ارزیابی کارایی داروهای منقضی‌شده بیسموت ساب‌سیترات و نورتریپتیلین به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی فولاد کربنی در محلول کلرید سدیم

حامد عابدی سماکوش[۱]، سهیل مهدوی*[۲]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
[۲] دکتری مهندسی مواد، دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* نویسنده مسئول: **mahdavi@sut.ac.ir**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱

چکیده

علی‌رغم کاربرد گسترده بازدارنده‌های خوردگی، هزینه بالا و سمی بودن کاربرد برخی از بازدارنده‌ها مانند کرومات سدیم، هیدرازین، و آرسنات روی را محدود کرده است. بسیاری از ترکیبات دارویی ماهیت غیرسمی و زیست‌سازگار دارند. به همین دلیل، در این تحقیق از دو نوع داروی منقضی شده بیسموت ساب‌سیترات و نورتریپتیلین بعنوان بازدارنده خوردگی فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵٪ استفاده شد. از آزمون های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی برای بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها استفاده شد. تاثیر غوطه‌وری به مدت ۴۸ ساعت بر مورفولوژی سطح خورده شده بررسی شد. همچنین تاثیر قرارگیری طولانی مدت نمونه‌ها (۲۱۶ ساعت) در محیط حاوی بازدارنده بر میزان تغییرات وزنی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمون های الکتروشیمیایی، بیشترین راندمان بازدارندگی برای بیسموت ساب‌سیترات معادل ۷۲٪ در غلظت ppm ۳۰ و برای نورتریپتیلین ۷۹ در غلظت ppm ۲۰۰ بدست آمد. هر دو بازدارنده در غلظت بهینه‌شان باعث افزایش حدود دو برابری مقاومت پلاریزاسیون فولاد کربنی در محلیط کلرید سدیم شدند. در آزمون غوطه‌وری طولانی مدت، نورتریپتیلین با راندمان بازدارندگی ۸۳ درصدی عملکرد بسیار بهتری از بیسموت ساب‌سیترات با راندمان ۵۰ درصدی را از خود نشان داد. بنابراین می‌توان گفت برای بازدارندگی طولانی مدت، نورتریپتیلین گزینه مناسب‌تری نسبت به بیسموت ساب‌سیترات است.

کلیدواژه: بازدارنده، داروی منقضی شده، بیسموت ساب‌سیترات، نورتریپتیلین، پلاریزاسیون، امپدانس الکتروشیمیایی.

Evaluation of the Inhibitive Performance of Expired Bismuth Subcitrate and Nortriptyline Drugs as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Sodium Chloride Solution

Hamed Abedi Samakush[1], Soheil Mahdavi*[2]

[1] M.Sc. of Materials Engineering, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
[2] Ph.D. of Materials Engineering, Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

*** Corresponding Author: mmahdavi@sut.ac.ir**

Submission: 2026, 05, 20 Acceptance: 2026,07,23

Abstract
Despite the widespread use of corrosion inhibitors, the high cost and toxicity of some inhibitors, such as sodium chromate, hydrazine, and zinc arsenate, have limited their application. Many pharmaceutical compounds are non-toxic and biocompatible in nature. Therefore, in this study, two types of expired drugs, bismuth subcitrate and nortriptyline, were used as corrosion inhibitors for carbon steel in a 3.5 wt.% sodium chloride environment. Potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy were employed to investigate the corrosion behavior of the samples. The effect of 48 hours of immersion on the morphology of the corroded surface was examined. In addition, the effect of long-term exposure of the samples (216 hours) in inhibitor-containing environments on weight change was evaluated. Based on the electrochemical test results, the maximum inhibition efficiency for bismuth subcitrate was 72% at a concentration of 30 ppm, while for nortriptyline it was 79% at a concentration of 200 ppm. Both inhibitors, at their optimal concentrations, approximately doubled the polarization resistance of carbon steel in the sodium chloride environment. In the long-term immersion test, nortriptyline exhibited significantly better performance, with an inhibition efficiency of 83%, compared to 50% for bismuth subcitrate. Therefore, it can be concluded that nortriptyline is a more suitable option than bismuth subcitrate for long-term corrosion inhibition.

Keywords: Inhibitor; Expired drug; Bismuth Subcitrate; Nortriptyline; Polarization; Electrochemical impedance.

۱ ـ مقدمه

خوردگی فلزات یکی از مشکلات اصلی صنایع است، که باعث صرف هزینه‌های زیادی به صورت مستقیم و غیر مستقیم توسط صاحبان صنایع می‌شود [9–1]. در حالیکه خوردگی امری اجتناب ناپذیر است، اما مخارج و مضرات ناشی از آن را می‌توان بوسیله روش‌های کنترل خوردگی کاهش داد. استفاده از بازدارنده‌های خوردگی یکی از کم هزینه‌ترین روش‌های عملی کنترل خوردگی است. اگر چه ترکیب شیمیایی بازدارنده‌های خوردگی غالبا به صورت عمومی منتشر نمی‌شود، اما از این مواد بطور وسیع در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، و صنایعی که فلزات در تماس با محیط‌های خورنده قرار دارند استفاده می‌شود [11–4]. اخیرا مقررات زیست‌محیطی و لزوم توسعه‌ی فرایندهای سازگار با محیط زیست، باعث توجه ویژه‌ای به جایگزینی بازدارنده‌های معدنی با ترکیبات غیر سمی شده است. در این راستا ترکیبات طبیعی استخراج شده از منابع گیاهی و ترکیبات آلی غیر سمی به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته‌اند [16–9,12–5,7]. به‌طور کلی ساختار مولکول‌های آلی نقشی اساسی در تعیین توانایی آن‌ها در حفاظت یک فلز و یا آلیاژ در برابر خوردگی ایفا می‌کند [5,9,17,18]. در این زمینه وجود اتم‌هایی مانند نیتروژن، اکسیژن و گوگرد در این مواد، بازدهی و مکانیزم جذب ترکیبات را تحت تاثیر قرار می‌دهد [22–7,9,14,15,19]. اگرچه تاکنون مکانیزم حفاظت از خوردگی توسط این ترکیبات به طور کامل شناخته نشده است، اما اعتقاد بر این است که لایه-ای محافظ از مولکول‌های ممانعت‌کننده بر روی سطح فلز ایجاد شده و باعث بوجود آمدن یک سد یا مانع محافظت کننده می‌شوند. این سد مانع از تماس فلز و یا آلیاژ با محلول خورنده شده و در نتیجه از خورده شدن آن جلوگیری می‌نمایند [23–7,9,11,14,21–4].

بازدارنده‌های خوردگی همچنین می‌توانند با تغییر سینتیک واکنش‌های الکتروشیمیایی نرخ خوردگی را کاهش دهند [27–3,7–9,24].

استفاده پژوهشی از داروهای منقضی‌شده در سال‌های اخیر به‌عنوان رویکردی نوین در توسعه بازدارنده‌های خوردگی مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از این ترکیبات دارویی، به‌ویژه آن‌هایی که ماهیت غیرسمی و زیست‌سازگار دارند، همچنان پس از انقضا ساختارهای شیمیایی فعالی را حفظ می‌کنند که می‌توانند با سطح فلز تعامل داشته و نقش حفاظتی ایفا کنند [22–5–7,10,20]. از آنجا که این مواد پیش‌تر برای کاربردهای دارویی تولید شده‌اند، ماهیت کم‌خطر و زیست‌سازگاری آن‌ها نسبت به بسیاری از بازدارنده‌های سنتزی، جذابیت بیشتری برای پژوهش‌های مرتبط با حفاظت از مواد ایجاد می‌کند [5,7,21]. افزون بر جنبه‌های زیست‌سازگاری، بهره‌گیری از داروهای تاریخ‌گذشته به‌عنوان بازدارنده خوردگی می‌تواند رویکردی مقرون‌به‌صرفه و پایدار تلقی شود. حجم قابل توجهی از داروهای منقضی‌شده هر ساله به‌عنوان پسماند شیمیایی دور ریخته می‌شوند، درحالی‌که استفاده از آن‌ها می‌تواند از تولید و انباشت پسماندهای جدید جلوگیری کرده و به کاهش هزینه‌ها کمک کند. این موضوع هم‌سو با اصول شیمی سبز، بازیافت منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی در فرایندهای صنعتی است و می‌تواند زمینه‌ساز توسعه بازدارنده‌های خوردگی کم‌هزینه، در دسترس و دوستدار محیط زیست باشد [5,10,21,28].

هدف از این تحقیق بررسی امکان‌سنجی استفاده از داروهای منقضی شده بعنوان بازدارنده خوردگی می-باشد. برای این منظور، غلظت‌های مختلفی از دو نوع داروی بیسموت ساب‌سیترات و نورتریپتیلین به محیط

کلرید سدیم ۳/۵٪ اضافه شده و اثر آن‌ها بر خوردگی فولاد کربنی با استفاده از آزمون‌های الکتروشیمیایی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از آزمون کاهش وزن نیز برای بررسی بیشتر اثرگذاری این باردارنده ها استفاده شد.

۲ ـ روش تحقیق

۲ ـ ۱ ـ آماده‌سازی نمونه فولادی

در این تحقیق از ورق فولادی st37 با ترکیب شیمیایی (به درصد وزنی) ۹۷/۶۴ آهن، ۰/۵ سیلیسیم، ۱/۴ منگنز، ۰/۳۷ کربن، ۰/۰۴۵ گوگرد، و ۰/۰۴۵ فسفر برای بررسی تاثیر بازدارنده‌ها استفاده شد. ابتدا نمونه‌های فولادی به کمک برش سیمی به‌صورت قطعات دایره‌ای شکل با مساحت سطح یک سانتی متر 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 تمپلیتی 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 خورنده قرار گرفت.

۲ ـ ۲ ـ آزمون‌های الکتروشیمیایی

برای ارزیابی اثر بازدارنده‌های بیسموت ساب‌سیترات پتاسیم[1] ($Bi(C_6H_6O_7).xK.yH_2O$) و نورتریپتیلین[2] ($C_{19}H_{21}N$) بر رفتار خوردگی فولاد در محلول کلرید سدیم ۳/۵٪، از یک سل الکتروشیمیایی سه‌الکترود استفاده شد. در این چیدمان، نمونه فولادی به‌عنوان الکترود کاری، الکترود Ag/AgCl (3M KCl) به‌عنوان مرجع، و صفحه پلاتین با سطح مؤثر $1\ cm^2$ به‌عنوان الکترود کمکی به‌کار گرفته شد. آزمایش‌ها در حضور بازدارنده‌ها با غلظت‌های مختلف در بازه ۳۰ تا ۲۰۰ ppm انجام شدند. دستگاه مورد استفاده برای ثبت داده‌ها، پتانسیواستات/گالوانواستات مدل Zive SP2 ساخت شرکت WonATech کره جنوبی بود.

پیش از شروع هر آزمون، نمونه‌ها برای مدت ۱۵ دقیقه در محلول قرار داده شدند تا پتانسیل مدار باز به حالت پایدار برسد. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز، با دامنه سیگنال سینوسی ۱۰ mV و در گستره فرکانسی ۱۰۰ kHz تا ۱۰ mHz انجام شد. تحلیل داده‌های امپدانس و برازش مدار معادل با استفاده از نرم‌افزار ZView صورت گرفت. همچنین آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در بازه ۳۰۰- تا ۱۰۰۰+ mV نسبت به پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش ۱ mV/s انجام شد.

۲ ـ ۳ ـ آزمون کاهش وزن

برای بررسی رفتار خوردگی به روش کاهش وزن، نمونه‌های فولادی با سطح در دسترس $1\ cm^2$ آماده شده و وزن اولیه آن‌ها با دقت چهار رقم اعشار با استفاده از ترازوی مدل Sartorius Entris 224i ثبت شد. سپس نمونه‌ها در محیط‌های حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده قرار داده شدند. از آنجا که گونه‌های حاصل از خوردگی فلزی می‌توانند بر نرخ خوردگی نمونه‌های دیگر در همان محیط اثر بگذارند، هر نمونه در ظرف جداگانه و در شرایط بسته نگه‌داری شد تا تداخل احتمالی میان آن‌ها به حداقل برسد.

پس از گذشت دوره مشخص‌شده آزمون (۲۱۶ ساعت)، نمونه‌ها خارج شده و پس از تمیزسازی و خشک‌شدن، وزن نهایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. کاهش وزن حاصل، مبنای محاسبه نرخ خوردگی (بر حسب mm/y) و همچنین راندمان بازدارندگی قرار گرفت که این مقادیر با استفاده از روابط استاندارد مرتبط با روش کاهش وزن تعیین شدند [29].

$$C.R = \frac{8.76\times10^4\times W}{D\times A\times t} \qquad (۱)$$

$$\%\,IEw = \left(\frac{W_0 - W_{inh}}{W_0}\right)\times 100 \qquad (۲)$$

که در این معادلات W کاهش وزن(g) ، D دانسیته‌ی فلز(g/cm^3) ، A مساحت سطح نمونه (cm^2) ، t زمان

[1] Bismuth Subcitrate Potassium

[2] Nortriptyline

غوطه‌وری (h)، W_{inh} و W_0 مقادیر کاهش وزن در حضور و عدم حضور بازدارنده هستند.

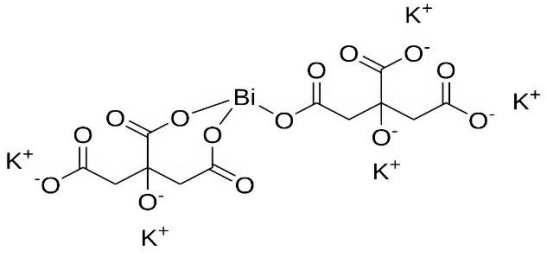
۲ ـ ٤ ـ مشخصه‌یابی

به منظور بررسی مورفولوژی سطح خورده شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN (CAMSCAN MV 2300) استفاده شد.

۳ ـ نتایج و بحث

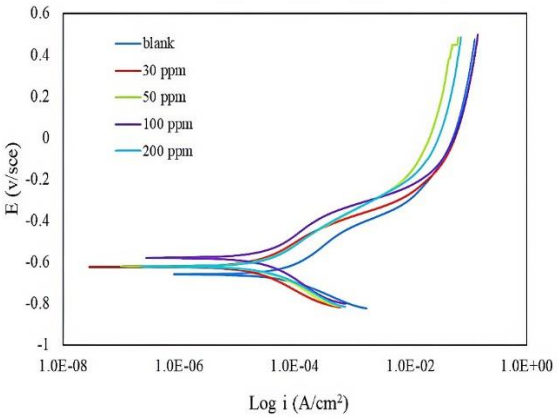
۳ ـ ۱ ـ بیسموت ساب‌سیترات

از قرص بیسموت ساب‌سیترات پتاسیم برای درمان زخم معده، روده و نیز اسهال مسافرتی استفاده می‌شود. شکل ۱ ساختار مولکولی بیسموت ساب‌سیترات را نشان می‌دهد. بیسموت ساب‌سیترات به دلیل داشتن یون بیسموت و گروه‌های سیترات، ترکیبی با پتانسیل مناسب برای پایدارسازی سطح فلزات در محیط‌های خورنده است. یون‌های بیسموت به‌طور عمومی تمایل دارند روی سطح فلز لایه‌های نسبتاً پایدار تشکیل دهند و در حضور لیگاندهایی مانند سیترات، کمپلکس‌هایی ایجاد می‌کنند که می‌توانند جذب سطحی مؤثرتری داشته باشند. علاوه بر این، بیسموت از جمله عناصری با سمیت کم در میان فلزات سنگین به شمار می‌رود و این موضوع استفاده از آن را در مطالعات بازدارندگی خوردگی از جنبه زیست‌محیطی و ایمنی، جذاب‌تر می‌کند. استفاده از نمونه‌های منقضی‌شده این ترکیب نه‌تنها از هدررفت منابع جلوگیری می‌کند، بلکه در راستای اصول شیمی سبز می‌تواند نقطه قوتی برای ارائه بازدارنده‌های دوستدار محیط زیست و مقرون‌به‌صرفه باشد.



شکل ۱ ـ ساختار مولکولی بیسموت ساب‌سیترات پتاسیم.

شکل ۲ منحنی‌های پلاریزاسیون فولادکربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی و در غلظت‌های مختلفی از بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات (۳۰، ۵۰، ۱۰۰، و ۲۰۰ ppm) و بدون بازدارنده در دمای محیط را نشان می‌دهد. پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون در جدول ۱ آمده است. با افزودن بازدارنده به محلول کلرید سدیم (در تمامی غلظت‌ها) دانسیته جریان خوردگی به میزان قابل توجهی نسبت به محلول بدون بازدارنده کاهش یافته است، که این موضوع بیانگر این است که قرص مورد نظر به‌عنوان بازدارنده خوردگی عمل کرده و با جذب برروی سطح فلز لایه محافظی تشکیل می‌دهد [30]. با توجه به جدول ۱ بهترین راندمان بازدارندگی در غلظت ۳۰ ppm بدست آمد، که نشان از تشکیل این لایه محافظ در غلظت‌های پایین‌تر می‌باشد. با بالاتر رفتن غلظت بازدارنده راندمان بازدارندگی تا حدودی افت کرده است و از ۷۲٪ در غلظت ۳۰ ppm به ۶۲٪ در غلظت ۲۰۰ ppm رسیده است.



شکل ۲ ـ منحنی پلاریزاسیون فولاد ساده کربنی در غلظت های مختلف بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.

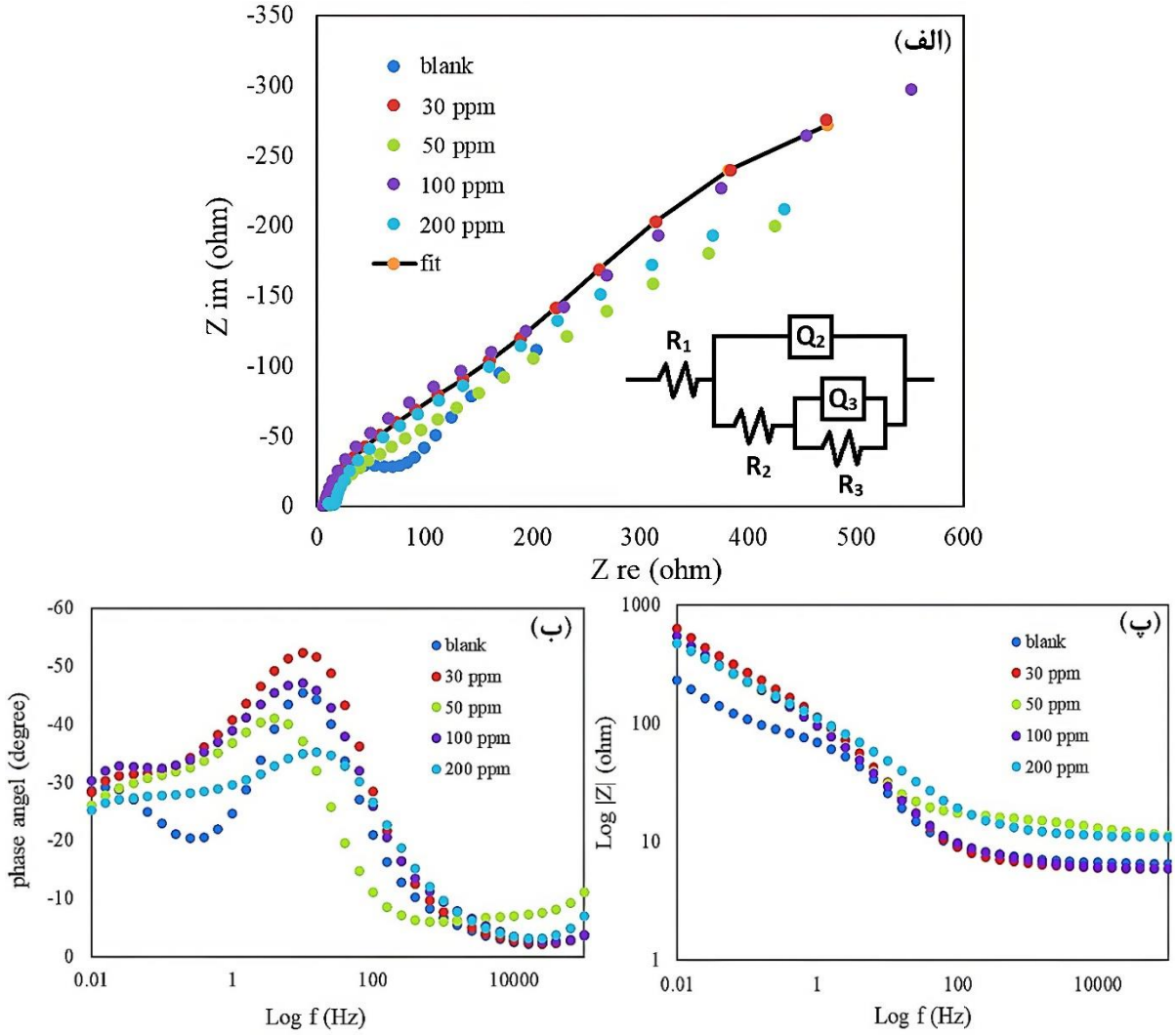
جدول ۱ ـ پارامترهای الکتروشیمیایی استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون برای تاثیر غلظت بیسموت ساب‌سیترات

غلظت (ppm)	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	β_c (mV/decade)	β_a (mV/decade)	% IE
۰	-۶۵۰	۷۰	۱۲۰	۲۲۰	-
۳۰	-۶۲۰	۱۹	۱۵۲	۱۷۵	۷۲
۵۰	-۶۲۰	۲۸	۱۷۵	۱۶۲	۶۰
۱۰۰	-۵۸۰	۲۳	۱۶۰	۱۸۰	۶۷
۲۰۰	-۶۲۰	۲۶	۱۴۰	۱۷۵	۶۲

بطورکلی اگر پتانسیل خوردگی به مقادیر فعال تر (منفی تر) نزول کند بیانگر عملکرد بازدارنده به صورت کاتدی می‌باشد و تغییر در جهت مثبت دلیل بر عملکرد آندی بازدارنده است. بازدارنده‌های مختلط معمولا باعث تغییر قابل توجهی در پتانسیل خوردگی نمی‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌هد با افزایش غلظت بازدارنده در این محیط پتانسیل خوردگی تغییر چشمگیری از خود نشان نمی‌دهد و این امر بیانگر عملکرد قرص مورد نظر به عنوان بازدارنده مختلط می‌باشد. بر این اساس قرص مورد نظر در این محیط هم در نواحی آندی و هم در نواحی کاتدی جذب شده و با تشکیل فیلم محافظ روی سطح دانسیته جریان و سرعت خوردگی را کاهش داده است [31,32].

به‌منظور بررسی مکانیزم جذب، تست‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حضور/عدم حضور غلظت-های مختلف بازدارنده روی فولاد کربنی انجام گرفت. با توجه به شکل ۳ افزودن بازدارنده بیسموت ساب-سیترات به محلول موجب افزایش قطر منحنی‌های نایکوئیست شده است، که نشان دهنده بهبود مقاومت پلاریزاسیون می‌باشد. جهت آنالیز دقیق تر نتایج طیف-سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، از مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳ (الف) با دو ثابت زمانی استفاده شد. حضور دو ثابت زمانی در مدار معادل به کار رفته برای فیت کردن داده‌های تجربی با حضور دو نیمدایره در منحنی های نایکوئیست و دو قله/تغییر شیب در منحنی-های بد (شکل ۳ (ب،پ)) مشخص است. همچنین در این مدار به جای خازن ایده آل از عنصر فاز ثابت استفاده شده است. عنصر فاز ثابت به طور موازی با مقاومت بوده و جذب بازدارنده موجب تغییر ترکیب در فصل مشترک لایه دوگانه الکتریکی و فلز، و در نتیجه افزایش مقاومت الکتریکی و افزایش ثابت دی‌الکتریک می‌شود. به‌طور کلی، با توجه به نتایج ارائه شده، می‌توان گفت که برای بازدارنده مورد نظر در این محیط، مکانیزم کاهش خوردگی از طریق جذب بازدارنده در سطح فولاد رخ می‌دهد.

نتایج به دست آمده از فیت کردن داده‌های تجربی با استفاده از مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳ (الف) در جدول ۲ آورده شده است. افزودن ppm ۳۰ بیسموت ساب‌سیترات به محلول کلرید سدیم حدود ۲/۲ مرتبه مقاومت پلاریزاسیون زیرلایه فولادی را بهبود داده است. داده‌های به دست آمده از محاسبات پلاریزاسیون با داده‌های امپدانس در تطابق خوبی با یکدیگر هستند.



شکل ۳ ـ نمودارهای (الف) نایکوئیست، (ب)بد - فاز، و (پ) بد -اندازه امپدانس برای فولاد کربنی در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در حضور و عدم حضور بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات.

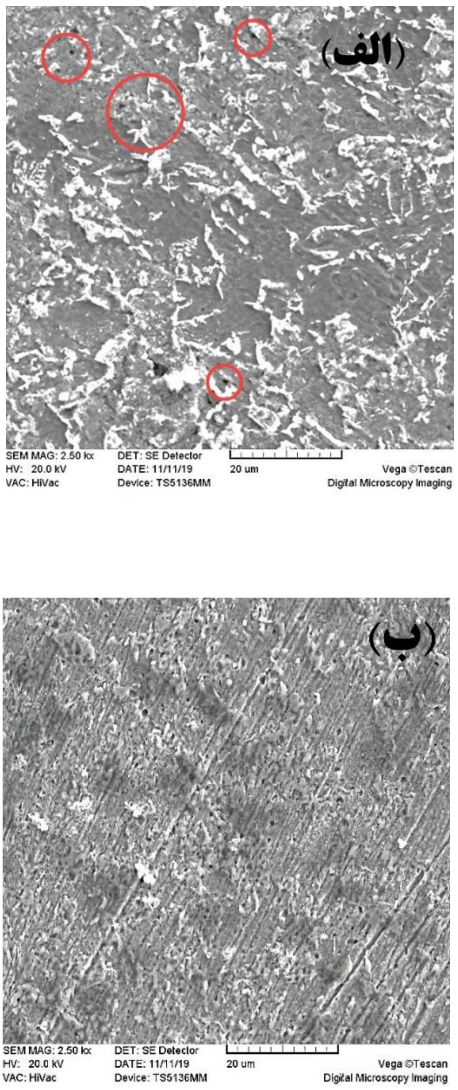
جدول ـ پارامترهای بدست آمده از فیت کردن داده‌های تجربی حاصل از EIS برای فولاد کربنی در حضور و عدم حضور بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات

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	۶/۶	۸۲	۱/۶×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۷	۳۵۷	۳۲×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۰
۳۰	۶/۷	۱۷۰	۱/۹×۱۰$^{-۳}$	۰/۷۵	۸۱۰	۷/۷×۱۰$^{-۳}$	۰/۵۸
۵۰	۱۴/۰	۱۴۴	۱/۶×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۶	۷۱۰	۶/۶×۱۰$^{-۳}$	۰/۵۶
۱۰۰	۶/۰	۱۶۵	۱/۷×۱۰$^{-۳}$	۰/۷۷	۷۹۰	۷/۵×۱۰$^{-۳}$	۰/۵۵
۲۰۰	۱۲/۵	۱۵۷	۲/۰×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۱	۷۳۰	۸/۶×۱۰$^{-۳}$	۰/۵۷

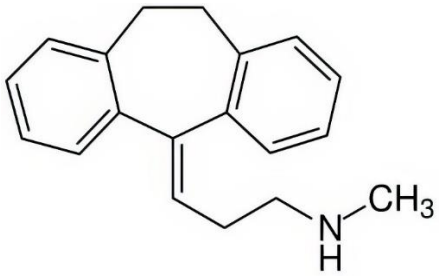
شکل ۴ مورفولوژی سطح فولاد کربنی را پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد، در عدم حضور و حضور غلظت بهینه بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات (۳۰ ppm) نشان می‌دهد. در غیاب بازدارنده سطح فولاد کربنی بسیار ناصاف بوده و متحمل خوردگی گسترده و آسیب‌های نسبتا شدید شده است. حفرات ناشی از خوردگی در شکل ۴ (الف) مشخص هستند. با افزودن بازدارنده، مورفولوژی سطح پس از خوردگی به نسبت صاف‌تر است. محصولات خوردگی از قبیل هیدروکسیدها و اکسیدهای فلزی به صورت اسفنجی و متخلخل بر روی سطح تشکیل شده‌اند. افزودن بازدارنده سبب تشکیل لایه محافظ بر سطح فلز شده و از خوردگی یکنواخت و حفره‌ای تا حدودی جلوگیری می‌کند.

۳ ـ ۲ ـ نورتریپتیلین

از نورتریپتیلین برای درمان اختلال افسردگی و برخی دیگر از بیماری‌های اعصاب استفاده می‌شود. شکل ۵ ساختار مولکولی نورتریپتیلین را نشان می‌دهد. نورتریپتیلین از جمله ترکیبات آلی دارای حلقه‌های آروماتیک و گروه‌های عاملی نیتروژنی است که این ساختارها توانایی قابل توجهی در برقراری پیوندهای داتیو و برهم‌کنش‌های الکترونی با سطح فلزات دارند. حضور اتم‌های نیتروژن و ساختارهای π–الکترونی باعث می‌شود این مولکول بتواند به‌عنوان یک گونه جذب‌شونده مؤثر عمل کرده و لایه‌ای محافظ روی سطح فلز تشکیل دهد. این ویژگی‌ها، همراه با ماهیت کم‌خطر نورتریپتیلین، آن را به گزینه‌ای مناسب برای آزمون به‌عنوان بازدارنده خوردگی در پژوهش‌های مختلف تبدیل کرده است.



شکل ٤ ـ تصاویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی پس از ٤٨ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم (الف) بدون حضور بازدارنده و (ب) در حضور ۳۰ ppm بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات.

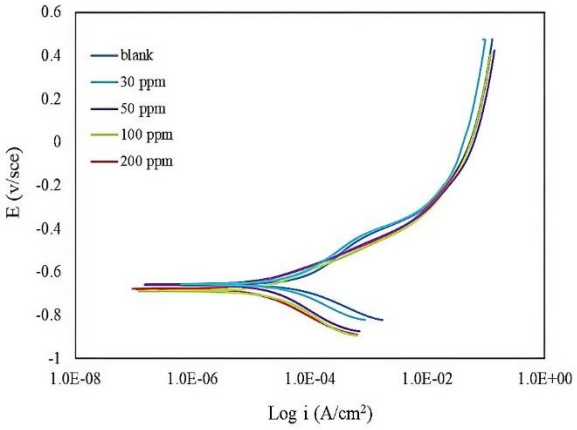


شکل ۵ ـ ساختار مولکولی نورتریپتیلین.

به منظور تعیین اثر غلظت بازدارندگی قرص نورتریپتیلین بر روی خوردگی فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصدوزنی، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در غلظت‌های مختلف بازدارنده صورت پذیرفت. نمودارهای پلاریزاسیون در شکل ۶ آورده شده است. نتایج بدست آمده از این منحنی ها در جدول ۳ ارایه شده است. با افزایش غلظت بازدارنده تا ppm ۲۰۰، دانسیته جریان خوردگی کاهش یافته است. این موضوع بیانگر این است که قرص نورتریپتیلین به عنوان بازدارنده خوردگی عمل کرده و با جذب بر روی سطح فلز، سد محافظی ایجاد می کند. با افزایش غلظت بازدارنده بازده بازدارندگی افزایش یافته است، که حاکی از تکمیل لایه محافظ جذب شده در غلظت‌های بالاتر است [30]. دانسیته جریان خوردگی فولاد کربنی در محیط فاقد بازدارنده از $\mu A/cm^2$ ۷۰ به $\mu A/cm^2$ ۱۵ در حضور ppm ۲۰۰ نورتریپتیلین رسیده است، و راندمان بازدارندگی در این حالت ٪۷۹ است.

به‌طورکلی اگر پتانسیل مدار باز یا پتانسیل خوردگی به مقادیر فعال‌تر (منفی‌تر) نزول کند، نشان دهنده عملکرد بازدارنده به صورت کاتدی می‌باشد و اگر تغییر در جهت مثبت باشد، دلیل بر عملکرد آندی بازدارنده است. بازدارنده‌های مختلط معمولا باعث تغییر قابل توجهی در پتانسیل خوردگی نمی‌شوند. در این مطالعه با افزایش غلظت بازدارنده تغییر قابل توجهی در پتانسیل خوردگی دیده نمی‌شود، و این امر دلالت بر این دارد که قرص نورتریپتیلین به عنوان بازدارنده ترکیبی می‌باشد [31,33].

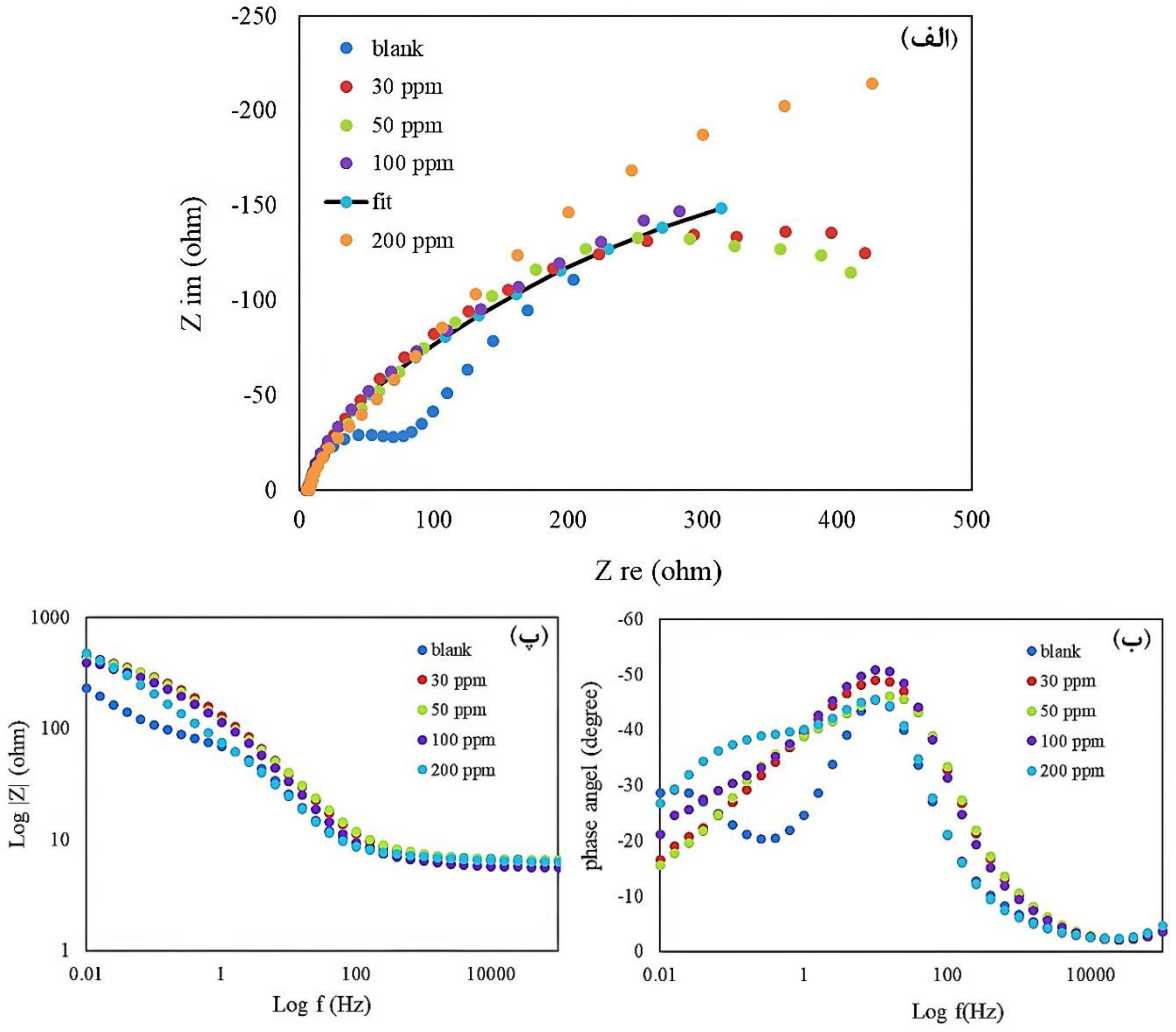
به منظور بررسی بیشتر عملکرد بازدارنده نورتریپتیلین در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد، آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف بازدارنده انجام شد و نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. از مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳ (الف) برای فیت کردن داده‌های تجربی استفاده شد و نتایج حاصل در جدول ۴ ارایه شده است. با افزایش غلظت بازدارنده تا ppm۲۰۰، مقاومت پلاریزاسیون بهبود یافته است، که به دلیل جذب بازدارنده بر روی سطح فلز می‌باشد. این نتیجه در تطابق با نتایج پلاریزاسیون بوده و نشان می دهد که در غلظت ppm ۲۰۰ این بازدارنده بهترین عملکرد را داشته است.



شکل ٦ ـ منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی ساده در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد غیاب و حضور غلظت های مختلف نورتریپتیلین در دمای محیط.

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

غلظت (ppm)	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	β_c (mV/decade)	β_a (mV/decade)	% IE
۰	-۶۵۰	۷۰	۱۲۰	۲۲۰	-
۳۰	-۶۵۵	۴۳	۱۳۰	۱۱۰	۳۹
۵۰	-۶۵۰	۲۸	۱۲۰	۱۱۰	۶۰
۱۰۰	-۶۹۰	۲۰	۱۶۰	۱۳۰	۷۱
۲۰۰	-۶۸۰	۱۵	۱۳۵	۱۷۰	۷۹

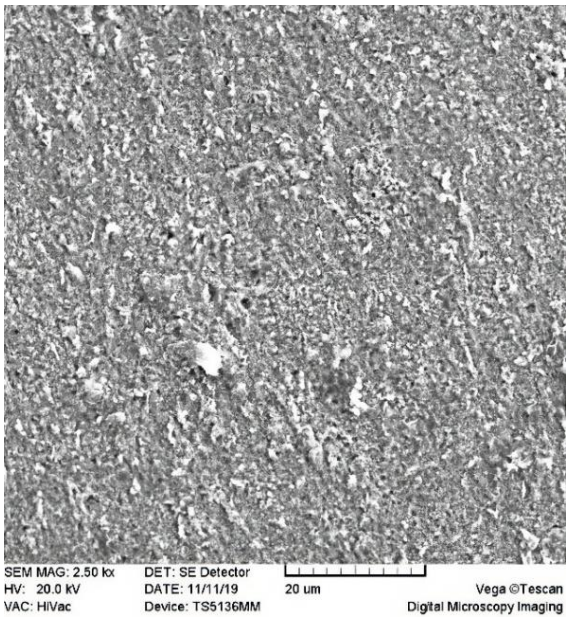


شکل ۷ ـنمودارهای (الف) نایکوئیست، (ب)بد-فاز و (پ) بد-اندازه امپدانس برای فولاد کربنی در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در حضور و عدم حضور بازدارنده نورتریپتیلین.

جدول ٤ ـ پارامترهای به‌دست آمده از منحنی‌های نایکوئیست فولاد ساده کربنی در محیط سدیم کلرید ۳/۵ درصد در غیاب و حضور غلظت های مختلف نورتریپتیلین در دمای محیط

n_3	Y_{03} ($S.s^n.cm^{-2}$)	R_3 ($\Omega.cm^2$)	n_2	Y_{02} ($S.s^n.cm^{-2}$)	R_2 ($\Omega.cm^2$)	R_1 ($\Omega.cm^2$)	غلظت (ppm)
۰/۶۰	۳۲×۱۰^{-۳}	۳۵۷	۰/۶۷	$۱/۶\times۱۰^{-۳}$	۸۲	۶/۶	۰
۰/۶۱	$۳/۳\times۱۰^{-۳}$	۴۰۰	۰/۷۳	$۱/۲\times۱۰^{-۳}$	۱۳۰	۶/۴	۳۰
۰/۵۹	$۳/۵\times۱۰^{-۳}$	۴۴۲	۰/۷۰	$۱/۴\times۱۰^{-۳}$	۱۵۵	۶/۶	۵۰
۰/۶۲	$۶/۸\times۱۰^{-۳}$	۵۱۲	۰/۷۳	$۱/۵\times۱۰^{-۳}$	۱۹۴	۵/۵	۱۰۰
۰/۶۰	$۶/۳\times۱۰^{-۳}$	۷۳۳	۰/۷۱	$۱/۹\times۱۰^{-۳}$	۱۸۹	۶/۳	۲۰۰

تصویر میکروسکوپی از سطح نمونه فولاد کربنی پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم حاوی ۲۰۰ ppm نورتریپتیلین در شکل ۸ نشان داده شده است. در مقایسه با نمونه خورده شده در محیط فاقد بازدارنده (شکل ۴ (الف))، سطح خوردگی به مراتب صاف‌تر بوده و محصولات خوردگی از قبیل هیدروکسیدها و اکسیدهای فلزی به صورت اسفنجی و متخلخل بر روی سطح تشکیل شده‌اند. مورفولوژی سطح خوردگی در حضور نورتریپتیلین تاحدودی مشابه مورفولوژی مشاهده شده در سطح خوردگی فولاد پس از غوطه‌وری در محلول حاوی بیسموت ساب‌سیترات است، که نشان می‌دهد این دو نوع بازدارنده در غلظت‌های بهینه‌شان عملکرد چندان متفاوتی با یکدیگر نداشته‌اند. با این وجود، علی‌رغم تشابه نسبی سطوح خوردگی، میزان حفرات ناشی از خوردگی موضعی در سطح نمونه غوطه‌ور شده در محلول حاوی بیسموت ساب‌سیترات بیشتر از نمونه غوطه‌ور شده در محلول حاوی نورتریپتیلین است، که می‌تواند نشان دهنده عملکرد تاحدودی مناسب‌تر نورتریپتیلین باشد.



شکل ۸ ـ تصویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی پس از ٤٨ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم حاوی ۲۰۰ ppm نورتریپتیلین.

۳ ـ ۳ ـ کاهش وزن

نتایج آزمون‌های کاهش وزن پس از ۲۱۶ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم حاوی و فاقد بازدارنده در جدول ۵ نشان داده شده است. با افزودن بازدارنده‌ها به محیط خورنده نرخ خوردگی به شدت کاهش پیدا کرده است. نرخ خوردگی فولاد کربنی در حضور بیسموت ساب‌سیترات و نورتریپتیلین در آزمون غوطه‌وری به ترتیب ۳ و ۴/۵ مرتبه کاهش یافته 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.

علی‌رغم اینکه دو نوع بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات و نورتریپتیلین در بررسی های الکتروشیمیایی تفاوت قابل توجهی با یکدیگر نداشتند و در غلظت بهینه‌شان باعث کاهش تقریبا یکسانی در چگالی جریان خوردگی یا بهبود مقاومت پلاریزاسیون فولاد کربنی شده‌اند، تفاوت عملکرد این دو نوع بازدارنده در آزمون غوطه‌وری طولانی مدت قابل توجه است. اگر فقط نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی در نظر گرفته شوند، بیسموت ساب‌سیترات می‌تواند بعنوان گزینه مناسب‌تر برای جلوگیری از خوردگی فولاد در محیط کلرید سدیم در نظر گرفته شود، چرا با وجود غلظت کمتر (۳۰ ppm) میزان خوردگی را به اندازه غلظت بالاتر نورتریپتیلین (۲۰۰ ppm) کاهش داده است. اما نتایج آزمون غوطه‌وری طولانی مدت نشان داد که بیسموت ساب‌سیترات در طولانی مدت به اندازه نورتریپتیلین کارایی نداشته و درحالیکه راندمان بازدارندگی طولانی مدت بیسموت ساب‌سیترات در آزمون غوطه‌وری ٪۵۰ است، راندمان بازدارندگی نورتریپتیلین ٪۸۳ می‌باشد.

مقایسه راندمان بازدارندگی در آزمون طولانی مدت با تحقیقات پیشین [34] نشان می‌دهد که هر دو بازدارنده بیسموت ساب‌سیترات و نورتریپتیلین در غلظت بهینه‌شان

عملکرد بهتری از ایمیدازول بعنوان بازدارنده داشته‌اند. مقایسه عملکرد بازدارنده‌ها با بنزوات‌سدیم نیز نشان می‌دهد که بیسموت ساب‌سیترات عملکرد ضعیف‌تری از بنزوات‌سدیم دارد اما راندمان بازدارندگی نورتریپتیلین مشابه بنزوات سدیم است، با این تفاوت که نورتریپتیلین در غلظت کمتری از بنزوات‌سدیم راندمان بازدارندگی برابری با آن را نشان می‌دهد.

٤ ـ نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر غلظت‌های مختلفی از دو نوع داروی منقضی شده بیسموت ساب – سیرات و نورتریپتیلین بعنوان بازدارنده خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مهم بدست آمده عبارتند از:

۱ - بر اساس نتایج آزمون پلاریزاسیون، افزودن غلظت بهینه 30 ppm بیسموت ساب – سیترات به محلول کلرید سدیم باعث کاهش چگالی جریان خوردگی فولاد از $70\ \mu A/cm^2$ به $19\ \mu A/cm^2$ می‌شود، که نشان از راندمان ۷۲ درصدی این بازدارنده است. همچنین نتایج EIS حاکی از بهبود ۲/۲ مرتبه‌ای مقاومت پلاریزاسیون در حضور بیسموت ساب‌سیترات است.

۲ -راندمان بازدارندگی نورتریپتیلین با افزایش غلظت آن از 30 ppm به 200 ppm از ۳۹٪ به ۷۹٪ می‌رسد. این بازدارنده نیز با عملکردی مشابه با بیسموت ساب‌سیترات، در غلظت بهینه باعث بهبود حدود ۲/۱ برابری مقاومت پلاریزاسیون فولاد می‌شود .

۳ -بررسی شاخه‌های آندی و کاتدی، و پتانسیل خوردگی در منحنی‌های پلاریزاسیون نشان داد که هر دو بازدارنده از نوع بازدارنده‌های مختلط هستند. همچنین بررسی سطوح خوردگی پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری حاکی از سطح خوردگی صاف‌تر، و حاوی محصولات خوردگی اسفنجی شکل، در نمونه‌های غوطه‌ور شده در محلول حاوی بازدارنده است.

۴ -هرچند اختلاف قابل ملاحظه‌ای در عملکرد بیسموت ساب‌سیترات و نورتریپتیلین در آزمون‌های الکتروشیمیایی مشاهده نشد، اما نتایج آزمون غوطه‌وری طولانی مدت (۲۱۶ ساعت) نشان داد که نورتریپتیلین با کاهش ۴/۵ برابری نرخ خوردگی و راندمان ۸۳ درصدی عملکرد بهتری از بیسموت ساب – سیترات با راندمان ۵۰ درصدی در کاهش خوردگی طولانی مدت دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله تمایل دارند از مسئولین پژوهشکده مواد پیشرفته در دانشگاه صنعتی سهند به دلیل فراهم کردن شرایط انجام آزمون ها تشکر کنند.

مراجع

[1] J.M. Castillo-Robles, E. de Freitas Martins, P. Ordejón, I. Cole, Molecular modeling applied to corrosion inhibition: a critical review, npj Materials Degradation, Vol. 8, 2024, pp. 72. https://doi.org/10.1038/s41529-024-00478-2.

[2] س. محمدی, بررسی خوردگی و عوامل موثر بر خوردگی فولاد دریایی STE 500، همایش ملی الکترونیکی دستاوردهای نوین در علوم مهندسی و پایه، اردبیل، ۱۳۹۳. https://civilica.com/doc/303987

[3] ع. دهقانی, ق. بهلکه, ب. رمضانزاده, مطالعه اثر هم‌افزایی عصاره پوست کیوی و کاتیون روی در بازدارندگی خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم, نشریه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۳۰، ۱۳۹۷، صفحه ۶۷–۸۱. http://journal.ica.ir/article-1-82-fa.html .

[4] V. Sastri, Corrosion inhibition: Theory and practice, in: Green Corrosion Inhibitors, 2011, pp. 139–166. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118015438.ch4.
[5] S.D. Kotabagi, S.K. Rajappa, R.L. Minagalavar, M.R. Rathod, J.G. Suma, A.M. Sajjan, Expired Lircetam drug as a corrosion inhibitor for low-carbon steel in 1 M HCl: Experimental, theoretical, and quantum chemical insights, Results in Surfaces and Interfaces, Vol. 18, 2025, pp. 100459. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100459.
[6] M. Abdallah, K.A. Soliman, M. Alfakeer, H. Hawsawi, A.M. Al-bonayan, S.S. Al-Juaid, S. Abd El Wanees, M.S. Motawea, Expired antifungal drugs as effective corrosion inhibitors for carbon steel in 1 M HCl solution: Practical and theoretical approaches, ACS Omega, Vol. 8, 2023, pp. 34516–34533. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03257.
[7] N. Vaszilcsin, A. Kellenberger, M.L. Dan, D.A. Duca, V.L. Ordodi, Efficiency of expired drugs used as corrosion inhibitors: A review, Materials (Basel), Vol. 16, 2023, pp. 5555. https://doi.org/10.3390/ma16165555.
[8] ج. دماوند, ا. دانایی, ه. اسکندری, بررسی اثر عصاره پوست نارنج به‌عنوان بازدارنده دوستدار محیط زیست بر خوردگی فولاد AISI-1030 در محیط اسیدسولفوریک ۱ مولار, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۱۱، ۱۴۰۰، صفحه ۷–۲۰.
[9] س.س. مهربان, م. ایزدی, س. کریمی, بررسی اثر عصاره آبی مریم‌نخودی بر رفتار خوردگی فولاد ساده کربنی در محیط سدیم کلرید ۳/۵ درصد وزنی, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۱۴، ۱۴۰۳، صفحه ۲۳–۳۶.
[10] M. Abdallah, K.A. Soliman, A.S. Al-Gorair, A. Al Bahir, J.H. Al-Fahemi, M.S. Motawea, S.S. Al-Juaid, Enhancing the inhibition and adsorption performance of SABIC iron corrosion in sulfuric acid by expired vitamins: Experimental and computational approach, RSC Advances, Vol. 11, 2021, pp. 17092–17107. https://doi.org/10.1039/D1RA01010G.
[11] ا. اعظمیان, س. اله کرم, م. جوهری, ف. تیموری, بررسی مکانیزم عملکرد بازدارندگی سه ماده آلی پایه کربوکسیلاتی بر رفتار خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول شبیه‌ساز حفرات بتن آلوده به ۵/۳ درصد وزنی سدیم کلرید, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، نسخه ۱۱، ۱۴۰۰، صفحه ۸۵–۹۸.
[12] E.E. Oguzie, Y. Li, F.H. Wang, Corrosion inhibition and adsorption behavior of methionine on mild steel in sulfuric acid and synergistic effect of iodide ion, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 310, 2007, pp. 90–98. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.01.038.
[13] M. Zerfaoui, H. Oudda, B. Hammouti, S. Kertit, M. Benkaddour, Inhibition of corrosion of iron in citric acid media by aminoacids, Progress in Organic Coatings, Vol. 51, 2004, pp. 134–138. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2004.05.005.
[14] م.ک. پور, م. عطاپور, بررسی اثر بازدارندگی روغن خار مریم بر روی مس خالص تجاری به‌عنوان یک بازدارنده سبز در محلول HCl ۱,۰ M، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۱۲، ۱۴۰۱، صفحه ۳۵–۴۷.
[15] ب. همراهی, ع. خانلرخانی, آ. فتاح الحسینی, س.م. مدنی, ارزیابی عملکرد عصاره پنیرک (Malva sylvestris) بر بازدارندگی از خوردگی فولاد API 5L در محیط اسیدی شامل H_2S، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۱۳، ۱۴۰۲، صفحه ۷–۲۵.
[16] ف. راعی شهرضا, ن. سلطانی, ن. توکلی, ح. صلواتی, م. خیاط کاشانی, اثر بازدارندگی عصاره شاه‌تره بر رفتار خوردگی کربن استیل در محلول ۲ مولار هیدروکلریک اسید, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۸، ۱۳۹۷، صفحه ۸۷–۱۰۲.
[17] J. Bockris, A.K. Reddy, Modern electrochemistry 2B, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004. https://doi.org/10.1007/b105350.
[18] S.N. Raicheva, E.I. Sokolova, Influence of inhibitor structure and metal/solution interface on the corrosion resistance of the protected metal, Russian Journal of Electrochemistry, Vol. 42, 2006, pp. 1213–1223. https://doi.org/10.1134/S1023193506110085.
[19] J. Aljourani, K. Raeissi, M.A. Golozar, Benzimidazole and its derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl solution, Corrosion Science, Vol. 51, 2009, pp. 1836–1843. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.011.

[20] M. Abdallah, K.A. Soliman, R. Alfattani, A.S. Al-Gorair, A. Fawzy, M.A.A. Ibrahim, Insight of corrosion mitigation performance of SABIC iron in 0.5 M HCl solution by tryptophan and histidine: Experimental and computational approaches, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, 2022, pp. 12782–12797. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.007.

[21] S. Varvara, Reusing an expired drug as a sustainable corrosion inhibitor for bronze in 3.5% NaCl and simulated acid rain solutions, Applied Sciences, Vol. 15, 2025, pp. 6637. https://doi.org/10.3390/app15126637.

[22] R. Anaee, H. Aljaafari, S. Naser, A. Khadom, A. Abd, T. Anai, Expired actifed drug as corrosion inhibitor for low-carbon steel in phosphoric acid: Experimental and theoretical investigation, Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, Vol. 44, 2025, pp. 1063–1073. https://doi.org/10.30492/ijcce.2025.2044014.6856.

[23] A. Kokalj, Is the analysis of molecular electronic structure of corrosion inhibitors sufficient to predict the trend of their inhibition performance, Electrochimica Acta, Vol. 56, 2010, pp. 745–755. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.09.065.

[24] ا. فاضل, م. نصر اصفهانی, م. زنده دل, عملکرد بازدارندگی لایه نازک خود مجتمع ایمیدازول مورد استفاده در پوشش هیبریدی آلی – معدنی برای جلوگیری از خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول اسیدی, فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین، جلد ۶، ۲۰۱۶، صفحه ۶۱–۷۴. https://jnm.marvdasht.iau.ir/article_1915.html .

[25] ن. اسماعیلی, ا. زمانی, ا. اکبری نژاد, ج. نشاطی, بررسی بازدارندگی ۲-مرکاپتوبنزواکسازول و ۲-آمینوبنزوایمیدازول بر روی فولاد API 5L X60درمحیط خوردگی شیرین, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۹، ۱۳۹۸، صفحه ۴۵–۶۴. http://journal.ica.ir/article-1-68-fa.html .

[26] 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. https://doi.org/10.3390/polym15112420.

[27] ع.ر.ح. زاده, س. جوادپور, س. رضائی, بررسی نتایج تئوری تابع چگالی و آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ممانعت کننده‌های خوردگی در محیط اسید کلریدریک, نشریه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۴۹، ۱۴۰۲، صفحه ۸۵–۹۸ . http://journal.ica.ir/article-1-200-fa.html.

[28] K.A. Alamry, A. Khan, J. Aslam, M.A. Hussein, R. Aslam, Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid solution by the expired Ampicillin drug, Scientific Reports, Vol. 13, 2023, pp. 6724. https://doi.org/10.1038/s41598-023-33519-y.

[29] Guide for laboratory immersion corrosion testing of metals, ASTM G31-72, 2004. https://doi.org/10.1520/G0031-72R04.

[30] E.M. Sherif, S.-M. Park, Inhibition of copper corrosion in acidic pickling solutions by N-phenyl-1,4-phenylenediamine, Electrochimica Acta, Vol. 51, 2006, pp. 4665–4673. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.01.007.

[31] L. Wang, Inhibition of mild steel corrosion in phosphoric acid solution by triazole derivatives, Corrosion Science, Vol. 48, 2006, pp. 608–616. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.02.007.

[32] 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, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 712, 2017, pp. 121–133. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.072.

[33] M. Lebrini, M. Lagrenée, H. Vezin, L. Gengembre, F. Bentiss, Electrochemical and quantum chemical studies of new thiadiazole derivatives adsorption on mild steel in normal hydrochloric acid medium, Corrosion Science, Vol. 47, 2005, pp. 485–505. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.06.001.

[34] ح. عابدی سماکوش, س. مهدوی, بررسی اثر هم‌افزایی و غلظت بازدارنده‌های ایمیدازول و بنزوات سدیم بر خوردگی فولاد کربنی, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۵۵، ۱۴۰۴، صفحه ۷–۲۲.