



فصل نامه علوم و مهندسی گرمسار

Journal Homepage: <https://journal.fmgarmsar.ac.ir/>



مقاله کامل پژوهشی

مروری کوتاه بر استفاده از عصاره های گیاهی به عنوان بازدارنده برای محافظت از فلزات در برابر خوردگی

میلاذ شیدایی، استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار

چکیده

فلزات به دلیل خواص مکانیکی خوبی که دارند به طور گسترده برای کاربردهای مختلف استفاده می شوند اما آنها همواره در معرض خوردگی هستند. محققان خوردگی را یک پدیده موذی می دانند، زیرا به کندی اما پیوسته رفتار می کند و می تواند باعث خرابی های عمده شود. خسارات های اقتصادی ناشی از خوردگی همیشه بسیار زیاد است، از همین رو جلوگیری و کنترل خوردگی همیشه از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. بسیاری از روش ها از خوردگی جلوگیری می کنند، اما بازدارنده های شیمیایی خوردگی همیشه بسیار محبوب بوده اند. آنها به دلیل کارایی خوب همیشه گزینه مناسبی در بین سایر روش های حفاظتی بوده اند، اما سمی بودن بسیاری از آنها باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی می شود. در سال های اخیر، ارزیابی و استفاده از بازدارنده های خوردگی سبز به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این میان استفاده از گیاهان بسیار مورد توجه قرار گرفته است زیرا دارای ترکیباتی هستند که خاصیت ضد خوردگی دارند. در این بررسی، استفاده از گیاهان به عنوان بازدارنده های خوردگی سبز با تمرکز بر پیشرفت های اخیر مورد بحث قرار می گیرد.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

کلیدواژه ها:

محیط خورنده،

حفاظت در برابر خوردگی،

شیمی سبز.

عهده دار مکاتبات: میلاذ شیدایی

نشانی: ایران، استان سمنان، شهرستان گرمسار، دانشگاه گرمسار

پیام نگار: md.sheydaei@fmgarmsar.ac.ir

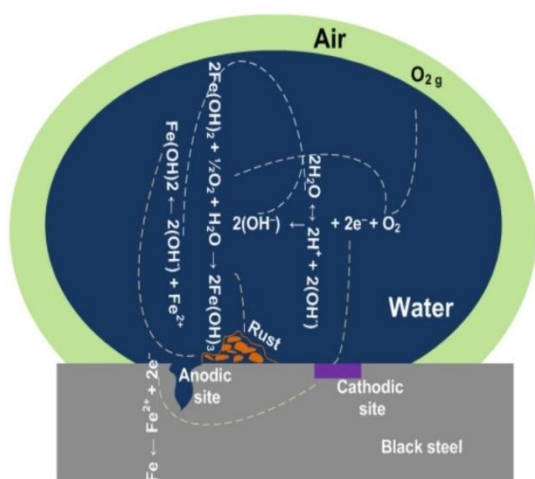
۱- مقدمه

در جهان امروز توسعه اقتصاد باعث پیشرفت فناوری و رشد سریع جامعه می‌شود که با تمام نتایج مثبت، حامل پیامدهای منفی می‌باشد که بخش اعظم آن متأسفانه برای محیط زیست است [۱]. در حقیقت آلودگی محیط زیست ارتباط مستقیمی با افزایش جمعیت انسان دارد که این سبب افزایش فعالیت‌های انسانی می‌شود و از این طریق محیط زیست تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۲]. آلودگی را می‌توان این‌گونه به سادگی توضیح داد: هرگونه فعالیت انسانی که سبب کاهش کیفیت محیط زیست شود [۳]. در حال حاضر اکثر کشورها با انواع آلودگی محیط زیست مواجه هستند و می‌توان گفت به یکی از مهم‌ترین مشکلات جهان بدل شده است که مسبب آن مدیریت اشتباه دولتهاست. آگاهی از منبع آلودگی و پیامدهای آن بسیار مهم است زیرا ناآگاهی می‌تواند موجب فعالیت‌هایی شود که سبب افزایش آلودگی گردد [۴]. به‌طور معمول، اقدامات سیاستی نامشخص به اعتماد جامعه و محیط زیست آسیب رسانده است. معمولاً این مشکلات در کشورهایی با منابع طبیعی غنی رخ می‌دهد [۵]. منابع طبیعی ارتباط مستقیمی با رشد اقتصادی دارد، بنابراین بهره‌برداری بیش از حد از منابع باعث ایجاد مسائل زیست‌محیطی مانند جنگل‌زدایی، افزایش دمای زمین، انتشار دی‌اکسید کربن و آلودگی آب می‌شود [۶-۸]. اگرچه در کنار مواردی که به آنها اشاره شد، گسترش آلاینده‌های سمی، پلاستیک‌ها، پساب‌های صنعتی، پسماندهای کشاورزی و خانگی و دفع نامناسب زباله‌ها را می‌توان نمونه‌هایی دیگر از آلودگی امروزه کشورها دانست که سبب تخریب محیط زیست و به‌خطر افتادن سلامت انسان‌ها می‌شود [۹-۱۱].

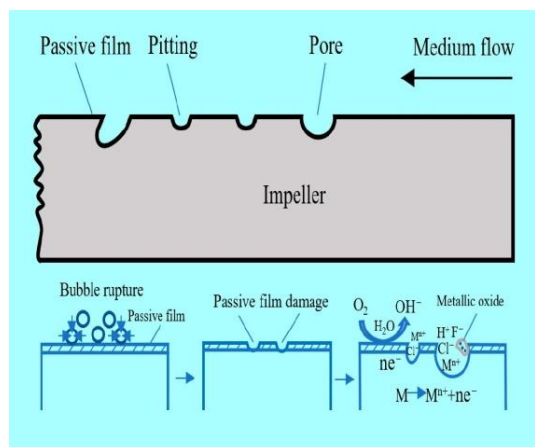
هم‌چنین، این مشکلات خسارات بسیار زیادی را در پی خواهند داشت و برای جبران، هزینه‌های مالی بسیار زیادی به کشورها تحمیل می‌شود. از همین‌رو، مدیریت پایدار باید برای شناخت آلودگی و هم‌چنین احیای منابع وجود داشته باشد. می‌توان گفت برای بهبود سلامت انسان، کنترل آلودگی همیشه در اولویت است، به‌عنوان مثال، آلودگی هوا می‌تواند

سلامت جسمی و توانایی شناختی افراد را کاهش دهد. هم‌چنین به محیط زندگی افراد آسیب می‌رساند و رفاه ساکنان را کاهش می‌دهد [۱۲]. در این‌میان، خوردگی یکی از پدیده‌هایی است که خسارات زیادی به بار می‌آورد و هم‌چنین پیامدهای منفی زیست‌محیطی بسیاری به همراه دارد [۱۳]. می‌توان خوردگی را یک فرآیند الکتروشیمیایی و البته خود به‌خودی دانست، اگرچه می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسان باشد و عوامل زیادی مانند دما، رطوبت، گازها، اسیدها و مواد شیمیایی در ایجاد و پیشرفت آن نقش مهمی دارند [۱۴]. تمام سازه‌های فلزی همواره در معرض خوردگی هستند و این مشکل نه تنها باعث آسیب اقتصادی می‌شود بلکه تهدیدی جدی برای ایمنی است [۱۵]. امروزه خوردگی در بسیاری از صنایع مانند نفت و گاز، دریایی، هوافضا، پتروشیمی، نظامی و صنایع سرامیک به یک معضل تبدیل شده است [۱۶]. سازه‌های فلزی همواره باید از استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی برخوردار باشند [۱۷]. در صنعت راه‌حل‌های کم هزینه و با عملکرد خوب همیشه اولویت است، از همین‌رو برای جلوگیری و کاهش خوردگی از بازدارنده‌های خوردگی به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۱۸]. بازدارنده‌های خوردگی براساس ترکیب شیمیایی به دو دسته معدنی و آلی طبقه‌بندی می‌شوند و همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد از آنها در صنعت به‌وفور استفاده می‌شود، اما آنها معایب بسیاری مانند سمیت، پایداری کوتاه و تجزیه سریع را دارند [۱۹]. براساس قوانین جدید دیگر عملکرد مناسب بازدارنده در اولویت نیست و باید مسائل زیست‌محیطی هم در نظر گرفته شود، به‌همین دلیل در سال‌های گذشته محققان یکی از اهداف اصلی را استفاده از مواد غیرسمی و سازگار با محیط زیست به‌عنوان بازدارنده در دستور کار قرار داده‌اند. در این‌میان، عصاره‌های گیاهی و ضایعات میوه‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند چون آنها حاوی ترکیبات زیست‌فعال بسیار زیادی هستند و می‌توانند از خوردگی جلوگیری کنند [۲۰]. بسیاری از قسمت‌های گیاهان مانند برگ، ریشه، پوست، گل، میوه، چوب و دانه

خون، که ناشی از ترکیبی از سایش سطح، حفره‌زایی^۲ و خوردگی عنصر هالوژن است را نشان می‌دهد که در حقیقت شکل پیچیده‌ای از خوردگی را گزارش می‌کند.



شکل ۱- فرایندهای فیزیکی و شیمیایی در خوردگی فولاد توسط یک قطره آب [۲۵].



شکل ۲. مکانیسم خوردگی پروانه پمپ گردش خون [۲۶].

عوامل محیطی (مانند نوسانات دما، رطوبت و آلاینده‌ها)، متالورژیکی (مانند روش فرآوری و ساخت، نوع و غلظت عناصر آلیاژی) و ساختاری (مانند طراحی سازه، ویژگی‌های هندسی سازه، جهت‌گیری مکانی سازه نسبت به سطح زمین

برای تهیه بازدارنده استفاده می‌شوند [۲۱]. این ترکیبات در غلظت‌های بسیار کم مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند روی سطوح فلزی جذب شوند [۲۲]. در این مقاله، به استفاده از گیاهان به‌عنوان بازدارنده خوردگی سبز پرداخته شده است و پیشرفت‌های اخیر در این زمینه مرور و مورد بحث قرار گرفته است.

۲- عوامل موثر بر ایجاد خوردگی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد تمام سازه‌های فلزی در معرض پدیده خوردگی هستند. فرآیند خوردگی بسیار آهسته اما پیوسته است، اگرچه در برخی از محیط‌ها مانند دریا، این فرآیند می‌تواند بسیار سریع باشد [۲۳]. مکانیسم فرآیند خوردگی را می‌توان به سادگی توضیح داد، درحقیقت پس از تماس اولیه فلز با محیط اطراف یک لایه سطحی (متشکل از اکسیدها و هیدروکسیدها) و یک محلول الکترولیت روی سطح فلز ایجاد می‌شود که این می‌تواند یک رطوبت با لایه بسیار نازک یا یک لایه ضخیم آبی باشد [۴]. با افزایش ضخامت این لایه، به دلیل افزایش رسانایی الکتریکی الکترولیت، ابتدا نرخ خوردگی افزایش می‌یابد و سپس به دلیل کاهش سرعت انتشار اکسیژن به سطح فلز، کاهش می‌یابد [۴]. در ادامه، یون‌های Fe^{2+} وارد محلول می‌شوند و تحت فرایندهای هیدرولیز و اکسیداسیون قرار می‌گیرند و در نهایت این فرآیند با جذب اکسیژن یا آزاد شدن هیدروژن ادامه می‌یابد و منجر به تشکیل محصولات خوردگی آهن می‌شود [۴]. این محصولات که زنگ^۱ نامیده می‌شوند، مانعی بین فلز و محیط هستند و شامل بسیاری از اکسیدها و هیدروکسیدها هستند [۲۴]. شکل ۱ فرایندهای اولیه لحظه‌ای خوردگی فولاد توسط یک قطره آب را نشان می‌دهد.

اگرچه فرآیند خوردگی در بعضی از موارد بسیار پیچیده است، به‌طور مثال شکل ۲ خوردگی پروانه پمپ گردش

^۱ Rust

^۲ Cavitation

یا آسمان و جهت‌گیری سطح نسبت به نقاط اصلی) را می‌توان عواملی دانست که بر فرآیند خوردگی تأثیر دارند [۴]. تحقیقات نشان داده است که در رطوبت ثابت، افزایش دما باعث افزایش خوردگی می‌شود، به‌طور کلی می‌توان گفت که تأثیر دما تا حدی به رطوبت محیط بستگی دارد [۲۷]. یکی از آلاینده‌ها دی‌اکسید گوگرد است که نقش یک عامل اکسیدکننده را ایفا می‌کند (در واقع دی‌اکسید گوگرد می‌تواند الکترولیت روی سطح را اسیدی کند) و در نواحی صنعتی و شهرهای با تراکم بالا، مقدار زیادی از آن وجود دارد [۲۸]. همچنین باران در فرآیند خوردگی هم نقش مثبت و هم منفی دارد، در واقع باران با حذف یون‌های کلرید (یون‌های کلرید یکی از تهاجمی‌ترین گونه‌هایی هستند که می‌توانند باعث خوردگی شوند) و برخی آلاینده‌ها از سطح فلز اثری مثبت را دارد، اما از طرف دیگر با خیس شدن سطح فلز، امکان انتقال ترکیبات خورنده فعال (مانند دی‌اکسید گوگرد) افزایش می‌یابد [۲۹]. روش‌های ساخت و محتوای عناصر در فلز بسیار مهم است و با تغییر در مقدار آنها فرآیند خوردگی به شدت تأثیر بیشتری بر سازه خواهد گذاشت. همچنین عوامل ساختاری مانند قرارگیری سازه از اهمیت بسیاری برخوردار است چون تماس بیشتر فلز با باران و نور خورشید، بسیار در پیشرفت خوردگی موثر است.

۳- بازدارنده‌های خوردگی

بازدارنده فارغ از طبیعی یا شیمیایی بودن را می‌توان ماده‌ای در نظر گرفت که وقتی در غلظت‌های بسیار کم استفاده شود، خوردگی را کاهش داده یا از آن جلوگیری کند [۴]. برای کاهش خوردگی، بازدارنده می‌تواند اجزای یک سلول

خوردگی (که شامل آند، کاتد، الکترولیت و هادی الکتریکی می‌شود) را تحت تأثیر قرار دهد، بنابراین بازدارنده ممکن است باعث مهار آندی، مهار کاتدی، مهار مقاومت و محدودیت انتشار شود [۳۰]. ایده‌آل بودن یک بازدارنده را می‌توان در چندین عامل جستجو کرد که عبارتند از: عدم سمیت و مشکلات آلودگی، اثربخشی طولانی‌مدت، حفاظت خوب در غلظت‌های بسیار پایین، مهار خوردگی یکنواخت و موضعی، حفاظت از تمام فلز در معرض گونه‌های خوردگی، کارایی در هر شرایط دمایی و همچنین عدم ایجاد رسوب بر روی سطح فلز [۴]. می‌توان گفت بازدارنده‌ها عموماً به دو صورت رفتار می‌کنند، یا یک سپر محافظتی روی آن‌ها یا کاتدها تشکیل می‌دهند و یا مستقیماً روی سطح فلز جذب می‌شوند [۳۱]. جدول ۱ بازدارنده‌ها را براساس مکانیسم گزارش می‌کند. همچنین، شکل ۳ طبقه‌بندی بازدارنده‌های خوردگی را براساس مکانیسم، محیط و حفاظت نشان می‌دهد.

۴- استفاده از گیاهان به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی

برای مقابله با فرآیند خوردگی می‌توان از روش‌های گوناگونی استفاده کرد مانند پوشش‌ها (رزین‌های اپوکسی^۱، وینیل استر^۲ و پلی یورتان^۳)، نانوذرات (خاک رس^۴، کربن سیاه^۵، اکسید گرافن^۶، نانولوله‌های کربنی^۷ و گرافن^۸) و رنگ‌ها، اما می‌توان گفت که استفاده از بازدارنده‌ها یکی از موثرترین و کاربردی‌ترین روش‌ها است [۴]. شکل ۴ ترکیبات بازدارنده‌ها را براساس آلی یا معدنی بودن نشان می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که بازدارنده‌های حاوی حلقه اثر محافظتی بالایی دارند، اما اخیراً استفاده از آنها

¹ Epoxy

² Vinyl ester

³ Polyurethane

⁴ Clay

⁵ Carbon black

⁶ Graphene oxide

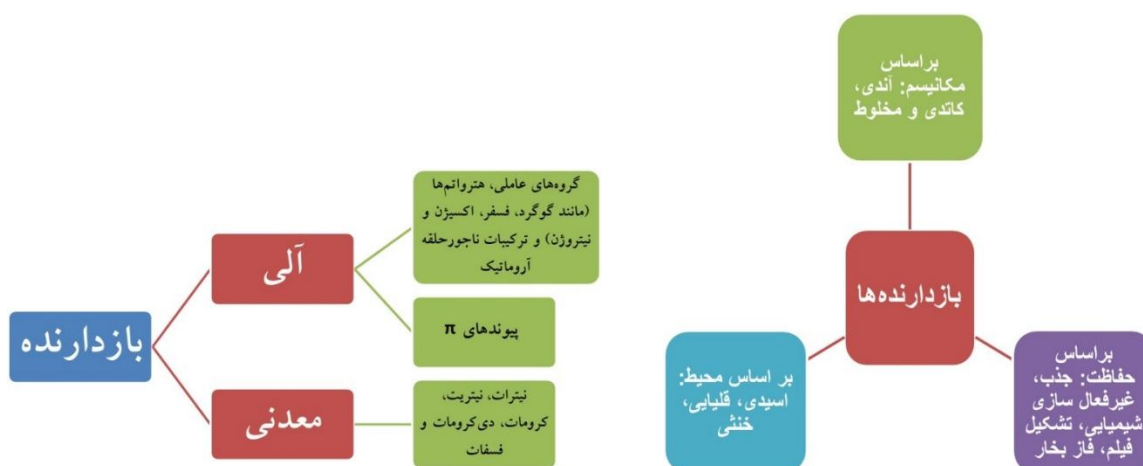
⁷ Carbon nanotubes

⁸ Graphene

به‌دلیل هزینه بالا، سمیت، تجزیه‌ناپذیری زیستی^۱ و خطرات بهداشتی محدود شده است [۳۲]. برخی از آنها حاوی عناصر سنگین^۲ هستند که به دلیل تجمع^۳ و تجزیه نشدن^۴ این عناصر باعث آلودگی محیط زیست می‌شوند و در نهایت با تجمع در گیاهان و جانوران وارد زنجیره غذایی انسان‌ها می‌شوند و اثرات جبران‌ناپذیری به‌جا می‌گذارند [۹].

جدول ۱- شرح مختصری از بازدارنده‌ها براساس مکانیسم.

بازدارنده	روش مهار خوردگی	رایج‌ترین بازدارنده
آندی ^۵	با تشکیل یک لایه محافظ در امتداد آند، پتانسیل آن را افزایش داده و واکنش خوردگی را کاهش می‌دهد.	کرومات‌ها
کاتدی ^۶	با مسدود کردن محل‌های کاتد، سرعت واکنش کاهشی سلول خوردگی الکتروشیمیایی را کاهش داده و سبب کاهش خوردگی می‌شود.	آنتیموان ^۷
مخلوط ^۸	با تشکیل لایه‌ای که باعث ایجاد رسوب در سطح می‌شود، محل‌های آندی و کاتدی را مسدود کرده و خوردگی را به تاخیر می‌اندازد.	فسفات‌ها



شکل ۳. طبقه بندی کلی بازدارنده‌ها.

شکل ۴. ترکیبات بازدارنده‌ها را براساس آلی یا معدنی بودن.

می‌توان گفت اکثر محصولات طبیعی را می‌توان بازدارنده‌های خوردگی سبز در نظر گرفت زیرا سرشار از ترکیبات موثر برای مهار خوردگی هستند [۳۳]. شکل ۵ منابعی را که

از این رو توسعه تحقیقات بر روی بازدارنده‌های خوردگی، براساس منابع طبیعی ایجاد شده است و در واقع مفهوم جدیدی به نام بازدارنده‌های خوردگی سبز پدید آمده است.

¹ Non-biodegradability

² Heavy elements

³ Accumulation

⁴ Non-biodegradation

⁵ Anodic

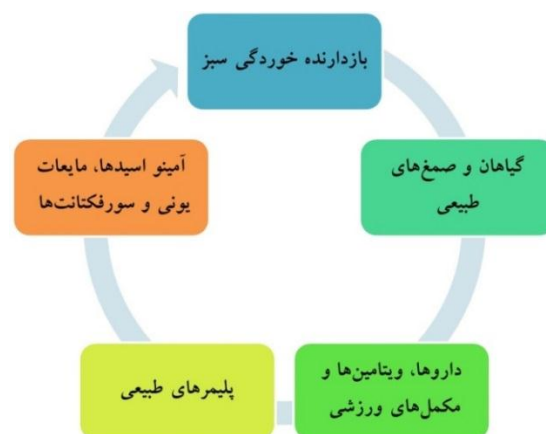
⁶ Cathodic

⁷ Antimony

⁸ Mixed

غیرقطبی بودن)، نسبت حلال به جامد و هم‌چنین دما (به‌طور معمول بهترین دما برای استخراج بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد است) [۴]. رایج‌ترین حلال‌های مورد استفاده برای استخراج ترکیبات گیاهی عبارتند از: آب، اتانول، متانول و استون [۳۶]. مکانیسم و عملکرد بازدارندگی عصاره‌ها مستقیماً به ترکیبات فیتوشیمیایی فعال موجود در گیاه بستگی دارد. به‌طور کلی مکانیسم جذب بازدارنده‌های خوردگی سبز به سه روش است: جذب شیمیایی، جذب فیزیکی یا ترکیبی از این دو روش (مخلوط) [۳۷]. می‌توان گفت عامل تعیین‌کننده نوع جذب، برهم‌کنش سطح فلز باردار با بازدارنده است، در واقع برهم‌کنش ضعیف قطبی باعث جذب فیزیکی و برهم‌کنش مولکولی با نیروهای الکترواستاتیک قوی روی سطح فلز، باعث جذب شیمیایی می‌شود [۴]. اما به‌طور کلی یک بازدارنده مخلوط بهترین محافظت را فراهم می‌کند زیرا بر واکنش‌های کاتدی و آندی تأثیر می‌گذارد. با تمام فاکتورهای مثبتی که عصاره‌های گیاهی دارند اما یک نکته منفی در آنها به‌شدت به‌چشم می‌آید و آن کاهش عملکرد با افزایش دما است [۳۸]. تحقیقات نشان داده است که با افزایش دما میزان جذب در جذب فیزیکی و جذب شیمیایی به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد [۴]. از طرف دیگر زمان غوطه‌وری هم می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد بازدارنده داشته باشد، به‌طور معمول با افزایش این زمان عملکرد بازدارنده کاهش می‌یابد [۳۹]. به‌طور کلی می‌توان گفت که عصاره گیاهان یک راه‌حل مقرون به‌صرفه برای محافظت از فلزات هستند. هم‌چنین بازدارنده‌های گیاهی، به‌دلیل غیرسمی بودن (گاهی اوقات سمیت بسیار کم) و سازگاری با محیط زیست بسیار مورد توجه می‌باشند. جدول ۲ خلاصه‌ای از عملکرد برخی از بازدارنده‌های خوردگی بر پایه گیاهان را در محیط‌های مختلف را گزارش می‌دهد.

می‌توانند به‌عنوان بازدارنده مورد استفاده قرار گیرند نشان می‌دهد. گیاهان منابع بسیار غنی از ترکیبات گوناگون هستند که ماهیت بسیاری از آنها غیرسمی است و هم‌چنین دارای قیمت ارزان، فراوانی بالا، روش تهیه آسان و سازگار با محیط زیست می‌باشند [۳۴]. روغن‌ها و عصاره‌های گیاهان شامل طیف وسیعی از ترکیبات فیتوشیمیایی^۱ مانند تانن‌ها^۲، فلاونوئیدها^۳ و پلی‌فنول‌ها^۴ هستند [۴].



شکل ۵. انواع بازدارنده‌های خوردگی سبز.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد می‌توان از قسمت‌های مختلف گیاهان از جمله برگ، ریشه، میوه، گل و قسمت‌های چوبی استفاده کرد. به‌طور معمول از عصاره‌های گیاهی بیشتر برای بررسی مهار خوردگی استفاده می‌شود. در حقیقت، به‌محلولی که از مواد موثره (ترکیبات) گیاه و محیط خاصی (حلال) تشکیل شده است، عصاره می‌گویند [۴]. روش تهیه عصاره گیاهی بسیار مهم است، به‌طور معمول استخراج با حلال بیشترین استفاده را دارد زیرا آسان‌تر، سریع‌تر و ظرفیت تولید بالاتری نسبت به روش‌های دیگر دارد. در این روش حلال به داخل بافت گیاه نفوذ کرده و سبب استخراج ترکیبات مورد نیاز می‌شود [۳۵]. عوامل زیادی بر کیفیت عصاره تأثیر می‌گذارند، از جمله نوع حلال (قطبی یا

¹ Phytochemical compounds

² Tannins

³ Flavonoids

⁴ Polyphenols

جدول ۲. عملکرد بازدارندگی خوردگی برخی از گیاهان.

گیاه	بستر	محیط خورنده	حداکثر عملکرد (%)	مرجع
<i>Rhynchosyilis retusa</i>	فولاد نرم	اسید سولفوریک	۹۳٫۲۴	۴۰
<i>Acacia catechu</i>	فولاد نرم	اسید سولفوریک	۹۸٫۵۴	۴۱
<i>Solanum xanthocarpum</i>	فولاد نرم	اسید سولفوریک	۹۸٫۱۴	۴۲
<i>Pinus nigra</i>	فولاد کربنی	اسید هیدروکلریک	۹۷	۴۳
دانه خرما	فولاد کربنی	اسید هیدروکلریک	۹۵	۴۴
<i>Cucumis sativus L.</i>	فولاد کربنی	اسید سولفوریک	۹۲٫۸	۴۵
<i>Harmal roots</i>	فولاد کربنی	اسید سولفوریک	۹۴٫۱	۴۶
<i>Aerva lanata</i>	آلومینیوم	کلرید سدیم	۸۸	۴۷
<i>Ziziphus joazeiro</i>	فولاد نرم	اسید هیدروکلریک	۹۴٫۷	۴۸
<i>Rosa damascene</i>	فولاد کربنی	اسید سولفوریک	۹۶٫۱	۴۹
<i>Cinnamomum camphora</i>	فولاد نرم	اسید سولفوریک	۹۷	۵۰
برگ زیتون	مس	پتاسیم هیدروکسید	۹۰٫۶۸	۵۱
<i>Justicia brandegeana</i>	فولاد کربنی	اسید سولفوریک	۸۲٫۴۱	۵۲
ضایعات قهوه	فولاد کربنی	اسید هیدروکلریک	۹۶	۵۳
<i>Chamaerops humilis</i>	فولاد کربنی	اسید هیدروکلریک	۹۴	۵۴
روغن هسته انگور	فولاد کربنی	اسید هیدروکلریک	۷۹	۵۵
برگ انجیر	فولاد کربنی	اسید هیدروکلریک	۹۴	۵۶
<i>Cyclotrichium niveum</i>	فولاد کربنی	اسید هیدروکلریک	۹۷٫۳	۵۷
Pumpkin leaf	مس	اسید سولفوریک	۸۹٫۹۸	۵۸
<i>Pipper cubeba</i>	فولاد کربنی	سولفامیک اسید	۹۶	۵۹
<i>Asafoetida</i>	فولاد نرم	کلرید سدیم	۹۰	۶۰
<i>Skytanthus acutus</i>	فولاد کربنی	کلرید سدیم	۹۰	۶۱
پوست پرتقال	آلیاژ منیزیم	کلرید سدیم	۸۵٫۷	۶۲

۵- نتیجه‌گیری

محیط خورنده، دما و غلظت مورد استفاده بستگی دارد. هم‌چنین، اعتماد به استفاده از آنها برای کاربردهایی در مقیاس‌های بزرگ هم‌چنان نیاز به زمان دارد. بنابراین می‌توان گفت تلاش‌های پژوهشی هم‌چنان باید بر مقرون به‌صرفه بودن و بهبود عملکرد در شرایط مختلف متمرکز شود.

در این مرور، استفاده از گیاهان به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی سبز مورد بررسی قرار گرفت. گیاهان به‌دلیل در دسترس بودن، قیمت ارزان و غیرسمی بودن کاندید مناسبی برای استفاده می‌باشند، اما هنوز مشکلاتی در استفاده از آنها وجود دارد که مهم‌ترین آن اثر بازدارندگی در دماهای بالا می‌باشد. عملکرد آنها به عوامل متعددی مانند نوع بستر،

مراجع

- [1] S. Wang, Y. He, M. Song, Global value chains, technological progress, and environmental pollution: Inequality towards developing countries, *J. Environ. Manag.* 277 (2021) 110999.
- [2] C. Rao, B. Yan, Study on the interactive influence between economic growth and environmental pollution, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (2020) 39442-39465.
- [3] C. Long, Z. Jiang, J. Shangguan, T. Qing, P. Zhang, B. Feng, Applications of carbon dots in environmental pollution control: A review., *Chem. Eng. J.* 406 (2021) 126848.
- [4] M. Sheydaei, The Use of Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors: A Review, *Surfaces* 7 (2024) 380-403.
- [5] S.I. Zandalinas, F.B. Fritschi, R. Mittler, Global warming, climate change, and environmental pollution: Recipe for a multifactorial stress combination disaster, *Trends Plant Sci.* 26 (2021) 588-599.
- [6] M. Sheydaei, Heavy metals contamination in soil and rice and their removal processes: a brief review, *Geomicrobiol. J.* 41 (2024) 721-731.
- [7] P. Ghiasvandnia, M. Sheydaei, M. Edraki, Evaluation of toxic metals content and microbial contamination of parsley (*Petroselinum crispum*) prepared from local farms in Kushal and Layalestan regions (Lahijan city, north of Iran), *Gıda Bilimi ve Mühendisliği Araştırmaları* 2 (2023) 23-27.
- [8] M. Sheydaei, V. Pouraman, E. Alinia-Ahandani, S. Shahbazi-Ganjgah, PVCS/GO nanocomposites: investigation of thermophysical, mechanical and antimicrobial properties, *J. Sulfur Chem.* 43 (2022) 376-390.
- [9] M. Sheydaei, Investigation of Heavy Metals Pollution and Their Removal Methods: A Review, *Geomicrobiol. J.* 41 (2024) 213-230.
- [10] M. Sheydaei, E. Alinia-Ahandani, Breast cancer and the role of polymer-carriers in treatment, *Biomed. J. Sci. Tech. Res.* 34 (2021) 27057-27061.
- [11] M. Sheydaei, E. Alinia-Ahandani, P. Ghiasvandnia, Cancer and The Role of Polymer-Carriers in Drug Delivery, *J. Genet. Cell Biol.* 4 (2020) 217-220.
- [12] J. Theerthagiri, S.J. Lee, K. Karuppasamy, S. Arulmani, S. Veeralakshmi, M. Ashokkumar, M.Y. Choi, Application of advanced materials in sonophotocatalytic processes for the remediation of environmental pollutants. *J. Hazard. Mater.* 412 (2021) 125245.
- [13] M. Edraki, M. Sheydaei, D. Zaarei, A. Salmasifar, B. Azizi, Protective nanocomposite coating based on ginger modified clay and polyurethane: preparation, characterization and evaluation anti-corrosion and mechanical properties, *Polym. Sci. Ser. B.* 64 (2022) 756-764.
- [14] M. Edraki, M. Sheydaei, E. Vessally, A. Salmasifar, Enhanced mechanical, anticorrosion and antimicrobial properties of epoxy coating via pine pollen modified clay incorporation, *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* 42 (2023) 2775-2786.
- [15] M. Sheydaei, M. Edraki, F. Safyari-Jafar Abad, Matcha-modified clay polyurethane coating: improving thermal, mechanical, antimicrobial, and anticorrosion performance, *Iran. Polym. J.* 32 (2023) 1643-1654.
- [16] M. Sheydaei, M. Edraki, S.M. Radeghi Mehrjou, Anticorrosion and Antimicrobial Evaluation of Sol-Gel Hybrid Coatings Containing *Clitoria ternatea* Modified Clay, *Gels* 9 (2023) 490.
- [17] M. Edraki, M. Sheydaei, Investigation of the Dual Active/Barrier Corrosion Protection, Mechanical and Thermal Properties of a Vinyl Ester Coating Doped with Ginger Modified Clay Nanoparticles, *Russ. J. Appl. Chem.* 95 (2022) 1481-1488.
- [18] M. Edraki, M. Sheydaei, Investigation of date seed powder as green corrosion inhibitor for mild steel: A study of solution and coating phases, *Hybrid Advances.* 6 (2024) 100238.

- [19] Y. Qiang, S. Zhang, H. Zhao, B. Tan, L. Wang, Enhanced anticorrosion performance of copper by novel N-doped carbon dots, *Corros. Sci.* 161 (2019) 108193.
- [20] M. Nasrollahzadeh, S.M. Sajadi, M. Khalaj, Green synthesis of copper nanoparticles using aqueous extract of the leaves of *Euphorbia esula* L and their catalytic activity for ligand-free Ullmann-coupling reaction and reduction of 4-nitrophenol, *RSC Adv.* 4 (2014) 47313-47318.
- [21] G. Ji, P. Dwivedi, S. Sundaram, R. Prakash, Aqueous extract of *Argemone mexicana* roots for effective protection of mild steel in an HCl environment, *Res. Chem. Intermed.* 42 (2016) 439-459.
- [22] K. Tamalmani, H. Husin, Review on corrosion inhibitors for oil and gas corrosion issues, *Appl. Sci.* 10 (2020) 3389.
- [23] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, T. Nazdracheva, Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review, *Constr. Build. Mater.* 288 (2021) 123115.
- [24] S.J. Oh, D.C. Cook, H.E. Townsend, Atmospheric corrosion of different steels in marine, rural and industrial environments, *Corros. Sci.* 41 (1999) 1687-1702.
- [25] M.C. Ilie, I. Maior, C.E. Raducanu, I.M. Deleanu, T. Dobre, O.C. Parvulescu, Experimental Investigation and Modeling of Film Flow Corrosion, *Metals* 13 (2023) 1425.
- [26] W. Wang, C. Hou, J. Li, M. Shi, J. Chen, G. Qian, Corrosion Failure Mechanism of 2507 Duplex Stainless Steel Circulation Pump Impeller, *Processes* 12 (2024) 1897.
- [27] L. Soufeiani, G. Foliente, K.T. Nguyen, R. San Nicolas, Corrosion protection of steel elements in façade systems—A review, *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101759.
- [28] A. Dal Pozzo, R. Moricone, A. Tugnoli, V. Cozzani, Experimental investigation of the reactivity of sodium bicarbonate toward hydrogen chloride and sulfur dioxide at low temperatures, *Ind. Eng. Chem. Res.* 58 (2019) 6316-6324.
- [29] F. Corvo, J. Minotas, J. Delgado, C. Arroyave, Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime, *Corros. Sci.* 47 (2005) 883-892.
- [30] M. Sheydaei, M. Edraki, An Overview of Silane-based Hybrid Sol-gel Coatings for Highly Efficient Metal Corrosion Protection, *J. Appl. Mat. Sci.* 1 (2025) 210131.
- [31] M. Edraki, M. Mahdiani, M. Sheydaei, A Review on the Use of MXene and Graphene in Epoxy Coatings and Their Protective Applications, *Journal of Studies in Color World*, 14 (2024) 329-349.
- [32] M. Edraki, M. Sheydaei, D. Zaarei, A brief review of the performance of azole-type organic corrosion inhibitors, *Chem. Rev. Lett.* 6 (2023) 79-85.
- [33] M. Sheydaei, M. Edraki, S. Javanbakht, *Ganoderma Lucidum*-Modified Clay Epoxy Coating: Investigation of Thermal, Mechanical, Anticorrosion, and Antimicrobial Properties, *Polym. Sci. Ser. B.* 65 (2023) 991-1000.
- [34] M. Edraki, M. Sheydaei, A. Salmasifar, D. Zaarei, The effect of matcha-impregnated sodium montmorillonite on the corrosion mitigation of mild steel in saline medium, *UNEC J.E.A.S.* 4 (2024) 5-11.
- [35] A.M. Abdel-Karim, A.M. El-Shamy, A review on green corrosion inhibitors for protection of archeological metal artifacts, *J. Bio-Tribo-Corros.* 8 (2022) 35.
- [36] M.M. Cowan, Plant products as antimicrobial agents, *Clin. Microbiol. Rev.* 12 (1999) 564-582.
- [37] E.S.J. Ahmed, G.M. Ganesh, A comprehensive overview on corrosion in RCC and its prevention using various green corrosion inhibitors, *Buildings* 12 (2022) 1682.
- [38] A. Miralrio, A. Espinoza Vázquez, Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: A review, *Processes* 8 (2020) 942.

- [39] P.R. Sivakumar, A.P. Srikanth, Green corrosion inhibitor: A comparative study, *Sādhanā* 45 (2020) 56.
- [40] A. Chapagain, D. Acharya, A.K. Das, K. Chhetri, H.B. Oli, A.P. Yadav, Alkaloid of *Rhynchosyris retusa* as Green Inhibitor for Mild Steel Corrosion in 1 M H_2SO_4 Solution, *Electrochem* 3 (2022) 211-224.
- [41] R. Karki, A.K. Bajgai, N. Khadka, O. Thapa, T. Mukhiya, H.B. Oli, D.P. Bhattarai, Acacia Catechu Bark Alkaloids as Novel Green Inhibitors for Mild Steel Corrosion in a One Molar Sulphuric Acid Solution, *Electrochem* 3 (2022) 668-687.
- [42] O. Thapa, J.T. Magar, H.B. Oli, A. Rajaure, D. Nepali, D.P. Bhattarai, T. Mukhiya, Alkaloids of *Solanum Xanthocarpum* Stem as Green Inhibitor for Mild Steel Corrosion in One Molar Sulphuric Acid Solution, *Electrochem* 3 (2022) 820-842.
- [43] A.R. Simović, B.N. Grgur, J. Novaković, P. Janačković, J. Bajat, Black Pine (*Pinus nigra*) Essential Oil as a Green Corrosion Inhibitor for Carbon Steel, *Metals* 13 (2023) 508.
- [44] N.J. Mohammed, N.K. Othman, M.F. Taib, M.H. Samat, S. Yahya, Experimental and Theoretical Studies on Extract of Date Palm Seed as a Green Anti-Corrosion Agent in Hydrochloric Acid Solution, *Molecules* 26 (2021) 3535.
- [45] L. Feng, S. Zhang, L. Hao, H. Du, R. Pan, G. Huang, H. Liu, Cucumber (*Cucumis sativus* L.) leaf extract as a green corrosion inhibitor for carbon steel in acidic solution: Electrochemical, functional and molecular analysis, *Molecules* 27 (2022) 3826.
- [46] H.H. Hammud, S.A. Maache, N. Al Otaibi, N.S. Sheikh, An Integrated Experimental and Theoretical Studies on the Corrosion Inhibition of Carbon Steel by Harmal Extracts, *Molecules* 27 (2022) 7250.
- [47] N.R. Hynes, N.J. Vignesh, C. Barile, P.S. Velu, T. Baskaran, J.T. Jappes, O.A. Al-Khashman, M. Brykov, A. Ene, Green Corrosion Inhibition on Carbon-Fibre-Reinforced Aluminium Laminate in NaCl Using *Aerva Lanata* Flower Extract, *Polymers* 14 (2022) 1700.
- [48] A.C. Mauro, B.D. Ribeiro, R. Garrett, R.M. Borges, T.U.; da Silva, S.; de Paula Machado, J.R. de Araujo, S. de Oliveira Massafra, F.O. de Oliveira Junior, E. D'Elia, *Ziziphus joazeiro* stem bark extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in acid medium, *Processes* 9 (2021) 1323.
- [49] H.M. Elabbasy, M.E. Elnagar, A.E. Fouda, Chemical, electrochemical, and surface studies of Rosa damascene extract as a green corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid environment, *J. Chin. Chem. Soc.* 71 (2024) 385-396.
- [50] A. El Nemr, A. Elhebshi, I. Ashour, M.S. El-Deab, N.A. Barghout, N.O. Eddy, S. Ragab, Camphor tree bark extract as green corrosion inhibitor of LCS in 0.5 M H_2SO_4 with and without salt effect, *J. Chin. Chem. Soc.* 71 (2024) 174-196.
- [51] S. Eid, S.M. Syam, A.Y. El-Etre, N.H. Sayed, Surface, electrochemical, and theoretical investigation on utilizing olive leaf extract as green inhibitor for copper corrosion in alkaline environment, *Arab. J. Sci. Eng.* 49 (2024) 147-164.
- [52] G.K. Barboza, M.C. de Oliveira, M.A. Neves, A. Echevarria, *Justicia brandegeana* as a green corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid, *Green Chem. Lett. Rev.* 17 (2024) 2320254.
- [53] S. Elhady, E.G. Zaki, O.E. El-Azabawy, I.S. Fahim, Electrochemical evaluation of green corrosion inhibitor based on ground coffee waste in Petroleum fields, *Results Eng.* 21 (2024) 101880.
- [54] F.Z. Eddahhaoui, A. Najem, M. Elhawary, M. Boudalia, O.S. Campos, M. Tabyaoui, A.J. Garcia, A. Bellaouchou, H.M. Amin, Experimental and computational aspects of green corrosion inhibition for low carbon steel in HCl environment using extract of *Chamaerops humilis* fruit waste, *J. Alloys Compd.* 977 (2024) 173307.
- [55] A. Batah, A.H. Al-Moubaraki, E.A. Noor, J.M. Al-Ahmari, A.A. Al-Ghamdi, O.I. El Mouden, R. Salghi, M. Chafiq, A. Chaouiki, Y.G. Ko, Environmentally Benign Grape Seed Oil for Corrosion Inhibition: Cutting-Edge Computational Modeling Techniques Revealing the Intermolecular and Intramolecular Synergistic Inhibition Action, *Coatings* 14 (2024) 77.

- [56] H. Rahmouni, S. Nigri, M. Nacef, R. Oumeddour, A.M. Affoune, Analysis of Fig Leaf Extract as Steel Eco-friendly Corrosion Inhibitor in Acidic Medium: Electrochemical, Gravimetric, Spectroscopic, and Surface Studies, *Anal. Bioanal. Electrochem.* 16 (2024) 142-162.
- [57] R. Yıldız, S. Arslanhan, A. Döner, M.F. Baran, Corrosion behavior of mild steel in 1 M HCl with *Cyclotrichium niveum* as a green inhibitor, *Mater. Chem. Phys.* 312 (2024) 128654.
- [58] H. Ren, Y. Liu, Z. Gong, B. Tan, H. Deng, J. Xiong, P. Shao, Q. Dai, J. Cao, R. Marzouki, Pumpkin Leaf Extract Crop Waste as a New Degradable and Environmentally Friendly Corrosion Inhibitor, *Langmuir* 40 (2024) 5738-5752.
- [59] A.M. Salem, M.S. Al-Sharif, Eco-Friendly *Piper cubeba* Official Extract Corrosion Inhibition of C-Steel in 1 M Sulfamic Acid, *ACS Omega* 9 (2024) 5024-5037.
- [60] S. Devikala, P. Kamaraj, M. Arthanareeswari, S. Pavithra, Green Corrosion inhibition of mild steel by *Asafoetida* extract extract in 3.5% NaCl, *Mater. Today Proc.* 14 (2019) 590-601.
- [61] L. Cáceres, Y. Frez, F. Galleguillos, A. Soliz, B. Gómez-Silva, J. Borquez, Aqueous dried extract of *skytanthus acutus* meyen as corrosion inhibitor of carbon steel in neutral chloride solutions, *Metals* 11 (2021) 1992.
- [62] Y. Wu, Y.; Zhang, Y.; Jiang, Y.; Qian, X. Guo, L. Wang, J. Zhang, Orange peel extracts as biodegradable corrosion inhibitor for magnesium alloy in NaCl solution: Experimental and theoretical studies, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 115 (2020) 35-46.

