

بررسی الکتروشیمیایی میزان تزریق ممانعت‌کننده WS 86-1 بر خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B در سامانه لوله‌کشی مجتمع دریایی نوروز

آرش فتاح‌الحسینی*^۱، صادق مومنی^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

* نویسنده مسئول: A.fattah@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۱۸

چکیده

در این تحقیق، رفتار خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B و میزان تزریق ممانعت‌کننده WS 86-1 در سامانه لوله‌کشی مجتمع دریایی نوروز 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 ممانعت‌کننده به دست می‌آید. نتایج آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی آشکار ساخت که بیش‌ترین مقدار مقاومت پلاریزاسیون با افزودن مقدار ۴۰ ppm از ممانعت‌کننده 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. 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.

کلمات کلیدی: طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون تافل، فولاد کربنی API 5L Gr.B، ممانعت‌کننده.

Electrochemical Investigation of Injection Rate of WS 86-1 Inhibitor on Corrosion of Carbon Steel API 5L Gr.B in Piping System of Nowrooz Offshore Complexes

Arash Fattah-alhosseini^{1*}, Sadegh Momeni²

¹ Assistance Professor, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University

² M.Sc. Student, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University

*Corresponding Author: A.fattah@basu.ac.ir

Submission: February 15, 2013 Acceptance: July 09, 2013

Abstract

In this study, the corrosion behavior of carbon steel API 5L Gr.B and injection rate of WS 86-1 inhibitor was investigated in Piping System of Nowrooz Offshore Complexes. For this purpose, after immersion of samples at open circuit potential for 30 min, Tafel polarization and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) measurements were done. Tafel polarization curves showed that the minimum values for corrosion current density achieve at 40 ppm concentration of inhibitor. EIS results expressed that maximum values for polarization resistance achieve at 40 ppm concentration of inhibitor and demonstrated an agreement with the Tafel polarization results. Also, EIS results showed that the best electrical equivalent circuit presents two time constants. The first high frequencies time constant can be correlated with the charge transfer process and it is composed by the charge transfer resistance (R_1) in parallel with the double layer constant phase element (Q_1). While, the second low frequencies time constant can be related with the surface adsorption and it is composed by the adsorbed surface film resistance (R_2) in parallel with the adsorbed surface film constant phase element (Q_2).

Keywords: EIS, Tafel polarization, Carbon Steel API 5L Gr.B, Inhibitor.

۱- مقدمه

استفاده از ممانعت‌کننده‌ها یکی از موثرترین روش‌ها برای حفاظت فلزات و آلیاژها در مقابل خوردگی در محیط‌های خورنده است [۱-۳]. ممانعت‌کننده‌ها تحت مکانیزم‌های مختلف موجب کاهش چشمگیر سرعت خوردگی می‌شوند. با توجه به نیم‌واکنش‌های اکسایش و احیا در واکنش‌های خوردگی، ممانعت‌کننده‌ها را می‌توان بر مبنای میزان تاثیر و اختلال در هر یک از واکنش‌های ذکر شده به ممانعت‌کننده‌های آندی، کاتدی و یا مختلط تقسیم کرد. طبقه‌بندی دیگر ممانعت‌کننده‌ها بر اساس ماهیت ترکیب شیمیایی است که ممانعت‌کننده‌ها به آلی و غیرآلی تقسیم می‌شوند. نوع دیگر طبقه‌بندی ممانعت‌کننده‌ها بر اساس کاربرد آن‌ها است مانند ممانعت‌کننده‌های اسیدشویی، سیستم‌های خنک‌کننده، صنایع انتقال آب و صنایع نفت و گاز. هم‌چنین با توجه به نوع محیط، ممانعت‌کننده‌ها به ممانعت‌کننده‌های اسیدی، خنثی و یا قلیایی تقسیم می‌شوند. در نهایت براساس سازوکار ممانعت‌کنندگی مانند جذب فیزیکی، جذب شیمیایی، تشکیل سد حفاظتی، مسدود ساختن سایت‌های فعال، اختلال در واکنش‌های الکتروود و تغییر در خواص لایه دوگانه الکتروکی می‌توان انواع ممانعت‌کننده‌ها را از یکدیگر جدا نمود [۴-۶].

به‌طور کلی استخراج، بهره‌برداری، انتقال، پالایش و نگهداری 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 کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفید، خوردگی گالوانیکی، خوردگی میکروبی و یا خوردگی ناشی از نشت اکسیژن به محیط اشاره نمود [۷-۹]. در این صنایع استفاده از ممانعت‌کننده‌های آلی که در ترکیب آن‌ها عناصر گروه پنجم و ششم جدول تناوبی شرکت دارند، به‌خصوص ترکیبات آلی نیتروژن‌دار با رشته‌های طولیل هیدروکربنی مانند آمین‌ها، پلی‌آمین‌ها، دی‌آمین‌ها، آمیدها،

ایمیدازولین^۲، بنزی‌میدازول^۶ و هم‌چنین مشتقات اسید چرب آلیفاتیک^۷ 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 سامانه 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 ممانعت‌کننده‌ها است. لذا تعیین موثرترین انواع ممانعت‌کننده‌ها و میزان موثر غلظت تزریق جهت حصول حداکثر بازده حفاظتی امری ضروری و اجتناب ناپذیر است [۱۳-۱۵].

در این تحقیق، هدف بررسی رفتار خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B (لوله‌های استفاده شده در مجتمع دریایی نوروز) در محیط شبیه‌سازی شده آب دورریز و برگشتی (محلول ۱۶/۹۷ 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 ممانعت‌کننده تجاری WS 86-1 (بر پایه ایمیدازولین) ساخت شرکت شیمیایی انرژی سمنان، بر رفتار خوردگی فولاد و بازده حفاظتی حاصله بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد API 5L Gr.B، که به‌عنوان الکتروود کار با مساحت ۱ سانتی‌متر مربع مورد استفاده قرار

² Polyamines³ Diamines⁴ Amides⁵ Imidazoline⁶ Benzimidazole⁷ Aliphatic Fatty Acid Derivatives¹ Amines

جدول ۱- ترکیب شیمیایی الکتروود کار از جنس فولاد کربنی API 5L Gr.B

عنصر آلیاژی	کربن	منگنز	فسفر	گوگرد	تیتانیوم	آهن
درصد وزنی	۰/۲۸	۱/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۰۴	باقی‌مانده

مقادیر پتانسیل مدار باز با شیب بسیار زیادی به سمت مقادیر منفی انتقال می‌یابند. این در حالی است که در بازه دوم زمانی (۱۲۰ تا ۱۵۰۰ ثانیه)، شیب تغییرات پتانسیل مدار باز با زمان کم‌تر می‌شود و در نهایت در منطقه سوم، شیب تغییرات اندک است که نشان‌دهنده شرایط پایا در فصل مشترک فولاد/ محلول و ایجاد شرایط مناسب برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی است.

منحنی پلاریزاسیون تافل یکی از روش‌های مناسب جهت ارزیابی پتانسیل و سرعت خوردگی، بررسی مکانیزم عملکرد ممانعت‌کننده و تعیین پلاریزاسیون اکتیواسیون، مقاومتی و یا غلظتی می‌باشد. تاثیر افزودن ممانعت‌کننده را می‌توان با پلاریزه کردن نمونه و محاسبه شیب شاخه‌های آندی و کاتدی تعیین نمود. تغییر شیب شاخه‌های آندی و کاتدی منحنی نحوه عملکرد ممانعت‌کننده و میزان اختلال در واکنش‌های آندی و کاتدی را نشان می‌دهد. هم‌چنین برون‌یابی مناطق خطی شاخه‌های آندی و کاتدی میزان چگالی جریان خوردگی را نشان می‌دهد [۴].

در شکل ۲ منحنی پلاریزاسیون تافل فولاد API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر و تاثیرات افزودن ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm از ممانعت‌کننده WS 86-1 نشان داده شده است.

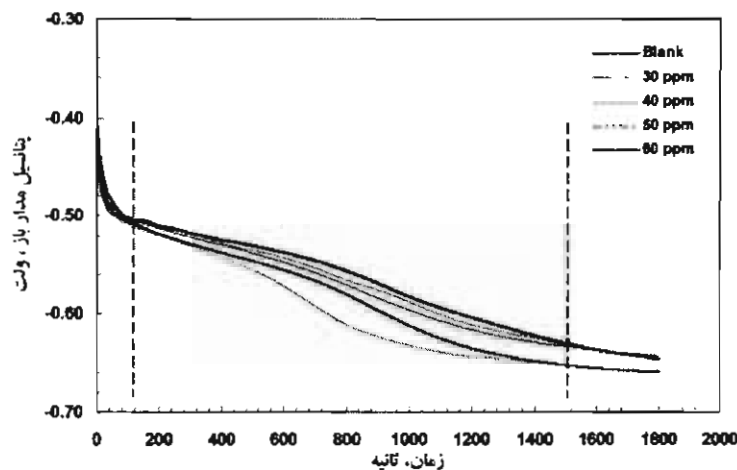
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود به‌جز غلظت ۳۰ ppm، پتانسیل خوردگی با افزودن ممانعت‌کننده به سمت مقادیر منفی‌تر انتقال یافته است. به‌طور کلی، تغییر پتانسیل خوردگی نمونه در حضور ممانعت‌کننده، مکانیزم عملکرد ممانعت‌کننده را نشان می‌دهد. تغییر پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر منفی‌تر نشان‌دهنده اختلال در واکنش‌های کاتدی است در حالی که غیرفعال شدن سطح و به‌عبارتی مثبت‌تر شدن پتانسیل خوردگی در حضور ممانعت‌کننده، دلالت بر مکانیزم آندی عملکرد ممانعت‌کننده دارد [۴، ۲۱].

گرفت، نشان داده شده است. برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی، پس از اتصال سیم مسی روکش‌دار به نمونه‌ها و انجام مانت سرد، عملیات سنباده‌زنی تر با سنباده ۱۲۰۰ انجام شد و 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 الکترودی 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 دورریز و برگشتی سکوی نوروز، از محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر استفاده شد.

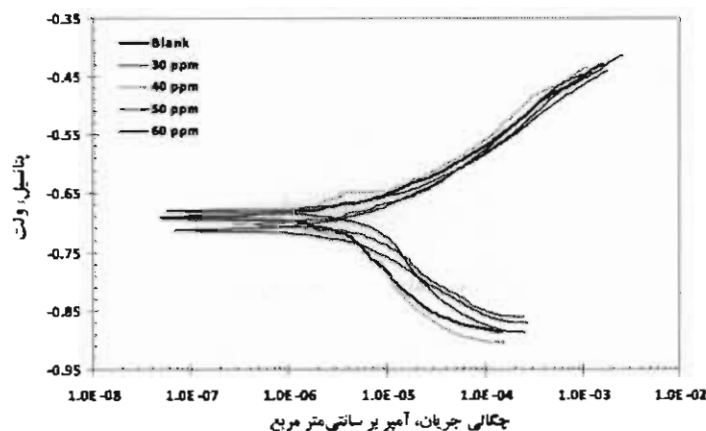
به‌منظور ارزیابی رفتار خوردگی فولاد API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر و بررسی تاثیر افزودن ممانعت‌کننده، ابتدا هر نمونه در پتانسیل مدار باز به مدت ۳۰ دقیقه نگاه‌داری شد. سپس آزمون‌های پلاریزاسیون تافل (با نرخ روبش ۱ میلی‌ولت بر ثانیه [۱۶، ۱۷]) و هم‌چنین طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز و در محدوده فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز با دامنه ۱۰ میلی‌ولت انجام شد [۲۰-۱۸]. برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی، از نرم‌افزار NOVA و دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات Autolab استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

تغییرات اندازه‌گیری شده پتانسیل مدار باز نسبت به زمان پس از قرارگیری فولاد کربنی API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون افزودن ممانعت‌کننده و با افزودن ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm از ممانعت‌کننده WS 86-1 در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در بازه زمانی اول (تا ۱۲۰ ثانیه)،



شکل ۱- تاثیر افزودن غلظت متفاوت از ممانعت‌کننده WS 86-1 بر تغییرات پتانسیل مدار باز فولاد API 5L Gr.B



شکل ۲- تاثیر افزودن غلظت متفاوت از ممانعت‌کننده WS 86-1 بر منحنی پلاریزاسیون تافل فولاد API 5L Gr.B

جدول ۲- مقادیر المان‌های به‌دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون تافل در شکل ۲.

درصد بازده حفاظت	چگالی جریان خوردگی (آمپر بر سانتی‌متر مربع)	پتانسیل خوردگی (ولت)	غلظت ممانعت‌کننده (ppm)
-	$7/2 \times 10^{-1}$	-۰/۶۹۲	-
۲۳/۶۱	$5/5 \times 10^{-1}$	-۰/۶۸۱	۳۰
۶۹/۴۴	$2/2 \times 10^{-1}$	-۰/۶۹۴	۴۰
۲۷/۷۷	$5/2 \times 10^{-1}$	-۰/۶۹۹	۵۰
۴۴/۴۴	4×10^{-1}	-۰/۷۱۲	۶۰

در جدول ۲ مقادیر پتانسیل و چگالی جریان خوردگی حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون تافل در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود چگالی جریان خوردگی فولاد کربنی در این محیط برابر با ۷/۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع است که با افزودن ۴۰ ppm از ممانعت‌کننده به ۲/۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع کاهش خواهد یافت.

در این محیط برابر با ۷/۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع است که با افزودن ۴۰ ppm از ممانعت‌کننده به ۲/۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع کاهش خواهد یافت.

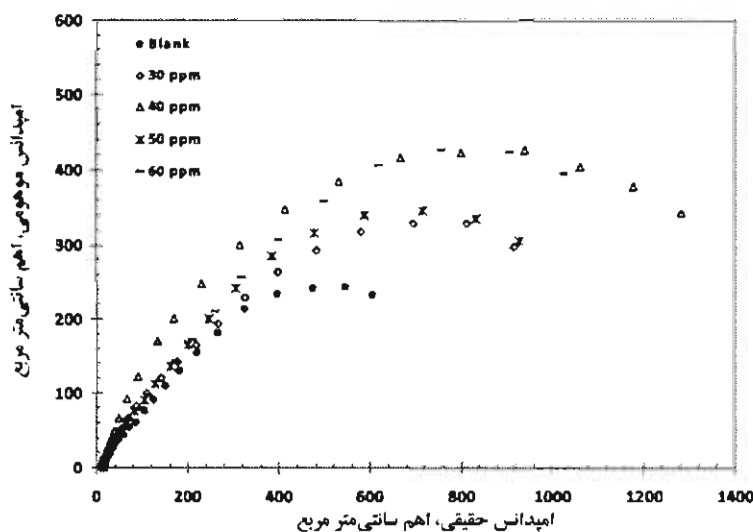
معادله ۱، در جدول ۲ مقادیر بازده حفاظت برای ممانعت‌کننده WS 86-1 در ۴ غلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰ ppm و ۶۰ نیز محاسبه و نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود برای غلظت ۴۰ ppm بازده به حدود ۷۰ درصد می‌رسد.

در شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب منحنی‌های نایکویست، باد و باد-فاز فولاد API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون افزودن ممانعت‌کننده و با افزودن غلظت‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm از ممانعت‌کننده نشان داده شده است.

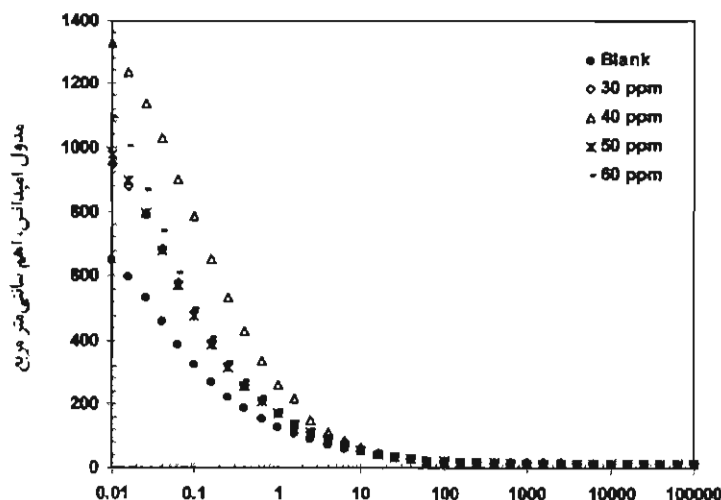
با تعیین چگالی جریان خوردگی نمونه در حضور ممانعت‌کننده و در محیط عاری از ممانعت‌کننده می‌توان بازده حفاظت ممانعت‌کننده (η) را با استفاده از معادله ۱ به دست آورد [۲۲-۲۴]:

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

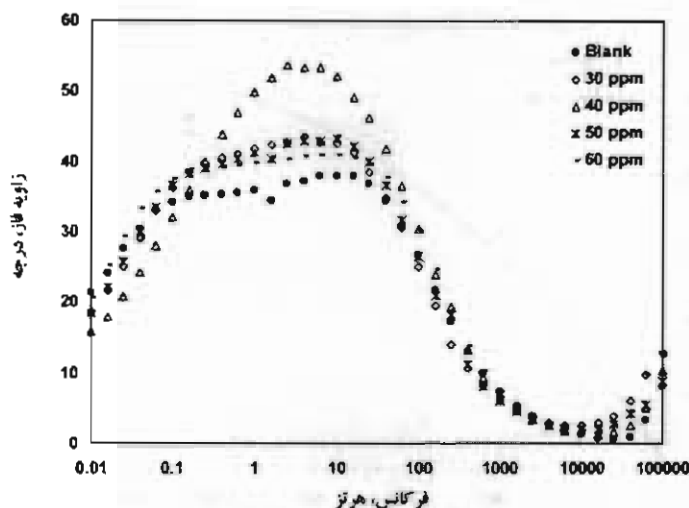
در این معادله $i_{\text{Inhibition}}$ چگالی جریان خوردگی نمونه در حضور ممانعت‌کننده و i_{Blank} چگالی جریان خوردگی نمونه در محیط عاری از ممانعت‌کننده است. با استفاده از



شکل ۳- تاثیر افزودن ۴ غلظت متفاوت از ممانعت‌کننده WS 86-1 بر منحنی نایکویست فولاد API 5L Gr.B.

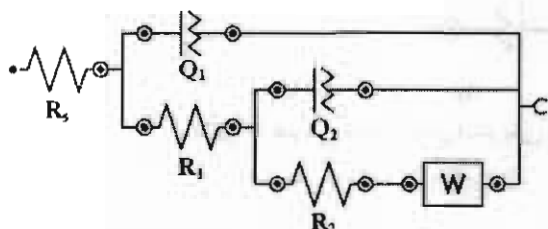


شکل ۴- تاثیر افزودن ۴ غلظت متفاوت از ممانعت‌کننده WS 86-1 بر منحنی باد فولاد API 5L Gr.B.



شکل ۵- تاثیر افزودن ۴ غلظت متفاوت از ممانعت‌کننده WS 86-1 بر منحنی باد- فاز فولاد API 5L Gr.B.

نتایج مدل‌سازی با این مدار معادل نشان می‌دهد که انطباق مناسبی بین منحنی‌های نایکویست و مدل‌سازی شده وجود ندارد که به‌طور مثال در شکل ۷ برای غلظت ۶۰ ppm نشان داده شده است.

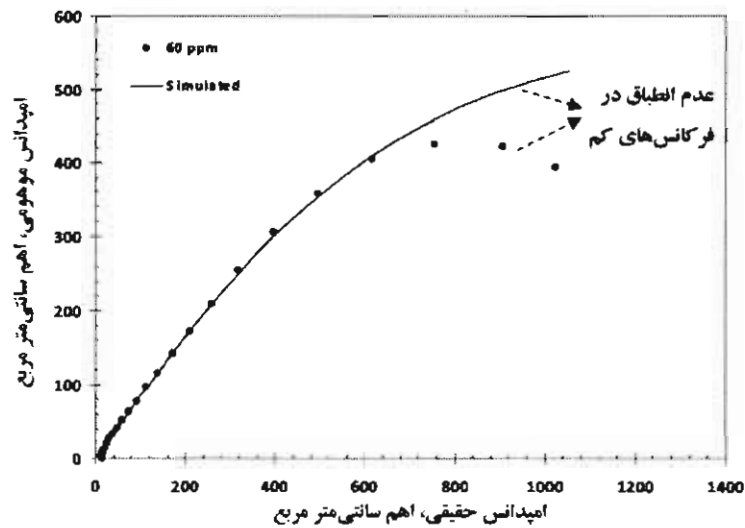


شکل ۶- اولین مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی رفتار خوردگی فولاد API 5L Gr.B [۲۹-۲۵].

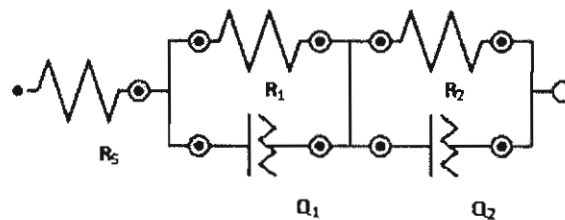
دومین مدار معادل (شکل ۸) بهترین برازش را برای مدل‌سازی رفتار خوردگی فولاد API 5L Gr.B نشان می‌دهد. در این مدار، ثابت زمانی اول مربوط به فرکانس‌های بالا، به فرایند انتقال بار مرتبط است که در آن مقاومت انتقال بار (R_1) با المان فاز ثابت لایه دوگانه الکتریکی (Q_1) موازی شده است. در حالی که ثابت زمانی دوم 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 [۳۰].

همان‌طور که در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود منحنی‌های نایکویست، باد و باد- فاز دارای رفتار مشابهی هستند و افزودن غلظت ممانعت‌کننده از ۳۰ به ۴۰ ppm به قطر نیم‌دایره ناقص را در منحنی‌های نایکویست افزایش می‌دهد. در حالی که افزایش بیش‌تر غلظت و رسیدن به ۵۰ و ۶۰ ppm باعث کاهش قطر نیم‌دایره ناقص در این منحنی‌ها می‌شود. برای مدل‌سازی طیف‌های امپدانس، از دو مدار معادل الکتریکی استفاده شد. اولین مدار معادل (شکل ۶) دارای دو ثابت زمانی است. ثابت زمانی اول در این مدار معادل، مربوط به فرکانس‌های 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) به‌صورت 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 به‌ترتیب 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 به‌عنوان امپدانس نفوذ واربرگ^۱ نشان می‌دهد [۲۹-۲۵].

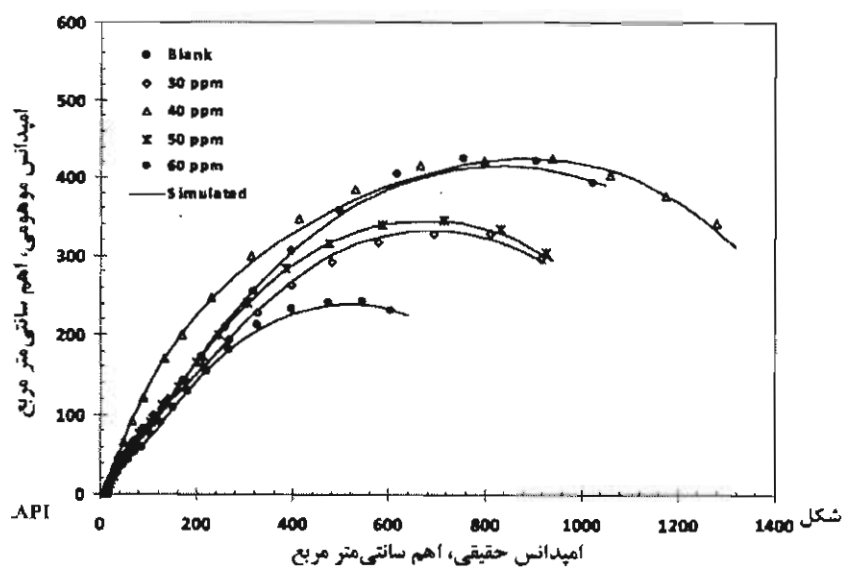
^۱ Warburg Diffusion Impedance



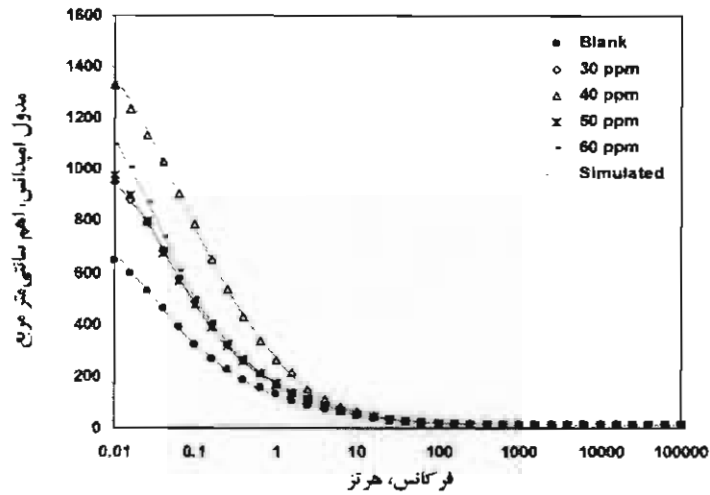
شکل ۷- منحنی نایکوئیست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۶ برای فولاد API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر و غلظت ۶۰ ppm از مانع‌کننده WS 86-1.



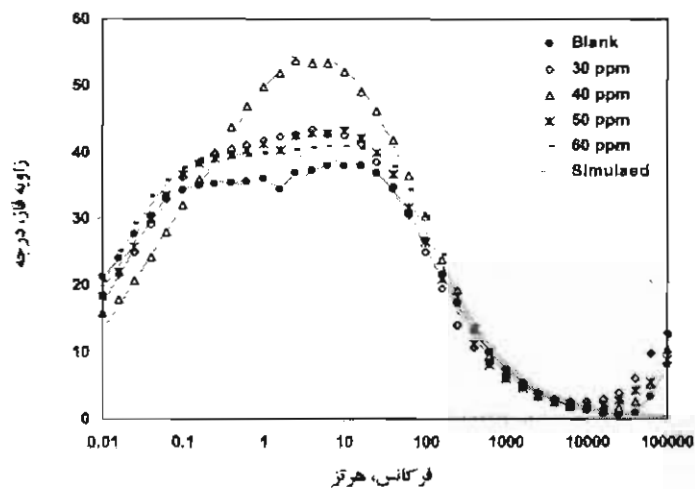
شکل ۸- دومین مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی رفتار خوردگی فولاد API 5L Gr.B [۳۰].



شکل ۹- منحنی نایکوئیست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۸ برای فولاد API 5L Gr.B.



شکل ۱۰- منحنی باد و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۸ برای فولاد API 5L Gr.B.



شکل ۱۱- منحنی باد- فاز و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۸ برای فولاد API 5L Gr.B.

افزودن ممانعت‌کننده به میزان ۳۰ و ۴۰ ppm این مقدار به ۱۲۵۷ و ۱۵۹۵ اهم بر سانتی‌متر مربع خواهد رسید. در حالی که افزایش مقدار ممانعت‌کننده به میزان ۵۰ و ۶۰ ppm باعث کاهش مقاومت پلاریزاسیون و رسیدن آن به ۱۲۷۰ و ۱۴۸۰ اهم بر سانتی‌متر مربع خواهد شد. این نتایج تایید کننده روند تغییرات چگالی جریان‌های به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون تافل نیز می‌باشد و نشان‌دهنده غلظت ۴۰ ppm به عنوان حد بهینه افزودن ممانعت‌کننده WS 86-1 به محیط است.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ انطباق بسیار ایده‌آل حاصل از مدل‌سازی با مدار معادل شکل ۸ برای منحنی‌های نایکویست، باد و باد- فاز نشان داده شده است.

در جدول ۳ المان‌های حاصل از مدل‌سازی با مدار معادل شکل ۸ و هم‌چنین مقدار χ^2 نشان داده شده است. مقاومت پلاریزاسیون برای مدار معادل شکل ۸ از جمع R_1 و R_2 به دست می‌آید. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که برای فولاد کربنی API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون حضور ممانعت‌کننده، مقاومت پلاریزاسیون برابر ۹۶۴ اهم بر سانتی‌متر مربع است که با

جدول ۳- مقادیر المان‌های به‌دست آمده از مدار معادل شکل ۸

Inhibitor (ppm)	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_1 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-n}$)	n_1	R_1 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_2 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-n}$)	n_2	R_2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	χ^2
-	۱۲/۱	$۱/۵۸ \times 10^{-7}$	۰/۷۵۳	۵۳	$۳/۹۴ \times 10^{-7}$	۰/۶۱۳	۹۱۱	۰/۰۳۸
۳۰	۱۲/۰	$۱/۴۱ \times 10^{-7}$	۰/۸۳۳	۱۲۷	$۳/۰۲ \times 10^{-7}$	۰/۶۶۹	۱۱۳۰	۰/۰۵۷
۴۰	۱۲/۵	$۱/۲۰ \times 10^{-7}$	۰/۷۴۰	۴۷۵	$۲/۸۶ \times 10^{-7}$	۰/۷۱۹	۱۱۲۰	۰/۰۵۹
۵۰	۱۳/۴	$۱/۵۳ \times 10^{-7}$	۰/۷۷۳	۷۰	$۲/۵۹ \times 10^{-7}$	۰/۶۶۳	۱۲۰۰	۰/۰۵۴
۶۰	۱۳/۸	$۱/۲۲ \times 10^{-7}$	۰/۷۷۵	۶۱	$۲/۴۴ \times 10^{-7}$	۰/۶۳۵	۱۴۲۰	۰/۰۹۹

۴- نتیجه‌گیری

(۱) آزمون‌های پلاریزاسیون تافل نشان دادند که چگالی جریان خوردگی فولاد کربنی API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون ممانعت‌کننده برابر با ۷/۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع است که با افزودن مقدار ۴۰ ppm بهینه ۲/۲ میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع کاهش خواهد یافت.

(۲) نتایج آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که بهترین مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی، مدار معادلی است که دارای دو ثابت زمانی باشد. ثابت زمانی اول در فرکانس‌های بالا به فرایند انتقال بار و ثابت زمانی دوم در فرکانس‌های کم به فرایند جذب سطحی مرتبط است.

(۳) نتایج طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی آشکار ساخت که مقاومت پلاریزاسیون فولاد کربنی API 5L Gr.B در محلول ۱۶/۹۷ گرم کلرید سدیم بر لیتر بدون حضور ممانعت‌کننده، برابر ۹۶۴ اهم بر سانتی‌متر مربع است که با افزودن ممانعت‌کننده در غلظت‌های ۳۰ و ۴۰ ppm، به ترتیب مقاومت پلاریزاسیون به ۱۲۵۷ و ۱۵۹۵ اهم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد.

(۴) هم‌چنین نتایج نشان داد که افزایش بیش‌تر غلظت ممانعت‌کننده به میزان ۵۰ و ۶۰ ppm باعث کاهش مقاومت پلاریزاسیون و رسیدن آن به ترتیب به مقادیر ۱۲۷۰ و ۱۴۸۰ اهم بر سانتی‌متر مربع خواهد شد.

با تعیین مقاومت پلاریزاسیون نمونه در حضور ممانعت‌کننده و در محیط عاری از ممانعت‌کننده می‌توان بازده حفاظت ممانعت‌کننده (η) را با استفاده از معادله ۲ به‌دست آورد [۲۴-۲۲]:

$$\eta\% = \left| 1 - \frac{R_{Inhibition}}{R_{Blank}} \right| \times 100 \quad (۲)$$

در این معادله $R_{Inhibition}$ ، مقاومت پلاریزاسیون نمونه در حضور ممانعت‌کننده و R_{Blank} مقاومت پلاریزاسیون نمونه در محیط عاری از ممانعت‌کننده است. با استفاده از معادله ۲، در جدول ۴ مقادیر بازده حفاظت برای ممانعت‌کننده WS 86-1 در چهارغلظت ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm نیز محاسبه و نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود مقادیر درصد بازده حفاظت محاسبه شده بسیار نزدیک به مقادیر مشابه در جدول ۲ می‌باشد و برای غلظت ۴۰ ppm، درصد بازده حفاظت به حدود ۶۵ می‌رسد که تایید کننده نتایج قبل است.

جدول ۴- مقادیر المان‌های به‌دست آمده از مقادیر المان‌های به‌دست آمده از مدار معادل شکل ۸

مقاومت پلاریزاسیون (اهم بر سانتی‌متر مربع)	درصد بازده حفاظت
۹۶۴	-
۱۲۵۷	۳۰/۴۱
۱۵۹۵	۶۵/۴۲
۱۲۷۰	۳۱/۷۶
۱۴۸۰	۵۳/۵۱

مراجع

- [1] 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, 2010, Pp. 4729–4733.
- [2] 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, 2010, Pp. 2059–2065.
- [3] 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, 2011, Pp. 3780–3787.
- [4] G. TrabANELLI, V. Carassiti, Mechanism and Phenomenology of Organic Inhibitors, *Advanced Corrosion Science and Technology*, Ed. M.G. Fontana, R.W. Staehle, Vol. 1, Plenum Press, New York, NY, 1970, Pp. 170–184.
- [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, 2009, Pp. 850–859.
- [6] F. Mansfeld, *Corrosion Mechanisms*, Marcel. Dekker Inc, 1987, Pp. 119–127.
- [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, 1999, Pp. 1911–1919.
- [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, 2009, 761–768.
- [9] B. Wang, M. Du, J. Zhang, C.J. Gao, Electrochemical and surface analysis studies on corrosion inhibition of Q235 steel by imidazoline derivative against CO₂ corrosion, *Corrosion Science*, Vol.53, 2011, 353–361.
- [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, 2005, Pp. 2636–2658.
- [11] L.J. Korb, D.L. Olsen, *Metals Handbook*, Ninth Edition, Vol. 13, Corrosion in Petroleum Production Operation, 1987, Pp. 1232–1244.
- [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, 2000, Pp. 979–990.
- [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, 2007, Pp. 331–340.
- [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, 2012, Pp. 148–155.
- [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, 2011, Pp. 147–152.
- [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, 2008, Pp. 2021–2029.
- [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, 2006, Pp. 4053–4064.

- [18] J. Zhao, G. Chen, The synergistic inhibition effect of oleic-based imidazoline and sodium benzoate on mild steel corrosion in a CO₂-saturated brine solution, *Electrochimica Acta*, Vol.69, 2012, Pp. 247–255.
- [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, 2009, Pp. 744–751.
- [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, 2004, Pp. 111–121.
- [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, 1964, Pp. 387–396.
- [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, 2012, Pp. 42–54.
- [23] D.A. Lopez, S.N. Simison, S.R. de Sanchez, Inhibitors performance in CO₂ corrosion: EIS studies on the interaction between their molecular structure and steel microstructure, *Corrosion Science*, Vol.47, 2005, Pp. 735–755.
- [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, 2012, Pp. 54–60.
- [25] T. Hong, W.P. Jepson, Corrosion inhibitor studies in large flow loop at high temperature and high pressure, *Corrosion Science*, Vol.43, 2001, Pp. 1839–1849.
- [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, 2002, Pp. 101–112.
- [27] G.W. Walter, A review of impedance plot method used for corrosion performance analysis of painted metals, *Corrosion Science*, Vol.26, 1986, Pp. 681–703.
- [28] G.W. Walter, A comparison of single frequency and wide frequency range impedance tests for painted metals, *Corrosion Science*, Vol.30, 1990, Pp. 617–629.
- [29] G.W. Walter, The application of impedance spectroscopy to study the uptake of sodium chloride solution in painted metals, *Corrosion Science*, Vol.32, 1991, Pp. 1041–1058.
- [30] 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, 2000, Pp. 1307–1326.