

مقاله پذیرفته شده

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

نویسندگان: اشکان کارگذاری، شاهین خامنه اصل

JCST-2501-1250

شماره مقاله:

۱۴۰۳-۱۰-۲۳

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴-۰۲-۳۰

تاریخ اصلاح:

۱۴۰۴-۰۳-۱۱

تاریخ پذیرش:

این فایل pdf مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکت مقاله توسط دفتر نشریه علوم و فناوری رنگ تهیه شده و قبل از چاپ برای ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

Accepted Manuscript

Title: Investigating the effect of pea pods as a green inhibitor on sweet corrosion of low carbon steel

Authors: Ashkan kargozari , Shahin khameneh asl

To appear in: Journal of Color Science and Technology

Receives date: 12-01-2025

Revises date: 20-05-2025

Accepted date: 01-06-2025

Please cite this article as:

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): JCST-2501-1250.

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form.



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

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

چکیده:

خوردگی شیرین نوعی از خوردگی در صنعت نفت است که در آن گاز CO₂ با آب واکنش داده و اسید کربنیک 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 اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. روشهای الکتروشیمیایی از قبیل آزمون پلاریزاسیون و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است. 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 ی تشکیل یک لایه محافظ روی سطح نمونه ها است و عملکرد عصاره به صورت یک بازدارنده مختلط است.

کلمات کلیدی: بازدارنده های سبز خوردگی، خوردگی شیرین، خواص الکتروشیمیایی، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون

Investigating the effect of pea pods as a green inhibitor on sweet corrosion of low carbon steel

Ashkan kargozari, Shahin khameneh asl

Abstract:

Sweet corrosion is a type of corrosion in the oil industry in which CO₂ 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. In this study, 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) was investigated in a 3.5 wt% NaCl solution saturated with CO₂ at different concentrations. Electrochemical methods such as polarization test 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 surface of the samples and the function of the extract as a mixed inhibitor.

Keywords: green corrosion inhibitors, sweet corrosion, electrochemical properties, electrochemical impedance spectroscopy, polarization

۱- مقدمه:

ازدیرباز خوردگی مشکل اصلی در صنعت نفت و گاز بوده است. دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن از علل اصلی حملات خوردگی و تخریب خطوط لوله های نفت و گاز هستند. خوردگی ناشی از CO₂ خوردگی شیرین^۱ و خوردگی ناشی از H₂S خوردگی اسیدی (ترش)^۲ نامیده شده است (۱).

گاز کربن دی اکسید به خودی خود در سیستم 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 اسید کربنیک تشکیل می دهد و آب را اسیدی می کند. (۲).

^۱Sweet corrosion

^۲Sour corrosion

مقاله پذیرفته شده

برخی از روش ها به طور گستره برای کنترل خوردگی استفاده می شود؛ مانند پوشش دادن، حفاظت کاتدی و انتخاب ماده مقاوم در برابر خوردگی. در مورد فولاد های 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 دوستدار 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 ... 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 جهت جلوگیری از خوردگی به سالهای گذشته برمی گردد.

گائتانو پالمبو^۴ و همکاران (۶) به بررسی عصاره گوارگام^۴ روی خوردگی شیرین فولاد N80 در دمای ۲۵ درجه سلسیوس پرداختند. نتایج حاصل از AFM نشان داد که با افزودن بازدارنده با غلظت ۴۰۰ ppm مقدار زبری (Ra) از ۹۷/۴۱ نانومتر به ۵/۶۲ نانومتر کاهش یافت و نتایج حاصل از پلاریزاسیون نشان دهنده این بود که با افزودن بازدارنده با غلظت ۳۰۰ ppm جریان خوردگی از $27/42 \mu A/cm^2$ به $3/70 \mu A/cm^2$ کاهش یافت و بالاترین اثر بخشی مربوط به غلظت ۳۰۰ ppm است. ابراهیم و همکاران (۷) نشان دادند که عصاره برگ استبرق^۵ یک بازدارنده موثر برای فولاد ملایم در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ است. اثربخشی این بازدارنده در پنج غلظت مختلف (۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ ppm) مقایسه شد. محافظت عصاره این گیاه نیز از طریق EIS بررسی شد. مشاهده شد که افزایش غلظت بازدارنده، ظرفیت دو لایه را کاهش داد و مقادیر مقاومت انتقال بار را افزایش داد. در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد، مقاومت انتقال بار از ۱۳۸،۶۰ اهم سانتی متر مربع در محلول بدون بازدارنده به ۱۶۱۱ اهم سانتی متر مربع در محلول حاوی بازدارنده ۲۰۰ ppm افزایش یافت. این به تشکیل یک فیلم محافظ نسبت داده شد و حداکثر راندمان بازداری محاسبه شده ۹۲٪ مربوط به غلظت ۲۰۰ ppm در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد بود که به کاهش نرخ خوردگی از $4/463 mm y^{-1}$ در محلول بدون بازدارنده به $1/325 mm y^{-1}$ در محلول ۲۰۰ ppm منجر شد. سان^۶ و همکاران (۸) تأثیر افزودن عصاره پوست دارابی را بر رفتار خوردگی فولاد کربنی N80 در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ مورد تحقیق قرار دادند. چندین غلظت از بازدارنده در محدوده (۴۰۰-۱۰۰ ppm) آزمایش شد. منحنی های پلاریزاسیون نشان داد که با افزایش غلظت بازدارنده، چگالی جریان خوردگی کاهش می یابد. نتایج پلاریزاسیون نشان داد 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 $1 mm y^{-1}$ به $1/845 CR$ و $0/124 CR$ کاهش یافت و نشان دهنده بازده ۹۳ درصد برای محلول حاوی بازدارنده با غلظت ۴۰۰ ppm بود. فیلیپ^۹ اثر عصاره پوسته سیب زمینی را بر خوردگی فولاد در محیط دی اکسید کربن با استفاده از روش امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون مورد بررسی قرار داد. تحقیقات نشان داد که افزایش غلظت عصاره باعث کاهش خوردگی می شود و نوع بازدارندگی

^۴Gaetano Palumbo

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

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

^۶Sun

^۷Philip

از مدل مخلوط (آندی - کاتدی) می باشد. بندها و همکارانش^(۱۰) به بررسی اثر بازدارندگی رزماری بر روی خوردگی فولاد در محیط فسفوریک اسید در دماهای مختلف پرداختند. نتایج حاصل از پلاریزاسیون نشان داد که رزماری بعنوان ممانعت کننده کاتدی عمل می کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت ماده بازده بازدارندگی افزایش می یابد، ولی افزایش دما باعث کاهش بازدارندگی شده است. منصور بزرگ و همکارانش^(۱۱) از عصاره گیاه میرتکس بعنوان بازدارنده خوردگی نمونه های فولاد در محلول ۱ مولار اسید کلریدریک استفاده کردند این آزمایشها بعد از یک ساعت پایداری نمونه ها در محلول انجام شده است. با افزایش غلظت بازدارنده ، افزایش مقاومت پلاریزاسیونی و در پی آن افزایش درصد بازدارندگی است.

استان آذربایجان شرقی، دومین تولید کننده بزرگ نخود فرنگی در ایران است. شهرستان های مراغه و هشتگرد 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 بوده بخش غلاف عاری از دانه سبز است که می توان آن را ضایعات نخودفرنگی در نظر گرفت .

در این مقاله به بررسی اثرات عصاره غلاف نخودفرنگی بعنوان بازدارنده سبز بر خوردگی جدید فولاد کربنی ساده در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های ۵۰ ، ۱۰۰ ، ۲۵۰ و ۵۰۰ ppm و مقایسه آن با خوردگی فولاد در همان محیط در غیاب بازدارنده پرداخته می شود.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- آماده سازی بازدارنده

روش تهیه عصاره غلاف نخودفرنگی : نخود فرنگی های تهیه شده از مارکت ابتدا شستشو گردیده و غلاف آنها جدا شد و پس از خشک کردن در سایه کوبیده شده، پودر شدند، سپس ۱۰ گرم از پودر در ۵۰ سی سی استون (شرکت شیمی سنتر باخلوص ۹۹/۹) ریخته شده و به مدت یک ساعت شیک و سپس به طور کامل در مقابل باد خشک می گردد و سپس مقدار آن اندازه گیری می شود . عصاره تهیه شده در غلظت های ۵۰ ppm ، ۱۰۰ ppm ، ۲۵۰ ppm و ۵۰۰ ppm به محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ افزوده شد. نمونه های فولادی از پیش آماده شده در این محلول ها به مدت ۲۴ ساعت غوطه ور شدند. نمونه ها پس از غوطه وری در آورده شده و در دسیکاتور نگه داشته شدند تا مشخصه یابی ها صورت گیرند.

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

مقادیر برحسب درصدوزنی (wt.%)

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

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی موجود (میلی گرم / 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

۲-۱-۲- آماده سازی نمونه

نمونه فولادی API 5L X42 از لوله ۱۲ اینچی (تهیه شده از شرکت گاز استان آذربایجان شرقی) با ابعاد حدودی $10 \times 0/4 \text{ mm}$ × ۱۴ با استفاده از دستگاه فرز برش داده و سپس به قطعات کوچکتر به ابعاد حدودی $10 \times 20 \times 4 \text{ mm}$ با استفاده از دستگاه وایرکات تقسیم شد.

نمونه های فولادی آماده شده توسط کاغذ سمباده از جنس کاربید سیلیکون (به ترتیب ۸۰، ۱۸۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰) ساییده شدند. در ادامه به منظور پاک سازی سطوح قطعات از آلودگی ها، صفحات در حمام اولتراسونیک حاوی محلول استون تجاری چربی گیری شده و با آب دیونیزه شستشو داده شدند.

۲-۱-۳- آماده سازی الکترولیت

برای تهیه الکترولیت خورنده به ترتیب مراحل زیر انجام گردید:

تهیه محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl: مقدار معینی آب مقطر در سل شیشه ای ریخته شده و معادل ۳/۵ درصد وزنی به آن، نمک طعام (NaCl) اضافه می شود. سپس درپوش سل بسته شده به منظور آب بند بودن آن از چسب سیلیکونی در اطراف درپوش و پایین آن استفاده شد.

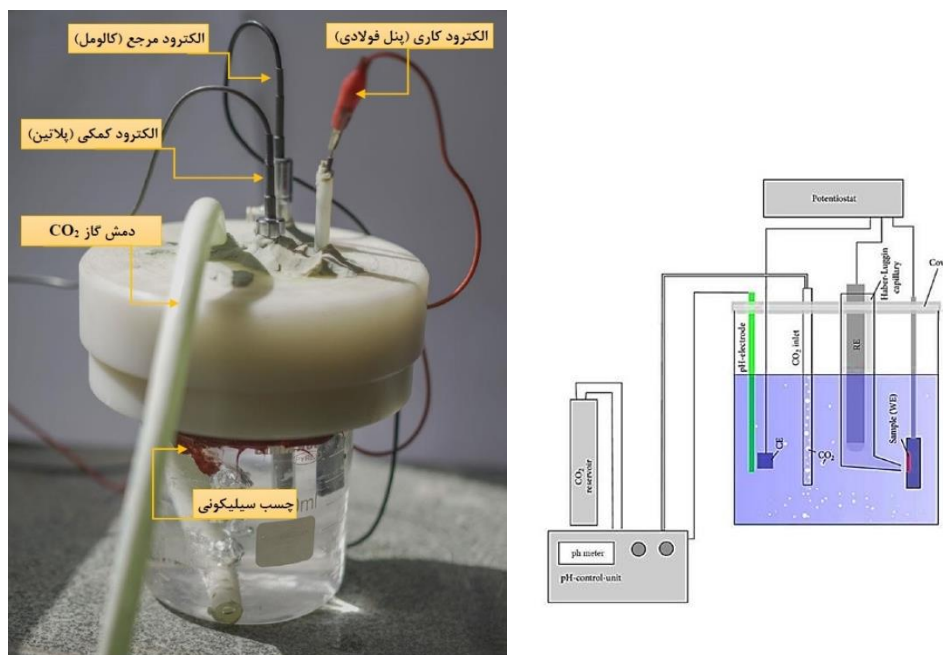
چند سوراخ ریز در دهانه شیلنگ (به منظور ایجادهای حباب های مناسب و همگن و همچنین اشباع سیستم توسط گاز CO_2) ایجاد گردید و گاز CO_2 تحت فشار، ۲ بار به مدت ۱ ساعت به مذکور محلول دمش داده شد. پس از یک ساعت تزریق گاز دی اکسید کربن، pH تقریباً روی عدد ۴/۳ (هم در حضور بازدارنده و هم در غیاب آن) ثابت می ماند که بیانگر اشباع شدن محلول از گاز اسیدی است. قابل ذکر است تمامی آزمایش ها در دمای محیط و pH محیط (۴/۳) صورت گرفت.

۲-۲- روشها

۲-۲-۱- اندازه گیری های الکتروشیمیایی

میزان مقاومت به خوردگی و همچنین سازوکار بازدارنده خوردگی لایه های تشکیل شده به ترتیب توسط آنالیزهای امپدانس و پلاریزاسیون با استفاده از دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات (ZIVE SP1 Potentiostat (Galvanostat / EIS مورد بررسی قرار گرفتند، سپس منحنی های حاصل توسط نرم افزار Origin pro 2022 و Zview و Exel رسم شد. این آنالیز ها در یک مجموعه تجهیزات الکتروشیمیایی که یک سیستم سه الکترودی است، تهیه شد.

طرح وارده این مجموعه تجهیزات در شکل ۱ نشان داده شده است، به طوری که CE الکترود کانترا یا کمکی از جنس پلاتین، RE الکترود رفرنس یا مرجع و WE الکترود کاری یا همان نمونه های 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 آزمایش های انجام شده برابر با 1 mV/s بود و محدوده نرخ روبش شده بین 500 mV - تا 500 mV + نسبت به پتانسیل مدار باز نمونه ها بوده است. سطح در تماس با الکترولیت نمونه ها برابر با 1 cm^2 سانتی متر مربع بوده است.



شکل ۱. طرح واره و تصویری از مجموعه تجهیزات مجهز شده برای آنالیزهای الکتروشیمیایی.
Figure 1. Schematic and image of the set of equipment equipped for electrochemical analysis

۳-۲- آنالیز سطح

۳-۲-۱- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

ریزساختار لایه های ایجاد شده روی نمونه های مختلف با SEM مجهز به EDS مدل Tescan Mira 3 ساخت کشور چک، مورد آنالیز قرار گرفت. به دلیل ماهیت اکسیدی و عایقی فیلم های سطحی تشکیل شده، نمونه های 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 (XRD)

ترکیب شیمیایی فیلم تشکیل شده بر روی سطح فولاد توسط آنالیز XRD (طیف سنج پراش اشعه ایکس) بررسی شد نمودارهایی حاصل شد. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه ها با استفاده از دستگاه Bouvestnik و مدل DRON-8 مجهز به تولیدکننده CuK α با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم در بازه ۱۰ تا ۸۰ درجه و با سرعت ۰/۰۵-۰/۰۴ درجه بر ثانیه به دست آمد. ساختار کریستالی نمونه ها بر اساس الگوی XRD با استفاده از نرم افزار HighScore plus آنالیز شد.

۳-۲-۳- میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

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

۳-۲-۴- طیف سنجی مادون قرمز (FTIR-ATR)

^۱Scanning Electron Microscope

^۲X-ray Diffraction

^۳Atomic Force Microscope

^۴Fourier transform infrared - Attenuated Total Reflection

گروه های عاملی تشکیل شده بر روی سطح نمونه های فولادی مورد نظر توسط آنالیز (FTIR- ATR) (طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه) مشخص گردید.

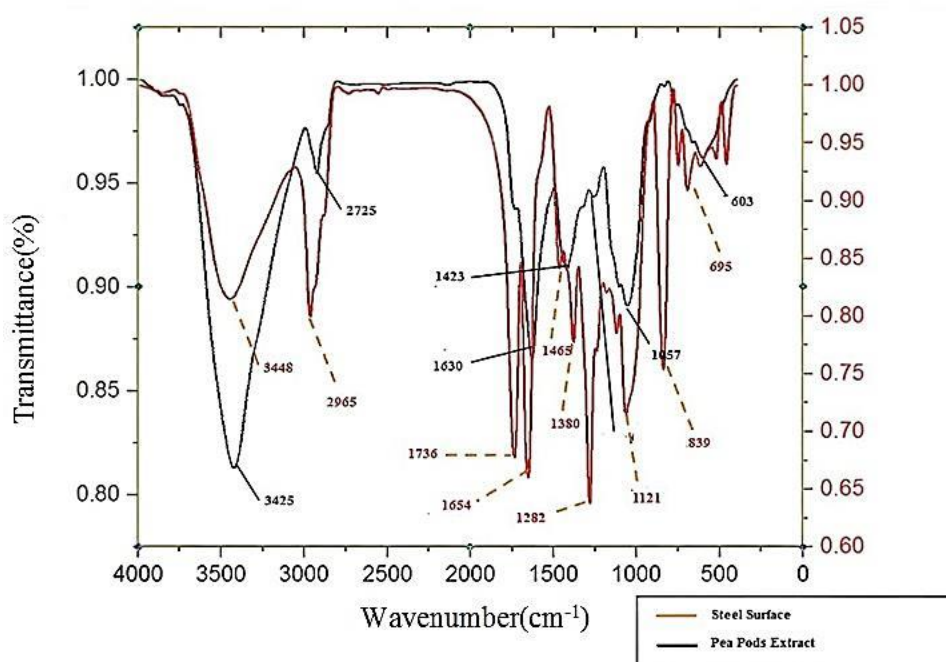
۲-۳-۵- ماوراء بنفش قابل مشاهده

شدت جذب/دفع ساختارهای آلی و حضور گروه های معطر توسط آنالیز UV-Visible (اسپکتروفتومتر) ارزیابی شد. بدین منظور آزمون قبل و بعد غوطه وری صفحات فولادی، از الکترولیت غوطه ور گرفته شد و نمودارهای هر حالت رسم شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی عصاره گیاهی

حضور گروه های عاملی مختلف بر روی سطح فولاد توسط آنالیز ATR بررسی شد. طیف حاصل در شکل ۲ ارائه شده است. گروه های عاملی یافته شده در طول موج های مختلف در عصاره غلاف نخود فرنگی توسط FTIR و سطح نمونه غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ توسط ATR در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار FTIR/ATR گرفته شده از عصاره و سطح فولاد غوطه ور 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. گروه های عاملی یافته شده در طول موج های مختلف بازدارنده و نمونه های فولادی غوطه ور 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	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	1626	=NOH(OH stretch)
Amides	RCONH ₂		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 -

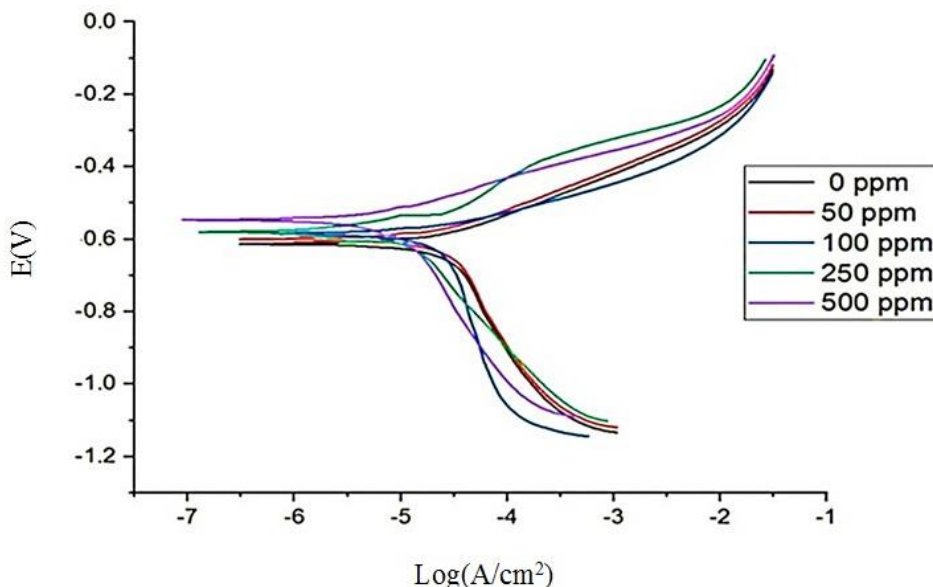
Alkyl halides	R-F	1225	C-F stretch
Misc.	N-O amine oxide		N-O aromatic
Carboxylic acids	RCO-OH		C-O stretch
Esters	RCOOR		C-O stretch
Alkyl halides	CH ₂ X		C-H wag (-CH ₂ X)
Alkyl halides	R-F	1105	C-F stretch
Alcohols	R ₂ CHOH		C-O stretch
Ethers	R-O-R		C-O stretch
Misc.	C=S thiocarbonyl		C-S thiocarbonyl
Carboxylic acids	RCO-OH		C-O stretch
Esters	RCOOR	666	C-O stretch
Alkynes	RC#CH		#C-H bend

با توجه به شکل ۲ پیک عریض در 3425 cm^{-1} به گروه های OH نسبت داده می شود که به صورت فیزیکی روی سطح صفحات فولاد کم کربن جذب شده اند (۶). پیک مشاهده شده در 2965 cm^{-1} به کشش C-H مربوط به آلیفاتیک است و پیک مشاهده شده در 1646 cm^{-1} مربوط به C=O است (۱۳) و همچنین پیک مشاهده شده در 1422 cm^{-1} مربوط به C=C است (۱۴). پیک های مشاهده شده از ۴۹۰ تا 700 cm^{-1} به ارتعاش کششی $\equiv \text{C-H}$ در اجزای مبتنی بر فنولی اختصاص داده می شوند. سایر قله های مشخصه مربوط به خم شدن و کشش C-O است. با توجه به نتایج حضور گروه های عاملی از خانواده های الکل ها، فنول ها، آلکان ها، کربوکسیلیک اسیدها، آلکن ها، آروماتیک ها، استرها، آلکیل هالیدها و آلکین ها که شامل ارتعاشات کششی O-H، C-Cl، ArC-C، C-O، CH، H در کنار پیوندهای H-bonded ArO-H، Dimer OHCH، نتایج نشان دهنده جذب بازدارنده بر روی سطح و تشکیل لایه محافظ هست (۱۵).

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

۲-۳- آزمون پلاریزاسیون

به منظور بررسی سازوکار بازدارنده ها از آزمون پلاریزاسیون استفاده شد.



شکل ۳. نمودارهای پلاریزاسیون گرفته شده از سطح فولاد غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف عصاره غلاف نخودفرنگی به عنوان بازدارنده بعد از ۳۰ دقیقه غوطه وری

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 .

جدول ۴: مشخصه های الکتروشیمیایی به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون

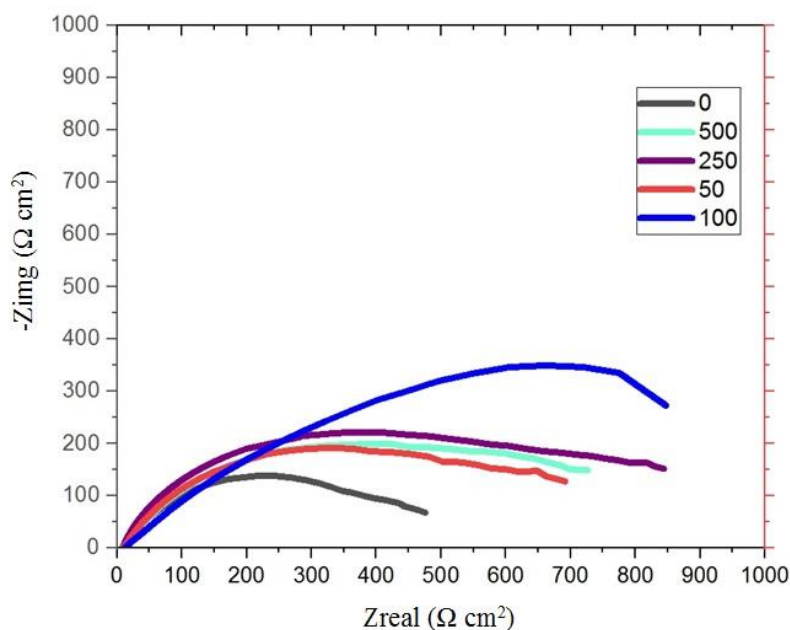
Table 4: Electrochemical characteristics obtained from the polarization test

IE(%)	bc (mV dec ⁻¹)	ba (mV dec ⁻¹)	i _{corr} (μA cm ⁻²)	E _{corr} (mV)	غلظت بازدارنده (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

منحنی های پلاریزاسیون در شکل ۳ ارائه شده است. به منظور مقایسه بهتر بین نمونه های مختلف، پارامترهای پلاریزاسیون استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این مقادیر در جدول ۴ ارائه شده است. به طوریکه E_{corr} (پتانسیل خوردگی)، i_{corr} (چگالی جریان خوردگی)، bc- (شیب شاخه کاتدی) و ba (شیب شاخه آندی) است. با مقایسه بین پارامترها مشاهده شد که بیشترین شدت جریان خوردگی (i_{corr}=4/63 μA/cm²) در نمونه شاهد است که نشان دهنده شرایط خوردگی شدید در این نمونه به دلیل نبود محافظت از سطح است.

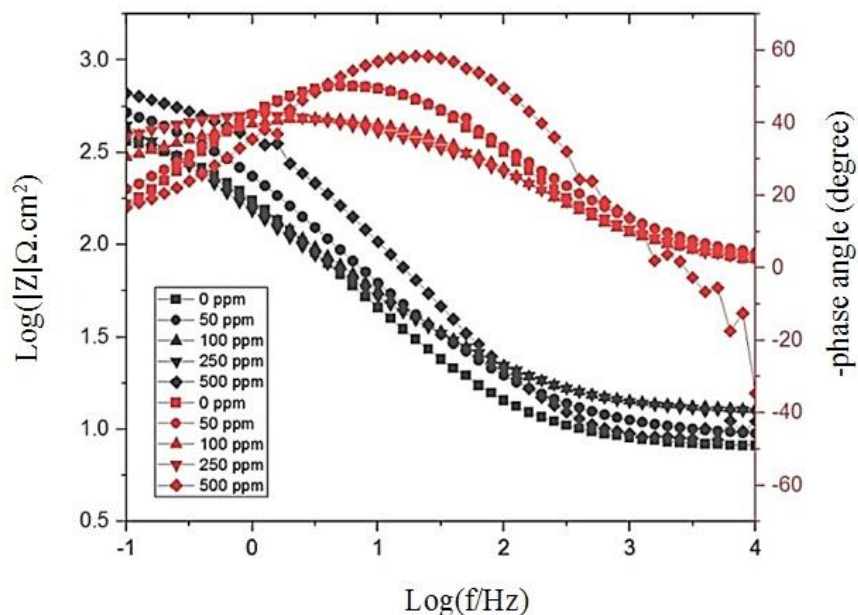
۳-۳- آزمون امپدانس

به منظور بررسی مقاومت نمونه های فولادی غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف بازدارنده عصاره غلاف نخودفرنگی، از آزمون امپدانس استفاده شد.



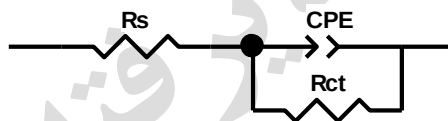
شکل ۴. نمودارهای نایکوئیست گرفته شده از سطح فولاد غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غیاب بازدارنده و غلظت های مختلف بازدارنده عصاره غلاف نخودفرنگی

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 غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غیاب بازدارنده و غلظت های 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 سیستم بازدارندگی عصاره این پژوهش

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

جدول ۵. پارامترهای امپدانس حاصل از نمونه های فولاد غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های 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 (%)	غلظت بازدارنده (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

نمودارهای نایکوئیست و باد فاز/ مدول در غیاب و حضور بازدارنده ها در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده اند. مدار الکتریکی مرتبط 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 ایده آل (برای سطوح هموار ، همگن و بدون تخلخل) برابر یک است . CPE ، خازن ایده آل را در قالب n و Y₀ معرفی می کند (۱۸). بازده بازدارنده از اندازه گیری های آزمایشگاهی به عنوان نرخ خوردگی نسبی با بازدارنده

مقاله پذیرفته شده

و بدون بازدارنده تعریف می شود که از رابطه ۱ بدست می آید (۱۹).

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

(۱)

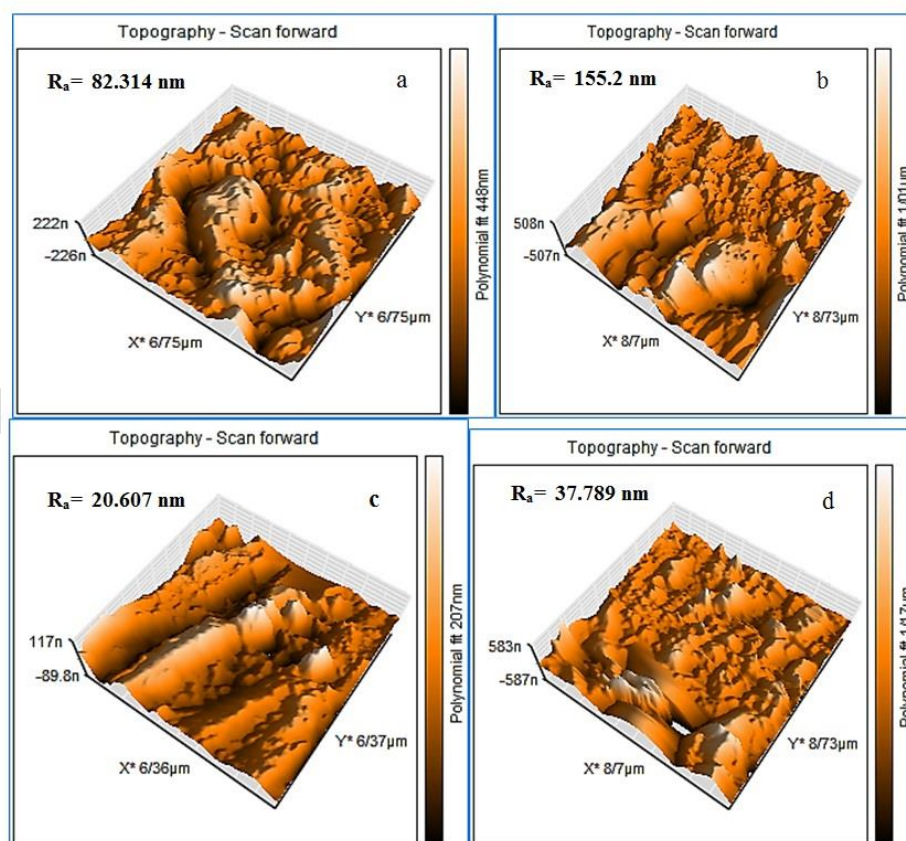
طبق نتایج مندرج در جدول ۵ بیشترین بازده عصاره غلاف در غلظت ۱۰۰ ppm مشاهده شد که برابر است با ۶۸/۹ درصد و پس از این مقدار غلظت، مقاومت به خوردگی کاهش پیدا کرده است.

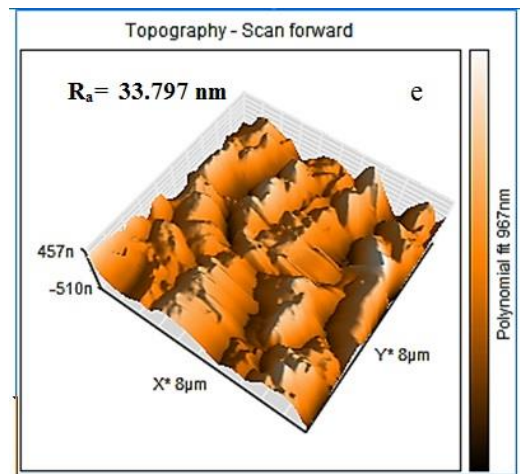
با توجه به داده های جدول ۵ می توان نتیجه گرفت که کاهش در ظرفیت لایه دوگانه و افزایش غلظت عصاره غلاف نخودفرنگی مبنی بر جذب این بازدارنده به سطح فلز و حضور آن در لایه دوگانه است. و افزایش فاکتور n نشان دهنده کاهش ناهمگنی سطح به علت جذب مولکول های بازدارنده بر روی نقاط فعال سطح است (۱۳). بیشینه مقدارهای n مربوط به غلظت ۱۰۰ ppm برای عصاره غلاف است.

با توجه به شکل ۱۰ افزایش قطر نیم دایره در غلظت های بالاتر جذب مولکول های بازدارنده و تشکیل لایه محافظ روی مناطق فعال سطح فلز نشان می دهد (۲۰، ۲۱). علاوه بر این، افزایش مقدار R_{ct} در نتیجه افزایش غلظت عصاره بازدارنده در محلول خورنده بیانگر جذب مولکول های بازدارنده و افزایش مقاومت سطح فلز است. با افزایش غلظت بازدارنده مقادیر عددی Y_0 روند کاهشی داشته است که این رفتار، جایگزینی مولکول های آب توسط مولکول های بازدارنده را نشان می دهد (۲۲).

۳-۴-زبری سطح

زبری سطح فولاد در محیط های مختلف توسط آنالیز میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) بررسی شد. زبری با معیار R_a (میانگین زبری) نشان داده شده است.





شکل ۷. توپوگرافی برای نمونه های فولادی غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف بازدارنده

(a) ۰ ppm (b) ۵۰ ppm (c) ۱۰۰ ppm (d) ۲۵۰ ppm (e) ۵۰۰ ppm

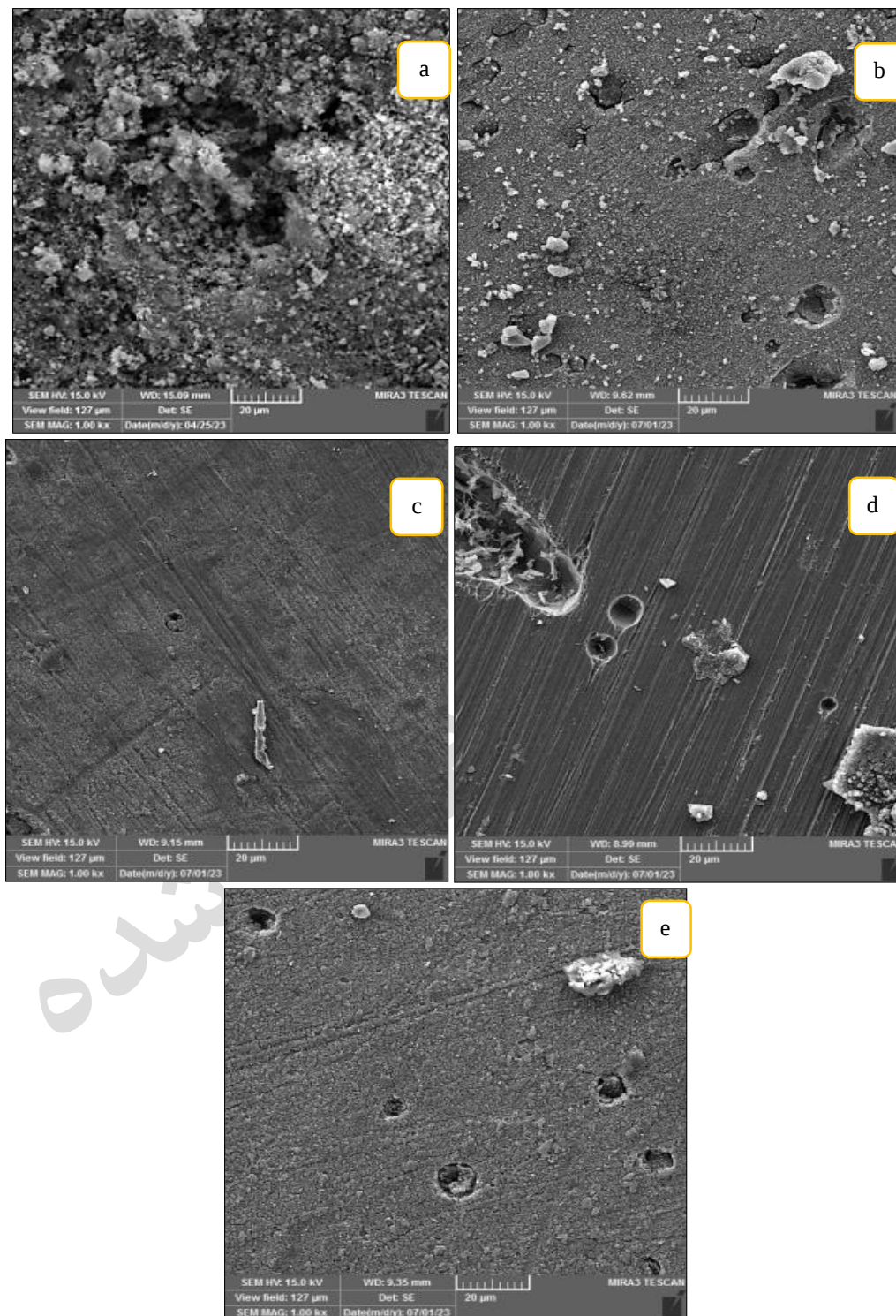
Figure 7. Topography for steel samples immersed in 3.5 wt% NaCl solution saturated with CO₂ in different inhibitor a) 0 ppm b) 50 ppm, c) 100 ppm, d) 250 ppm, e) 500 ppm concentrations

با غوطه وری نمونه های فولادی در محلول خورنده بدون بازدارنده، به دلیل واکنش های آندی و کاتدی باعث ایجاد دره ها و بلندی هایی روی سطح نمونه شد که نشان دهنده تشکیل محصولات خوردگی زیر است. ریزساختارهای دو بعدی و سه بعدی حاصل از آنالیز در شکل ۷ آورده شده است. طبق نتایج Ra سطح در الکترولیت با غلظت ppm ، ۰ ، 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 نشان دهنده 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- مورفولوژی و ریزساختار سطح

برای بررسی ریزساختار سطح فولاد پس از غوطه وری در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف ۰ ppm ، ۵۰ ppm ، ۱۰۰ ppm ، ۲۵۰ ppm و ۵۰۰ ppm از آنالیز SEM استفاده شده و همچنین به منظور بررسی تغییرات در ترکیب شیمیایی سطح فولاد در محیط های مختلف، آنالیز EDS گرفته شد.



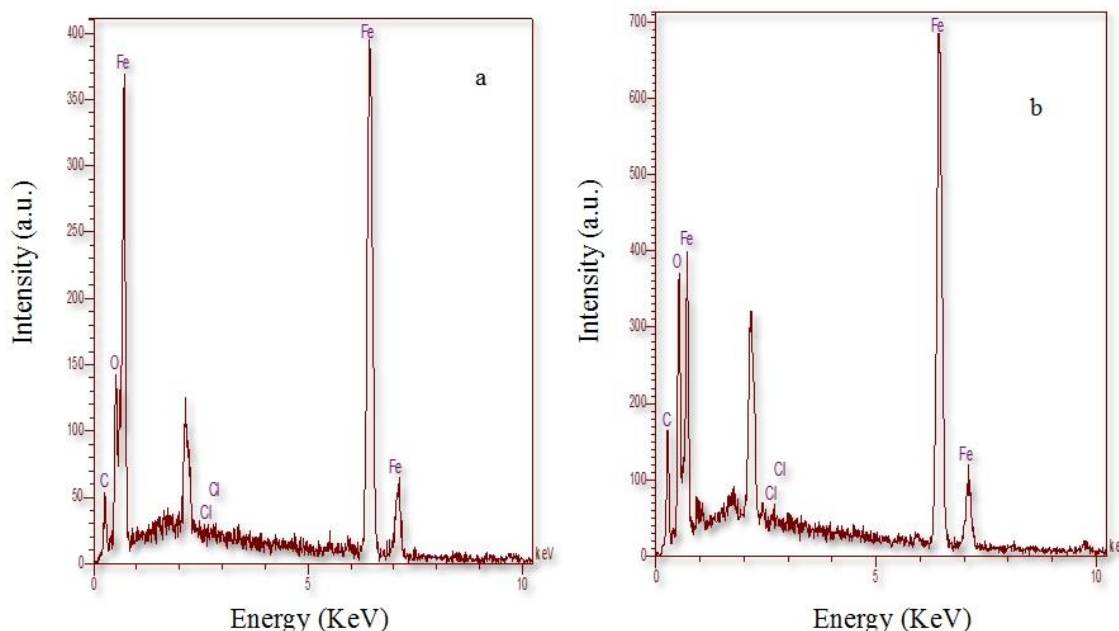
شکل ۸. مورفولوژی سطح نمونه های فولادی غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف بازدارنده (a) ۰ ppm، (b) ۵۰ ppm (c) ۱۰۰ ppm (d) ۲۵۰ ppm (e) ۵۰۰ ppm

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, e) 500 ppm

مقاله پذیرفته شده

ریزننگاره های حاصله در شکل ۸ نشان داده شده اند. در سطح نمونه (a) حفره ها و ترک هایی وجود دارد و سطح آن دارای آسیب های 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 صاف تر شد (۲۴).

در غلظت ۱۰۰ ppm بازدارنده عصاره غلاف نخود فرنگی ، سطح صاف ترین حالت خود را دارد. اما به نظر می رسد در غلظت ۵۰۰ ppm راندمان بازدارنده بعلت لخته شدن افت کرده است .



شکل ۹. نمودارهای حاصل از طیف سنجی فلورسانس انرژی پرتو ایکس برای نمونه های فولادی غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف بازدارنده (a) ۰ ppm (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, b) 100 ppm

جدول ۶. نتایج حاصل از طیف سنجی فلورسانس انرژی پرتو ایکس برای نمونه های فولادی غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های 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

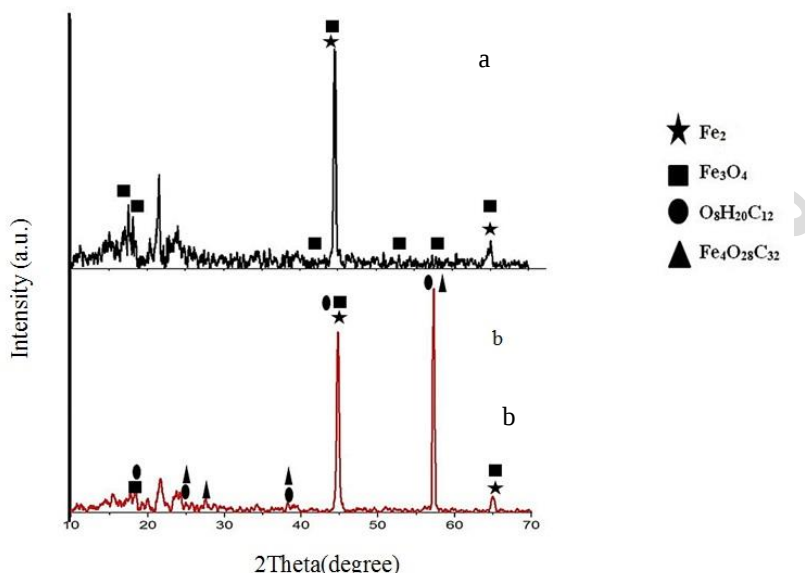
Fe (wt%)	C (wt%)	O (wt%)	Cl (wt%)	غلظت بازدارنده (ppm)
80.82	9.84	9.18	0.16	0
88.48	8.49	2.72	0.31	50
71.69	15.63	12.53	0.15	100
82.06	10.91	6.87	0.15	250
82.37	12.22	5.26	0.14	500

نتایج طیف های EDS برای عصاره های غلاف ، غلاف و پوسته بیرونی نخود فرنگی در شکل ۹ و جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به بررسی نتایج طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه های فولادی غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غلظت های مختلف، می توان نتیجه گرفت :

برای عصاره غلاف نخود فرنگی در غلظت ۱۰۰ ppm، نمونه (c) بیشترین مقدار کربن را دارا است که می تواند به دلیل تشکیل فیلم محافظ باشد (۱۶). قابل ذکر است اندازه گیری دقیق کربن با این آنالیز امکان پذیر 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 غوطه ور در محلول خورنده حاوی بازدارنده در غلظت ۱۰۰ ppm از آنالیز XRD استفاده شد. برای اطمینان از تشکیل فازهای مدنظر و شناسایی ساختار کریستالی آنها از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد.



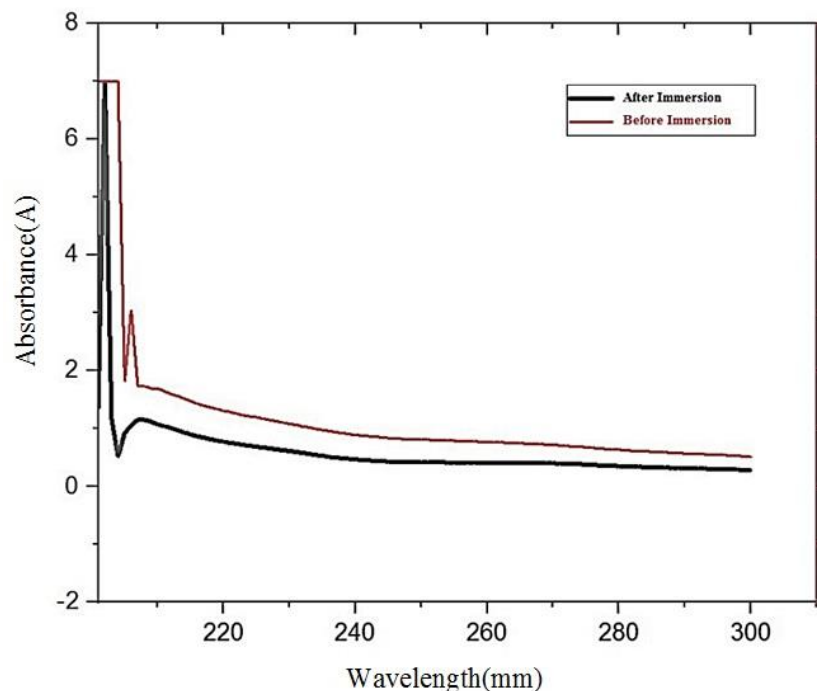
شکل ۱۰. الگوی حاصل از آزمون XRD گرفته شده از سطح فولاد غوطه ور در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ (الف) در غیاب بازدارنده و (ب) حاوی ۱۰۰ ppm بازدارنده عصاره نخودفرنگی

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 containing 100 ppm of pea pod extract inhibitor (b)

مطابق شکل ۱۰ الگوی پراش اشعه ایکس نمونه الف نشان می دهد که پیک های ظاهر شده در زوایای ۱۸°، ۴۵°، ۵۲°، ۵۵° و ۶۵° به طور کلی متعلق به فازهای Fe₃O₄ با شماره کارت ۲۰۲۷-۹۰۰-۹۶ و ساختار کریستالی اورترومبیک و فاز Fe₂ به شماره کارت ۳۴۷۵-۹۰۱-۹۶ با ساختار کیوبیک است. پیک های مربوط به هر کدام از فازها با علامت های جداگانه مشخص شده اند. در نمونه ب نیز نتایج حاصل از آنالیز پراش اشعه ایکس نشان می دهد که پیک های 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 ۸۷۱۶-۲۲۳-۹۶ و ساختار کریستالی اورترومبیک، فاز Fe₂ با شماره کارت ۳۴۷۵-۹۰۱-۹۶ با ساختار کریستالی مکعبی ساده، و فاز Fe₆C₆O₁₈ با ساختار هگزاگونال به شماره کارت ۵۲۶۱-۹۰۱-۹۶ 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 و C₃₆H₆₀O₄ و Fe₆O₆C₁₈ دیده می شوند که بیانگر ایجاد یک لایه محافظ سطحی است.

۳-۷-جذب/واجذب گونه های فعال

به منظور بررسی جذب و واجذب ترکیبات آلی بر روی نمونه فولادی، آنالیز طیف سنجی مرئی -فرابنفش (UV-VIS) از الکترولیت، قبل و بعد غوطه وری پنل های فولادی گرفته شد. شکل ۱۱ نمودارهای UV را نشان می دهد.



شکل ۱۱. طیف حاصل از آزمون UV-VIS در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ در غیاب حضور عصاره غلاف نخود فرنگی بعنوان 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

طیف های جذب UV-Visible برای غلظت مطلوب بازدارنده قبل و بعد از ۲۴ ساعت غوطه وری نمونه فولادی در شکل مذکور قابل مشاهده است. طیف جذب الکترونیکی بازدارنده قبل از غوطه وری شدن فولادها دو پیک را در منطقه UV نشان می دهد که در شکل های مربوطه نشان داده شده است. این پیک ها (باند ها) ممکن است به دلیل انتقال الکترونیکی $\pi-\pi^*$ و $\pi-\pi^*$ با ویژگی انتقال بار قابل توجه ایجاد شوند (۲۵). اولین ناحیه در مجاورت ۲۱۰ نانومتر مربوط به پیوند $C=C$ است که در حلقه بنزن ساختار آلی وجود دارد (۲۶). مصرف بازدارنده های آلی موجود در محلول از طریق اتصال به سطح فلز باعث کاهش شدت جذب کل طیف UV-Vis می شود. شدت $\pi-\pi^*/\pi-\pi^*$ قبل و بعد از غوطه وری یکی دیگر از تغییرات قابل توجه است. کاهش شدت $\pi-\pi^*/\pi-\pi^*$ پس از غوطه وری شدن پانل های فولادی را می توان به برهمکنش های دهنده/گیرنده نسبت داد که در آن جفت الکترون های بازدارنده آلی با اوربیتال های خالی سطح فولاد پیوند تشکیل می دهند (۲۷، ۲۸). با این حال، تغییر قابل توجهی در شکل طیف ها وجود ندارد. این مشاهدات شواهد قوی از تشکیل کمپلکس بین مولکولهای بازدارنده و سطح فولاد و تشکیل یک لایه محافظتی ممانعت کننده بر روی سطح فولاد را ارائه می دهد (۲۵).

۴- بحث ها

۴-۱- مکانیزم خوردگی شیرین

مکانیزم خوردگی شیرین را میتوان به صورت زیر بیان کرد:

(با حل شدن CO₂ در آب اسید کربنیک (واکنش (۱)) به وجود می آید و با تجزیه اسید کربنیک ، بی کربنات تشکیل می شود (واکنش (۲)) که آن نیز تجزیه ومنجر به تولید یون های کربنات وهیدروژن خواهد شد (واکنش (۳)) (۲).



مقاله پذیرفته شده

واکنش های الکتروشیمیایی سطح فلز عبارتند از :

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



ب) واکنش انحلال آندی آهن

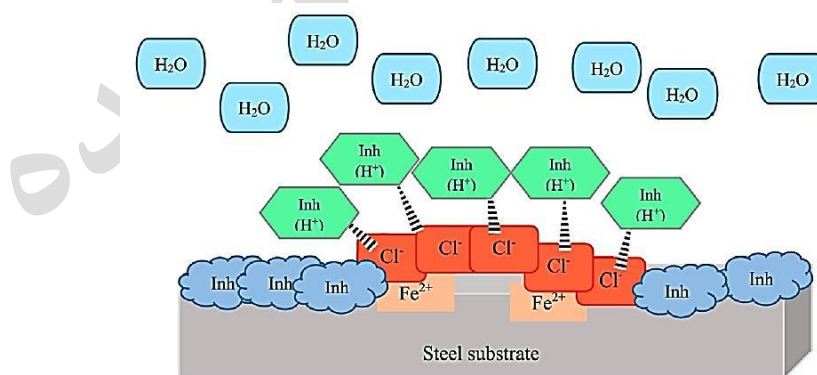


در طی این فرآیند خوردگی اگر کربنات به حد حلالیت رسیده باشد، می تواند بر روی سطح فولاد رسوب کند و نرخ خوردگی یکنواخت را کاهش دهد. حد حلالیت به pH محلول، فشار جزئی CO_2 و دما بستگی دارد. با این حال تحت شرایط محیطی خاص، زمانی که لایه محافظ کربنات آهن تا حدی از بین می رود، خوردگی موضعی می تواند رخ دهد (۲۸).

۴-۲- مکانیزم عملکرد بازدارنده

مکانیزم بازداری به منظور اثبات آن بررسی می شود قابلیت اطمینان IE برای عصاره گیاهی مکانیسم جذب روی بستر فلزی را می توان به عنوان جذب فیزیکی، جذب شیمیایی یا ترکیبی از این دو جذب که به عنوان بازدارنده جذب نوع مختلط نیز نامیده می شود طبقه بندی کرد (۲۹). بازدارنده های مختلط بالاترین حفاظت را ارائه می دهند زیرا بر واکنش های کاتدی و آندی تأثیر می گذارند (۳۰). این نوع جذب های بازدارنده می توانند تحت تأثیر ماهیت بازدارنده خوردگی (۳۱) و شیمیایی باشند. ساختار (۳۲)، محیط خورنده (۳۳) و بار سطحی زیرلایه فلزی (۳۴) قرار گیرند.

هانینی (۳۵) طرح مکانیزم جذب فیزیکی را بر اساس ماهیت خوردگی پیشنهاد کرده است. بازدارنده همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است آنها گزارش کرده اند که عصاره حاوی پیوندهای متعدد، حلقه های معطر و هترواتم است که می توانند به راحتی در محیط اسیدی پروتونه شوند. پروتونه شدن بازدارنده منجر به گونه های بازدارنده با بار مثبت می شود که می توانند از طریق یون های کلرید روی سطح فولادی با بار مثبت جذب شوند و پل های متصل به هم را تشکیل دهند که به برهمکنش الکترواستاتیکی معروف هستند.



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].

از طرفی دیگر، اگر اختلاف بین پتانسیل خوردگی نمونه شاهد و سایر نمونه ها بیشتر از ۸۵ mV باید، با توجه به محل قرارگیری پتانسیل خوردگی نمونه حاوی بازدارنده نسبت به نمونه خام می توان گفت که بازدارنده از نوع آندی است یا کاتدی. در صورتی که این اختلاف از ۸۵ mV کمتر باشد، ممانعت از نوع مختلط است (۳۵). با توجه به داده های جدول ۴ به نظر می رسد نوع بازدارنده مختلط هستند. بازدارنده مختلط یعنی هم واکنش تکامل هیدروژن و هم انحلال آهن آندی مسدود می شود (۳۷).

۵- نتیجه گیری

- بهترین اثر بخشی بازدارنده : در غلظت ۱۰۰ ppm با ۷۶/۶۹ IE =
- با افزودن بازدارنده و در غلظت ۱۰۰ ppm ، زبری سطح از ۸۲/۳۱۴ نانومتر به ۲۰/۶۰۷ نانومتر کاهش می یابد.
- تحلیل نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) برای عصاره غلاف نخود فرنگی بیانگر تشکیل فیلم محافظ بر روی سطح فلز است
- تحلیل نتایج آزمون امپدانس نشان میدهد که کارایی بازدارنده با افزودن غلظت آن افزایش یافته بطوریکه در غلظت ۱۰۰ ppm به ۶۸/۹٪ رسیده است .
- تحلیل نتایج آزمون پلاریزاسیون نشان میدهد که کمترین شدت جریان خوردگی مربوط به عصاره غلاف نخود فرنگی در غلظت ۱۰۰ ppm به مقدار $1/4 \mu A/cm^2$ است که نشان دهنده بهترین اثر بخشی این عصاره است .
- به دلیل اینکه اختلاف بین پتانسیل خوردگی نمونه شاهد و سایر نمونه ها کمتر از ۸۵ mV نوع بازدارنده از نوع بازدارنده مختلط است .

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۶- مراجع

1. 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/app10103389>
2. Touali Yo A. Dioxide Corrosion studies in Oil and Gas Productionre parameters . [MSc thesis]. [London South Bank] :Univercity of London South Bank.2013
3. Fontana Mar. J., translated by Dr. Saatchi A. Corrosion Engineering.14th ed. Jihad University of Isfahan Industrial Unit.1399 [In Persian]
4. 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]
5. Rani, B. , Basu B.B.J. Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview. Corrosion. 2012;(1): 1687-9325 <http://dorl.net/dor/10.1155/2012/380217>
6. 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. Molecular Sciences.2023;(24):7-16. <https://doi.org/10.3390/ijms241512269>
7. Ebrahim, T., Gomes, E., Obot, I. B., Khamis, M. & Abou Zour, M. Corrosion inhibition of mild steel by Calotropis procera leaves extract in a CO₂ saturated sodium chloride solution. Adhesion Science and Technology.2016;(30): 2523–2543 <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1185229>
8. 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. Reserch Chemical Intermediates. 2017;(43): 6719–6736 <https://doi.org/10.1007/s11164-017-3017-1>
9. JNY P., Buchweishaija J., Mkayula L. Cashew nut shell liquid as an alternative corrosion inhibitor for carbon steel. Tanzania Journal Science .2001; (27): 9-19. <https://doi.org/10.4314/tjs.v27i1.18332>
10. Bendahou M., Benabdallah M., Hammouti B. A study of rosemary oil as a green corrosion inhibitor for steel in 2M H₃PO₄. Pigment & Resin Technology 2006;(35): 95-100 <https://doi.org/10.1108/03699420610652386>
11. Bozorg M. and Shahrabi T. Using Myrtex plant extract as a steel corrosion inhibitor Hydrochloric acid solution . New processes in materials engineering. 2016(11):109-118 <https://doi.org/20.1001.1.24233226.1396.11.4.10.8> [In Persian]
12. Beniwal A. , Vikram, Singh S., Sangwan V., Punia D. Chemical Constituents (Proximate, Minerals, Bioactive Compounds) of Pea [Pisum sativum (L.)] Shells. Asian Journal of Dairy and Food Research 2023; <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-1968>
13. Nabatipour S. and Mohamadi A. Preparation of Chromone-based Schiff base as corrosion inhibitor for carbon steel in Hydrochloric acid. **Corrosion Sciences and Engineering**. 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]
14. Gadow H.S, Motawea M.M. Investigation of the corrosion inhibition of carbon steel in Hydrochloric acid solution by using ginger roots extract. Royal society of chemistry. 2017;(7): 24576-24583 <https://doi.org/10.1039/C6RA28636D>
15. 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. Industrial and Engineering Chemistry. 2015;(24):219-228. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.034>
16. 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](https://doi.org/10.1007/s12633-017-9673-3)
 17. Rabizadeh, T., Khameneh Asl S. Casein as a natural protein to inhibit the corrosion of mild steel in HCl solution. Molecular Liquids. 2019; (276): 694-704. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.162> [In Persian]
 18. Brug, G., Vanden Eeden A.L.G., Sluyters J.H. The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element. Electroanalytical chemistry and interfacial electrochemistry. 1984;(176):275-295. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(84\)80324-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(84)80324-1)
 19. Singh, A., Ansari K., Chauhan D.S., Quarashi M.A. Comprehensive investigation of steel corrosion inhibition at macro/micro level by ecofriendly green corrosion inhibitor in 15% HCl medium. Colloid and Interface science. 2020;(560):225-236. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.040>
 20. Eyu G. D., 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. Materials. 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 . Surface Engineering Applied Electrochemistry. 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 length ionic liquids as green inhibitors for X70 steel in acidic medium. Material Chemistry and Physics. 2018;(215): 29-241. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.054>
 23. Satapathy A.K., Gunasekaran G. Corrosion inhibition by Justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution. Corrosion Science. 2009;(51):2848-2853 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.016>
 24. Foyzal Ahmad A.K.M., Hossain N. Determining corrosion efficiency of a green solution prepared from extract of dalbergia sissoo leaves in H₂SO₄ and its characterization. IUBAT Review. 2023;(9): 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. Electrochemical Science. 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. Gasparetto J.C., Martins C.A.F., Hayashi S.S., Otukey M.F., Pontarolo R. Ethnobotanical and scientific aspects of Malva sylvestris L.: A millennial herbal medicine. Pharmacy and Pharmacology. 2012;(64): 172-189. <https://doi.org/10.1111/j.2042-7158.2011.01383.x>
 27. Majd M.T., 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, Construction and Building Materials. 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 Spectroscopy. 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. Corrosion. 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, S.M., Peikari, M., Shadizadeh, S.R., Hashemi, S.J. Corrosion inhibition of mild steel in 1M HCl solution by henna extract: a comparative study of the inhibition by henna and its constituents (Lawsonic acid, Gallic acid, a-d-Glucose and Tannic acid). Corrosion Science. 2009;(51): 1935-1949. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.024>
 32. Rahim, A.A., Kassim, J., 2010. Recent development of vegetal tannins in corrosion protection of iron and steel. Recent Patents Materials Science 100.2008;(3): 223-231. <https://doi.org/10.2174/1874465610801030223>
 33. Oguzie, E.E., Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel. Corrosion Science. 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. Material 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 Chemistry and Pharmacy 2019;(14): 100189 <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100189>

36. Marshakov, I., Anodic dissolution and selective corrosion of alloys. Protection of metals, 2002. 38(2): 118-123. [http://dx.doi.org/ 10.1023/A:1014908930959](http://dx.doi.org/10.1023/A:1014908930959)
37. Bentiss, F., Lebrini, M., and 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. Corrosion Sci. 2005 ;(47): 2915–2931. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.034>

مقاله پذیرفته شده