

بررسی اثر عصاره آبی مریم‌نخودی بر رفتار خوردگی فولاد ساده کربنی در محیط سدیم کلرید ۳/۵ درصد وزنی

سیده‌سوگند مهربان^۱، مزدک ایزدی^{۲*}، سعید کریمی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان

^{۲*} استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان

^۳ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان

* نویسنده مسئول: mazdak.izadi@hut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

چکیده

در این پژوهش عصاره گیاهی مریم‌نخودی به عنوان بازدارنده دوست‌دار محیط زیست برای کنترل خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید مورد مطالعه قرار گرفت. عصاره گیاه در محیط آبی تهیه شد. در این راستا آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی جهت مطالعه رفتار خوردگی قطعات فولادی استفاده شد. همچنین ارزیابی سطحی با استفاده از آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج آزمون الکتروشیمیایی نشان داد که عصاره مریم‌نخودی بازدارنده مؤثری جهت حفاظت از خوردگی فولاد ساده کربنی در محیط حاوی یون‌های کلر می‌باشد. بالاترین میزان بازدارندگی در غلظت ۵۰۰ ppm عصاره گیاهی حاصل شده و بهبود بیش از ۲ برابری را در مقاومت به خوردگی پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری نشان داد. مطابق نتایج پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان غوطه‌وری، مقاومت امپدانس از ۱۵۳۰ اهم در سانتی‌متر مربع برای نمونه عاری از افزودنی، به بیش از ۳۰۰۰ اهم در سانتی‌متر مربع برای نمونه بهینه رسیده است. همچنین نتایج مطالعات سطحی و ایجاد شرایط کنترل نفوذ در منحنی‌های امپدانس نشان داد که سازوکار حفاظت از خوردگی در حضور این بازدارنده می‌تواند ایجاد یک فیلم سطحی باشد.

کلیدواژه: بازدارنده خوردگی، دوست‌دار محیط زیست، فولاد ساده کربنی، عصاره گیاهی، EIS

Studying the Effect of Teucrium Polium Aqueous Extract on the Corrosion Behavior of Mild Steel in 3.5 Wt.% Sodium Chloride Media

S. S. Mehraban¹, M. Izadi^{2*}, S. Karimi³

¹MSc, Department of Materials Engineering, Hamedan University of Technology

^{2*}Assistant Profesor, Department of Materials Engineering, Hamedan University of Technology

³Assistant Profesor Department of Materials Engineering, Hamedan University of Technology

* Corresponding Author: mazdak.izadi@hut.ac.ir

Submission: 2024, 09, 11 Acceptance: 2025, 03, 19

Abstract

In this study, Teucrium polium plant extract was studied as eco-friendly inhibitor for corrosion controlling of mild steel in 3.5 wt.% NaCl solution. The plant extract was prepared in aqueous medium. Electrochemical impedance spectroscopy was used to study the corrosion behavior of steel samples. Also, surface analysis was performed using scanning electron microscopy and Energy-dispersive X-ray spectroscopy. The results of electrochemical analysis showed that Teucrium polium extract is effective corrosion inhibitor in Cl-containing media for mild steel. The maximum inhibition efficiency was obtained in the presence of 500 ppm plant extract with 2 times larger corrosion resistance after 24 h immersion. Based on the results, the impedance resistance reaches more than 2000 ohm.cm² for optimum sample related to the additive-free sample which shows impedance resistance about 990 ohm.cm². Also, surface studies and diffusion-controlled situation in impedance plots showed that the protection mechanism was surface film formation in the presence of inhibitor.

Keywords: Corrosion inhibitor, Eco-friendly, mild steel, Plant extract, EIS

۱- مقدمه

پدیده خوردگی باعث آسیب‌های انسانی و محیطی، مصرف مواد تجدیدنپذیر و هزینه‌های ناشی از تخریب سازه‌ها می‌شود. در میان فلزات، آهن و آلیاژهای مبتنی بر آهن مانند فولادهای ساده کربنی به طور گسترده در بسیاری از کاربردهای صنعتی از تجهیزات دریایی گرفته تا خطوط لوله نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این میان پیشگیری از خوردگی سازه‌های فولادی کربنی هنوز دغدغه اصلی در بسیاری از صنایع است. در میان روش‌های حفاظتی مختلف، بازدارنده‌های خوردگی یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای جلوگیری از خوردگی فولاد کربنی به ویژه در محیط‌های تهاجمی می‌باشند [۴-۱]. در حقیقت استفاده از بازدارنده‌های خوردگی به دلیل سهولت استفاده و قیمت تمام‌شده نسبتاً مناسب یکی از مؤثرترین تکنیک‌ها برای محافظت از فلزات در برابر محیط‌های خوردنده می‌باشد [۵]. تاکنون از بازدارنده‌های مختلفی در صنایع برای کاهش هزینه‌های خوردگی استفاده شده است.

در یک تعریف ساده بازدارنده خوردگی یک ترکیب شیمیایی است که در غلظت‌های پایین به الکترولیت خوردنده اضافه شده و به صورت مؤثری شدت خوردگی را کاهش می‌دهد [۳]. بر اساس ماهیت شیمیایی بازدارنده‌ها را می‌توان به دو دسته آلی و غیرآلی تقسیم کرد. بازدارنده‌های مختلف خوردگی به دلیل اثربخشی آن‌ها در محافظت از فولاد در محیط‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و به عنوان یک گزینه مؤثر طی سالیان اخیر کاربردهای صنعتی قابل توجهی یافته است. در میان بازدارنده‌های خوردگی ترکیبات کروماتی در قالب رنگدانه‌ها عملکرد بسیار مناسبی جهت محافظت در برابر خوردگی فلزات و آلیاژها از خود نشان داده‌اند. با این وجود کرومات‌ها سمی بوده و عامل بسیاری از مخاطرات زیست محیطی برای انسان‌ها، حیوانات و گیاهان هستند [۴]. بنابراین با وجود عملکرد قابل توجه این بازدارنده‌ها و استفاده گسترده از آن‌ها در صنایع طی سالیان گذشته، جایگزینی آن‌ها با بازدارنده‌هایی که سازگاری محیط‌زیستی بهتری دارند، به دلیل ملاحظات جهانی، یک ضرورت به نظر می‌رسد [۵].

بازدارنده‌های آلی یکی از انواع ترکیبات شیمیایی هستند که به عنوان عوامل مؤثر ضد خوردگی مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفته‌اند. ترکیبات حاوی هترواتم مانند (S, P, H, N, O) در برابر خوردگی فلزات و آلیاژهای آن‌ها اثر بازدارندگی دارند [۶-۸]. نقش اصلی این اتم‌ها، تشکیل رسوبات نامحلول در نواحی سطحی فعال فلز است که از واکنش‌های موضعی آندی و کاتدی و در نتیجه تخریب فلز در اثر خوردگی، جلوگیری می‌کند [۸].

بازدارنده‌های سبز یا دوست‌دار محیط زیست دسته‌ای از ترکیبات آلی یا معدنی هستند که برای محیط زیست چالش قابل توجهی ندارند. همچنین در رابطه با این ترکیبات عدم آلاینده‌گی قابل توجه طی فرآیند سنتز یا تهیه نیز دارای اولویت می‌باشد. بر این اساس توجه به جایگزینی ترکیبات آلی و معدنی دارای چالش‌های محیط زیستی با نمونه‌های با سازگاری بالاتر به یک اولویت تحت عنوان بازدارنده‌های خوردگی سبز در سطح جهانی تبدیل شده است. بازدارنده‌های سبز خود به دو دسته سنتزی و طبیعی تقسیم می‌شوند. در انواع سنتزی هدف توسعه ترکیبی است که نه خود برای محیط زیست مشکل ساز باشد و نه فرآیند سنتز آن منجر به تولید آلاینده‌هایی نظیر پساب‌ها یا تصاعد گازهای مضر شود. در مقابل یک راهکار در حوزه بازدارنده‌های سبز، استفاده از منابع طبیعی در دسترس و استحصال ترکیبات مورد نظر از آن‌ها بدون دخالت مواد شیمیایی سنتزی است. این رویکرد با توجه به منابع زیستی مورد استفاده در توسعه آن، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

در میان ترکیب‌های بازدارنده خوردگی آلی دوست‌دار محیط‌زیست، عصاره‌های گیاهی، حاوی حلقه‌های هتروسیکلی، نواحی با بار الکتریکی نامتوازن و الکترون‌های پای، انتخاب‌های مناسبی برای کاهش میزان خوردگی تجهیزات فلزی هستند [۹]. ایجاد یک لایه آلی/غیرآلی که مکان‌های فعال سطح فلز در حال خوردگی را می‌پوشاند، به عنوان مکانیزم اصلی بازدارندگی در حضور ترکیبات بازدارنده آلی محسوب می‌شود که فرآیند جذب خود می‌تواند فیزیکی، شیمیایی یا ادغامی از هر دو مورد

باشد [۱۰]. بر این اساس عصاره‌های مختلف آبی و حلالی اجزای گیاهی (مانند برگ، ساقه، ریشه) به عنوان بازدارنده‌های خوردگی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اما استفاده مستقیم از عصاره‌های گیاهی دارای معایب مختلفی است [۱۱]. در درجه اول غلظت کم بخش‌های مؤثر در ترکیب شیمیایی گیاه در مقایسه با سایر اجزای موجود در عصاره می‌تواند منجر به حفاظت در برابر خوردگی ناکافی می‌شود. در درجه دوم وجود اجزای شیمیایی نامشخص در عصاره‌های گیاه (به غیر از مواد شیمیایی مفید) این ترکیبات ممکن است بر خواص شیمیایی/فیزیکی محیط خوردگی تأثیر گذاشته و برای سامانه تحت حفاظت مشکلات جدیدی ایجاد کند. به عنوان مثال این موضوع می‌تواند با تشکیل رسوب یا لجن در سامانه تحت حفاظت منجر به اختلال در عملکرد آن می‌شود. همچنین فعل و انفعالات غیرقابل پیش‌بینی در حضور عصاره‌های گیاهی ممکن است در سامانه تحت حفاظت رخ داده و آن را تحت تأثیر قرار دهد. بر این اساس انتخاب یافتن یک عصاره گیاهی که به دلیل اجزای مؤثر قابل توجه در ساختار آن بتواند به عنوان یک بازدارنده خوردگی مناسب عمل کند به یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهش در دو دهه اخیر در علوم مهندسی خوردگی تبدیل شده است.

در پژوهش‌های مختلفی از ترکیبات بازدارنده دوستدار محیط زیست جهت حفاظت از فولاد ساده کربنی استفاده شده است. کمالی و همکاران [۱۲] از یک مشتق ایمیدازولی به عنوان بازدارنده دوستدار محیط زیست در محیط ۱ مولار اسید هیدروکلریک برای حفاظت از خوردگی فولاد ساده کربنی استفاده کردند. در این مطالعه، یک مایع یونی پلیمری سنتز شد. سپس عملکرد حفاظت از خوردگی آن روی فولاد ساده کربنی ارزیابی شد. نتایج طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه فولاد ساده کربنی در محیط ۱ مولار اسید هیدروکلریک با غلظت‌های مختلف PIL در ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان داده شد. غلظت‌های مختلف بازدارنده از ۵۰ ppm تا ۴۰۰ ppm بررسی شده و نتایج نشان داد که بعد از اضافه شدن بازدارنده، مقدار مقاومت به خوردگی فلز از ۱۰ به ۲۰۰ اهم در سانتی‌مترمربع رسیده است. در پژوهش دیگری، مفیدآبادی و همکاران از یک

عصاره آبی دانه میخک به عنوان بازدارنده دوستدار محیط زیست در محیط ۱ مولار اسید هیدروکلریک برای حفاظت از خوردگی فولاد ساده کربنی استفاده کردند [۱۳]. در حضور و عدم حضور بازدارنده، آزمون‌های خوردگی انجام شد و زمانی که بازدارنده به میزان ۸۰۰ ppm به سامانه اضافه شد، چگالی جریان خوردگی در حدود یک دهه کاهش پیدا کرد که مقدار قابل توجهی بوده و از طرف دیگر، تغییرات پتانسیل خوردگی چندان قابل توجه نبود. اما شیب‌های آندی بعد از اضافه شدن بازدارنده نسبت به نمونه‌ی عاری از بازدارنده به شدت دچار تغییر شدند که این نشان می‌دهد مکانیزم نیم‌واکنش‌های آندی که شامل انحلال فلز در محیط خورنده است، با استفاده از این بازدارنده دچار تغییر شده و می‌تواند یکی از علل اصلی جلوگیری از خوردگی نمونه باشد. در پژوهش دیگری بریسول و همکاران [۱۴]، از یک عصاره آبی گیاه پونه کوهی به عنوان بازدارنده دوستدار محیط زیست برای حفاظت از خوردگی فولاد ساده کربنی استفاده کردند. نمودارهای نایکوئیست در حضور و عدم حضور بازدارنده نشان داد که این بازدارنده می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه خوردگی در محیط هیدروکلریک اسید شود.

گیاه مریم‌نخودی یا کلپوره همدانی که با نام علمی *Teucrium polium* شناخته می‌شود، از گیاهان دارویی و معطر با طبعی گرم و خشک است. این گیاه به تیره نعنائیان تعلق داشته و سرشاخه‌های گلدار آن از خواص دارویی فراوانی برخوردار است. دارای ظاهر سفید پنبه‌ای که معمولاً در نواحی بایر، سواحل سنگلاخی و ماسه‌زارهای نواحی جهان می‌روید. برگ‌های آن باریک، دراز و پوشیده از کرک‌های پنبه‌ای در هر دو سطح پهنک است. گل‌هایی به رنگ‌های سفید، سفید مایل به زرد یا زرد و حتی ارغوانی دارد. این گیاه خواص آنتی‌اکسیدانی و اجزای مختلفی در ساختار خود دارد که فلاونوئیدها از جمله مهم‌ترین آن‌ها هستند. این ترکیبات می‌توانند به عنوان بازدارنده خوردگی مورد استفاده قرار گیرند [۱۵-۱۷].

در این پژوهش هدف ارزیابی عملکرد حفاظت از خوردگی عصاره آبی مریم‌نخودی روی فولاد ساده کربنی در محیط نمک

شود. مجدداً در همان دما فاز مایع روی همزن مغناطیسی قرار گرفته تا تمام آب محلول تبخیر شده و نمونه‌ای خمیری بدون سوختگی حاصل شود. خمیر نهایی روی شیشه ساعت پخش شده و درون آن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. نمونه حاصل که فامی تیره رنگ دارد، در محل خشک و خنک به دور از نور نگهداری شد تا در تهیه محلول‌ها مورد استفاده قرار گیرد. آنالیز پیوندی عصاره آبی تهیه‌شده با استفاده از آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲ آماده‌سازی نمونه‌های فولادی

نمونه‌های در ابعاد $50 \times 20 \times 1$ mm و $10 \times 10 \times 1$ mm به ترتیب برای مطالعات خوردگی و بررسی ساختاری و شیمیایی سطح نمونه‌های غوطه‌ور استفاده شد. ابتدا با استفاده از کاغذهای سنباده از شماره ۸۰ تا ۱۲۰۰ آماده‌سازی مکانیکی نمونه‌های انجام می‌شود. نمونه‌های با مساحت ۱ سانتی‌متر مربع مانت شده و سپس سنباده‌زنی آن‌ها انجام شد. جهت از بین بردن چربی‌ها و آلودگی‌های سطحی از مخلوط استون و الکل درون بشر استفاده شد. استفاده از حمام فراصوت جهت چربی‌گیری و حذف براده‌های فلزی ایجاد شده طی فرآیند آماده‌سازی مکانیکی به مدت ۵ دقیقه برای همه نمونه‌ها انجام شد. در ادامه نمونه‌ها با اتانول شسته شده و نهایتاً با استفاده از پمپ باد خشک شدند. نمونه‌ها قبل از انجام آزمون درون دسیکاتور نگهداری شدند.

۴-۲ تهیه الکترولیت

جهت آماده‌سازی الکترولیت ابتدا توزین عصاره جامد تا سه رقم اعشار انجام گرفت. در گام دوم محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید در آب ۵ بار تقطیر تهیه شده و در دمای محیط تحت همزن مغناطیسی قرار گرفت تا محلولی کاملاً شفاف حاصل شود. در ادامه حجم‌های ۵۰ میلی‌لیتری از این محلول جدا شده نمونه‌های موردنظر در غلظت‌های مختلف بازدارنده تهیه شد. این محلول‌ها تحت همزن مغناطیسی قرار گرفتند تا انحلال کامل انجام گرفته و محلولی یکنواخت حاصل شود. محلول‌ها به‌صورت تازه جهت انجام آزمون‌های خوردگی و مشخصه‌یابی سطح استفاده شدند. ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌های خوردگی در جدول (۲) نمایش داده شده است.

طعام ۳/۵ درصد وزنی است. در این راستا ابتدا عصاره آبی گیاه موردنظر تهیه شده و سپس مطالعات مربوطه انجام گرفت. ابتدا با استفاده از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی رفتار حفاظت از خوردگی بازدارنده در غلظت‌ها و زمان‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و در گام دوم مطالعات سطحی روی نمونه‌های با مقاومت مناسب با هدف اثبات جذب ترکیبات موجود در عصاره گیاهی روی سطح با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس انجام گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱ مواد مصرفی

در این کار نمونه‌های فولاد ساده کربنی با آنالیز ارائه‌شده در جدول (۱) مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب ارائه‌شده در جدول مربوط به آزمون کوانتومتری انجام گرفته روی نمونه است. نمک طعام با گرید بسیار خالص از برند دکتر مجللی و آب یون‌زدایی شده (۵ بار تقطیر) تهیه شد. گیاه خشک‌شده مریم‌نخودی از بازار محلی شهر همدان خریداری و جهت تولید عصاره آبی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه‌های فولاد ساده کربنی مورد

استفاده در این پژوهش

عنصر	آهن	کربن	منگنز	فسفر	گوگرد
درصد وزنی	۹۹/۱	۰/۱۲	۰/۶	۰/۰۵	۰/۰۳

۲-۲ تهیه عصاره آبی

به منظور تهیه عصاره گیاه در گام اول، گیاهان تهیه شده از ساقه جدا و سپس تحت خردایش قرار گرفتند. هدف از خردایش صرفاً سهولت فرآیند انحلال بوده است. در گام دوم پودر حاصل به مقدار کافی آب یون‌زدایی شده اضافه و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد روی همزن مغناطیسی به مدت ۲/۵ ساعت قرار گرفت تا فرآیند عصاره‌گیری تحت دما انجام شود. سپس جدایش فازهای مایع و جامد با استفاده از کاغذ صافی دو مرتبه فرآیند جداسازی انجام می‌شود تا محلولی یکنواخت حاصل

جدول ۲. ترکیب شیمیایی الکترولیت‌های مورد استفاده در این پژوهش

غلظت عصاره مریم‌نخودی (ppm)	نمونه
۰	Blank
۱۰۰	M1
۲۰۰	M2
۳۰۰	M3
۴۰۰	M4
۵۰۰	M5
۶۰۰	M6

سطح قطعات پس از اضافه نمودن عصاره آبی به الکترولیت بهره برده شد. در نهایت سطح نمونه‌ها نیز با استفاده از تصاویر ماکروسکوپی به کمک دوربین دیجیتال به ثبت رسیده است تا دید بهتری از عملکرد بازدارنده در اختیار قرار دهد.

۳- نتایج و بحث

جهت شناسایی پیوندهای موجود در عصاره آبی، از آزمون FT-IR استفاده شده است که نتایج آن در محدوده عددهای موج 4000 تا 400 cm^{-1} در شکل (۱) نمایش داده شده است. مطابق نتایج، طیف ارائه شده در عدد موج با مرکزیت 3400 cm^{-1} مربوط به گروه‌های OH موجود در بازدارنده است. همچنین دو پیک در اعداد موج 2930 و 2875 cm^{-1} مربوط به پیوندهای C-H در قالب ساختار CH_2 و CH_3 هستند. در نهایت پیک‌های مربوط به پیوندهای C=C و C-O نیز در اعداد موج 1610 و 1050 cm^{-1} قابل مشاهده هستند. عصاره‌های گیاهی دارای ترکیب‌های شیمیایی مختلفی در ساختار خود هستند که زنجیره‌های هیدروکربنی، حلقه‌های هتروسایکلیک و برخی گروه‌های عاملی از جمله این موارد می‌باشند. نتایج به دست آمده تطابق بسیار مناسبی با سایر منابع علمی دارد. در پژوهشی که توسط هاشمی تبار و همکاران انجام گرفته است، طیف مشابهی برای این عصاره حاصل شده است [۱۸].

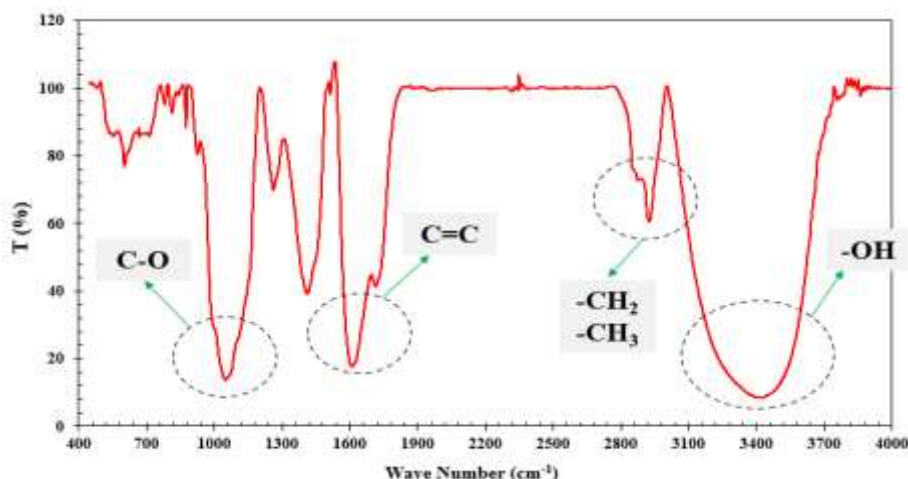
آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی طی زمان‌های مختلف غوطه‌وری مطابق جدول (۲) روی نمونه‌های مختلف انجام گرفته و رفتار الکتروشیمیایی نمونه‌ها و تغییرات ایجاد شده طی زمان ثبت شد. فرآیند برازش منحنی‌های EIS با استفاده از مدارهای معادل نمایش داده شده در شکل (۲) انجام گرفته است. در این مدارها R_s نشان‌دهنده مقاومت محلول، R_f و CPE_f به ترتیب مربوط به مقاومت و عنصر فاز ثابت پوشش حاصل از جذب بازدارنده روی سطح، و R_{ct} و CPE_{dl} مربوط به مقاومت انتقال بار و عنصر فاز ثابت لایه دوگانه الکتریکی هستند. با توجه به تعدد نمونه‌ها صرفاً در منحنی‌های مربوط به زمان غوطه‌وری ۲ ساعت نتایج برازش در شکل‌ها ارائه شده است و سایر موارد در قالب داده‌های استخراج شده ارائه گردیده است. نتایج مستخرج از آزمون EIS در جدول (۳) خلاصه شده است.

۵-۲ مطالعات خوردگی

آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات شرکت کیان‌شاردانش مدل Radstat200 جهت مطالعات خوردگی مورد استفاده قرار گرفت. محدوده فرکانسی 100 kHz تا 0.1 Hz در پتانسیل مدار باز (OCP) با دامنه ولتاژ 0.01 ولت در سامانه سه الکترودی شامل الکترود کاری؛ نمونه‌های فولادی ساده کربنی با مساحت سطح 1 cm^2 ، الکترود کمکی (شمارنده)؛ پلاتین با مساحت سطح $1 \times 1 \text{ cm}$ و الکترود مرجع؛ الکترود نقره-کلرید نقره برای کنترل پتانسیل اعمالی مورد استفاده قرار گرفت. جهت محدود کردن سطح در تماس با الکترولیت به 1 سانتی‌متر مربع از موم استفاده شده است. با توجه به غیر مخرب بودن این آزمون رفتار الکتروشیمیایی نمونه‌ها طی زمان‌های مختلف غوطه‌وری شامل 0.5 ، 2 ، 6 و 24 ساعت مورد بررسی قرار گرفتند. جهت تحلیل نتایج برازش با استفاده از نرم افزار RadSoft انجام گرفت.

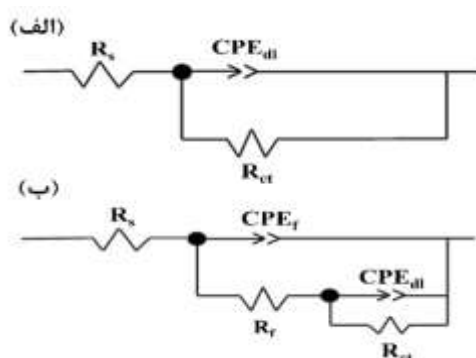
۶-۲ مطالعات سطحی

جهت مطالعه سطح نمونه‌ها پس از غوطه‌وری در الکترولیت‌های مختلف حاوی و عاری از عصاره گیاهی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای بررسی مورفولوژی و ترکیب شیمیایی محصولات تشکیل شده بر سطح نمونه‌ها، از آزمون SEM-EDS با دستگاه FEI Quanta 200 استفاده شد. از آنالیز عنصری با هدف تغییر ترکیب شیمیایی



شکل ۱. طیف FT-IR مربوط به عصاره مریم نخودی نهایی مورد استفاده در مطالعات خوردگی در محدوده عددهای موج 4000 تا 400 cm^{-1} .

نمونه M5 در منحنی‌های نایکوئیست است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، منحنی این نمونه به‌صورت شبه‌نیم‌دایره در نیامده و به‌صورت یک خط با شیب نسبتاً ثابت افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند ناشی از شروع ایجاد یک لایه سطحی در نتیجه جذب اجزای بازدارنده روی سطح باشد که یک رفتار شبه‌نفوذی را در سامانه القا می‌کند. این حالت زمانی پیش می‌آید که لایه سطحی بتواند سطحی مقاوم در برابر نفوذ عوامل خورنده به سمت سطح فلز ایجاد نماید. اثبات این ادعا با مطالعه زمان‌های طولانی‌تر غوطه‌وری امکان‌پذیر خواهد بود. معمولاً تشکیل یک فیلم از تشکیل جزیره‌هایی در بخش‌های فعال سطحی آغاز شده و در ادامه پوشش یکنواختی را روی سطح فلز ایجاد می‌نماید.



شکل ۲. مدارهای معادل مورد استفاده در برازش منحنی‌های

EIS: الف: جهت برازش منحنی‌های نمونه عاری از افزودنی

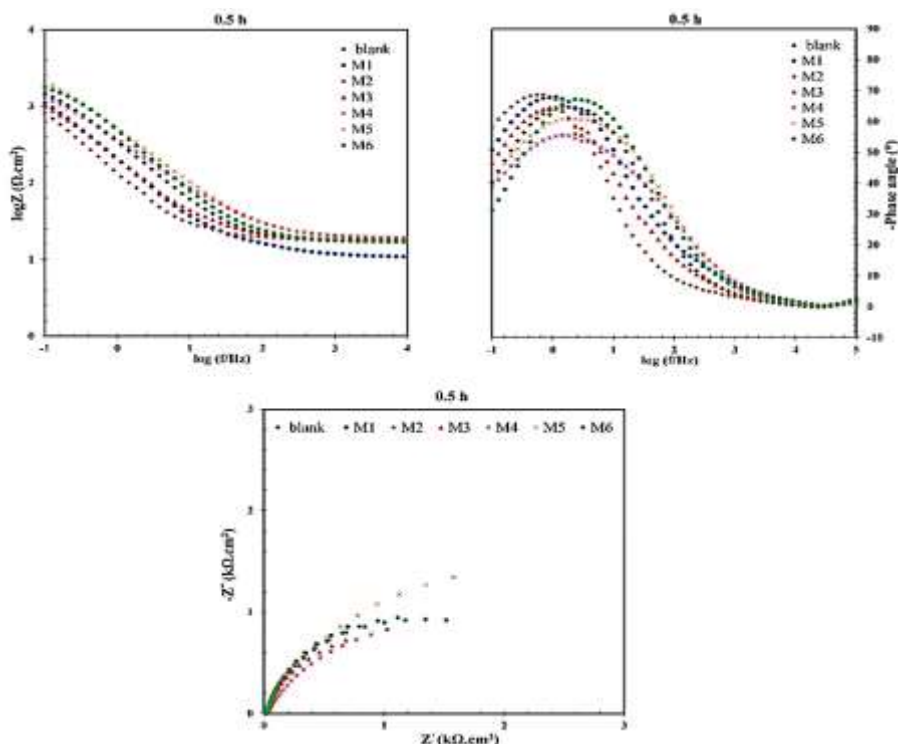
(Blank) و ب: جهت برازش منحنی‌های حاوی غلظت‌های

مختلف بازدارنده (M1 تا M6).

در شکل (۳) منحنی‌های بُد و نایکوئیست مربوط به نمونه‌های عاری از افزودنی و حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده پس از گذشت ۳۰ دقیقه از زمان غوطه‌وری ارائه شده است. مطابق نتایج مقدار مقاومت نمونه عاری از افزودنی پس از ۳۰ دقیقه ۲۱۳۰ اهم در سانتی‌مترمربع است. در رابطه با نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده، شاهد یک روند نسبی در مقاومت با افزایش غلظت عصاره گیاهی هستیم و مقاومت‌هایی از ۲۱۰۰ تا ۴۳۰۰ اهم در سانتی‌مترمربع حاصل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت نمونه M6 (۲۳۶۵ اهم در سانتی‌مترمربع) از نمونه M5 (۴۳۲۶ اهم در سانتی‌مترمربع) کمتر است. علت این موضوع می‌تواند ناشی از تغییر سازوکار جذب و ماهیت فیلم سطحی در غلظت‌های بالاتر باشد. در حضور مقدار بهینه از بازدارنده (نمونه M5) مقدار مقاومت به خوردگی بیش از ۲ برابر شده است. با توجه به منحنی‌ها بد، در این نمونه‌ها تنها یک ثابت زمانی مشاهده شده است که نشان می‌دهد فرآیند خوردگی تحت کنترل انتقال بار است. لازم به ذکر است، در منحنی‌های امپدانس اولین ثابت زمانی که در فرکانس‌های بالا ظاهر می‌شود عموماً مربوط به لایه دوگانه الکتریکی بوده که در آن انتقال بار رخ می‌دهد [۱۹]. با این وجود اندکی انحراف از حالت تقارن در منحنی‌های بُد-زاویه فاز دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از تشکیل برخی ترکیبات اکسیدی طی خوردگی فولاد در محیط نمکی خنثی باشد [۲۰]. نکته مهم دیگر در این زمینه، تفاوت رفتار برخی نمونه‌های حاوی بازدارنده از جمله

جدول ۳. داده‌های مستخرج از برازش آزمون EIS مربوط به نمونه‌های عاری از افزودنی (Blank) و M1 تا M6

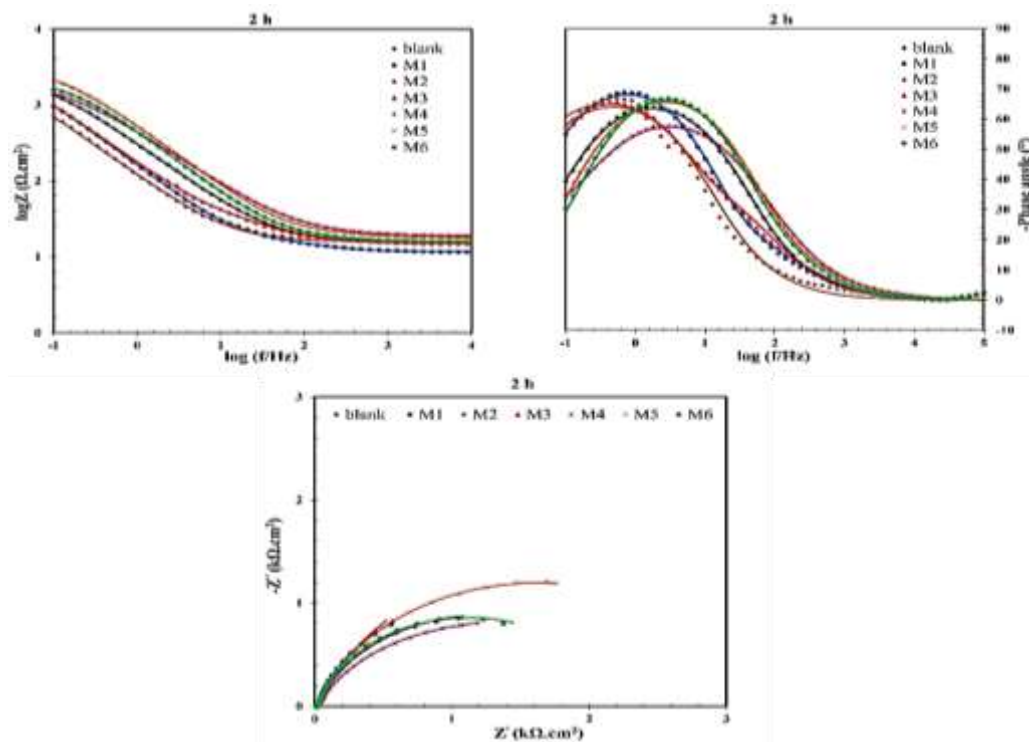
نمونه	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	CPE_{dl} Y_0 ($\mu S^n.\Omega^{-1}.cm^{-2}$)	n	R_f ($\Omega.cm^2$)	$Y_0 CPE_f$ ($\mu S^n.\Omega^{-1}.cm^{-2}$)	n_f	R_{total} ($\Omega.cm^2$)
۰/۵ ساعت							
blank	۲۱۳۰	۶۴۵	۰/۸۱	—	—	—	۲۱۳۰
M1	۲۷۳۰	۵۴۳	۰/۸۷	۱۵	۵۲۸	۰/۷۹	۲۷۴۵
M2	۲۶۰۵	۲۶۹	۰/۸۷	۷	۶۰۰	۰/۸۳	۲۶۱۲
M3	۲۱۴۰	۳۴۱	۰/۸۸	۳۳	۷۷۳	۰/۷۷	۲۱۷۳
M4	۲۱۰۵	۳۲۲	۰/۸۹	۸۸۰	۷۲۶	۰/۶۹	۲۹۸۵
M5	۴۳۱۵	۲۲۵	۰/۸۲	۱۱	۱۷۸	۰/۸۳	۴۳۲۶
M6	۲۳۵۰	۲۹۳	۰/۸۱	۱۶	۱۹۴	۰/۸۸	۲۳۶۵
۲ ساعت							
blank	۱۹۴۰	۷۳۰	۰/۸۰	—	—	—	۱۹۴۰
M1	۲۶۵۵	۶۷۴	۰/۸۷	۱۲	۶۳۸	۰/۸۳	۲۶۶۷
M2	۲۵۵۰	۵۱۱	۰/۸۴	۷	۶۴۸	۰/۸۳	۲۵۵۷
M3	۳۱۴۵	۴۵۳	۰/۸۶	۶۰	۸۹۹	۰/۷۷	۳۲۰۵
M4	۲۵۸۵	۴۹۹	۰/۶۷	۵	۸۷	۰/۹۲	۲۵۹۰
M5	۳۲۴۰	۳۲۹	۰/۷۸	۶	۸۱	۰/۹۵	۳۲۴۶
M6	۲۲۲۰	۳۰۰	۰/۷۹	۱۰	۱۶۶	۰/۹۲	۲۲۳۰
۶ ساعت							
blank	۱۸۲۰	۹۲۳	۰/۷۸	—	—	—	۱۸۲۰
M1	۳۱۵۵	۶۴۵	۰/۸۵	۱۲	۶۰۵	۰/۸۳	۳۱۶۷
M2	۲۵۸۵	۲۷۹	۰/۸۱	۵	۶۲۵	۰/۸۱	۲۵۹۰
M3	۲۵۰۵	۴۱۰	۰/۸۰	۵۵	۴۶۷	۰/۷۴	۲۵۶۰
M4	۲۳۴۰	۳۵۵	۰/۷۵	۶	۷۹	۰/۹۴	۲۳۴۶
M5	۲۷۰۰	۲۶۴	۰/۸۰	۸	۱۰۹	۰/۹۳	۲۷۰۸
M6	۲۶۰۰	۲۶۰	۰/۷۶	۵	۴۰	۰/۹۸	۲۶۰۵
۲۴ ساعت							
blank	۱۵۳۰	۷۸۰	۰/۷۵	—	—	—	۱۵۳۰
M1	۲۹۸۵	۶۰۴	۰/۸۰	۱۴	۶۴۷	۰/۸۱	۲۹۹۹
M2	۲۸۸۰	۴۱۰	۰/۷۲	۸۳	۵۸۰	۰/۷۵	۲۹۶۳
M3	۲۷۷۰	۵۷۶	۰/۷۱	۲۰	۱۵۰	۰/۸۹	۲۷۹۰
M4	۲۸۸۵	۲۰۱	۰/۷۶	۱۵	۲۰۴	۰/۸۷	۲۹۰۰
M5	۳۰۲۰	۹۵	۰/۷۹	۳۰	۲۱۶	۰/۸۴	۳۰۵۰
M6	۲۹۷۵	۱۱۶	۰/۶۹	۱۱۵	۱۴۱	۰/۸۶	۳۰۹۰



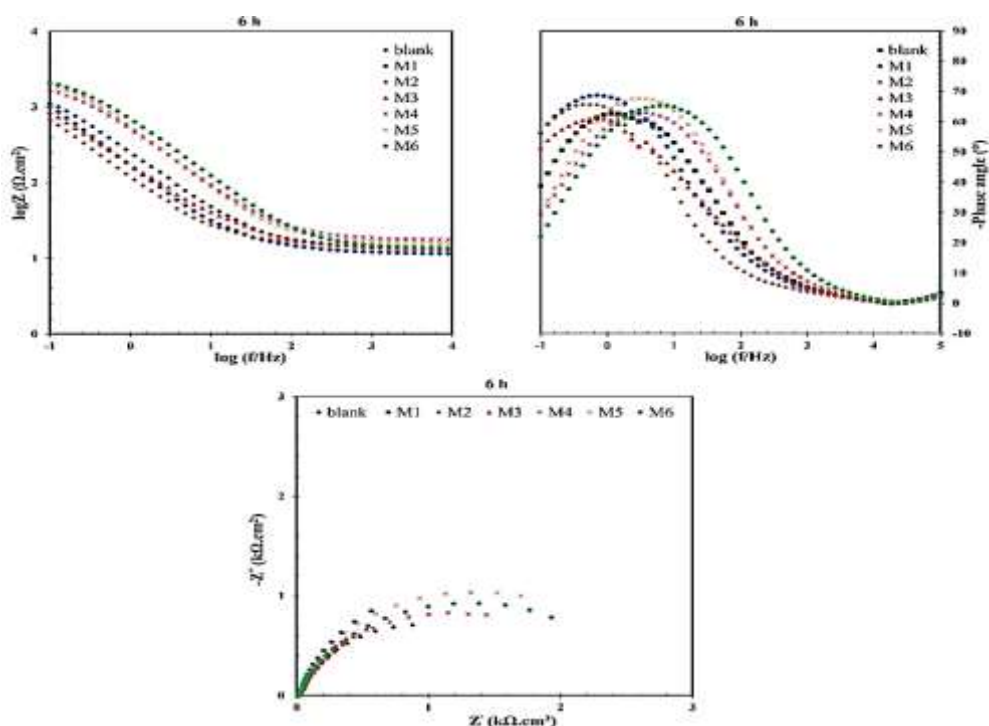
شکل ۳. منحنی‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (بُد و نایکوئیست) مربوط به نمونه‌های مختلف پس از ۳۰ دقیقه غوطه‌وری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

مقاومت با زمان، اختلاف مقاومت بیشتری بین نمونه عاری از بازدارنده و نمونه‌هایی نظیر M5 مشاهده می‌شود. پس از ۶ ساعت غوطه‌وری منحنی‌های بُد و نایکوئیست مطابق شکل (۵) حاصل شده است. در این زمان مقاومت امپدانس نمونه عاری از افزودنی برابر ۱۸۲۰ اهم در سانتی‌مترمربع و نمونه M5 به ۲۷۰۰ اهم در سانتی‌مترمربع رسیده است. این افزایش مقاومت امپدانس برای نمونه حاوی بازدارنده‌های خوردگی به صورت غیر مستقیم حضور یک لایه سطحی مقاوم به خوردگی را اثبات می‌کند. در نهایت مطابق شکل (۶) پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان غوطه‌وری که زمانی طولانی برای ارزیابی عملکرد یک بازدارنده خوردگی آلی است، مقاومت نمونه M5 به بیش از ۳۰۰۰ اهم در سانتی‌مترمربع رسیده است. همچنین بازدارندگی نیز برای این نمونه پس از گذشت ۲۴ ساعت با توجه به مقاومت ۱۵۳۰ اهم در سانتی‌مترمربع نمونه عاری از افزودنی به حدود ۲ برابر رسیده و به عبارتی مقاومت امپدانس در حضور ۵۰۰ ppm عصاره گیاهی به حدود ۲ برابر رسیده است.

نتایج آزمون امپدانس پس از ۲ ساعت غوطه‌وری برای نمونه‌های مختلف در شکل (۴) نمایش داده شده است. مطابق منحنی بُد اندازه امپدانس در فرکانس کمینه، مقدار مقاومت نمونه عاری از افزودنی از ۲۱۳۰ اهم در سانتی‌مترمربع مربوط به زمان ۳۰ دقیقه، به مقدار ۱۹۴۰ اهم در سانتی‌مترمربع پس از ۲ ساعت غوطه‌ور کاهش یافته است. همچنین مقدار امپدانس برای نمونه M5 به ۳۲۴۰ اهم در سانتی‌مترمربع کاهش یافته است. علت این بهبود می‌تواند ناشی از پیشرفت فرآیند خوردگی و محصولات تشکیل شده بر سطح در حضور مولکول‌های اجزای موجود در عصاره گیاهی باشد که باعث بالاتر بودن مقاومت در برابر انتقال بار در نمونه بهینه شده است [۲۱]. از سوی دیگر همچنان روند افزایشی تا نمونه M5 و پس از آن کاهش مقاومت در نمونه M6 در زمان ۲ ساعت نیز مشاهده می‌شود که ممکن است ناشی از واجذب بازدارنده در غلظت‌های بالاتر آن از سطح فلز باشد. در مجموع به نظر می‌رسد با افزایش زمان نمونه‌های حاوی بازدارنده مقاومت به خوردگی بهتری را از خود نشان داده و ضمن افزایش



شکل ۴. منحنی‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (بُد و نایکوئیست) مربوط به نمونه‌های مختلف پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد: نقاط نشان‌دهنده نتایج آزمایشگاهی و خطوط نشان‌دهنده داده‌های حاصل از برازش هستند.



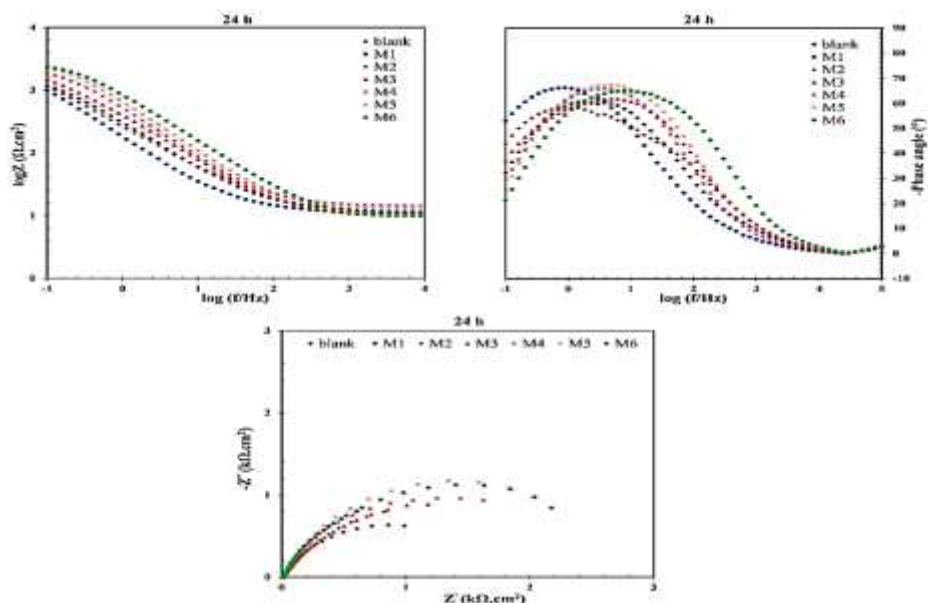
شکل ۵. منحنی‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (بُد و نایکوئیست) مربوط به نمونه‌های مختلف پس از ۶ ساعت غوطه‌وری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

قهوه‌ای رنگ ایجاد شده است. این در حالی است که در حضور عصاره گیاهی بخش قابل توجهی از سطح حفاظت شده و محصولات خوردگی روی سطح آن مشاهده نمی‌شود. در حضور بازدارنده سطح دست‌خورده فلز همچنان در بخش عمده‌ای از قطعه قابل مشاهده است. این موضوع می‌تواند به ماهیت قابلیت تشکیل فیلم اجزای عصاره گیاهی و ترکیبات احتمالی موجود در آن مرتبط باشد که می‌تواند روی سطح فولاد جذب شده و لایه محافظ ایجاد نماید [۲۵ و ۲۶].

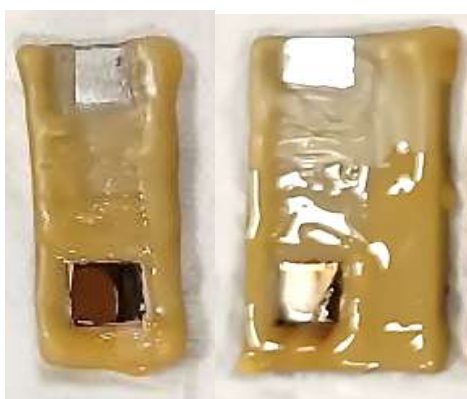
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل (۸) نمایش داده شده است. مطابق تصاویر در یک بزرگنمایی یکسان تفاوت معناداری بین مورفولوژی محصولات سطحی در حضور و عدم حضور بازدارنده وجود دارد. در نمونه عاری از بازدارنده به نظر می‌رسد ساختارهای تیغه‌ای به صورت جزیره‌ای روی بخش‌هایی از یک لایه ضخیم‌تر سطحی که در بخش‌هایی ترک‌خورده، تشکیل شده است. از طرف دیگر در حضور عصاره گیاهی ساختار به سمت مورفولوژی‌های شبه کروی ریز متمایل شده و این اجزای کروی با کنار هم قرار گرفتن در برخی بخش‌های سطح ساختارهای فشرده‌ای ایجاد نموده‌اند. همچنین تقریباً کل سطح به صورت یکنواخت توسط این اجزاء پوشیده شده است. به نظر می‌رسد اجزای شبیه به گل کلم در نتیجه رشد‌های جدید روی لایه قبلی بازدارنده که روی سطح بوده انجام گرفته و این موضوع می‌تواند دلیلی برای جدایش‌های موضعی پوشش و افت اندک نمونه M6 نسبت به نمونه M5 باشد. با افزایش ضخامت یک لایه امکان جدایش آن از زیرلایه افزایش می‌یابد.

در جدول (۴) نتایج آزمون EDS ارائه شده است. مطابق نتایج جدول، در حضور بازدارنده مقدار اکسیژن به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و مقدار کربن و نیتروژن بیش از نمونه عاری از افزودنی شناسایی شده است که می‌تواند نشان‌دهنده حضور اجزای عصاره گیاهی روی سطح نمونه فولادی باشد [۲۷]. کمتر بودن مقدار اکسیژن نیز می‌تواند ملاکی برای کمتر تشکیل شدن محصولات خوردگی با ماهیت اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی باشد.

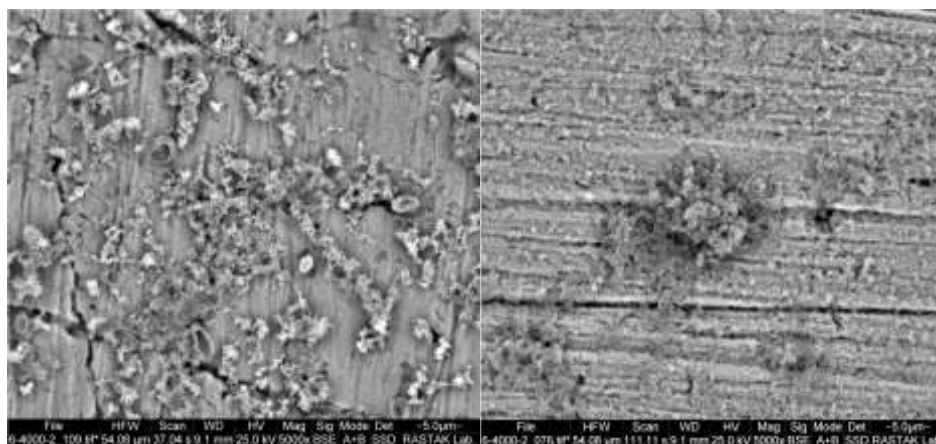
با توجه به افزایش مقاومت امپدانس و افزایش میزان بازدارندگی طی زمان به نظر می‌رسد که لایه سطحی جهت حفاظت طولانی مدت تراکم و چسبندگی کافی به نمونه فولادی را داشته و طی زمان با وجود کاهش غلظت اجزای بازدارنده در الکترولیت، ماهیت پوشاندگی پوشش نه تنها حفظ شده، بلکه بهبود یافته است [۲۱]. ثابت زمانی دوم که در فرکانس‌های بالاتر ظاهر می‌شود عموماً مربوط به یک لایه سطحی پیوسته است که سطح را پوشانده و مشابه لایه دوگانه الکتریکی یک مقاومت خازنی و یک مقاومت الکتریکی از خود نشان می‌دهد [۲۲]. عموماً زمانی که یک ساختار مولکولی به محیط خوردگی یک فلز اضافه می‌شود، ۳ رخداد ممکن است اتفاق بیفتد. رویکرد اول برهم کنش سازنده با سطح فلز منجر به تشکیل یک فیلم با پیوستگی و چسبندگی مناسب روی سطح است [۲۳]. رویکرد دوم بی‌عمل بودن ترکیب آلی در محیط الکترولیت بوده و رویکرد سوم اختلال در تشکیل محصولات خوردگی نظیر لایه‌های اکسیدی روی سطح است. چنانچه یک ترکیب بدون ایجاد یک لایه محافظ با قرار گرفتن در نزدیکی سطح فلز بر اساس مکانیزم‌های چون ایجاد مانع هندسی از تشکیل لایه اکسیدی جلوگیری نماید یا با شرکت در تشکیل این لایه به شکل‌هایی نظیر کلات‌ها ماهیت حفاظتی آن را تحت تأثیر قرار دهد، می‌توانیم شاهد کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌های فلزی از جمله فولاد ساده کربنی در محیط‌های خورنده باشیم [۲۴]. در شکل (۷) تغییرات سطح نمونه‌ها با استفاده از دوربین دیجیتال در قالب تصاویر ماکروسکوپی پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در محلول سدیم کلرید ثبت شده است. تصاویر ماکروسکوپی در کنار آزمون‌های الکتروشیمیایی و تصاویر میکروسکوپی می‌توانند اطلاعات ارزشمندی از ماهیت لایه‌های تشکیل شده روی سطح در اختیار محقق قرار دهند. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در عدم حضور عصاره گیاهی شاهد تشکیل محصولات خوردگی قابل توجه روی سطح فلز هستیم. این نتایج به مقادیر مقاومت امپدانس ثبت شده برای دو نمونه در تطابق است. محصولات خوردگی پس از گذشت ۴۸ ساعت در عدم حضور بازدارنده کل سطح رو پوشانده و لایه‌ای



شکل ۶. منحنی‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (بُد و نایکوئیست) مربوط به نمونه‌های مختلف پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۷. میکروسکوپی تهیه‌شده با دوربین از سطح نمونه‌های غوطه‌ور در الکترولیت پس از ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد: سمت راست: نمونه Blank، سمت چپ: نمونه M6.



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌های Blank (سمت راست) و M6 (سمت چپ) غوطه‌ور در الکترولیت پس از غوطه‌وری (۲۴ ساعت) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۴. داده‌های حاصل از آزمون EDS مربوط به نمونه‌های فولادی غوطه‌ور شده در محلول‌های همراه با افزودنی و بدون آن پس از گذشت ۲۴ ساعت

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Blank		M6	
کربن	۰/۰۲	کربن	۴/۴۱
اکسیژن	۲۵/۹۸	اکسیژن	۱۳/۵۱
آهن	۷۳/۷۷	آهن	۷۹/۹۳
نیتروژن	۰/۲۳	نیتروژن	۲/۱۵

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی عملکرد ضد خوردگی عصاره آبی گیاه مریم‌نخودی روی فولاد ساده کربنی مدنظر قرار گرفت. مطابق نتایج در حضور ۵۰۰ ppm از بازدارنده درون محلول نمکی، مقاومت امپدانس نسبت به نمونه شاهد بیش از ۲ برابر شده است. همچنین نتایج آزمون الکتروشیمیایی احتمال وجود یک لایه سطحی روی نمونه‌های غوطه‌ور در حضور بازدارنده را نشان می‌دهد. آزمون‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی نیز تفاوت ماهیت اجزای سطحی را از نظر شکل ظاهری و مورفولوژی نشان داد. در نهایت نتیجه آنالیز عنصری نشان داد که لایه‌ای با مقدار قابل توجه کربن و نیتروژن روی سطح فولاد توسط مولکول‌های بازدارنده ایجاد می‌شود که به‌عنوان سدی در برابر رسیدن عوامل خورنده به سطح فلز عمل می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه صنعتی همدان بابت فراهم کردن مواد و تجهیزات مورد نیاز جهت انجام این پژوهش تشکر نموده و همچنین از انجمن خوردگی ایران بابت چاپ این پژوهش در فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] M. I. Habibullah, A. Veawab, C. L. Chen, W. F. Su, Y. H. Yu, Cysteine as an Alternative Eco-Friendly Corrosion Inhibitor for Absorption-Based Carbon Capture Plants, Materials, Vol. 19, No. 9, 2023, pp. 3496.
- [2] S. Ouchenane, R. Jalgham, S. Rezgoune, G. Roymahapatra, Electrochemical and Computational Study of Cysteine as a Green Corrosion Inhibitor of Mild Steel in Sulfuric Acid Medium, Handbook of Research on Corrosion Sciences and Engineering, 2023, pp. 405-432
- [3] P.R. Roberge, Handbook of corrosion engineering, McGraw-Hill, 2nd Edition, 2000.
- [4] M. Costa, C.B. Klein, Toxicity and Carcinogenicity of Chromium Compounds in Humans, Vol. 36, No. 2, 2006, pp. 155-163.
- [5] I. Recloux, M. Mouanga, M. Druart, Y. Paint, M. Olivier, Applied Surface Science Silica mesoporous thin films as containers for benzotriazole for corrosion protection of 2024 aluminium alloys, Appl. Surf. Sci., Vol. 346, 2015, pp. 124-133.
- [6] M. Jokar, T.S. Farahani, B. Ramezanzadeh, leaves extract (MAPLE) as a green corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 63, 2016, pp. 436-452.
- [7] M.A. Zadeh, J. Tedim, M. Zheludkevich, S. Van Der Zwaag, S.J. Garcia, Synergetic active corrosion protection of AA2024-T3 by 2D- anionic and 3D- cationic nanocontainers loaded with Ce and mercaptobenzothiazole, Corrosion Science, Vol. 138, 2018, pp. 35-45.

- [8] L.B. Coelho, D. Cossement, M. Olivier, Benzotriazole and cerium chloride as corrosion inhibitors for AA2024-T3: An EIS investigation supported by SVET and ToF-SIMS analysis, *Corrosion Science*, Vol. 130, 2017, pp. 177-189
- [9] D. Gopi, K.M. Govindaraju, L. Kavitha, Investigation of triazole derived Schiff bases as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid medium, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 40, 2010, pp. 1349-1356.
- [10] T.K. Chaitra, K.N.S. Mohana, H.C. Tandon, Thermodynamic, electrochemical and quantum chemical evaluation of some triazole Schiff bases as mild steel corrosion inhibitors in acid media, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 211, 2015, pp. 1026-1038.
- [11] A. Jmiai, B. El Ibrahim, A. Tara, M. Chadili, S. El Issami, O. Jbara, A. Khallaayoun, L. Bazzi, Application of Zizyphus Lotuse - pulp of Jujube extract as green and promising corrosion inhibitor for copper in acidic medium, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 268, 2018, pp. 102-113.
- [12] E. Kamali Ardakani, E. Kowsari, A. Ehsani, Imidazolium-derived polymeric ionic liquid as a green inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in 1.0 M HCl: Experimental and computational study, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 586, 2020, pp. 124195.
- [13] A.H. Jafari Mofidabadi, A. Dehghani, B. Ramezanzadeh, Combined clove extract bio-molecules and zinc(II) ion synergistic effects in steel corrosion mitigation in saline solution: electronic (DFT) modeling, atomic/molecular (MC/MD) simulations, and corrosion measurement, Vol. 14, 2024, pp. 9519-9539.
- [14] A. Berrissoul, A. Ouarhach, F. Benhiba, A. Romane, A. Zarrouk, A. Guenbour, B. Dikici, A. Dafali, Evaluation of Lavandula mairei extract as green inhibitor for mild steel corrosion in 1 M HCl solution. Experimental and theoretical approach, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 313, 2020, pp. 113493.
- [15] F. Sharififar, G. Dehghan-Nudeh, M. Mirtajaldini, Major flavonoids with antioxidant activity from Teucrium polium L., *Food Chemistry*, Vol. 112, No. 4, 2009, pp. 885-888.
- [16] S. Bahramikia, R. Yazdanparast, Phytochemistry and Medicinal Properties of Teucrium polium L. (Lamiaceae), *Phytotherapy Research*, Vol. 26, No. 11, 2012, pp. 1581-1593.
- [17] P. Ljubuncic, S. Dakwar, I. Portnaya, H. Azaizeh, A. Bomzon, Aqueous Extracts of Teucrium polium Possess Remarkable Antioxidant Activity In Vitro, *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, Vol. 3.3, 2006, pp. 329-338.
- [18] Gh. Hashemitabar, F. Aflakian, A. Hadad Sabzevar, Assessment of antibacterial, antioxidant, and anticancer effects of biosynthesized silver nanoparticles using Teucrium polium extract, *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1291, 2023, pp. 136076.
- [19] H. Akhavan, M. Izadi, I. Mohammadi, The Synergistic Effect of BTA-Co System on the Corrosion Inhibition of Mild Steel in 3.5 wt% NaCl Solution, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 165, 2018, pp. 670-680.
- [20] Y.H. Ahmad, W.M. Hassan, Corrosion inhibition of steel in hydrochloric acid solution using a triazole derivative: electrochemical and computational studies, *International Journal of Electrochemical Society*, Vol. 7, 2012, pp. 12456-12469.
- [21] T.S. and B.R. M. T. Majd, The role of neodymium based thin film on the epoxy/steel interfacial adhesion and corrosion protection promotion, *Applied Surface Science*, Vol. 464, 2019, pp. 516-533.
- [22] B.H. and R.B. X. Guo, Z. Feng, Entrapped molybdate in phytate film and the corresponding anodic corrosion inhibition on AA2024-T3, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 163, 2016, pp. 260.
- [23] C. Verma, A.H. Al-Moubaraki, A. Alfantazi, K.Y. Rhee, Heterocyclic amino acids-based green and sustainable corrosion inhibitors: Adsorption, bonding and corrosion control, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 446, 2024, pp. 141186.
- [24] F. Bunghez, C. Socaciu, F. Zagrean, R. Pop, F. Ranga, F. Romanciuc, Characterisation of an aromatic plant-based formula using UV-Vis Spectroscopy, LC-ESI (+) QTOF-MS and HPLC-DAD analysis, *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Food Science and Technology*, Vol. 70, 2013, pp. 16-24.
- [25] S. Xuan, Y. X.J. Wang, K.C. F. Leung, K. Shu, Synthesis of Fe₃O₄@ polyaniline core/shell microspheres with well-defined blackberry-like morphology, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol 112, 2008, pp. 18804-18809.
- [26] R. Molaei, K. Farhadi, M. Forough, A. Pourhossein, Biosynthetic Route for the Preparation of Nonregular Gold Nanoparticles Using Aqueous Extracted of Nettle (Urtica dioica L.) Plant, *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, Vol. 45, 2015, pp. 1489-1494.

[۲۷] علی حجاری، تقی شهبازی فراهانی، ایمان محمدی، سنتز رنگدانه آلی/ معدنی بر پایه لیگنوسولفونات/ روی، جهت بهبود مقاومت به

خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول ۳.۵ wt.% NaCl، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره پیاپی ۴۸، سال سیزدهم - ۳۸،

تابستان ۱۴۰۲، صفحات ۷۳ تا ۸۵.