

بررسی اثر هم‌افزایی و غلظت بازدارنده‌های ایمیدازول و بنزوات سدیم بر خوردگی فولاد کربنی

حامد عابدی سماکوش^۱، سهیل مهدوی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند

^{۲*} دانشیار، پژوهشگاه مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند

* نویسنده مسئول: mahdavi@sut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

چکیده

استفاده از بازدارنده‌های خوردگی یکی از روش‌های موثر برای کاهش نرخ خوردگی است. در این تحقیق تاثیر افزودن هر یک از بازدارنده‌های ایمیدازول و بنزوات سدیم به صورت مجزا از هم و همچنین تاثیر افزودن هم‌زمان آن‌ها در غلظت‌های مختلف بر خوردگی فولاد st37 در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی برای بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها استفاده شد. همچنین تاثیر غوطه‌وری به مدت ۴۸ ساعت بر مورفولوژی سطح خورده شده و تاثیر قرارگیری طولانی مدت نمونه‌ها (۲۱۶ ساعت) در محیط حاوی بازدارنده بر میزان تغییرات وزنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی حاکی از غلظت‌های بهینه ۴۰۰ و ۳۰۰ ppm برای بازدارنده‌های ایمیدازول و بنزوات سدیم با راندمان بازدارندگی به ترتیب ۹۵ و ۸۳٪ بودند. استفاده از این بازدارنده‌ها صافی سطح خوردگی پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم را افزایش داده و مانع از ایجاد حفرات خوردگی شد. برخلاف انتظار، افزودن هم‌زمان ایمیدازول + بنزوات سدیم باعث کاهش قابل توجه‌تری در میزان خوردگی فولاد در مقایسه با افزودن جداگانه این مواد نشد و در بهترین حالت (۴۰۰ ppm ایمیدازول + ۳۰۰ ppm بنزوات سدیم) راندمان بازدارندگی ۵۰٪ به دست آمد. با این وجود، بررسی تاثیر طولانی مدت بازدارنده‌ها و نتایج کاهش وزن نشان داد که بیشترین راندمان و کمترین نرخ خوردگی در حضور هم‌زمان ایمیدازول + بنزوات سدیم رخ می‌دهد و استفاده از ایمیدازول به تنهایی نمی‌تواند بازدارندگی طولانی مدت را فراهم کند.

کلیدواژه: بازدارنده، ایمیدازول، بنزوات سدیم، پلاریزاسیون، امپدانس الکتروشیمیایی.

Investigation of the Synergistic Effect and Concentration of Imidazole and Sodium Benzoate Inhibitors on the Corrosion of Carbon Steel

H. Abedi Samakush¹, S. Mahdavi^{*2}

¹ MSc, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology

^{2*} Associate Professor, Advanced Materials Institute, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology

* Corresponding Author: mahdavi@sut.ac.ir

Submission: 2025, 05, 25 Acceptance: 2025, 06, 12

Abstract

The use of corrosion inhibitors is one of the effective methods to reduce the corrosion rate. In this study, the effect of adding each of the inhibitors, imidazole and sodium benzoate, separately, as well as the effect of their simultaneous addition at various concentrations, on the corrosion of ST37 steel in a 3.5 wt% sodium chloride environment was investigated. Potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) tests were used to evaluate the corrosion behavior of the samples. Additionally, the effect of 48-h immersion on the morphology of the corroded surface and the effect of long-term exposure (216 hrs) of the samples in the inhibitor-containing environment on weight change were also studied. The polarization and EIS results indicated optimal concentrations of 400 ppm and 300 ppm for imidazole and sodium benzoate, respectively, with inhibition efficiencies of 95% and 83%, respectively. The use of these inhibitors improved the surface smoothness after 48 hrs of immersion in the sodium chloride solution and prevented the formation of corrosion pits. Contrary to expectations, the simultaneous addition of imidazole + sodium benzoate did not lead to a significantly great reduction in the corrosion rate of steel compared to the individual addition of these substances, and at best (400 ppm imidazole + 300 ppm sodium benzoate), an inhibition efficiency of 50% was obtained. However, the long-term effects of the inhibitors and the weight loss results showed that the highest efficiency and lowest corrosion rate occurred in the simultaneous presence of imidazole and sodium benzoate, and that the use of imidazole alone could not provide long-term corrosion inhibition.

Keywords: Inhibitor; Imidazole; Sodium benzoate; Polarization; Electrochemical impedance.

۱- مقدمه

خوردگی فولاد در محیط آب دریا، به عنوان یک چالش مهم در صنایع دریایی و زیرساخت‌های ساحلی، همواره مورد توجه بوده است. حضور یون‌های کلرید و سایر عوامل خوردنده در آب دریا، باعث تسریع فرآیند خوردگی و کاهش عمر مفید سازه‌های فولادی می‌شود [۱-۳]. در این راستا، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی به عنوان یک روش مؤثر برای کاهش سرعت خوردگی و افزایش دوام سازه‌ها مطرح شده است. بازدارنده‌های خوردگی با مکانیزم‌های مختلفی از جمله جذب سطحی، تشکیل لایه‌های محافظ، و تغییر سینتیک واکنش‌های الکتروشیمیایی از خوردگی جلوگیری می‌کنند [۳-۷].

ایمیدازول و بنزوات سدیم، دو ترکیب شیمیایی هستند که به دلیل خواص بازدارندگی خوردگی خود، مورد توجه قرار گرفته‌اند. ایمیدازول و مشتقات آن به عنوان بازدارنده‌هایی با عملکرد بالا در محیط‌های اسیدی و خنثی شناخته می‌شوند. این مواد به دلیل ساختار حلقوی و قابلیت تشکیل پیوندهای هیدروژنی، می‌توانند به طور مؤثری با سطح فولاد تعامل داشته باشند و لایه‌ای محافظ ایجاد کنند. این لایه محافظ می‌تواند از نفوذ یون‌های خوردنده به داخل ساختار فلز جلوگیری کرده و در نتیجه، سرعت خوردگی را کاهش دهد [۴، ۵ و ۱۳-۸].

بنزوات سدیم نیز به عنوان یک بازدارنده خوردگی غیرسمی، سازگار با محیط زیست، و مؤثر برای فولاد در محیط‌های مختلف، از جمله آب دریا، مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از این بازدارنده می‌تواند از طریق تشکیل رسوبات نامحلول بر سطح فلز به طور قابل توجهی میزان خوردگی فولاد را در محلول‌های نمکی کاهش داده و به بهبود عمر مفید سازه‌های فولادی کمک کند. بنزوات سدیم نه تنها با یون‌های فلزی کمپلکس تشکیل می‌دهد، بلکه با ایجاد محیطی قلیایی در سطح فلز، پتانسیل خوردگی را به سمت مناطق غیرفعال جابه‌جا می‌کند [۱۴ و ۱۵].

با توجه به اهمیت خوردگی فولاد در محیط آب دریا و پتانسیل بالای ایمیدازول و بنزوات سدیم در کاهش خوردگی، بررسی و ارزیابی اثرات بازدارندگی خوردگی این دو ترکیب به صورت مجزا از یکدیگر و در صورت استفاده هم‌زمان، می‌تواند

به توسعه روش‌های مؤثرتر برای حفاظت از سازه‌های فولادی در برابر خوردگی کمک کند.

در این مقاله، به بررسی اثرات بازدارندگی خوردگی ایمیدازول و بنزوات سدیم بر روی فولاد در محیط آب دریا پرداخته می‌شود. هدف از این بررسی، تعیین عملکرد بازدارندگی خوردگی این دو ترکیب، ارزیابی کارایی آن‌ها، و ارائه راهکارهایی برای استفاده بهینه از آن‌ها در حفاظت از سازه‌های فولادی در برابر خوردگی است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق فولادی st37 با ترکیب شیمیایی نمایش داده شده در جدول ۱ استفاده شد. ابتدا نمونه‌های فولادی به کمک برش سیمی به صورت قطعات دایره‌ای شکل با مساحت سطح یک سانتی‌متر مربع در آمدند. سطح نمونه‌ها توسط کاغذ سمباده با مش ۸۰ تا ۲۰۰۰ صیقل داده شد. در ادامه برای حذف آلودگی‌های سطحی، نمونه‌ها با اتانول شستشو داده شدند. سپس نمونه‌ها در داخل قالبی از جنس پلی‌آمید قرار گرفتند. اتصال الکتریکی نمونه فولادی به کمک یک فنر و سیم مسی برقرار شد. در نهایت، سطح نمونه به ابعاد 1 cm^2 در تماس با محیط خوردنده قرار گرفت.

از یک سل سه الکترودی شامل نمونه‌های فولادی به عنوان الکترود کاری، الکترود Ag/AgCl (3M KCl) به عنوان الکترود مرجع، و ورق پلاتینی با مساحت سطح 1 cm^2 به عنوان الکترود مخالف برای بررسی تاثیر بازدارنده‌های مختلف ایمیدازول^۱ ($\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_2$) و بنزوات سدیم^۲ ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$) بر رفتار خوردگی فولاد در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد در دمای محیط (25°C) استفاده شد. تاثیر غلظت‌های مختلفی از بازدارنده‌های ایمیدازول (۵۰۰-۱۰۰ ppm)، بنزوات سدیم (۵۰۰-۱۰۰ ppm)، و ایمیدازول + بنزوات سدیم (۳۰۰+۴۰۰، ۱۰۰+۴۰۰، ۱۰۰+۱۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی‌ها از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات WonATech Zive SP2 ساخت کره جنوبی استفاده شد.

^۱Imidazole

^۲Sodium Benzoate

خورنده قرار دارند تاثیر بگذارد. بنابراین نمونه‌ها به‌طور جداگانه و در ظروف سر بسته قرار گرفتند. پس از ۲۱۶ ساعت نمونه‌ها از محلول خارج شده و پس از شستشو با اتانول و خشک شدن، مجدداً توزین شدند. سرعت خوردگی (mm/y) و راندمان بازدارندگی با توجه به میزان کاهش وزن و با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند [۲۰].

$$C.R = \frac{8.76 \times 10^{-4} \times W}{D \times A \times t} \quad (1)$$

$$\% IEW = \left(\frac{W_0 - W_{inh}}{W_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در این معادلات W کاهش وزن (g)، D دانسیته ی فلز (g/cm^3)، A مساحت سطح نمونه (cm^2)، t زمان غوطه‌وری (h)، W_{inh} و W_0 مقادیر کاهش وزن در حضور و عدم حضور بازدارنده هستند. به منظور بررسی مورفولوژی سطح از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN (CAMSCAN MV 2300) استفاده شد.

نمونه‌ها قبل از هر آزمون برای ثابت شدن پتانسیل مدار باز به مدت ۱۵ دقیقه در محلول غوطه‌ور شدند. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز با دامنه نوسان سینوسی پتانسیل ۱۰ mV و در محدوده فرکانس ۱۰۰ kHz تا ۱۰ mHz انجام شد. لازم بذکر است که برای به‌دست آوردن مدار معادل و پارامترهای الکتروشیمیایی پس از آزمون امپدانس، از نرم افزار ZView استفاده شد. آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده ۳۰۰ - تا ۱۰۰۰ mV نسبت به پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش ۱ mV/s انجام شد. برای اطمینان از صحت نتایج هر آزمون سه بار تکرار شد.

برای انجام آزمون کاهش وزن، نمونه‌هایی با سطح در دسترس 1 cm^2 آماده‌سازی شدند. نمونه‌های آماده شده با قدرت تفکیک چهار رقم اعشار و با استفاده از ترازوی Sartorius Entris 224i توزین شده و داخل محلول‌های حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده قرار گرفتند. محصولات خوردگی یک فلز ممکن است روی سرعت خوردگی فلزات دیگری که در یک محیط

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه فولادی st37 بر حسب درصد وزنی

عنصر	کربن	منگنز	فسفر	گوگرد	سیلیسیم	آهن
درصد وزنی	≥ 0.37	$\geq 1/4$	≥ 0.045	≥ 0.045	≥ 0.5	$\leq 97/64$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر ایمیدازول

شکل ۱ منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی و در غلظت‌های مختلفی از بازدارنده ایمیدازول (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، و ۴۰۰ ppm) و بدون بازدارنده در دمای محیط را نشان می‌دهد. در حضور بازدارنده هر دو شاخه آندی و کاتدی منحنی پلاریزاسیون به سمت دانسیته جریان‌های پایین‌تر می‌روند. این بدان معنی است که هر دو واکنش‌های

آندی و کاتدی تحت تاثیر حضور بازدارنده قرار می‌گیرند و این نوع بازدارنده‌ها را می‌توان در گروه بازدارنده‌های مختلط قرار داد [۲۱].

پارامترهای الکتروشیمیایی مانند دانسیته جریان خوردگی (i_{corr})، پتانسیل خوردگی (E_{corr})، شیب تافلی آندی و کاتدی (β_a , β_c) و راندمان بازدارندگی (EI %) در جدول ۲ آمده است. داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد مقادیر i_{corr} در حضور بازدارنده‌ها کاهش یافته و راندمان بازدارندگی افزایش یافته است.

با استفاده از مدار معادل نشان داده در شکل ۳ که شامل مقاومت محلول (R_1)، مقاومت انتقال بار در فصل مشترک فلز و محلول (R_2)، مقاومت فیلم محافظ (R_3) تحلیل کرد.

داده‌های به‌دست آمده از فیت کردن منحنی‌های تجربی در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر مقاومت پلاریزاسیون پس از افزودن بازدارنده افزایش یافته است، که نشان می‌دهد این بازدارنده با تشکیل یک فیلم محافظ در فصل مشترک فلز/محلول، از فولاد محافظت می‌کند.

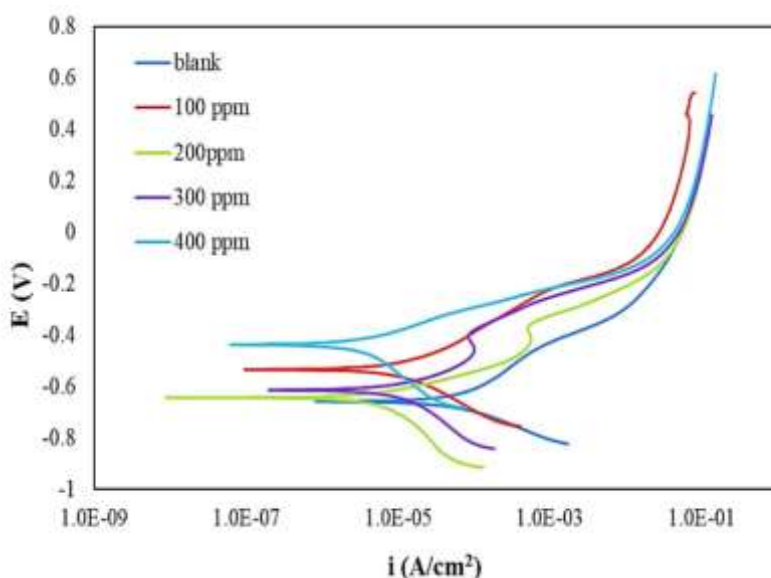
تصاویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی در حضور/عدم حضور غلظت بهینه بازدارنده ایمیدازول پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در شکل ۴ نشان داده شده است. در غیاب بازدارنده سطح فولاد کربنی بسیار ناصاف بوده و متحمل خوردگی گسترده و آسیب‌های نسبتاً شدید شده است.

حفرات ناشی از خوردگی در شکل ۴ الف مشخص هستند. با افزودن بازدارنده، مورفولوژی سطح پس از خوردگی به نسبت صاف‌تر است، و حفرات ناشی از خوردگی در سطح مشاهده نمی‌شوند. این تصاویر با نتایج بررسی‌های الکتروشیمیایی در تطابق هستند.

با توجه به جذب مولکول‌های بازدارنده در هر دو مکان آنودی و کاتدی فلز، شیب تافلی آنودی و کاتدی در عدم حضور و حضور بازدارنده تقریباً ثابت است. این نشان می‌دهد که فعالیت بازدارنده‌گی این بازدارنده بر روی سطح موجود، بدون تغییر در مکانیزم خوردگی است. بنابراین می‌توان گفت که این بازدارنده از نوع مختلط است، اما تأثیر بازدارنده بر واکنش‌های کاتدی تا حدودی بیشتر بوده است [۲۱].

از مشاهده نمودار پلاریزاسیون و جدول ۲ می‌توان گفت بهترین عملکرد بازدارندگی با راندمان ۹۵٪ در غلظت ۴۰۰ ppm ایمیدازول حاصل شده است. همچنین بررسی غلظت‌های بالاتر از ۴۰۰ ppm نشان داد که راندمان بازدارندگی به‌شدت کاهش می‌یابد.

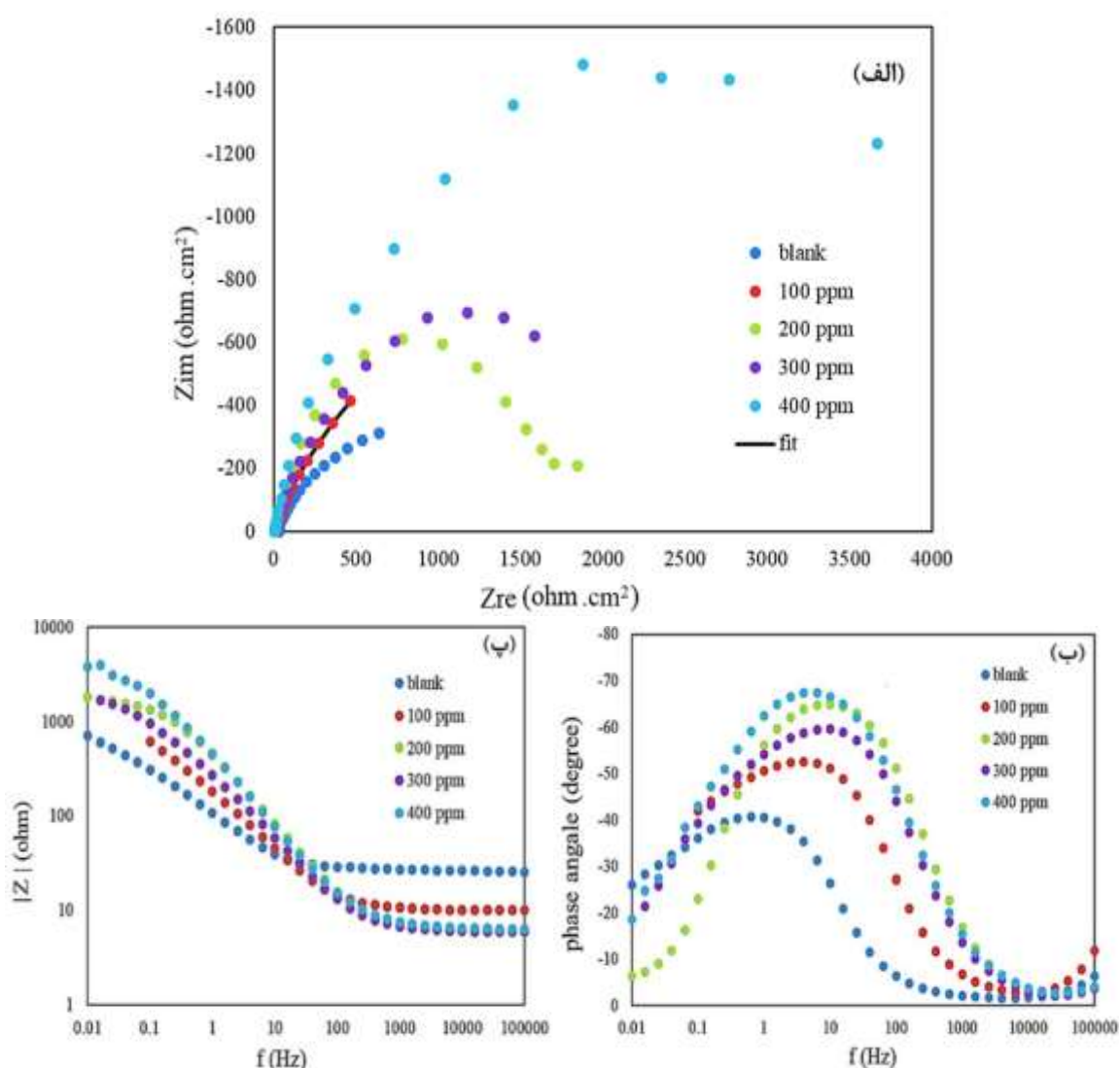
شکل ۲ منحنی‌های نایکوئیست و بد فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد و در غلظت‌های مختلف ایمیدازول را نشان می‌دهد. قطر نیم‌دایره منحنی نایکوئیست با افزودن بازدارنده افزایش یافته است، که نشان می‌دهد مولکول‌های بازدارنده روی سطح فولاد جذب می‌شوند و یک سد محافظ ایجاد می‌کنند. نتایج به‌دست آمده از منحنی‌های EIS را می‌توان



شکل ۱. منحنی پلاریزاسیون فولاد ساده کربنی در غلظت‌های مختلف بازدارنده در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۲. پارامترهای الکتروشیمیایی استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون برای تاثیر غلظت ایمیدازول

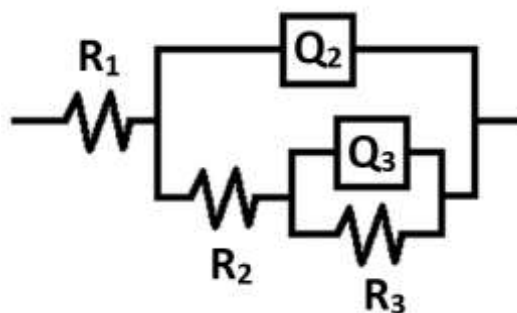
غلظت (ppm)	E_{corr} (mV)	i_{corr} (mA/cm ²)	β_a (mV/decade)	β_c (mV/decade)	% IE
۰	-۶۵۰	۰/۰۷	۲۲۰	۱۲۰	-
۱۰۰	-۵۴۰	۰/۰۱۵	۱۸۰	۱۹۰	۷۸
۲۰۰	-۶۴۰	۰/۰۰۵	۸۰	۲۲۰	۹۲
۳۰۰	-۶۲۰	۰/۰۱۲	۱۶۰	۲۳۰	۸۲
۴۰۰	-۴۴۰	۰/۰۰۳	۸۰	۲۰۰	۹۵



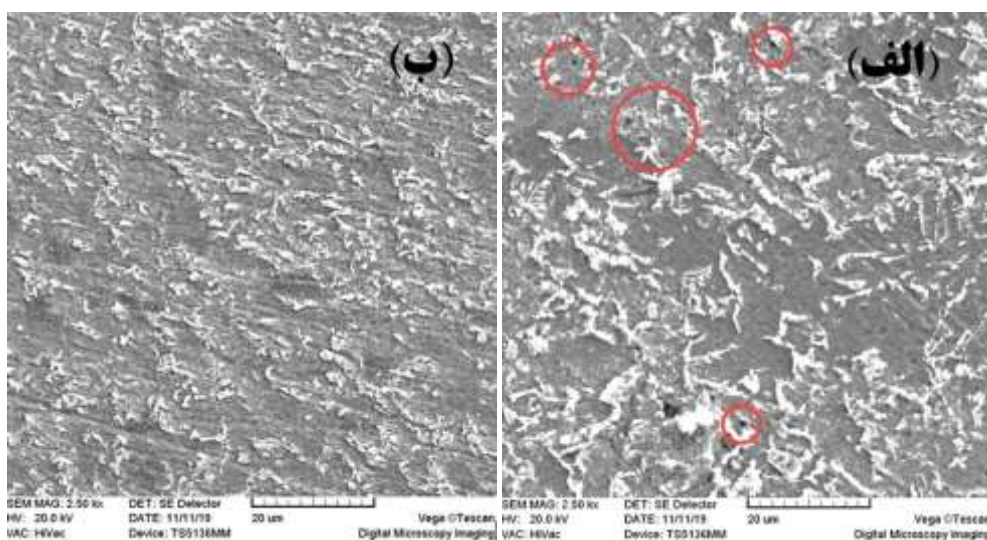
شکل ۲. نمودارهای (الف) نایکوئیست (ب) فاز و (پ) بد-اندازه امپدانس برای فولاد کربنی در محلول NaCl ۳/۵ درصد وزنی در حضور و عدم حضور بازدارنده ایمیدازول.

جدول ۳. پارامترهای متناسب طیف EIS برای فولاد کربنی ساده در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم با و بدون بازدارنده ایمیدازول

غلظت (ppm)	R_1 ($\Omega.cm^2$)	R_2 ($\Omega.cm^2$)	Y_{02} ($S.s^n.cm^{-2}$)	n_2	R_3 ($\Omega.cm^2$)	Y_{03} ($S.s^n.cm^{-2}$)	n_3
۰	۶/۰	۴/۵	$1/6 \times 10^{-3}$	۰/۷۰	۸۴	$8/6 \times 10^{-3}$	۰/۶۰
۱۰۰	۵/۶	۲/۷	$1/7 \times 10^{-3}$	۰/۶۰	۲۴۴۳	$9/5 \times 10^{-3}$	۰/۵۴
۲۰۰	۵/۷	۷/۰	$4/5 \times 10^{-4}$	۰/۶۳	۱۷۲۰	$6/3 \times 10^{-3}$	۰/۵۲
۳۰۰	۵/۷	۱/۵	$9/8 \times 10^{-4}$	۰/۶۴	۲۳۸۰	$5/0 \times 10^{-3}$	۰/۵۷
۴۰۰	۶/۵	۱۳/۷	$4/8 \times 10^{-4}$	۰/۷۶	۳۹۲۵	$3/5 \times 10^{-3}$	۰/۵۵



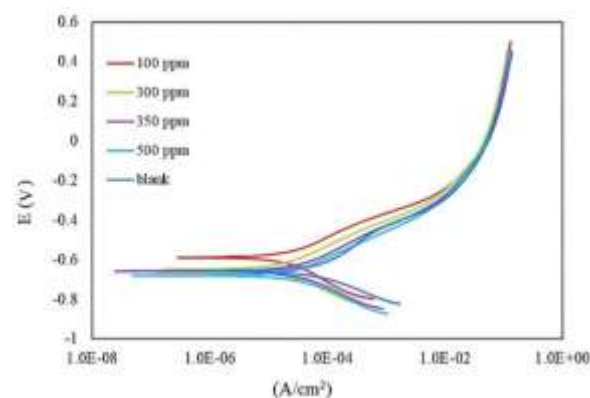
شکل ۳. مدار معادل به کار رفته برای فیت کردن داده‌های تجربی.



شکل ۴. تصاویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی (الف) بدون بازدارنده و (ب) در حضور غلظت بهینه بازدارنده ایمیدازول پس از ۸ ساعت غوطه‌وری.

۳-۲- تاثیر بنزوات سدیم

به‌منظور تعیین اثر غلظت بنزوات سدیم روی خوردگی کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد، آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در غلظت‌های مختلف صورت پذیرفت. شکل ۵ منحنی‌های به‌دست آمده از این آزمایش‌ها را برای محلول حاوی بنزوات سدیم نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از نمودار پلاریزاسیون در جدول ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش غلظت بنزوات سدیم تا ۳۰۰ ppm راندمان بازدارندگی افزایش، ولی در غلظت‌های بالاتر راندمان بازدارندگی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت بازدارنده پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر منفی‌تر رفته است، که نشان می‌دهد بنزوات سدیم به‌عنوان بازدارنده خوردگی کاتدی عمل کرده و با جذب بر روی سطح فلز، سد محافظتی تشکیل می‌دهد. افزایش راندمان بازدارندگی با افزایش غلظت بنزوات سدیم نشان از بهبود کیفیت پوشش و افزایش ضخامت لایه محافظ در غلظت‌های بالاتر دارد [۲۲]. به‌طور کلی اگر پتانسیل مدار باز یا پتانسیل خوردگی به مقادیر فعال‌تر (منفی‌تر) نزول کند، بیانگر عملکرد بازدارنده به صورت کاتدی می‌باشد و تغییر در جهت مثبت، دلیل بر عملکرد آندی بازدارنده است. بازدارنده‌های مختلط معمولاً باعث تغییر قابل توجهی در پتانسیل خوردگی نمی‌شوند [۲۳].



شکل ۵. منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف بنزوات سدیم در دمای محیط.

به‌منظور بررسی اثر غلظت بر رفتار بازدارنده، تست‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف بنزوات سدیم روی فولاد کربنی در محیط ۳/۵ NaCl انجام گرفت. شکل ۶ منحنی‌های نایکوئیست و بد، و مدار معادل مناسب برای فیت کردن داده‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌ها، در محیط مورد آزمایش افزودن بنزوات سدیم تا غلظت ۳۰۰ ppm، موجب افزایش قطر منحنی‌های نایکوئیست شده است، که دلالت بر افزایش مقاومت انتقال بار می‌باشد. نتایج به دست آمده از منحنی‌های نایکوئیست در جدول ۵ آورده شده است.

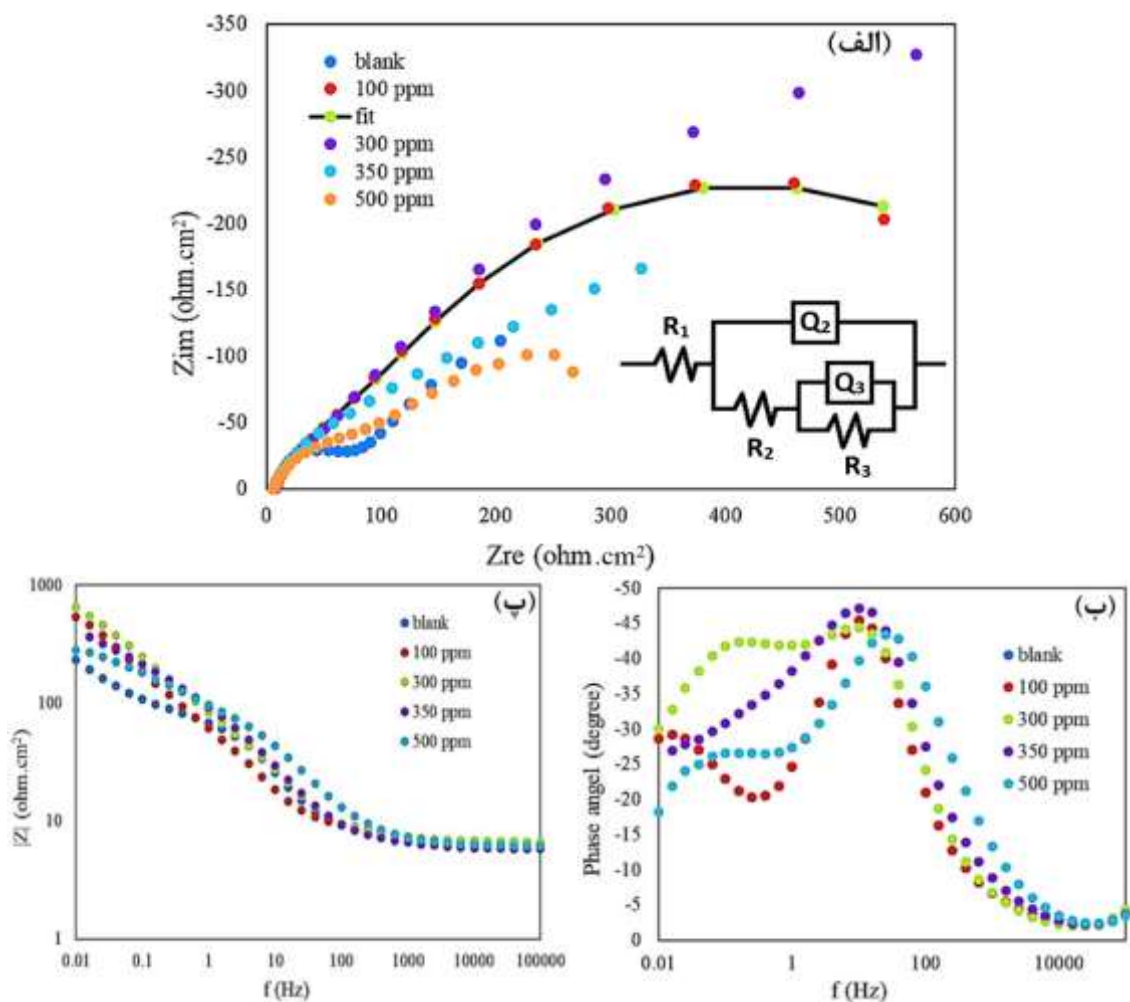
همانطور که مشاهده می‌شود، در محیط آزمایش با افزایش غلظت بازدارنده تا ۳۰۰ ppm مقاومت انتقال بار و راندمان بازدارندگی افزایش یافته و همچنین زاویه فاز افزایش می‌یابد، که به دلیل جذب بازدارنده روی سطح می‌باشد. داده‌های به دست آمده از محاسبات پلاریزاسیون با داده‌های امپدانس در تطابق خوبی با یکدیگر هستند.

شکل ۷ مورفولوژی سطح فولاد کربنی را در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد، در حضور غلظت بهینه بازدارنده بنزوات سدیم پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری نشان می‌دهد. در مقایسه با شکل ۴ (الف) که مربوط به نمونه بررسی شده در شرایط بدون حضور بازدارنده است، تغییر چندانی در ناهمواری‌های سطحی مشاهده نمی‌شود، اما حفرات ایجاد شده در سطح نمونه در محیط فاقد بازدارنده در محیط حاوی بازدارنده بنزوات سدیم قابل مشاهده نیستند.

با این وجود مقایسه شکل ۷ با شکل ۴ ب نشان دهنده عملکرد بهتر بازدارنده ایمیدازول در مقایسه با بنزوات سدیم است. سطح نمونه خورده شده در حضور بازدارنده ایمیدازول به مراتب صاف‌تر از نمونه خورده شده در حضور بنزوات سدیم است و محصولات خوردگی کمتری در سطح این نمونه مشاهده می‌شوند، که این موضوع در نیز تطابق با نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های الکتروشیمیایی خوردگی است.

جدول ۴. پارامترهای به‌دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد، در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف بنزوات سدیم در دمای محیط

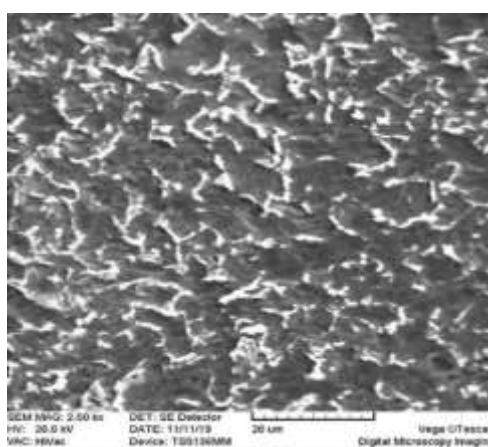
غلظت (ppm)	E_{corr} (mV)	i_{corr} (mA/cm ²)	β_a (mV/decade)	β_c (mV/decade)	% IE
۰	-۶۵۰	۰/۰۷	۲۲۰	۱۲۰	-
۱۰۰	-۵۸۲	۰/۰۱۶	۱۲۲	۱۶۰	۷۷
۳۰۰	-۶۴۵	۰/۰۱۲	۱۳۵	۱۴۹	۸۳
۳۵۰	-۶۶۰	۰/۰۲۳	۱۴۲	۱۳۶	۶۷
۵۰۰	-۶۸۰	۰/۰۲۵	۱۳۸	۱۲۵	۶۴



شکل ۶. نمودارهای (الف) نایکوئیست (ب) بد-فاز و (پ) بد-اندازه امپدانس برای فولاد کربنی در محلول ۳/۵NaCl درصد وزنی در حضور و عدم حضور بازدارنده بنزوات سدیم.

جدول ۵. پارامترهای به‌دست آمده از منحنی‌های نایکوئیست فولاد ساده کربنی در محیط سدیم کلرید ۳/۵ درصد در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف بنزوات سدیم در دمای محیط

غلظت (ppm)	R ₁ (Ω.cm ²)	R ₂ (Ω.cm ²)	Y ₀₂ (S.s ⁿ .cm ⁻²)	n ₂	R ₃ (Ω.cm ²)	Y ₀₃ (S.s ⁿ .cm ⁻²)	n ₃
۰	۶/۶	۸۲	۱/۶×۱۰ ^{-۳}	۰/۶۷	۳۵۷	۳۲/۰×۱۰ ^{-۳}	۰/۶۰
۱۰۰	۶/۵	۱۶۶	۲/۵×۱۰ ^{-۳}	۰/۷۰	۱۱۹۰	۴/۵×۱۰ ^{-۳}	۰/۵۵
۳۰۰	۶/۸	۳۸۹	۱/۷×۱۰ ^{-۳}	۰/۷۴	۱۲۹۱	۴/۴×۱۰ ^{-۳}	۰/۵۰
۳۵۰	۶/۰	۱۲۵	۱/۸×۱۰ ^{-۳}	۰/۷۲	۸۰۹	۷/۴×۱۰ ^{-۳}	۰/۵۲
۵۰۰	۶/۲	۸۷	۹/۸×۱۰ ^{-۴}	۰/۷۲	۷۳۸	۹/۶×۱۰ ^{-۳}	۰/۵۲



شکل ۷. تصویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی پس از ۸ ساعت غوطه‌وری در محلول NaCl حاوی غلظت بهینه بازدارنده بنزوات سدیم.

۳-۳- تاثیر حضور هم‌زمان ایمیدازول+بنزوات سدیم

به‌منظور بررسی امکان هم‌افزایی و تاثیر مثبت حضور هم‌زمان هر دو بازدارنده، نسبت‌های مختلفی از ایمیدازول و بنزوات سدیم به کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی اضافه شده و خوردگی نمونه‌های فولادی در این محیط‌ها مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای فولاد کربنی در حضور و عدم حضور و بازدارنده‌ها در شکل ۸ و پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از آن در جدول ۶ نشان داده شده است. مقایسه نتایج مربوط به استفاده ترکیبی از ۱۰۰ppm بنزوات سدیم + ۱۰۰ppm ایمیدازول با نتایج به‌دست آمده از استفاده جداگانه از ۱۰۰ppm بنزوات سدیم یا ۱۰۰ppm ایمیدازول (جدول ۲ و ۴) نشان می‌دهد که حضور هم‌زمان ایمیدازول و

بنزوات سدیم اثر بازدارندگی کمتری ایجاد کرده است. این موضوع در صورت استفاده از ۱۰۰ppm بنزوات سدیم در کنار ۴۰۰ppm ایمیدازول و همچنین استفاده از مقادیر بهینه ppm ۳۰۰ بنزوات سدیم در کنار ۴۰۰ppm ایمیدازول نیز صادق است.

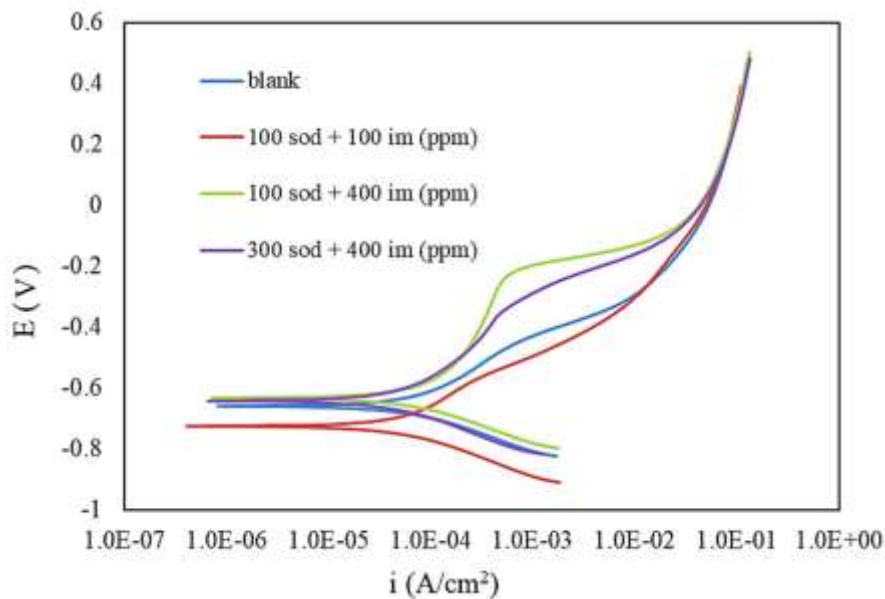
راندمان بازدارندگی در صورت استفاده از مقدار بهینه ایمیدازول ۹۵ درصد، و در صورت استفاده از مقدار بهینه بنزوات سدیم ۸۳ درصد بوده است، در حالیکه استفاده هم‌زمان از مقادیر بهینه این دو نوع بازدارنده باعث افت راندمان بازدارندگی به ۵۰ درصد شده است. با توجه به تغییرات پتانسیل خوردگی می‌توان گفت ترکیب بنزوات سدیم + ایمیدازول می‌تواند به عنوان یک بازدارنده از نوع مختلط با تأثیر غالب در شاخه آندی عمل کند.

جدول ۶. پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد، در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف ترکیب بنزوات سدیم + ایمیدازول در دمای محیط

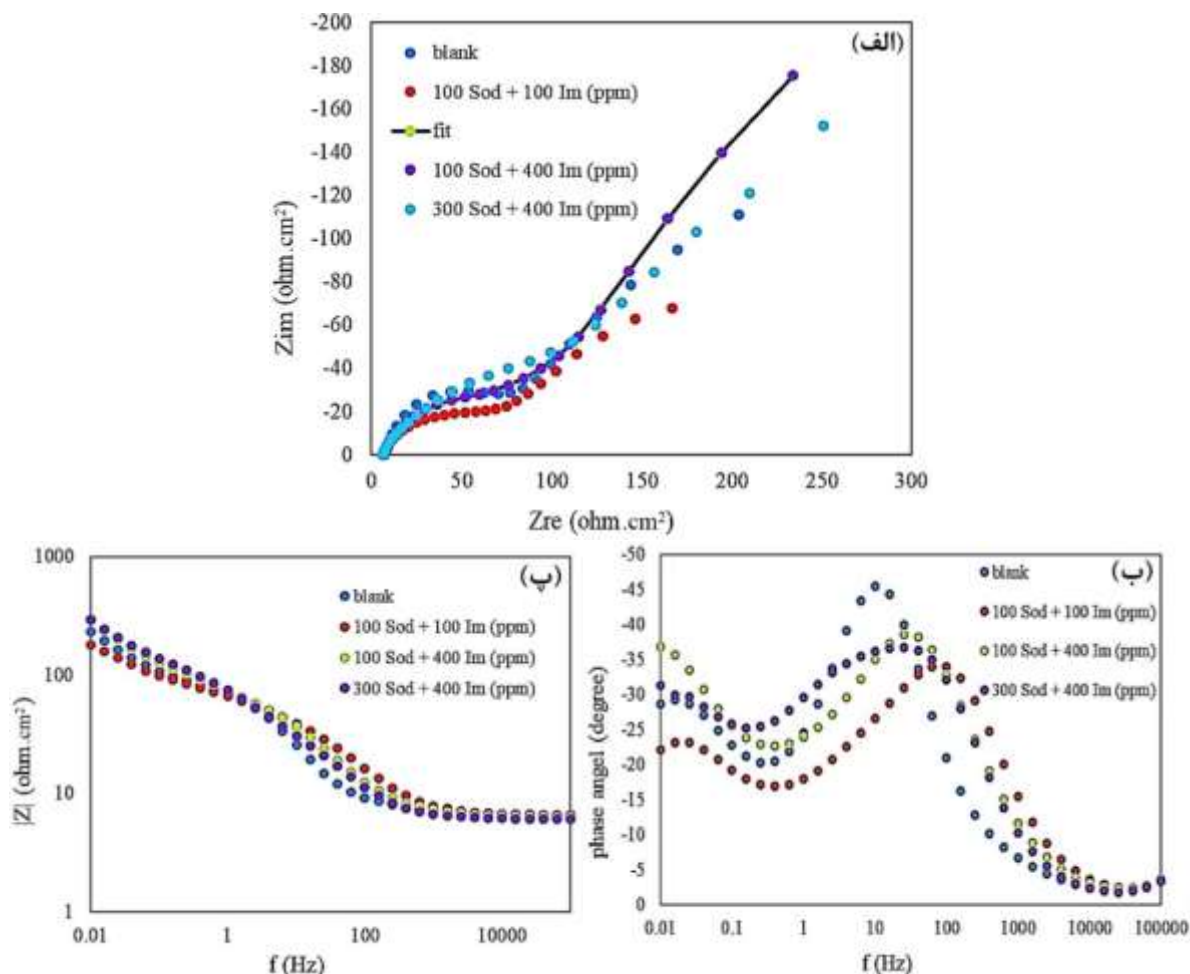
غلظت (ppm)	E_{corr} (mV)	i_{corr} (mA/cm ²)	β_a (mV/decade)	β_c (mV/decade)	% IE
۰	-۶۵۰	۰/۰۷	۲۲۰	۱۲۰	-
۱۰۰ Sod + ۱۰۰ Im	-۷۲۰	۰/۰۵	۲۲۸	۱۲۵	۲۸
۱۰۰ Sod + ۴۰۰ Im	-۶۲۵	۰/۰۵۲	۲۲۰	۱۲۰	۳۰
۳۰۰ Sod + ۴۰۰ Im	-۶۴۰	۰/۰۳۵	۲۴۲	۱۲۵	۵۰

جدول ۷. پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های نایکوئیست فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف ترکیب بنزوات سدیم و ایمیدازول در دمای محیط

غلظت (ppm)	R_1 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Y_{02} ($\text{S} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2}$)	n_2	R_3 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Y_{03} ($\text{S} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2}$)	n_3
۰	۶/۶	۸۲/۰	$۱/۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۶۷	۳۵۷	$۳/۲ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۶۰
۱۰۰ Sod + ۱۰۰ Im	۶/۵	۴۰/۷	$۷/۲ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۲	۱۶۰۰	$۱/۸ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۵۰
۱۰۰ Sod + ۴۰۰ Im	۶/۳	۷۲/۲	$۱/۲ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۷۰	۵۹۰۰	$۱/۷ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۴۸
۳۰۰ Sod + ۴۰۰ Im	۶/۰	۶۶/۸	$۱/۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۶۸	۳۵۰۰	$۱/۲ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۵۸



شکل ۸. منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد غیاب و حضور غلظت‌های مختلف ترکیب بنزوات سدیم و ایمیدازول در دمای محیط.



شکل ۹. نمودارهای (الف) نایکوئیست (ب) بد-فاز و (پ) بد-اندازه امپدانس برای فولاد کربنی در محلول ۳/۵ NaCl درصد وزنی در حضور و عدم حضور ترکیبی از بازدارنده‌های ایمیدازول+بنزوات سدیم.

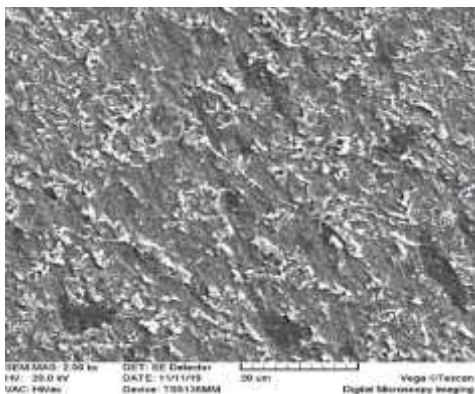
به‌صورت جداگانه، بر رفتار خوردگی فولاد داشته است. کاهش هم‌زمان اثربخشی بازدارنده‌ها هنگامی که به‌صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌تواند ناشی از تداخل در مکانیزم‌های عملکرد شیمیایی آن‌ها باشد.

در این مطالعه، ایمیدازول به‌عنوان یک بازدارنده‌ی مختلط عمل می‌کند، به این معنا که می‌تواند هم فرآیند آندی و هم فرآیند کاتدی را مهار کند.

در مقابل، بنزوات سدیم عمدتاً یک بازدارنده‌ی کاتدی است و از طریق مداخله در واکنش‌های کاهشی (به‌ویژه کاهش اکسیژن محلول) اثر حفاظتی خود را اعمال می‌کند.

منحنی‌های امپدانس الکتروشیمیایی برای فولاد کربنی در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در حضور و عدم حضور ترکیبی از بازدارنده‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از فیت کردن داده‌های تجربی نیز در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده در تطابق خوبی با نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون هستند. با افزایش غلظت بازدارنده‌ها قطر منحنی نایکوئیست افزایش می‌یابد، که به‌دلیل تشکیل فیلم محافظ بازدارنده روی سطح فولاد می‌باشد. با این وجود، استفاده از ترکیبی از دو بازدارنده ایمیدازول و بنزوات سدیم با هر نسبتی، تاثیر کمتری از استفاده هر یک از این بازدارنده‌ها



شکل ۱۰. تصاویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی در حضور غلظت بهینه بازدارنده ایمیدازول (۸۰۰ ppm) + بنزوات سدیم (۳۰۰ ppm) پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری.

۳-۴- کاهش وزن

نتایج آزمون‌های کاهش وزن پس از ۲۱۶ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم حاوی و فاقد بازدارنده در جدول ۸ نشان داده شده است. با افزودن بازدارنده‌ها به محیط خورنده نرخ خوردگی به شدت کاهش پیدا کرده است. علت این امر حضور ترکیبات آلی در این بازدارنده‌ها، و جذب گونه‌های آلی بر روی نواحی فعال خوردگی و در نتیجه کاهش مناطق فعال و دسترسی کمتر محیط خورنده به سطح فلز نسبت داده می‌شود. برخلاف نتایج پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی که حاکی از عملکرد مناسب ایمیدازول در جلوگیری از خوردگی فولاد بودند، آزمون غوطه‌وری طولانی مدت نشان می‌دهد که استفاده تنها از ایمیدازول کمترین راندمان و بدترین عملکرد بازدارندگی را در طولانی مدت خواهد داشت. در واقع گویا این بازدارنده در طولانی مدت کارایی خود را از دست می‌دهد. نتایج آزمون غوطه‌وری طولانی مدت بنزوات سدیم و آزمون‌های الکتروشیمیایی این بازدارنده تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند، که حاکی از عدم افت عملکرد این بازدارنده در طولانی مدت است.

حضور هم‌زمان ایمیدازول + بنزوات سدیم بهترین عملکرد را در طولانی مدت داشته و راندمان بازدارندگی آن ۹۸٪ است. به نظر می‌رسد در حضور هم‌زمان این دو بازدارنده، زمان‌های بیشتری برای جذب آن‌ها در سطح نمونه مورد نیاز است و پس از جذب این ترکیب می‌تواند بهترین عملکرد بازدارندگی را داشته باشد.

زمانی که این دو بازدارنده به‌طور هم‌زمان در محیط قرار می‌گیرند، ممکن است به‌جای اثر هم‌افزایی، نوعی اثر تداخلی^۱ میان آن‌ها رخ دهد. دلیل اصلی این پدیده احتمالاً به تداخل در جذب سطحی بازدارنده‌ها بر روی سطح فلز بازمی‌گردد. هر دو ماده برای اثرگذاری نیاز دارند تا به سطح فلز جذب شوند و یک لایه‌ی محافظ تشکیل دهند. اگر مکانیزم جذب یکی از آن‌ها باعث ممانعت از جذب مؤثر دیگری شود، بازدارنده‌ها نمی‌توانند به‌طور کامل نقش حفاظتی خود را ایفا کنند.

به عنوان مثال، اگر مولکول‌های ایمیدازول که به دلیل ساختار حلقوی حاوی نیتروژن تمایل زیادی به جذب سطح فلز دارند، بخش بزرگی از سطح را اشغال کنند، بنزوات‌ها ممکن است نتوانند به درستی جذب شوند یا بالعکس. در این شرایط، رقابت برای جذب و تداخل در تشکیل لایه‌ی محافظ می‌تواند نه تنها باعث کاهش کارایی یکی از بازدارنده‌ها شود، بلکه به‌طور کلی بازدارندگی هر دو ماده را کاهش دهد.

همچنین از دید الکتروشیمیایی، ممکن است این دو ماده پتانسیل‌های متفاوتی برای اثرگذاری بر روی واکنش‌های آندی و کاتدی داشته باشند و در نتیجه، حضور هم‌زمان آن‌ها باعث اختلال در تعادل الکتروشیمیایی سطح فلز شود که خود موجب ناپایداری لایه‌ی محافظ و افزایش نرخ خوردگی می‌شود.

شکل ۱۰ تصویر SEM به‌دست آمده از سطح نمونه فولاد کربنی در حضور غلظت بهینه بازدارنده بنزوات سدیم + ایمیدازول پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری را نشان می‌دهد.

استفاده از ترکیبی از دو بازدارنده ایمیدازول و بنزوات سدیم نیز مانع ایجاد حفرات خوردگی در سطح نمونه شده است. مورفولوژی به‌دست بیشتر شبیه به مورفولوژی نمونه خورده شده در حضور ایمیدازول است شکل ۴ ب، که می‌تواند نشان دهنده تاثیر قابل توجه‌تر ایمیدازول بر خوردگی فولاد در مقایسه با بنزوات سدیم، در حضور هم‌زمان این دو در محلول خورنده باشد. با این وجود، میزان زبری سطح خوردگی در حالت اخیر بیشتر است، که بیانگر تاثیر منفی بنزوات سدیم بر عملکرد ایمیدازول می‌باشد.

^۱Antagonistic effect

جدول ۸. نتایج آزمون کاهش وزن فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد در حضور و عدم حضور غلظت بهینه بازدارنده‌ها بعد از ۲۱۶ ساعت غوطه‌وری

غلظت (ppm)	نرخ خوردگی (mm/y)	%IE _w	بازدارنده
-	۰/۷۲	-	بدون بازدارنده
۴۰۰	۰/۲۷	۳۳	ایمیدازول
۳۰۰	۰/۱۶	۸۳	بنزوات سدیم
۴۰۰+۳۰۰	۰/۱۳	۹۸	ایمیدازول+بنزوات سدیم

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر غلظت‌های مختلفی از دو نوع بازدارنده ایمیدازول و بنزوات سدیم، و همچنین تاثیر حضور هم‌زمان این دو بازدارنده، بر رفتار خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مهم به‌دست آمده عبارتند از:

- اضافه کردن ۴۰۰ ppm ایمیدازول به محلول کلرید سدیم، با راندمان بازدارندگی ۹۵٪، باعث کاهش قابل توجه چگالی جریان خوردگی از ۰/۰۷ به ۰/۰۳ mA.cm⁻² می‌شود. ایمیدازول به‌عنوان یک بازدارنده مختلط همچنین باعث سطح خوردگی صاف‌تر و جلوگیری از تشکیل حفرات خوردگی پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم می‌شود.
- غلظت ۳۰۰ ppm مقدار بهینه بنزوات سدیم برای کاهش چگالی جریان خوردگی فولاد به ۰/۰۱۲ mA.cm⁻² است. راندمان بازدارندگی در این حالت ۸۳٪ بوده و نتایج EIS نیز این موضوع را تایید می‌کنند. بنزوات سدیم به‌عنوان یک بازدارنده کاتدی عمل می‌کند.
- برخلاف انتظار، حضور هم‌زمان ایمیدازول + بنزوات سدیم تاثیر کمتری بر کاهش نرخ خوردگی فولاد در مقایسه با استفاده جداگانه از این بازدارنده‌ها دارد. با افزایش غلظت بازدارنده‌ها از ۱۰۰ ppm ایمیدازول+۱۰۰ ppm بنزوات سدیم به مقدار بهینه ۴۰۰ ppm ایمیدازول+۳۰۰ ppm بنزوات سدیم راندمان بازدارندگی از ۲۸ به ۵۰٪ می‌رسد، که همچنان بسیار کمتر از راندمان به‌دست آمده در حضور جداگانه هر کدام از این بازدارنده‌ها است.
- پس از غوطه‌وری به مدت ۲۱۶ ساعت، ایمیدازول، بنزوات سدیم، و ایمیدازول+بنزوات سدیم به ترتیب باعث کاهش ۲/۷، ۴/۵، و ۵/۵ برابری در نرخ خوردگی فولاد شده‌اند. برخلاف نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی و کوتاه مدت، در زمان‌های طولانی‌تر حضور هم‌زمان ایمیدازول+بنزوات سدیم باعث افزایش قابل توجهی در راندمان بازدارندگی و کاهش زیادی در نرخ خوردگی فولاد شده، و عملکرد بهتری از حضور جداگانه این بازدارنده‌ها داشته است.

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه مواد پیشرفته بابت فراهم آوردن تجهیزات آزمایشگاهی و حمایت مالی از پروژه تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] J.M. Castillo-Robles, E. de Freitas Martins, P. Ordejón, I. Cole, Molecular modeling applied to corrosion inhibition: a critical review, *Npj Mater. Degrad.*, Vol. 8, 2024, pp. 72
- [2] س. محمدی، بررسی خوردگی و عوامل موثر بر خوردگی فولاد دریایی STE 500، همایش ملی الکترونیک‌های دستاوردهای نوین در علوم مهندسی و پایه (۱۳۹۷).
- [3] ع. دهقانی، ق. بهلکه، ب. رمضانزاده، مطالعه اثر هم‌افزایی عصاره پوست کیوی و کاتیون روی در بازدارندگی خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول ۵/۳ درصد وزنی کلرید سدیم، نشریه علوم و مهندسی خوردگی شماره ۳۰، سال ۱۳۹۷، صفحات: ۶۷-۸۱.
- [4] ا. فاضل، م. نصر اصفهانی، م. زنده دل، عملکرد بازدارندگی لایه نازک خود مجتمع ایمیدازول مورد استفاده در پوشش هیبریدی آل - معدنی برای جلوگیری از خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول اسیدی، فصلنامه علمی - پژوهشی مواد نوین شماره ۶، سال ۲۰۱۶، صفحات: ۶۱-۷۴.
- [5] بررسی بازدارندگی ۲-مرکاپتوبنزواکسازول و ۲-آمینوبنزواکسازول بر روی فولاد API 5L X60 در محیط خوردگی شیرین، نشریه علوم مهندسی خوردگی شماره ۹، سال ۲۰۱۹، صفحات: ۶۴-۴۵.
- [6] Z. Huang, L. Liu, B. Lei, G. Meng, Z. Feng, H. Guo, B. Liao, P. Zhang, A New Imidazole Derivative for Corrosion Inhibition of Q235 Carbon Steel in an Acid Environment, *Polymers (Basel)*. Vol.15, 2023, pp. 2420.
- [7] ع.رح. زاده، س. جوادپور، س. رضائی، بررسی نتایج تئوری تابع چگالی و آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ممانعت‌کننده‌های خوردگی در محیط اسید کلریدریک، نشریه علوم و مهندسی خوردگی شماره ۴۹، سال ۱۴۰۲، صفحات: ۸۵-۹۸.
- [8] A. Barrahi, M. El Faydy, F. Benhiba, H.S. Kusuma, D.R. Bazanov, N.A. Lozinskaya, I. Warad, B. Dikici, A. Zarrouk, A new and effective organic imidazole derivative inhibitor for carbon steel protection in 1M HCl medium: electrochemical analysis and computer simulation, *Indian Chem. Eng.* 2025, pp. 1-21.
- [9] M.B. Petrović Mihajlović, M.B. Radovanović, Ž.Z. Tasić, M.M. Antonijević, Imidazole based compounds as copper corrosion inhibitors in seawater, *J. Mol. Liq.*, Vol. 225, 2017, pp. 127-136
- [10] M. Ouakki, M. Galai, M. Rbaa, A.S. Abousalem, B. Lakhrissi, E.H. Rifi, M. Cherkaoui, Investigation of imidazole derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in sulfuric acidic environment: experimental and theoretical studies, *Ionics (Kiel)*, Vol. 26, 2020, pp. 5251-5272
- [11] S.N. Costa, F.W.Q. Almeida-Neto, O.S. Campos, T.S. Fonseca, M.C. de Mattos, V.N. Freire, P. Homem-de-Mello, E.S. Marinho, N.K.V. Monteiro, A.N. Correia, P. de Lima-Neto, Carbon steel corrosion inhibition in acid medium by imidazole-based molecules: Experimental and molecular modelling approaches, *J. Mol. Liq.*, Vol. 326, 2021, pp. 115330.
- [12] E. Gutiérrez, J.A. Rodríguez, J. Cruz-Borbolla, J.G. Alvarado-Rodríguez, P. Thangarasu, Development of a predictive model for corrosion inhibition of carbon steel by imidazole and benzimidazole derivatives, *Corros. Sci.*, Vol. 108, 2016, pp. 23-35
- [13] D. Karra, N. Timoudan, D.R. Bazanov, N.A. Lozinskaya, H. Zarrok, H. Oudda, D.B. Left, M. Zerto. Assouag, F. Benhiba, M. El Faydy, J. Saranya, H.A. Abuelizz, A. Zarrouk, Corrosion inhibition performance of imidazole derivative for protection of carbon steel in hydrochloric acid solution: Experimental and theoretical analysis, *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 20, 2025, pp. 101015
- [14] R. Rosliza, H.B. Senin, H.B. Senin, G. Carini, J.B. Abdullah, D.A. Bradley, Corrosion Inhibition of Sodium Benzoate on Aluminum Alloys in Tropical Seawater, in: *AIP Conf. Proc.*, AIP, 2008, pp. 434-439
- [15] D.M. Brasher, A.D. Mercer, Comparative Study of Factors Influencing the Action Of Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Neutral Solution: I. Sodium Benzoate, *Br. Corros. J.*, Vol. 3, 1968, pp. 120-129
- [16] R. Kahraman, Inhibition of atmospheric corrosion of mild steel by sodium benzoate treatment, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 11, 2002, pp. 46-50
- [17] S.Y. Seoh, H.B. Senin, W.N.W. Nik, M.M. Amin, H.B. Senin, N.H. Idris, Inhibition of Sodium Benzoate on Stainless Steel in Tropical Seawater, in. 2011, pp. 210-214
- [18] P. RD, Corrosion Studies of AA2024 in Sea Water using Sodium Benzoate as an Inhibitor, *J. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 05, 2016, pp. 1000226
- [19] Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, 2004

- [20] A. Singh, K.R. Ansari, A. Kumar, W. Liu, C. Songsong, Y. Lin, Electrochemical, surface and quantum chemical studies of novel imidazole derivatives as corrosion inhibitors for J55 steel in sweet corrosive environment, *J. Alloys Compd*, Vol. 712, 2017, pp. 121–133
- [21] E.M. Sherif, S.-M. Park, Inhibition of copper corrosion in acidic pickling solutions by N-phenyl-1, 4-phenylenediamine, *Electrochim. Acta*, Vol. 51, 2006, pp. 4665–4673
- [22] L. Wang, Inhibition of mild steel corrosion in phosphoric acid solution by triazole derivatives, *Corros. Sci.*, Vol. 48, 2006, pp. 608–616