

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 گورابجیری پور^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

چکیده

از بازدارنده‌های خوردگی بطور گسترده در سیستم‌های 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 بازدارنده‌ها از آزمون‌های الکتروشیمیایی (پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی) و تغییرات وزنی پس از غوطه‌وری 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 بازدارنده‌های 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 غوطه‌وری نشان دهنده کاهش زبری و علایم خوردگی در حضور بازدارنده بود. نتایج کاهش وزن پس از ۲۱۶ ساعت غوطه‌وری 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.

کلمات کلیدی: 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-Samakush¹, Soheil Mahdavi^{*2}, Anita Gourab-Jeiri-Pour³

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,

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 خوردنده 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 خوردنده 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 نسبتاً 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، تریپنوئیدها 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 لرج 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. روش تحقیق

۱.۲. 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، ۰/۴۵ 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 cm^2 ۱ در تماس با محیط خورنده قرار گرفت.

۲.۲. آماده سازی عصاره گیاه لرگ

گیاه لرگ با نام علمی پتروکاریا فراکزینی فلیاگونه 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 می‌باشد، که در نواحی مرطوب و ساحلی دریای خزر رشد می‌کند و از آستارا تا مینودشت در کلیه جنگل‌های جلگه ای بطور خودرو رشد می‌نماید. در جنگل‌های مازندران و گیلان قامت این درخت به بیست متر نیز می‌رسد. تصویری از این درخت در شکل ۱ آورده شده است. برای عصاره‌گیری

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.

۳،۲. آزمون های الکتروشیمیایی

برای ارزیابی اثر بازدارنده های 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 سه الکتروده استفاده شد. در این چیدمان، نمونه فولادی به عنوان الکترود کاری، الکترود ($Ag/AgCl$ (3M KCl) به عنوان مرجع، و صفحه پلاتین با سطح مؤثر 1 cm^2 به عنوان الکترود کمکی به کار گرفته شد. آزمایش ها در حضور بازدارنده ها با غلظت های مختلف در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ ppm SDS و ۳۰ تا ۵۰۰ ppm عصاره گیاه لرگ انجام شدند. دستگاه مورد استفاده برای ثبت داده ها، پتانسیواستات/گالوانواستات مدل Zive SP2 ساخت شرکت WonATech کره جنوبی بود.

پیش از شروع هر آزمون، نمونه ها 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 10 mV و در گستره فرکانسی 100 kHz تا 10 mHz انجام شد. تحلیل داده های امپدانس و برازش مدار معادل با استفاده از نرم افزار ZView صورت گرفت. همچنین آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در بازه -300 تا $+1000\text{ mV}$ نسبت به پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش 1 mV/s انجام شد.

۴,۲. 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 مشخص شده آزمون (۲۱۶ ساعت)، نمونه‌ها خارج شده و پس از تمیزسازی و خشک شدن، 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].

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

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

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

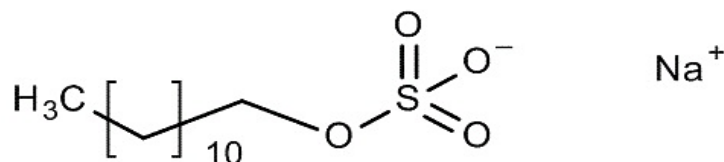
۵,۲. مشخصه یابی

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

۳. نتایج و بحث

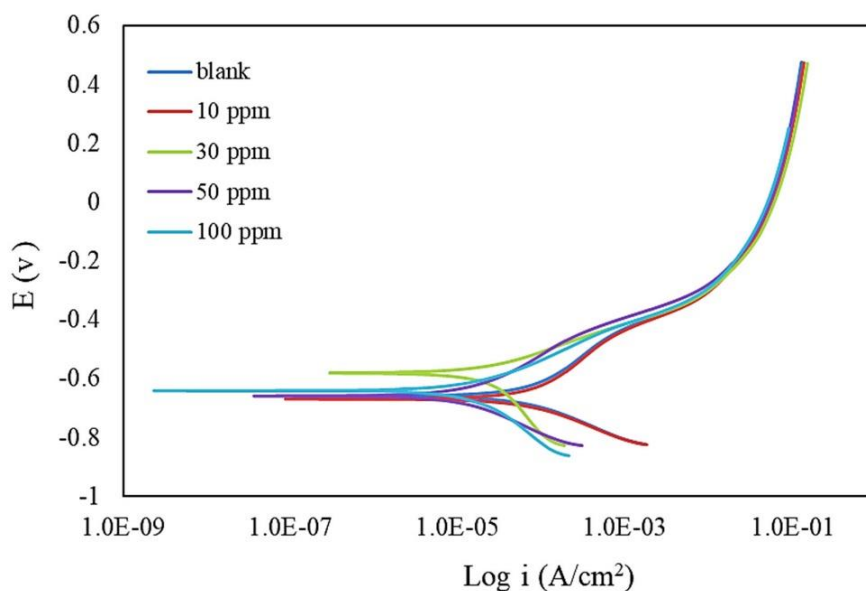
۱,۳. سدیم دودسیل سولفات

سدیم دودسیل سولفات (SDS) که یک سورفکتانت آنیونی با ساختاری دوگانه (آمفیفیلیک) است، از یک دم بلند آب‌گریز هیدروکربنی با ۱۲ اتم کربن ($-\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}-$) و یک سر آب‌دوست حاوی گروه سولفات ($-\text{OSO}_3\text{Na}$) 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 منحنی‌های پلاریزاسیون به سمت چپ جابه‌جا شده و چگالی جریان خوردگی کاهش می‌یابد. 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 غلظت‌های بالاتر است [۵۹]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در حضور بازدارنده جریان‌های آندی بیشتر از جریان‌های کاتدی تحت تاثیر بازدارنده قرار گرفته‌اند و باعث تغییر جزئی پتانسیل به سمت مقادیر مثبت‌تر شده‌اند. بنابراین و با توجه به تغییرات جزئی در شیب‌های آندی و کاتدی می‌توان گفت، این دو بازدارنده به صورت آندی-کاتدی (مختلط)، و بیشتر آندی عمل کرده‌اند [۶۰]. داده‌های استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین راندمان بازدارندگی در غلظت ۵۰ ppm حاصل می‌شود.



شکل ۳. منحنی‌های 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

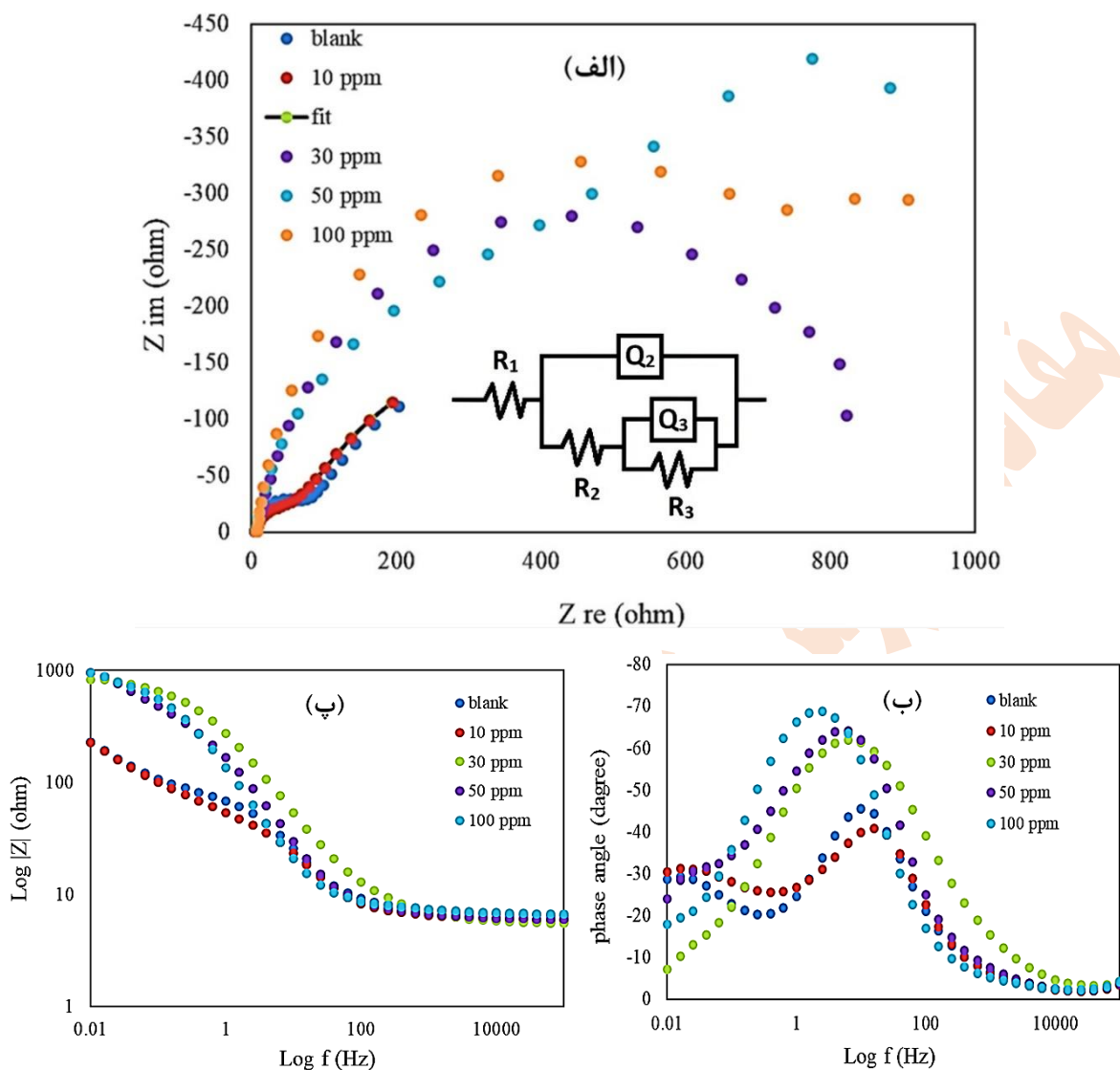
درصد، در غیاب و حضور غلظت های مختلف SDS در دمای محیط

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

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 نیم دایره در نمودارهای نایکوئیست افزایش می یابد. قطر این نیم دایره ها عموماً به میزان مقاومت به خوردگی فولاد در آن محیط مربوط می شود که میزان بیشتر آن به بالاتر بودن میزان مقاومت به خوردگی اشاره دارد [۶۱].

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 می یابد، که می تواند به دلیل مسدود شدن مناطق فعال بیشتری از سطح فلز توسط مولکولهای بازدارنده باشد. همچنین مشاهده می شود مقادیر زاویه فاز (n) گزارش شده در جدول ۴-۱۲ حاکی از افزایش مقدار آن در حضور بازدارنده در مقایسه با محلول بدون بازدارنده می باشد، بطوریکه با افزایش غلظت بازدارنده نیز زاویه فاز افزایش می یابد. معمولاً این پدیده به کاهش زبری سطحی که به نوعی به کم شدن میزان خوردگی در سطح فولاد کربنی بر می گردد ربط داده می شود [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 غوطه وری نشان می دهد. در غیاب بازدارنده سطح فولاد کربنی بسیار ناصاف بوده و متحمل خوردگی گسترده و آسیب های نسبتاً شدید شده است. در حضور غلظت بهینه بازدارنده خوردگی سطح خورده شده به نسبت صاف بوده و خوردگی بیشتر از نوع یکنواخت می باشد. حضور بازدارنده سبب تشکیل لایه محافظ بر سطح فلز شده و از خوردگی حفره ای و غیریکنواخت به مقدار زیادی جلوگیری می کند.

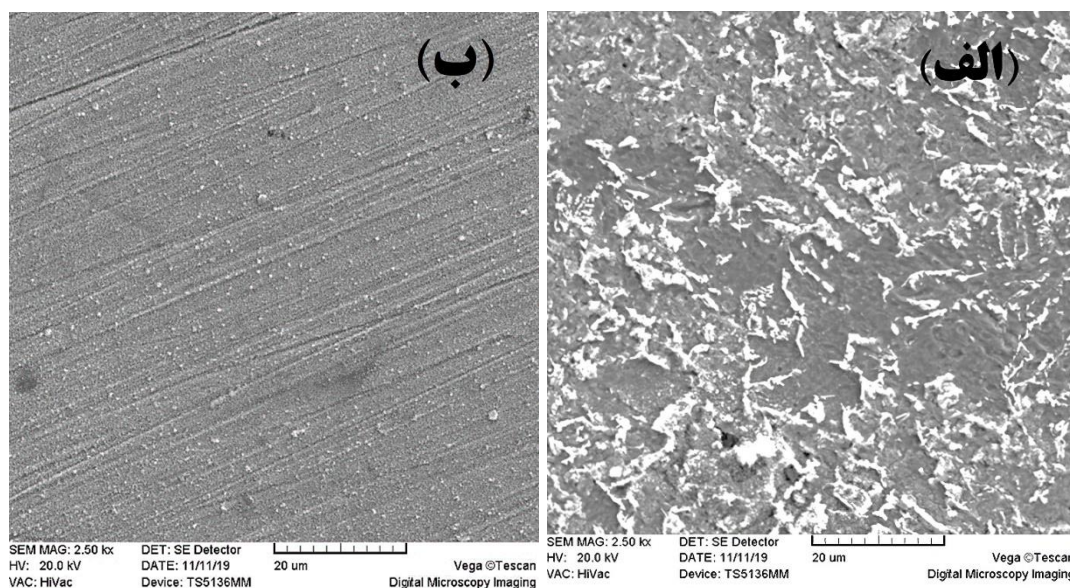


شکل ۴. نمودارهای (الف) نایکویست، (ب) بد-فاز، و (پ) بد-اندازه امپدانس فولاد کربنی در محلول NaCl ۳/۵ درصد وزنی در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف SDS در دمای محیط.

جدول ۲. پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های نایکویست فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد در غیاب و

حضور غلظت‌های مختلف SDS در دمای محیط

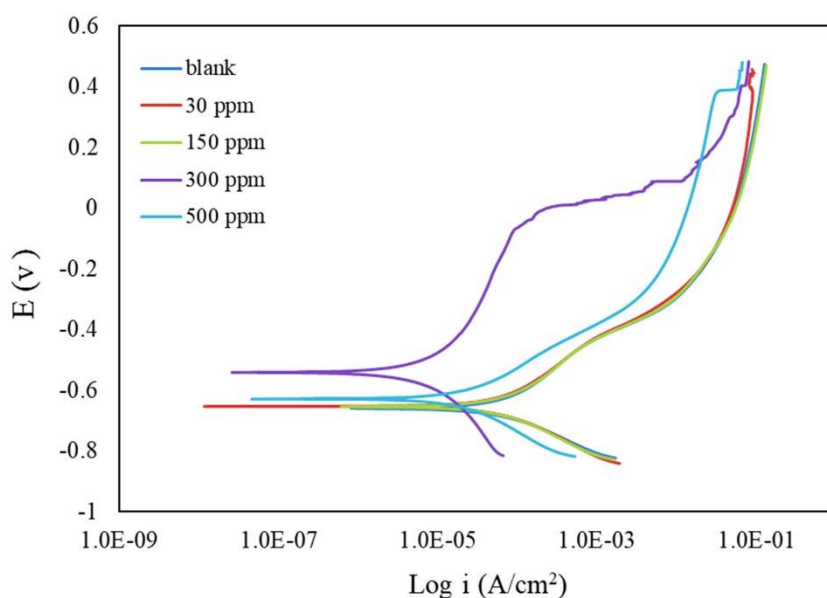
n_3	Y_{03} ($S.s^n.cm^{-2}$)	R_3 ($\Omega.cm^2$)	n_2	Y_{02} ($S.s^n.cm^{-2}$)	R_2 ($\Omega.cm^2$)	R_1 ($\Omega.cm^2$)	غلظت (ppm)
۰/۶۰	32×10^{-3}	۳۵۷	۰/۶۷	$1/6 \times 10^{-2}$	۸۲	۶/۶	۰
۰/۵۳	19×10^{-3}	۶۶۶	۰/۷۷	$1/7 \times 10^{-2}$	۵۲	۶/۲	۱۰
۰/۵۷	$1/5 \times 10^{-4}$	۸۰۴	۰/۷۳	$6/2 \times 10^{-4}$	۱۲	۵/۵	۳۰
۰/۵۲	$6/7 \times 10^{-3}$	۷۵۴	۰/۸۳	$1/1 \times 10^{-2}$	۵۰۵	۶/۳	۵۰
۰/۵۱	$5/5 \times 10^{-4}$	۸۶۱	۰/۸۸	$1/0 \times 10^{-3}$	۲۰۸	۶/۸	۱۰۰



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

۲,۳. 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.



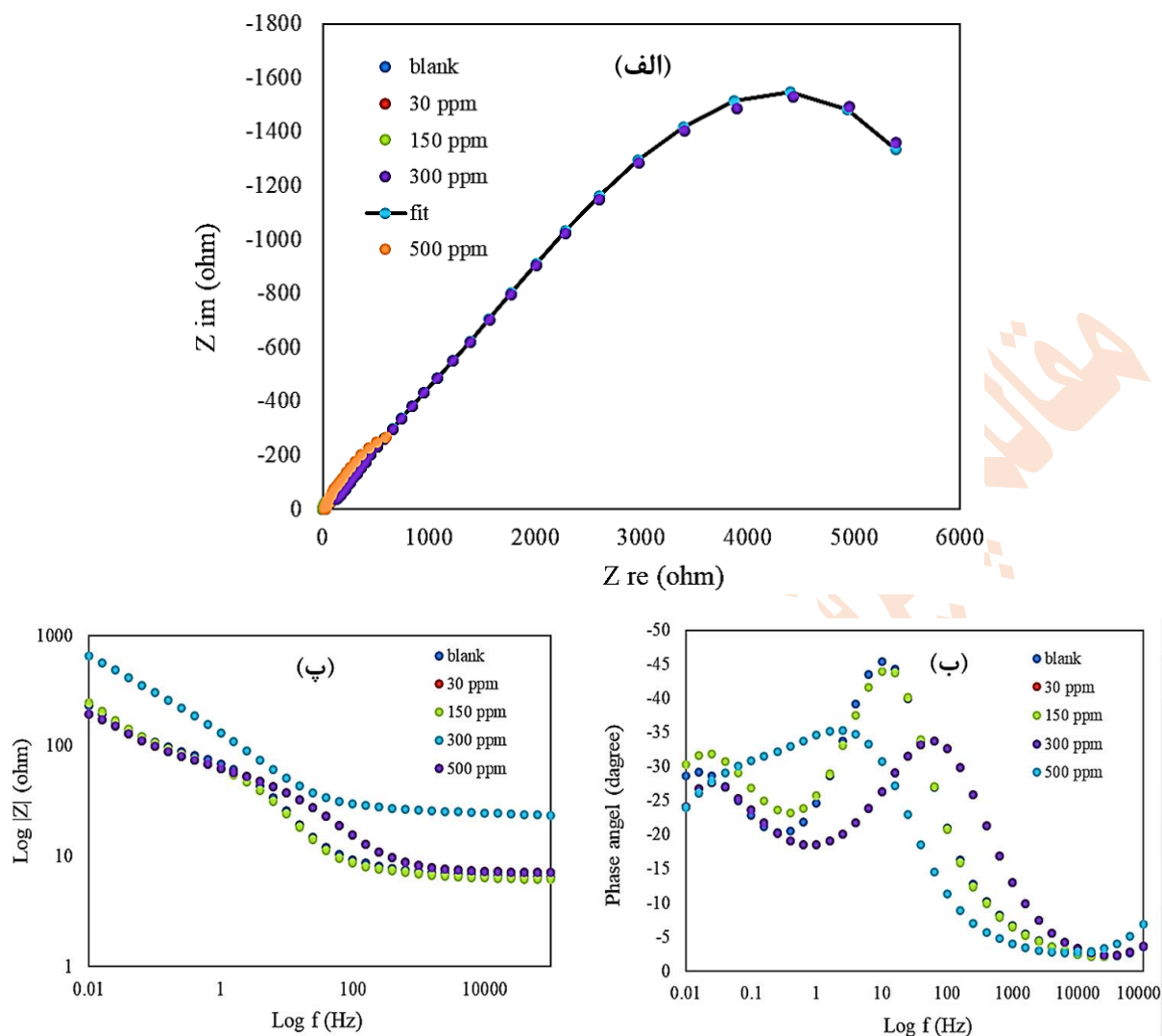
شکل ۶. منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی، در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف عصاره گیاه لرگ در دمای محیط.

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 ۳۰۰ ppm، راندمان بازدارندگی افزایش می‌یابد ولی در غلظت‌های بالاتر راندمان بازدارندگی کاهش داشته است. با این وجود، حتی در غلظت ۵۰۰ ppm نیز دانسیته جریان خوردگی نسبت به عدم حضور بازدارنده کاهش یافته است. با توجه منحنی‌های پلاریزاسیون به نظر می‌رسد عصاره گیاه لرگ به عنوان بازدارنده مختلط عمل می‌کند. 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 غلظت‌های مختلف عصاره گیاه لرگ 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	۳۵	۱۲۰	۱۳۵	۵۰
۱۵۰	-۶۵۰	۳۰	۱۱۰	۱۳۰	۵۷
۳۰۰	-۵۴۰	۳	۱۷۵	۱۵۷	۹۶
۵۰۰	-۶۳۰	۱۷	۱۴۰	۱۵۰	۷۶

به منظور بررسی بیشتر اثر غلظت عصاره گیاه لرگ بر خوردگی فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم آزمون‌های امپدانس الکتروشیمیایی انجام شدند. شکل ۷ منحنی‌های نایکوئیست، بد-فاز، و بد-اندازه امپدانس حاصل از این آزمون‌ها را نشان می‌دهد. افزودن عصاره گیاه لرگ به محلول کلرید سدیم تا غلظت ۳۰۰ ppm، موجب افزایش قطر منحنی‌های نایکوئیست شده است، که نشان دهنده افزایش مقاومت انتقال بار می‌باشد. جهت انجام آنالیز دقیق تر نمودارهای امپدانس الکتروشیمیایی، نمودارهای به دست آمده با کمک مدار معادل نشان داده شده در شکل ۴(الف) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از منحنی‌های نایکوئیست در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت عصاره گیاه لرگ، مقاومت انتقال بار و راندمان بازدارندگی افزایش یافته و همچنین ظرفیت لایه دوگانه کاهش می‌یابد که به دلیل جذب بازدارنده بر روی سطح می‌باشد [۶۶].

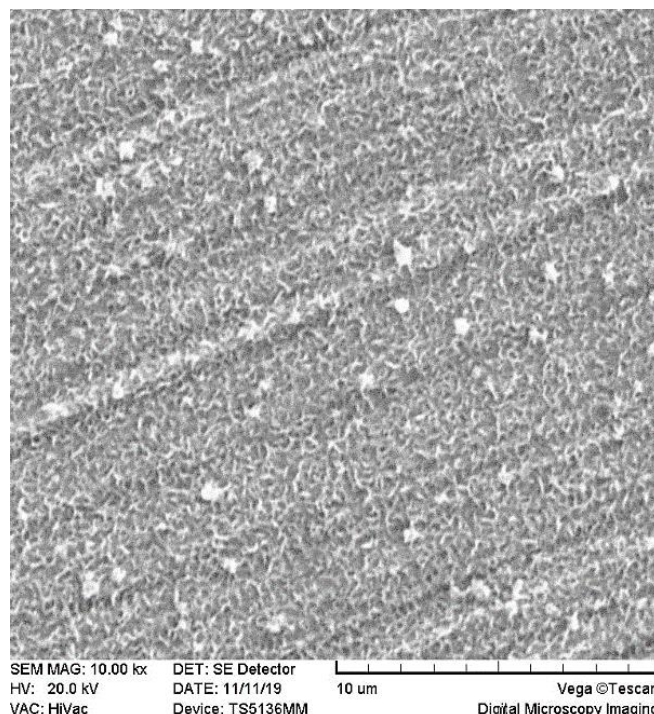


شکل ۷. نمودارهای (الف) نایکویست، (ب) بد-فاز، و (پ) بد-اندازه امپدانس فولاد کربنی در محلول NaCl ۳/۵ درصد وزنی در حضور و عدم حضور غلظت های مختلف عصاره گیاه لرگ در دمای محیط.

جدول ۴. پارامترهای به دست آمده از منحنی های نایکویست فولاد کربنی در محیط کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی، در غیاب و حضور غلظت های مختلف عصاره گیاه لرگ 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	$۱/۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۶۷	۳۵۷	۳۲×۱۰^{-۳}	۰/۶۰
۳۰	۷/۰	۴۵	$۸/۳ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۰	۴۴۵	۲۰×۱۰^{-۳}	۰/۵۸
۱۵۰	۶/۵	۷۰	$۱/۷ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۷۷	۱۱۷۱	۲۵×۱۰^{-۴}	۰/۷۰
۳۰۰	۱۴/۰	۷۴	$۱/۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۹۰	۵۹۵۳	$۳/۰ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۶۰
۵۰۰	۵/۳	۱۰	$۳/۷ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۶۶	۲۲۳۵	$۸/۰ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۰

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



شکل ۸. تصاویر SEM مربوط به نمونه فولاد کربنی در حضور غلظت بهینه بازدارنده عصاره گیاه لرگ پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری.

۳.۳. 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 آزمون‌های کاهش وزن در جدول ۵ ارائه شده است. با افزودن بازدارنده‌ها 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 $3/6$ و 4 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.

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

غلظت (ppm)	نرخ خوردگی (mm/y)	%IE _w	بازدارنده
۰	۰/۷۲	-	بدون بازدارنده
۵۰	۰/۲۰	۶۶	سدیم دودسیل سولفات
۳۰۰	۰/۱۸	۸۱	عصاره گیاه لرگ

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 ۳۰۰ ppm عصاره گیاه لرگ حدود ۳ مرتبه کوچک تر از چگالی جریان خوردگی در حضور ۵۰ ppm 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.

۴. 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 ۵۰ ppm سدیم دودسیل سولفات به محلول کلرید سدیم باعث کاهش چگالی جریان خوردگی فولاد از $70 \mu A/cm^2$ به $10 \mu A/cm^2$ می شود، که نشان از راندمان ۸۶ درصدی این بازدارنده است. همچنین نتایج EIS حاکی از افزایش ۱/۹ مرتبه ای مقاومت پلاریزاسیون در حضور SDS است.

۲- راندمان بازدارندگی عصاره گیاه لرگ با افزایش غلظت آن از ۳۰ ppm به ۳۰۰ ppm از ۵۰٪ به ۹۶٪ می رسد. این بازدارنده سبز، در غلظت بهینه ۳۰۰ ppm باعث افزایش حدود ۱۳/۷ برابری مقاومت پلاریزاسیون می شود.

۳- بررسی شاخه های آندی و کاتدی، و پتانسیل خوردگی در منحنی های پلاریزاسیون نشان داد که هر دو بازدارنده از نوع بازدارنده های مختلط هستند. همچنین بررسی سطوح خوردگی پس از ۴۸ ساعت غوطه وری

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 (۲۱۶ h) نیز عملکرد بهتری از بازدارنده سنتزی، SDS، داشته و راندمان بازدارندگی آن در آزمون غوطه‌وری و کاهش وزن با ۸۱٪ بهتر از عملکرد SDS با ۶۶٪ بود.

مقاله پذیرش شده در مجله علمی پژوهشی

- [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 الکترونیکي دستاوردهای نوین در علوم مهندسی و پایه. <https://civilica.com/doc/303987>. (1393).
- [3] ع. دهقانی، ق. بهلکه، ب. رمضانزاده، مطالعه اثر هم افزایی 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) ۸۱–۶۷. <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 به عنوان بازدارنده دوستدار محیط زیست بر خوردگی فولاد AISI-1030 در محیط اسیدسولفوریک ۱ مولار، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی ۱۱ (۱۴۰۰) ۲۰–۷.
- [9] س.س. مهربان، م. ایزدی، س. کریمی، بررسی اثر عصاره آبی مریمخودی 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-Bayat, 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 ۱۰٪ 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>.

- 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. [28]
<https://doi.org/10.4152/pea.2023410505>.
- 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. [29]
- A. Thakur, A. Kumar, Sustainable Inhibitors for Corrosion Mitigation in Aggressive Corrosive Media: A Comprehensive Study, *J. Bio- Tribo-Corrosion* 7 (2021) 67. [30]
<https://doi.org/10.1007/s40735-021-00501-y>.
- 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. [31]
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108915>.
- 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. [32]
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33748>.
- 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. [33]
<https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100919>.
- 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>. [34]
- 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>. [35]
- 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>. [36]
- 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>. [37]
- 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>. [38]
- 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>. [39]
- 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>. [40]
- A. Thakur, P.K. Sharma, A. Kumar, A. Somya, A. Singh, E. Berdimurodov, S. Bashir, [41]

- 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>.
- 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>. [42]
- ا.ز. زهرا، ا. مزدک، ی.س. جابر، بررسی عملکرد حفاظت از خوردگی آمینو اسید سیستئین روی فولاد ۱۲ St در محیط کلریدی خنثی، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی ۵۵ (۱۴۰۴) ۷۳–۸۵. [43]
- 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>. [44]
- 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. [45]
- 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>. [46]
- 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>. [47]
- Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, (2004). <https://doi.org/10.1520/G0031-72R04>. [48]

مقاله پذیرش شده در مجله علمی پژوهشی
مقاله پذیرش شده در مجله علمی پژوهشی