

بررسی الکتروشیمیایی قرص رپاکلیناید به عنوان باز دارنده خوردگی برای فولاد نرم در محلول اسید سولفوریک اسید

نرگس عبداللهی گراغانی

کارشناسی ارشد رشته شیمی، گرایش تجزیه

چکیده

در این تحقیق، خوردگی فولاد ملایم CK45 در محلول اسید سولفوریک ۰.۵ مولار در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف قرص رپاگلینید با استفاده از تکنیک‌های قطبش تافل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن بازدارنده به محلول اسیدی منجر به کاهش نرخ خوردگی می‌شود. بازدارنده به عنوان یک بازدارنده مخلوط رفتار می‌کند زیرا هر دو شاخه کاتدی و آندی منحنی‌های پلاریزاسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نتایج حاصل از تست پلاریزاسیون تافل و EIS نشان داد که جذب رپاگلینید بر روی فولاد کربنی در محلول اسید سولفوریک از ایزوترم لانگمویر پیروی می‌کند. توافق خوبی بین راندمان بازداری که از اندازه‌گیری قطبش و EIS بدست می‌آید وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: رپاگلینید، پلاریزاسیون تافل، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، فولاد ملایم، بازدارنده سبز.

مقدمه

فلزاتی مانند آهن، آلومینیوم، مس، منیزیم و آلیاژهای آنها در صنایع بیشماری از جمله صنایع دریایی، هوا فضا و ... کاربرد دارند. هرچند این فلزات به خاطر خواص فیزیکی خود بسیار سودمندند، اما مستعد خوردگی هستند. خوردگی همیشه دلیل عمده از بین رفتن ماده و انرژی بوده است (۱) و نتیجه آن صرف هزینه‌های بسیار زیادی است که به صورت مستقیم و غیر-مستقیم توسط صاحبان صنایع پرداخت می‌گردد. مسئله خوردگی سالیانه هزینه‌های هنگفتی به جای می‌گذارد به طوری که می‌توان گفت هزینه‌های خوردگی از هزینه مجموع بلایا مثل سیل، زلزله، آتش‌سوزی و تصادفات جاده‌ای خیلی بیشتر است. زیرا هر جا فلز و مواد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند خوردگی با درجه و شدت‌های متفاوتی واقع می‌گردد.

یکی از جامع‌ترین تعاریف خوردگی، تخریب و از بین رفتن مواد در اثر انجام واکنش شیمیایی با محیط اطراف می‌باشد. خوردگی الکتروشیمیایی در فلز وقتی رخ می‌دهد که اتم‌های فلز اکسیده شده و سپس شبکه فلزی را به صورت یون ترک کنند. الکترون‌های ظرفیت همراه یون‌های فلزی روی فلز قرار گرفته و ایجاد سطح فلزی پر الکترون می‌نمایند. اکسایش فلز در نتیجه یک واکنش الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد. نیم واکنش اکسایش به واکنش آندی معروف است و در سل الکتروشیمیایی این قسمت به آند معروف می‌باشد. کاهش گونه‌های فعال الکتروشیمیایی که الکترون‌های اضافه در سیستم را دریافت کنند به واکنش کاتدی معروف بوده و در سل الکتروشیمیایی این قسمت را کاتد می‌گویند (۲).

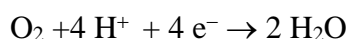
فرایند الکتروشیمیایی خوردگی استیل:

هنگامی که آهن خورده می‌شود، سرعت خوردگی معمولاً توسط واکنش کاتدی کنترل می‌شود. چندین واکنش مختلف کاتدی که غالباً مواجه می‌شوند در برابر خوردگی فلز، وجود دارد. شایع‌ترین آنها عبارتند از:

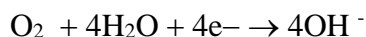
آزاد شدن هیدروژن:



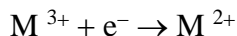
کاهش اکسیژن (در محلول اسیدی):



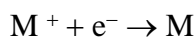
کاهش اکسیژن (در محلول خنثی یا بازی):



احیا یون فلزی:



رسوب فلز:



آزاد شدن هیدروژن یک واکنش کاتدی است که غالباً در محلول‌های اسیدی متوسط مشاهده می‌شود. کاهش اکسیژن بسیار معمول است، از آنجایی که هر محلول آبی در تماس با هوا است، قادر به انجام این واکنش است. کاهش یون فلز و رسوب فلز کمتر رایج است. در تمام واکنش‌های فوق مصرف الکترون زیاد است از آنجا که واکنش‌های آندی و کاتدی در طی خوردگی وابستگی متقابل دارند، کاهش خوردگی با کاهش سرعت هر دو واکنش امکان پذیر است بنابراین، در صورتی که سطح فلز با

رنگ و یا دیگر فیلم، پوشش داده شود میزان واکنش های آندی و کاتدی تا حد زیادی کاهش می یابد و خوردگی عقب خواهد افتاد. رفتار خوردگی فلزات، و در نتیجه فرآیندهای بازدارنده خوردگی بصورت خوب، تا حد زیادی به آنیون ترکیب الکترولیت بستگی دارد (۳۲).

بیان چند کار پژوهشی

تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از بازدارنده های خوردگی با استفاده از روشهای پلاریزاسیون تافل و امپدانس شده است که به چند مورد از آنها در زیر اشاره می کنیم:

۱- اثر هم افزایی (اثر سینرژیک) بین یون سریم (IV) و وانیلین بر روی خوردگی فولاد سرد نورد (CRS) در محلول هیدروکلراید ۱ M برای اولین بار با روشهای کاهش وزن، پلاریزاسیون تافل، و اسپکتروفتومتر مرئی و ماوراء بنفش (UV-VIS)، طیف سنجی فوتوالکترون اشعه X(XPS) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وانیلین اثر بازدارندگی متوسط دارد، و جذب وانیلین از ایزوترم جذب تمکین پیروی می کند. برای Ce^{4+} ، اثر بازدارندگی آن ناچیز است. با این حال، اختلاط Ce^{4+} با وانیلین به طور قابل توجهی بهبود عملکرد بازدارندگی، و اثر بازدارندگی هم افزایی قوی ایجاد می شود. با توجه به نتایج به دست آمده، مکانیسم سینرژیسیم ارائه شده است (۳۳).

۲- اثر بازدارندگی وانیلین (4-هیدروکسی-3-متوکسی بنزآلدید) و ۳و۴-دی هیدروکسی بنزآلدید در محیط اسید هیدروکلریک بر فولاد با ترکیب شناخته شده بررسی شده است. با استفاده از روشهای کاهش وزن، روش پلاریزاسیون و امپدانس مشخص شده است که میزان خوردگی را کاهش داده و درصد بازدارندگی و افزایش درجه پوشش سطح با افزایش غلظت افزایش می یابد. از سوی دیگر راندمان بازدارندگی با کاهش دما افزایش می یابد. بازدارنده ها به نظر می رسد که از طریق جذب ایزوترم لانگمویر عمل می کنند. مطالعات پلاریزاسیون نشان می دهد ترکیبات مورد مطالعه بازدارنده های مخلوط بودند. تمام روشهای به کار گرفته شده در توافق معقول هستند (۳۴).

۳- اثر بازدارندگی داروی تاریخ مصرف گذشته آمبروکسول^۱ بر خوردگی فولاد نرم محلول HCl یک مولار و H_2SO_4 یک مولار در سال ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار گرفت (۳۵). بر اساس این کار مشخص شد که این دارو یک بازدارنده موثر است. بازدارنده از نوع مختلط بوده و از ایزوترم جذب سطحی لانگمویر پیروی می کند.

۴- فودا^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ اثر بازدارندگی داروی آملودیپین^۳ بر روی فولاد کربنی در محیط کلریدریک اسید ۱ مولار را با استفاده از روشهای کاهش وزن، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار دادند (۳۶). مقادیر بازده بازدارندگی با افزایش غلظت بازدارنده افزایش می یابد. جذب این بازدارنده از همدمای جذب لانگمویر پیروی می کند. نتایج حاصل از سه روش اندازه گیری با هم همخوانی دارند.

¹ Ambroxol

² Fouda

³ Amlodipine Besylate

بحث

اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون تافل

مقادیر بازده بازدارندگی خوردگی برای اندازه‌گیری پلاریزاسیون تافل با فرمول زیر بدست آمده‌اند:

$$IE\% = \frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}} \times 100 \quad (5-1)$$

که i_{corr} و i'_{corr} چگالی جریان خوردگی به ترتیب در غیاب و حضور بازدارنده می‌باشند. بازده بازدارندگی خوردگی محاسبه شده از داده‌های پلاریزاسیون تافل برای این بازدارنده در دمای محیط در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱: بازده بازدارندگی برای خوردگی فولاد نرم در محلول اسیدسولفوریک ۰/۵ مولار و غلظت‌های مختلف بازدارنده.

C/ppm	$i_{corr}/\mu A.cm^2$	$-E_{corr}/mV$	$\beta_a/mV.dec^{-1}$	$\beta_c/mV.dec^{-1}$	IE%
۰	۷۸۷	۵۰۳	۹۰	۱۴۲	-
۲۵	۴۱۲	۴۹۸	۶۲	۱۲۶	۴۸
۵۰	۱۸۵	۴۹۲	۴۲	۱۲۸	۷۶
۱۰۰	۹۳	۴۹۲	۳۷	۱۱۷	۸۸
۲۰۰	۲۹	۴۷۳	۲۵	۱۱۱	۹۶

با بررسی نمودارهای پلاریزاسیون در شکل ۱-۴ و همچنین جدول ۵-۱ مشاهده می‌شود که با افزایش بازدارنده به محلول آزمایش جریان خوردگی کاهش پیدا کرده است. کاهش جریان خوردگی با افزایش بازدارنده نشان از جذب این بازدارنده بر روی سطح فلز و تشکیل لایه محافظ می‌باشد. بالا رفتن بازده بازدارندگی در اثر افزایش غلظت نشان از تکمیل این لایه محافظ در غلظت‌های بالا می‌باشد. همانگونه که در منحنی‌های مذکور مشاهده می‌شود نمودارهای بدست آمده برای آلیاژ فولاد در حضور بازدارنده شکل تقریباً یکسانی را دارند، لذا می‌توان انتظار داشت که در حضور بازدارنده واکنش کاتدی و آندی یکسانی در سطح الکتروود روی دهد. به طور کلی اگر پتانسیل مدار باز یا پتانسیل خوردگی به مقادیر فعال‌تر (منفی‌تر) نزول کند بیانگر عملکرد بازدارنده به صورت کاتدی می‌باشد و با تغییر در جهت مثبت نشانگر عملکرد آندی بازدارنده است. بازدارنده‌های مختلط معمولاً باعث تغییرات زیادی در پتانسیل نمی‌گردند (۳۷ و ۳۸). با توجه به تغییر جزئی در پتانسیل خوردگی و شیب‌های تافل آندی و کاتدی می‌توان گفت که بازدارنده مذکور از نوع مختلط می‌باشد.

محاسبه پوشش سطح (θ):

مقدار θ بیان کننده سطح پوشیده شده از فلز توسط بازدارنده است و هر چه مقدار آن بیشتر باشد نشان از پوشش بهتر سطح توسط بازدارنده می باشد و امکان رسیدن یون های خورنده به سطح فلز را کاهش می دهند برای محاسبه پوشش سطح، می توان نوشت:

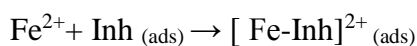
$$\theta = \frac{IE\%}{100} \quad (39)$$

ایزوترم های جذب

در این قسمت به بررسی ایزوترم های جذب می پردازیم که می توانند اطلاعات مفیدی در مورد مکانیسم جذب سطحی بازدارنده در اختیار بگذارند. یک اصل پذیرفته شده در مورد بازدارنده ها آن است که اولین مرحله از جذب یک بازدارنده آلی بر روی سطح فلز طبق رابطه زیر شامل جایگزینی بازدارنده به جای یک یا چند مولکول آب است که بر سطح فلز جذب شده اند.



در مرحله بعد ملکول های بازدارنده می توانند با یون های Fe^{2+} آزاد، که بر اثر واکنش خوردگی در سطح فلز ایجاد شده اند تشکیل کمپلکس دهند و یک کمپلکس فلز - بازدارنده ایجاد شود (۴۰).



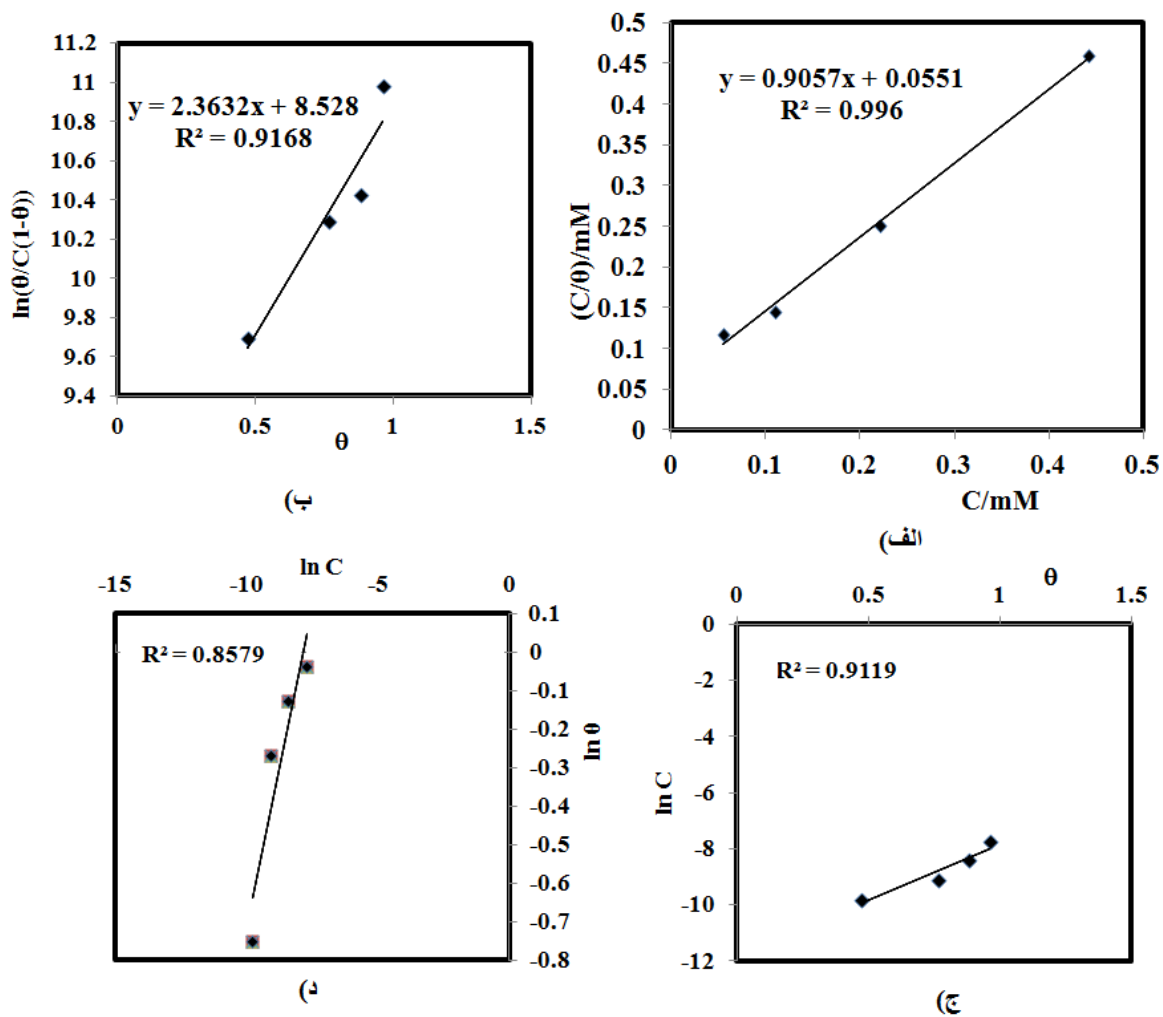
این کمپلکس با توجه به انحلال نسبی که دارد می تواند به عنوان یک بازدارنده یا کاتالیست در انحلال فلز، نقش داشته باشد (۴۱). از این رو نوع توانایی محیط واکنش در انحلال آن نقش مهمی را در عملکردش ایفا می کند. بنابراین می توان چنین عنوان کرد در غلظت های پایین بازدارنده، به دلیل عدم تشکیل یک لایه کامل کمپلکس فلز- بازدارنده بر سطح فلز (به دلیل کم بودن بازدارنده) کمپلکس حد واسط در محلول اسیدی به راحتی حل می گردد، اما زمانی که غلظت بازدارنده به اندازه کافی زیاد باشد یک لایه کامل از کمپلکس مذکور روی سطح فلز ایجاد می شود و این لایه انحلال کمی در محلول اسیدی دارد و از رسیدن یون های خورنده به سطح فلز خودداری می نماید (۴۲).

بررسی همدماهای جذب که رفتار جذبی و همچنین مکانیسم آن را توصیف می کند یکی از مهمترین قسمت های این مطالعه بود زیرا این همدمها می توانند اطلاعات بسیار مهمی از طبیعت واکنش فلز- بازدارنده را ارائه دهند (۴۳). اگر جذب ساده بر روی سطح فلز را در نظر بگیریم پوشاندگی سطح را می توان از تکنیک های الکتروشیمیایی متنوع بدست آورد و با استفاده از θ می توان بهترین همدمها برای فرایند جذب را انتخاب نمود (۴۴).

برای بررسی ایزوترم جذب سطحی، ایزوترم های متفاوتی از جمله لانگمویر، تمکین و فرامکین به کار گرفته شد. برای پیدا کردن نوع ایزوترم بایستی اطلاعات تجربی (آزمایشگاهی) را با فرمول های ارائه شده مورد بررسی قرار داد و دید که اطلاعات با کدام ایزوترم بهترین همخوانی را دارد. در ایزوترم لانگمویر منحنی $\frac{C}{\theta}$ برحسب C (غلظت)، در ایزوترم تمکین θ برحسب

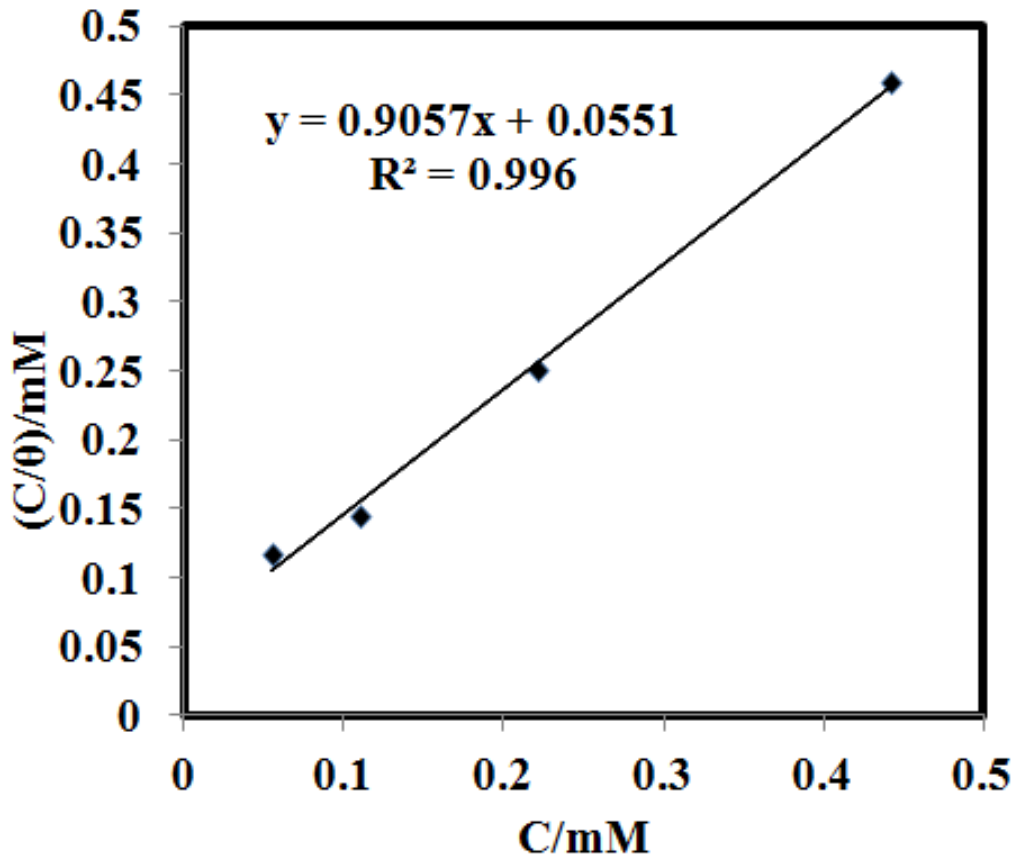
$\ln C$ (۴۵) و در ایزوترم فرامکین $\ln \left[\frac{C(1-\theta)}{\theta} \right]$ برحسب θ بایستی خط راست ارائه دهد. با بررسی ایزوترم های ذکر شده،

ایزوترم مناسب برای جذب این بازدارنده، ایزوترم جذب لانگمویر می باشد (۴۶).



(شکل ۵-۱): نمودار همدماهای جذب حاصل از اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون تافل برای بازدارنده رپاگلییناید.

(الف) لانگمویر (ب) فرمکین (ج) تمکین (د) فرنرلیچ



شکل (۵-۲) نمودار همدمای جذب لانگمویر حاصل از اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون تافل برای بازدارنده رباگلیناید.

ایزوترم جذب لانگمویر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{C}{\theta} = C + \frac{1}{K} \quad \text{یا} \quad \theta = \frac{KC}{1 + KC} \quad (۵-۳)$$

که در آن θ پوشش سطح، C غلظت بازدارنده و K ثابت تعادل جذب سطحی است. با رسم C/θ در مقابل C خط راستی به دست می‌آید (شکل ۵-۱). نزدیکی ضریب همبستگی به $1/0$ برای بازدارنده دلیل بر پیروی جذب این بازدارنده از ایزوترم جذب لانگمویر است.

ثابت تعادل جذب (K) با انرژی آزاد جذب (ΔG_{ads}^0) از معادله زیر پیروی می‌کند (۴۸).

$$K = \left(\frac{1}{55.5} \right) \exp \left(\frac{-\Delta G_{ads}^0}{RT} \right) \quad (۵-۴)$$

که ۵۵/۵ بیانگر غلظت آب بر حسب مول است که در محلول‌های رقیق استفاده می‌شود. با استفاده از عرض از مبدا نمودار لانگمویر مربوط به بازدارندها می‌توان مقدار K را محاسبه کرد. با رسم نمودار C/θ بر حسب C و بدست آوردن معادله خط عبوری، عرض از مبدا این نمودار برابر معکوس K می‌باشد. بعد از به‌دست آوردن مقدار K و با توجه به معادله (۴-۵) می‌توان ΔG_{ads}^0 را محاسبه کرد. مقادیر ΔG_{ads}^0 برای این بازدارنده در جدول (۲-۵) ذکر گردیده است منفی بودن ΔG_{ads}^0 نشان می‌دهد که جذب بر سطح فلز خودبخودی و پایدار می‌باشد (۴۷ و ۴۸).

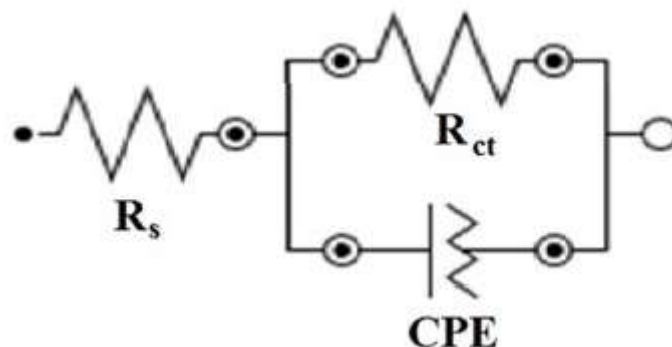
جدول ۲-۵: مقادیر ثابت تعادل و انرژی آزاد جذب بدست آمده از روش پلاریزاسیون برای بازدارنده ریپاگلیناید.

$K(L.mol^{-1})$	$\Delta G_{ads}^0(kJ.mol^{-1})$
۱۸۱۴۹	-۳۴/۲۵

همانگونه که مشاهده می‌شود انرژی آزاد جذب محاسبه شده برای بازدارنده کمتر از $-۴۰ kJ.mol^{-1}$ که آستانه بین جذب فیزیکی-شیمیایی است، می‌باشد (۴۹). بنابراین جذب سطحی بازدارنده بر روی فولاد نرم از نوع فیزیکی می‌باشد. مقدار انرژی جذب برای بازدارنده مورد نظر منفی می‌باشد که بیانگر خودبه‌خودی فرآیند جذب می‌باشد.

اندازه‌گیری‌های امپدانس الکتروشیمیایی

شکل (۲-۵) مدار الکتریکی معادل برای تجزیه و تحلیل نمودارهای امپدانس را نشان می‌دهد. در این شکل، R_s مقاومت محلول است و R_{ct} مقاومت انتقال بار می‌باشد.



شکل (۲-۵) مدار الکتریکی معادل برای طیف‌های امپدانس

امپدانس عنصر فاز ثابت (CPE) بصورت زیر تعریف شده است (۵۰):

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (5-5)$$

که در آن Y_0 ثابت تناسب، j برابر با $\sqrt{-1}$ ، w فرکانس زاویه‌ای و n تغییر فاز می‌باشد. اگر $n = 0$ باشد Z_{CPE} نشان‌دهنده یک مقاومت برابر با $R = Y_0^{-1}$ ، اگر $n = 1$ باشد Z_{CPE} نشان‌دهنده یک خازن برابر با $C = Y_0$ و اگر $n = -1$ باشد Z_{CPE} نشان‌دهنده یک اندوکتانس برابر با $L = Y_0^{-1}$ می‌باشد.

بازده بازدارندگی در جدول ۳-۵ از طریق عبارت زیر محاسبه می‌شود:

(۵-۶)

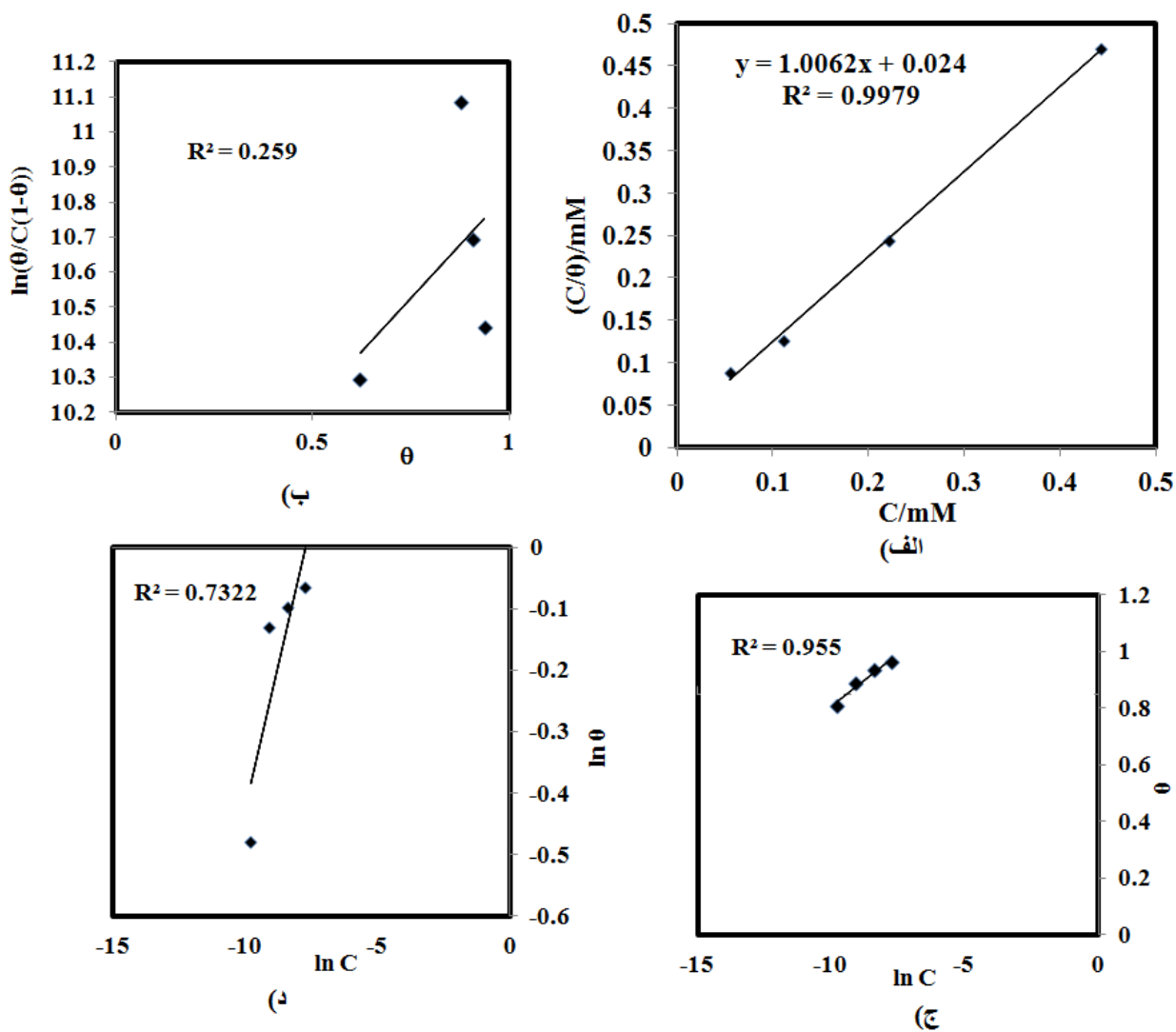
$$IE\% = \frac{R'_{ct} - R_{ct}}{R'_{ct}} \times 100$$

R'_{ct} و R_{ct} مقاومت انتقال بار به ترتیب در غیاب و حضور بازدارنده می‌باشند. جدول ۳-۵ لیست پارامترهای امپدانس به همراه بازده بازدارندگی را در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف از بازدارنده مورد نظر نشان می‌دهد.

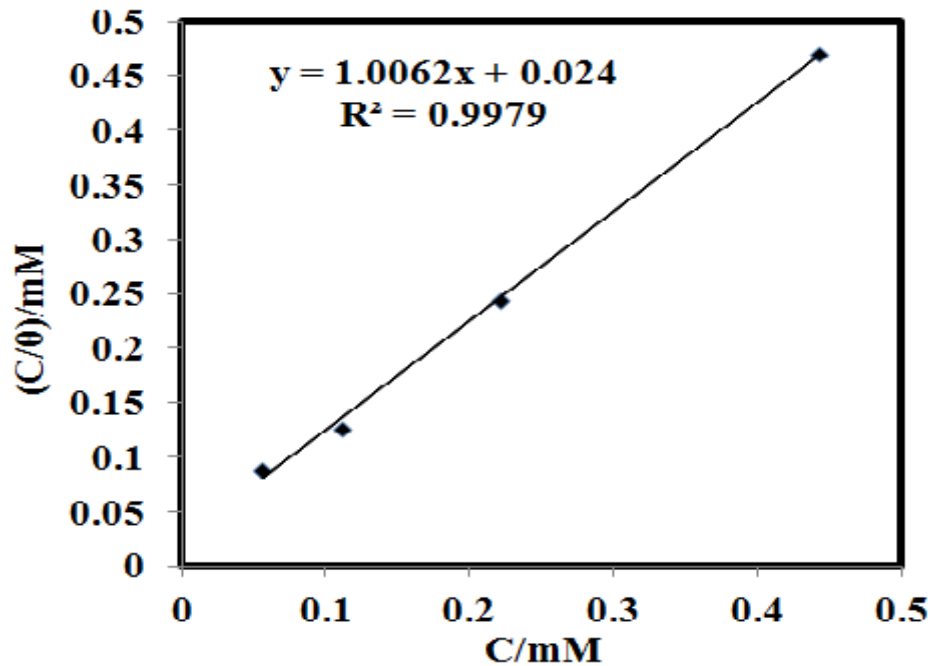
جدول ۳-۵ مقدار پارامترهای طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی به همراه بازده بازدارندگی برای خوردگی فولاد نرم در محلول اسید سولفوریک ۰/۵ مولار و غلظت‌های مختلف از بازدارنده مورد نظر.

C/ppm	$R_s/\Omega.cm^2$	$R_{ct}/\Omega.cm^2$	n	IE%
۰	۱/۷۸	۲۷	۰/۸۹۷	-
۲۵	۱/۸۹	۷۱	۰/۸۹۰	۶۲
۵۰	۱/۹۳	۲۲۱	۰/۸۷۴	۸۷
۱۰۰	۲/۰۵	۲۸۹	۰/۸۷۱	۹۱
۲۰۰	۲/۴۰	۴۳۲	۰/۸۸۱	۹۴

باتوجه به شکل ۴-۲ در فصل قبل و همینطور مشاهده جدول ۳-۵، با افزایش غلظت بازدارنده مقاومت انتقال بار افزایش، و در نتیجه بازده بازدارندگی افزایش پیدا می‌کند.



(شکل ۵-۳): نمودار همدماهای جذب حاصل از اندازه‌گیری‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای بازدارنده رپاگلیناید. الف) لانگمویر ب) فرمکین ج) تمکین د) فرنرندلیچ



شکل (۵-۵) نمودار همدمای جذب لانگمویر حاصل از اندازه‌گیری‌های طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای بازدارنده رپاگلیناید.

شکل ۵-۳ ایزوترم‌های جذب حاصل از اندازه‌گیری‌های امپدانس را نشان می‌دهد. نزدیکی ضریب همبستگی به ۱/۰ برای این بازدارنده نشان از پیروی جذب بازدارنده از ایزوترم لانگمویر است. همچنین با توجه به مقادیر K و ΔG°_{ads} برای هر دو بازدارنده در جدول (۵-۴) جذب این بازدارنده بر روی سطح آلیاژ از نوع فیزیکی می‌باشد.

جدول ۵-۴ مقادیر ثابت تعادل و انرژی آزاد جذب بدست آمده از روش امپدانس برای بازدارنده رپاگلیناید.

$K(L.mol^{-1})$	$\Delta G^{\circ}_{ads}(kJ.mol^{-1})$
۴۱۶۶۶	-۳۶/۳۱

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج نشان دادند که بازدارنده رپاگلیناید بازدارنده خوبی برای جلوگیری از خوردگی فولاد نرم در محیط اسیدسولفوریک می‌باشد. بازدارنده مورد نظر در محیط اسید سولفوریک به صورت یک بازدارنده مختلط عمل کرده، عدم تغییر پتانسیل خوردگی در حضور بازدارنده نیز مؤید این رفتار است و افزایش غلظت آن جریان خوردگی را کاهش و بازده بازدارندگی را افزایش می‌دهد.

به‌طور کلی جذب این بازدارنده روی سطح فولاد نرم از ایزوترم جذب سطحی لانگمویر پیروی می‌کند. فرآیند جذب براساس داده‌های مذکور از نوع خودبخودی است. مقادیر ΔG° نشان دهنده جذب فیزیکی بازدارنده بر روی سطح فلز در محیط اسیدی می‌باشد.

منابع و ماخذ

- ۱- فونتانا، مارس جی. مهندسی خوردگی. ترجمه احمد ساعتچی، چاپ هشتم، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۸۸، ص ۲.
- ۲- گلغدار، محمد علی. روش‌های بازرسی و نظارت بر خوردگی. چاپ دوم، انتشارات ارکان دانش تهران، ۱۳۹۳، ص ۵.
- ۳- زمانیان، رحیم. خوردگی و روش‌های کنترل آن. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۴، ص ۹۷.
- ۴- علی‌زاده طوسی، محمد تقی. خوردگی فلزات و جلوگیری از آن. چاپ دوم، انتشارات مهتاب، ۱۳۶۰، ص ۹.
- ۵- پاشایی فرد مقدم، فاطمه. خوردگی فلزات و آلیاژها. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۵۴، ص ۳۵.
- ۶- مفیدی، جمشید. اصول خوردگی و حفاظت فلزات. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۷، ص ۱۸.
- ۷- پیرون، دی.ال. الکتروشیمی خوردگی. ترجمه دکتر محمد علی گلغدار و مهندس احمد رضایی، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۸، ص ۲۱.
- ۸- رضی، سید محمد. کنترل خوردگی در صنایع. چاپ اول، انجمن خوردگی ایران، ۱۳۷۸، ص ۳۳.
- ۹- ساستری، وی.اس. اصول و کاربرد بازدارنده‌های خوردگی. ترجمه محمد رضا نفری، چاپ اول، انجمن خوردگی ایران، ۱۳۸۳، ص ۱۵۲.
- ۱۰- رسولی، سوسن. نانو مواد و خطرات بالقوه تولید و کاربرد آنها برای سلامتی انسان و محیط زیست، انتشارات نفسیان با همکاری پژوهشکده صنایع رنگ، ۱۳۸۵، ص ۱۳۶.
- ۱۱- خامئی، علی اکبر. افشان، مهدی. ضرورت به کار گیری فناوری نانو در صنایع دریایی ایران. سیزدهمین همایش صنایع دریایی ایران، کیش، ۱۳۹۰.
- ۱۲- استنبری، ال.یوجین. اصول خوردگی الکتروشیمی. ترجمه مریم احتشام زاده، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۹، ص ۳۹۵-۳۹۶.
- ۱۳- بهرامی پناه، نیلوفر. مطالعه خواص ضد خوردگی کامپوزیت پلی پیروول/پلی آنیلین (به عنوان پلیمر هادی) بر روی پنل کربن استیل با استفاده از طیف‌سنجی الکتروشیمیایی. نشریه علوم و فناوری رنگ، ۱۳۸۶، ص ۶۵-۵۷.