنده در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف ال-هیدروکسی-پرولین

غلظت (ppm)	$E_{act} (kJ.mol^{-1})$	$\Delta H_{act} (kJ.mol^{-1})$	$\Delta S_{act} (J.mol^{-1})$
۰	۵/۲	۲/۵	-۱۹۶/۸
۵۰	۱۸/۹	۱۶/۳	-۱۵۹/۶
۱۰۰	۲۴/۵	۲۱/۸	-۱۴۴/۹
۲۵۰	۳۱/۱	۲۸/۴	-۱۲۹/۱
۵۰۰	۳۴/۸	۳۲/۱	-۱۲۲/۱



شکل ۴ - نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب ال-هیدروکسی-پرولین بر روی نمونه‌های فولادی کم کربن غوطه‌ور در ۰/۱ مولار اسید کلریدریک در دماهای مختلف

لانگمویر پیروی می‌کند که طبق این ایزوترم می‌توان گفت که مولکول‌های بازدارنده خوردگی جذب شده با یکدیگر اندک‌اندک نداشتند. علاوه بر این، ایزوترم جذب لانگمویر تشکیل تک لایه‌ای از مولکول‌های بازدارنده را بر روی سطح جاذب پیشنهاد می‌کند [۳۱].

اثر فرایند جذب را نشان می‌دهد. علاوه بر این، علامت منفی ΔG_{ads}° نشانه‌ای از جذب خود به خودی بازدارنده و پایداری مولکول‌های جذب‌شده در سطح نمونه‌های آزمایش می‌باشد. همچنین اثبات شده است که به طور کلی، مقادیر ΔG_{ads}° از صفر تا -۲۰ کیلوژول بر مول نشان دهنده جذب فیزیکی می‌باشد که در آن مولکول‌های باردار به صورت الکترواستاتیکی به سطح فلز باردار متصل می‌شوند. اما، مقادیر منفی تر از -۴۰ کیلوژول بر مول دلالت بر جذب شیمیایی یا اشتراک بار مابین مولکول‌های بازدارنده آلی و سطح فلز دارد. با این حال، اگر مقادیر ΔG_{ads}° بین این دو مقدار باشد، به احتمال فراوان جذب هم به صورت فیزیکی و هم شیمیایی اتفاق می‌افتد [۱۸]. در این مطالعه، مقادیر ΔG_{ads}° بین -۲۶/۶ و -۲۳/۳ کیلوژول بر مول بود که به

از شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که داده‌های تجربی منطبق با ایزوترم جذب لانگمویر می‌باشد. چراکه مقادیر R^2 حدود ۰/۹۹۹ بوده و شیب خطوط نزدیک به ۱ می‌باشد. این موضوع تأکید می‌کند که جذب ال-هیدروکسی-پرولین روی فولاد کم کربن در ۰/۱ مولار اسید کلریدریک از ایزوترم جذب تغییرات انرژی آزاد جذب (ΔG_{ads}°) که ماهیت فرآیند جذب را نشان می‌دهد نیز برای جذب بازدارنده خوردگی بر روی زیرلایه فولادی محاسبه شد (معادله ۶):

$$\Delta G_{ads}^\circ = -RT \ln (K_{ads} \times C_{solvent}) \quad (6)$$

که در این معادله K_{ads} ثابت تعادل فرآیند جذب است که از معکوس عرض از مبدا نمودار C/θ بر حسب C محاسبه می‌شود. $C_{solvent}$ نیز غلظت مولی حلال (۱۰۰۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای آب) را نشان می‌دهد، R ثابت گاز و T دمای آزمایش بر حسب کلوین است.

از جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دما از ۲۹۸ کلوین به ۳۴۳ کلوین، مقادیر K_{ads} کاهش می‌یابد در حالی که مقادیر ΔG_{ads}° مثبت‌تر شده است که آزاد شدن گرما در

سهم هر دو نوع جذب (یعنی جذب فیزیکی و جذب شیمیایی) در ممانعت خوردگی نمونه‌ها در حضور ال-هیدروکسی-پرولین اشاره دارد.

۳-۲- بررسی‌های الکتروشیمیایی

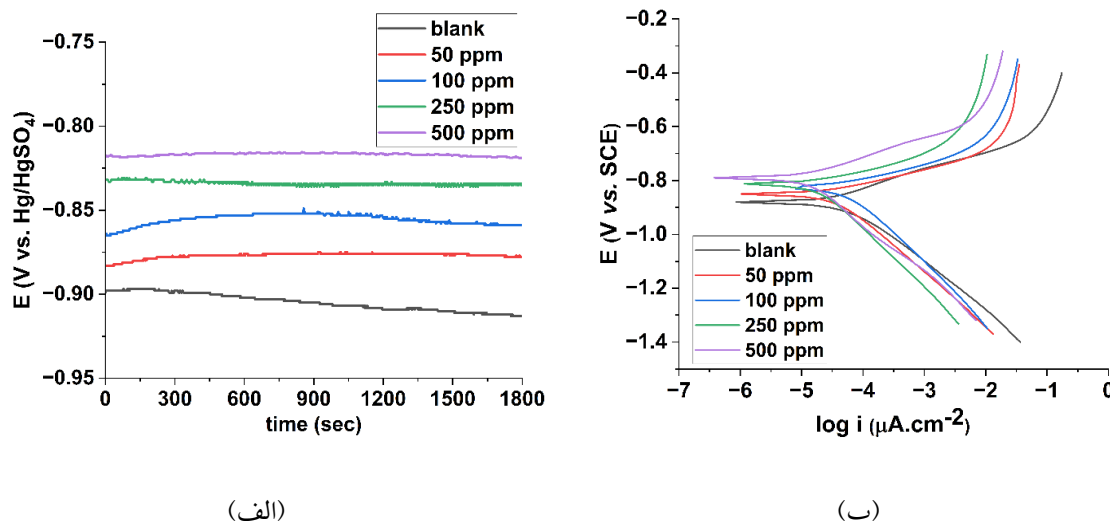
مقادیر OCP نمونه‌های غوطه‌ور در محلول خوردگی در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف بازدارنده خوردگی به مدت ۳۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵ الف). مشاهده شد که در غیاب افزودنی، مقادیر OCP نهایی ۹۱۳- میلی ولت می‌باشد. اما، هنگامی که ۵۰ ppm، ۱۰۰ ppm، ۲۵۰ ppm یا ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین در محلول ۰/۱ مولار اسید کلریدریک حل شد، مقادیر OCP نهایی به ترتیب به ۸۷۸-، ۸۵۹-، ۸۴۲-، ۸۲۷- میلی ولت افزایش یافت. که این موضوع به دلیل جذب ال-هیدروکسی-پرولین بر روی نمونه‌های فولاد کم کربن و ایجاد یک سد در برابر نفوذ یون‌های خوردنده از محلول به سطح نمونه‌های فلزی می‌باشد [۳۲].

برای ارزیابی بیشتر اثرات ممانعت از خوردگی ال-هیدروکسی-پرولین، اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در ۰/۱ مولار اسید کلریدریک در غیاب و حضور ۵۰۰-۵۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین در دمای ۲۹۸ K انجام شد (شکل ۵ ب). مشاهده می‌شود که در تمام آزمایشات منحنی‌های پلاریزاسیون از دو ناحیه فعال تشکیل شده‌اند که واکنش‌های احیا هیدروژن و انحلال فولاد به ترتیب در شاخه‌های کاتدی و آندی رخ داده است. با استفاده از روش برون یابی تافل، پتانسیل خوردگی (E_{corr})، دانسته

جریان خوردگی (i_{corr}) و شیب‌های تافل آندی و کاتدی (β_a, β_c)، محاسبه و در جدول ۵ خلاصه شده است. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، i_{corr} در حضور بازدارنده خوردگی از $98/3 \mu A.cm^{-2}$ به $9/1 \mu A.cm^{-2}$ کاهش یافته است. علاوه بر این، در مقایسه با محلول بدون ممانعت کننده، حضور ال-هیدروکسی-پرولین در محلول خوردنده پتانسیل خوردگی را مثبت‌تر کرد که در این میان، بیشترین افزایش زمانی مشاهده شد که ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین در محلول خوردگی وجود داشت. این رفتار به معنی تغییر واکنش‌های حل شدن فلز و انتقال بار در حضور ال-هیدروکسی-پرولین می‌باشد. در واقع جذب ال-هیدروکسی-پرولین بر روی نمونه‌های آزمایش شده، از انحلال فولاد کم کربن جلوگیری می‌کند و انتقال محصولات خوردگی بین محلول و سطح فلز را محدود می‌کند. علاوه بر این، حضور یک لایه از مولکول‌های ال-هیدروکسی-پرولین روی سطح نمونه‌های فولادی، میزان احیا هیدروژن را کاهش می‌دهد و با افزایش مقاومت در برابر انتقال بار و همچنین با به حداقل رساندن ظرفیت خازنی لایه دوگانه، انتقال الکترون را در سطح مشترک فولاد / الکترولیت خوردنده را کاهش می‌دهد [۱۷]. تغییر در مقادیر شیب‌های تافل کاتدی و آندی که در جدول ۵ و شکل ۵ (ب) قابل مشاهده است، موید تأثیر بازدارنده خوردگی مورد استفاده بر واکنش‌های آندی و کاتدی خوردگی می‌باشد. به علاوه، از آنجا که مقادیر شیب‌های کاتدی و آندی تغییر کرده است، می‌توان گفت که ال-هیدروکسی-پرولین رفتار نوع مخلوط (آندی و کاتدی) داشته است.

جدول ۴- انرژی آزاد گیس و ثابت تعادل جذب محاسبه شده در دماهای مختلف

Temperature (K)	R^2	$K_{ads} (mg.l^{-1})$	$(KJ.mol^{-1})\Delta G_{ads}^{\circ}$
۲۹۸	۱	۰/۰۴۶	-۲۶/۶
۳۱۳	۱	۰/۰۳	-۲۵/۵
۳۲۸	۱	۰/۰۲	-۲۴/۶
۳۴۳	۱	۰/۰۱۲	-۲۳/۳



شکل ۵ - (الف) نمودار تغییرات OCP (ب) پلاریزاسیون مربوط به خوردگی فولاد کم کربن غوطه ور در محلول ۰/۱ مولار اسید کلریدریک در غیاب و حضور ۵۰-۵۰۰ میلی گرم بر لیتر ال پرولین

جدول ۵ - نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به خوردگی فولاد کم کربن غوطه ور در ۰/۱ مولار اسید کلریدریک در غیاب و حضور ۵۰-۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین در دمای ۲۹۸ K

غلظت (ppm)	E_{corr} (mV vs. Hg/HgSO ₄)	i_{corr} ($\mu A.cm^{-2}$)	β_a (V.dec ⁻¹)	$-\beta_c$ (V.dec ⁻¹)
۰	-۸۸۰	۹۸/۳	۰/۰۶۷	۰/۱۵۶
۵۰	-۸۵۰	۳۹/۲	۰/۰۶	۰/۱
۱۰۰	-۸۳۰	۲۴/۵	۰/۰۴۷	۰/۰۸
۲۵۰	-۸۱۲	۱۰/۷	۰/۰۳۵	۰/۰۵۲
۵۰۰	-۷۹۸	۹/۱	۰/۰۲۶	۰/۰۴۴

بازدارنده مورد استفاده بیشتر از کاتدی است. به عبارت دیگر، ال-هیدروکسی-پرولین ترجیحاً در محل های آندی جذب می شود و بر انحلال فولاد کم کربن تأثیر زیادی می گذارد. نقش ال-هیدروکسی-پرولین در بازدارندگی از خوردگی فولاد کم کربن در محلول خوردگی نیز توسط طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. داده های EIS به صورت نمودارهای نایکوئیست (شکل ۶) آورده شده است. از شکل ۶ می توان دریافت که نمودارهای نایکوئیست که در غیاب و حضور افزودنی ثبت شده اند از یک نیم دایره در فرکانس های بالا و یک مقدار حلقه "شبه القایی" در فرکانس های پایین تشکیل شده اند. علاوه بر این، قطر حلقه

با توجه به اسناد منتشر شده قبلی، اگر حداکثر میزان جابجایی در E_{corr} در حضور یک بازدارنده خوردگی کمتر از ۸۵ میلی ولت باشد، آن بازدارنده را می توان به عنوان یک بازدارنده نوع مخلوط در نظر گرفت [۱۸]. در غیر این صورت، بازدارنده به عنوان یک نوع آندی یا کاتدی طبقه بندی می شود. در این تحقیق حداکثر میزان جابجایی در پتانسیل خوردگی در حضور ۵۰۰ ppm افزودنی مشاهده شد که به میزان ۸۲ میلی ولت بود که این موضوع نشان دهنده این است که ال-هیدروکسی-پرولین یک بازدارنده نوع مخلوط می باشد. اما از آنجا که نمودارهای پلاریزاسیون به سمت مقادیر مثبت و منطقه آندی جابجا شده است، تمایل آندی

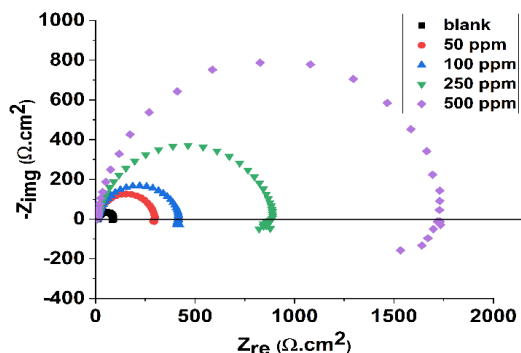
خازنی ثبت شده در حضور ال-هیدروکسی-پرولین بزرگتر از قطر حلقه به دست آمده از محلول بدون بازدارنده است که نشان دهنده افزایش امپدانس فولاد کم کربن در اثر حل شدن ممانعت کننده در محلول خورنده است. در میان نمودارهای نایکوئیست به دست آمده در حضور بازدارنده، واضح است که با افزودن بیشتر بازدارنده به سیستم، قطر نیم دایره های رسم شده افزایش می یابد که نشان دهنده نقش مهم غلظت بازدارنده در فرایند ممانعت از خوردگی است. این یافته ها با نتایج پلاریزاسیون الکتروشیمیایی همخوانی دارد (شکل ۵ ب). اگرچه، گزارش شده است که وقوع یک حلقه خازنی به فرآیند مقاومت انتقال بار مربوط است، دلیل حلقه شبه القایی مشاهده شده هنوز به طور دقیق مشخص نشده است. برخی از محققان آن را به تجمع محصولات خوردگی و یا جذب مولکول های بازدارنده خوردگی بر روی سطح فلز، نسبت می دهند [۱۷]. داده های EIS به دست آمده در این تحقیق با استفاده از یک مدار معادل الکتریکی با پیکربندی مشابه با مدارهای پیشنهادی در تحقیقات دیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۸]. در مدار در نظر گرفته شده (شکل ۶ ب)، R_s مقاومت محلول بین الکترودهای مرجع و کار بوده و R_{ct} نشان دهنده مقاومت انتقال بار در فصل مشترک فلز / الکترولیت می باشد. علاوه بر این، مقدار R_{ct} در قطر حلقه خازنی نیز تاثیرگذار است و با نرخ خوردگی فولاد کم کربن تناسب معکوس دارد.

در حالت ایده آل، از Cdl برای نمایش ظرفیت یک لایه دوگانه تشکیل شده در سطح مشترک بین فلز و الکترولیت استفاده می شود. با این حال، به دلیل زبری سطح، ناهمگنی سطح و اثرات جذب، انحراف از شرایط خازنی ایده آل به وجود می آید. بنابراین در این تحقیق CPE (عنصر فاز ثابت) به جای Cdl در نظر گرفته شده است. CPE-T و n نیز دو پارامتر مشخصه یک عنصر CPE هستند. امپدانس CPE نیز به صورت زیر بیان می شود [۳۳]:

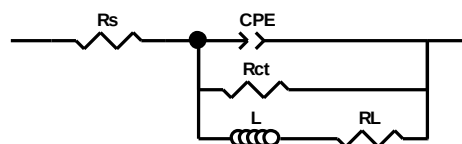
$$Z_{CPE} = Y^{-1} (j\omega)^{-n} \quad (7)$$

که در آن ω فرکانس زاویه ای با واحد (rad.s^{-1}) ، Y نشان دهنده مقدار CPE با واحد $(\Omega^{-1} \text{ S}^n \text{ cm}^{-2})$ و $j = (-1)^{1/2}$ نیز یک عدد موهومی است و $\omega = 2\pi f$ می باشد که f فرکانس Hz است، n نیز نشان دهنده انحراف از رفتار خازنی ایده آل است. L و R_L نیز به ترتیب اندوکتانس (H.cm^2) و مقاومت القایی $(\Omega.\text{cm}^2)$ هستند. نتایج برازش نمودارهای نایکوئیست در جدول ۶ آمده است. مشاهده می شود که با افزایش غلظت ال-هیدروکسی-پرولین از ۵۰ ppm به ۵۰۰ ppm، مقاومت انتقال بار افزایش می یابد. علاوه بر این، کاهش در مقادیر CPE-T جذب بازدارنده خوردگی روی فولاد را نشان می دهد که با افزایش ضخامت لایه دوگانه الکتریکی همراه می باشد. مقادیر محاسبه شده برای n نیز حاکی از کاهش ناهمگنی سطح نمونه ها احتمالاً به دلیل جذب مولکول های بازدارنده است. همچنین، زمانی که غلظت ال-هیدروکسی-پرولین در محلول خورنده از ۵۰ ppm تا ۵۰۰ ppm تغییر کرد، مقادیر L و R_L افزایش یافت. که نشان دهنده افزایش جذب بازدارنده خوردگی می باشد. این مقادیر به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر به دست آمده از محلول بدون ممانعت کننده است که در آن محصولات خوردگی روی سطح فولاد کم کربن انباشته شده اند. افزایش L و R_L به عنوان تابعی از غلظت بازدارنده نیز در مقالات دیگر گزارش شده است [۳۴].

در نمودارهای Bode، مدول امپدانس $(|Z|)$ در فرکانس پایین (معمولاً $\log f = 1/8$ مرتز) نشان دهنده کارایی بازدارنده خوردگی است. از شکل ۷ الف واضح است که ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین بالاترین مدول امپدانس را ایجاد می کند. با در نظر گرفتن نمودار زاویه فاز (شکل ۷ ب)، مشاهده می شود که با افزایش غلظت بازدارنده، پیک منحنی های زاویه - فاز در فرکانس بالا (حدود $\log f = 1.8$) به سمت بالا حرکت کردند و به مقادیر بالاتری رسیدند که نشان دهنده چسبندگی بیشتر مولکول های بازدارنده به الکترودهای کار است که سطح الکترودها را همگن تر کرده است [۱۷].

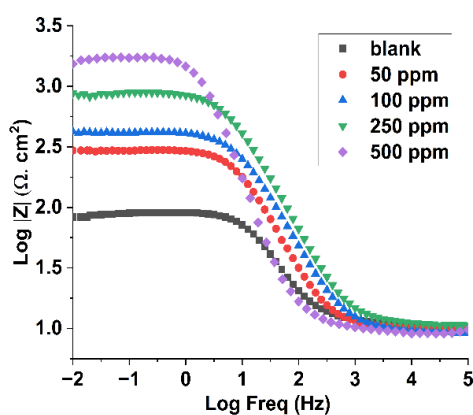


(الف)

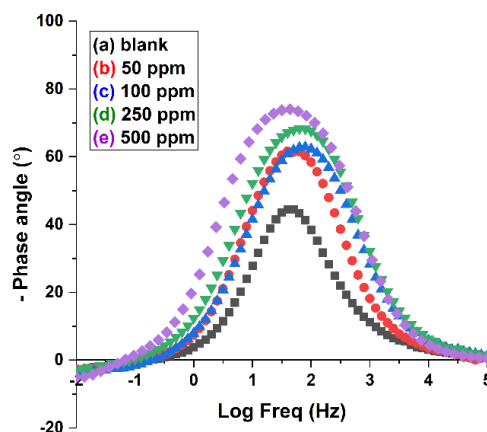


(ب)

شکل ۶- (الف) نمودارهای امپدانس نایکونیست مربوط به خوردگی فولاد کم کربن غوطه‌ور در ۰/۱ مولار اسید کلریدریک در غیاب و حضور ۵۰۰-۵۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین در دمای ۲۹۸ کلوین (ب) مدار معادل طراحی شده جهت تحلیل نمودارهای نایکونیست.



(الف)



(ب)

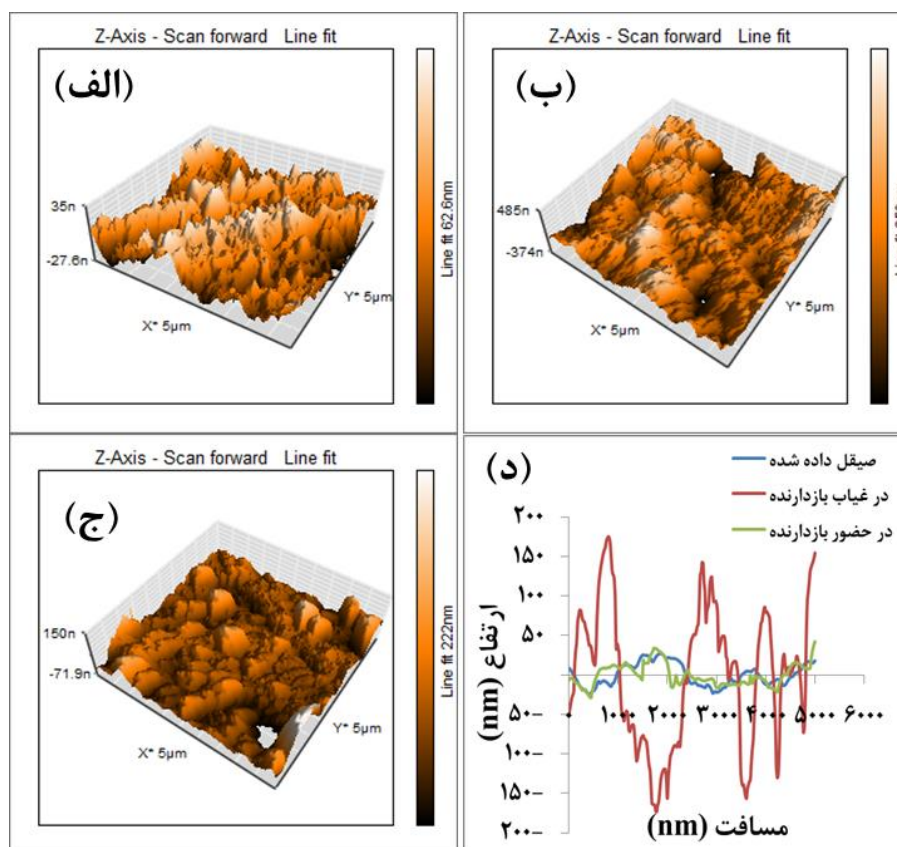
شکل ۷- (الف) نمودار بد (ب) نمودار فاز فولاد کم کربن در ۰/۱ مولار کلریدریک اسید در غیاب و حضور ۵۰۰-۵۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین در دمای ۲۹۸ K

جدول ۶- داده‌های بدست آمده از نمودارهای نایکونیست مربوط به فولاد کم کربن غوطه‌ور در محلول ۰/۱ مولار اسید کلریدریک در غیاب و حضور ۵۰-۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین در دمای ۲۹۸ K

غلظت (ppm)	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$\text{CPE-T } (\Omega^{-1} \text{ S}^n \text{ cm}^{-2})$	n	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	L ($\text{H} \cdot \text{cm}^2$)	R_L ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
۰	۱۰/۶	$۲/۵۴ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۸۶	۸۲	۱۶۴۳	۸۰۴
۵۰	۱۰/۸	$۱/۰۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۸۸	۲۹۱	۱۷۷۶۲	۳۵۹۰
۱۰۰	۱۰/۸	$۷/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۸۸	۴۱۰	۵۷۱۲۴	۳۶۶۰
۲۵۰	۱۰/۸۳	$۵/۰۷ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۸۹	۸۷۵	۶۶۶۱۱	۵۳۴۸
۵۰۰	۱۰/۹	$۴/۳۸ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۹۲	۱۷۵۰	۱۲۲۶۱۰	۸۳۳۰

شدت خورده شده به دست آمد (شکل ۸ ب). با توجه به خوردگی و تجمع سطحی محصولات خوردگی، نمودار زبری این نمونه پیک‌های تیز در محدوده حدود ۴۸۰ نانومتر نیز به دست آمد (شکل ۸ د). در مقابل، حضور ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین از خوردگی فولاد جلوگیری کرده و سطحی نسبتاً صاف با تخریب جزئی ایجاد کرد که کاهش قابل توجهی در نرخ خوردگی فولاد آزمایش شده را نشان می‌دهد (شکل ۸ ج). مشخصات زبری ثبت شده برای این نمونه تقریباً مشابه نمونه صیقل شده بود (حدود ۱۵۰ نانومتر). مقدار Ra اندازه‌گیری شده برای کوپن‌های صیقل شده، به شدت خورده شده و ممانعت شده به ترتیب حدود ۱۴ نانومتر، ۲۰۰ نانومتر و ۲۲ نانومتر بود. این نتایج را می‌توان با جذب سطحی ال-هیدروکسی-پرولین توضیح داد که یک لایه محافظ از مولکول‌های بازدارنده بین فولاد و محلول خورنده ایجاد می‌کند.

میکروسکوپ AFM برای ارزیابی میزان پستی و بلندی‌های سطح نمونه فولادی در اثر خوردگی مورد استفاده قرار گرفت. برای این کار سطح یک نمونه صیقلی شده قبل از آزمایشات خوردگی و سطح دو نمونه که در محلول خورنده ۰/۱ مولار اسید کلریدریک بدون بازدارنده و محلول خورنده ۰/۱ مولار اسید کلریدریک حاوی ۵۰۰ ppm ال-هیدروکسی-پرولین به مدت ۲۴ ساعت در ۲۹۸ درجه کلون غوطه ور شده اند، مورد آنالیز قرار گرفت. تصاویر AFM سه بعدی و نمودارهای زبری سطح مربوطه نیز در شکل ۸ (الف - د) ارائه شده است. با توجه به تصاویر سه بعدی، نمونه صیقلی قبل از غوطه‌وری در محلول خورنده دارای سطح بسیار صاف با خراش‌های جزئی مربوط به مراحل آماده‌سازی نمونه بود (شکل ۸ الف). مشخصات زبری این نمونه نوسانات بسیار جزئی را در محدوده حدود ۳۵ نانومتر نشان داد (شکل ۸ د). با این حال، پس از غوطه‌ور شدن نمونه فولادی در محلول خوردگی بدون بازدارنده، سطحی به



شکل ۸- تصاویر AFM مربوط به فولاد کربنی (الف) پولیش شده قبل از خوردگی، (ب) بعد از خوردگی در غیاب بازدارنده خوردگی (ج) بعد از خوردگی در حضور بازدارنده خوردگی (د) نمودار تغییرات زبری نمونه‌ها

نتیجه گیری

این مطالعه قابلیت ال-هیدروکسی-پرولین به عنوان یک آمینو اسید زیست تخریب پذیر برای ممانعت از خوردگی فولاد کم کربن در محلول ۰/۱ مولار اسید کلریدریک را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که افزایش میزان ال-هیدروکسی-پرولین در الکترولیت خورنده از ۵۰ ppm به ۵۰۰ ppm، منجر به کاهش قابل توجه سرعت خوردگی و کاهش وزن کپن های فولادی می شود. این موضوع به دلیل جذب سطحی بازدارنده مورد استفاده بود. با این حال، بازده و کارایی ال-هیدروکسی-پرولین آزمایش شده با افزایش دمای محلول از ۲۹۸ کلوین به ۳۴۳ کلوین کاهش یافت. یافته های ترمودینامیکی نشان داد که ال-هیدروکسی-پرولین از طریق فرآیندهای فیزیکی (برهمکنش الکترواستاتیک) و شیمیایی (به اشتراک گذاری بار) روی سطح نمونه جذب می شود که منجر به افزایش انرژی فعال سازی مورد نیاز برای آغاز فرایند خوردگی می شود. ایزوترم جذب لانگمویر بر جذب بازدارنده خوردگی آزمایش شده حاکم است. همچنین عملکرد بازدارندگی ال-هیدروکسی-پرولین با اندازه گیری های الکتروشیمیایی تأیید شد. به عنوان مثال، افزایش غلظت ال پرلین منجر به کاهش i_{corr} و افزایش مقاومت انتقال بار در لایه دوگانه سطح فولاد کم کربن شد. تصاویر سه بعدی از سطح نمونه ها نشان می دهد که در حضور بازدارنده خوردگی به دلیل تشکیل یک فیلم محافظ که از رسیدن یون های خورنده به سطح فلز جلوگیری می کرد، میزان خوردگی و زبری سطح کاهش می یابد.

مراجع

- [1] M. Farsak, H. Keleş, M. Keleş, A new corrosion inhibitor for protection of low carbon steel in HCl solution, Corrosion Science, Vol. 98, 2015, Pp. 223-232.
- [2] S. Vikneshvaran, S. Velmathi, Reinforcement of low-carbon steel against corrosion in acidic condition by some Schiff bases: Experimental and theoretical studies, Materials and Corrosion, Vol. 69, 2018, Pp. 1084-1094.
- [3] M. Li, Y. Chen, W. Yang, 1-Vinyl-3-allyl Imidazolium Bromide as a New Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in 1 M HCl Solution, ChemistrySelect, Vol. 5, No. 4, 2020, Pp. 13511-13523.
- [4] M.F. Montemor, Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances, Surface and Coatings Technology, Vol. 258, 2014, Pp. 17-37.
- [5] T. Rabizadeh, S.R. Allahkaram, Corrosion resistance enhancement of Ni-P electroless coatings by incorporation of nano-SiO₂ particles, Materials & Design, Vol. 32, No. 1, 2011, Pp. 133-138.
- [6] Y. Zeng, K. Li, R. Hughes, J.-L. Luo, Corrosion mechanisms and materials selection for the construction of flue gas component in advanced heat and power systems, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 56, No. 48, 2017, Pp. 14141-14154.
- [7] X. Cheng, J. Xia, R.-j. Wu, W.-l. Jin, C.-g. Pan, Optimisation of sacrificial anode cathodic protection system in chloride-contaminated reinforced concrete structure, Journal of Building Engineering, Vol. 45, 2022, Pp. 103515.
- [8] S.Z. Salleh, A.H. Yusoff, S.K. Zakaria, M.A.A. Taib, A.A. Seman, M.N. Masri, M. Mohamad, S. Mamat, S.A. Sobri, A. Ali, Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review, Journal of Cleaner Production, Vol. 304, 2021, 127030.
- [9] I.W. Ma, S. Ammar, S.S. Kumar, K. Ramesh, S. Ramesh, A concise review on corrosion inhibitors: types, mechanisms and electrochemical evaluation studies, Journal of Coatings Technology and Research, Vol. 19, 2022, Pp. 241-268.
- [10] W. Guo, X. Zhao, D. Wang, Y. Li, L. Zhou, Z. Li, Y. Gao, Corrosion behavior of mild steel in presence of 2-chloromethylbenzimidazole and sodium molybdate in 1 M HCl, Russian Journal of Electrochemistry, Vol. 57, 2021, Pp. 970-977.
- [11] B.J. Usman, S.A. Umoren, Z.M. Gasem, Inhibition of API 5L X60 steel corrosion in CO₂-saturated 3.5% NaCl solution by tannic acid and synergistic effect of KI additive, Journal of Molecular Liquids, Vol. 237, 2017, Pp. 146-156.
- [12] L. Ezemonye, D. Ogeleka, F. Okieimen, Acute toxicity of industrial detergent (Neatex) and corrosion inhibitor (Norust CR486) to early stages of cichlids: Tilapia guineensis, Chemistry and Ecology, Vol. 23, No. 2, 2007, Pp. 131-138.

- [13] T. Rabizadeh, A. Matin Javid, M. Kazemi, N. Vahedian Khezerlou, H. Ghanbari, Investigating the potential of casein as a sustainable material in inhibiting the corrosion of aluminum in hydrochloric acid, *Materials and Corrosion*, Vol. 75, No. 10, 2023, Pp. 1521-1534.
- [14] H. Wei, B. Heidarshenas, L. Zhou, G. Hussain, Q. Li, K.K. Ostrikov, Green inhibitors for steel corrosion in acidic environment: state of art, *Materials Today Sustainability*, Vol. 10, 2020, Pp. 100044.
- [15] Y. Qiang, S. Zhang, B. Tan, S. Chen, Evaluation of Ginkgo leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor of X70 steel in HCl solution, *Corrosion Science*, Vol. 133, 2018, Pp. 6-16.
- [16] S.K. Shukla, M. Quraishi, Cefalexin drug: A new and efficient corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 120, No. 1, 2010, Pp. 142-147.
- [17] T. Rabizadeh, S.K. Asl, Casein as a natural protein to inhibit the corrosion of mild steel in HCl solution, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 276, 2019, Pp. 694-704.
- [18] T. Rabizadeh, S. Khameneh Asl, Chitosan as a green inhibitor for mild steel corrosion: Thermodynamic and electrochemical evaluations, *Materials and Corrosion*, Vol. 70, No. 4, 2019, Pp. 738-748.
- [19] T.M.H. Bach, H. Takagi, Properties, metabolisms, and applications of L-proline analogues, *Applied microbiology and biotechnology*, Vol. 97, No. 15, 2013, Pp. 6623-6634.
- [20] G.M. Tsoeunyane, E.M. Makhatha, Electrochemical and Surface Analytical Study on the Role of Poly (butylene-succinate)-l-proline during Corrosion of Mild Steel in 1 M HCl. *Chemistry*, Vol. 2, No. 4, 2020, Pp.900-917.
- [21] S. Pour-Ali, R. Tavangar, S. Hejazi, Comprehensive assessment of some l-amino acids as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in HCl: Insights from experimental and theoretical studies. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol.181, 2023, Pp.111550.
- [22] M. Parveen, M. Mobin, S. Zehra, R. Aslam, L-proline mixed with sodium benzoate as sustainable inhibitor for mild steel corrosion in 1M HCl: An experimental and theoretical approach. *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 1, 2018, Pp.7489-7507.
- [23] N. Faraj, K.A. Abdelghani, A.A. Idress, D.M. Ibrahim, L-Proline as a Green Corrosion Inhibitor in Aqueous Solutions for Carbon Steel. *Journal of Metallic Material Research*, Vol. 4, No. 1, 2021, Pp.1-5.
- [24] M.A. Amin, S.S. Abd El-Rehim, E.E. El-Sherbini, O.A. Hazzazi, M.N. Abbas, Polyacrylic acid as a corrosion inhibitor for aluminium in weakly alkaline solutions. Part I: Weight loss, polarization, impedance EFM and EDX studies, *Corrosion Science*, Vol. 51, No. 3, 2009, Pp. 658-667.
- [25] K. Sayin, H. Jafari, Effect of pyridyl on adsorption behavior and corrosion inhibition of aminotriazole, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 68 (2016) 431-439.
- [26] J. Radilla, G.E. Negrón-Silva, M. Palomar-Pardavé, M. Romero-Romo, M. Galván, DFT study of the adsorption of the corrosion inhibitor 2-mercaptoimidazole onto Fe (1 0 0) surface, *Electrochimica Acta*, Vol. 112, 2013, Pp. 577-586.
- [27] O. Li, Y. Zhang, Y. Cheng, X. Zuo, Y. Wang, X. Yuan, H. Huang, Effect of Temperature on the Corrosion Behavior and Corrosion Resistance of Copper–Aluminum Laminated Composite Plate. *Materials*, Vol. 15, No. 4, 2022, 1621.
- [28] M.M. Fares, A. Maayta, M.M. Al-Qudah, Pectin as promising green corrosion inhibitor of aluminum in hydrochloric acid solution, *Corrosion Science*, Vol. 60, 2012, Pp. 112-117.
- [29] A. Fawzy, M. Abdallah, I. Zaafarany, S. Ahmed, I. Althagafi, Thermodynamic, kinetic and mechanistic approach to the corrosion inhibition of carbon steel by new synthesized amino acids-based surfactants as green inhibitors in neutral and alkaline aqueous media, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 265, 2018, Pp. 276-291.
- [30] A. Kokalj, On the use of the Langmuir and other adsorption isotherms in corrosion inhibition, *Corrosion Science*, 217 (2023) 111112.
- [31] Y. Zhu, M.L. Free, G. Yi, The effects of surfactant concentration, adsorption, aggregation, and solution conditions on steel corrosion inhibition and associated modeling in aqueous media, *Corrosion Science*, Vol. 102, 2016, Pp. 233-250.
- [32] S. Wang, T. Wang, Three Monohalogenated Aminopyrazines as Effective Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Acid Medium, *ChemistrySelect*, Vol. 8, No. 7, 2023, Pp. e202204242.
- [33] I.B. Onyeachu, I.B. Obot, A.Y. Adesina, Green corrosion inhibitor for oilfield application II: The time–evolution effect on the sweet corrosion of API X60 steel in synthetic brine and the inhibition performance of 2-(2-pyridyl) benzimidazole under turbulent hydrodynamics, *Corrosion Science*, Vol. 168, 2020, 108589.
- [34] A. Ehsani, M. Ahmadi, M. Ghanbari, Inhibitory effect of newly synthesized organic compound in corrosion of aluminum: electrochemical investigation, *Advances in Analytical Chemistry*, Vol. 5, 2015, Pp. 19-25.