

مروری بر قابلیت استفاده از عصاره‌های گیاهان به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی سبز در میادین نفت و گاز

طاهر ربیع‌زاده^{*}، استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

تاریخ ارسال به داور: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش داور: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

چکیده

امروزه بر کسی پوشیده نیست که وقوع خوردگی در واحدهای ذخیره‌سازی و انتقال صنعت نفت و گاز، بر توسعه این صنایع تأثیرگذار است. بازدارنده‌های خوردگی سنتی در طول دهه‌ها برای کاهش مشکلات جدی خوردگی ناشی از CO_2 ، H_2S و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما در سال‌های اخیر بازدارنده‌های سبز به‌ویژه عصاره‌های گیاهی به‌عنوان جایگزین بازدارنده‌های سنتی خوردگی فلزات معرفی شده‌اند. این نوع بازدارنده‌ها توجه زیادی به خود جلب کرده‌اند زیرا سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه بوده، حداقل آسیب را به محیط‌زیست وارد می‌کنند و می‌توانند در زمینه‌های مختلف به کار گرفته شوند. بررسی مقالات پژوهشی نشان داده است که بسیاری از گیاهان به‌طور مؤثر به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی برای فلزات در محیط‌های خورنده مختلف استفاده می‌شوند. روش‌های جدید و پیشرفته شبیه‌سازی (شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و روش‌های محاسبه شیمی کوانتومی) نیز می‌توانند برای توصیف و پیش‌بینی بازدارنده‌های خوردگی استفاده شوند. در این مقاله مجموعه‌ای از مقالات منتشر شده در مورد کاربرد عصاره‌های گیاهی به‌عنوان بازدارنده خوردگی مورد مطالعه قرار گرفته است. کاربرد عصاره‌های مختلف به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی ارائه شده است. همچنین چالش‌های مختلفی که در این زمینه با آن‌ها مواجه هستیم و چشم‌اندازی از تحقیق نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی:

خوردگی، بازدارنده سبز، عصاره گیاهان، میادین نفت و گاز

مقدمه

خوردگی در میادین نفت و گاز

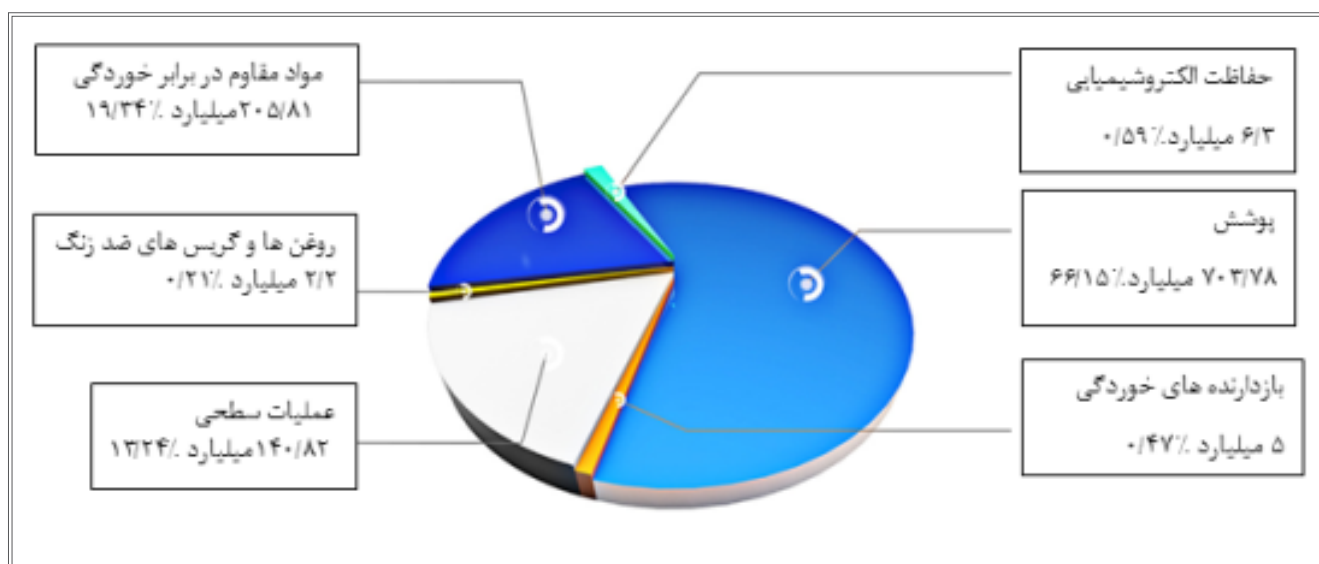
تکنولوژی «ازدیاد برداشت از مخزن نفت» (EOR) از هوا، نیتروژن، دی‌اکسید کربن، گاز مایع و گاز طبیعی استفاده می‌کند. [۴] کاربرد گسترده دی‌اکسید کربن، خوردگی CO_2 را در خطوط لوله نفت و گاز به یک موضوع پر اهمیت تحقیقاتی تبدیل کرده است. همچنین، می‌دانیم که نفت خام از اعماق زمین تأمین می‌شود. تحت این شرایط، به دلیل میزان بالای سولفور (گوگرد)، خوردگی ناشی از H_2S متعاقباً رخ می‌دهد. تحت برخی شرایط خاص مهندسی، خوردگی CO_2 و خوردگی H_2S ممکن است به‌طور همزمان رخ دهد. مهندسان از روش‌های مختلفی برای حفاظت از تجهیزات نفت و گاز در برابر خوردگی استفاده می‌کنند. این روش‌ها شامل پوشش، آستر، حفاظت کاتدی و غیره هستند. یک روش دیگر استفاده از بازدارنده‌های خوردگی است. استفاده از بازدارنده‌های خوردگی مزایای هزینه پایین و استفاده ساده را دارد. عملکرد تجهیزات نیز مختل نمی‌شود. [۵] اما همچنان

در سطح جهانی، خوردگی یک مشکل بزرگ است. تخمین زده می‌شود که سالانه حدود ۲/۵ تریلیون دلار آمریکا (حدود ۲/۳ تریلیون یورو) صرف حل مشکلات ناشی از آن می‌شود. این مقدار تقریباً ۳ تا ۴ درصد از تولید ناخالص جهان (GWP) در سال است. [۱] همچنین زیان اقتصادی سالانه چین ناشی از خوردگی تقریباً ۲/۳ تریلیون یوان چین است که ۳/۳ درصد از کل تولید ناخالص ملی این کشور را تشکیل می‌دهد. از طرفی، تولید نفت و گاز سهم قابل توجهی از بازارهای جهانی را به خود اختصاص داده است. بنابراین خوردگی همیشه یک مسئله کلیدی در این صنعت بوده است و محققان در تلاش برای رفع این مشکل بزرگ هستند. به همین دلیل کاهش و جلوگیری از خوردگی می‌تواند برخی زیان‌های اقتصادی را کاهش دهد. [۲] همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، وجود گاز H_2S باعث خوردگی در یک خط لوله شده است. [۳]

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات (t.rabizadeh@tabrizu.ac.ir)



شکل ۱ | خوردگی خط لوله ناشی از گاز H_2S [۳]



شکل ۲ | هزینه های مستقیم خوردگی در چین در سال ۲۰۱۴. مقادیر ذکر شده هزینه خوردگی در هر بخش بر حسب RMB و درمید مربوط به کل هزینه خوردگی (روش Uhlig) را ارائه می دهد. [۲]

به طور گسترده در میادین نفت و گاز مشاهده می شود. CO_2 در آب حل می شود و یک اسید ضعیف تشکیل می دهد. [۶] مواد واکنش دهنده به فلز می چسبند و با تشکیل یک لایه متراکم، از آن محافظت می کند. با این حال، کربنات آهن تولید شده بر روی سطح فلز عموماً سست است و نمی تواند نقش حفاظتی ایفا کند. [۷] تحت این شرایط، خوردگی حفره ای معمولاً رخ می دهد. واکنش های اصلی CO_2 در محلول آب نمک اشباع شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

در جدول ۱، در طول مراحل مربوط به فرایند انحلال، CO_2 به راحتی در آب حل می شود و از منظر سینتیک، مرحله

لازم است که یک بررسی دقیق از محیط خورنده انجام شود تا بتوان یک بازدارنده های خوردگی مناسب ساخته و مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا بازدارنده های خوردگی سبز می توانند مسائل و مشکلات زیست محیطی ناشی از استفاده از بازدارنده های خوردگی سنتی را نیز مرتفع سازند. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بازدارنده ها به طور گسترده استفاده می شوند. به دلیل کاربرد گسترده «ازدیاد برداشت از مخزن نفت» EOR، مقدار زیادی دی اکسید کربن در سیستم سیال چند فاز استفاده می شود و این گاز به خط لوله نیز منتقل می شود. بنابراین خوردگی ناشی از دی اکسید کربن



واکنش	فرآیند	
$\text{CO}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}_2(\text{i})$ (۱)	انحلال CO ₂	فرآیند انحلال
$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (۲)	هیدراتاسیون CO ₂	
$\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ (۳)	تجزیه H ₂ CO ₃	
$\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ (۴)	تجزیه HCO ₃ ⁻	
$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ (۵)	تجزیه H ₂ O	
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (۶)	اکسیداسیون آندی	فرآیند الکتروشیمیایی
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (۷)	احیای کاتدی H ⁺	
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (۸)	احیای کاتدی H ₂ O	
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (۹)	احیای کاتدی H ₂ CO ₃	
$2\text{H}_2\text{CO}_3 + 4\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{CO}_3^{2-}$ (۱۰)	احیای کاتدی HCO ₃ ⁻	

می‌شود. [۸] هنگامی که پارامترهای محیطی در یک سیستم خوردگی به بالاتر از دمای ۳۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷/۳۸ مگاپاسکال می‌رسند، حالت‌های مختلف CO₂ بین گاز و مایع قرار می‌گیرند. چگالی CO₂ نیز نزدیک به چگالی یک مایع است و ضریب نفوذ بسیار بالاتر از ضریب نفوذ مشاهده شده در حالت مایع است. همان‌طور که تکنولوژی تزریق CO₂ (EOR، EGR) در میدان‌های نفت و گاز برای بهبود ضریب بازیابی^۵ استفاده می‌شود، سیال حاوی CO₂ فوق بحرانی به آب زیرزمینی^۶ و آب میدان نفتی^۷، فرآیند خوردگی را پیچیده‌تر می‌سازد. [۹]

در خصوص خوردگی ناشی از H₂S، می‌دانیم که با افزایش عمق برداشت از چاه نفت، میزان گوگرد افزایش می‌یابد که در فرآیند خوردگی سولفید هیدروژن منعکس می‌شود. سولفید هیدروژن در آب حل می‌شود و احیا هیدروژن رخ می‌دهد. مکانیزم این فرایند به شرح زیر است. واکنش آندی شامل فرآیند جذب - و جذب و اکسیداسیون آندی HS⁻ به صورت زیر است:

$$\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{FeSH}_{\text{ad}}^- + \text{H}_3\text{O}^+ \quad (۱۱)$$

$$\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{FeSH}_{\text{ad}}^- + \text{H}_3\text{O}^+ \quad (۱۲)$$

$$\text{Fe}(\text{SH})_{\text{ads}} \rightarrow \text{FeSH}^+ + \text{e}^- \quad (۱۳)$$

با سرعت کم، مانند انحلال و هیدراتاسیون، کنترل‌کننده سرعت کلی فرایند هستند. همچنین در طول مراحل «فرآیند الکتروشیمیایی»، سرعت احیا هیدروژن کاتدی به pH محلول بستگی دارد. این فرآیند توسط سرعتی که در آن یون‌های H از محلول به سطح فلز مهاجرت می‌کنند، محدود و کنترل می‌شود. بنابراین سرعت جریان و آشفته‌گی سیال^۲ بر نرخ خوردگی تأثیر می‌گذارد.

همان‌طور که مطرح شد وجود گاز دی‌اکسید کربن منجر به تولید اسید کربنیک می‌شود. اکسیداسیون آندی فلز باعث انتقال Fe²⁺ به از سطح فلز به داخل محلول می‌شود. از طرفی تجزیه اسید کربنیک موجود در محلول منجر به تشکیل یون‌های کربنات می‌شود. هنگامی که میزان غلظت یون‌ها به حد قابل توجهی می‌رسد، لایه‌ای از کربنات آهن ایجاد می‌شود. pH بسیار اسیدی، نشان‌دهنده فراوانی CO₂ و شدت خوردگی بالا است. اما وقتی مقدار pH بین ۴ و ۶ باشد، سرعت نفوذ یون H پایین است. بنابراین مکانیزم خوردگی در pH‌های مختلف متفاوت است. علاوه بر این، در شرایط جریان چند فاز^۳، نرخ خوردگی CO₂ تحت شرایط فوق بحرانی فشار بالا^۴ شدیدتر از شرایط استاتیکی است و مکانیزم‌های خوردگی مختلفی مشاهده

$FeSH_{ad}^{+}$ در حضور اسید ضعیف به FeS تبدیل می‌شود. [۱۰] مشاهده شده است که فیلم متراکم FeS می‌تواند از زمینه محافظت کند اما در حضور فیلم غیر متراکم خوردگی تشدید می‌شود. در محیط غنی از گوگرد، وجود سولفید از تبدیل اتم‌های H به هیدروژن مولکولی جلوگیری می‌کند. اتم‌های H در مکان‌ها موسوم به عیوب ماده تجمع پیدا می‌کنند که اغلب باعث ترک خوردگی ناشی از خوردگی تنشی همراه می‌شود. [۱۱]

هنگامی که دو گاز به‌طور همزمان در محلول وجود دارند، H_2S ، H^+ ، CO_2 ، HCO_3^- و CO_3^{2-} به‌طور همزمان در محلول وجود دارند. مکانیزم خوردگی پیچیده است. زیرا به‌عنوان مثال، نسبت فشار $(H_2S)/P(CO_2)$ بر روی نوع خوردگی مؤثر است. [۱۲] همچنین میزان خوردگی تحت تأثیر دانسیته و فشار خوردگی فیلم تشکیل شده بر روی سطح فلزی قرار می‌گیرد. همچنین نشان داده شده است که در حضور فیلم فشرده FeS، با افزایش فشار جزئی H_2S در حضور CO_2 ، نرخ خوردگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. [۱۳]

بازدارنده‌های خوردگی

طبق پروتکل‌های مشخص‌شده در ASTM G15-2008، بازدارنده خوردگی یک ماده شیمیایی یا ترکیبی از موادی است که وقتی در غلظت مناسب به کار گرفته می‌شوند، از خوردگی جلوگیری کرده یا آن را کاهش می‌دهد. در ISO 8044-2020، بازدارنده خوردگی یک ماده شیمیایی است که وقتی در سیستم خوردگی در غلظت مناسب وجود دارد، سرعت خوردگی را بدون تغییر قابل توجه در غلظت عوامل خورنده، کاهش می‌دهد.

به‌طور کلی، بازدارنده‌های خوردگی مورد استفاده در صنعت باید الزامات زیر را برآورده سازند:

- باید باعث حد بالایی از حفاظت در برابر خوردگی شود که باعث عملکرد مناسب خطوط لوله موجود در میدان، و سایر تأسیسات را در حضور عوامل خطرناک خوردگی، شود.
- استفاده از بازدارنده‌های خوردگی نباید تأثیر منفی بر فرآیندهای تکنولوژیکی تولید، حمل‌ونقل، فرآوری و ذخیره‌سازی هیدروکربن‌ها و گاز داشته باشد؛
- بازدارنده‌های خوردگی باید در دماهای کاری از نظر گرمایی پایدار باشند؛
- بهترین بازدارنده‌های خوردگی آن‌هایی هستند که به‌خوبی در آب حل می‌شوند درحالی‌که لایه‌ای از بازدارنده خوردگی را بر روی سطح فلز باقی می‌گذارند؛
- مقدار کمی بازدارنده باعث حفاظت در برابر خوردگی شود؛
- توانایی مهار انواع مختلف خوردگی مانند خوردگی عمومی، خوردگی موضعی، خوردگی شکافی، خوردگی باکتریایی و غیره؛

● توانایی باقی ماندن اثر بازدارندگی خوردگی در مناطق مختلف آب و هوایی، به‌ویژه محیط‌های عمیق دریا، محیط قطبی، و غیره. [۱۴]

براساس ترکیب شیمیایی، بازدارنده‌های خوردگی می‌توانند به بازدارنده‌های خوردگی آلی و بازدارنده‌های خوردگی غیر آلی تقسیم شوند. با توجه به حالت فیزیکی، بازدارنده‌ها می‌توانند به بازدارنده‌های خوردگی فاز مایع و بازدارنده‌های خوردگی فاز گاز تقسیم شوند. براساس فیلم محافظ تشکیل‌شده بر روی سطح فلز، بازدارنده‌ها می‌توانند به نوع جذبی^۸، نوع فیلم اکسیداسیون^۹، و بازدارنده‌های نوع رسوب^{۱۰}، تقسیم شوند. براساس مکانیزم عملکرد الکتروشیمیایی، بازدارنده‌ها را می‌توان به انواع کاتد، نوع آند و بازدارنده‌های خوردگی نوع مخلوط طبقه‌بندی کرد. بازدارنده‌های خوردگی آلی به‌طور گسترده تحت شرایط اسیدی استفاده می‌شوند. این نوع بازدارنده‌ها فیلم‌های محافظ را بر روی سطوح فلزی عمدتاً از طریق جذب سطحی (جذب فیزیکی یا جذب شیمیایی) تشکیل می‌دهند. [۱۴]

۱. بازدارنده‌های خوردگی سنتی

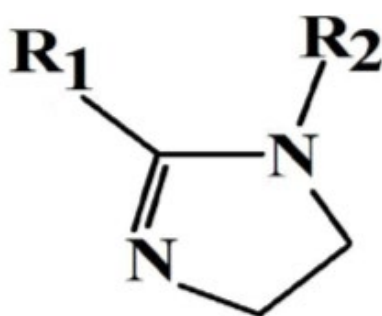
۱-۱. مروری بر بازدارنده‌های خوردگی سنتی

بیشتر بازدارنده‌های خوردگی CO_2 مورد استفاده در میدان‌های نفت و گاز، مواد آلی مانند آمین‌های آلی، ایمیدازولین‌ها و باز شیف‌ها^{۱۱} هستند. بیشتر این مواد بازدارنده‌هایی هستند که جذب سطح می‌شوند. ترکیبات مبتنی بر ایمیدازول (IM) یک گروه عمده از بازدارنده‌های خوردگی هستند. نمودار ساختار مولکولی این مواد در شکل ۳ نشان داده شده است. اعتقاد بر این است که مواد آب‌گریزی و آب‌دوستی که به ترتیب در مکان‌های R2 و R1 قرار می‌گیرند به افزایش کارایی بازدارندگی خوردگی کمک می‌کند. انواع مختلفی از مولکول‌های جدید ایمیدازولین (دارای انواع مختلفی از گروه‌های عاملی) برای تهیه بازدارنده‌های خوردگی استفاده شده‌اند. مولکول‌های حاوی نیتروژن آمینی اغلب برای ساخت این نوع بازدارنده‌ها استفاده می‌شوند. [۱۵]

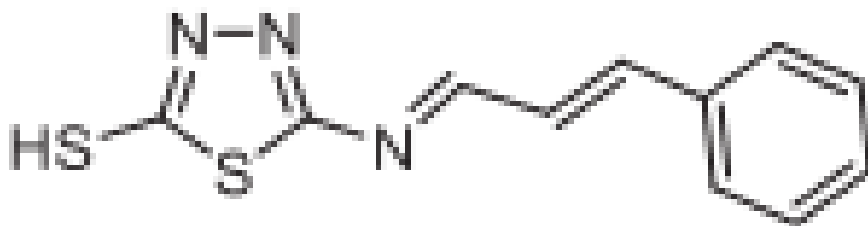
محلول آبی اشباع CO_2 عموماً اسیدی است. به دلیل حضور گروه‌های آلکیل آب‌دوست و آب‌گریز در مولکول‌های ایمیدازولین، مولکول‌ها خواص سورفکتانت‌های کاتیونی را نشان می‌دهند. این مولکول‌ها به سطح فلز متصل می‌شوند و یک فیلم را تشکیل می‌دهند. فیلم آب‌گریز انتقال ماده و بار ایجاد شده در اثر خوردگی را کاهش می‌دهد. [۱۷] گزارش شده است که نمک آمونیوم دو چهارتایی نامتقارن ایمیدازولین (DBA) [۱۸]، مشتق ایمیدازولین، سیستین [۱۹]، نمک ایمیدازولین [۲۰]، نمک کینولین (QB) [۲۱]، اسید تانیک (TA) [۲۲] و غیره از خوردگی CO_2 جلوگیری می‌کنند. گروهی از محققان اثر بازدارندگی مولکول ایمیدازولین را بر روی

روی فولاد X65 در حضور آب اشباع شده از CO_2 بررسی کردند. نتایج نشان داد که مولکول‌ها از نوع بازدارنده آندی هستند و از طریق فرآیند جذب شیمیایی به سطح فلز متصل شدند. PATT تحت شرایط مشابه بازدارنده بهتری از TATT بود. [۲۴] فرمول مولکولی یک بازدارنده از نوع باز شیف در شکل ۴ نشان داده شده است. برخی آمین‌های آلی که شامل پیوندهای آمین خاصی هستند، بازدارنده‌های خوردگی بسیار مناسبی هستند. این مولکول‌ها خواص مقاومت در برابر هیدرولیز، انواع پایداری و زیست تخریب‌پذیری را نشان می‌دهند. این مواد برای انواع سیستم‌های خوردنده مناسب هستند و مقاومت اسیدی و قلیایی قوی از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال اثر بازدارندگی خوردگی دی سیکلو هگزیل آمین و اولو آمین^{۱۴} (DCHA + OA) بر روی فولاد کربنی در محلول اشباع از CO_2 مورد مطالعه قرار گرفت. [۲۵] نتایج نشان داد که مخلوط ۵۰ میلی گرم بر لیتر از DCHA + OA می‌تواند به طور قابل توجهی نرخ خوردگی را کاهش دهد. یک فیلم محافظ جهت بازدارندگی از خوردگی بر روی سطح توسط جذب شیمیایی تشکیل شود. فرمول مولکولی آمین‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

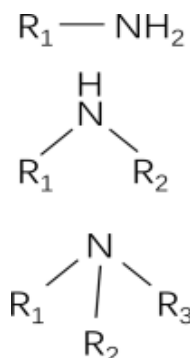
فولاد 80N مورد بررسی قرار دادند. بازدارندگی خوردگی در حضور محلول اشباع شده با CO_2 و استیک اسید با استفاده از روش کاهش وزن و فرآیندهای الکتروشیمیایی مورد مطالعه قرار گرفت. پتانسیل مدار باز (OCP)، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، اسپکتروسکوپی آمپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، و روش‌های آنالیز سطح (مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، اسپکتروسکوپی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)، مورد استفاده قرار گرفتند. این مطالعه نشان داد که میزان بازدارندگی خوردگی با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. خوردگی شکافی می‌تواند با اضافه کردن یک بازدارنده در ابتدای آزمایش مهار شود. اما اثر بازدارندگی زمانی که بازدارنده پس از شروع فرایند خوردگی اضافه شد، کاهش می‌یابد. [۲۳] ماده باز شیف یک بازدارنده خوردگی آلی است که شامل گروه‌های مشخص ایمین یا متیل ایمین است. توانایی جذب قوی این نوع از بازدارنده‌ها می‌تواند به پیوند دوگانه $\text{C} = \text{N}$ نسبت داده شود. این مواد به راحتی می‌تواند به زمینه فلزی جذب شوند تا یک کمپلکس تشکیل داده و نرخ خوردگی را کاهش دهد. دانشمندان دو مولکول باز شیف PATT و TATT را سنتز کردند و اثر بازدارندگی خوردگی را بر



شکل ۳ | ساختار مولکولی ایمیدازولین. [۱۶]



شکل ۴ | فرمول مولکولی پایه شیف [۲۴]



شکل ۵ | فرمول مولکولی آمین‌ها [۲۵]

به‌عنوان مثال با استفاده از آزمون الکتروشیمیایی و روش‌های تئوری تابعی چگالی (DFT)، اثر ۲-آمینو - ۴-متیل تiazول^{۱۵} بر روی فولاد کم کربن (در محلول 0/5 mol /L HCl) مورد مطالعه قرار گرفت. [۲۹] نتایج تجربی و محاسبات نشان داد که مولکول‌ها یک لایه محافظ بر روی سطح فولاد تشکیل داده‌اند. این لایه از طریق فرآیند جذب فیزیکی تشکیل شده است. همچنین اثر ممانعت از خوردگی پیوندهای غیر اشباع α و β آلدئید را مورد مطالعه قرار گرفت. [۳۰] محققان بر این باور بودند که آلدئیدهای حاوی پیوندهای دوگانه غیر اشباع α و β ، اثر بازدارندگی خوردگی خوبی در اسید هیدروکلریک از خود نشان می‌دهند. آن‌ها گزارش کردند که آلدیدهای غیر اشباع، خوردگی فولاد کم کربن را در اسید سولفوریک افزایش می‌دهد. بازدارنده‌های خوردگی سبز از محصولات طبیعی استخراج می‌شوند یا از مواد خام طبیعی ساخته می‌شوند. برخی از بازدارنده‌های خوردگی آلی و بازدارنده‌های خوردگی پلیمر در این دسته قرار می‌گیرند. برگ‌ها، گل‌ها، میوه‌ها، دانه‌ها، تخمک‌های و یا دیگر بخش‌های گیاهان می‌توانند منابع مواد بازدارنده مؤثر باشند. روش‌های استخراج شامل خیساندن، حرارت دادن، هیدرولیز و روش‌های استخراج اولتراسونیک است. [۳۱] بازده استخراج اجزای فعال، به حلال استفاده‌شده [۳۲]، دمای استخراج (۶۰ - ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای اکثر گیاهان) [۳۳]، دمای خشک کردن (۶۰ - ۸۰ درجه سانتی‌گراد) [۳۴]، زمان استخراج، نسبت مایع به جامد [۳۵] و غیره بستگی دارد.

۳-۱- استفاده از عصاره‌های گیاهی به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی سبز ۳-۱-۱- مروری بر بازدارنده‌های عصاره گیاهی

محققان از برخی عصاره‌های گیاهی برای توسعه بازدارنده‌های خوردگی استفاده کرده‌اند. گیاه مرکبات، چای، آفتابگردان و غیره اثرات بازدارندگی خوبی از خود نشان می‌دهند. این بازدارنده‌ها غیر

۲-۱- ترکیب بازدارنده‌های خوردگی سنتی

بیشتر بازدارنده‌های خوردگی سنتی ترکیبات آلی هستند که به‌طور قابل‌توجهی به محیط‌زیست آسیب می‌رسانند. با افزایش آگاهی زیست‌محیطی، انتخاب بازدارنده‌های خوردگی نه تنها به‌عنوان شاخص اولیه بلکه به‌عنوان عامل دوست‌دار محیط‌زیست نیز عمل می‌کند. در حال حاضر، تمرکز بر کاهش مقدار کل بازدارنده‌های سنتی و دستیابی به اثرات بازدارندگی خوردگی ایده‌آل با استفاده از ترکیبی از بازدارنده‌های آلی متعدد است. [۲۶] در دهه ۱۹۸۰ گزارش شد که استفاده از ترکیبی از بازدارنده‌های خوردگی سنتی و ترکیبات دیگر می‌تواند عملکرد کلی بازدارنده‌ها را بهبود بخشد. مقدار کل بازدارنده‌های مورد استفاده نیز می‌تواند کاهش یابد. [۲۷ و ۲۸]

۲-۲- بازدارنده‌های خوردگی سبز

بازدارنده‌های خوردگی سنتی با سمیت بالا باعث آسیب‌های غیرقابل‌برگشت به محیط‌زیست در طول فرایند ساخت، انتقال و کاربرد می‌شوند. محققان تلاش کرده‌اند تا مقدار استفاده از بازدارنده‌های خوردگی سنتی کاهش دهند. مهم این است که بازدارنده‌های خوردگی سازگار با محیط‌زیست را توسعه دهیم تا میزان تأثیر منفی بازدارنده‌های خوردگی سنتی بر محیط‌زیست را کاهش دهیم. بازدارنده‌های خوردگی سبز می‌توانند به تنهایی مورد استفاده قرار گیرند. این مواد همچنین می‌توانند با بازدارنده‌های خوردگی سنتی ترکیب شوند. انواع زیادی از بازدارنده‌های دوست‌دار محیط‌زیست وجود دارند: بازدارنده‌های خوردگی آلی، بازدارنده‌های خوردگی غیر آلی و بازدارنده‌های خوردگی پلیمر. همچنین بازدارنده‌ها را می‌توان براساس روش‌های آماده‌سازی به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی طبیعی و بازدارنده‌های خوردگی مصنوعی طبقه‌بندی کرد. بازدارنده‌های خوردگی مصنوعی از مواد آلی مصنوعی و بازدارنده‌های خوردگی غیرآلی ساخته می‌شوند.

خوردگی CO₂ ایجاد شده‌اند در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. محققین بازدهی بازدارندگی خوردگی پوست پوملو برای فولاد J55 را در ۳/۵ درصد وزنی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی انجام دادند و از تکنیک‌های SEM و EDS به همراه زاویه تماس برای آنالیز نمونه‌ها استفاده کردند. این مطالعه ثابت کرد که عصاره از طریق فرآیند جذب فیزیکی به سطح فلز چسبیده که با مدل جذب لانگمیر مطابقت دارد. حداکثر بازده بازدارندگی خوردگی ۸۳/۳ درصد بود. کاهش دما و افزایش غلظت استخراج منجر به افزایش بازده شد. [۴۲] عصاره گیاه Kuding- (cha) به‌عنوان بازدارنده خوردگی استخراج شده و رفتار بازدارندگی خوردگی آن برای فولاد J55 در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl نیز مورد بررسی قرار گرفت. محققان دریافتند که بازدارنده خوردگی از نوع مخلوط با حداکثر بازده ۹۶/۵۳ درصد است. مشخص شد که بازده با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. این امر مطابق با مدل جذب لانگمیر بود. [۴۳] از پوست میوه پوملو برای ساخت بازدارنده‌های خوردگی نیز استفاده شده است. خوردگی N80 را در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با محلول CO₂ با استفاده از روش کاهش وزن مورد مطالعه قرار دادند. همچنین از روش‌های الکتروشیمیایی، FT-IR، SEM و محاسبات شیمی کوانتومی برای مطالعه این فرآیند استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که جذب فیزیکی مهم‌ترین رفتار جذب است و فرآیند جذب با مدل جذب لانگمیر مطابقت دارد. بازده بازدارندگی خوردگی با افزایش غلظت محلول استخراج افزایش یافت. حداکثر بازده نزدیک به ۸۷ درصد بود. نتایج حاصل از محاسبات شیمی کوانتومی نشان داد که مواد مؤثر استخراج‌شده، عملکرد جذب عالی از خود نشان دادند. [۴۴] بازدارندگی عصاره روغن باگاس قهوه برای فولاد X70 در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با محلول CO₂ مورد مطالعه قرار گرفت. هنگامی که غلظت عصاره به ۲۵ ppm رسید، نرخ بازدارندگی خوردگی به اوج خود (۹۵ درصد) رسید. هنگامی که غلظت بیشتر از ۱۰ ppm بود، بازده بازدارندگی خوردگی تقریباً ۹۵ درصد بود. برای دستیابی به بازده بالا، نیازی به افزایش بیشتر غلظت بازدارنده نبود. جذب شیمیایی در طول بازدارندگی خوردگی رخ داد که مطابق با مدل جذب لانگمیر بود. [۴۵] مواد بازدارنده از برگ‌های کالوتروپیس پروسرا استخراج شد و رفتار بازدارندگی خوردگی فولاد کربنی را در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl مورد ارزیابی قرار دادند. روش‌های ارزیابی شامل روش‌های الکتروشیمیایی و شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بودند. هنگامی که غلظت عصاره ۵۰ ppm بود، نرخ بازدارندگی خوردگی به ۸۰ درصد رسید. [۴۶] رفتار بازدارندگی خوردگی عصاره‌های برگ زیتون نیز گزارش شده است. [۴۷]

سمی و ارزان هستند و می‌توانند به راحتی به‌دست آیند. بنابراین آن‌ها را می‌توان در زمینه «شیمی سبز» استفاده کرد. [۳۶] آمینو اسیدها، پلی‌ساکاریدها، فلاونوئیدها^{۱۶} و غیره که شامل اتم‌های O، N، S و دیگر اتم‌ها با جفت‌های الکترون غیراشتراکی هستند، پیوندهای کوئوردیناسیون با اوربیتال‌های خالی (3d) موجود در سطح نمونه آهنی برای جلوگیری از تماس سطح فلز با محلول خورنده ایجاد می‌کنند. این امر پس از انجام یک فرآیند جذب فیزیکی به وقوع می‌پیوندد. [۳۷] گروه‌های عاملی قطبی مانند هیدروکسیل، کربوکسیل، کربونیل و غیره نقش مراکز جذب را ایفا می‌کنند. این فرآیند همچنین حلالیت مواد بازدارنده خوردگی را بهبود می‌بخشد. هترواتم‌ها و اتم‌های π در طول تشکیل فیلم بر روی فلزات برای جلوگیری از خوردگی، نقش جذبی ایفا می‌کنند. اجزای فعال عصاره‌های گیاهی نیز شامل پیوندهای غیر اشباع (پیوندهای دوگانه) و حلقه‌های بنزن هستند، که می‌توانند به‌طور بالقوه با تیواوره، ایمیدازولین و دیگر مواد پلیمریزه شوند تا یک فیلم محافظ متراکم تشکیل دهند. گروه‌های آگریز در مواد طبیعی می‌توانند پایداری فیلم بازدارنده خوردگی را تا حدی تضمین کنند. مکان و موقعیت پایه آگریز و زنجیره‌های جانبی مولکول بازدارنده بر جذب تأثیر می‌گذارند. زنجیره آگریز طولانی‌تر جذب را افزایش می‌دهد، در حالی که قرار گرفتن زنجیره جانبی نزدیک به مرکز جذب، مانع از جذب می‌شود. [۳۸] آمینو اسیدها [۳۹] نه تنها برای مهار خوردگی فولاد کربنی مناسب هستند بلکه می‌توانند به‌طور مؤثری خوردگی Al، Co، Ni، Cu و غیره را مهار کنند. این مواد اثر بازدارندگی عالی بر خوردگی موضعی نشان می‌دهند. بازدارنده‌های خوردگی سبز براساس عصاره‌های گیاهی مقرون‌به‌صرفه هستند. فرآیند تهیه این مواد نیز ساده است. [۴۰] در حال حاضر، بازدارنده‌های خوردگی سبز عمدتاً برای مطالعه محیط‌های خورنده معمول مانند HCl، H₂SO₄ و NaOH استفاده می‌شوند. اما بازدارنده‌های خوردگی غیر سمی و کارآمد نیز در میدان نفت و گاز مورد نیاز هستند. [۴۱] در خصوص چاه‌های نفت، بازدارنده‌های خوردگی در بخش اسیدی کردن و انتقال^{۱۷}، تقاضای زیادی دارند. همچنین به وفور نشان داده شده است که استفاده از بازدارنده‌های خوردگی برای کاهش آسیب خوردگی در میدان‌های نفت و گاز یک روش مناسب، مؤثر و کم‌هزینه در مقابله با خوردگی است. در این راستا مطالعه بازدارنده‌های خوردگی که می‌توانند در میدان‌های نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرند، از اهمیت استراتژیک برخوردار است.

۲-۳. عصاره‌های گیاهی به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی در سیستم خوردگی CO₂

برخی از بازدارنده‌های خوردگی که از عصاره‌های گیاهی در سیستم

۳-۳. عصاره‌های گیاهی به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی در دیگر سیستم‌های خوردگی

برخی از بازدارنده‌های خوردگی به‌دست‌آمده از عصاره‌های گیاهی در دیگر سیستم‌های خوردگی در جدول ۳ نشان‌داده شده‌اند. بازدارندگی خوردگی برگ‌های گیاه به‌لیمو را در سیستم ترکیبی حاوی اسید هیدروکلریک و سولفید هیدروژن مورد مطالعه قرار گرفتند. مشاهده شد که وقتی غلظت $2/7 \text{ g/L}$ بود، حداکثر بازده به $95/61$ درصد رسید. [۴۸]

مقاومت به خوردگی عصاره‌های برگ قره‌قاپاق آبی به HCl بر روی

فولاد کم کربن مورد مطالعه قرار گرفت. گزارش شده است که وقتی غلظت بازدارنده خوردگی به 1500 ppm می‌رسد، نرخ بازدارندگی خوردگی به 93 درصد می‌رسد. آنالیز کروماتوگرافی / طیف‌سنجی جرمی نشان داد که آدنوزین (adenosin) جز مؤثر اصلی است. [۴۹]

از روش‌های کاهش وزن و احیا هیدروژن برای مطالعه نرخ بازدارندگی خوردگی عصاره پوست دانه آفتابگردان بر روی فولاد کربنی در کلرید هیدروژن نیز استفاده شده است. نتایج نشان داد که عصاره پوسته دانه آفتابگردان حاوی برخی ترکیبات حاوی اکسیژن، نیتروژن و حلقه‌های آروماتیک است و می‌تواند به‌عنوان

۲ بازدارنده خوردگی عصاره‌های گیاهی در سیستم خوردگی CO_2



گیاه	رانامان (%)	فلز	محیط خورنده	ماهیت
برگ‌های جینکو	$84/7\%$	Q235	محلول اشباع CO_2 ۳ درصد وزنی NaCl	نوع مختلط
اسید لوریک در روغن نباتی	$98/6\%$	فولاد کربن	میادین نفتی اشباع شده با CO_2 آب تولید می‌کردند	نوع مخلوط، که عمدتاً فرآیند کاتدی را سرکوب می‌کند
پوست پوملو	تقریباً 87%	N80	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
روغن باگاس قهوه	$> 95\%$	X70	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	ایزوترم لانگمویر، نوع کاتدی، جذب شیمیایی
میوه جینکو بیلوبا	97%	J55	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر
برگ‌های کالوتروپیس پروسرا	80%	فولاد کربن	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
AMPS پیوند ساقه صمغ گوار	$89/23\%$	J55	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
روغن سبوس برنج خام	95%	X70	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع آندی
پوست پوملو	$83/3\%$	J55	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
برگ زیتون	$92/6\%$	فولاد کربن	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع مختلط
Tseng (Kudingcha)	$96/53\%$	J55	$3/5$ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO_2	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر

خواص سیستم و پارامترهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۵۵] به‌عنوان مثال پیکربندی‌های جذب تعادلی سه مولکول CATM، FATM و DATM را در آهن (۱۱۰) با استفاده از روش دینامیک مولکولی مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۶). مشاهده شد که DTAM جذب تعادلی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که انرژی جذب، همبستگی مثبتی با کارایی بازدارندگی خوردگی دارد. [۵۶]

الکترون‌گاتیویته، و پارامترهای دیگر را با استفاده از محاسبات کوانتومی بررسی کردند. نتایج نشان داد که مکانیزم جذب و بازدارندگی خوردگی مولکول‌ها بر روی سطح فلز را می‌توان با ترکیب نتایج تجربی با نتایج حاصل از روش DFT به‌دست آورد. [۵۷] محققان از پوست گریپ‌فروت برای توسعه بازدارنده خوردگی استفاده کردند. آن‌ها خوردگی N80 را در ۳/۵ درصد وزنی NaCl اشباع شده با CO₂ با استفاده از روش کاهش وزن و اصول الکتروشیمی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین از تکنیک‌های FT-IR، SEM و دینامیک مولکولی استفاده کردند و محاسبات شیمی کوانتومی را برای تجزیه و تحلیل نمونه‌ها انجام دادند. نتایج نشان داد که جذب فیزیکی، رفتار جذب اولیه است که با مدل جذب لانگمویر مطابقت دارد. بازده بازدارندگی خوردگی با افزایش غلظت محلول استخراج افزایش یافت. حداکثر بازده حدود ۸۷ درصد بود. محاسبات شیمی کوانتومی نشان داد که مواد مؤثر استخراج‌شده از پوست گریپ‌فروت، عملکرد جذبی عالی از خود نشان می‌دهند. [۵۷]

از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، روش مونت کارلو و محاسبات شیمی کوانتومی، اثر بازدارندگی خوردگی برگ‌های شیرین بیان در اسید هیدروکلریک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نشان داد که اجزای مؤثر گیاهان اثر تشکیل فیلم واضحی را نشان می‌دهند. [۵۸]

۵. نتیجه‌گیری

۱. تحقیق در مورد بازدارنده‌های خوردگی گیاهی را می‌توان با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی انجام داد. و بررسی‌ها نشان‌دهنده قابلیت عصاره‌های گیاهی در جلوگیری از خوردگی در فلزات مورد کاربرد در صنایع نفت و گاز است. در این راستا دانش مناسبی از شیمی مواد، گیاه‌شناسی و غیره به درک این زمینه از تحقیقات بین رشته‌ای کمک می‌کند که پتانسیل عظیمی را نشان می‌دهد.

۲. عصاره‌های گیاهان را می‌توان بر اساس اصول نامگذاری که در زمینه گیاه‌شناسی دنبال می‌شود طبقه‌بندی کرد تا زمینه مشترکی برای تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر کارایی بازدارنده‌ها و غربالگری مؤثر پیدا کرد. عصاره‌های گیاهی عمدتاً مایع هستند و تحت تأثیر باکتری‌ها و محیط نگهداری قرار می‌گیرند. بنابراین، بازدارندگی مؤثر را نمی‌توان پس از حفظ طولانی مدت تضمین کرد.

بازدارنده‌های خوردگی آلی مؤثر در محیط‌های اسیدی استفاده شوند. آنالیز طیف‌سنجی، تشکیل کمپلکس‌ها بر روی سطح بین گروه‌های عاملی بازدارنده‌های مورد استفاده و یون‌های فلزی را تأیید کرد. کمپلکس‌های تشکیل‌شده بر روی سطح فلز یک ناحیه بزرگ را اشغال کردند. بنابراین، بار و انتقال یون از سطح فلز به داخل محلول در اثر خوردگی را کاهش دادند. نرخ بازدارندگی پس از افزودن عصاره به ۹۸/۵ درصد رسید. [۵۰] نتایج محققان نشان داد که بازدارنده‌های خوردگی مؤثر در خربزه به دما حساس هستند و فعالیت عصاره‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد. در همان زمان، در محدوده غلظت بالا، افزایش غلظت اثر بازدارندگی بهبود می‌یابد. [۵۱] اثر آب و متانول به‌عنوان حلال را بر روی مواد مؤثر در پوست انار نیز مورد مطالعه قرار گرفت. محققان آزمایش‌هایی را بر روی سطح فولاد کم کربن در 0/1 M HCl انجام دادند. از طریق HRSEM (تحلیل‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی با وضوح بالا) و AFM بر روی سطح نمونه، مشخص شد که با بیشتر شدن مقدار مواد شیمیایی استخراج‌شده توسط متانول، بازدارنده خوردگی، اثر حفاظتی قویتری بر روی فولاد کربنی دارد. [۵۲] هسپریدین و سیترولین نیز در عصاره‌های میوه سیترولولوس لاناتوس شناسایی شده است. ثابت شده است که این مواد حاوی گروه‌های فعال، عوامل ضد خوردگی مؤثری هستند. نتایج تحلیل‌های نظری و تجربی نشان داد که مواد به سطح نمونه به‌صورت جذب شده باقی می‌مانند. حداکثر نرخ ممانعت از خوردگی ۹۱ درصد بود. [۵۳]

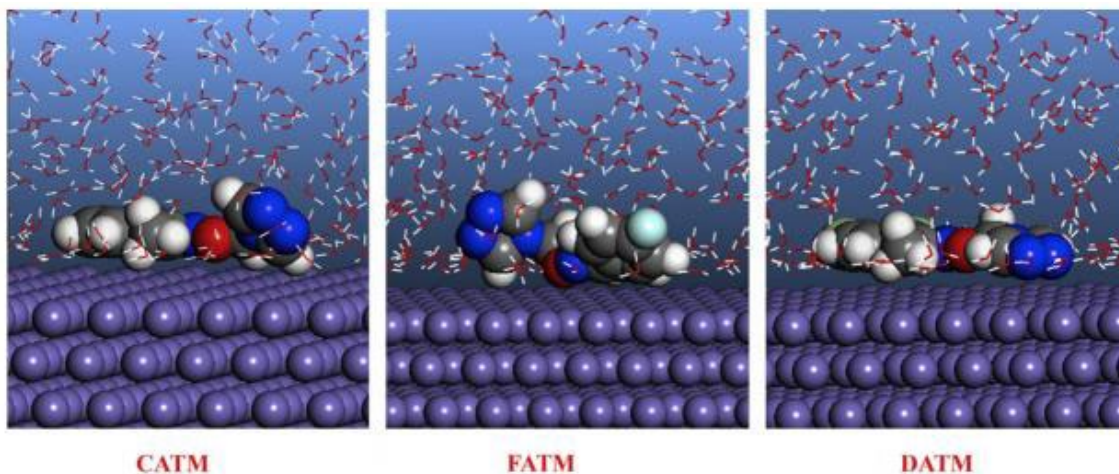
۴. مطالعه مکانیسم بازدارندگی خوردگی با استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و محاسبه شیمی کوانتومی

محاسبات شیمی کوانتومی بر روی اجزای و گروه‌های بازدارنده خوردگی تمرکز می‌کند تا انرژی مولکولی، فرآیند تشکیل پیوند شیمیایی، فرکانس ارتعاش، انتقال بار، ممان دوقطبی، اوربیتال مولکولی و غیره را تعیین کند. تکنیک DFT، که انقلابی در زمینه شیمی کوانتومی است، برای تصویرسازی انرژی به‌عنوان تابعی از چگالی به کار می‌رود. [۵۴]

شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بر تعامل بین بازدارنده خوردگی و فلز متمرکز شده است و برای تعیین پیکربندی جذب پایدار، انرژی اتصال، پارامترهای رفتار انتشار، و غیره استفاده می‌شود. این روش بر روی وضعیت حرکت مولکول‌ها (یا ذرات کوچکتر) در یک مجموعه خاص در یک زمان معین برای تجزیه و تحلیل خواص مربوط به سیستم معطوف می‌شود و بر استفاده از قوانین نیوتن برای محاسبه مسیرهای حرکت ذرات در پیکربندی اولیه متمرکز شده است. همچنین اصول ترمودینامیک آماری برای تجزیه و تحلیل



گیاه	رانامان (%)	فلز	محیط خورنده	ماهیت
برگ گزنه لیمو	۹۵/۶۱ %	فولاد کربن SAE 1018	۱۹۸/۹۹ میلی‌گرم در لیتر H_2S محلول همزیستی ۰/۰۱ درصد وزنی HCl	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
برگ‌های Aquilaria subintergra	۹۳ %	فولاد کم کربن	1.0 M HCl	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
پوسته تخمه آفتابگردان	۹۸/۵۰ %	فولاد کربن	1.0 M HCl	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر مدل جذب بین جذب فیزیکی و جذب شیمیایی است
پوست خربزه شیرین	۹۱/۵۹ %	فولاد کم کربن	1.0 M HCl	نوع آندی
پوست‌های Prunus dulcis	۹۳ %	فولاد کم کربن	0.1 M HCl	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
میوه آبی سیتروولوس (CLF) لاناتوس	۹۱ %	فولاد کم کربن	37% HCl	نوع مختلط، ایزوترم لانگمویر، جذب فیزیکی
میوه رزا کانینا	۸۶ %	فولاد کم کربن	1.0 M HCl	نوع مختلط، جذب فیزیکی
کاه برنج	۹۲ %	فولاد کم کربن	3.5 wt.% $NaCl$	نوع آندی، جذب شیمیایی



دمایی و ثبات بلندمدت بازدارنده‌های عصاره گیاهی در آینده مورد توجه قرار خواهد گرفت.

۴. در حال حاضر، روش‌های XPS، SEM، XRD، FT-IR و غیره در درجه اول برای ارزیابی کارایی بازدارندگی خوردگی و تعیین مکانیسم خوردگی استفاده می‌شوند. محاسبات شیمیایی کوانتوم و شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نیز می‌تواند به‌طور مؤثر برای مطالعه مکانیزم بازدارندگی خوردگی استفاده شود.

اما عصاره‌های گیاهی جامد می‌توانند به‌طور کمی برای یک زمان طولانی به‌عنوان بازدارنده خوردگی استفاده شوند.

۳. کاربرد بازدارنده‌های خوردگی باید تحت شرایط خورنده شدید (در حضور دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن، به‌ویژه در دمای بالا که عصاره گیاهی نمی‌تواند تحمل کند) نیز ارزیابی شود. فن‌آوری‌های مدرن می‌توانند برای ارزیابی کارایی بازدارندگی و پیش‌بینی رفتار بازدارندگی مورد استفاده قرار گیرند. تحقیق در مورد بهبود مقاومت

پانویس‌ها

- | | | |
|---|---|--------------------------------------|
| 1. Enhanced oil recovery | 8. adsorption type | thiadiazole-2thiol (TATT) |
| 2. turbulence | 9. oxidation film type | 14. dicyclohexylamine and oleo amine |
| 3. multiphase flow conditions | 10. precipitation type | 15. 2-amino-4-methylthiazole |
| 4. high-pressure supercritical conditions | 11. Schiff base | 16. flavonoids |
| 5. recovery factor | 12. 5((3-phenylallylidene)amino)-1,3,4-thiadiazole-2-thiol (PATT) | 17. Acidification and transportation |
| 6. underground water | 13. 5-((thiophen-2-ylmethylene)amino)-1,3,4- | |
| 7. oilfield water | | |

منابع

- [1]. Koch, G., cost of corrosion, chapter 1, In: Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies, Woodhead Publishing Series in Energy, 2017, p. 3-30.
- [2]. Hou, B., Li, X., Ma, X., Du, C., Zhang, D., Zheng, M., Xu, W., Lu, D. and Ma, F., the cost of corrosion in China. npj Materials Degradation, 2017, 1, p. 1-10.
- [3]. Sotoodeh, K., Requirement and calculation of corrosion allowance for piping and valves in the oil and gas industry, Journal of Bio-and Tribo-Corrosion, 2020, 6, p.21-29.
- [4]. Tong, X., Zhang, G., Wang, Z., Wen, Z., Tian, Z., Wang, H., Distribution and potential of global oil and gas resources, Petroleum Exploration and Development, 2018, 45, p. 779-789.
- [5]. Xu, B., Liu, Y., Yin, X., Yang, W., Chen, Y., Experimental and theoretical study of corrosion inhibition of 3pyridinecarboxaldehyde thiosemicarbazone for mild steel in hydrochloric acid, Corrosion Science, 2013, 74, p. 206-213.
- [6]. Zafar, MN., Rihan, R., Al-Hadhrani, L., Evaluation of the corrosion resistance of SA-543 and X65 steels in emulsions containing H₂S and CO₂ using a novel emulsion flow loop, Corrosion Science, 2015, p. 275-287.
- [7]. Cole, IS., Corrigan, P., Sim, S., Birbilis N., Corrosion of pipelines used for CO₂ transport in CCS: is it a real problem?, International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5, p. 749-756.
- [8]. Sarrade, S., Feron, D., Rouillard, F., Perrin, S., Robin, R., Ruiz, J-C., Overview on corrosion in supercritical fluids, The Journal of Supercritical Fluids, 2017, 120, p. 335-344.
- [9]. Sun C., Sun J., Wang Y., Lin X., Li X., Cheng X., Synergistic effect of O₂, H₂S and SO₂ impurities on the corrosion behavior of X65 steel in water-saturated supercritical CO₂ system. Corrosion Science, 2016, p. 193-203.
- [10]. Ma, H., Cheng, X., Li, G., Chen, S., Quan, Z., Zhao, S., The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions, Corrosion Science, 2000, 42, p. 1669-1683.
- [11]. Tsay, LW, Chen, YC, Chan, SLI, Sulfide stress corrosion cracking and fatigue crack growth of welded TMCP API 5L X65 pipe-line steel, International Journal of Fatigue, 2001, 23, p. 103-113.
- [12]. Zhao, X., Huang, W., Li, G., Feng, Y., Zhang, J., Effect of CO₂/H₂S and applied stress on corrosion behavior of 15Cr tubing in oil field environment, Metals, 2020, 10, p.409-421.
- [13]. Wang, Z.B., Pang, L., Zheng, Y.G., A review on under-deposit corrosion of pipelines in oil and gas fields: Testing methods, corrosion mechanisms and mitigation strategies. Corrosion Communications, 2022, 7, p. 70-81
- [14]. Finsgar, M., Jackson, J., Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: a review. Corrosion Science, 2014, 86, p. 17-41.
- [15]. Liu, X., Okafor, PC., Zheng, YG.. The inhibition of CO₂ corrosion of N80 mild steel in single liquid phase and liquid/particle two-phase flow by aminoethylimidazoline derivatives, Corrosion Science, 2009, 51, p. 744-751.
- [16]. Abd El-Lateef, H.M., Abbasov, V.M., Aliyeva, L.I. and Ismayilov, T.A., Corrosion protection of steel pipelines against CO₂ corrosion-a review, Chemistry Journal, 2012, 2, p.52-63.
- [17]. Heydari, M., Javidi, M., Corrosion inhibition and adsorption behaviour of an amido-imidazoline derivative on API 5L X52 steel in CO₂-saturated solution and synergistic effect of iodide ions, Corrosion Science, 2012, 61, p. 148-155.
- [18]. Zhang, J., Sun, X., Ren, Y., Du, M., The synergistic effect between imidazoline-based dissymmetric bis-quaternary ammonium salts and thiourea against CO₂ corrosion at high temperature, Journal of Surfactants and Detergents, 2015, 18, p. 981-987.
- [19]. Zhang, C., Duan, H., Zhao, J., Synergistic inhibition effect of imidazoline derivative and L-cysteine on carbon steel corrosion in a CO₂-saturated brine solution, Corrosion Science, 2016, 112, p. 160-169.
- [20]. Li, W., Pots, BFM., Zhong, X., Nesic, S., Inhibition of CO₂ corrosion of mild steel study of mechanical effects of highly turbulent disturbed flow, Corrosion Science, 2017, 126, p. 208-226.
- [21]. Zhao, J., Duan, H., Jiang, R., Synergistic corrosion inhibition effect of quinoline quaternary ammonium salt and Gemini surfactant in H₂S and CO₂ saturated brine solution, Corrosion Science, 2015, 91, p. 108-119.
- [22]. Bju, A., Sau, B., Zmg, A., Inhibition of API 5L X60 steel corrosion in CO₂-saturated 3.5% NaCl solution by tannic acid and synergistic effect of KI additive, Journal of Molecular Liquids, 2017, 237, p. 146-156.
- [23]. Li, YZ., Xu, N., Guo, XP., Zhang, GA., Inhibition effect of imidazoline inhibitor on the crevice corrosion of N80 carbon steel in the CO₂-saturated NaCl solution containing acetic acid, Corrosion Science, 2017, 126, p. 127-141.

- [24]. Zhang, QH., Hou, BS., Xu, N., Xiong, W., Liu, HF., Zhang, GA., Effective inhibition on the corrosion of X65 carbon steel in the oilfield produced water by two Schiff bases, *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 285, p. 223-236.
- [25]. Jevremovic, I., Debeljkovic, A., Singer, M., The mixture of dicyclohexylamine and oleylamine as corrosion inhibitor for mild steel in NaCl solution saturated with CO₂ under both continual immersion and top of the line corrosion, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2012, 77, p. 1047-1061.
- [26]. Tang, J., Complicated synergistic effects between three corrosion inhibitors for Q235 steel in a CO₂-saturated 3.5 wt% NaCl solution, *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, p. 2246-2264.
- [27]. Arukalam, IO., Durability and synergistic effects of KI on the acid corrosion inhibition of mild steel by hydroxypropyl methylcellulose, *Carbohydrate Polymers*, 2014, 112, p. 291-299.
- [28]. Rajeswari, V., Kesavan, D., Gopiraman, M., Viswanathamurthi P. Physicochemical studies of glucose, gellan gum, and hydroxypropyl cellulose inhibition of cast iron corrosion, *Carbohydrate Polymers*, 2013, 95, p. 288-294.
- [29]. Ongun Yuce, A., Electrochemical and quantum chemical studies of 2-amino-4-methyl-thiazole as corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution, *Corrosion Science*, 2014, 83, p. 310-316.
- [30]. Avdeev, YG., Kuznetsov, YI., Buryak, AK., Inhibition of steel corrosion by unsaturated aldehydes in solutions of mineral acids, *Corrosion Science*, 2013, 69, p. 50-60.
- [31]. Miralrio, A., Espinoza Vázquez, A., Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review, *Processes*, 2020, 8, p. 942.
- [32]. Harhaun, R., Kunik, O., Saribekova, D., Lazzara, G., Biologically active properties of plant extracts in cosmetic emulsions, *Microchemical Journal*, 2020, 154, p. 104543.
- [33]. Fang, Y., Suganthan, B., Ramasamy, RP., Electrochemical characterization of aromatic corrosion inhibitors from plant extracts, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2019, 840, p. 74-83.
- [34]. Eakkalanuksamee, K., Anuntagool, J., Optimization of high protein glutinous rice flour production using response surface method, *Rice Science*, 2020, 27, p. 75-80.
- [35]. Gholamnezhad, J., Effect of plant extracts on activity of some defense enzymes of apple fruit in interaction with *Botrytis cinerea*, *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18, p. 115-123.
- [36]. Umoren, SA., Solomon, MM., Obot, IB., Suleiman, RK., A critical review on the recent studies on plant biomaterials as corrosion inhibitors for industrial metals, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 76, p. 91-115.
- [37]. Cheng, F., Novel inhibitors containing multi-functional groups for pipeline corrosion inhibition in oilfield formation water, *Corrosion*, 2015, 72, p. 472-485.
- [38]. Verma, C., Ebenso, EE., Quraishi, MA., Corrosion inhibitors for ferrous and non-ferrous metals and alloys in ionic sodium chloride solutions: a review, *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 248, p. 927-942.
- [39]. Schmitt, G., Saleh, A., Evaluation of environmentally friendly corrosion inhibitors for sour service, *Materials Performance*, 2000, 39, p. 62-65.
- [40]. Javidi, M., Chamanfar, R., Bekhrad, S., Investigation on the efficiency of corrosion inhibitor in CO₂ corrosion of carbon steel in the presence of iron carbonate scale, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 61, p. 197-205.
- [41]. He, S., Qiu, Y., Sun, Y., Zhang, Z., Cheng, J., Gao, C., Corrosion behavior of AISI 1020 steel in MEA and [Bmim]BF₄ mixed solution containing saturated CO₂, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 94, p. 102931.
- [42]. Wang, S., Inhibition effect of tangerine peel extract on J55 steel in CO₂-saturated 3.5 wt. % NaCl solution, *International Journal of Electrochemical Science*, 2017, 12, p. 11195-11211.
- [43]. Chen, S., Inhibition effect of *Ilex kudingcha* C.J. Tseng (*kudingcha*) extract on J55 steel in 3.5wt% NaCl solution saturated with CO₂, *International Journal of Electrochemical Science*, 2017, 12, p. 782-796.
- [44]. Sun, Z., Singh, A., Xu, X., Chen, S., Liu, W., Lin, Y., Inhibition effect of pomelo peel extract for N80 steel in 3.5% NaCl saturated with CO₂ solution, *Research on Chemical Intermediates*, 2017, 43, p. 6719-6136.
- [45]. Gomez-Guzman, NB., Martinez de la Escalera, DM., PorcayoCalderon, J., Gonzalez-Rodriguez, JG., Martinez-Gomez, L., Performance of an amide-based inhibitor derived from coffee bagasse oil as corrosion inhibitor for X70 steel in CO₂-saturated brine, *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2019, 12, p. 49-60.
- [46]. Ibrahim, T., Gomes, E., Obot, IB., Khamis M, Abou Zour M. Corrosion inhibition of mild steel by *Calotropis procera* leaves extract in a CO₂ saturated sodium chloride solution, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, 30, p. 2523-2543.
- [47]. Pustaj, G., Olive leaf extract as a corrosion inhibitor of carbon steel in CO₂-saturated chloride carbonate solution, *International Journal of Electrochemical Science*, 2016, 7, p. 811-829.
- [48]. Fattah-alhosseini, A., Noori, M., Corrosion inhibition of SAE 1018 carbon steel in H₂S and HCl solutions by lemon verbena leaves extract, *Measurement*, 2016, 94, p. 787-793.
- [49]. Sin, HLY., Abdul Rahim, A., Gan, CY., Saad, B., Salleh, MI., Umeda, M., *Aquilaria subintergra* leaves extracts as sustainable mild steel corrosion inhibitors in HCl, *Measurement*, 2017, 109, p. 334-345.
- [50]. Hassannejad, H., Nouri, A., Sunflower seed hull extract as a novel green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution, *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 254, p. 377-382.
- [51]. Saeed, MT., Saleem, M., Usmani, S., Malik, IA., Al-Shammari, FA., Deen, KM., Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl by sweet melon peel extract, *Journal of King Saud University - Science*, 2019, 31, p. 1344-1351.
- [52]. Pal, S., Lgaz, H., Tiwari, P., Chung, I-M., Ji, G., Prakash, R., Experimental and theoretical investigation of aqueous and methanolic extracts of *Prunus dulcis* peels as green corrosion inhibitors of mild steel in aggressive chloride media, *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 276, p. 347-361.
- [53]. Dehghani A, Bahlakeh G, Ramezanzadeh B, Ramezanzadeh M. 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*, 2019, 279, p. 603-624.
- [54]. Obayes HR, Al-Amiery AA, Alwan GH, Abdullah TA, Kadhum AAH, Mohamad AB. Sulphonamides as corrosion inhibitor: experimental and DFT studies, *Journal of Molecular Structure*, 2017, 1138, p. 27-34.
- [55]. Anadebe VC, Onukwuli OD, Abeng FE, Okafor NA, Ezeugo JO, Okoye CC. Electrochemical-kinetics, MD simulation and multi-input single-output (MISO) modelling using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) prediction for dexamethasone drug as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 2 M HCl electrolyte, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2020, 115, p. 251-265.
- [56]. Guo L, Zhu S, Zhang S, He Q, Li W. Theoretical studies of three triazole derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in acidic medium, *Corrosion Science*, 2014, 87, p. 366-375.
- [57]. Obot IB, Macdonald DD, Gasem ZM. Density functional theory (DFT) as a powerful tool for designing new organic corrosion inhibitors. Part 1: an overview, *Corrosion Science*, 2015, 99, p. 1-30.
- [58]. Alibakhshi E, Ramezanzadeh M, Bahlakeh G, Ramezanzadeh B, Mahdavian M, Motamedi M., *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*, 2018, 255, p. 185-198.