ارزیابی رفتار خوردگی فولاد در محلول کلرید سدیم در حضور SDS و عصاره گیاه لرگ: مقایسه یک بازدارنده سنتزی با یک بازدارنده سبز

حامد عابدی سماکوش[۱]، سهیل مهدوی*[۲]، آنیتا گورابجیری‌پور[۳]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
[۲] دکتری مهندسی مواد، دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
[۳] کارشناسی بیولوژی، دانشکده بیولوژی، دانشگاه کونکوردیا، مونترال، کانادا

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

چکیده

از بازدارنده‌های خوردگی بطور گسترده در سیستم های بسته برای کاهش خوردگی استفاده می‌شود. بازدارنده‌های سبز به دلیل تجدیدپذیر بودن، زیست‌سازگاری، هزینه پایین‌تر و اثرات محیط‌زیستی کمتر، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در این تحقیق تاثیر یک بازدارنده سنتزی (سدیم دودسیل سولفات) و یک بازدارنده سبز (عصاره گیاه لرگ) بر خوردگی فولاد ساده کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵٪ مقایسه شد. برای بررسی تاثیر بازدارنده ها از آزمون های الکتروشیمیایی (پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی) و تغییرات وزنی پس از غوطه وری طولانی مدت در محلول حاوی بازدارنده استفاده شد. مقدار غلظت بهینه برای SDS و عصاره گیاه لرگ برای رسیدن به حداکثر راندمان بازدارندگی ۸۶ و ۹۶٪ به ترتیب ۵۰ و ۳۰۰ ppm بدست آمد. مقدار مقاومت پلاریزاسیون در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی با اضافه کردن مقادیر بهینه از بازدارنده های SDS و عصاره گیاه لرگ نسبت به محلول فاقد بازدارنده به ترتیب حدود ۱/۹ و ۱۳/۷ مرتبه افزایش یافت، که نشان دهنده اثر قابل توجه بازدارنده سبز در کاهش مقدار خوردگی است. لازم به ذکر است که تغییر غلظت بازدارنده‌ها از مقدار بهینه باعث افت کارایی آنها شد، اما در این حالت نیز مقاومت به خوردگی نسبت به محلول فاقد بازدارنده بهبود یافته بود. تصاویر SEM از سطح خوردگی پس از ۴۸ ساعت غوطه وری نشان دهنده کاهش زبری و علایم خوردگی در حضور بازدارنده بود. نتایج کاهش وزن پس از ۲۱۶ ساعت غوطه وری نیز نشان داد که عصاره گیاه لرگ با کاهش نرخ خوردگی از ۰/۷۲ به ۰/۱۸ mm/y و راندمان بازدارندگی ۸۱٪ عملکرد طولانی مدت بهتری نیز از SDS با راندمان بازدارندگی ۶۶٪ دارد.

کلیدواژه: بازدارنده سبز، سدیم دودسیل سولفات، عصاره گیاه لرگ، پلاریزاسیون، امپدانس الکتروشیمیایی

Evaluation of the Corrosion Behavior of Steel in Sodium Chloride Solution in the Presence of SDS and Pterocarya Fraxinifolia Extract: A Comparison of a Synthetic Inhibitor with a Green Inhibitor

Hamed Abedi-Samakush[1], Soheil Mahdavi[*2], Anita Gourab-Jeiri-Pour[3]

[1] M.Sc. of Materials Engineering, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
[2] Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
[3] B.Sc. Student, Department of Biology, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada

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

Submission: 2026, 06, 20 Acceptance: 2026,08,01

Abstract
Corrosion inhibitors are widely used in closed systems to reduce corrosion. Green inhibitors have attracted considerable attention in recent years due to their renewability, biocompatibility, lower cost, and reduced environmental impact. In this study, the effects of a synthetic inhibitor (sodium dodecyl sulfate, SDS) and a green inhibitor (Pterocarya fraxinifolia extract) on the corrosion of carbon steel in 3.5 wt.% sodium chloride solution were compared. Electrochemical tests, including potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), as well as weight-loss measurements after prolonged immersion in inhibitor-containing solutions, were employed to evaluate the effects of the inhibitors. The optimum concentrations of SDS and Pterocarya fraxinifolia extract for achieving maximum inhibition efficiencies of 86% and 96% were determined to be 50 ppm and 300 ppm, respectively. The polarization resistance obtained from EIS increased by approximately 1.9 and 13.7 times upon the addition of the optimum concentrations of SDS and Pterocarya fraxinifolia extract, respectively, compared with the uninhibited solution, demonstrating the significant effectiveness of the green inhibitor in reducing corrosion. It should be noted that increasing or decreasing the inhibitor concentration from its optimum value resulted in a decrease in inhibition efficiency; nevertheless, the corrosion resistance remained higher than that of the uninhibited solution. SEM images of the corroded surfaces after 48 h of immersion showed reduced surface roughness and fewer signs of corrosion in the presence of the inhibitors. The weight-loss results after 216 h of immersion further demonstrated that Pterocarya fraxinifolia extract provided better long-term performance than SDS, reducing the corrosion rate from 0.72 to 0.18 mm/y and achieving an inhibition efficiency of 81%, compared with 66% for SDS.

Keywords: Green inhibitor; Sodium dodecyl sulfate; Pterocarya fraxinifolia extract; Polarization; Electrochemical impedance.

۱. مقدمه

خوردگی فولاد در محیط‌های آبی حاوی یون کلرید یکی از مهم‌ترین چالش‌های مهندسی در صنایع نفت و گاز، سازه‌های دریایی، سامانه‌های انتقال سیال، تجهیزات شیمیایی و زیرساخت‌های عمرانی به شمار می‌رود [1–9]. حضور یون کلرید به دلیل نفوذپذیری بالا و توانایی تخریب لایه‌های محافظ سطح، موجب تسریع فرایندهای آندی و کاتدی و در نهایت کاهش عمر مفید قطعات فولادی می‌شود. از این رو، کنترل خوردگی فولاد در محیط‌هایی مانند محلول کلرید سدیم، هم از نظر اقتصادی و هم از دیدگاه ایمنی و پایداری عملکرد، اهمیت فراوانی دارد [10–12].

یکی از روش‌های مؤثر و در عین حال ساده برای کاهش نرخ خوردگی، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی است [4,6–9,13–17]. این ترکیبات با جذب روی سطح فلز و ایجاد یک لایه محافظ، دسترسی عوامل خورنده به سطح را محدود کرده و سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی را کاهش می‌دهند [17–22]. بازدارنده‌ها را می‌توان به‌طور کلی به دو گروه سنتزی و طبیعی تقسیم کرد. بازدارنده‌های سنتزی، مانند سورفکتانت‌ها و ترکیبات آلی فعال سطحی، معمولاً بازدهی بالایی دارند و به‌خوبی می‌توانند با تشکیل فیلم جذب‌شده، مانع تماس مستقیم محیط خورنده با سطح فلز شوند [4,6,7,9,13,15,17,23–26]. در مقابل، بازدارنده‌های طبیعی یا گیاهی به دلیل تجدیدپذیر بودن، زیست‌سازگاری، هزینه پایین‌تر و اثرات محیط‌زیستی کمتر، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [27–33].

در میان بازدارنده‌های سنتزی، سدیم دودسیل سولفات یا SDS به عنوان یک ماده فعال سطحی آنیونی شناخته می‌شود که می‌تواند از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و جذب سطحی، در کاهش خوردگی فلزات مؤثر باشد. ساختار زنجیره‌ای و گروه سولفات این ترکیب می‌تواند زمینه تشکیل لایه‌ای نسبتا پایدار روی سطح فولاد را فراهم کند و از انتقال بار و نفوذ گونه‌های مهاجم جلوگیری نماید [34–38]. از سوی دیگر، عصاره‌های گیاهی به علت دارا بودن ترکیبات متنوعی مانند پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، ترپنوئیدها و سایر مولکول‌های واجد اتم‌های نیتروژن، اکسیژن یا گوگرد، اغلب توانایی بالایی در جذب سطحی و مهار خوردگی نشان می‌دهند. این ترکیبات می‌توانند از طریق پیوندهای فیزیکی یا شیمیایی، لایه‌ای متراکم و محافظ روی سطح فولاد ایجاد کنند [39–43].

گیاه لرگ نیز به عنوان یک منبع طبیعی بالقوه برای تهیه بازدارنده خوردگی، می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای بررسی باشد، به‌ویژه اگر استخراج آن در دسترس، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست باشد [44,45]. با این حال، برای ارزیابی دقیق کارایی چنین عصاره‌هایی، لازم است رفتار آن‌ها در مقایسه با یک بازدارنده سنتزی مرجع در شرایط یکسان بررسی شود. این مقایسه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره بازدهی نسبی، نحوه عملکرد، پایداری فیلم محافظ و توانایی هر بازدارنده در کاهش نرخ خوردگی ارائه دهد. علاوه بر این، مطالعه هم‌زمان روش‌های الکتروشیمیایی و آزمون کاهش وزن، امکان تحلیل جامع‌تری از مکانیسم بازدارندگی فراهم می‌کند [12,46,47].

در این پژوهش، رفتار خوردگی فولاد در محلول کلرید سدیم در حضور SDS و عصاره گیاه لرگ در غلظت‌های مختلف بررسی شده است. برای این منظور، از آزمون‌های پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی به‌عنوان ابزارهای اصلی ارزیابی رفتار خوردگی استفاده شده و در کنار آن، نتایج کاهش وزن در زمان غوطه‌وری طولانی‌مدت و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در غلظت بهینه هر بازدارنده ارائه شده است. ترکیب این روش‌ها امکان بررسی دقیق اثر غلظت،

نوع بازدارنده و کیفیت لایه محافظ تشکیل‌شده روی سطح فولاد را فراهم می‌سازد.

۲ ـ روش تحقیق

۲ ـ ۱ ـ آماده سازی 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 بازدارنده ها 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 آلودگی های 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 آماده سازی عصاره گیاه لرگ

گیاه لرگ با نام علمی پتروکاریا فراکزینی فلیا[1]گونه ای درخت از خانواده گردوها می‌باشد. این درخت بومی منطقه قفقاز (ارمنستان، آذربایجان، گرجستان، ایران، روسیه، اوکراین و ترکیه) است. درخت لرگ یکی از درختان زیبای سواحل خزر می باشد، که در نواحی مرطوب و ساحلی دریای خزر رشد می کند و از آستارا تا مینودشت در کلیه جنگل های جلگه ای بطور خودرو رشد می نماید. در جنگل های مازندران و گیلان قامت این درخت به بیست متر نیز می رسد. تصویری از این درخت در شکل ۱ آورده شده است. برای عصاره گیری ابتدا برگ گیاه را آسیاب کرده و سپس با فشردن تفاله آسیاب شده، آب موجود از بافت برگ خارج شد. آب حاصل پس از حرارت دهی روی شعله ملایم تغلیظ شده و به عصاره سیاه رنگ تبدیل می شود.

شکل ۱. تصویر درخت لرگ.

۲ ـ ۳ ـ آزمون های الکتروشیمیایی

برای ارزیابی اثر بازدارنده‌های سدیم دودسیل سولفات ($C_{12}H_{25}NaO_4S$) و عصاره گیاه لرگ بر رفتار خوردگی فولاد در محلول کلرید سدیم ٪۳/۵، از یک سل الکتروشیمیایی سه‌الکتروده 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 ۱۰ تا ۱۰۰ ppm SDS و ۳۰ تا ۵۰۰ ppm عصاره گیاه لرگ انجام شدند. دستگاه مورد استفاده برای ثبت داده‌ها، پتانسیواستات/گالوانواستات مدل Zive SP2 ساخت شرکت WonATech کره جنوبی بود.

۲ ـ ٤ ـ آزمون کاهش وزن

برای بررسی رفتار خوردگی به روش کاهش وزن، نمونه‌های فولادی با سطح در دسترس $1\ cm^2$ آماده شده

[1] Pterocarya fraxinifolia

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 [48].

$$C.R = \frac{8.76 \times 10^4 \times W}{D \times A \times t} \quad (۱)$$

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

که در این معادلات W کاهش وزن(g) ، D دانسیته‌ی فلز(g/cm^3) ، A مساحت سطح نمونه (cm^2) ، t زمان غوطه وری(h)، W_{inh} و W_0 مقادیر کاهش وزن در حضور و عدم حضور بازدارنده هستند.

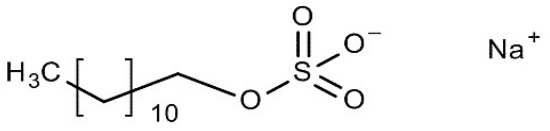
۲ ـ ۵ ـ مشخصه یابی

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

۳. نتایج و بحث

۳ ـ ۱ ـ سدیم دودسیل‌سولفات

سدیم دودسیل سولفات (SDS) که یک سورفکتانت آنیونی با ساختاری دوگانه (آمفیفیلیک) است، از یک دم بلند آب‌گریز هیدروکربنی با ۱۲ اتم کربن ($-CH_3(CH_2)_{11}$) و یک سر آب‌دوست حاوی گروه سولفات ($-OSO_3Na$) تشکیل شده است. این ساختار دوگانه، جذب مولکول‌های SDS بر روی سطح فلز و تشکیل یک لایه محافظ را تسهیل می‌کند. ساختار مولکولی SDS در شکل ۲ نشان داده شده است.

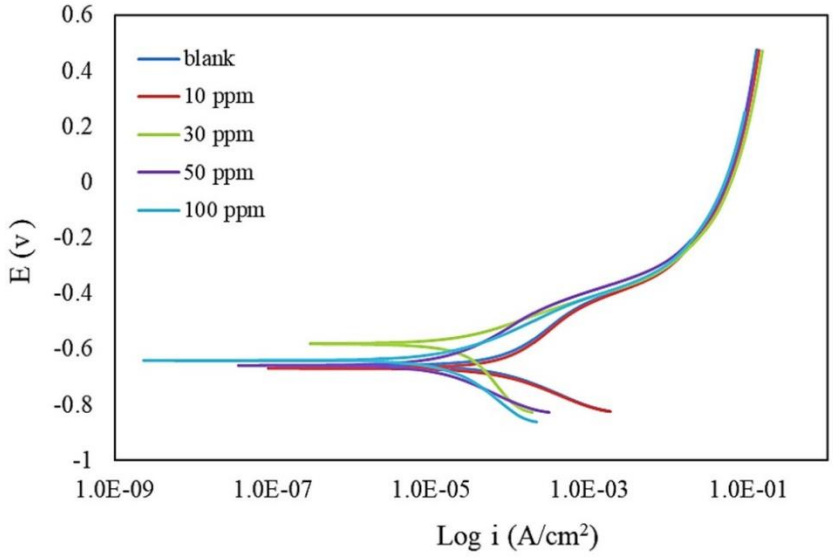


شکل ۲. ساختار مولکولی سدیم دودسیل سولفات.

به منظور تعیین اثر غلظت بازدارندگی سدیم دودسیل سولفات بر خوردگی فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در غلظت‌های مختلف صورت پذیرفت. نتایج پلاریزاسیون در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش غلظت بازدارنده منحنی های پلاریزاسیون به سمت چپ جابه‌جا شده و چگالی جریان خوردگی کاهش می یابد. کاهش چگالی جریان خوردگی با افزایش بازدارنده نشان از جذب این بازدارنده بر روی سطح فلز و تشکیل لایه محافظ می‌باشد. بالا رفتن راندمان بازدارندگی در اثر افزایش غلظت، نشان از تکمیل این لایه محافظ در غلظت های بالاتر است [۵۹]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در حضور بازدارنده جریان-های آندی بیشتر از جریان‌های کاتدی تحت تاثیر بازدارنده قرار گرفته اند و باعث تغییر جزیی پتانسیل به سمت مقادیر مثبت تر شده‌اند. بنابراین و با توجه به تغییرات جزیی در شیب‌های آندی و کاتدی می‌توان

گفت، این دو بازدارنده به صورت آندی –کاتدی (مختلط)، و بیشتر آندی عمل کرده اند[۶۰]. داده های استخراج شده از منحنی های پلاریزاسیون در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین راندمان بازدارندگی در غلظت ۵۰ppm حاصل می شود.

آزمون امپدانس الکتروشیمیایی به منظور بررسی بیشتر اثر غلظت SDS بر خوردگی فولاد کربنی انجام شد. شکل ۴ نتایج بدست آمده بصورت نمودارهای نایکوئیست، بد–اندازه امپدانس، و بد–فاز را نشان می دهد. با اضافه کردن بازدارنده به محلول خورنده، قطر نیم‌دایره در نمودارهای نایکوئیست افزایش می‌یابد. قطر این نیم‌دایره‌ها عموما به میزان مقاومت به خوردگی فولاد در آن محیط مربوط می‌شود که میزان بیشتر آن به بالاتر بودن میزان مقاومت به خوردگی اشاره دارد [۶۱].



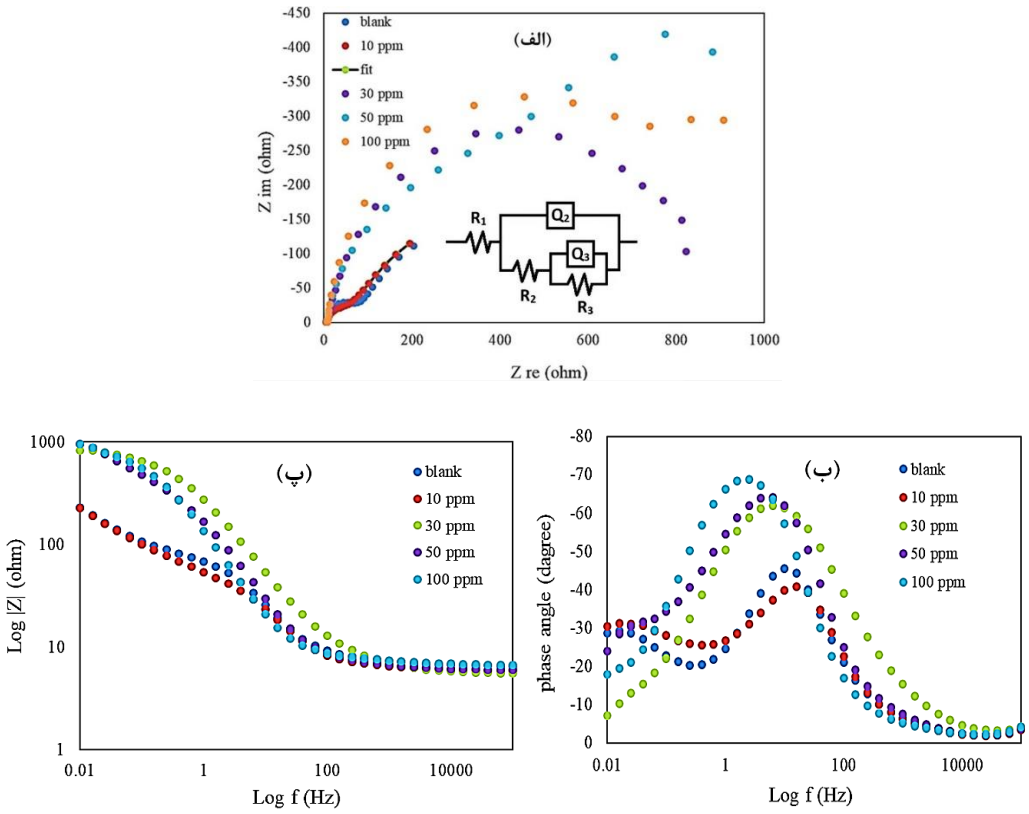
شکل ۳. منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد، در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف SDS در دمای محیط.

جدول ۱. پارامترهای به دست آمده از منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد، در غیاب و حضور غلظت های مختلف SDS 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	–
۱۰	-۶۷۰	۵۰	۱۰۰	۱۷۰	۲۸/۵
۳۰	-۵۸۰	۱۹	۲۱۰	۱۰۳	۷۳/۰
۵۰	-۶۶۰	۱۰	۱۳۰	۱۲۰	۸۶/۰
۱۰۰	-۶۴۰	۱۱	۱۶۰	۱۲۰	۸۴/۰

برای بدست آوردن پارامترهای الکتروشیمیایی، فیت کردن داده های تجربی با استفاده از مدار معادل نشان داده شده در شکل ۴(الف) انجام شد. نتایج بدست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است. مجموع R_2+R_3 با افزایش غلظت بازدارنده افزایش می‌یابد، که می تواند به دلیل مسدود شدن مناطق فعال بیشتری از سطح فلز توسط مولکولهای بازدارنده باشد. همچنین مشاهده می‌شو مقادیر زاویه فاز(n) گزارش شده در جدول۴-۱۲ حاکی از افزایش مقدار آن در حضور بازدارنده در مقایسه با محلول بدون بادارنده می‌باشد، بطوریکه با افزایش غلظت بازدارنده نیز زاویه فاز افزایش می‌یابد. معمولا این پدیده به کاهش زبری سطحی که به نوعی به کم شدن میزان خوردگی در سطح فولاد کربنی بر می‌گردد ربط داده می‌شود [۶۳].

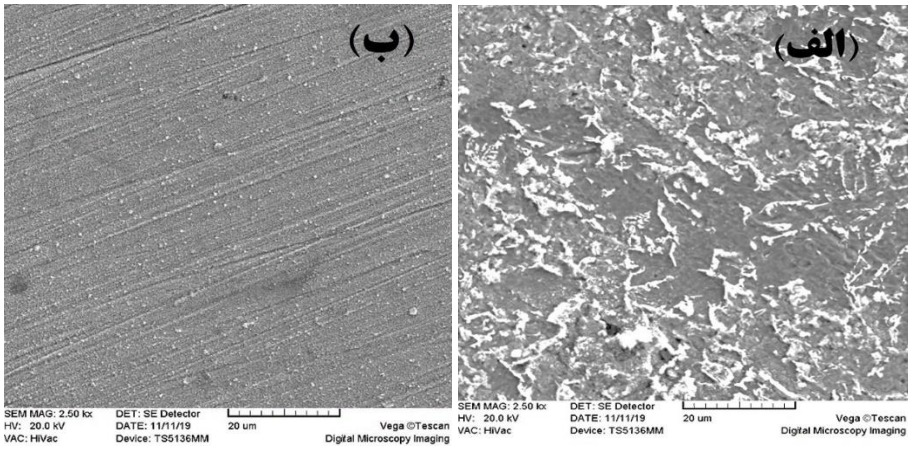
شکل ۵ مورفولوژی سطح فولاد کربنی را در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی، در عدم حضور و حضور غلظت بهینه بازدارنده SDS (۵۰ ppm) پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری نشان می‌دهد. در غیاب بازدارنده سطح فولاد کربنی بسیار ناصاف بوده و متحمل خوردگی گسترده و آسیب های نسبتا شدید شده است. در حضور غلظت بهینه بازدارنده خوردگی سطح خورده شده به نسبت صاف بوده و خوردگی بیشتر از نوع یکنواخت می‌باشد. حضور بازدارنده سبب تشکیل لایه محافظ بر سطح فلز شده و از خوردگی حفره‌ای و غیریکنواخت به مقدار زیادی جلو گیری می کند.



شکل ٤. نمودار های (الف) نایکویست، (ب) بد-فاز، و (پ) بد-اندازه امپدانس فولاد کربنی در محلول ۳/۵NaCl درصد وزنی در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف SDS در دمای محیط.

جدول ۲. پارامترهای به دست آمده از منحنی های نایکوئیست فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف SDS در دمای محیط

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
۱۰	۶/۲	۵۲	۱/۷×۱۰$^{-۳}$	۰/۷۷	۶۶۶	۱۹×۱۰$^{-۳}$	۰/۵۳
۳۰	۵/۵	۱۲	۶/۲×۱۰$^{-۴}$	۰/۷۳	۸۰۴	۱/۵×۱۰$^{-۴}$	۰/۵۷
۵۰	۶/۳	۵۰۵	۱/۱×۱۰$^{-۳}$	۰/۸۳	۷۵۴	۶/۷×۱۰$^{-۳}$	۰/۵۲
۱۰۰	۶/۸	۲۰۸	۱/۰×۱۰$^{-۳}$	۰/۸۸	۸۶۱	۵/۵×۱۰$^{-۴}$	۰/۵۱



شکل ۵. تصاویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی در (الف) عدم حضور و (ب) حضورغلظت بهینه بازدارنده SDS پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری.

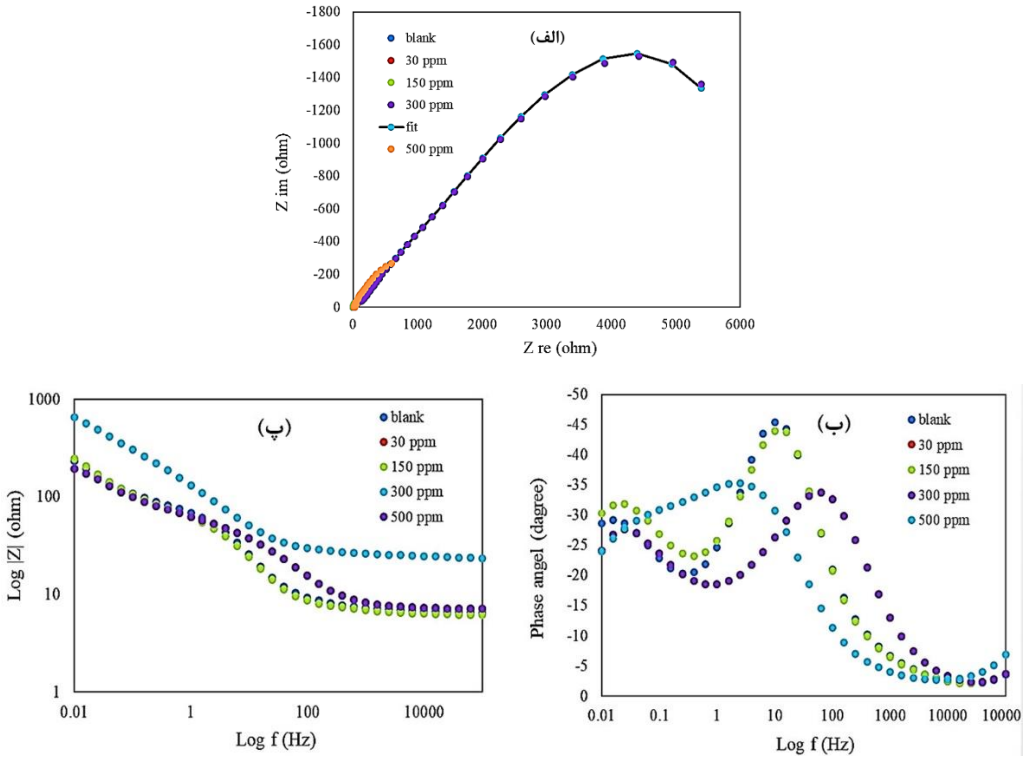
۳ ـ ۲ ـ عصاره گیاه لرگ

به منظور تعیین اثر غلظت بازدارنده بر روی خوردگی فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی، آزمون های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در غلظت‌های مختلف عصاره گیاه لرگ صورت گرفت. شکل ۶ منحنی‌های بدست آمده از این آزمون ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳ پارامترهای الکتروشیمیایی شامل دانسیته جریان خوردگی، پتانسیل خوردگی، شیب تافلی آندی و کاتدی و راندمان بازدارندگی را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت بازدارنده تا ۳۰۰ppm، راندمان بازدارندگی افزایش می یابد ولی در غلظت‌های بالاتر راندمان بازدارندگی کاهش داشته است. با این وجود، حتی در غلظت ۵۰۰ppm نیز دانسیته جریان خوردگی نسبت به عدم حضور بازدارنده کاهش یافته است. با توجه منحنی های پلاریزاسیون به نظر می رسد عصاره گیاه لرگ به عنوان بازدارنده مختلط عمل می کند. تغییرات مقادیر شیب‌های تافل آندی و کاتدی نیز این مکانیزم عملکردی را تایید می‌کنند. بر این اساس عصاره گیاه لرگ 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 [۶۵].

جدول ۳. پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصدوزنی، در غیاب و حضور غلظت های مختلف عصاره گیاه لرگ در دمای محیط

% IE	β_a (mV/decade)	β_c (mV/decade)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)	غلظت (ppm)
–	۲۲۰	۱۲۰	۷۰	−۶۵۰	۰
۵۰	۱۳۵	۱۲۰	۳۵	−۶۵۵	۳۰
۵۷	۱۳۰	۱۱۰	۳۰	−۶۵۰	۱۵۰
۹۶	۱۵۷	۱۷۵	۳	−۵۴۰	۳۰۰
۷۶	۱۵۰	۱۴۰	۱۷	−۶۳۰	۵۰۰



شکل ۷. نمودار های (الف) نایکویست، (ب) بد-فاز، و (پ) بد-اندازه امپدانس فولاد کربنی در محلول NaCl ۳/۵ درصد وزنی در حضور و عدم حضور غلظت های مختلف عصاره گیاه لرگ در دمای محیط.

جدول ۴. پارامترهای به دست آمده از منحنی های نایکوئیست فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی، در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف عصاره گیاه لرگ 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
۰/۵۸	۲۰×۱۰^{-۳}	۴۴۵	۰/۷۰	$۸/۳\times۱۰^{-۴}$	۴۵	۷/۰	۳۰
۰/۷۰	۲۵×۱۰^{-۴}	۱۱۷۱	۰/۷۷	$۱/۷\times۱۰^{-۳}$	۷۰	۶/۵	۱۵۰
۰/۶۰	$۳/۰\times۱۰^{-۴}$	۵۹۵۳	۰/۹۰	$۱/۶\times۱۰^{-۳}$	۷۴	۱۴/۰	۳۰۰
۰/۷۰	$۸/۰\times۱۰^{-۴}$	۲۲۳۵	۰/۶۶	$۳/۷\times۱۰^{-۳}$	۱۰	۵/۳	۵۰۰

شکل ۸ مورفولوژی سطح فولاد کربنی پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم حاوی ppm ۳۰۰ عصاره گیاه لرگ را نشان می‌دهد. خوردگی سطح تقریبا بصورت یکنواخت بوده و محصولات خوردگی از قبیل اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی به صورت اسفنجی و متخلخل بر روی سطح تشکیل شده‌اند.

۳ ـ ۳ ـ آزمون کاهش وزن

به منظور بررسی عملکرد بازدارندگی بازدارنده‌ها، تغییرات کاهش وزن نمونه‌های فولاد کربنی بعد از ۲۱۶ ساعت غوطه‌وری در حضور و عدم حضور غلظت بهینه بازدارنده‌ها در دمای محیط، به وسیله‌ی آزمون کاهش وزن مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر نرخ خوردگی (mm/y) و راندمان بازدارندگی با توجه به معادلات (۱) و (۲) محاسبه شد. نتایج آزمون های کاهش وزن در جدول ۵ ارایه شده است. با افزودن بازدارنده ها به محیط خورنده نرخ خوردگی به شدت کاهش پیدا کرده است. نرخ خوردگی فولاد کربنی در حضور SDS و عصاره گیاه لرگ در آزمون غوطه‌وری به ترتیب ۳/۶ و ۴ مرتبه کاهش یافته است. علت این امر جذب بازدارنده بر روی نواحی فعال خوردگی و در نتیجه کاهش مناطق فعال و دسترسی کمتر محیط خورنده به سطح فلز نسبت داده می‌شود.

نتایج آزمون پلاریزاسیون و امپدانس نشان می دادند که عصاره گیاه لرگ در غلظت بهینه عملکرد بهتری در کاهش خوردگی فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم در مقایسه با SDS دارد. چگالی جریان خوردگی فولاد کربنی در حضور ppm ۳۰۰ عصاره گیاه لرگ حدود ۳ مرتبه کوچک تر از چگالی جریان خوردگی در حضور ppm ۵۰ SDS بود. با این وجود، اختلاف موجود بین این دو بازدارنده در طولانی مدت (آزمون غوطه وری به مدت ۲۱۶ ساعت) کاهش یافته است. چه بسا می توان گفت عملکرد SDS با توجه به غلظت پایین تر در حد همان عصاره گیاه لرگ بوده است.

جدول ۵. نتایج آزمون کاهش وزن فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد در حضور و عدم حضور غلظت بهینه بازدارنده ها بعد از ۲۱۶ ساعت غوطه وری

بازدارنده	غلظت (ppm)	نرخ خوردگی (mm/y)	$\%IE_w$
بدون بازدارنده	۰	۰/۷۲	–
سدیم دودسیل سولفات	۵۰	۰/۲۰	۶۶
عصاره گیاه لرگ	۳۰۰	۰/۱۸	۸۱

٤. نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر غلظت های مختلفی از دو نوع بازدارنده سنتزی و سبز SDS و عصاره گیاه لرگ بر 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 ppm ۵۰ سدیم دودسیل سولفات به محلول کلرید سدیم باعث کاهش چگالی جریان خوردگی فولاد از $\mu A/cm^2$ ۷۰ به $\mu A/cm^2$ ۱۰ می‌شود، که نشان از راندمان ۸۶ درصدی این بازدارنده است. همچنین نتایج EIS حاکی از افزایش ۱/۹ مرتبه‌ای مقاومت پلاریزاسیون در حضور SDS است.

۲- راندمان بازدارندگی عصاره گیاع لرگ با افزایش غلظت آن از ppm ۳۰ به ppm ۳۰۰ از ٪۵۰ به ٪۹۶ می‌رسد. این بازدارنده سبز، در غلظت بهینه ppm ۳۰۰ باعث افزایش حدود ۱۳/۷ برابری مقاومت پلاریزاسیون 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 صاف تر و علایم خوردگی کمتر در نمونه‌های غوطه‌ور شده در محلول حاوی غلظت بهینه بازدارنده است.

۴- بازدارنده سبز، عصاره گیاه لرگ، در طولانی مدت (h ۲۱۶) نیز عملکرد بهتری از بازدارنده سنتزی، SDS، داشته و راندمان بازدارندگی آن در آزمون غوطه وری و کاهش وزن با ٪۸۱ بهتر از عملکرد SDS با ٪۶۶ بود.

تقدیر و تشکر

از پژوهشگاه مواد پیشرفته دانشگاه صنعتی سهند بابت فراهم آوردن تجهیزات آزمایشگاهی پروژه تشکر می‌شود.

مراجع

[1] V. Díaz-Jiménez, G. Gómez-Sánchez, N.V. Likhanova, P. Arellanes-Lozada, O. Olivares-Xometl, I. V. Lijanova, J. Arriola-Morales, Current Overview of Corrosion Inhibition of API Steel in Different Environments, ACS Omega 9 (2024) 27798–27831. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01999.

[2] س. محمدی, بررسی خوردگی و عوامل موثر بر خوردگی فولاد دریایی STE 500, همایش ملی الکترونیکی دستاوردهای نوین در علوم مهندسی و پایه. https://civilica.com/doc/303987 .(1393)

[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 ۳۰ (۱۳۹۷) ۶۷–۸۱ . http://journal.ica.ir/article-1-82-fa.html.

[4] V.. Sastri, Corrosion Inhibition: Theory and Practice, in: Green Corros. Inhib., 2011: pp. 139–166. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118015438.ch4.

[5] W.K. Chan, C.T. Kwok, K.H. Lo, Effect of laser surface melting and subsequent re-aging on microstructure and corrosion behavior of aged S32950 duplex stainless steel,

Mater. Chem. Phys. 207 (2018) 451–464. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.01.007.

[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 8 (2023) 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). 16 (2023) 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 ۱۱ (۱۴۰۰) 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 ۵/۳ درصد وزنی, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی ۱۴ (۱۴۰۳) ۲۳–۳۶.

[10] S. Yu, B. Yan, B. Jiang, H. Guo, E. Bakhtiyor, L. Wang, Chloride Ion-Induced Modification of Passive Film on the Surface of 18%Ni High-Strength Steel, Materials (Basel). 19 (2026) 444. https://doi.org/10.3390/ma19020444.

[11] P. Li, M. Du, Effect of chloride ion content on pitting corrosion of dispersion-strengthened-high-strength steel, Corros. Commun. 7 (2022) 23–34. https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.005.

[12] S. Sharma, H. Assad, A. Thakur, R. Ganjoo, A. Singh, A. Kumar, Plant Extracts as Corrosion Inhibitors for Steel in NaCl Solutions, in: Phytochem. Corros. Sci., CRC Press, Boca Raton, 2024: pp. 407–431. https://doi.org/10.1201/9781003394631-19.

[13] 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 18 (2025) 100459. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100459.

[14] 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 Adv. 11 (2021) 17092–17107. https://doi.org/10.1039/D1RA01010G.

[15] 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 ۱۱ (۱۴۰۰) ۸۵–۹۸.

[16] Z. Ghehsareh, T. Sayah, M. Moharramnejad, A. Rahimitabar, A. Ehsani, "Green guardians: A comprehensive review of environmentally friendly corrosion inhibitors from plant extract to ionic-liquids in industrial applications," Prog. Org. Coatings 201 (2025) 109146. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109146.

[17] D. Jero, N. Caussé, N. Pébère, Film-forming amines as corrosion inhibitors: a state-of-the-art review, Npj Mater. Degrad. 8 (2024) 111. https://doi.org/10.1038/s41529-024-00523-0.

[18] Y.P. Asmara, F. Herlina, A.G.E. Sutjipto, Selection of Inhibitor and Recent Advances in Enhancing Corrosion Prevention, Defect Diffus. Forum 431 (2024) 69–76. https://doi.org/10.4028/p-iVXj7u.

[19] C. Verma, M.A. Quraishi, D.S. Chauhan, Fundamentals of Corrosion and Corrosion Inhibition, in: Green Corros. Inhib., The Royal Society of Chemistry, 2022: pp. 1–34. https://doi.org/10.1039/9781839167461-00001.

[20] R.A.H. Al-Uqaily, S.A. Al-Bayaty, A.G. Sager, Inhibition and Adsorption Using

Thiazole-2-Carboxylic Acid as an Anti-Corrosive for Copper in HCl Media, J. Southwest Jiaotong Univ. 55 (2020). https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.55.2.56.

[21] M. Gan, Corrosion Control (III): Corrosion Inhibitors, in: 2023: pp. 111–130. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2392-2_7.

[22] M. Murmu, S.K. Saha, N.C. Murmu, P. Banerjee, Corrosion Inhibitors for Acidic Environments, in: 2021: pp. 111–162. https://doi.org/10.1021/bk-2021-1403.ch007.

[23] م.ک. پور, م. عطاپور, بررسی اثر بازدارندگی روغن خار مریم بر روی مس خالص تجاری به‌عنوان یک بازدارنده سبز در محلول ۱,۰ M HCl, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی ۱۲ (۱۴۰۱) ۳۵–۴۷.

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

[25] S. Varvara, Reusing an Expired Drug as a Sustainable Corrosion Inhibitor for Bronze in 3.5% NaCl and Simulated Acid Rain Solutions, Appl. Sci. 15 (2025) 6637. https://doi.org/10.3390/app15126637.

[26] 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, Iran. J. Chem. Chem. Eng. 44 (2025) 1063–1073. https://doi.org/10.30492/ijcce.2025.2044014.6856.

[27] M. Parveen, M. Mobin, S. Zehra, R. Aslam, K. Cial, Phytochemicals/Plant Extracts as Corrosion Inhibitors for Zinc in NaCl Solutions, in: Phytochem. Corros. Sci., CRC Press, Boca Raton, 2024: pp. 466–474. https://doi.org/10.1201/9781003394631-22.

[28] U.S. Nwigwe, C.I. Nwoye, The Efficacy of Plant Inhibitors as Used against Structural Mild Steel Corrosion: A Review, Port. Electrochim. Acta 41 (2023) 381–395. https://doi.org/10.4152/pea.2023410505.

[29] R. Solmaz, G. Kardaş, Plant Wastes as Green, Renewable and Sustainable Corrosion Inhibitors, in: 2024: pp. 183–213. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1160-4_9.

[30] A. Thakur, A. Kumar, Sustainable Inhibitors for Corrosion Mitigation in Aggressive Corrosive Media: A Comprehensive Study, J. Bio- Tribo-Corrosion 7 (2021) 67. https://doi.org/10.1007/s40735-021-00501-y.

[31] Y. Li, Y. Chen, C. Wang, Y. Li, Y. Wu, Exploring the potential of plant extracts as corrosion inhibitors: A comprehensive review, Prog. Org. Coatings 198 (2025) 108915. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108915.

[32] B. R. Holla, R. Mahesh, H.R. Manjunath, V.R. Anjanapura, Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review, Heliyon 10 (2024) e33748. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33748.

[33] H. Parangusan, M.H. Sliem, A.M. Abdullah, M. Elhaddad, N. Al-Thani, J. Bhadra, Plant extract as green corrosion inhibitors for carbon steel substrate in different environments: A systematic review, Int. J. Electrochem. Sci. 20 (2025) 100919. https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100919.

[34] H. Song, Z. Xu, L. Benabou, Z. Yin, H. Guan, H. Yan, L. Chao, Z. Hu, X. Wang, Sodium dodecyl sulfate (SDS) as an effective corrosion inhibitor for Mg-8Li-3Al alloy in aqueous NaCl: A combined experimental and theoretical investigation, J. Magnes. Alloy. 11 (2023) 287–300. https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.07.006.

[35] K.G. Prajapati, P.S. Desai, Corrosion inhibition of aluminum alloy in HCl by SDS:

experimental, SEM/AFM imaging, and computational insights (DFT and MD simulations), J. Mol. Model. 31 (2025) 172. https://doi.org/10.1007/s00894-025-06391-y.

[36] C.K. Yadav, B. Yadav, N. Shahi, T.P. Niraula, Y. Chaudhary, M. Adhikari, J. Kunwar, S. Neupane, A.P. Yadav, A. Bhattarai, D. Kumar, Effect of sodium dodecyl sulfate on the corrosion protection behaviour of mild steel in acidic medium, R. Soc. Open Sci. 12 (2025). https://doi.org/10.1098/rsos.250015.

[37] N. Antony, H.B. Sherine, S. Rajendran, Inhibition and Biocide Actions of Sodium Dodecyl Sulfate-Zn2+ System for the Corrosion of Carbon Steel in Chloride Solution, Port. Electrochim. Acta 28 (2010) 1–14. https://doi.org/10.4152/pea.201001001.

[38] H. Shin, S. Oh, Effective Corrosion Inhibition of Galvanic Corrosion of Cu Coupled to Au by Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) and Polyethylene Glycol (PEG) in Acid Solution, Metals (Basel). 14 (2024) 1080. https://doi.org/10.3390/met14091080.

[39] H. Mei, B. Zhou, S. Hu, C. Wu, H. Cen, Extract of photinia leaves as an effective corrosion inhibitor of carbon steel in 1 M HCl solution, J. Adhes. Sci. Technol. 39 (2025) 2384–2405. https://doi.org/10.1080/01694243.2025.2503245.

[40] M. Lebrini, Alkaloids from Plant Extracts as Corrosion Inhibitors for Metal Alloys, in: Corros. Eng. - Recent Break. Innov. Solut., IntechOpen, 2024. https://doi.org/10.5772/intechopen.1005148.

[41] A. Thakur, P.K. Sharma, A. Kumar, A. Somya, A. Singh, E. Berdimurodov, S. Bashir, Plant Extracts as Corrosion Inhibitors for Different Metals/Alloys in HNO3, in: Phytochem. Corros. Sci., CRC Press, Boca Raton, 2024: pp. 177–207. https://doi.org/10.1201/9781003394631-10.

[42] S. Sharma, A.S. Solanki, S.K. Sharma, Anticorrosive action of eco-friendly plant extracts on mild steel in different concentrations of hydrochloric acid, Corros. Rev. 42 (2024) 185–201. https://doi.org/10.1515/corrrev-2023-0053.

[43] ا.ز. زهرا, ا. مزدک, ی.س. جابر, بررسی عملکرد حفاظت از خوردگی آمینو اسید سیستئین روی فولاد St ۱۲در محیط کلریدی خنثی, فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی ۵۵ (۱۴۰۴) ۷۳–۸۵.

[44] S.A. Lakani, S. Hedjazi, A. Abdulkhani, Chemical analysis and antioxidant activities of bark extracts from four endemic species of Hyrcanian forests in Iran, Holzforschung 73 (2019) 287–294. https://doi.org/10.1515/hf-2018-0113.

[45] D.T. Ngo Minh, N. Thi Phuong, Investigation of polyphenol derivative extraction from Terminalia catappa leaves and assessment of their corrosion inhibition performance on CB300 steel in saline solution, J. Mil. Sci. Technol. 106 (2025) 80–86.

[46] X. Wang, L. Chen, F. Yang, Q. Xiang, J. Liu, Corrosion inhibition mechanism and extraction technology of plant corrosion inhibitors: a review, J. Adhes. Sci. Technol. 37 (2023) 2919–2943. https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2172993.

[47] B.R. Fazal, T. Becker, B. Kinsella, K. Lepkova, A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO2 corrosion of carbon steel, Npj Mater. Degrad. 6 (2022) 5. https://doi.org/10.1038/s41529-021-00201-5.

[48] Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, (2004). https://doi.org/10.1520/G0031-72R04.