

تأثیر بازدارنده‌ای بر پایه ایمیدازولین بر خوردگی فولاد API 5L Gr.B در آب دریای ساختگی

آرش فتاح الحسینی*^۱، صادق مومنی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*a.fattah@basu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۲۲)

چکیده

در این پژوهش، رفتار خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B و میزان تزریق بازدارنده‌ای بر پایه ایمیدازولین در آب دریای ساختگی بررسی شد. برای این منظور پس از غوطه‌وری نمونه‌ها در پتانسیل مدار باز به مدت زمان ۳۰ دقیقه، آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی انجام شدند. منحنی‌های پلاریزاسیون تافل نشان داد که کم‌ترین مقدار چگالی جریان خوردگی با افزودن مقدار ۴۰ ppm از بازدارنده به دست می‌آید. نتایج آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی آشکار ساخت که بیش‌ترین مقدار مقاومت پلاریزاسیون با افزودن مقدار ۴۰ ppm از بازدارنده به دست می‌آید که تایید کننده نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون تافل است. هم‌چنین نتایج آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی آشکار ساخت که بهترین مدار معادل دارای دو ثابت زمانی است.

واژه‌های کلیدی:

بازدارنده، مقاومت پلاریزاسیون، رفتار خوردگی، فولاد کربنی API 5L Gr.B.

۱- مقدمه

اسیدشویی، سیستم‌های خنک‌کننده، صنایع انتقال آب و یا صنایع نفت و گاز. هم‌چنین با توجه به نوع محیط، بازدارنده‌ها به بازدارنده‌های اسیدی، خنثی و یا قلیایی تقسیم می‌شوند. هم‌چنین بر اساس مکانیزم بازدارندگی مانند جذب فیزیکی، جذب شیمیایی، تشکیل سد حفاظتی، مسدود ساختن سایت‌های فعال، اختلال در واکنش‌های الکتروود و تغییر در خواص لایه دوگانه الکتريکی می‌توان انواع بازدارنده‌ها را تقسیم‌بندی نمود [۱-۶]. به‌طور کلی استخراج، بهره‌برداری، انتقال، پالایش و نگهداری

به‌طور کلی بازدارنده‌ها تحت مکانیزم‌های مختلف موجب کاهش سرعت خوردگی می‌شوند. با توجه به نیم‌واکنش‌های اکسایش و احیا، بازدارنده‌ها را می‌توان بر مبنای میزان تاثیر و اختلال در هر یک از واکنش‌های ذکر شده به بازدارنده‌های آندی، کاتدی و یا مختلط تقسیم کرد. طبقه‌بندی دیگر بازدارنده‌ها بر اساس ماهیت ترکیب شیمیایی است که بازدارنده‌ها به آلی و غیرآلی تقسیم می‌شوند. تقسیم بندی دیگر بازدارنده‌ها بر اساس کاربرد آن‌ها است مانند بازدارنده‌های

است.

در این پژوهش، هدف بررسی رفتار خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B (لوله‌های استفاده شده در مجتمع دریایی سروش و نوروز) در محیط آب دریای شبیه‌سازی شده (محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر) با استفاده از آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بوده است. هم‌چنین در این محیط تاثیر افزودن ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm از بازدارنده تجاری WS 86-1 (بر پایه ایمیدازولین) ساخت شرکت شیمیایی انرژي سمنان، بر رفتار خوردگی فولاد و بازده حفاظتی حاصله بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از الکترودهای از جنس فولاد API 5L Gr.B با مساحت ۱ سانتی‌متر مربع، با ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) ۰/۲۸ کربن، ۰/۳ فسفر، ۰/۳ گوگرد، ۰/۰۴ تیتانیم، ۱/۲ منگنز و باقی‌مانده آهن به‌عنوان الکتروود کار استفاده شد. برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی، پس از اتصال سیم مسی روکش‌دار به نمونه‌ها و انجام مانت سرد، عملیات سنباده‌زنی تر تا سنباده ۱۲۰۰ انجام شد. سپس نمونه‌ها با آب دوبار تقطیر شسته و پس از خشک کردن با دمش هوا، به‌سرعت تحت آزمون‌ها قرار گرفتند.

تمامی آزمون‌ها با استفاده از سل استاندارد سه الکتروودی انجام شدند. در این سل از الکتروود پلاتین به‌عنوان الکتروود کمکی و از الکتروود نقره/کلرید نقره با محلول کلرید پتاسیم اشباع به‌عنوان الکتروود مرجع استفاده و تمامی پتانسیل‌ها نسبت به این الکتروود مرجع گزارش شده است. برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی و شبیه‌سازی آب دریا، از محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر استفاده شد.

به‌منظور ارزیابی رفتار خوردگی فولاد API 5L Gr.B در محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر و بررسی تاثیر افزودن بازدارنده، ابتدا هر نمونه در پتانسیل مدار باز به مدت ۳۰ دقیقه نگهداری شد. سپس آزمون‌های پلاریزاسیون تافل (با نرخ روبش ۱ میلی‌ولت بر

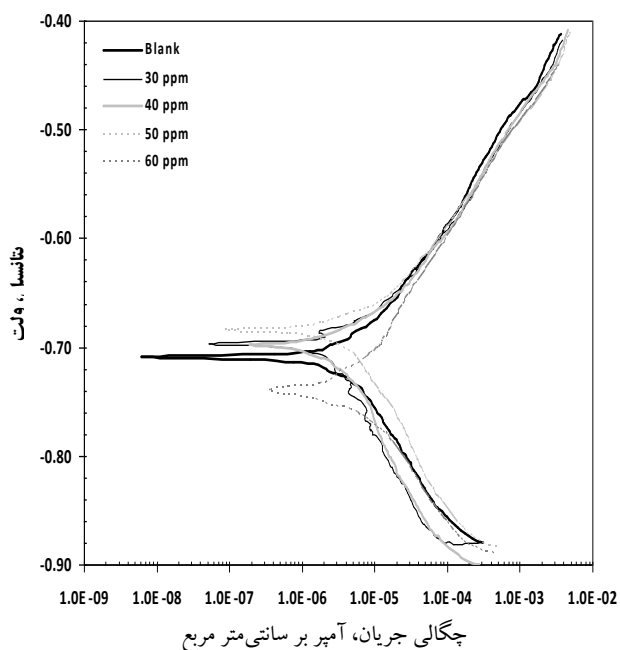
نفت و گاز شامل مراحل مختلف و پیچیده‌ای است و یکی از معضلات موجود در این مراحل مشکلات ناشی از خوردگی می‌باشد. از جمله انواع خوردگی رایج در صنایع نفت و گاز می‌توان به خوردگی ناشی از یون کلر، گازهای دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن، خوردگی گالوانیکی، خوردگی میکروبی و یا خوردگی ناشی از نشست اکسیژن به محیط اشاره نمود [۷-۹]. در این صنایع استفاده از بازدارنده‌های آلی که در ترکیب آن‌ها عناصر گروه پنجم و ششم جدول تناوبی شرکت دارند، به خصوص ترکیبات آلی نیتروژن‌دار با رشته‌های طولیل هیدروکربنی مانند ایمیدازولین و هم‌چنین مشتقات اسید چرب آلیفاتیک و مشتقات رزین متداول می‌باشد [۱۰-۱۲].

خوردگی داخلی خطوط لوله ناشی از آب دورریز و برگشتی یکی از معضلات جدی تاسیسات نفتی است که می‌تواند منجر به وقوع خوردگی‌های شدید و در نتیجه تعویض بخشی از سیستم لوله‌کشی، تعویض لوله‌ها، شیرها و پمپ‌های مسیر آب برگشتی شود. فولادهای کربنی یکی از فولادهای پرکاربرد در صنایع نفت می‌باشد که خوردگی آن‌ها به‌علت حضور یون کلر سبب تحمیل هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیمی مانند هزینه‌های تعمیرات خطوط لوله، تعویض لوله‌ها و پمپ‌های خورده شده و نیروی انسانی می‌شود. یکی از موثرترین راه‌های مقابله با خوردگی مورد بحث، استفاده از بازدارنده‌ها است. بنابراین تعیین موثرترین انواع بازدارنده‌ها و میزان موثر غلظت تزریق جهت حصول حداکثر بازده حفاظتی امری ضروری و اجتناب ناپذیر است [۱۳-۱۵].

از آنجایی که فولاد API 5L Gr.B یکی از فولادهای پرکاربرد در صنایع نفت و گاز می‌باشد و خوردگی آن به‌علت حضور یون کلر سبب تحمیل هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیمی مانند هزینه‌های تعمیرات خطوط لوله، تعویض لوله‌ها و پمپ‌های خورده شده و نیروی انسانی می‌شود. بنابراین تعیین موثرترین انواع بازدارنده‌ها و میزان موثر غلظت تزریق جهت حصول حداکثر بازده حفاظتی با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی مانند طیف-سنجی امپدانس الکتروشیمیایی امری ضروری و اجتناب ناپذیر

به طور کلی منحنی پلاریزاسیون تافل یکی از روش های مناسب جهت ارزیابی پتانسیل و سرعت خوردگی، بررسی مکانیزم عملکرد بازدارنده و تعیین پلاریزاسیون اکتیواسیون، مقاومتی و یا غلظتی می باشد. تاثیر افزودن بازدارنده را می توان با پلاریزه کردن نمونه و محاسبه شیب شاخه های آندی و کاتدی تعیین نمود. تغییر شیب شاخه های آندی و کاتدی منحنی نحوه عملکرد بازدارنده و میزان اختلال در واکنش های آندی و کاتدی را نشان می دهد. هم چنین برون یابی مناطق خطی شاخه های آندی و کاتدی میزان چگالی جریان خوردگی را نشان می دهد [۴].

در شکل ۲ منحنی پلاریزاسیون تافل فولاد کربنی API 5L Gr.B در محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر و تاثیرات افزودن ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ ppm از بازدارنده WS 86-1 نشان داده شده است.



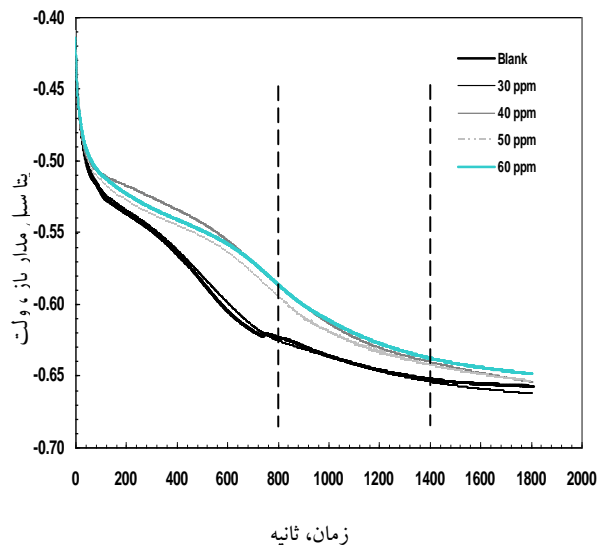
شکل (۲): تاثیر افزودن ۴ غلظت متفاوت از بازدارنده WS 86-1 بر منحنی پلاریزاسیون تافل فولاد کربنی API 5L Gr.B

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود به جز غلظت ۶۰ ppm، پتانسیل خوردگی با افزودن بازدارنده به سمت مثبت تر انتقال یافته است. به طور کلی، تغییر پتانسیل خوردگی نمونه در

ثانیه [۱۶-۱۷]) و هم چنین طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز و در محدوده فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی هرتز با دامنه ۱۰ میلی ولت انجام شد [۱۸-۲۰]. برای انجام آزمون های الکتروشیمیایی، از دستگاه پتانسیواستات / گالوانواستات μ autolab و نرم افزار NOVA استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

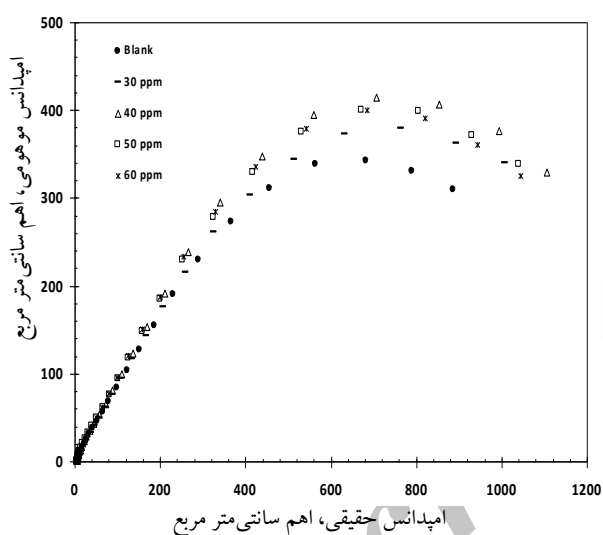
تغییرات اندازه گیری شده پتانسیل مدار باز نسبت به زمان پس از قرارگیری فولاد کربنی API 5L Gr. B در محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون افزودن بازدارنده و با افزودن ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ ppm از بازدارنده WS 86-1 در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، در بازه زمانی اول (تا ۸۰۰ ثانیه)، مقادیر پتانسیل مدار باز با شیب بسیار زیادی به سمت مقادیر منفی انتقال می یابند. این در حالی است که در بازه دوم زمانی (۸۰۰ تا ۱۴۰۰ ثانیه)، شیب تغییرات پتانسیل مدار باز با زمان کم تر می شود و در نهایت در منطقه سوم، شیب تغییرات اندک است که نشان دهنده شرایط پایا در فصل مشترک فولاد/ محلول و ایجاد شرایط مناسب برای انجام آزمون های الکتروشیمیایی است.



شکل (۱): تاثیر افزودن ۴ غلظت متفاوت از بازدارنده WS 86-1 بر تغییرات پتانسیل مدار باز فولاد کربنی API 5L Gr.B

محیط عاری از بازدارنده است. با استفاده از معادله ۱، در جدول ۱ مقادیر بازده حفاظت برای بازدارنده WS 86-1 در ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm نیز محاسبه و نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می شود برای غلظت ۴۰ ppm، بازده به حدود ۴۴ درصد می رسد.

در شکل ۳ منحنی های نایکویست فولاد API 5L Gr.B در محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون افزودن بازدارنده و با افزودن غلظت های ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm از بازدارنده نشان داده شده است.



شکل (۳): تاثیر افزودن ۴ غلظت متفاوت از بازدارنده WS 86-1 بر منحنی نایکویست فولاد کربنی API 5L Gr.B

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود منحنی های نایکویست دارای رفتار مشابهی هستند و افزودن غلظت بازدارنده از ۳۰ به ۴۰ ppm قطر نیم دایره ناقص را در منحنی های نایکویست افزایش می دهد. در حالی که افزایش بیش تر غلظت و رسیدن به ۵۰ و ۶۰ ppm باعث کاهش قطر نیم دایره ناقص در این منحنی ها می شود.

برای مدل سازی طیف های امپدانس، از دو مدار معادل الکتریکی استفاده شد. اولین مدار معادل (شکل ۴) دارای دو ثابت زمانی است. ثابت زمانی اول در این مدار معادل، مربوط به فرکانس-

حضور بازدارنده مکانیزم عملکرد بازدارنده را نشان می دهد. تغییر پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر منفی تر نشان دهنده اختلال در واکنش های کاتدی است در حالی که غیرفعال شدن سطح و به عبارتی مثبت تر شدن پتانسیل خوردگی در حضور بازدارنده، دلالت بر مکانیزم آندی عملکرد بازدارنده دارد [۲۱].

در جدول ۱ مقادیر پتانسیل و چگالی جریان خوردگی حاصل از منحنی های پلاریزاسیون تافل در محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود چگالی جریان خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B در این محیط برابر با ۷/۸ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع است که با افزودن ۴۰ ppm از بازدارنده به ۴/۴ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع کاهش خواهد یافت.

جدول (۱): مقادیر مان های به دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون تافل در

شکل ۲

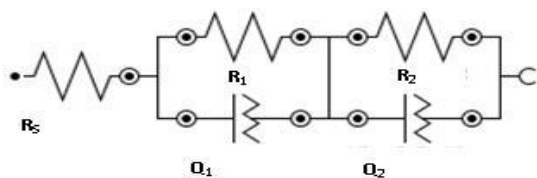
درصد بازده حفاظت	چگالی جریان خوردگی (آمپر بر سانتی متر مربع)	پتانسیل خوردگی (ولت)	غلظت بازدارنده (ppm)
-	$7/8 \times 10^{-6}$	-۰/۷۰۸	-
۱۰/۲۵	$7/1 \times 10^{-6}$	-۰/۶۹۶	۳۰
۴۳/۵۹	$4/4 \times 10^{-6}$	-۰/۶۹۵	۴۰
۱۶/۶۶	$6/5 \times 10^{-6}$	-۰/۶۸۴	۵۰
۱۱/۵۳	$6/9 \times 10^{-6}$	-۰/۷۳۷	۶۰

با تعیین چگالی جریان خوردگی نمونه در حضور بازدارنده و در محیط عاری از بازدارنده می توان بازده حفاظت بازدارنده (η) را با استفاده از معادله ۱ به دست آورد [۲۲-۲۴]:

$$\eta\% = 1 - \frac{i_{\text{Inhibition}}}{i_{\text{Blank}}} \times 100 \quad (1)$$

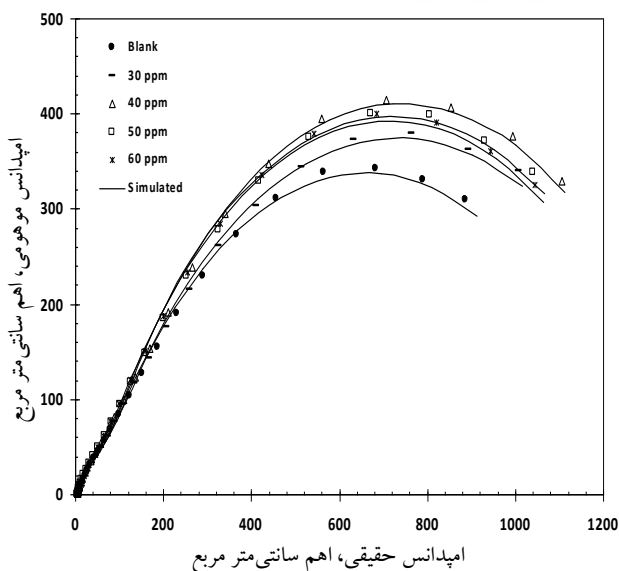
در این معادله $i_{\text{Inhibition}}$ چگالی جریان خوردگی نمونه در حضور بازدارنده و i_{Blank} چگالی جریان خوردگی نمونه در

دومین مدار معادل (شکل ۶) بهترین برازش را برای مدل‌سازی رفتار خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B نشان می‌دهد. در این مدار، ثابت زمانی اول مربوط به فرکانس‌های بالا، به فرایند انتقال بار مرتبط است که در آن مقاومت انتقال بار (R_1) با المان فاز ثابت لایه دوگانه الکتریکی (Q_1) موازی شده است. در حالی که ثابت زمانی دوم مربوط به فرکانس‌های کم، به فرایند جذب سطحی مرتبط است و در آن مقاومت لایه سطحی جذب شده (R_2) با المان فاز ثابت لایه سطحی جذب شده (Q_2) موازی شده است [۲۸].



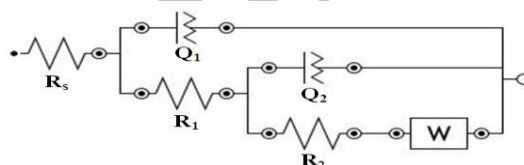
شکل (۶): دومین مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی رفتار خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B [۲۸]

در شکل ۷ انطباق بسیار ایده‌آل حاصل از مدل‌سازی با مدار معادل شکل ۶ برای منحنی‌های نایکوئیست نشان داده شده است.



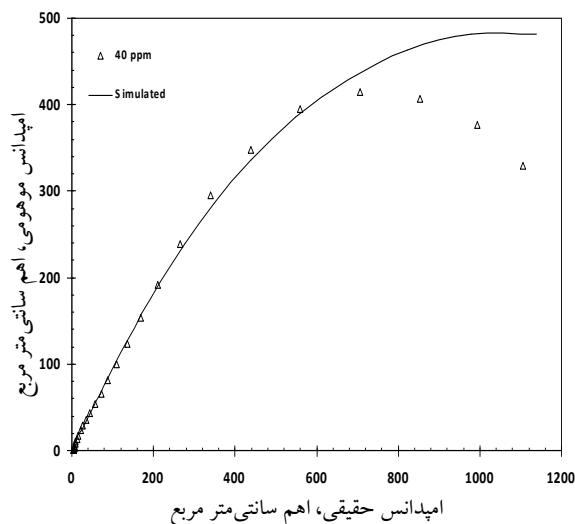
شکل (۷): منحنی نایکوئیست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۶ برای فولاد API 5L Gr.B

های بالا و میانی است که به فرایند انتقال بار مرتبط است و با مقاومت انتقال بار (R_1) و ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی (Q_1) به صورت موازی بیان می‌شود. در حالی که ثابت زمانی دوم مربوط به فرکانس‌های کم است که به فرایندهای اکسایش و کاهش که در سطح لایه اتفاق می‌افتند، مرتبط می‌شود و R_2 و Q_2 به ترتیب مقاومت و ظرفیت خازنی لایه سطحی می‌باشند. در این حالت سرعت انجام واکنش تحت نفوذ عوامل خوردنده نیز می‌باشد و مدار معادل در این حالت W را به عنوان امپدانس نفوذ وارپورگ نشان می‌دهد [۲۵-۲۷].



شکل (۴): اولین مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی رفتار خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B [۲۵-۲۷]

نتایج مدل‌سازی با این مدار معادل نشان می‌دهد که انطباق مناسبی بین منحنی‌های نایکوئیست و مدل‌سازی شده (به‌خصوص در چند فرکانس پایین) وجود ندارد که به‌طور مثال در شکل ۵ برای غلظت ۴۰ ppm نشان داده شده است.



شکل (۵): منحنی نایکوئیست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۴ برای فولاد کربنی API 5L Gr.B در محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر و غلظت ۴۰ ppm از بازدارنده WS 86-1

۴- نتیجه گیری

۱- تغییرات پتانسیل مدار باز فولاد کربنی API 5L Gr.B در آب دریای ساختگی (محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر) بدون بازدارنده و با افزودن ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm از بازدارنده WS 86-1 نشان داد که پس از گذشت ۱۴۰۰ ثانیه، شیب تغییرات پتانسیل اندک می شود و نشان دهنده ایجاد شرایط پایا در فصل مشترک فولاد/محلول است.

۲- چگالی جریان خوردگی به دست آمده از آزمون های پلاریزاسیون تافل فولاد کربنی API 5L Gr.B در آب دریای ساختگی (محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر) بدون بازدارنده برابر با ۷/۸ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع است که با افزودن مقدار بهینه ۴۰ ppm از بازدارنده WS 86-1 به ۴/۴ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع کاهش خواهد یافت.

۳- نتایج مدل سازی طیف های امپدانس نشان داد که بهترین مدار معادل الکتریکی، مدار است که دارای دو ثابت زمانی باشد. ثابت زمانی اول در فرکانس های بالا به فرایند انتقال بار و ثابت زمانی دوم در فرکانس های کم به فرایند جذب سطحی مرتبط است.

۴- هم چنین نتایج مدل سازی طیف های امپدانس آشکار ساخت که مقاومت پلاریزاسیون فولاد API 5L Gr.B در آب دریای ساختگی بدون حضور بازدارنده، برابر ۱/۲۷ کیلو اهم بر سانتی متر مربع است که با افزودن بازدارنده WS 86-1 در غلظت های ۳۰ و ۴۰ ppm، به ترتیب مقاومت پلاریزاسیون به ۱/۴۱ و ۱/۴۳ کیلو اهم بر سانتی متر مربع افزایش می یابد.

۵- هم چنین این نتایج نشان داد که افزایش بیش تر غلظت بازدارنده WS 86-1 به میزان ۵۰ و ۶۰ ppm باعث کاهش مقاومت پلاریزاسیون و رسیدن آن به ترتیب به مقادیر ۱/۳۸ و ۱/۳۷ کیلو اهم بر سانتی متر مربع خواهد شد.

۶- با توجه به مقادیر بازده حفاظت، می توان بیان کرد که در محیط آب دریای ساختگی بازدارنده تجاری WS 86-1 نمی تواند حفاظت قابل قبولی را ارائه دهد.

لازم به ذکر است که در حالتی که بازدارنده در محیط وجود ندارد، در مدار معادل شکل ۶، در ثابت زمانی دوم (مربوط به فرکانس های کم) R_2 مقاومت لایه سطحی اکسیدی و Q_2 المان فاز ثابت این لایه سطحی است.

در جدول ۲ المان های حاصل از مدل سازی با مدار معادل شکل ۶ و هم چنین مقدار χ^2 نشان داده شده است. مقاومت پلاریزاسیون برای مدار معادل شکل ۶ از جمع R_1 و R_2 به دست می آید.

جدول (۲): مقادیر المان های به دست آمده از مدار معادل شکل ۶

Inhibitor (ppm)	-	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
R_s ($\Omega.cm^2$)	۵/۵۹	۶/۷۷	۴/۸۴	۵/۱۱	۶/۸۳
CPE1 ($m\Omega^{-1}.cm^{-2}.s^{-n}$)	۲/۴۳	۰/۷۶	۱/۹۷	۲/۰۹	۲/۰۴
n_1	۰/۶۴	۰/۸۱	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸
R_1 ($k\Omega.cm^2$)	۱/۲۳	۰/۰۴	۱/۳۸	۱/۳۴	۱/۳۳
CPE2 ($m\Omega^{-1}.cm^{-2}.s-n$)	۰/۷۶	۲/۱۲	۰/۵۸	۰/۷۳	۰/۹۹
n_2	۰/۸۰	۰/۶۳	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۰
R_2 ($k\Omega.cm^2$)	۰/۰۴	۱/۳۸	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴
χ^2	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۰۴

با توجه به جدول ۲ مشاهده می شود که برای فولاد کربنی API 5L Gr.B در محلول ۳۵ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون حضور بازدارنده، مقاومت پلاریزاسیون برابر ۱/۲۷ کیلو اهم بر سانتی متر مربع است که با افزودن بازدارنده به میزان ۳۰ و ۴۰ ppm این مقدار به ۱/۴۱ و ۱/۴۳ کیلو اهم بر سانتی متر مربع خواهد رسید. در حالی که افزایش مقدار بازدارنده به میزان ۵۰ و ۶۰ ppm باعث کاهش مقاومت پلاریزاسیون و رسیدن آن به ۱/۳۸ و ۱/۳۷ کیلو اهم بر سانتی متر مربع خواهد شد. این نتایج تایید کننده روند تغییرات چگالی جریان های به دست آمده از منحنی های پلاریزاسیون تافل نیز می باشد.

corrosion inhibition of Q235 steel by imidazoline derivative against CO₂ corrosion”, Corrosion Science, Vol. 53, pp. 353–361, 2011.

- [10] X. Jiang, Y.G. Zheng & W. Ke, “Effect of flow velocity and entrained sand on inhibition performances of two inhibitors for CO₂ corrosion of N80 steel in 3% NaCl solution”, Corrosion Science, Vol. 47, pp. 2636–2658, 2005.
- [11] L.J. Korb, D.L. Olsen, “Metals Handbook”, Ninth Edition, Corrosion in Petroleum Production Operation, Vol. 13, 1232–1244, 1987.
- [12] Y. Chen, T. Hong, M. Gopal & W.P. Jepson, “EIS studies of a corrosion inhibitor behavior under multiphase flow conditions”, Corrosion Science, Vol. 42, pp. 979–990, 2000.
- [13] G. Zhang, C. Chen, M. Lu, C. Chai & Y. Wu, “Evaluation of inhibition efficiency of an imidazoline derivative in CO₂-containing aqueous solution”, Materials Chemistry and Physics, Vol. 105, pp. 331–340, 2007.
- [14] M. Heydari & M. Javidi, “Corrosion inhibition and adsorption behaviour of an amido-imidazoline derivative on API 5L X52 steel in CO₂-saturated solution and synergistic effect of iodide ions”, Corrosion Science, Vol. 61, pp. 148–155, 2012.
- [15] J. Zhang, G. Qiao, S. Hu, Y. Yan, Z. Ren & L. Yu, “Theoretical evaluation of corrosion inhibition performance of imidazoline compounds with different hydrophilic groups”, Corrosion Science, Vol. 53, pp. 147–152, 2011.
- [16] S. Xia, M. Qiu, L. Yu, F. Liu & H. Zhao, “Molecular dynamics and density functional theory study on relationship between structure of imidazoline derivatives and inhibition performance”, Corrosion Science, Vol. 50, pp. 2021–2029, 2008.
- [17] L.M. Rodriguez-Valdez, W. Villamizar, M. Casales, J.G. Gonzalez-Rodriguez, A. Martinez-Villafane, L. Martinez & D. Glossman-Mitnik, “Computational simulations of the molecular structure and corrosion properties of amidoethyl, aminoethyl and hydroxyethyl imidazolines inhibitors”, Corrosion Science, Vol. 48, pp. 4053–4064, 2006.
- [18] J. Zhao & G. Chen, “The synergistic inhibition effect of oleic-based imidazoline and sodium

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از شرکت نفت فلات قاره ایران به خاطر فراهم آوردن کلیه امکانات انجام این تحقیق، تشکر و قدردانی کنند.

۶- مراجع

- [1] J. Zhang, J. Liu, W. Yu, Y. Yan, L. You & L. Liu, “Molecular modeling of the inhibition mechanism of 1-(2-aminoethyl)-2-alkyl-imidazoline”, Corrosion Science, Vol. 52, pp. 2059–2065, 2010.
- [2] D.M. Ortega-Toledo, J.G. Gonzalez-Rodriguez, M. Casales, L. Martinez & A. Martinez-Villafañe, “CO₂ corrosion inhibition of X-120 pipeline steel by a modified imidazoline under flow conditions”, Corrosion Science, Vol. 53, pp. 3780–3787, 2011.
- [3] J. Liu, W. Yu, J. Zhang, S. Hu, L. You & G. Qiao, “Molecular modeling study on inhibition performance of imidazolines for mild steel in CO₂ corrosion”, Applied Surface Science, Vol. 256, pp. 4729–4733, 2010.
- [4] G. Trabanelli, V. Carassiti, “Mechanism and Phenomenology of Organic Inhibitors, Advanced Corrosion Science and Technology, Ed. M.G. Fontana, R.W. Staehle, Plenum Press, New York, NY, Vol. 1, p. 170, 1970.
- [5] P.C. Okafor & Y. Zheng, “Synergistic inhibition behaviour of methylbenzyl quaternary imidazoline derivative and iodide ions on mild steel in H₂SO₄ solutions”, Corrosion Science, Vol. 51, pp. 850–859, 2009.
- [6] F. Mansfeld, Corrosion Mechanisms, p. 119, Marcel. Dekker Inc, 1987.
- [7] D. Wang, S. Li, Y. Ying, M. Wang, H. Xiao & Z. Chen, “Theoretical and experimental studies of structure and inhibition efficiency of imidazoline derivatives”, Corrosion Science, Vol. 41, pp. 1911–1919, 1999.
- [8] P.C. Okafor, X. Liu & Y.G. Zheng, “Corrosion inhibition of mild steel by ethylamino imidazoline derivative in CO₂-saturated solution, Corrosion Science, Vol. 51, pp. 761–768, 2009.
- [9] B. Wang, M. Du, J. Zhang & C.J. Gao, “Electrochemical and surface analysis studies on

- studies on the interaction between their molecular structure and steel microstructure”, *Corrosion Science*, Vol. 47, pp. 735–755, 2005.
- [24] S. Hu, A. Guo, Y. Geng, X. Jia, S. Sun & J. Zhang, “Synergistic effect of 2-oleyl-1-oleylamidoethyl imidazoline ammonium methylsulfate and halide ions on the inhibition of mild steel in HCl”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 134, pp. 54–60, 2012.
- [25] T. Hong & W.P. Jepson, “Corrosion inhibitor studies in large flow loop at high temperature and high pressure”, *Corrosion Science*, Vol. 43, pp. 1839–1849, 2001.
- [26] T. Hong, Y.H. Sun & W.P. Jepson, “Study on corrosion inhibitor in large pipelines under multiphase flow using EIS”, *Corrosion Science*, Vol. 44, pp. 101–112, 2002.
- [27] G.W. Walter, “The application of impedance spectroscopy to study the uptake of sodium chloride solution in painted metals”, *Corrosion Science*, Vol. 32, pp. 1041–1058, 1991.
- [28] M.S. Morad, “An electrochemical study on the inhibiting action of some organic phosphonium compounds on the corrosion of mild steel in aerated acid solutions”, *Corrosion Science*, Vol. 42, pp. 1307–1326, 2000.
- benzoate on mild steel corrosion in a CO₂-saturated brine solution”, *Electrochimica Acta*, Vol. 69, pp. 247–255, 2012.
- [19] X. Liu, P.C. Okafor & Y.G. Zheng, “The inhibition of CO₂ corrosion of N80 mild steel in single liquid phase and liquid/particle two-phase flow by aminoethyl imidazoline derivatives”, *Corrosion Science*, Vol. 51, pp. 744–751, 2009.
- [20] J. Cruz, R. Martinez, J. Genesca & E. Garcia-Ochoa, “Experimental and theoretical study of 1-(2-ethylamino)-2-methylimidazoline as an inhibitor of carbon steel corrosion in acid media”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 566, pp. 111–121, 2004.
- [21] T. Murakava & N. Hackerman, “The Double Layer Capacity at the Interface Between Iron and Acid Solutions with and without Organic Materials”, *Corrosion Science*, Vol. 4, pp. 387–396, 1964.
- [22] S. H. Yoo, Y. W. Kim, K. Chung, S. Y. Baik & J. S. Kim, “Synthesis and corrosion inhibition behavior of imidazoline derivatives based on vegetable oil”, *Corrosion Science*, Vol. 59, pp. 42–54, 2012.
- [23] D.A. Lopez, S.N. Simison & S.R. de Sanchez, “Inhibitors performance in CO₂ corrosion: EIS