

Investigating the Effect of Pea Pods as a Green Inhibitor on Sweet Corrosion of Low Carbon Steel

Ashkan kargozari, Shahin khameneh asl*

Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Tabriz University, P.O. Code: 5166616471, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12-01-2025

Accepted: 07-06-2025

Available online: 26-07-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/JCST.2025.167445.1250

Keywords:

Green corrosion inhibitors

Sweet corrosion

Electrochemical properties

Electrochemical impedance spectroscopy

Polarization

ABSTRACT

Sweet corrosion is a type of corrosion in the oil industry in which CO_2 gas reacts with water to form carbonic acid, which causes corrosion in steel. One of the methods of combating corrosion is the use of corrosion inhibitors. This study investigated the natural inhibitory effect of pea pod extract as a new corrosion inhibitor for low carbon steel used in the gas industry (API 5L X42) in a 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO_2 at different concentrations. Electrochemical methods such as polarization tests and electrochemical impedance spectroscopy were used. The results showed that the minimum surface roughness in the extract at a concentration of 100 ppm was 607.20 nm and also the best effectiveness of the extract with a percentage of $IE=69.76$ at a concentration of 100 ppm compared to other concentrations. The results obtained from SEM and XRD indicate the formation of a protective layer on the samples' surface and the extract's function as a mixed inhibitor.

*Corresponding author: * khameneh@tabrizu.ac.ir



بررسی اثر غلاف نخود فرنگی به عنوان بازدارنده سبز بر خوردگی شیرین فولاد کم کربن

اشکان کارگذاری^۱، شاهین خامنه اصل^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، کدپستی: ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، کدپستی: ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱

چکیده

خوردگی شیرین نوعی از خوردگی در صنعت نفت است که در آن گاز CO_2 با آب واکنش داده و کربنیک اسید ایجاد شده و باعث خوردگی در فولاد می شود. یکی از روش های مقابله با خوردگی استفاده از بازدارنده خوردگی است. در این پژوهش، اثر بازدارنده طبیعی عصاره غلاف نخود فرنگی به عنوان بازدارنده خوردگی جدید برای فولاد کم کربن مورد استفاده در صنایع گاز (API 5L X42) در محلول ۳،۵ درصد وزنی NaCl/شباع شده با CO_2 در غلظت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. روش های الکتروشیمیایی از قبیل آزمون قطبش و طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداقل زبری سطح در عصاره با غلظت ۱۰۰ ppm، ۲۰،۶۰۷ نانومتر بوده و همچنین بهترین اثربخشی عصاره با درصد ۶۹،۷۶ $IE =$ در غلظت ۱۰۰ ppm در مقایسه با سایر غلظت ها است و نتایج حاصل از SEM و XRD نشان دهنده تشکیل یک لایه محافظ روی سطح نمونه ها است و عملکرد عصاره به صورت یک بازدارنده مختلط است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/JCST.2025.167445.1250

واژه های کلیدی:

بازدارنده های سبز خوردگی

خوردگی شیرین

خواص الکتروشیمیایی

طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی

قطبش

۱- مقدمه

از دیرباز خوردگی مشکل اصلی در صنعت نفت و گاز بوده است. کربن دی اکسید و سولفید هیدروژن از علل اصلی حملات خوردگی و تخریب خطوط لوله های نفت و گاز هستند. خوردگی ناشی از CO_2 خوردگی شیرین^۱ و خوردگی ناشی از H_2S خوردگی اسیدی (ترش)^۲ نامیده شده است (۱).

گاز کربن دی اکسید به خودی خود در سامانه های نفت و گاز خورنده نیست، اما زمانی که در یک فاز آبی حل شود، از طریق آن می تواند یک واکنش الکتروشیمیایی را تحریک کند. کربن دی اکسید با آب مخلوط می شود و کربنیک اسید تشکیل می دهد و آب را اسیدی می کند. (۲).

برخی از روش ها (مانند پوشش دادن، حفاظت کاتدی و انتخاب ماده مقاوم در برابر خوردگی) به طور گستره برای کنترل خوردگی استفاده می شوند. در مورد فولادهای آلیاژی با افزایش درصد کروم مقاومت به خوردگی افزایش می یابد ولی در مقیاس صنعتی صرفه اقتصادی ندارد. یک راه مقرون به صرفه برای کاهش میزان خوردگی استفاده از یک بازدارنده خوردگی مناسب است (۱).

بازدارنده های خوردگی را می توان به عنوان موادی تعریف کرد که به محیط خورنده اضافه می شوند و از انحلال بیشتر فلز جلوگیری می کنند. هنگام انتخاب بازدارنده عوامل متعددی مانند هزینه، سمی بودن، در دسترس بودن و دوست دار محیط زیست بودن باید در نظر گرفته شود. با وجود کارایی بسیاری از ترکیبات مصنوعی رایج، به علت سمی بودن و سرطان زایی از آنها استفاده نمی شود. بنابراین استفاده از بازدارنده های سبز حداقل نگرانی های ایمنی و زیست محیطی را به همراه خواهند داشت (۳).

بازدارنده های سبز از مواد طبیعی مثل گیاهان، دانه ها، پوست میوه ها و غیره به صورت عصاره و با روش های ساده و کم هزینه استخراج می شوند (۴). بازدارنده های سبز حاوی ترکیبات آلی هستند که از اتم های قطبی مانند اکسیژن، فسفر، گوگرد و نیتروژن تشکیل شده است. این اتم های قطبی می توانند با جذب روی سطح فلز باعث مقاومت در برابر خوردگی شده و فیلم محافظ ایجاد می کنند (۵). استفاده از عصاره گیاهان برای جلوگیری از خوردگی به سال های گذشته برمی گردد.

گائتانو پالمبو^۳ و همکارانش (۶) به بررسی عصاره گوارگام^۴ روی خوردگی شیرین فولاد N80 در دمای ۲۵ درجه سلسیوس پرداختند.

- 1- Sweet corrosion
- 2- Sour corrosion
- 3- Gaetano palumbo

۴- گوارگام یک فیبر غذایی گرفته شده از نوعی لوبیای خوشه ای گیاه گوار در هند است و بیشتر در پاکستان و هندوستان و ایالات متحده آمریکا تولید می شود.

بررسی های AFM نشان می دهد که با افزودن بازدارنده با غلظت ppm ۴۰۰ مقدار زبری (Ra) از ۹۷،۴۱ نانومتر به ۵،۶۲ نانومتر کاهش یافته است و در ضمن نتایج قطبش نشان دهنده این بود که با افزودن بازدارنده با غلظت ppm ۳۰۰ جریان خوردگی از $27.42 \mu A/cm^2$ به $3.70 \mu A/cm^2$ کاهش می یابد و بالاترین اثر بخشی مربوط به غلظت ppm ۳۰۰ است. ابراهیم و همکارانش (۷) نشان دادند که عصاره برگ استبرق^۵ یک بازدارنده موثر برای فولاد ملایم در محلول ۳،۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2 است. اثر بخشی این بازدارنده در پنج غلظت مختلف (۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ ppm) مقایسه شده است. محافظت عصاره این گیاه نیز از طریق EIS بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش غلظت بازدارنده، ظرفیت دو لایه را کاهش و مقادیر مقاومت انتقال بار را افزایش می دهد. در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد، مقاومت انتقال بار از 138.60 اهم سانتی متر مربع در محلول بدون بازدارنده به 1611 اهم سانتی متر مربع در محلول حاوی بازدارنده ppm ۲۰۰ افزایش می یابد. این اثر به تشکیل یک فیلم محافظ نسبت داده می شود و حداکثر بازده بازدارنده محاسبه شده ۹۲ درصد مربوط به غلظت ppm ۲۰۰ در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد است که به کاهش نرخ خوردگی از 4.463 mm y^{-1} در محلول بدون بازدارنده به 0.325 mm y^{-1} در محلول ppm ۲۰۰ منجر می شود. سان^۶ و همکارانش (۸) تأثیر افزودن عصاره پوست دارایی را بر رفتار خوردگی فولاد کربنی N80 در محلول ۳،۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2 مورد تحقیق قرار دادند. چندین غلظت از بازدارنده در محدوده (۴۰۰-۱۰۰) آزمایش شده است. منحنی های قطبش نشان می دهد که با افزایش غلظت بازدارنده، چگالی جریان خوردگی کاهش می یابد. نتایج قطبش نشان می دهد که تغییر در پتانسیل خوردگی کمتر از ۸۵ میلی ولت با افزودن بازدارنده بود. از این رو، بازدارنده به عنوان یک بازدارنده نوع مخلوط شناسایی شد. در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد، جریان خوردگی از 1.845 mm y^{-1} به $0.124 \text{ CR} =$ کاهش می یابد و نشان دهنده بازده ۹۳ درصد برای محلول حاوی بازدارنده با غلظت ppm ۴۰۰ است. فیلیپ^۷ اثر عصاره پوسته سیب زمینی را بر خوردگی فولاد در محیط کربن دی اکسید با استفاده از روش امپدانس الکتروشیمیایی و قطبش مورد بررسی قرار داد. تحقیقات نشان می دهد که افزایش غلظت عصاره باعث کاهش خوردگی می شود و نوع بازدارندگی از مدل مخلوط (آندی - کاتدی) پیروی می کند. بنداهو^۸ و همکارانش (۱۰) به بررسی اثر بازدارندگی رزماری بر روی خوردگی فولاد در محیط فسفریک اسید در دماهای مختلف پرداختند.

۵- نام یک گونه از سرده خرک یا سرده استبرق است. از الیاف این گیاه برای بافت پارچه های دیربا استفاده می شده است.

- 6- Sun
- 7- Philip
- 8- Bendahou

۲-۲-۲ روش‌ها

۲-۲-۲-۱ آماده‌سازی بازدارنده

نخود فرنگی‌های تهیه شده از بازار ابتدا شستشو و غلاف آنها جدا شد و پس از خشک کردن در سایه کوبیده و پودر شدند. ۱۰ گرم از پودر در ۵۰ میلی‌لیتر استن (شرکت شیمی سنتر باخلوص ۹۹٫۹) ریخته شده و به مدت یک ساعت توسط لرزاننده^۱ هم‌زده و خشک شد. عصاره تهیه شده در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ ppm به محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ افزوده شد. نمونه‌های فولادی از پیش آماده‌شده به مدت ۲۴ ساعت در این محلول‌ها غوطه‌ور شدند. نمونه‌ها، خارج شده و در خشکانه^۲ نگهداشته شدند تا مشخصه‌یابی‌ها صورت گیرند.

۲-۲-۲-۲ آماده‌سازی نمونه

نمونه فولادی API 5L X42 از لوله ۱۲ اینچی (تهیه شده از شرکت گاز استان آذربایجان شرقی) با ابعاد حدودی ۴ mm × ۱۰ × ۱۴ با استفاده از دستگاه فرز برش داده و سپس به قطعات کوچک‌تر به ابعاد حدودی ۴ mm × ۲۰ × ۱۰ با استفاده از دستگاه وایرکات تقسیم شد. نمونه‌های فولادی آماده شده توسط کاغذ سمباده از جنس کاربید سیلیکون^۳ (به ترتیب ۸۰، ۱۸۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰) ساییده شدند. در ادامه به منظور پاک‌سازی سطوح قطعات از آلودگی‌ها، صفحات در حمام فراصوت حاوی محلول استن تجاری چربی‌گیری شده و با آب بدون یون شستشو داده شدند.

۲-۲-۲-۳ آماده‌سازی الکترولیت

مقدار معینی آب مقطر در ظرف شیشه‌ای ریخته شده و به آن معادل ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اضافه شد. سپس درپوش ظرف بسته شد. به منظور آب بند بودن درب ظرف از چسب سیلیکونی استفاده شد. چند سوراخ ریز در دهانه شیلنگ (به منظور ایجادهای حباب‌های مناسب و همگن و همچنین اشباع سامانه توسط گاز CO₂) ایجاد شد و گاز CO₂ تحت فشار ۲ بار به مدت ۱ ساعت به محلول مذکور دمش داده شد. پس از یک ساعت تزریق گاز کربن‌دی اکسید، pH تقریباً روی عدد ۴٫۳ (هم در حضور بازدارنده و هم در غیاب آن) ثابت ماند که بیانگر اشباع شدن محلول از گاز اسیدی است. قابل ذکر است تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط و pH محیط (۴٫۳) صورت گرفت.

۲-۲-۲-۴ اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی

میزان مقاومت به خوردگی و همچنین سازوکار بازدارنده خوردگی

نتایج حاصل از قطبش نشان می‌دهد که رزماری به‌عنوان ممانعت‌کننده کاتدی عمل می‌کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش غلظت ماده بازده بازدارندگی افزایش می‌یابد، ولی افزایش دما باعث کاهش بازدارندگی شده است. بزرگ و همکارانش (۱۱) از عصاره گیاه میرتکس به عنوان بازدارنده خوردگی نمونه‌های فولاد در محلول ۱ مولار کلریدریک اسید استفاده کردند. این آزمایش‌ها بعد از یک ساعت پایداری نمونه‌ها در محلول انجام شده است. با افزایش غلظت بازدارنده، مقاومت قطبشی و در پی آن درصد بازدارندگی افزایش یافته است.

استان آذربایجان شرقی، دومین تولیدکننده بزرگ نخود فرنگی در ایران است. شهرستان‌های مراغه و هشترو در این استان، از مراکز مهم تولید نخود فرنگی هستند همچنین فراورده فرعی بعد برداشت نخود فرنگی که به صورت دستی قابل استحصال و تفکیک است بخش غلاف عاری از دانه سبز بوده که می‌توان آن را به عنوان ضایعات نخودفرنگی در نظر گرفت.

در این مقاله به بررسی اثرات عصاره غلاف نخودفرنگی به عنوان بازدارنده سبز بر خوردگی جدید فولاد کربنی ساده در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ ppm و مقایسه آن با خوردگی فولاد در همان محیط در غیاب بازدارنده می‌پردازد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

ترکیبات شیمیایی فولاد API 5L X42 که توسط آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش اسپکترومتری نشری (کوانتومتری) تهیه شده در جدول ۱ و ترکیبات شیمیایی نخود فرنگی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی فولاد API 5L X4.

Table 1: Chemical composition of steel API 5L X4.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti
0.2	1.18	0.1	0.025	0.01	0.4	0.4	0.035	0.02

مقادیر برحسب درصدوزنی (wt.%)

جدول ۲: ترکیبات شیمیایی موجود (میلی‌گرم/ ۱۰۰ گرم غلاف نخود فرنگی)

(۱۲).

Table 2: Chemical compounds (mg/100 grams of peas) (12).

منگنز	سدیم	پتاسیم	منیزیم	روی	آهن	کلسیم
0.59	47.37	1.078	1.029	3.28	10.7	803

- 1- Shaker
- 2- Desicator
- 3- Silicon carbide

۳-۲- تحلیل سطح

۳-۲-۱- میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM)

ریزساختار لایه‌های ایجاد شده روی نمونه‌های مختلف با SEM مجهز به EDS مدل Tescan Mira 3 ساخت کشور چک، مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل ماهیت اکسیدی و عایقی فیلم‌های سطحی تشکیل شده، نمونه‌های به دست آمده با یک لایه نازک از طلا روکش شدند تا تصاویر به دست آمده وضوح بهتری داشته باشند.

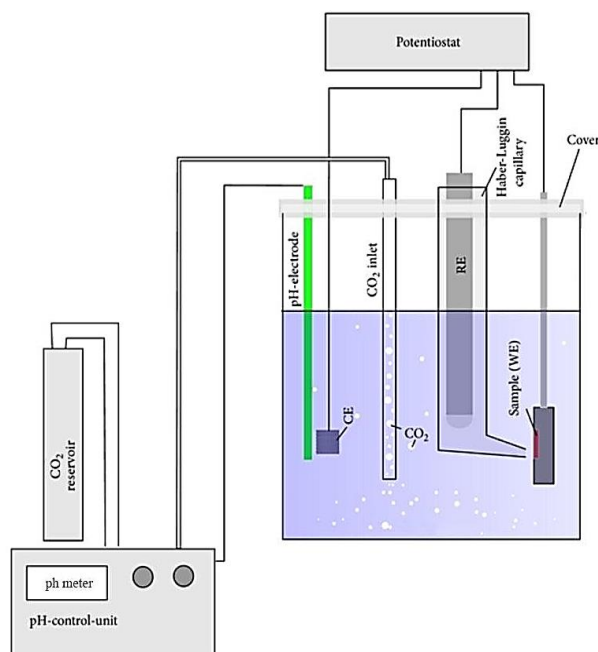
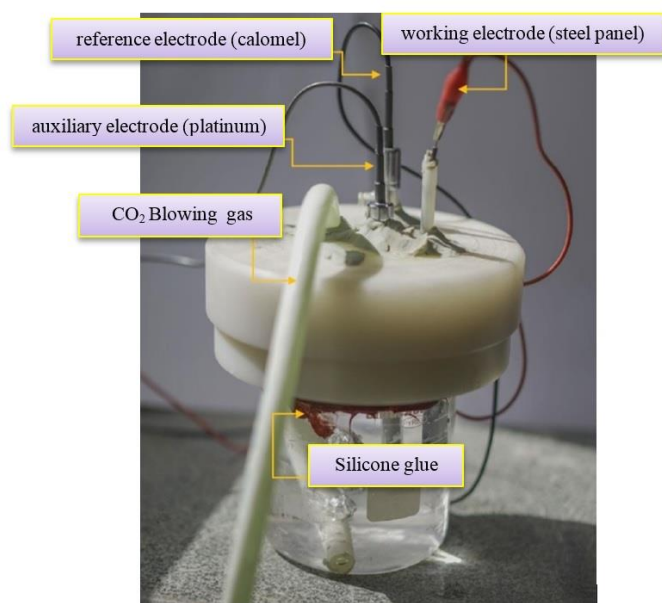
۳-۲-۲- پراش اشعه ایکس^۳ (XRD)

ترکیب شیمیایی فیلم تشکیل شده بر روی سطح فولاد توسط XRD (طیف‌سنج پراش اشعه ایکس) بررسی شد. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Bouvestnik و مدل DRON-8 مجهز به تولیدکننده $\text{CuK}\alpha$ با طول موج 1.54 ، آنکستروم در بازه 10 تا 80 درجه و با سرعت 0.04 - 0.05 درجه بر ثانیه به دست آمد. ساختار بلوری نمونه‌ها براساس الگوی XRD با استفاده از نرم‌افزار HighScore plus بررسی شد.

لایه‌های تشکیل شده به ترتیب توسط تحلیل‌های امپدانس و قطبش با استفاده از دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات (ZIVE SP1) با استفاده از Potentiostat (Galvanostat / EIS) مورد بررسی قرار گرفتند، سپس منحنی‌های حاصل توسط نرم‌افزار Origin pro 2022، Zview، Exel و رسم شد. این آزمون‌ها در یک مجموعه تجهیزات الکتروشیمیایی که یک سامانه سه الکترودی است، تهیه شد.

طرح‌واره این مجموعه تجهیزات در شکل ۱ نشان داده شده است، به طوری که الکترود کانترا یا کمکی از جنس پلاتین، الکترود مرجع^۱ و الکترود کاری^۲ یا همان نمونه‌های فولادی هستند. در این مجموعه تجهیزات از الکترود پلاتین به عنوان الکترود کمکی و کالومل اشباع (Hg_2Cl_2) به عنوان الکترود مرجع استفاده شد. نرخ روبش در آزمایش‌های انجام شده برابر با 1 mV/s بود و محدوده نرخ روبش شده بین 500 mV - تا 500 mV + نسبت به پتانسیل مدار باز نمونه‌ها بوده است. سطح در تماس با الکترولیت نمونه‌ها برابر با یک سانتی‌متر مربع بوده است

- 1- Reference electrode
- 2- Work electrode
- 3- Scanning electron microscope
- 4- X-ray Diffraction



شکل ۱: طرح‌واره و تصویری از مجموعه تجهیزات مجهز شده برای تحلیل‌های الکتروشیمیایی.

Figure 1: Schematic and image of the set of equipment equipped for electrochemical analysis

اسپکتروفتومتر (UV-Visible) ارزیابی شد. بدین منظور آزمون قبل و بعد غوطه‌وری صفحات فولادی، از الکترولیت غوطه‌ور گرفته شد و نمودارهای هر حالت رسم شد.

۳- نتایج و بحث

۱-۳ بررسی عصاره گیاهی

حضور گروه‌های عاملی مختلف بر روی سطح فولاد توسط ATR بررسی شد. طیف حاصل در شکل ۲ ارائه شده است. گروه‌های عاملی موجود در طول موج‌های مختلف در عصاره غلاف نخود فرنگی توسط FTIR و سطح نمونه غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ توسط ATR در جدول ۳ ارائه شده است.

1- Atomic force microscope

2- Fourier transform infrared - Attenuated total reflection

۲-۳-۲ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

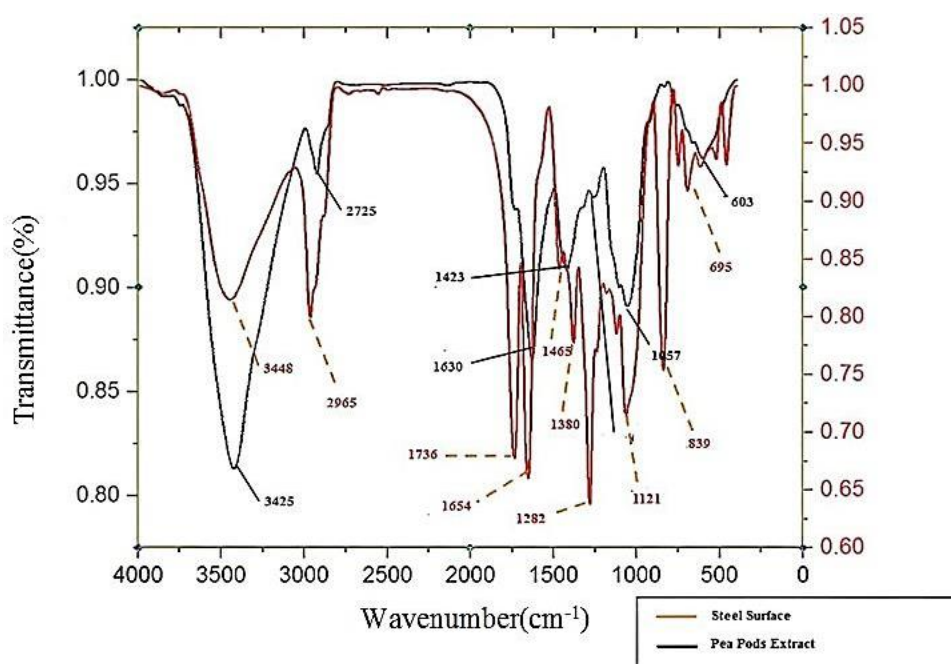
زبری سطح فولاد در سامانه‌های مختلف الکترولیتی این پژوهش توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) بررسی شد. میکروسکوپ نیروی اتمی مدل Nanosurf Mobile S ساخت کشور سوئیس، یک میکروسکوپ روبشی با توانایی تصویربرداری از پستی و بلندی‌های سطح نمونه است.

۲-۳-۴ طیف‌سنجی فروسرخ (FTIR-ATR)

گروه‌های عاملی تشکیل‌شده بر روی سطح نمونه‌های فولادی مورد نظر توسط طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR-ATR) توسط Fourier Transform Infrared Spectroscopy مشخص گردید.

۲-۳-۵ فرابنفش قابل مشاهده

شدت نور ساختارهای آلی و حضور گروه‌های عاملی توسط



شکل ۲: نمودار FTIR/ATR گرفته شده از عصاره و سطح فولاد غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ حاوی ۱۰۰ ppm بازدارنده.

Figure 2: FTIR/ATR diagram taken from the extract and steel surface immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ containing 100 ppm inhibitor.

جدول ۳: گروه‌های عاملی موجود در طول موج‌های مختلف برای بازدارنده و نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂.

Table 3: Functional groups found in different inhibitory wavelengths and steel samples immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂.

Class	structure	Wavelength (cm ⁻¹)	Connection
Alcohols	RCH ₂ OH	3553	O-H stretch
Alcohols	R ₂ CHOH		O-H stretch
Alcohols	R ₃ COH		O-H stretch
Misc.	=NOH Oxime		=NOH(OH stretch)
Amides	RCONH ₂	1626	NH out of plane
Misc.	C=N		C=N
Alkanes	RCH ₂ CH ₃	1467	CH ₂ and CH ₃
Alkanes	-CH ₂ -		-CH ₂ -
Alkyl halides	R-F	1225	C-F stretch
Misc.	N-O amine oxide		N-O aromatic
Carboxylic acids	RCO-OH		C-O stretch
Esters	RCOOR		C-O stretch
Alkyl halides	CH ₂ X		C-H wag (-CH ₂ X)
Alkyl halides	R-F	1105	C-F stretch
Alcohols	R ₂ CHOH		C-O stretch
Ethers	R-O-R		C-O stretch
Misc.	C=S thiocarbonyl		C-S thiocarbonyl
Carboxylic acids	RCO-OH		C-O stretch
Esters	RCOOR		C-O stretch
Alkynes	RC≡CH		#C-H bend

طیف مشابه برای عصاره غلاف نخود فرنگی و سطح فولاد مشاهده شد. با این حال، یک تغییر جزئی در پیک‌های مشخصه وجود دارد که جذب بازدارنده را روی سطح فولاد کربنی تأیید می‌کند (۱۶، ۱۷).

۳-۲- آزمون قطبش

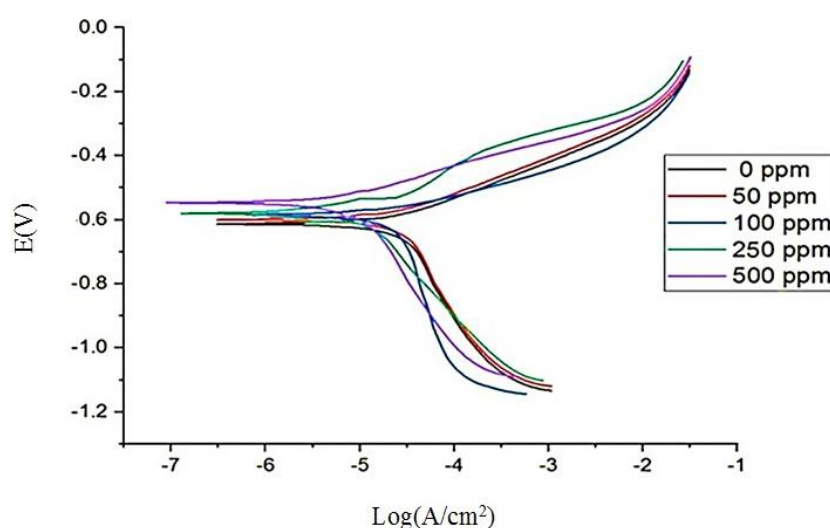
به منظور بررسی سازوکار بازدارنده‌ها از آزمون قطبش استفاده شد. منحنی‌های قطبش در شکل ۳ ارائه شده است. به منظور مقایسه بهتر بین نمونه‌های مختلف، عوامل قطبش استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این مقادیر در جدول ۴ ارائه شده است. به طوری که E_{corr} (پتانسیل خوردگی)، i_{corr} (چگالی جریان خوردگی)، bc- (شیب شاخه کاتدی) و ba (شیب شاخه آندی) است.

با توجه به شکل ۲ نوار عریض در ۳۴۲۵ cm⁻¹ به گروه‌های OH نسبت داده می‌شود که به صورت فیزیکی روی سطح صفحات فولاد کم کربن جذب شده‌اند (۶). قله مشاهده‌شده در ۲۹۶۵ cm⁻¹ به کشش C-H مربوط به آلیفاتیک است و قله مشاهده‌شده در ۱۶۴۶ cm⁻¹ مربوط به C=O است (۱۳) و همچنین قله مشاهده‌شده در ۱۴۲۲ cm⁻¹ مربوط به C=C است (۱۴). قله‌های مشاهده‌شده از ۴۹۰ تا ۷۰۰ cm⁻¹ به ارتعاش کششی C-H در اجزای مبتنی بر فنولی اختصاص داده می‌شوند. سایر قله‌های مشخصه مربوط به خمش و کشش C-O است. با توجه به نتایج حضور گروه‌های عاملی از خانواده‌های الکل‌ها، فنل‌ها، آلکان‌ها، کربوکسیلیک اسیدها، آلکن‌ها، آروماتیک‌ها، استرها، آلکیل هالیدها و آلکین‌ها که شامل ارتعاشات کششی O-H، CH، C-O، ArC-C، C-Cl، نشان می‌دهد که سبب جذب بازدارنده بر روی سطح و تشکیل لایه محافظ می‌شود (۱۵).

جدول ۴: مشخصه‌های الکتروشیمیایی به دست آمده از آزمون قطبش.

Table 4: Electrochemical characteristics obtained from the polarization test.

IE (%)	bc (mV dec ⁻¹)	ba (mV dec ⁻¹)	i _{corr} (μA cm ⁻²)	E _{corr} (mV)	Inhibitor concentration (ppm)
0	23.5	51.2	4.63	607	0
35.4	25.5	26.6	2.99	562	50
69.76	35.4	30.5	1.4	603	100
26.1	52.1	34.5	3.42	501	250
50.3	50.7	27.1	2.33	507	500



شکل ۳: نمودارهای قطبش گرفته شده از سطح فولاد غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف عصاره غلاف نخود فرنگی به عنوان بازدارنده بعد از ۳۰ دقیقه غوطه‌وری

Figure 3: Polarization diagrams taken from the steel surface immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ in different gels of pea pod extract as an inhibitor after 30 minutes Immersion.

در شکل ۶ رسم گردید. R_{ct} مقاومت انتقال بار لایه دوگانه، R_s مقاومت محلول، CPE نشان دهنده عنصر فاز ثابت لایه دوگانه و Y₀ بیانگر ظرفیت خازنی CPE است. مقدار n در خازن ایده‌آل (برای سطوح هموار، همگن و بدون تخلخل) برابر یک است. CPE، خازن ایده‌آل را در قالب n و Y₀ معرفی می‌کند (۱۸). بازده بازدارنده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به عنوان نرخ خوردگی نسبی با بازدارنده و بدون بازدارنده تعریف می‌شود که از رابطه ۱ به دست می‌آید (۱۹).

$$(\eta = R_{ct}(i) - R_{ct} / R_{ct}(i)) * 100 \quad (1)$$

طبق نتایج مندرج در جدول ۵ بیشترین بازده عصاره غلاف در غلظت ۱۰۰ ppm مشاهده شد که برابر است با ۶۸٫۹ درصد و پس از

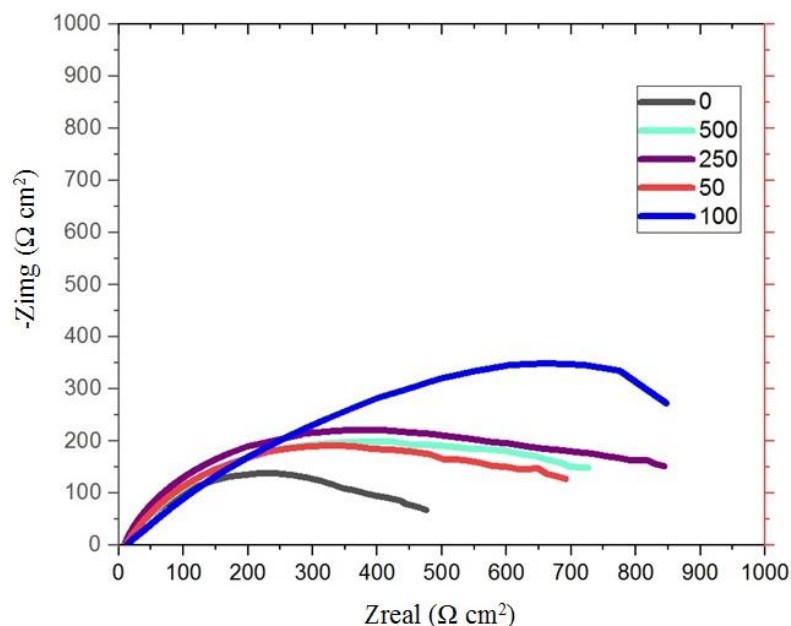
با مقایسه بین عوامل مشاهده شد که بیشترین شدت جریان خوردگی (i_{corr}=۴٫۶۳ μA/cm²) در نمونه شاهد است که نشان‌دهنده شرایط خوردگی شدید در این نمونه به دلیل نبود محافظت از سطح است.

۳-۳-۳ آزمون امپدانس

به منظور بررسی مقاومت نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف بازدارنده عصاره غلاف نخودفرنگی، از آزمون امپدانس استفاده شد. نمودارهای نایکوئیست و باد فاز/مدول در غیاب و حضور بازدارنده‌ها در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. مدار الکتریکی مرتبط

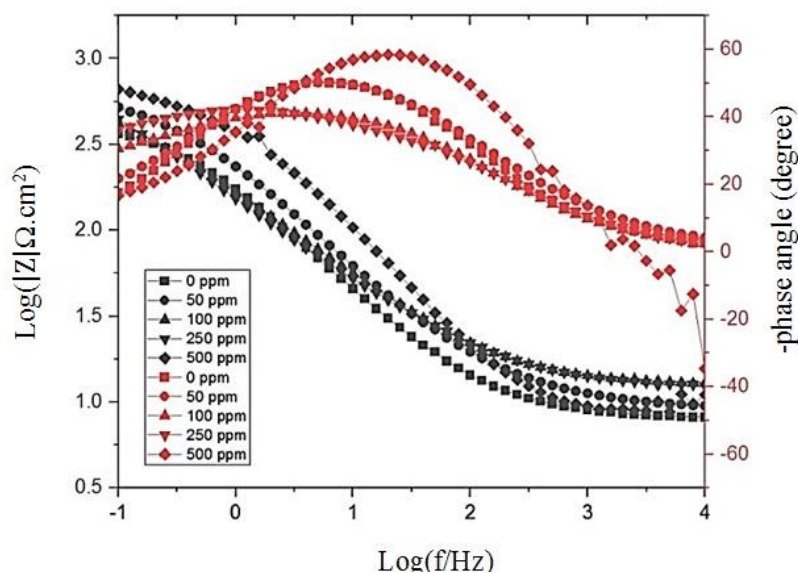
و افزایش فاکتور n نشان دهنده کاهش ناهمگنی سطح به علت جذب مولکول‌های بازدارنده بر روی نقاط فعال سطح است (۱۳). بیشینه مقدارهای n مربوط به غلظت ۱۰۰ ppm برای عصاره غلاف است.

این مقدار غلظت، مقاومت به خوردگی کاهش پیدا کرده است. با توجه به داده‌های جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که کاهش در ظرفیت لایه دوگانه و افزایش غلظت عصاره غلاف نخودفرنگی مبنی بر جذب این بازدارنده به سطح فلز و حضور آن در لایه دوگانه است.



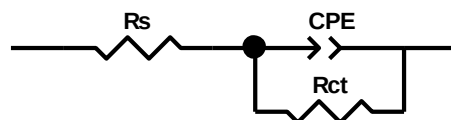
شکل ۴: نمودارهای نایکوئیست گرفته شده از سطح فولاد غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غیاب بازدارنده و غلظت‌های مختلف بازدارنده عصاره غلاف نخودفرنگی.

Figure 4: Nyquist diagrams taken from the steel surface immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ in the absence of inhibitor and different inhibitor concentrations of pea pod extract.



شکل ۵: نمودارهای باد فاز/مدول گرفته شده از سطح فولاد غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غیاب بازدارنده و غلظت‌های مختلف بازدارنده عصاره غلاف نخودفرنگی.

Figure 5: Phase/module wind diagrams taken from the surface of steel immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ in the absence of inhibitor and different inhibitor concentrations of pea pod extract.



شکل ۶: مدار الکتریکی پیشنهادی برای سامانه بازدارندگی عصاره این پژوهش.

Figure 6: Proposed electrical circuit for the extract inhibition system of this research.

جدول ۵: عوامل امپدانس حاصل از نمونه‌های فولاد غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف بازدارنده.

Table 5: Impedance parameters obtained from steel samples immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ in different inhibitor concentrations.

R _{ct} (Ω cm ²)	CPE		R _s (Ω cm ²)	η (%)	Inhibitor concentration (ppm)
	Y ₀ (mΩ cm ⁻² s ⁿ)	n			
457	3.42	0.69	8.031		0
718.3	2.34	0.66	9.321	36.37	50
1471	1.976	0.7668	11.9	68.9	100
910.2	1.077	0.545	11.49	49.7	250
664.1	0.397	0.568	9.675	31.18	500

تشکیل فیلم بازدارنده در سطح فلز است (۲۳). پس از این غلظت، زبری مقداری افزایش یافت که با نتایج حاصل از آزمون SEM در یک راستا است.

۳-۵- ریزشناسی و ریزساختار سطح

برای بررسی ریزساختار سطح فولاد پس از غوطه‌وری در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع‌شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ ppm از SEM استفاده شد. همچنین به منظور بررسی تغییرات در ترکیب شیمیایی سطح فولاد در محیط‌های مختلف، از EDS استفاده شد.

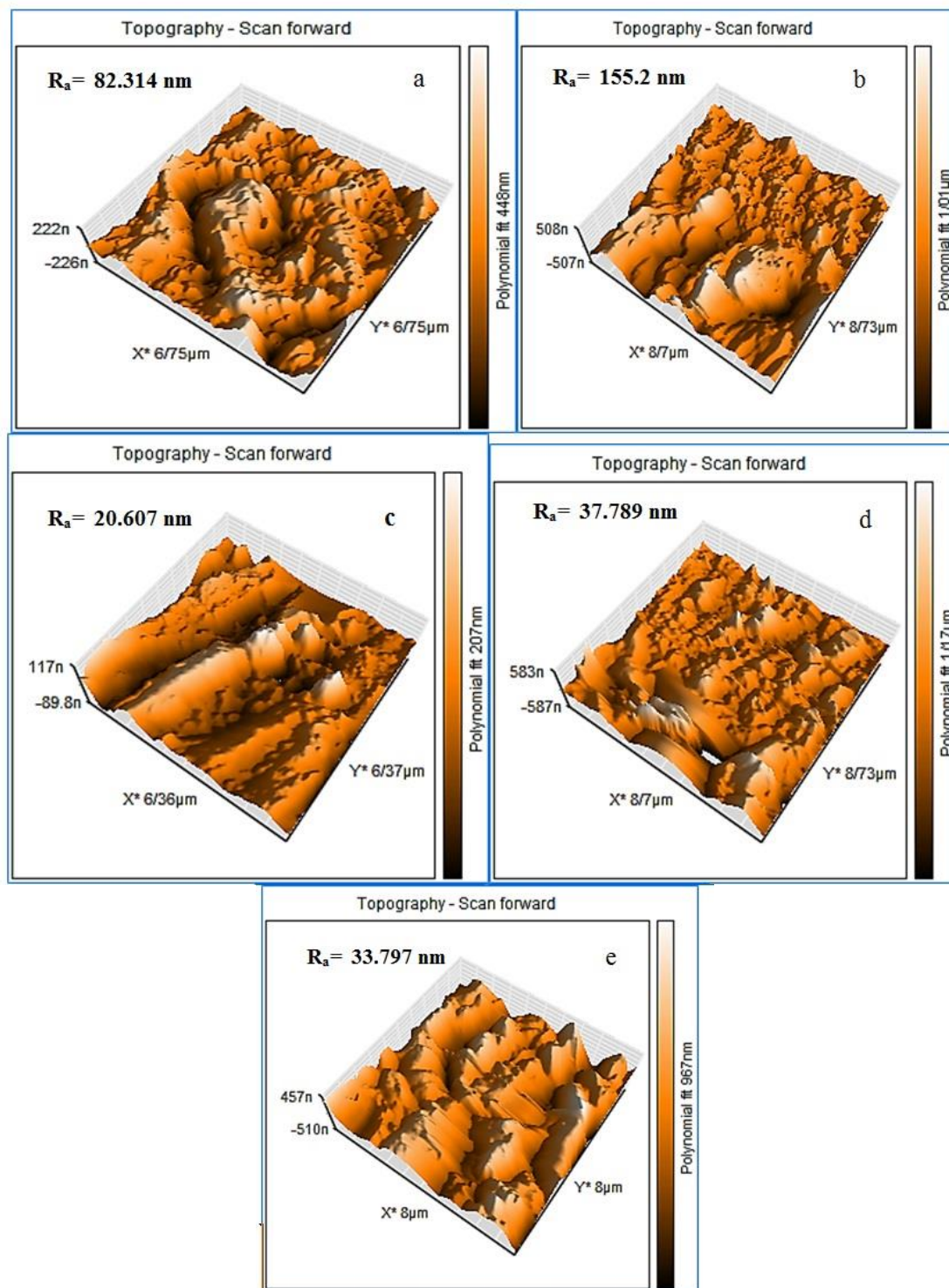
ریزنه‌های حاصله در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. در سطح نمونه (a) حفره‌ها و ترک‌هایی وجود دارد و سطح آن دارای آسیب‌های جدی است. با افزودن بازدارنده عصاره غلاف نخودفرنگی به الکترولیت خورنده و تشکیل لایه محافظ، سطح در برابر هجوم عوامل خورنده محافظت شده است. لایه محافظ سطحی، عایقی بین نقاط فعال سطح و محیط خورنده است. با افزایش غلظت بازدارنده سطح صاف‌تر شد (۲۴).

در غلظت ۱۰۰ ppm از بازدارنده عصاره غلاف نخود فرنگی، سطح فولاد صاف‌ترین حالت خود را دارد. اما به نظر می‌رسد در غلظت ۵۰۰ ppm به علت لخته شدن بازده بازدارنده افت کرده است.

با توجه به شکل ۴ افزایش قطر نیم دایره در غلظت‌های بالاتر جذب مولکول‌های بازدارنده و تشکیل لایه محافظ روی مناطق فعال سطح فلز را نشان می‌دهد (۲۰، ۲۱). علاوه بر این، افزایش مقدار R_{ct} در نتیجه افزایش غلظت عصاره بازدارنده در محلول خورنده بیانگر جذب مولکول‌های بازدارنده و افزایش مقاومت سطح فلز است. با افزایش غلظت بازدارنده مقادیر عددی Y₀ روند کاهشی داشته است که این رفتار، جایگزینی مولکول‌های آب توسط مولکول‌های بازدارنده را نشان می‌دهد (۲۲).

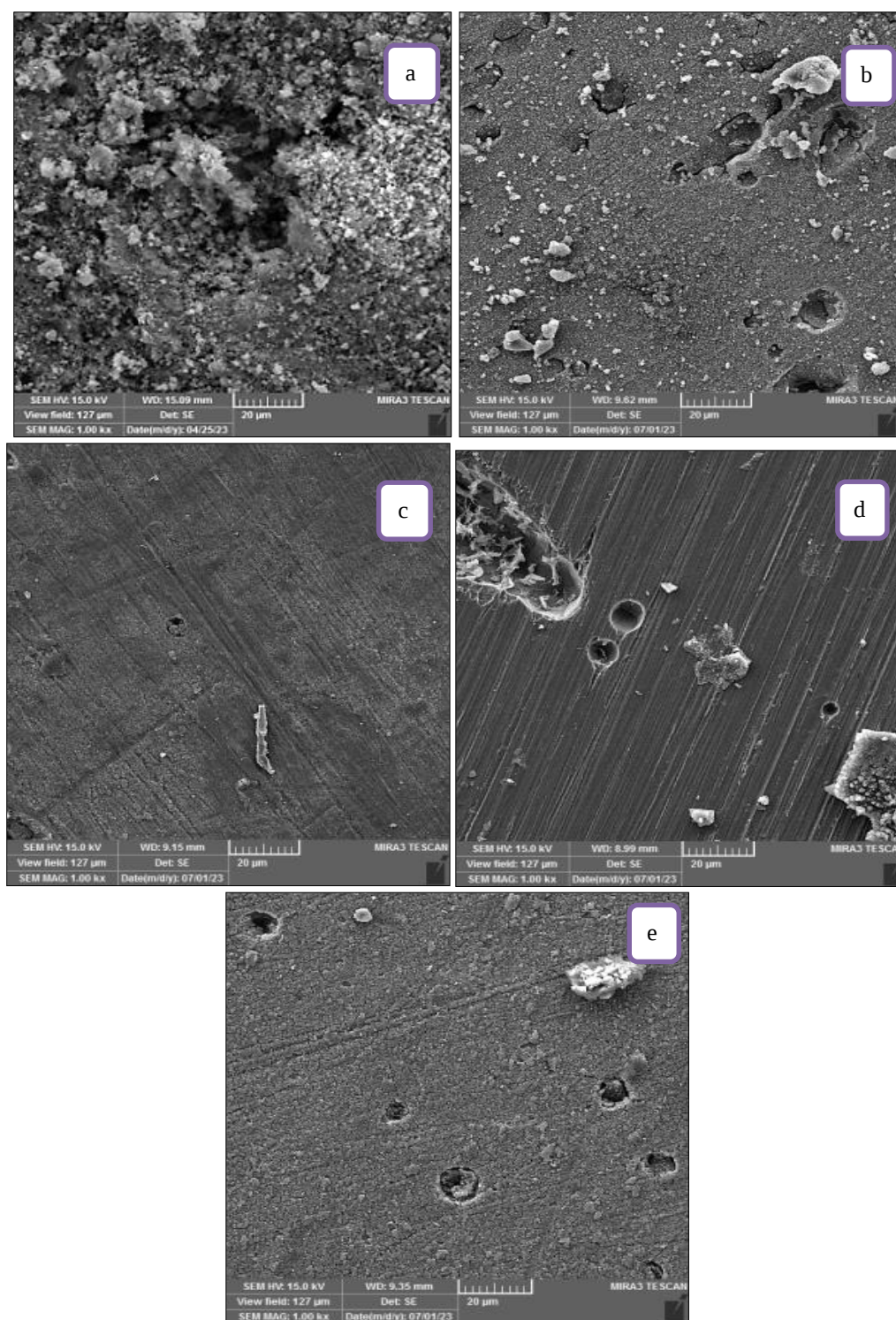
۳-۴- زبری سطح

زبری سطح فولاد در محیط‌های مختلف توسط میکروسکوپ AFM بررسی شد. زبری با معیار Ra (میانگین زبری) نشان داده شده است. با غوطه‌وری نمونه‌های فولادی در محلول خورنده بدون بازدارنده، به دلیل واکنش‌های آندی و کاتدی باعث ایجاد دره‌ها و بلندی‌هایی روی سطح نمونه شد که نشان‌دهنده تشکیل محصولات خوردگی زیر است. ریزساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی در شکل ۷ آورده شده است. طبق نتایج Ra سطح در الکترولیت بدون حضور بازدارنده ۸۲٫۳۱۴ نانومتر بود. افزودن بازدارنده موجب کاهش زبری شد. حداقل زبری سطح در غلظت ۱۰۰ ppm بازدارنده عصاره غلاف نخود فرنگی مشاهده شد که برابر با ۲۰٫۶۰۷ نانومتر بود. کاهش زبری سطح فولاد از ۸۲٫۳۱۴ نانومتر به ۲۰٫۶۰۷ نانومتر نشان‌دهنده



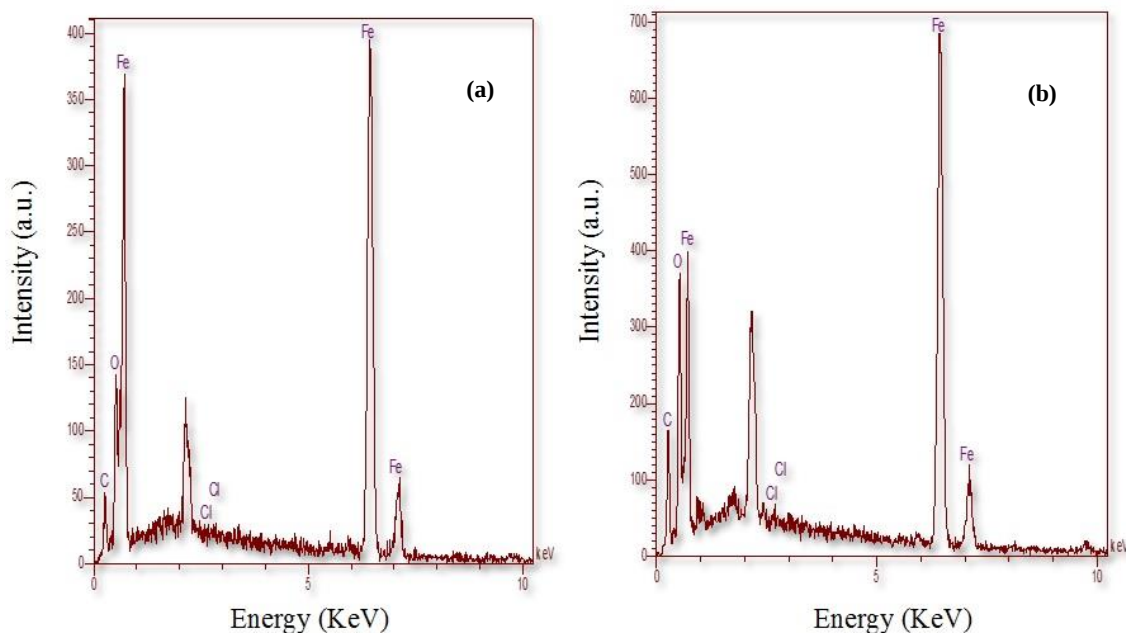
شکل ۷: عارضه‌نگاری برای نمونه های فولادی غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف بازدارنده، a) ۰ ppm، b) ۵۰ ppm، c) ۱۰۰ ppm، d) ۲۵۰ ppm و e) ۵۰۰ ppm.

Figure 7: Topography for steel samples immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ in different inhibitor concentrations, a) 0 ppm, b) 50 ppm, c) 100 ppm, d) 250 ppm and e) 500 ppm.



شکل ۸: ریخت سطح نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف بازدارنده، a) ۰ ppm، b) ۵۰ ppm، c) ۱۰۰ ppm، d) ۲۵۰ ppm و e) ۵۰۰ ppm.

Figure 8: Surface morphology of steel samples immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ at different inhibitor concentrations a) 0 ppm, b) 50 ppm, c) 100 ppm, d) 250 ppm and e) 500 ppm.



شکل ۹: نمودارهای حاصل از طیف سنجی فلورسانس انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول ۳,۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف بازدارنده a) ۰ ppm و b) ۱۰۰ ppm

Figure 9: Graphs obtained from X-ray energy diffraction spectroscopy for steel samples immersed in 3.5 wt% NaCl solution saturated with CO₂ at different inhibitor concentrations a) 0 ppm and b) 100 ppm.

جدول ۶: نتایج حاصل از طیف‌سنجی فلورسانس انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول ۳,۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف بازدارنده.

Table 6: The results of X-ray energy diffraction spectroscopy for steel samples immersed in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ in different inhibitor concentrations.

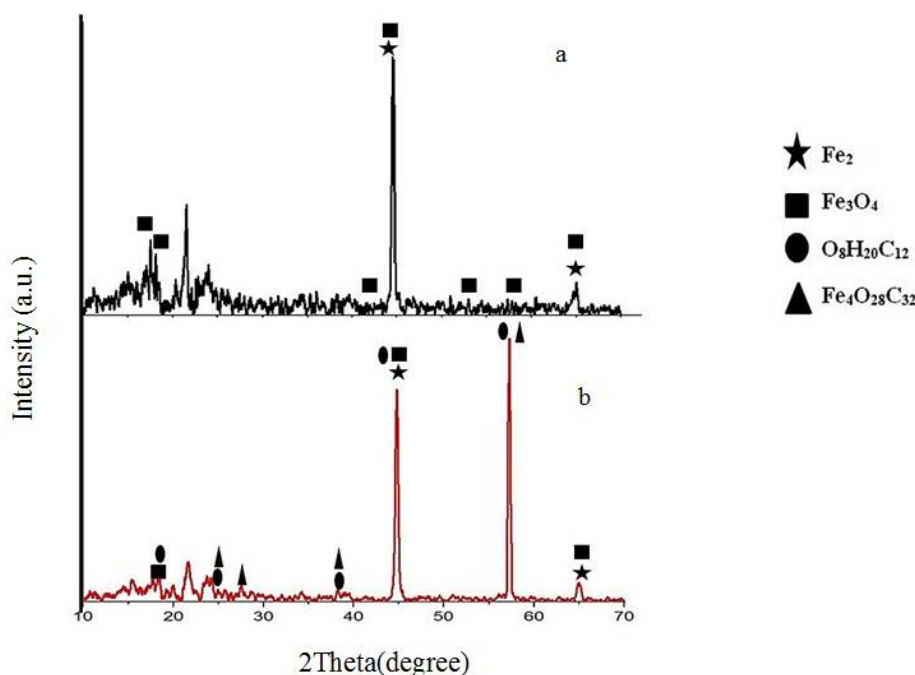
Fe (wt. %)	C (wt. %)	O (wt. %)	Cl (wt. %)	Inhi bi tor concent rati on (ppm)
80.82	9.84	9.18	0.16	0
88.48	8.49	2.72	0.31	50
71.69	15.63	12.53	0.15	100
82.06	10.91	6.87	0.15	250
82.37	12.22	5.26	0.14	500

امکان‌پذیر نیست.

۳-۶- آزمون XRD

به منظور یافتن محصولات خوردگی در نمونه الف عاری از بازدارنده (۰ ppm) و همچنین ماهیت لایه محافظ در نمونه غوطه‌ور در محلول خورنده حاوی بازدارنده در غلظت ۱۰۰ ppm از XRD استفاده شد. این آزمون همچنین از تشکیل فازهای مدنظر و شناسایی ساختار بلوری آنها را مشخص می‌کند.

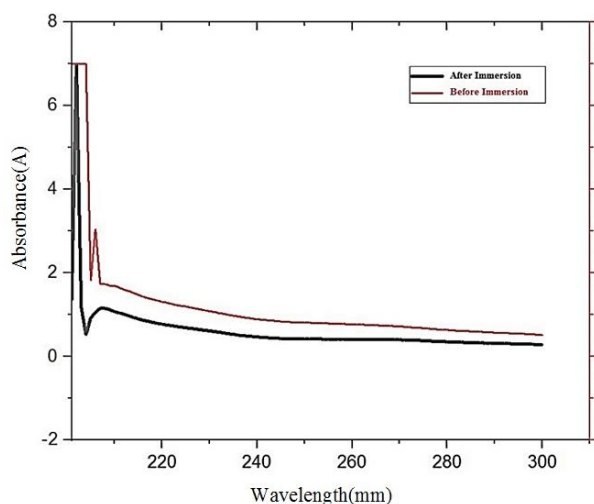
نتایج طیف‌های EDS برای عصاره‌های غلاف، غلاف و پوسته بیرونی نخود فرنگی در شکل ۹ و جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به بررسی نتایج طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول ۳,۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت‌های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که برای عصاره غلاف نخود فرنگی در غلظت ۱۰۰ ppm، نمونه (b) بیشترین مقدار کربن را دارا است که می‌تواند به دلیل تشکیل فیلم محافظ باشد (۱۶). قابل ذکر است اندازه‌گیری دقیق کربن با این آزمون



شکل ۱۰: الگوی حاصل از آزمون XRD گرفته شده از سطح فولاد غوطه ور در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂، (a) در غیاب بازدارنده و (b) حاوی ۱۰۰ ppm بازدارنده عصاره غلاف نخودفرنگی.

Figure 10: The pattern obtained from the XRD test taken from the steel surface immersed in a solution of 3.5 wt% NaCl saturated with CO₂ in the absence of inhibitor, (a) and (b) containing 100 ppm of pea pod extract inhibitor.

فرابنفش صفحات فولادی قبل و بعد از غوطه‌وری در الکترولیت اندازه‌گیری شد. شکل ۱۱ محدوده فرابنفش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: طیف حاصل از UV-VIS در محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غیاب و حضور عصاره غلاف نخود فرنگی به عنوان بازدارنده.

Figure 11: The spectrum obtained from the UV-VIS test in 3.5 wt. % NaCl solution saturated with CO₂ in the absence and presence of pea pod extract as an inhibitor.

مطابق شکل ۱۰ الگوی پراش اشعه ایکس نمونه a نشان می‌دهد که قله‌های ظاهر شده در زوایای ۱۸°، ۴۵°، ۵۲°، ۵۵° و ۶۵° به طور کلی متعلق به فازهای Fe₃O₄ با شماره کارت ۲۰۲۷-۹۰-۹۶ و ساختار بلوری اورترومبیک و فاز Fe₂ به شماره کارت ۳۴۷۵-۹۰-۹۶ با ساختار کیوبیک است. قله‌های مربوط به هر کدام از فازها با علامت‌های جداگانه مشخص شده‌اند. در نمونه b نیز نتایج حاصل از آزمون پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد که قله‌های ظاهر شده در زوایای ۱۵°، ۲۳°، ۲۷°، ۳۳°، ۳۷°، ۴۱°، ۴۴°، ۴۵°، ۴۷°، ۵۵°، ۶۰° و ۶۵° عمدتاً مربوط به فاز C₃₆H₆₀O₄ با شماره کارت ۸۷۱۶-۹۶-۲۲۳ و ساختار بلوری اورترومبیک، فاز Fe₂ با شماره کارت ۳۴۷۵-۹۰-۹۶ با ساختار بلوری مکعبی ساده، و فاز Fe₆C₆O₁₈ با ساختار هگزاگونال به شماره کارت ۵۲۶۱-۹۰-۹۶ و فاز O₆C₃₄H₅₂ با ساختار مونوکلینیک با شماره کارت ۱۹۲۶-۱۵۱-۹۶ است. بنابراین با توجه به نتایج الگوی پراش اشعه ایکس بر روی سطح نمونه b (در حضور بازدارنده)، O₆C₃₄H₅₂، C₃₆H₆₀O₄ و Fe₆O₆C₁₈ دیده می‌شوند که بیانگر ایجاد یک لایه محافظ سطحی است.

۳-۷ جذب/واجذب گونه‌های فعال

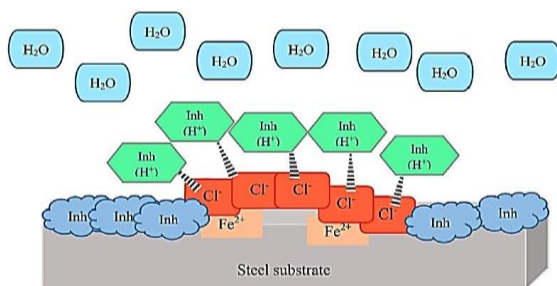
به منظور بررسی جذب و واجذب ترکیبات آلی بر روی نمونه فولادی، از طیف‌سنجی مرئی - فرابنفش استفاده شد. برای این کار طیف مرئی -

در طی این فرآیند خوردگی اگر کربنات به حد حلالیت رسیده باشد، می‌تواند بر روی سطح فولاد رسوب کند و نرخ خوردگی یکنواخت را کاهش دهد. حد حلالیت به pH محلول، فشار جزئی CO₂ و دما بستگی دارد. با این حال تحت شرایط محیطی خاص، زمانی که لایه محافظ کربنات آهن تا حدی از بین می‌رود، خوردگی موضعی می‌تواند رخ دهد (۲۸).

۳-۹- سازوکار عملکرد بازدارنده

درصد عملکرد (IE) برای عصاره گیاهی و سازوکار جذب روی بستر فلزی را می‌توان به جذب فیزیکی، شیمیایی یا ترکیبی از این دو جذب که به عنوان بازدارنده جذب نوع مختلط نیز نامیده می‌شود، طبقه‌بندی کرد (۲۹). بازدارنده‌های مختلط بالاترین حفاظت را ارائه می‌دهند زیرا بر واکنش‌های کاتدی و آنودی تأثیر می‌گذارند (۳۰). از عوامل موثر بر عملکرد بازدارنده می‌توان به ماهیت بازدارنده خوردگی (۳۱) ساختار بازدارنده (۳۲)، محیط خورنده (۳۳) و بار سطحی لایه فلزی (۳۴) اشاره کرد.

هانینی (۳۵) طرح سازوکار جذب فیزیکی را براساس ماهیت خوردگی پیشنهاد کرده است (شکل ۱۲). آنها گزارش کرده‌اند که عصاره حاوی پیوندهای متعدد، حلقه‌های معطر و هترواتم است که می‌توانند به راحتی در محیط اسیدی پروتونه شوند. پروتونه شدن بازدارنده منجر به گونه‌های بازدارنده با بار مثبت می‌شود که می‌توانند از طریق یون‌های کلرید روی سطح فولادی با بار مثبت جذب شوند و پل‌های متصل به هم را تشکیل دهند که به برهم‌کنش الکترواستاتیکی معروف هستند. از طرفی دیگر، اگر اختلاف بین پتانسیل خوردگی نمونه شاهد و سایر نمونه‌ها بیشتر از ۸۵ mV باشد، با توجه به محل قرارگیری پتانسیل خوردگی نمونه حاوی بازدارنده نسبت به نمونه خام می‌توان بررسی کرد که بازدارنده از نوع آنودی است یا کاتدی. در صورتی که این اختلاف از ۸۵ mV کمتر باشد، ممانعت از نوع مختلط است (۳۵). با توجه به داده‌های جدول ۴ به نظر می‌رسد نوع بازدارنده‌ها مختلط هستند. بازدارنده مختلط یعنی هم واکنش تکامل هیدروژن و هم انحلال آهن آنودی مسدود می‌شود (۳۷).



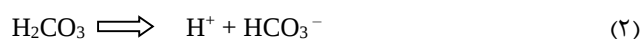
شکل ۱۲: طرح جذب فیزیکی بازدارنده در محیط HCl روی سطح فلز (۳۵).

Figure 12: Physical adsorption scheme of inhibitor in HCl medium on the metal surface (35).

طیف‌های جذبی UV-Visible برای غلظت مطلوب بازدارنده قبل و بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری نمونه فولادی در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. طیف جذب الکترونیکی بازدارنده قبل از غوطه‌ور شدن فولادها دو قله را در منطقه UV نشان می‌دهد که در شکل‌های مربوطه نشان داده شده است. این قله‌ها ممکن است به دلیل انتقال الکترونیکی $\pi \rightarrow \pi^*$ و $n \rightarrow \pi^*$ با ویژگی انتقال بار قابل توجه ایجاد شوند (۲۵). افزایش جذب در محلول بازدارنده قبل از غوطه‌وری و همچنین جابه‌جایی بیشینه جذب از ۲۱۱ به ۲۰۸ نانومتر، نشان‌دهنده تعامل از طریق ابر الکترونی ترکیب بازدارنده، یعنی آلکالوئیدها، می‌باشد (۲۶). مصرف بازدارنده‌های آلی موجود در محلول از طریق اتصال به سطح فلز باعث کاهش شدت جذب کل طیف UV-Vis می‌شود. شدت $\pi \rightarrow \pi^*$ / $n \rightarrow \pi^*$ قبل و بعد از غوطه‌وری یکی دیگر از تغییرات قابل توجه است. کاهش شدت $\pi \rightarrow \pi^*$ / $n \rightarrow \pi^*$ پس از غوطه‌ور شدن صفحات فولادی را می‌توان به برهم‌کنش‌های دهنده/گیرنده نسبت داد که در آن جفت الکترون‌های بازدارنده آلی با اوربیتال‌های خالی سطح فولاد پیوند تشکیل می‌دهند (۲۷، ۲۸). با این حال، تغییر قابل توجهی در شکل طیف‌ها وجود ندارد. این مشاهدات شواهد قوی از تشکیل کمپلکس بین مولکول‌های بازدارنده و سطح فولاد و تشکیل یک لایه محافظتی ممانعت‌کننده بر روی سطح فولاد را ارائه می‌دهد (۲۵).

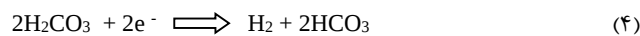
۳-۸- سازوکار خوردگی شیرین

سازوکار خوردگی شیرین را می‌توان به این صورت بیان کرد که با حل شدن CO₂ در آب، کربنیک اسید (واکنش ۱) به وجود می‌آید و با تجزیه کربنیک اسید، بی‌کربنات تشکیل می‌شود (واکنش ۲) که آن نیز تجزیه و منجر به تولید یون‌های کربنات و هیدروژن خواهد شد (واکنش ۳) (۲).



واکنش‌های الکتروشیمیایی سطح فلز عبارتند از:

الف) واکنش کاتدی واکنش احیا و واکنش احیا مستقیم اسید کربنیک



ب) واکنش انحلال آنودی آهن



۴- نتیجه گیری

با افزودن غلظت آن افزایش یافت به طوری که در غلظت ۱۰۰ ppm به ۶۸,۹٪ رسیده است و تحلیل نتایج آزمون قطبش کمترین شدت جریان خوردگی مربوط به بازدارنده در غلظت ۱۰۰ ppm به مقدار $1,4 \mu A/cm^2$ می باشد که نشان دهنده بهترین اثربخشی این عصاره است. به دلیل اینکه اختلاف بین پتانسیل خوردگی نمونه شاهد و سایر نمونه ها کمتر از ۸۵ mV است، نوع بازدارنده از نوع بازدارنده مختلط می باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، از مسئولین و کارکنان آزمایشگاه خوردگی و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز تشکر و قدردانی می کند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

به دلیل مزایای بسیار بازدارنده های سبز نسبت به بازدارنده مصنوعی استفاده از بازدارنده های سبز در صنعت نفت و گاز بسیار رو به رشد بوده از این رو ما در این تحقیق به بررسی عصاره غلاف نخود فرنگی در شرایط خوردگی شیرین پرداخته ایم که نتایج حاصل شده به طور خلاصه در ادامه آورده شده است: بهترین اثربخشی بازدارنده در غلظت ۱۰۰ ppm با ۶۹,۷۶٪ IE می باشد. به طوری که با افزودن بازدارنده و در غلظت ۱۰۰ ppm، زبری سطح (Ra) از ۸۲,۳۱۴ نانومتر به ۲۰,۶۰۷ نانومتر کاهش می یابد. با بررسی نتایج آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) و آزمون UV-VIS تشکیل کمپلکس بین مولکول های بازدارنده و سطح فولاد و تشکیل یک لایه محافظتی محرز است. تغییر قابل توجهی در شکل طیف ها وجود نداشته و جابجایی موقعیت میزان جذب نشان دهنده تشکیل کمپلکس بین دو گونه در محلول است. تحلیل نتایج آزمون امپدانس نشان می دهد که کارایی بازدارنده

۵- مراجع

- Panchal J. comprehensive review and critical data analysis on corrosion and emphasizing on green eco-friendly corrosion inhibitors for oil and gas Industries. Bio-and Tribo- corrosion. 2021;(3): 107. <https://doi.org/10.3390/app 10103389>.
- Touali Yo A. Dioxide Corrosion studies in Oil and Gas Productionre parameters [MSc thesis]. [London South Bank]: University of London South Bank.2013.
- Fontana Mar J. translated by Dr. Saatchi A. Corrosion Engineering.14th Ed. Jihad University of Isfahan Industrial Unit.1399 [In Persian].
- Asgari F. article on types of corrosion and its control methods.[Internet], 2019. Available From <http://iran-mavad.com> <http://doi.org/10.24874/PES03.01.002> [In Persian].
- Rani B, Basu BBJ. Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview. Corros. 2012;(1):1687-9325 <http://doi.org/10.1155/2012/380217>.
- Palumbo G, Dominika, Swiech, Górný M. Guar Gum as an Eco-Friendly Corrosion Inhibitor for N80 Carbon Steel under Sweet Environment in Saline Solution: Electrochemical, Surface, and Spectroscopic Studies. Int J Mol Sci. 2023;(24):7-16. <https://doi.org/10.3390/ijms241512269>.
- Ebrahim T, Gomes E, Obot IB, Khamis M, Abou Zour M. Corrosion inhibition of mild steel by Calotropis procera leaves extract in a CO₂ saturated sodium chloride solution. Adhes Sci Technol. 2016;(30):2523-2543 <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1185229>.
- Sun Z, Singh A, Xu X, Chen S. Inhibition effect of pomelo peel extract for N80 steel in 3.5 % NaCl saturated with CO₂ solution. Res Chem Intermed. 2017;(43):6719-6736 <https://doi.org/10.1007/s11164-017-3017-1>
- JNY P, Buchweishaija J, Mkayula L. Cashew nut shell liquid as an alternative corrosion inhibitor for carbon steel. Tanzania J Sci. 2001;(27):9-19. <https://doi.org/10.4314/tjs.v27i1.18332>.
- Bendahou M, Benabdallah M, Hammouti B. A study of rosemary oil as a green corrosion inhibitor for steel in 2M H₃PO₄. Pigm Resin Technol. 2006;(35):95-100 <https://doi.org/10.1108/03699420610652386>.
- Bozorg M, Shahrabi T. Using Myrtex plant extract as a steel corrosion inhibitor Hydrochloric acid solution. New Processes Mater Eng. 2016(11):109-118 <https://doi.org/20.1001.1.24233226.1396.11.4.10.8> [In Persian].
- Beniwal A, Vikram, Singh S, Sangwan V, Punia D. Chemical Constituents (Proximate, Minerals, Bioactive Compounds) of Pea [Pisum sativum (L.)] Shells. Asian J Dairy Food Res. 2023; <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-1968>.
- Nabatipour S. and Mohamadi A. Preparation of chromone-based Schiff base as corrosion inhibitor for carbon steel in Hydrochloric acid. Corros Sci Eng. 2019;(9):26 [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(86\)90066-1](https://doi.org/10.1016/0010-938X(86)90066-1) [In Persian].
- Gadow HS, Motawea MM. Investigation of the corrosion inhibition of carbon steel in Hydrochloric acid solution by using ginger roots extract. Royal Soc Chem. 2017;(7):24576-24583 <https://doi.org/10.1039/C6RA28636D>.
- Singh A, Lin Y, Ebenso E, Liu W. Gingko biloba fruit extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for J55 steel in CO₂ saturated 3.5 % NaCl solution. Ind Eng Chem. 2015;(24): 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.034>.
- Bhuvaneswari T, Vasantha V, Jeyaprabha C. Pongamia pinnata as a green corrosion inhibitor for mild steel in 1N sulfuric acid medium. Silicon. 2018;10(5):1793-1807. 10.1007/s12633-017-9673-3.
- Rabizadeh T, Khameneh Asl S. Casein as a natural protein to inhibit the corrosion of mild steel in HCl solution. Mol Liq. 2019;(276):694-704. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.162> [In Persian].
- Brug G, Vanden Eeden ALG, Sluyters JH. The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element. Electroanal Chem Interfac Electrochem. 1984;(176):275-295. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(84\)80324-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(84)80324-1).
- Singh A, Ansari K, Chauhan DS, Quarashi MA. Comprehensive investigation of steel corrosion inhibition at macro/micro level by ecofriendly green corrosion inhibitor in 15 % HCl medium. Colloid Interface Sci. 2020;(560):225-

236. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.040>.
20. Eyu GD, Will G, Dekkers W, MacLeod J. The synergistic effect of iodide and sodium nitrite on the corrosion inhibition of mild steel in bicarbonate-chloride solution. *Mater*. 2016; (9):868-882 <https://doi.org/10.3390/ma9110868>.
21. Ezuber H., Alshater A. Effect of surface finish on the pitting corrosion behavior of sensitized aisi 304 austenitic stainless steel alloys in 3.5 % NaCl solutions. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2018;(54):73-80. <https://doi.org/10.3103/S1068375518010039>.
22. Feng L, Zhang S, Qiang Y, Xu S, Tan B, Chen S. The synergistic corrosion inhibition study of different chain lengthsonic liquids as green inhibitors for X70 steel in acidic medium. *Mater Chem Phys*. 2018;(215):29-241. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.054>.
23. Satapathy AK, Gunasekaran G. Corrosion inhibition by Justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution. *Corros Sci*. 2009;(51):2848-2853 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.016>
24. Foyisal Ahmad AKM, Hossain N. Deteminig corrosion efficiency of a green solution prepared from extract of dalbergia sissoo leaves in H₂SO₄ and its characterization. *IUBAT Review*. 2023;83-84 <https://doi.org/10.3329/iubatr.v6i1.67232>
25. Singh A, Lin Y, Ebenso E, Liu W, Huang B. Determination of corrosion inhibition efficiency using HPHT autoclave by Gingko biloba on carbon steels in 3.5 % NaCl solution saturated with CO₂. *Electrochem Sci*. 2014;(9):5993-6005. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)10864-9](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)10864-9).
26. Arockia Selvi J, Arthanareeswari M, Pushpamalini T, Rajendran S, Vignesh T. Effectiveness of Vinca rosea leaf extract as corrosion inhibitor for mild steel in 1 N HCl medium investigated by adsorption and electrochemical studies. *Int. J. Corros. Scale Inhib*. 2020;(4):1438-1439. <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-4-15>.
27. Majd MT, Shahrabi T, Ramezanzadeh B. Production of an eco-friendly anti-corrosion ceramic base nanostructured hybrid-film based on Nd (III)-C₇H₆N₂ on the mild steel surface. electrochemical and surface studies. *Constr Build Mater*. 2019;(221):456-468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.122>.
28. Froment F, Tournié A, Colomban P. Raman identification of natural red to yellow pigments: ochre and iron-containing ores. *Raman Spectrosc*. 2008;(39): 560-568 <https://doi.org/10.1002/jrs.1858>.
29. Faisal M, Saeed A, Shahzad D, Abbas N, Ali Larik F, Ali Channar P, et al. General properties and comparison of the corrosion inhibition efficiencies of the triazole derivatives for mild steel. *Corros*. 2018;(36):507-545 <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0006>.
30. Brycki B.E., Kowalczyk, I.H., Szulc, A., Kaczerewska, O., Pakiet, M. Organic corrosion inhibitors. *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. InTech;2018.3-33. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040174>.
31. Ostovari A, Hoseinie SM, Peikari M, Shadzadeh SR, Hashemi SJ. Corrosion inhibition of mild steel in 1M HCl solution by henna extract: a comparative study of the inhibition by henna and its constituents (Lawson, Gallic acid, a-d-Glucose and Tannic acid). *Corros Sci*. 2009;(51):1935-1949. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.024>.
32. Rahim AA, Kassim J. 2010. Recent development of vegetal tannins in corrosion protection of iron and steel. *Recent Patents Mater Sci*. 100.2008;(3):223-231. <https://doi.org/10.2174/1874465610801030223>.
33. Oguzie EE. Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel. *Corros Sci*. 2008;(50):2993-2998. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.004>.
34. Wei H, Heidarshenas B, Zhou L, Hussain G, Li Q, Ostrikov, K. Green inhibitors for steel corrosion in acidic environment: state of art. *Mater Today Sustainability*. 2020;(10): 100044. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100044>
35. Hanini K, Merzoug B, Boudiba S, Selatnia I, Laouer H, Akkal S. Influence of different polyphenol extracts of *Taxus baccata* on the corrosion process and their effect as additives in electrodeposition. *Sustainable Chem Pharm* 2019;(14): 100189. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100189>.
36. Marshakov I. Anodic dissolution and selective corrosion of alloys. *Prot Met*. 2002.38(2):118-123. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1014908930959>.
37. Bentiss F, Lebrini M, Lagrenée M. Thermodynamic characterization of metal dissolution and inhibitor adsorption processes in mild steel/2,5-Bis(n-Thienyl)-1,3,4-Thiadiazoles/hydrochloric acid system. *Corros Sci*. 2005; (47):2915-2931. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.034>.

How to cite this article:

kargozari A, khameneh asl Sh. Investigating the effect of pea pods as a green inhibitor on sweet corrosion of low carbon steel. *J Color Sci Tech*. 2025;18(4):337-353. <https://doi.org/10.30509/JCST.2025.167445.1250> [In Persian].