



Research paper

(Received Nov. 10, 2023

Accepted Dec. 22, 2023)

Eucalyptus leaf essential oil as Green inhibitor of steel corrosion

Mohammad Ghasemi^{1*}, Hanie Abbaslou², Bahador Abolpour³

¹ MSc. Student, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology.

² Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

³ Department of Chemical Engineering, Sirjan University of Technology

Abstract

Corrosion inhibitor is a suitable and economical method to control the corrosion of metals in acidic environments. In this regard, green corrosion inhibitors based on plant essential oils have received a lot of attention as a usable alternative to common synthetic corrosion inhibitors, which are mostly not environmentally friendly. The presence of active compounds in eucalyptus essential oil has made it a source of green inhibitors in steel corrosion control. In this study, the inhibitory performance of eucalyptus essential oil has been investigated by extracting essential oils using steam method, electrochemical tests and surface analysis methods. Therefore, eucalyptus leaf essential oil has been used as a green inhibitor in the corrosive environment of sulfuric acid and hydrochloric acid to check the reduction of metal corrosion in this environment GC-Mass device was used to investigate the compounds present in the eucalyptus plant. The effect of steel corrosion inhibition by essential oils was investigated using weight measurement methods, electrochemical impedance spectroscopy and absorption isotherms and the results of metal immersed in acid solution with different concentrations were compared in the absence of inhibitor. The results of the tests showed that this substance has a good performance as an inhibitor and the percentage of inhibition on steel corrosion will increase with increasing concentration. The absorption of eucalyptus essential oil on steel follows the absorption isotherm and the amount of free energy of absorption indicates the spontaneous absorption of this substance with the predominance of chemical absorption on the surface.

Keywords: Eucalyptus Essential Oil, Essential Oil Extraction Method, Corrosion, Steel, Electrochemical Impedance Spectroscopy.

*Corresponding Author: Mohammad Ghasemi

Email: mohammadghaseme72@gmail.com

Phone: 03441522054

Doi: 10.48306/jumeec.2023.424688.1023



مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۱

کارایی اسانس برگ درخت اکالیپتوس به عنوان بازدارنده سبز خوردگی فولاد

محمد قاسمی^{۱*}، حانیه عباسلو^۱، بهادر ابول پور^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

^۲ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان

چکیده

بازدارنده خوردگی یک روش آسان و اقتصادی جهت کنترل خوردگی فلزات در محیط‌های اسیدی می‌باشد. در این راستا بازدارنده‌های خوردگی سبز بر پایه اسانس گیاهان به عنوان یک جایگزین مناسب بازدارنده‌های خوردگی سنتزی رایج که عمدتاً دوستدار محیط زیست نمی‌باشند، مورد توجه فراوان قرار گرفته است. حضور ترکیبات فعال در اسانس اکالیپتوس آن را به یک منبعی از بازدارنده‌های سبز در کنترل خوردگی فولاد تبدیل کرده است. در این مطالعه عملکرد بازدارندگی اسانس برگ درخت اکالیپتوس توسط روش‌های اسانس گیری با بخار و آزمون‌های الکتروشیمیایی و روش‌های تحلیل سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین اسانس برگ گیاه اکالیپتوس به عنوان بازدارنده سبز در محیط خورنده اسید سولفوریک و اسید کلریدریک، استفاده شده تا میزان کاهش خوردگی فلز در این محیط بررسی گردد. جهت دستیابی به بهترین نتیجه، نمونه اسانس تهیه و توسط دستگاه GC-Mass آنالیز شد تا ترکیبات موجود در گیاه اکالیپتوس، مورد بررسی قرار گیرد. اثر بازدارندگی خوردگی فولاد توسط اسانس با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری وزن، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و ایزوترم‌های جذب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از فلز غوطه‌ور شده در محلول اسید با غلظت‌های مختلف، در شرایط عدم حضور بازدارنده مقایسه شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این ماده عملکرد خوبی به‌عنوان بازدارنده داشته و درصد بازدارندگی روی خوردگی فولاد با افزایش غلظت افزایش خواهد یافت. جذب اسانس اکالیپتوس روی فولاد از ایزوترم جذب تبعیت کرده و مقدار انرژی آزاد جذب نشان از جذب خودبه‌خودی این ماده با غالب بودن جذب شیمیایی روی سطح را دارد.

کلمات کلیدی: اسانس اکالیپتوس، روش اسانس‌گیری، خوردگی، فولاد، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.

۱- مقدمه

خوردگی فلزات یکی از مشکلات بزرگ در سطح جهانی است؛ به طوری که تخمین زده می‌شود سالانه تقریباً ۲/۵ تریلیون دلار برای رفع مشکلات ناشی از خوردگی فلزات هزینه می‌شود. با این حال، هیچ راه فراری از زنگ زدگی وجود ندارد. خوردگی را تخریب یا فاسد شدن یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد، تعریف می‌کنند [1]. به‌عنوان یک صنعت مهم و بنیادی، تولید نفت و گاز سهم قابل توجهی از بازار را به خود اختصاص داده است. خوردگی همواره یک موضوع کلیدی در این صنعت بوده است و محققان در تلاش هستند تا به این موضوع بپردازند؛ به طوری که کاهش و جلوگیری از تأثیر آن می‌تواند از زیان‌های اقتصادی جلوگیری کند. محققان و مهندسان از روش‌های مختلفی برای محافظت از تجهیزات نفت و گاز در برابر خوردگی استفاده می‌کنند؛ برخی از این روش‌ها شامل پوشش، آستر، حفاظت کاتدی و غیره می‌باشد. روش‌های مختلفی در صنایع مختلف مورد علاقه توجه است اما استفاده از بازدارنده‌های خوردگی دارای مزایای کم‌هزینه و عملکرد ساده است؛ از طرفی عملکرد تجهیزات نیز مختل نمی‌شود. بازدارنده‌های خوردگی سبز می‌توانند مسائل زیست‌محیطی را برطرف کنند. بازدارنده‌های خوردگی سنتی با سمیت بالا باعث آسیب جبران‌ناپذیری به محیط در مراحل مختلف از فرآیند تولید این مواد تا حمل و نقل و کاربرد می‌شوند. توسعه بازدارنده‌های خوردگی سازگار با محیط‌زیست برای کاهش میزان تأثیر منفی بر محیط‌زیست مهم است. بازدارنده‌های خوردگی سبز به تنهایی قابل استفاده هستند؛ همچنین امکان ترکیب بازدارنده‌های خوردگی سبز با بازدارنده‌های خوردگی سنتی وجود دارد [1].

انواع مختلفی از بازدارنده‌های سازگار با محیط‌زیست وجود دارد که شامل بازدارنده‌های خوردگی آلی، بازدارنده‌های خوردگی معدنی و بازدارنده‌های خوردگی پلیمری می‌شوند؛ همچنین بر اساس روش‌های تهیه، این بازدارنده‌ها را می‌توان به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی طبیعی و بازدارنده‌های خوردگی مصنوعی طبقه‌بندی کرد. بازدارنده‌های خوردگی سبز از محصولات طبیعی استخراج می‌شوند یا از محصولات طبیعی (به عنوان مواد اولیه) تهیه می‌شوند و برخی از بازدارنده‌های خوردگی آلی و بازدارنده‌های خوردگی پلیمری در این دسته قرار می‌گیرند. برگ‌ها، گل‌ها، میوه‌ها، دانه‌ها، پریکارپ (Pericarp) یا سایر قسمت‌های گیاهان می‌توانند منبع مواد بازدارنده مؤثر باشند [2,3].

محققان از برخی اسانس‌های گیاهی برای تولید بازدارنده‌های خوردگی استفاده کرده‌اند و در این راستا گیاه مرکبات، چای، آفتابگردان و غیره اثرات خوبی از خود نشان می‌دهند. مزیت استفاده از اسانس‌های گیاهی این است که غیرسمی و ارزان بوده و به‌راحتی قابل تهیه هستند. بنابراین می‌توان از آنها در این زمینه به‌عنوان شیمی سبز استفاده کرد [4]. روش‌های استخراج مواد مؤثر برای بازدارنده‌های خوردگی سبز از گیاهان شامل روش‌های خیساندن، رفلاکس حرارتی، هیدرولیز آنزیمی، استخراج سوکسله و روش‌های استخراج اولتراسونیک است. بازده استخراج اجزای فعال به حلال مورد استفاده، دمای استخراج، دمای خشک کردن، زمان استخراج، نسبت جامد مایع و غیره بستگی دارد.

یکی از بهترین روش‌های شناخته شده برای حفاظت از خوردگی فلزات استفاده از بازدارنده‌ها می‌باشد. بازدارنده‌ها موادی می‌باشند که با سطح فلز یا محیطی که سطح در معرض آن قرار دارد، برهمکنش نشان می‌دهد و از طریق دو فرایند جذب فیزیکی و جذب شیمیایی به سطح فلز متصل می‌شود که در نهایت میزان مشخصی حمایت از سطح به عمل می‌آورند. بازدارنده‌های که به طور متداول در این صنعت از آنها استفاده می‌شود، شامل بازدارنده‌های شیمیایی هستند [1].

اسیدهای آمینه، پلی‌ساکاریدها، فلاونوئیدها و غیره که حاوی O، N، S و سایر اتم‌های دارای جفت الکترون مشترک هستند، پیوندهای داتیو را با اوربیتال‌های خالی (d^2) موجود در سطح نمونه تشکیل می‌دهند تا از تماس بین نمونه‌ها جلوگیری کنند. این موضوع به دنبال فرآیند جذب فیزیکی به دست می‌آید و گروه‌های عاملی قطبی مانند هیدروکسیل، کربوکسیل، کربونیل و ... نقش مراکز جذب سطحی را ایفا می‌کنند. این فرآیند همچنین حلالیت مواد مؤثر بازدارنده خوردگی را بهبود می‌بخشد [5].

با توجه به اهمیت اقتصادی خوردگی فلزات در صنایع مختلف، همواره تلاش می‌شود تا بازدارنده‌های ارزان‌قیمت و از طرفی دوستدار محیط‌زیست معرفی شود [6,7,8]. لذا در این تحقیق از اسانس گیاه برای بازدارگی از خوردگی فولاد استفاده شده است. روش به دست آوردن اسانس این گیاه ارزان و غیرسمی است لذا علاوه بر جنبه اقتصادی آن، از نظری ایمنی و حفظ محیط‌زیست نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با تحقیق در این زمینه می‌توان امیدوار بود که از اسانس‌ها در صنعت بازدارگی از خوردگی فلزات در سطح وسیعی استفاده شود و این ترکیبات سبز و بی‌خطر جایگزین ترکیبات سمی و خطرناک بازدارنده‌های شیمیایی شوند. از این رو در تحقیق حاضر، انتخاب

بهترین روش از لحاظ کارایی و اقتصادی در خوردگی فولاد با گیاه بومی اکالیپتوس در منطقه سیرجان دارای تولید فولاد برای اولین بار در حال بررسی می‌باشد.

با توجه به جمیع موارد ذکر شده، استفاده از بازدارنده‌های سبز با توجه به وفور منابع طبیعی مقرون‌به‌صرفه است و در عین حال این ترکیبات غیرسمی و سازگار با محیط‌زیست می‌باشند. استفاده از بازدارنده‌های خوردگی به علت هزینه پایین و کارایی بالا مورد توجه بسیاری از محققین به‌عنوان یکی از روش‌های عملی کنترل خوردگی قرار گرفته است. بازدارنده‌ها به طور عمومی موادی هستند که با سازوکارهای مختلف هم می‌توانند از خوردگی محیط بکاهند و هم با تشکیل فیلم محافظ بر روی سطح فلز از ورود مواد خوردنده به سطح جلوگیری کنند و باعث به تعویق انداختن خوردگی فلزات شوند. به طور کلی اهداف این تحقیق شامل (۱) بررسی اثر روش اسانس‌گیری برگ گیاه اکالیپتوس بومی سیرجان در بازدارندگی خوردگی فولاد، (۲) ارائه روشی برای جلوگیری از خوردگی فلزات، (۳) بررسی خوردگی فولاد در شرایط اسیدی، (۳) مقایسه خوردگی فولاد در شرایط اسیدی در حضور و عدم حضور اسانس گیاهی، و (۴) مقایسه غلظت‌های مختلف اسانس گیاه برگ اکالیپتوس در بازدارندگی خوردگی فولاد می‌باشد.

۲- روش کار

۱-۲- نمونه برداری

برای این تحقیق از برگ گیاه اکالیپتوس مخصوص منطقه سیرجان استان کرمان (گونه *E. Cmaldulensis*)، جمع‌آوری و تحت شرایط سایه و بدون رطوبت خشک شد.

۲-۲- اسانس‌گیری

تقطیر با بخار فرآیندی است که در آن غلظت و جداسازی اسانس از منابع طبیعی به‌صورت مطمئن و اغلب ارزان‌تر انجام می‌شود. روش بخار تکنیک مهمی است و کاربردهای تجاری قابل‌توجهی دارد که طی آن، بسیاری از ترکیبات اعم از جامد و مایع با بهره‌گیری از فراریت آن‌ها در بخار از مخلوط‌های پیچیده جدا می‌شوند. در روش بخار، نقطه جوش محصولات به‌حدی به حداقل می‌رسد که به اجزای تشکیل‌دهنده اجازه بخار شدن می‌دهد. فشار بخار اعمال‌شده توسط مایعات که تابعی از دماست، از نظر قدرت متفاوت است. جوش مایعات در یک زمان مشخص اتفاق می‌افتد و نقطه جوش محصولات طبیعی به شکل مایع از فشار اتمسفر فراتر می‌رود. در نتیجه فشار بخار کل سیستم افزایش می‌یابد.

تقطیر با بخار فرآیندی است که برای استخراج اسانس از مواد ارگانیک گیاهی با عبور بخار تولید شده از مواد گیاهی استفاده می‌شود. معمولاً یک محفظه توسط سوراخ‌هایی در پایین پر می‌شود تا بخار با گیاهان تازه یا خشک‌شده از آن خارج گردد. ترکیبات حساس به دما که معمولاً از طریق تقطیر ساده تجزیه می‌شوند، در دمای پایین‌تر وقتی در ستون تقطیر تحت بخار قرار می‌گیرند، تبخیر می‌شوند. این کار اجازه می‌دهد تا اسانس‌ها را که تمایل به حل شدن کمتری در آب جوش دارند، از مواد شیمیایی پیچیده جدا کنند. هنگامی که بخار از مواد ارگانیک عبور می‌کند، جیب‌های کوچکی که اسانس‌ها را باز نگه می‌دارند تا مولکول‌های اسانس را بدون آسیب‌رساندن به این اجزای ظریف آزاد کنند. یک درب از پخش شدن اسانس در هوا در هنگام اعمال بخار به آن جلوگیری می‌کند. تقطیر به‌دست‌آمده حاوی مخلوطی از بخار آب و اسانس است که در دستگاه متراکم به حالت مایع باز می‌گردد. قطرات آب و اسانس متراکم‌شده، جمع‌آوری شده و آن‌ها را از طریق فیلتری هدایت می‌کنند که آب را از اسانس جدا می‌کند.

۲-۳- آنالیز با GC-MS

دستگاه آنالیز GC-Mass (Gas Chromatography) از دو قسمت کروماتوگرافی گازی (GC) و طیف‌سنج جرمی (MS) تشکیل شده است، در این روش اجزای یک مخلوط بعد از جداسازی با کروماتوگرافی گازی در دستگاه طیف‌سنج جرمی، شناسایی می‌شوند. کروماتوگرافی گازی دارای شش قسمت اصلی منبع جریان گاز حامل، انژکتور، آون، ستون، آشکارساز و ثبات است. بطور خلاصه فرآیند یک آنالیز کروماتوگرافی گازی بدین صورت است که محلولی از نمونه مورد نظر توسط یک میکروسرنج به درون محفظه داغ انژکتور با دمای ۳۰۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تزریق می‌شود؛ نمونه در تماس با دمای بالای انژکتور بلافاصله تبخیر شده و به همراه جریان گاز حامل به سوی ستون هدایت می‌شود و ستون در آونی قرار دارد که دمای آن با دقت و حساسیت فوق‌العاده زیاد تنظیم و تثبیت می‌گردد.

پس از خارج شدن هر جزء از ستون و رسیدن آن به آشکارساز یک سیگنال الکتریکی تولید می‌شود که شدت آن متناسب با مقدار کمی آن جزء است. در نهایت یک کروماتوگرام رسم می‌گردد که پاسخ‌های آشکارساز به اجزاء نمونه بر حسب زمان خروج اجزا از ستون می‌باشد. در تحقیق حاضر برای شناسایی ترکیب‌های اسانس گیاه اکالیپتوس از دستگاه‌های کروماتوگرافی گازی (GC) و کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنج جرمی (GC-MS) مدل Agilent- GC7890-MS5975 ساخت کشور آمریکا استفاده شد. پس از تزریق اسانس به دستگاه‌های فوق با استفاده از زمان بازداری ترکیب‌ها، شاخص بازداری کواتس (KI) و طیف‌جرمی و همچنین مقایسه این مولفه با ترکیب‌های استاندارد و یا با اطلاعات موجود در کتابخانه دستگاه، نسبت به شناسایی ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس اقدام گردید. درصد کمی این ترکیب‌ها، با محاسبه سطوح زیر منحنی در کروماتوگرام محاسبه شد.

۲-۴-آزمایش خوردگی

در تحقیق حاضر به منظور ایجاد شرایط خوردگی، غلظت‌های مختلف اسانس اکالیپتوس در محیط اسید کلریدریک ۱ مولار و اسید سولفوریک ۰/۵ مولار قرار داده شد.

۲-۵-ارزیابی رفتار خوردگی با روش اندازه‌گیری وزن

آزمون‌های کاهش وزن برای نمونه‌های فولادی انجام شد. به منظور انجام این آزمون، نمونه‌ها به صورت ورق در ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر با ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه شده و سطح آن‌ها با سنباده صیقل داده شدند. سپس نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک و اسید کلریدریک با غلظت‌های مختلف از بازدارنده اسانس گیاه اکالیپتوس تهیه شده است، مخلوط شده و پس از گذشت زمان ۶ ساعت، تغییرات وزن ورقه‌های فولادی هر نمونه اندازه‌گیری شدند.

برای محاسبه درصد مهار $E\%$ در روش کاهش وزن، از فرمول شماره ۱ استفاده می‌شود:

$$E\% = 100 * (1 - W_{or} / W_{corr}) \quad (1)$$

که در آن W_{or} و W_{corr} کاهش وزن نمونه‌های فولادی هستند که به ترتیب با و بدون بازدارنده می‌باشند.

۲-۶-ارزیابی رفتار خوردگی با روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (Electrochemical Impedance Spectroscopy-EIS) روشی کارآمد و پرکاربرد و از قدرتمندترین روش‌ها در مطالعه خوردگی است. از روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی می‌توان برای اندازه‌گیری نرخ یا سرعت خوردگی، پایش خوردگی، تعیین یکپارچگی پوشش و مطالعه بر روی مکانیزم واکنش‌ها استفاده کرد. روش کار این مدل بدین ترتیب است که در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی یک سیگنال تحریک متناوب که عموماً از نوع پتانسیل است، به نمونه داده می‌شود.

$$E = A \sin(\omega t) \quad (2)$$

نمونه با سیگنال ورودی تحریک شده به آن پاسخ می‌دهد و بر مبنای تحلیل این پاسخ، اطلاعات بسیار مفیدی از رفتار خوردگی یک ماده می‌توان به دست آورد. پاسخ سیستم در مقابل سیگنال پتانسیل داده شده از نوع جریان متناوب است.

$$I = B \cos(\omega t) \quad (3)$$

در نهایت بر مبنای پاسخ گرفته شده و پتانسیل اعمال شده، میزان مقاومت با امپدانس سیستم تعیین می‌گردد و از روی آن سرعت خوردگی محاسبه می‌گردد.

به این ترتیب پارامترهای الکتروشیمیایی در دو حالت جداگانه بر روی فولاد غوطه‌ور در اسید کلیدریک ۱ مولار و اسید سولفوریک ۵. مولار در غلظت‌های مختلف اسانس اکالیپتوس مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج به‌دست‌آمده از خوردگی فولاد در هر دو روش، از جهت تاثیر نوع اسید و غلظت‌های متفاوت اسید به همراه بازدارنده مورد مقایسه قرار گرفت.

۷-۲- بررسی ایزوترم‌های جذب

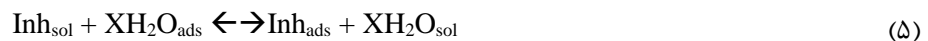
برخی از متداول‌ترین مدل‌های ارائه شده برای ایزوترم‌های جذب عبارتند از: ایزوترم جذب لانگمویر، ایزوترم جذب BET، ایزوترم جذب تمکین و ایزوترم جذب فروندلیش.

به منظور بررسی درجه پوشش سطح، از هم‌دمای جذب سطحی استفاده شد [9]. معادلات متعددی جهت بیان رابطه بین مقدار جذب یک ترکیب به‌وسیله فاز جامد و غلظت آن در محلول در حالت تعادل مورد استفاده قرار می‌گیرد که معروف‌ترین آن‌ها بصورت ریاضی معادله لانگمویر در رابطه ۴ می‌باشد [10].

$$q = (q_m \cdot k_L \cdot C) / (1 + k_L \cdot C) \quad (۴)$$

معادله لانگمویر جهت جذب بر روی سطوح کاملاً یکنواخت همراه با قابلیت چشم‌پوشی از برهم‌کنش بین مولکول‌های جذب‌شونده به‌کار می‌رود [10].

مولکول‌های بازدارنده و آب برای واکنش با مکان‌های فعال سطح فلز با یکدیگر رقابت می‌کنند. رابطه ۵ فرایند جابجایی مولکول‌های آب از طریق مولکول بازدارنده بر روی سطح فولاد را بیان می‌کند [11].



که در آن X نشان دهنده تعداد مولکول‌های آب جابجا شده توسط مولکول بازدارنده است. رابطه ۶ توضیح دیگر این ایزوترم می‌باشد.

$$\text{Langmuir: } C_{\text{inh}}/X = 1/K_{\text{ads}} + C_{\text{inh}} \quad (۶)$$

که در آن X مقدار پوشش سطح، C_{inh} غلظت بازدارنده و K_{ads} ثابت واکنش مولکولی است. در واقع ایزوترم جذب، فعل و انفعالات مولکول‌های بازدارنده در سایت‌های فعال بر روی سطح فولاد را توصیف می‌کند. ضریب پوشیدگی سطح فلز (Y) را می‌توان از فرمول ۷ محاسبه کرد:

$$Y = (V_0 - V_{\text{inh}}) / V_0 \quad (۷)$$

مقدار پوشاندگی سطح فاز (Y) در دیگر ایزوترم‌ها مقادیر متفاوتی می‌باشد. در رابطه ۷ مقدار V_0 حجم اولیه، و مقدار V_{inh} حجم نهایی می‌باشد. طبق بحث‌های قبلی، ایزوترم لاگمویر بهترین توصیف را از جذب اسانس بر روی سطح فلز ارائه می‌کند. همان‌طور که گفته شد، رابطه دیگری که علاوه بر رابطه ۴ برای ایزوترم لاگمویر وجود دارد، رابطه ۶ می‌باشد؛ بسته به شرایط آزمایش و فرایند جذب، از هر یک از آنها استفاده می‌شود. (رابطه ۸ همان رابطه ۶ می‌باشد که در آن بجای X از Y استفاده شده است).

$$C/Y = 1/K_{\text{ads}} + C \quad (۸)$$

مقدار K ثابت تعادل جذب در فرایند جذب می‌باشد. در نمودار ایزوترم که به صورت تابعی خطی از C/Y بر حسب C می‌باشد و ضریب پوشاندگی (R) را برای بررسی همسازگاری با نمودار ایزوترم استفاده می‌کنند، ضریب پوشاندگی نشان می‌دهد که جذب اسانس گیاه اکالیپتوس بر روی سطح فلز از ایزوترم لاگمویر تبعیت می‌کند [11].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصات اسانس

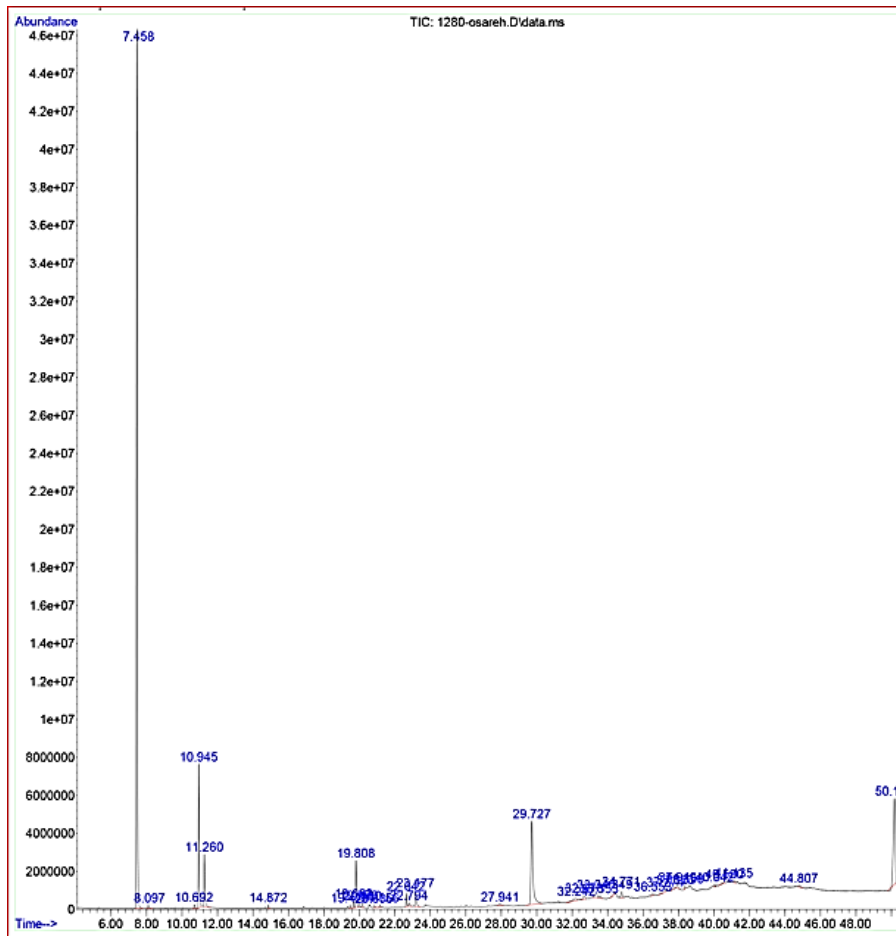
برای شناسایی ترکیب‌های اسانس از دستگاه‌های کروماتوگرافی گازی (GC) و کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنج جرمی (GC-MS) استفاده شد؛ پس از تزریق اسانس به دستگاه‌های فوق با استفاده از زمان بارگذاری ترکیب‌ها، شاخص بازداری کوتاس (KI) و طیف‌جرمی و همچنین مقایسه این مولفه‌ها با ترکیب‌های استاندارد و یا با اطلاعات موجود در کتابخانه دستگاه، نسبت به شناسایی ترکیب‌های تشکیل دهنده اسانس اقدام گردید و درصد کمی این ترکیب‌ها با محاسبه سطوح زیر منحنی در کروماتوگرام‌ها محاسبه شد [12].

کروماتوگرام اسانس گرفته‌شده با روش بخار بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، بر روی ستون DB-I در شکل ۱ نشان داده شده است. ترکیب‌های شناسایی شده در اسانس گیاه اکالیپتوس گونه منطقه سیرجان که با روش بخار بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده، به همراه شاخص کیفیت هر عنصر و نیز درصد هر یک از ترکیبات در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج جدول ۱ در روغن اسانس گیاه اکالیپتوس، با توجه به اینکه مهمترین ترکیب اصلی این اسانس، ۱-۸-سینئول (با کیفیت ۹۸) می‌باشد که ۵۴/۳۹ درصد ترکیب اسانس را تشکیل می‌دهد. از این رو می‌توان این روش اسانس‌گیری را قابل قبول دانست. از ترکیبات با کیفیت بالا در این اسانس می‌توان به موارد زیر اشاره کرد؛ پی‌منت (۹۸) که ۷/۵۸ درصد اسانس، ترپینول (۹۶) که ۳/۲۲ درصد اسانس، گلوبول (۹۸) که ۲/۶۰ درصد اسانس، ۲-اتیل هکسیل (۹۰) که ۱۲/۶۹ درصد اسانس، اکزو-آلفا یلانگل (۸۳) که ۱/۴۳ درصد اسانس، دوکوسان (۹۳) که ۲/۰ درصد اسانس، ۲۰-متیل (۴۷) که ۱۲/۶۲ درصد اسانس و بیشترین درصد ترکیب در این اسانس، بعد از ۱-۸-سینئول (با کیفیت ۹۸) می‌باشد که ۵۴/۳۹ درصد اسانس، ۲-اتیل هکسیل (۹۰) که ۱۲/۶۹ درصد اسانس را تشکیل می‌دهند.

ترکیب‌های شناسایی شده در این اسانس که با روش بخار بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است، نشان می‌دهد که با توجه به تعداد کم ترکیبات، اما درصد به نسبت بالای ۱-۸-سینئول یا همان اوکالیپتول، با درصد ۵۴/۳۹ که درصد خیلی خوبی در گیاه اکالیپتوس می‌باشد، با کیفیت ۹۸ در اسانس موجود می‌توان از این روش اسانس‌گیری برای خوردگی فلزات استفاده کرد. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است، کل زمان اسانس‌گیری در این روش نیز حدود ۵۰ دقیقه صورت می‌گیرد که از دیگر روش‌های اسانس‌گیری بیشتر بوده و با توجه به زمان بالا، تعداد ترکیبات کمتری نسبت به بقیه روش‌های اسانس‌گیری به دست آمده است که این موضوع باعث می‌شود روش بخار زیر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کارایی بهتری نسبت به این روش اسانس‌گیری داشته باشد. البته عنصر ۱-۸-سینئول در حدود همان ۸ دقیقه به دست می‌آید.

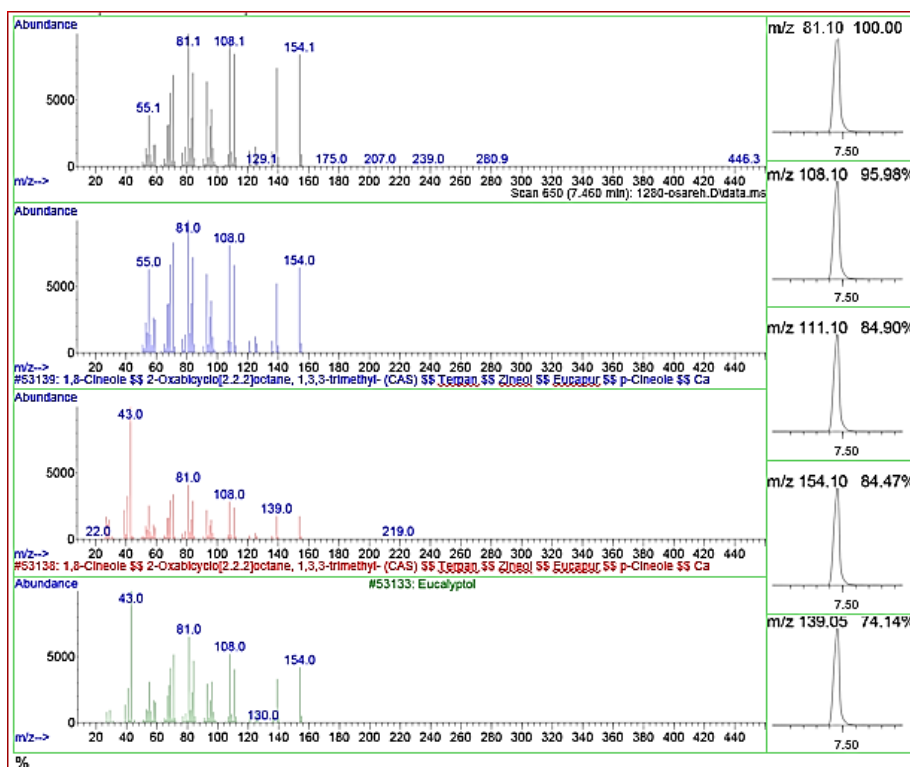
جدول ۱- ترکیبات شیمیایی اسانس اکالیپتوس منطقه سیرجان با استفاده از روش بخار

شماره رجیستری*	کیفیت	نام	سطح (درصد)
000470-82-6	98	1,8-Cineole	54/39
000562-74-3	98	p-Menth-1-en-4-ol	7/58
000098-55-5	96	Terpineol	3/22
077171-55-2	99	(+) spathulenol	0/35
000489-41-8	98	(-)-Globulol	2/60
000000-00-0	44	Neoisolongifolene, 8-oxo-	0/69
000000-00-0	83	(+)-OXO-.ALPHA.-YLANGENE	1/43
000117-81-7	90	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	12/69
055401-55-3	87	11-n-Decylidocosane	0/79
000629-97-0	93	Docosane	2/00
000112-95-8	96	Eicosane	0/30
000117-81-7	83	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	0/76
054411-87-9	47	Pregn-20-en-3-ol, 20-methyl-, (3.beta.,5.alpha.)-	12/62



شکل ۱- کروماتوگرام اسانس گیاه اکالیپتوس منطقه سیرجان با روش بخار

طبق شکل ۱ مشاهده می‌شود که پهن‌شدگی تمامی عناصر بسیار کم بوده که نشان از انتقال جرم بهتر می‌باشد. با مقایسه این شکل با شکل‌های قبل مشاهده می‌شود با توجه به سطح زیر پیک در نمودارها، غلظت به دست آمده در این حالت نیز کم می‌باشد. بنابراین در شکل ۱ که نمودار کروماتوگرام اسانس اکالیپتوس با روش بخار بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، تعداد ترکیبات موجود در این روغن اسانس اکالیپتوس، با توجه به نمودار کروماتوگرام بالا می‌باشد؛ با مشاهده شکل ۱ می‌توان دید که پهن‌شدگی بسیار کم بوده که نشان از انتقال جرم بهتر می‌باشد؛ و از آنجا که شدت هر پیک با مقدار کمی آن جزء در ترکیب متناسب است، در نتیجه بیشترین شدت در نمودار ۵۰/۱۰ می‌باشد که با توجه به قله این پیک کیفیت متوسطی دارد؛ در این نمودار مشاهده می‌شود که تعداد عناصر با شدت بالای ۳۰ زیاد بوده و مقدار کمی این عناصر تقریباً نزدیک به هم می‌باشد. در نتیجه درصد جذب عناصر در این اسانس به نسبت متوسط بوده است. میزان فراوانی عناصر نیز در حد متوسط بوده است. بالاترین کیفیت در این اسانس در دقیقه حدود ۱۱ با میزان ۷/۴۵۸ اتفاق افتاده است. از آنجا که سطح زیر پیک‌ها، بسیار کم می‌باشد، در نتیجه غلظت این نمونه به نسبت کم است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، کل زمان اسانس‌گیری در این روش حدود ۵۰ دقیقه صورت می‌گیرد که از دیگر روش‌های اسانس‌گیری بیشتر بوده است و با توجه به زمان بالا، تعداد ترکیبات نسبتاً بیشتری انتظار می‌رود.



شکل ۲- نمودار طیف‌سنج جرمی، عنصر ۸۱-سینئول از ترکیب اسانس اکالیپتوس منطقه سیرجان در روش بخار

همان‌طور که گفته شد مهم‌ترین عنصر، ۸۱-سینئول می‌باشد با استفاده از شکل ۲، با داشتن نسبت جرم به بار که روی هر شاخه نوشته شده است، یون مربوط به آن را پیدا کرده و با داشتن جرم اتمی ایزوتروپ‌ها و فراوانی نسبی آن‌ها، جرم اتمی متوسط این عنصر قابل محاسبه است. در نتیجه با توجه به شکل ۲، ۵ قله (پیک) در طیف وجود دارد و به این معنی است که از این عنصر، ۵ ایزوتروپ طبیعی خواهیم داشت و همچنین بلندی پیک، فراوانی نسبی هر ایزوتروپ را نسبت به دیگری نشان می‌دهد؛ در نتیجه مشاهده می‌شود که در دقیقه ۷/۵ این آزمایش، این عنصر یعنی ۸۱-سینئول، ۱۰۰٪ ایزوتروپ با جرم اتمی ۸۱/۱۰، ۹۵/۹۸٪ ایزوتروپ با اتم جرمی ۱۰۸/۱۰، ۸۴/۹۰٪ ایزوتروپ با جرم اتمی ۱۱۱/۱۰، ۸۴/۴۷٪ ایزوتروپ با جرم اتمی ۱۵۴/۱۰ و ۷۴/۱۴٪ ایزوتروپ با جرم اتمی ۱۳۹/۰۵ وجود دارد. در نتیجه با توجه به مساحت زیر منحنی درصد فراوانی این عنصر ۵۲/۳۸٪ به‌دست می‌آید. البته میزان فراوانی این عنصر با توجه به بلندی هر شاخه، بالا بوده در نتیجه با توجه به درصد بالای این عنصر در ترکیب اصلی، این نمونه برای ادامه آزمایش ما که بازدارندگی خوردگی فلز می‌باشد، بسیار مناسب به نظر می‌رسد. با توجه به درصد خوب این عنصر در این نمونه برای آزمایش خوردگی قابل قبول می‌باشد.

۳-۲- تحلیل خوردگی با اسانس

داده‌های مربوط به کاهش وزن برای فولاد در اسید کلریدریک ۱ مولار با اسانس اکالیپتوس که از روش بخار به‌دست آمده و در دمای محیط که برای ۶ ساعت در محلول غوطه ور بوده، در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ هر چه حجم اسانس اکالیپتوس در لیتر بیشتر می‌شود، میزان کاهش وزن فلز نیز کمتر شده است تا جایی که مقدار اسانس اکالیپتوس ۳ میلی‌لیتر در لیتر محلول می‌رسد؛ مقدار کاهش وزن فلز به ۰/۱۴ میلی‌گرم کاهش می‌یابد که نشان از خوردگی کمتر فلز نسبت به حالت بدون اسانس اکالیپتوس است.

جدول ۲- داده‌های کاهش وزن و عملکرد بازداری برای فولاد در اسید با اسانس اکالیپتوس

کاهش وزن W (mg/cm ² h)	حجم اسانس اکالیپتوس (ml/L)
۰/۳۲	۰
۰/۲۸	۰/۵
۰/۲۶	۰/۸
۰/۲۰	۱
۰/۱۶	۲
۰/۱۴	۳

در جدول ۳ پارامتر E_{corr} پتانسیل خوردگی و راندمان بازدارندگی E (%) می‌باشد. بررسی این نتیجه نشان می‌دهد که در حضور بازدارنده، مقدار چگالی خوردگی کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که هر چه غلظت اسانس از ۱ میلی‌لیتر به ۶ میلی‌لیتر در یک لیتر محلول اسید کلریدریک ۱ مولار و آب مقطر افزایش می‌یابد، درصد بازدارندگی E (%) بیشتر می‌شود تا جایی که در حالت اسانس ۱ میلی‌لیتر در ۱ لیتر محلول درصد بازدارندگی ۴۶٪ است و زمانی که مقدار اسانس به ۶ میلی‌لیتر در ۱ لیتر محلول افزایش می‌یابد، درصد بازدارندگی به ۸۴٪ می‌رسد؛ این رفتار نشان‌دهنده توانایی اسانس گیاه اکالیپتوس در مهار خوردگی فولاد در محلول ۱ مولار اسید کلریدریک است.

جدول ۳- پارامترهای الکتروشیمیایی برای فولاد در اسید ۱ مولار کلریدریک در غلظت‌های مختلف اسانس اکالیپتوس منطقه سیرجان در

دمای محیط				
بازدارندگی E (%)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	β_c (mV/dec)	E_{corr} (mV)	بازدارنده
-	۳۰۷	-۱۷۵	-۴۴۱	شاهد (اسید کلریدریک 1 (M)
۴۶	۱۶۶	-۱۷۵	-۴۰۶	اسید+ اسانس 1 ml/L
۵۷	۱۳۳	-۱۷۶	-۴۰۲	اسید+ اسانس 2 ml/L
۶۸	۹۸	-۱۷۴	-۴۲۱	اسید+ اسانس 3 ml/L
۷۴	۶۲	-۱۷۶	-۴۲۷	اسید+ اسانس 4 ml/L
۸۴	۴۴	-۱۶۹	-۴۳۳	اسید+ اسانس 6 ml/L

نتایج پژوهش در این قسمت با نتایج پژوهش‌های التره و همکاران [13]، بهپور [14]، استغن و ادبایو [15]، بانو و همکاران [16]، حسن‌نژاد و نوری [17]، علی‌بخشی و همکاران [18]، بهلکه و همکاران [19] و دهقانی و همکاران [20]، نعمتین و همکاران [21] همسو می‌باشد که در آن‌ها تاثیر بازدارنده‌های سبز بر خوردگی فولاد در محیط اسید کلریدریک بررسی و تایید شده‌اند.

پارامتر الکتروشیمیایی را بر روی فولاد در اسید ۰/۵ مولار سولفوریک در غلظت‌های مختلف اسانس اکالیپتوس در دمای محیط مورد مطالعه قرار داده و نتیجه آزمایش حاصل در جدول ۴ آورده شده است.

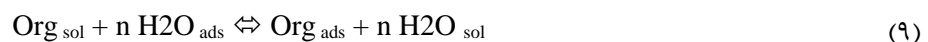
مشاهده می‌شود که در محلول اسانس با میزان ۱/۵ میلی‌لیتر، درصد بازدارندگی ۶۰/۳٪ می‌باشد و هر چه میزان اسانس بیشتر می‌شود، درصد بازدارندگی کمتر می‌شود تا جایی که در محلول با ۶ میلی‌لیتر اسانس، درصد بازدارندگی به ۸۱٪ می‌رسد. با مقایسه دو جدول ۳ و ۴ که در یکی غلظت اسید کلریدریک ۱ مولار و در دیگری غلظت اسید سولفوریک ۰/۵ مولار می‌باشد؛ مشاهده می‌شود که درصد بازدارندگی در تمامی غلظت‌های اسانس تا زیر ۳ میلی‌لیتر برای اسید سولفوریک ۰/۵ مولار بهتر می‌باشد. اما در اسانس ۴ و ۵ میلی‌لیتر درصد بازدارندگی برای هر دو حالت تقریباً یکسان است که به این معنی است که در اسانس ۴ یا ۵ میلی‌لیتر، مهم نیست اسید

نیم مولار یا یک مولار باشد، اسانس بر روی فولاد کارایی یکسانی دارد. جالب توجه است که هنگامی میزان اسانس به ۶ میلی لیتر می رسد؛ در این حالت درصد بازدارندگی بر روی فولادی که در محلول ۱ مولار اسید غوطه ور است، بیشتر از حالتی است که اسید محلول نیم مولار باشد که این نشان می دهد در مقادیر بالای اسانس در محلول خورنده فولاد، کارایی اسانس بسیار بهتر جواب می دهد و حتی اگر میزان خوردندگی بیشتر باشد، درصد کارایی اسانس نیز بالا می رود. به هر حال در هر دو حالت با افزایش میزان اسانس درصد خوردندگی فولاد به نسبت بسیار زیادی کاهش یافته است. در مقدار بیشتر اسانس در محلول بازدارنده حاوی اسید، با توجه به میزان افزایش خوردندگی و افزایش اسید، اسانس نیز کارایی بالاتری از خود بروز می دهد و درصد بازدارندگی و مهار خوردندگی افزایش می یابد.

جدول ۴- پارامترهای الکتروشیمیایی برای فولاد در اسید نیم مولار سولفوریک در غلظت های مختلف اسانس اکالیپتوس منطقه سیرجان در

دمای محیط				
بازدارندگی E (%)	I _{corr} (μA/cm ²)	β _c (mV/dec)	E _{corr} (mV)	بازدارنده
-	۱۷/۹	۱۴۱/۸	-۶۶۳	شاهد (اسید سولفوریک (0.5 M)
۶۰/۳	۰۷/۱	۱۰۰/۷	-۶۲۹	اسید+ اسانس 1.5 ml/L
۶۴/۸	۰۶/۳	۱۰۵/۵	-۶۳۳	اسید+ اسانس 2 ml/L
۶۸/۲	۰۵/۷	۹۲/۵	-۶۲۴	اسید+ اسانس 3 ml/L
۷۴/۳	۰۴/۶	۱۹۲/۲	-۶۳۶	اسید+ اسانس 4 ml/L
۸۱/۰	۰۳/۴	۱۴۵/۷	-۶۴۰	اسید+ اسانس 6 ml/L

نتایج پژوهش در این قسمت با نتایج پژوهش های لی و همکاران [4]، سین و همکاران [22]، بهلکه و همکاران [19] و دهقانی و همکاران [20] همسو می باشد که در آن ها تاثیر بازدارنده های سبز بر خوردندگی فولاد در محیط اسید کلریدریک بررسی و تایید شده اند. به خوبی ثابت شده است که اولین مرحله در مهار خوردندگی فلزات و آلیاژها، جذب مولکول های بازدارنده آلی در سطح مشترک فلز و محلول است؛ جذب سطحی بستگی به ترکیب شیمیایی مولکول، دما و پتانسیل الکتروشیمیایی در مخلوط، فلز و محلول دارد. مولکول های آب حلال می توانند در سطح مشترک فلز و محلول جذب شوند، بنابراین جذب مولکول های بازدارنده آلی از محلول آبی را می توان به عنوان یک شبه در نظر گرفت. به این ترتیب که فرآیند جایگزینی بین ترکیبات آلی در فاز آبی [org sol] و مولکول های آب در سطح الکترواد [H₂O_{ads}] به صورت رابطه ۹ است:



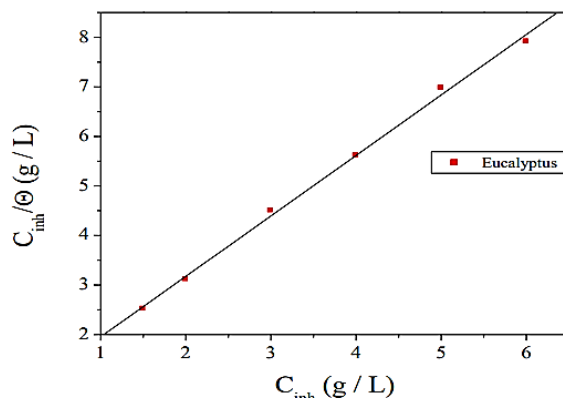
که در آن Org_{ads} و Org_{sol} گونه های آلی هستند که در محلول آبی حل شده و جذب می شوند. H₂O_{ads} مولکول آب است که روی سطح فلزی جذب شده و n نسبت اندازه است که نشان دهنده تعداد مولکول های آبی است که با یک جاذب آلی جایگزین شده اند. اطلاعات مربوط به جذب بازدارنده ها روی سطح فلز را می توان با ایزوترم جذب ارائه کرد. برای به دست آوردن ایزوترم، مقادیر پوشش سطح کسری اکسیژن به عنوان تابعی از بازدارنده غلظت باید به دست آید. مقادیر اکسیژن را می توان به راحتی از کاهش وزن تعیین کرد. اندازه گیری ها با نسبت 100% E_w محاسبه می شود که E_w در آن راندمان مهار (بازداری) به دست آمده با روش کاهش وزن است. بنابراین لازم است که به طور تجربی مشخص شود که کدام ایزوترم برای جذب بازدارنده ها در سطح فولادی در بین چندین ایزوترم جذب (یعنی فرمکین، لانگمویر، تمکین، فروندلیچ) بهترین برای مورد آزمایش قرار گرفتن است. ایزوترم جذب لانگمویر برای ارائه، بهترین توصیف از جذب می باشد که رفتار این بازدارنده ایزوترم لانگمویر با معادله ۱۰ به دست می آید:

$$C_{\text{inh}} / O = 1 / K_{\text{ads}} + C_{\text{inh}} \quad (10)$$

که در این معادله C_{inh} غلظت بازدارنده، K_{ads} ثابت تعادل فرایند جذب و O پوشش سطح است. همان طور که در شکل ۴-۱۴ مشخص است، نمودار C_{inh}/O در مقابل C_{inh} یک خط مستقیم است، با ضریب رگرسیون R که تقریباً برابر ۱ گرفته شده است. این نشان می‌دهد که اسانس اسانس اکالیپتوس در مطالعه حاضر از ایزوترم لانگمویر تبعیت می‌کند. برهم‌کنش بین مولکول‌های جذب‌شده انرژی آزاد جذب با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$K_{ads} = 1/55.55 \exp(- \Delta G_{ads}/RT) \quad (11)$$

جایی که R ثابت گاز جهانی و T دمای مطلق است. مقدار $55/55$ در بالا معادله غلظت آب در محلول بر حسب مول می‌باشد [23].



شکل ۳- ایزوترم جذب لانگمویر اسانس اکالیپتوس روی سطح فولاد

بر اساس خصوصیات اسانس اکالیپتوس، فرض می‌شود که اجزای اصلی عمل می‌کنند و برای اطمینان از مهار، با توجه به شکل ۳ و تبعیت از ایزوترم جذب لانگمویر، سپس مهار به عنوان هم‌افزایی بین مولکول در نظر گرفته می‌شود؛ تاثیر اجزای مختلف روغن طبیعی یا اسانس اکالیپتوس، به اندازه کافی توصیه می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، رفتار خوردگی فولاد در محلول اسید کلریدریک و اسید سولفوریک مورد بررسی قرار گرفت و اثر افزودن اسانس اکالیپتوس تهیه شده به روش بخار در منطقه سیرجان در غلظت‌های مختلف توسط طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و کاهش وزن مورد بررسی قرار داده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌ها می‌توان نتایج زیر را نشان داد:

- تحقیقات نشان داده که وجود ترکیبات ۱ و ۸-سینئول در کاهش روند خوردگی موثر بوده و از مجموع آزمایش‌های به‌عمل‌آمده مشخص شد که گیاه اکالیپتوس منطقه سیرجان از مقدار قابل توجهی از این ماده برخوردار می‌باشد.
- آزمایشات مربوط به پارامترهای الکتروشیمیایی بر روی فولاد غوطه‌ور در اسید کلریدریک یک مولار و نیم مولار سولفوریک اسید، نشان می‌دهد که در حضور بازدارنده، مقدار چگالی خوردگی کاهش یافته است. این رفتار نشان‌دهنده توانایی اسانس اسانس گیاه اکالیپتوس، در مهار خوردگی فولاد در محلول ۱ مولار اسید کلریدریک و ۰/۵ مولار اسید سولفوریک است.
- با توجه به آزمایش پارامتر الکتروشیمیایی مشخص شد که هر چه غلظت اسانس اکالیپتوس از ۱ میلی‌لیتر به ۶ میلی‌لیتر در یک لیتر محلول اسید کلریدریک ۱ مولار و آب مقطر افزایش می‌یابد، درصد بازدارندگی ($E\%$) بیشتر می‌شود تا جایی که در حالت اسانس ۱ میلی‌لیتر در ۱ لیتر محلول درصد بازدارندگی ۴۶٪ است و زمانی که مقدار اسانس به ۶ میلی‌لیتر در ۱ لیتر محلول افزایش می‌یابد، درصد بازدارندگی به ۸۴٪ می‌رسد؛ که نتیجه بسیار عالی برای اسانس گیاه اکالیپتوس می‌باشد.
- این ترکیب اسانس گیاه اکالیپتوس از خوردگی فولاد در محلول اسید کلریدریک ۱ مولار در تمام غلظت‌ها جلوگیری می‌کند، همچنین مشاهده شد راندمان بازدارندگی برای این ترکیب با افزایش غلظت، افزایش می‌یابد. مهار خوردگی را می‌توان به جذب این ترکیب نسبت داد به‌گونه‌ای که در رابط محلول فولاد و اسید، سرعت خوردگی با غلظت بازدارنده کاهش می‌یابد.

- بر اساس آزمایش مطالعه پارامتر الکتروشیمیایی را بر روی فولاد در اسید ۰/۵ مولار سولفوریک اسید در غلظت‌های مختلف اسانس اکالیپتوس در دمای محیط، مشاهده می‌شود که در محلول اسانس با میزان ۱/۵ میلی لیتر، درصد بازدارندگی ۶۰/۳٪ می‌باشد و هر چه میزان اسانس بیشتر می‌شود، درصد بازدارندگی کمتر می‌شود تا جایی که در محلول با ۶ میلی‌لیتر اسانس، درصد بازدارندگی به ۸۱٪ می‌رسد.
- در مقدار بیشتر اسانس در محلول بازدارنده حاوی اسید، با توجه به میزان افزایش خوردگی و افزایش اسید، اسانس نیز کارایی بالاتری از خود بروز می‌دهد و درصد بازدارندگی و مهار خوردگی افزایش می‌یابد.
- همان‌طور که مشخص است، نمودار C_{inh}/O در مقابل C_{inh} یک خط مستقیم است، با ضریب رگرسیون، R که تقریباً برابر ۱ گرفته شده است. این نشان می‌دهد که اسانس اسانس اکالیپتوس در مطالعه حاضر از ایزوترم لانگمویر تبعیت می‌کند. بنابراین می‌تواند یک بازدارنده عالی برای خوردگی فلزات باشد.
- نتایج به دست آمده از مطالعات و مشاهدات توسط آنالیز کاهش وزن نشان می‌دهد اسانس گیاه اکالیپتوس روی سطح فلز خورده شده، تشکیل می‌شوند که سطح با یک لایه نسبتاً ضخیم پوشیده شده و پوشاندگی خوبی هم دارد. سهولت کار، غیرسمی بودن و قابلیت برگشت‌پذیری از مزایای برجسته این ترکیب به شمار می‌رود. در مجموع اسانس گیاهان طبیعی زیست‌سازگار، غیرسمی بوده و قیمت چندان بالایی ندارند؛ به علاوه زیست‌تجزیه‌پذیر هم هستند. البته گیاه اکالیپتوس علاوه بر مزایای گفته شده، اشکال نگهداری و استفاده در زمان‌های طولانی هم دارند.

۵-منابع

1. Shang, Z., & Zhu, J. 2021. Overview on plant extracts as green corrosion inhibitors in the oil and gas fields. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5078-5094.
2. Dehghani, A., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., & Ramezanzadeh, M. 2019. A combined experimental and theoretical study of green corrosion inhibition of mild steel in HCl solution by aqueous Citrullus lanatus fruit (CLF) extract. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 603-624.
3. El-Etre, A. Y., & Ali, A. I. 2017. A novel green inhibitor for C-steel corrosion in 2.0 mol·L⁻¹ hydrochloric acid solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(3), 373-380.
4. Li, X., Deng, S., Fu, H., & Xie, X. 2014. Synergistic inhibition effects of bamboo leaf extract/major components and iodide ion on the corrosion of steel in H₃PO₄ solution. *Corrosion Science*, 78, 29-42.
5. Chen, X., Guan, Z., Du, M., Lin, C. 2019. Corrosion Behavior of P110 Steel in Simulated Oilfield Produced Water. *International Journal of Electrochemical Science*. 8(14): 7332-7347.
6. Al-Akhras, N., & Mashaqbeh, Y. (2021). Potential use of eucalyptus leaves as green corrosion inhibitor of steel reinforcement. *Journal of Building Engineering*, 35, 101848.
7. Cherrad, S., Alrashdi, A. A., Lee, H. S., Lgaz, H., Satrani, B., Ghanmi, M., & Chaouch, A. (2022). Cupressus arizonica fruit essential oil: A novel green inhibitor for acid corrosion of carbon steel. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(6), 103849.
8. Cisse, K., Gassama, D., Thiam, A., Ndiaye, E. B., Gueye, M. T., & Fall, M. (2021). Comparative study of S235 steel corrosion inhibition by Eucalyptus camaldulensis and Cyperus rotundus essential oils in hydrochloric acid solution. *American Journal of Physical Chemistry*, 10(1), 6-15.
9. Limousin, G., Gaudet, J. P., Charlet, L., Szenknect, S., Barthes, V., & Krimissa, M. 2007. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied geochemistry*, 22(2), 249-275.

10. Ahmaruzzaman, M. 2008. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: a review. *Advances in colloid and interface science*, 143(1-2), 48-67.
11. Bendahou, M., Benabdellah, M., & Hammouti, B. 2006. A study of rosemary oil as a green corrosion inhibitor for steel in 2 M H₃PO₄. *Pigment & resin technology*.
12. Macphail, M., & Thornhill, A. H. 2016. How old are the eucalypts? A review of the microfossil and phylogenetic evidence. *Australian Journal of Botany*, 64(8), 579-599.
13. El-Etre, A. Y., Abdallah, M., & El-Tantawy, Z. E. 2005. Corrosion inhibition of some metals using lawsonia extract. *Corrosion science*, 47(2), 385-395.
14. Behpour, M., Ghoreishi, S. M., Khayatkashani, M., & Soltani, N. J. M. C. 2012. Green approach to corrosion inhibition of mild steel in two acidic solutions by the extract of *Punica granatum* peel and main constituents. *Materials Chemistry and Physics*, 131(3), 621-633.
15. Stephen, J. T., & Adebayo, A. 2018. Inhibition of corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution using akee apple seed extract. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18, 350-355.
16. Banu, M., Joany, R., & Rajendran, S. 2018. Green approach to corrosion inhibition of mild steel in acid medium by aqueous extract of *Pedaliium murex* L. Leaves. *Der Pharma Chemica*, 10, 21-28.
17. Hassannejad, H., & Nouri, A. 2018. Sunflower seed hull extract as a novel green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. *Journal of Molecular Liquids*, 254, 377-382.
18. Alibakhshi, E., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., Mahdavian, M., & Motamedi, M. 2018. Glycyrrhiza glabra leaves extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in 1 M hydrochloric acid solution: experimental, molecular dynamics, Monte Carlo and quantum mechanics study. *Journal of Molecular Liquids*, 255, 185-198.
19. Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., Dehghani, A., & Ramezanzadeh, M. 2019. Novel cost-effective and high-performance green inhibitor based on aqueous *Peganum harmala* seed extract for mild steel corrosion in HCl solution: detailed experimental and electronic/atomic level computational explorations. *Journal of Molecular Liquids*, 283, 174-195.
۲۰. دهقانی، ع.، بهلکه، ق.، و رمضانزاده، ب. ۱۳۹۸. بررسی عملکرد بازدارندگی خوردگی اسانس آبی دارچین روی فولاد ساده کربنی در محیط اسید هیدرولیک ۱ مولار. نشریه علمی علوم و فناوری رنگ، دوره ۱۳(۲)، ۱۴۱-۱۵۴.
۲۱. نعمتیان، ب.، رضانی سعادتآبادی، ا.، مهدویان احدی، م.، بهلکه، ق.، و حدادی، س.آ. ۱۳۹۸. بررسی اثر اسانس گیاه گلرنگ به عنوان یک بازدارنده خوردگی سبز جهت جلوگیری از خوردگی فولاد نرم در محیط اسید کلریک ۰/۱ مولار، نشریه علمی علوم و فناوری رنگ، ۱۳(۴)، ۳۳۱-۳۴۰.
22. Sin, H. L. Y., Rahim, A. A., Gan, C. Y., Saad, B., Salleh, M. I., & Umeda, M. 2017. *Aquilaria subintergra* leaves extracts as sustainable mild steel corrosion inhibitors in HCl. *Measurement*, 109, 334-345.
23. Krishnegowda, P. M., Venkatesha, V. T., Krishnegowda, P. K. M., & Shivayogiraju, S. B. 2022. *Acalypha torta* leaf extract as green corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(2), 722-728.