

Investigating the Effectiveness of Pomegranate Peel Extract in Protecting Rebar Corrosion in Concrete Simulant Solution

Samaneh Fatehi Kenarsari, Somayeh Mohammadi*

Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Guilan, P.O. Box: 41635-1914, Rasht, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12-03-2025

Accepted: 30-06-2025

Available online: 01-10-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167495.1256

Keywords:

Pomegranate peel extract

Nitrate

Green corrosion inhibitor

Steel rebar

Concrete simulating environment

ABSTRACT

In this research, the inhibitive effects of pomegranate peel extracted with water and a water/acetonitrile solvent as a green corrosion inhibitor of steel rebar in a concrete simulation environment are investigated. For this purpose, the inhibition effect was evaluated using spectroscopic, electrochemical, weight loss, and electron microscopy methods. Concentrations of 1, 2, 3, and 4 % by volume of the green inhibitor were investigated, and the optimal concentration was found to be 4 wt. % for the calcium nitrate inhibitor. The results showed that the inhibition efficiency of the extracted extract in water/acetonitrile at an optimal concentration of 3 % v/v was higher than that of nitrate. The impedance results showed that in the presence of the green inhibitor, the polarization resistance (R_p) increased from 488 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) in the blank to 8260 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) in the inhibitor, and the inhibition efficiency was 94 % compared to nitrate (91.8 %). The SEM-EDX results indicated the formation of a continuous inhibitor film on the metal substrate, which prevents the penetration and absorption of chloride ions, thus preserving the passive film on the metal substrate.

*Corresponding author: * somaye.mohammadi32@guilan.ac.ir



بررسی کارایی عصاره پوست انار در حفاظت از خوردگی میلگرد در محلول شبیه‌ساز بتن

سمانه فاتحی کنارسری^۱، سمیه محمدی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، صندوق پستی: ۴۱۶۳۵-۱۹۱۴

۲- استادیار، گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، صندوق پستی: ۴۱۶۳۵-۱۹۱۴

چکیده

در این پژوهش، اثرات بازدارندگی عصاره پوست انار استخراج شده با آب و همچنین آب/ استونیتریل به عنوان بازدارنده خوردگی میلگرد فولادی در محیط شبیه‌ساز بتن بررسی شد. بدین منظور، اثر بازدارندگی با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی الکتروشیمیایی، کاهش وزن و میکروسکوپ الکترونی ارزیابی شد. غلظت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد حجمی/ حجمی از بازدارنده سبز و غلظت بهینه ۴ درصد وزنی از بازدارنده کلسیم نیترات بررسی شد. نتایج نشان دادند که کارایی بازدارندگی عصاره استخراج شده در آب- استونیتریل در غلظت بهینه ۳ درصد، بالاتر از بازدارنده نیترات است. نتایج امپدانس نشان داد که در حضور بازدارنده سبز، مقاومت قطبش (R_p) از $488 (\Omega.cm^2)$ در شاهد تا $8260 (\Omega.cm^2)$ در بازدارنده افزایش پیدا کرد و کارایی بازدارندگی مقدار ۹۴ درصد نسبت به نیترات (۹۱/۸ درصد) به دست آمد. نتایج SEM- EDX حاکی از تشکیل یک فیلم پیوسته از بازدارنده بر بستر فلز بود که مانع از نفوذ و جذب یون کلرید و حفظ فیلم رویین تشکیل شده بر بستر فلز می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167495.1256

واژه‌های کلیدی:

عصاره پوست انار

نیترات

بازدارنده خوردگی سبز

میلگرد فولادی

محیط شبیه‌ساز بتن

*Corresponding author: * somaye.mohammadi32@guilan.ac.ir



۱- مقدمه

اصولاً بتنی که به تازگی تهیه شده است به دلیل دارا بودن خاصیت قلیایی (۱۲-۱۳: pH)، موجب حفاظت آرماتور در اثر تشکیل یک فیلم اکسیدی فشرده روپین می‌شود که به دلیل خاصیت قلیایی بالا در بتن، این حالت روپین حفظ می‌شود (۱-۳). هرچند در یک بتن با کیفیت که شامل اجزای با کیفیت، درصد اختلاط مناسب اجزا و نسبت آب به سیمان مناسب است، خوردگی آرماتور دیرتر اتفاق می‌افتد، اما عوامل خاصی موجب از بین رفتن لایه اکسیدی روپین و در نتیجه آغاز خوردگی در آرماتور بتن می‌شوند. این عوامل عبارتند از:

■ **پدیده کربن شدن:** کربن شدن فرایندی است که طی آن، CO_2 موجود در هوا با هیدروکسید موجود در بتن مثل Ca(OH)_2 واکنش داده و با تشکیل کربنات، موجب کاهش pH می‌شود. با رسیدن pH بتن به کمتر از ۱۲ (حوالی ۸ تا ۹)، لایه اکسیدی روپین از بین رفته و در حضور رطوبت و O_2 خوردگی آرماتور آغاز می‌شود (۱-۳).

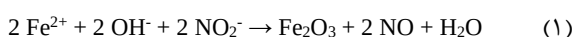
■ **وجود یون کلرید:** غلظت یون کلرید مورد نیاز برای آغاز خوردگی در آرماتور وابسته به pH بتن است. در بتن تازه‌ساز با طبیعت قلیایی، غلظت یون کلرید حد آستانه‌ای بین ۷۵۰۰-۸۰۰۰ ppm دارد، ولی در صورت کاهش قلیانیت، این مقدار به ۱۰۰ ppm می‌رسد.

■ **باران‌های اسیدی و آلاینده‌های صنعتی:** وجود انواع آلاینده‌های صنعتی از جمله گازهای H_2S ، SO_2 ، NO_2 و غیره که امروزه در اکثر شهرها میزان آنها افزایش یافته است، موجب تشکیل باران‌های اسیدی می‌شود که می‌توانند با کاهش pH بتن، موجب خوردگی آرماتور شوند (۱-۳).

در اثر خوردگی آرماتور، محصولات ناشی از خوردگی آن از جمله اکسید آهن یا هیدروکسیدها، به دلیل افزایش حجم و با فشاری که ایجاد می‌کنند، موجب ایجاد ترک و شکست در بتن و ایجاد وقایع و خسارات جبران ناپذیر می‌شوند (۱-۳). در اغلب مواقع، شدت خوردگی به حدی است که منجر به تعمیرات بتن و عملیات بتن‌ریزی مجدد می‌شود که بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. برخی از اقداماتی که در جهت مبارزه با خوردگی آرماتور در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل استفاده از آرماتورهای مقاوم به خوردگی (فولاد ضدزنگ)، استفاده از آرماتورهای پوشش‌دار (پوشش اپوکسی)، حفاظت کاتدی، تهیه بتن با نفوذپذیری پایین، استفاده از بتن با مقاومت الکتریکی بالا و بازدارنده‌های خوردگی هستند (۱-۳).

با این وجود، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی از نظر اقتصادی و سهولت استفاده از آنها، از جذابیت بیشتری برخوردار است (۳). گرچه در سال‌های اخیر، بازدارنده‌های آلی نقش برجسته‌ای پیدا کرده‌اند، ولی

کلسیم نیتريت و کلسیم نیترات به عنوان بازدارنده‌های خوردگی کارآمد در بتن‌های با رسوب زیاد، کاربرد دارند (۴). این ترکیبات، در مقابل حضور کلریدها، از آرماتور محافظت کرده (به دلیل ترمیم فیلم غیرفعال آسیب دیده) و به سهولت برای مصارف عمومی بتن به عنوان یک بازدارنده خوردگی تجاری در دسترس قرار دارند (۴). یک شرح تفصیلی از سازوکار بازدارندگی خوردگی توسط کلسیم نیتريت، ارائه شده است. واکنش آنیدی اصلی که در بتن رخ می‌دهد، شامل $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ و به دنبال آن واکنش‌های دیگری است که منجر به تولید ترکیباتی چون Fe(OH)_2 ، Fe_3O_4 ، FeO-OH ، γ در سطح آرماتور می‌شوند. کلسیم نیتريت و کلسیم نیترات جزء بازدارنده‌های آنیدی هستند که بنابر پاره‌ای نظرات، مسئولیت ترمیم نقاط ضعیف فیلم روپین و واکنش با یون‌های آهن را برعهده دارند (واکنش ۱ و ۲) (۴).



هرچند بازدارنده‌های نیتريت و نیترات به عنوان اولین بازدارنده خوردگی در ساختارهای بتنی استفاده شدند، اما این بازدارنده‌ها مشکلاتی در بتن ایجاد می‌کنند از جمله تسریع در زمان گیرش بتن (مدت زمان لازم برای آغاز سخت شدن سیمان بتن) و افزایش انقباض خشکی (کاهش حجم بتن در اثر از دست دادن رطوبت حین خشک شدن) در بتن و با افزایش میزان این بازدارنده‌ها، مشکلات فوق تشدید می‌شود (۴). این بازدارنده‌ها تنها به صورت مواد افزودنی در ساختارهای بتنی تازه‌ساز قابل استفاده هستند. از طرفی، به دلیل اینکه کلسیم نیتريت یک بازدارنده آنیدی است، چنانچه در غلظت‌های ناکافی استفاده شود، موجب ایجاد و تشدید خوردگی حفره‌ای می‌شود. این ترکیب معمولاً در میزان بهینه ۴ درصد وزنی در بتن استفاده می‌شود اما در همین مقادیر بالا نیز در محیط‌های با خوردندگی شدید کارایی مناسبی نشان نمی‌دهد (۴). بررسی‌ها با استفاده از روش‌های مختلف تجربی در محلول، ملات و خود بتن یک نسبت بحرانی برای بازدارنده نیتريت نسبت به غلظت کلرید را نشان داد که معادل ۰/۶ است و این نسبت بحرانی آغاز خوردگی را به تاخیر می‌اندازد و در مواردی این نسبت بحرانی می‌تواند بین ۰/۵ تا ۱ متغیر باشد (۴).

از طرفی، سمیت و سرطان‌زایی نیتريت‌ها و نیترات‌ها موجب آسیب موقت یا دائم به محیط‌زیست و سلامت انسان می‌شود و با توجه به مقررات و نگرانی‌های زیست‌محیطی و افزایش احتمالی نرخ خوردگی در نتیجه ناکافی بودن بازدارنده، نیتريت‌ها در اروپا کاربرد کمی پیدا کرده‌اند (۴، ۵). کلسیم نیتريت و کلسیم نیترات هر دو به عنوان بازدارنده‌های پرمصرف و نسبتاً موثری در بتن هستند، اما براساس

همافزایی صمغ آدامس و صمغ عربی^۳ را در رفتار خوردگی آرماتور در محیط شبیه‌ساز به مدت ۴۸ ساعت بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد در غلظت ۱۰۰۰ ppm، بازدارنده‌ها جذب خوبی بر بستر دارند (۱۷). رحمانی و همکارانش، اثر عصاره میوه انبه را در حفاظت از خوردگی آرماتور در محلول شبیه‌ساز بتن بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان دادند که عصاره میوه انبه در غلظت ۲ درصد وزنی، کارایی ۹۸ درصد دارد (۱۸). در رابطه با بررسی کارایی بازدارندگی پوست انار در محیط شبیه‌ساز بتن پژوهش‌های کمی صورت گرفته است. در یک پژوهش، هاروات و همکارانش، اثرات بازدارندگی عصاره پوست انار را در محلول بتن شبیه‌سازی شده حاوی ۰/۵ مولار NaCl بررسی کردند و نتایج نشان داد که غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر از عصاره پوست انار بازده بازدارنده به اندازه ۹۷،۳۹ درصد دارد (۱۹). همچنین در پژوهشی دیگر که توسط باسکاران، برای بررسی کارایی عصاره پوست انار در بتن انجام شد. مقاومت در برابر خوردگی کربناته آرماتور در حضور عصاره پوست انار انجام شد و نتایج نشان داد که آرماتور فولادی بدون بازدارنده، دچار خوردگی کربناته شد، در حالی که در حضور عصاره پوست انار، آرماتور تحت تأثیر خوردگی کربناته قرار نگرفت (۲۰). در پژوهش حاضر، هدف بررسی یک عصاره گیاهی حاصل از بخش پسماند و دور ریز پوست انار برای تولید یک بازدارنده خوردگی سبز و مقرون‌به‌صرفه برای حفاظت آرماتور در محیط شبیه‌ساز بتن بود. مطالعات انجام شده در چند دهه گذشته نشان دادند که انار و اجزای آن دارای خواص آنتی‌اکسیدانی قوی، ضد التهاب، ضد باکتری، ضد میکروب و قارچ است (۲۱). قسمت‌های غیرخوراکی انار (عمدتاً پوست) حاوی ترکیبات فعال زیستی بیشتری نسبت به قسمت خوراکی بوده و نقش موثرتری دارند (۲۲). ترکیبات اجزای غالب در عصاره پوست انار عبارتند از: گالیک اسید، گالاژیک اسید، الازیک اسید و غیره که حاوی هتروآتم‌ها، گروه‌های عاملی الکترون‌گاو و حلقه‌های آروماتیک هستند (۱۹). در شکل ۱ ساختار برخی از مهم‌ترین ترکیبات پلی‌فنل موجود در پوست انار آورده شده است. طبق بررسی‌های انجام شده در این زمینه براساس پژوهش قبل (۱۹)، میزان استخراج ترکیبات فعال گیامایه در حلال‌های مختلف متفاوت بوده و طبق بررسی‌های انجام شده، سامانه‌های حلالی آب/اتانل و آب/استونیتربل در کنار آب خالص به عنوان محیط استخراج کننده با روش ساده و مقرون‌به‌صرفه استخراج با حلال (روش اختلاط ساده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده شدند. نتایج نشان دادند که سامانه حلالی آب/استونیتربل با نسبت حجمی (۲:۱) بیشترین کارایی را در استخراج ترکیبات گیامایه از پوست انار دارد (۱۹). لذا در این پژوهش نیز از این سامانه حلالی برای استخراج استفاده شد و نتایج به دست آمده با نتایج استخراج در حلال آب خالص مقایسه شدند. نکته قابل

برخی مراجع، کلسیم نیترات اثرات بافری بیشتری در مقایسه با کلسیم نیتريت داشته و ارزانتر، دسترسی بیشتر و سمیت کمتری دارد (۴، ۵). اخیراً استفاده از بازدارنده‌های آلی، گزینه جدیدی در برابر استفاده معمول از بازدارنده کلسیم نیتريت است. بازدارنده‌های آلی حفاظت را از طریق جذب و ایجاد یک لایه محافظ روی سطح فولاد انجام می‌دهند (۶). به دلیل مشکلاتی که بسیاری از بازدارنده‌های سنتزی آلی برای محیط‌زیست و سلامت انسان ایجاد می‌کنند و محدودیت‌های شدیدی که در استفاده از آنها اعمال می‌شود، همچنین قیمت بالای تولید آن‌ها، در سال‌های اخیر استفاده از بازدارنده‌های خوردگی سبز به عنوان یک راهبرد جدید دوست‌دار محیط‌زیست، ارزان‌قیمت و تجدیدپذیر برای کنترل خوردگی سازه‌های فلزی در محیط‌های مختلف خورنده بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۷-۱۰، ۵). در زمینه حفاظت از خوردگی آرماتور بتن نیز، استفاده از بازدارنده‌های سبز یا بازدارنده‌های پایه طبیعی اخیراً به دلیل مشکلات زیست‌محیطی سایر بازدارنده‌ها از جمله کلسیم نیتريت بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعاتی در مورد بررسی کارایی بازدارنده‌های سبز انجام شده و پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نزدیک، استفاده از این بازدارنده‌ها توسعه زیادی پیدا کند (۱۱). قریشی و همکارانش اثر کلسیم پالمیتات را به عنوان بازدارنده خوردگی سبز برای آرماتور بتن در محیط سدیم کلرید ۳/۵ درصد بررسی کردند که کارایی ۹۲ درصد نشان داد (۱۲). لیو و همکارانش اثر عصاره زنجبیل را در بازدارنده خوردگی آرماتور بتن در محیط شبیه‌ساز بتن بررسی کردند که نتایج آن‌ها نشان داد غلظت ۲ درصد وزنی از بازدارنده، کارایی خوبی در حفاظت دارد (۱۳). آنیتا و همکارانش اثر عصاره برگ گل محمدی^۱ را در کاهش سرعت خوردگی آرماتور در بتن بررسی کردند و مشاهده کردند در غلظت ۱۲ v/v درصد دارای کارایی ۸۲ درصد است (۱۴). ژانگ و همکارانش نیز از عصاره کنجاله گلو تن ذرت به عنوان بازدارنده خوردگی آرماتور در محلول شبیه‌ساز بتن استفاده کردند. نتایج نشان دادند که عصاره حاصل در غلظت ۲ g/l کارایی معادل ۸۸ درصد دارد (۱۵). بن‌هارب و همکارانش از عصاره استخراج شده از برگ زیتون توسط متانل به عنوان بازدارنده خوردگی آرماتور در محیط شبیه‌ساز بتن استفاده کردند که کارایی به اندازه ۹۱/۹ درصد داشت (۱۶).

نادری و همکارانش از عصاره شیرین بیان برای کنترل خوردگی آرماتور در محیط شبیه‌ساز آلوده به یون کلرید استفاده کردند. بررسی‌های الکتروشیمیایی به مدت ۲۴ ساعت انجام شد و نتایج نشان دادند در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، بازدارنده دارای کارایی ۸۰ درصد است و ترکیبات موجود در عصاره شیرین بیان می‌توانند به صورت شیمیایی روی سطح آرماتور جذب شوند (۵). حجازیان و همکارانش نیز، اثر

3. Arabic and guar gums

4. Phytochemical

1. Rosa damascena (R. damascena) leaves

2. Maize gluten meal extract

شناسایی) و ابعاد $5 \times 5 \text{ cm}^2$ (برای آنالیزهای الکتروشیمیایی) با ترکیب درصد شیمیایی (wt. %): کربن (۰/۴۵)، اکسیژن (۱/۳۷) و آهن (۹۸/۱۷) و خریداری شده از شرکت نما پوشش اعتماد رشت به عنوان فلز پایه انجام گرفت. نوع آرماتور مورد استفاده، شامل میلگرد فولادی آجدار A3 با ترکیب درصد شیمیایی مشخص بود که از شرکت فولاد صبا زاگرس تهیه شد.

ابعاد نمونه‌های مورد استفاده شامل قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر (در آزمون‌های تسریع شده و کوتاه‌مدت) و قطر ۱۰ میلی‌متر با طول ۵۰ میلی‌متر در آزمون‌های بلند مدت بود.

از ترازوی دیجیتال مدل AXIS ALN220 II با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد.

۲-۲- استخراج عصاره‌های گیاهی

برای تهیه عصاره مورد نظر، از پوست انار شیرازی استفاده شد. در ابتدا پوست انار با آب شسته و در آون با دمای 40°C به مدت ۳ روز کاملاً خشک شد. سپس به صورت یک پودر ریزدانه و یکنواخت آسیاب شد و تا زمان استفاده در یک ظرف دربسته در یخچال و به دور از نور نگهداری شد. به منظور عصاره‌گیری، ۱۰ گرم از پودر خشک نمونه به دقت وزن شد و ۱۰۰ میلی‌لیتر از حلال مورد نظر به آن اضافه و به مدت ۶ ساعت در دمای 55°C (۲۴) توسط هم‌زن مغناطیسی با دور 200 rpm هم‌زده شد. سپس مخلوط فوق به منظور حذف مواد جامد توسط کاغذ صافی فیلتر و عصاره مایع حاصل تا حجم ۱۰ میلی‌لیتر به صورت یک مایع نسبتاً غلیظ به رنگ قهوه‌ای تیره تغلیظ شد و در ظروف شیشه‌ای درپوش‌دار تیره در یخچال نگهداری شد. در این پژوهش فرایند استخراج توسط آب (به عنوان شاهد) و همچنین مخلوط آب/استونیتریل به نسبت ۲:۱ حجمی/حجمی انجام شد.

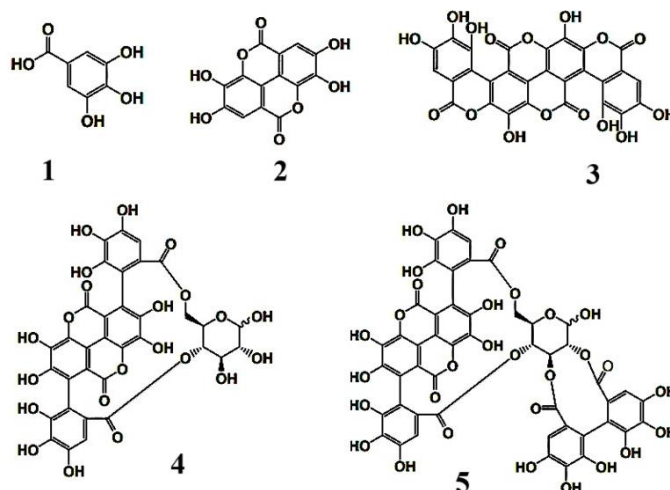
توجه در اغلب مقالات مورد بررسی در زمینه استفاده از بازدارنده‌های شیمیایی و سبب خوردگی در حفاظت از آرماتور در محیط شبیه‌ساز بتن، این بود که در اغلب بررسی‌های انجام شده، زمان بررسی ۲۴ الی ۴۸ ساعت بود که با توجه به بررسی‌های اولیه انجام شده در این پژوهش، زمان بسیار کوتاهی است و برای ارزیابی نتایج کافی نیست. لذا در این پژوهش، بررسی‌ها تحت شرایط خوردگی تسریع شده (شرایط خوردگی تسریع شده، برای اولین بار در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت) و طی مدت زمان دو هفته انجام شدند و در انتهای کار، به منظور مقایسه شرایط تسریع شده با شرایط بلند مدت، آزمون‌های کاهش وزن و الکتروشیمیایی بلند مدت (۳ ماه) نیز بر روی نمونه‌ها انجام شد. از جمله نکات جالب در این تحقیق استفاده از صفحات فولادی در کنار قطعات میلگرد در اکثر آزمایشات، طراحی تست‌های خوردگی تسریع شده (در عرض دو هفته)، انجام تست‌های خوردگی طولانی مدت (۳ ماه) و مقایسه کارایی بازدارنده‌های سبز با بازدارنده تجاری نیترات کلسیم بود.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و دستگاه‌های مورد استفاده

اتانل ۹۶ درصد، کلریدریک اسید ۳۷ درصد، هیدروکسید کلسیم، هیدروکسید پتاسیم و هیدروکسید سدیم از شرکت مجتمع صنایع شیمیایی دارویی دکتر مجللی (ایران) خریداری شد. استونیتریل ۹۹/۹۹ درصد و نیترات کلسیم از شرکت مرک تهیه شد. محلول‌های حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده (۱، ۲، ۳ و ۴ درصد حجمی/حجمی (v/v) با افزودن مقادیر معینی از عصاره‌ها در ۲۵ میلی‌لیتر محلول شبیه‌ساز بتن ساخته شدند.

آزمایش‌ها روی صفحات فولاد ST 37 برش خورده با ابعاد $2 \times 2 \text{ cm}^2$ (برای تست کاهش وزن)، $1 \times 1 \text{ cm}^2$ (برای آزمون‌های



شکل ۱: ساختار ترکیبات پلی فنلی موجود در انار: ۱- گالیک اسید، ۲- الازیک اسید، ۳- گالاژیک اسید، ۴- پونیکالین و ۵- پونیکالاگین (۲۳).

Figure 1: Structure of polyphenolic compounds in pomegranate, 1- Gallic acid, 2- Ellagic acid, 3- Gallic acid, 4- Punicalin, and 5- Punicalagin (23).

۳-۲- تهیه محلول شبیه‌ساز بتن

تمامی آزمون‌ها در محلول شبیه‌ساز بتن انجام شدند. محلول شبیه‌ساز مورد استفاده، محلولی حاوی کلسیم هیدروکسید به صورت اشباع + پتاسیم هیدروکسید با غلظت ۰/۳ مولار + سدیم هیدروکسید با غلظت ۰/۳ مولار و حاوی ۳/۵ درصد وزنی از سدیم کلرید به عنوان منبع یون کلرید بود. محلول فوق دارای pH برابر با ۱۳ بود (۲۵، ۲۰، ۱۸).

۴-۲- شرایط آزمون خوردگی تسريع شده

قبل از آغاز آزمون خوردگی تسريع شده، نمونه‌ها به مدت یک هفته در محلول شبیه‌ساز بتن آلوده به یون کلرید غوطه‌ور شدند. در این شرایط به دلیل اینکه pH محلول شبیه‌ساز در حد ۱۳/۵ است، شرایط برای تشکیل فیلم روئین محافظ بر بستر فولاد با توجه به نمودار پوربه مهیا است و نتایج پتانسیل مدار باز در این شرایط، تشکیل فیلم روئین بر بستر فولاد را تایید کردند. در این مدت، با توجه به فرصتی که به نمونه‌ها داده شد، به تدریج یک فیلم محافظ روئین بر بستر فولاد شکل گرفت (که البته حضور یون کلرید تا حدودی در تشکیل، پیوستگی و انسجام این فیلم محافظ می‌تواند مزاحمت ایجاد کند) و مقادیر پتانسیل مدار باز OCP یا همان پتانسیل خوردگی بین ۲۰۰- الی ۳۰۰ میلی‌ولت بود. این قسمت در واقع شبیه‌سازی حالتی است که آرماتور در بدو ورود به بتن تا زمانی که افت pH در بتن نباشد، در این حالت قرار می‌گیرد. بعد از یک هفته، به منظور تسريع در انجام آزمون، از شرایط آزمون تسريع شده استفاده شد تا شرایطی برای انحلال تدریجی فیلم روئین و عملکرد بازدارنده‌ها ایجاد شود. این شرایط نیز شبیه‌سازی شرایطی است که در اثر ورود عوامل خورنده به داخل بتن، به تدریج pH کاهش می‌یابد و از ۱۳/۵ به حوالی ۸ می‌رسد. در ابتدای هفته دوم، pH محلول‌ها توسط کلریدریک اسید تا حوالی ۸ کاهش یافت. در طول تنظیم pH، مقادیر آن با pH متر و همچنین کاغذ نشانگر pH به طور دقیق کنترل می‌شد. برای تنظیم pH نمونه‌ها از pH متر آزمایشگاهی مجهز به الکترود شیشه‌ای شرکت Zag Chemical استفاده شد. به طور کلی، کارایی بازدارنده‌ها در مجموع بعد از دو هفته غوطه‌وری در محیط شبیه‌ساز بتن (یک هفته شرایط عادی جهت تشکیل فیلم روئین بر بستر فلز و به دنبال آن، یک هفته شرایط خوردگی تسريع شده برای انحلال فیلم روئین تشکیل شده و بررسی کارایی بازدارنده) مورد بررسی‌های آزمایشگاهی قرار گرفتند.

۵-۲- FT-ATR و FT-IR

طیف FT-IR از عصاره خشک پوست انار (استخراج شده در آب و همچنین آب / استونیتریل با نسبت ۲:۱ حجمی / حجمی) با استفاده

از دستگاه طیف‌سنج Shimadzu FT-IR 4100 ثبت گردید.

برای بررسی برهم‌کنش بین ترکیبات بازدارنده و سطح فلز، دو قطعه فولادی پس از براق کردن و چربی‌زدایی در محلول شبیه‌ساز بتن حاوی بازدارنده و همچنین در محلول شبیه‌ساز بدون بازدارنده (به عنوان نمونه شاهد) به مدت ۱۴ روز غوطه‌ور شدند. سپس FT-ATR با استفاده از طیف‌سنج FT-ATR 4100 بر روی هر دو قطعه مذکور انجام شد.

۶-۲- آنالیز SEM/Mapping EDX

سطوح فلزی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ VEGA\TESCAN-LMU (SEM) مجهز به طیف‌سنج پراش اشعه ایکس (EDX) و با ولتاژ شتاب‌دهنده ۳۰ کیلو ولت بررسی شدند. بدین منظور نمونه‌ها به شکل مربع به ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر مربع برش داده شده و طبق توضیحات قبلی تمیز شده و به مدت ۱۴ روز (تحت شرایط تسريع شده) در ۲۵ میلی‌لیتر از محلول مربوطه قرار داده شدند.

۷-۲- بررسی XRD

به منظور بررسی ترکیبات اکسیدی سطح فولاد در حضور و عدم حضور بازدارنده، XRD توسط دستگاه فیلپس مدل PW1730 ساخته شده توسط کشور هلند با طول موج لامپ اشعه ایکس مس ۱/۵۴۰۵۶ آنگستروم و ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، سطح نمونه مورد نظر به شکل مربعی با ابعاد ۱×۱ cm² برش داده شد و طبق روش‌های ذکر شده در قبل تمیز و به مدت ۱۴ روز (تحت شرایط تسريع شده) در ۲۵ میلی‌لیتر از محلول شبیه‌ساز بتن شاهد و محلول شبیه‌ساز بتن که حاوی بازدارنده بود غوطه‌ور گردید.

۸-۲- تهیه محلول‌های آزمایشی مورد استفاده

محلول‌هایی به حجم ۲۵ ml از محلول شبیه‌ساز در حضور و غیاب بازدارنده‌ها در غلظت‌های مختلف ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد حجمی / حجمی (v/v) تهیه شدند.

تمامی آزمون‌ها در هر مورد روی دو سری نمونه فولادی بصورت کوپن‌های فولادی و آرماتور (میلگرد) انجام شد که علت استفاده از کوپن در کنار آرماتور، وضوح بیشتر و تکرارپذیری بالاتر نتایج در مقایسه با آرماتور بود که می‌تواند مربوط به براق کردن مکانیکی دقیق‌تر و یکنواخت‌تر سطح کوپن‌ها نسبت به آرماتور آجدار باشد که در تکرارپذیری آزمون‌ها موثر است.

در ابتدا قطعات فولاد در ابعاد ۲×۲ cm² برش داده شدند، سپس

2. Scanning electron microscope
3. X-Ray diffraction

1. Pourbaix diagram

مقاومت قطبش (R_p) حاصل، برای تحلیل عملکرد بازدارنده‌ها روی سطح فلز استفاده شد. درصد بازدارندگی خوردگی (IE) نیز با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد.

$$IE\% = \left[\frac{R_{p(inhibitor)} - R_{p(uninhibitor)}}{R_{p(inhibitor)}} \right] \times 100 \quad (5)$$

در رابطه ۵، $R_{p(inhibitor)}$ مقاومت قطبش در حضور بازدارنده و $R_{p(uninhibitor)}$ نیز مقاومت قطبش در غیاب بازدارنده هستند. قطبش خطی در محدوده پتانسیل ۲۵۰ تا ۲۵۰+ میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز با نرخ اسکن ۱ میلی‌ولت / ثانیه به دست آمد (۲۸). شیب شاخه آندی و کاتدی از رسم خطوط مماس بر شاخه‌های آندی و کاتدی در محدوده ۲۰ تا ۸۰ میلی‌ولت به دست آمد که به ترتیب با b_a یا β_a و b_c یا β_c نمایش داده شدند. مقاومت قطبش، سرعت خوردگی و درصد بازدارندگی به کمک روابط (۸-۶) به دست می‌آیند.

$$R_p = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2/303 \cdot i_{corr} \cdot (\beta_a + \beta_c)} \quad (6)$$

$$i_{corr} = \frac{0/0032 \cdot i_{corr} \cdot M}{n \cdot d} \quad (7)$$

$$IE\% = \frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}} \times 100 \quad (8)$$

در روابط ۸-۶، i_{corr} دانسیته جریان خوردگی فولاد، M وزن اتمی فولاد (۵۵/۸۵)، d چگالی فولاد ($7/87 \text{ g/cm}^3$) و n تعداد الکترون‌های انتقال یافته از سطح فولاد ($n = 2$) است (۲۸). در رابطه ۸، i_{corr} دانسیته جریان خوردگی محلول بدون بازدارنده و i'_{corr} دانسیته جریان خوردگی محلول حاوی بازدارنده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی عملکرد بازدارندگی عصاره پوست انار توسط

روش کاهش وزن

اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌های فولادی (کوپن فولادی و آرماتور) غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بتن در غیاب و حضور بازدارنده‌ها انجام شد. نتایج در جدول ۱ آورده شده است (سرعت خوردگی محاسبه شده (C.R) بر حسب $\text{mg.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ است). بعد از دو هفته غوطه‌وری در محلول شبیه‌ساز بتن (تحت شرایط تسریع شده) نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که کاهش وزن برای نمونه‌های فولادی در حضور عصاره پوست انار در مقایسه با نمونه‌های فولادی بدون عصاره کمتر بود. براساس این آزمون، همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود چندین نکته قابل توجه است. نکته اول اینکه اختلاف قابل توجهی بین کارایی عصاره استخراج شده در حلال آب/ استونیتریل و عصاره استخراج شده در آب وجود داشت.

هر دو سطح فولاد با کاغذ سمباده شماره ۶۰۰ زنگ‌زدایی و صیقلی شد. سپس برای پاک‌سازی و چربی‌زدایی سطح، قطعات فولاد ابتدا با استن و سپس با آب مقطر شست‌وشو داده شدند و در نهایت خشک شدند. قابل ذکر است که برای هر آزمایش از یک قطعه فولادی جدید استفاده گردید. قطعات آرماتور با طول ۲۰ میلی‌متر برش داده شدند و توسط برس سیمی الکتریکی براق شدند.

قطعات فولادی در ۲۵ میلی لیتر محلول شبیه‌ساز به عنوان شاهد و همین‌طور در محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده منتقل و غوطه‌ور گردید. این آزمون طی زمان‌های مختلف انجام شد. پس از سپری شدن زمان‌های مورد نظر، برای تمیزکردن سطح نمونه‌ها از برس پلاستیکی و آب استفاده شد. پس از شست و شو، نمونه‌ها خشک و مجدداً وزن شدند. اختلاف وزن نمونه‌ها در قبل و بعد از غوطه‌وری ثبت گردید و سرعت خوردگی با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$C.R = \frac{m_1 - m_2}{S \times t} \quad (3)$$

در رابطه ۳، C.R برابر با سرعت خوردگی برحسب میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع در ساعت است. m_1 برابر با وزن قطعه فولاد قبل از غوطه‌وری در محلول برحسب میلی‌گرم، m_2 برابر با وزن قطعه فولاد بعد از غوطه‌وری در محلول برحسب میلی‌گرم، S سطح کل قطعه برحسب سانتی‌متر مربع و t زمان غوطه‌وری برحسب ساعت است (۲۶).

درصد بازدارندگی بازدارنده برای خوردگی فولاد با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$IE\% = \frac{W_{uninhibitor} - W_{inhibitor}}{W_{uninhibitor}} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه ۴، $W_{uninhibitor}$ و $W_{inhibitor}$ به ترتیب کاهش وزن فولاد در غیاب و حضور بازدارنده است (۲۷).

به منظور مطالعه طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و قطبش خطی، از قطعات آرماتور برش داده شده با مساحت سطح ۷،۵ سانتی‌متر مربع استفاده شد. این آزمایش‌ها به وسیله پتانسیواستات/ گالوانوستات Autolab ۸۴۱۶۵ شامل نرم‌افزار Nova 1.6 در یک سل سه الکترودی حاوی قطعات میلگرد به عنوان الکتروود کار، پلاتین به عنوان الکتروود کمکی و الکتروود مرجع Ag/AgCl اشباع انجام شد. این آزمون‌ها در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و پتانسیل مدار باز در ۲۵ میلی‌لیتر محلول شبیه‌ساز بتن در محدوده بسامد ۱۰ مگاهرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز با دامنه ۱۰ AC میلی‌ولت انجام شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی از نرم‌افزار تجاری Zsim Demo 3.22d استفاده شد. پس از انجام آزمایشات خوردگی و رسم منحنی‌های نایکوئیست، با استفاده از نرم‌افزار، مدار معادلی که دارای کمترین درصد خطا بود انتخاب و از عوامل لایه دوگانه الکتریکی (Cdl) و

جدول ۱: بررسی اثر غلظت بازدارنده‌های مختلف بعد از دو هفته آزمون غوطه‌وری تسریع شده با روش کاهش وزن.

Table 1: Study of the effect of different inhibitor concentrations after two weeks of accelerated immersion test using the weight loss method.

Sample/Concentration		0 % (v/v)	1 % (v/v)			2 % (v/v)			3 % (v/v)		
		C.R	IE%	θ	C.R	IE%	θ	C.R	IE%	θ	C.R
Blank	(coupon)	1.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(armature)	1.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Extract/ (water)	(coupon)	-	38.4	0.384	0.436	52.0	0.520	0.364	69.9	0.699	0.286
	(armature)	-	31.0	0.310	0.445	45.0	0.450	0.402	57.7	0.577	0.312
Extract/(water- acetonitrile)	(coupon)	-	77.9	0.779	0.123	87.3	0.873	0.082	90.4	0.904	0.072
	(armature)	-	69.5	0.695	0.148	85.6	0.856	0.096	89.8	0.898	0.076
Nitrate (4 %)	(coupon)	-	-	-	-	-	-	-	87.0	0.870	0.089
	(armature)	-	-	-	-	-	-	-	84.3	0.843	0.098

در محلول شبیه‌ساز بتن آلوده به یون کلرید تحت شرایط تسریع‌شده برای نمونه شاهد (قطعات غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بدون بازدارنده)، نمونه نیترات (قطعات غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز حاوی ۴ درصد وزنی از نیترات) و عصاره پوست انار (قطعات غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز حاوی ۳ درصد حجمی/ حجمی از عصاره پوست انار استخراج شده در آب/ استونیتریل) مشاهده می‌شود. همان‌طور که واضح است، در نمونه شاهد، محصولات خوردگی زنگ آهن قسمت اعظمی از سطح قطعات فلزی (میلگرد و کوپن) را پوشانده و سطح قطعات بعد از شستشو نیز حاکی از آسیب‌های ناشی از خوردگی به بستر فلز است. در این نمونه‌ها، به دلیل انحلال و آسیب فیلم رویین تحت شرایط تسریع‌شده و عدم حضور بازدارنده، سطح قطعات کاملاً متاثر از واکنش‌های خوردگی شد. در نمونه حاوی بازدارنده نیترات، نیز محصولات خوردگی و آسیب‌های سطحی قابل مشاهده است اما در مقایسه با نمونه‌های شاهد شدت کمتری دارد که به دلیل عملکرد حفاظتی بازدارنده تجاری نیترات است. در این نمونه به دلیل اینکه سازوکار حفاظتی بازدارنده نیترات (به عنوان یک بازدارنده آندی) تشکیل فیلم رویین بر بستر فلز است، در اثر آسیب و انحلال فیلم رویین تشکیل شده (تحت شرایط خوردگی تسریع شده)، حفاظت سطح فلز به طور ناقص انجام شد که محدود به نواحی دارای فیلم رویین در حضور بازدارنده تجاری نیترات است.

درحالی که در نمونه حاوی عصاره پوست انار به عنوان بازدارنده خوردگی سبز، به دلیل تشکیل فیلم منسجمی از مولکول‌های بازدارنده بر بستر فلز تحت شرایط خوردگی تسریع شده و انحلال فیلم رویین، سطح فلز از واکنش‌های خوردگی و تشکیل زنگ آهن به خوبی حفاظت شد.

این اختلاف در کارایی بازدارندگی، براساس آزمون فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های استخراج شده (۲۱)، مربوط به استخراج بیشتر ترکیبات گیامایه و مواد موثر در بازدارندگی خوردگی توسط آب - استونیتریل در مقایسه با آب به تنهایی است.

نکته دوم این است که روند بازدارندگی در نمونه‌های فولادی کوپن مشابه نمونه‌های آرماتور بود، اما درصد بازدارندگی در نمونه‌های فولادی کوپن در اغلب مواقع، در مقایسه با آرماتور عدد بالاتری نشان داد که همان‌طور که قبلاً ذکر شد می‌تواند مربوط به براق کردن یکنواخت‌تر و دقیق‌تر سطوح فولادی کوپن در مقایسه با سطح غیریکنواخت و آجدار آرماتور باشد. نکته سوم اینکه در این آزمون بازدارنده تجاری کلسیم نیترات در غلظت بهینه آن (۴ درصد وزنی در محیط شبیه‌ساز بتن طبق مراجع مختلف (۳۰،۲۹)) به عنوان نمونه شاهد دوم در کنار محیط شبیه‌ساز بتن (به عنوان شاهد اول) بررسی شد که نتایج حاصل نشان دادند که کارایی بازدارنده سبز در مقایسه با بازدارنده تجاری نیترات به طور قابل توجهی بالاتر است. همچنین طبق نتایج به دست آمده می‌توان گفت که عصاره پوست انار در غلظت‌های مختلف، کارایی و عملکرد متفاوتی را نشان می‌دهد و میزان کارایی (IE %) با افزایش غلظت عصاره تا ۳ درصد افزایش می‌یابد. کارایی در غلظت ۴ درصد در مقایسه با ۳ درصد اندکی کاهش یافت (نتایج ۴ درصد در جدول ذکر نشد). با این حال در غلظت‌های ۱، ۲ و ۳ درصد، تفاوت قابل توجهی بین درصد کارایی عصاره استخراج شده توسط آب - استونیتریل در مقایسه با آب مشاهده شد. بر اساس نتایج تست کاهش وزن، غلظت ۳ درصد به عنوان غلظت بهینه برای بازدارنده سبز مورد بررسی به دست آمد.

در شکل ۲ ظاهر سطوح میلگرد و کوپن بعد از دوهفته غوطه‌وری



شکل ۲: ظاهر سطوح آرماتور و کوپن فولادی نمونه‌های مختلف بعد از دو هفته غوطه‌وری در شرایط تسریع شده آزمون کاهش وزن.

Figure 2: Appearance of the surfaces of the reinforcement and steel coupon of different samples after two weeks of immersion in accelerated weight loss test conditions.

دست‌آمده برای هریک از بازدارنده‌ها، مدار معادل منحنی‌ها (شکل ۵) تعیین گردید و همچنین عوامل الکتروشیمیایی و درصد بازدارندگی، در جدول ۲ گزارش شدند. طبق نمودارهای بد و نایکوئیست، به طور کلی در نمونه‌ها دو ثابت زمانی مشاهده شد که در نمونه حاوی نیترات و بازدارنده‌ها واضح‌تر بود. مشاهده دو ثابت زمانی در نمودار حاوی نیترات و حتی نمونه بازدارنده می‌تواند دلیلی بر تشکیل مجدد فیلم روبین در حضور نیترات و همچنین تشکیل فیلم منسجمی از بازدارنده بر بستر فلز در حضور مولکول‌های عصاره پوست انار باشد. در نمونه آرماتور فولادی غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بتن بدون بازدارنده، R_s مربوط به مقاومت الکترولیت و R_p در واقع یک مقاومت کلی و دربرگیرنده

۲-۳- بررسی خوردگی به روش طیف‌بینی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)

به منظور اندازه‌گیری سرعت خوردگی به روش امپدانس، قطعات آرماتور در محلول‌های موردنظر غوطه‌ور شدند و طبق قسمت (۲-۶-۲) عمل شد. در این روش نحوه خوردگی آرماتور فولادی بعد از دو هفته غوطه‌وری در محلول شبیه‌ساز بتن در غیاب و حضور غلظت‌های مختلف از بازدارنده‌ها شامل ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد (در شرایط تسریع‌شده) به روش طیف‌بینی امپدانس الکتروشیمیایی و در دمای محیط بررسی شد. منحنی‌های نایکوئیست و بد آرماتورهای فولادی در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شوند. سپس با استفاده از نمودارهای نایکوئیست به

بالاترین بازده بازدارندگی خوردگی برای عصاره پوست انار / آب- استونیتریل، برابر با ۹۴ درصد در غلظت ۳ درصد حجمی / حجمی به دست آمد.

لازم به ذکر است که در حضور بازدارنده تجاری نیترات با غلظت بهینه و مرسوم ۴ درصد وزنی، نیز کارایی نسبتاً خوبی در حد ۹۱/۸ درصد مشاهده شده که در رتبه دوم قرار داشت. مقدار R_p از $88 \Omega \text{ cm}^2$ (در نمونه شاهد) به $8260 \Omega \text{ cm}^2$ (در حضور ۳ درصد از عصاره پوست انار / آب- استونیتریل) و به میزان $5995 \Omega \text{ cm}^2$ در حضور ۴ درصد از بازدارنده تجاری نیترات افزایش یافت.

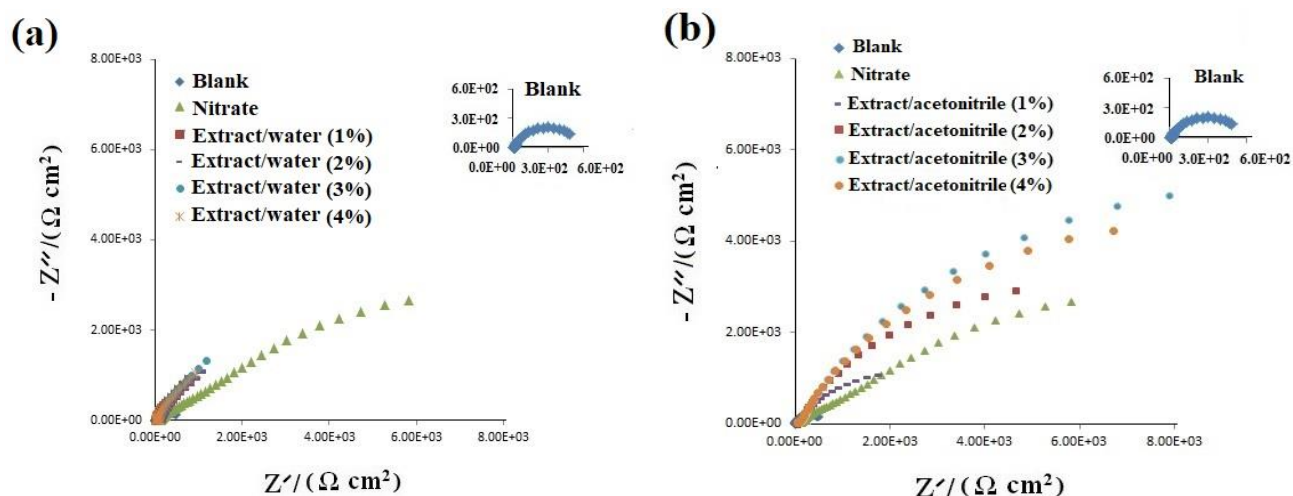
همچنین مقادیر CPE_{dl} و CPE_{dl} در غلظت‌های بهینه بازدارنده‌ها کاهش نشان دادند به طوری که CPE از $617 \mu\text{Fcm}^{-2}$ در نمونه شاهد به $63/2 \mu\text{Fcm}^{-2}$ و $86/0 \mu\text{Fcm}^{-2}$ به ترتیب در عصاره پوست انار / آب- استونیتریل و نیترات رسیدند. این پدیده عمدتاً به دلیل جذب سطحی بازدارنده بر بستر فلز است (۳۲). براساس نتایج آزمون امیدانس الکتروشیمیایی، غلظت ۳ درصد حجمی- حجمی از عصاره پوست انار / آب- استونیتریل به عنوان غلظت بهینه به دست آمد و نتایج این آزمون نشان دادند بازدارنده خوردگی سبز حاصل قابل رقابت و حتی جایگزینی با بازدارنده مرسوم تجاری نیترات است. همچنین براساس این نتایج، کارایی آب- استونیتریل در مقایسه با آب در استخراج ترکیبات موثره در بازدارندگی کاملاً مشهود است.

مجموعه مقاومت‌های مربوط به همه گونه‌های تجمع یافته در ناحیه فصل مشترک فلز / محلول از جمله یون‌های کلرید جذب سطحی شده، محصولات خوردگی و اکسیدهای فلزی و همچنین بقایای فیلم رویین بر بستر فولاد (بعد از شرایط خوردگی تسریع شده) و CPE ظرفیت خازنی گونه‌های تجمعی بر بستر فلز است، می‌باشند. R_{ct} مقاومت انتقال بار و CPE_{dl} ظرفیت لایه دوگانه الکتریکی است. در حضور بازدارنده، R_p مقاومت کلی و دربرگیرنده تمام گونه‌های تجمع یافته بر بستر فلز (محصولات اکسیدهای فلزی و همچنین بقایای فیلم رویین بر بستر فولاد (بعد از شرایط خوردگی تسریع شده)) به علاوه فیلم محافظ حاصل از جذب سطحی مولکول‌های بازدارنده بر بستر فولاد می‌باشد. CPE نیز، ظرفیت خازنی تمام گونه‌های تجمعی، از جمله فیلم بازدارنده بر بستر فولاد است (۱۹). R_{ct} مقاومت انتقال بار و CPE_{dl} ظرفیت لایه دوگانه الکتریکی هستند. در واقع، در مدار معادل مربوط به بازدارنده، R_p علاوه بر مقاومت مربوط به گونه‌های تجمع یافته در فصل مشترک فلز/محلول، (که در نمونه شاهد نیز مشترک هستند) مقاومت مربوط به فیلم بازدارنده نیز وجود دارد. با توجه به داده‌های امیدانس (جدول ۲) و نمودارهای نایکویست (شکل ۳)، می‌توان مشاهده کرد که در مورد عصاره‌های پوست انار / آب و عصاره پوست انار / آب- استونیتریل مقادیر R_p با افزایش غلظت بازدارنده تا ۳ درصد حجمی / حجمی افزایش و سپس کاهش نشان داد. بر این اساس

جدول ۲: داده‌های حاصل از امیدانس الکتروشیمیایی میلگرد در محلول شبیه‌ساز بتن و محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده‌ها پس از دو هفته غوطه‌وری در شرایط آزمون خوردگی تسریع شده.

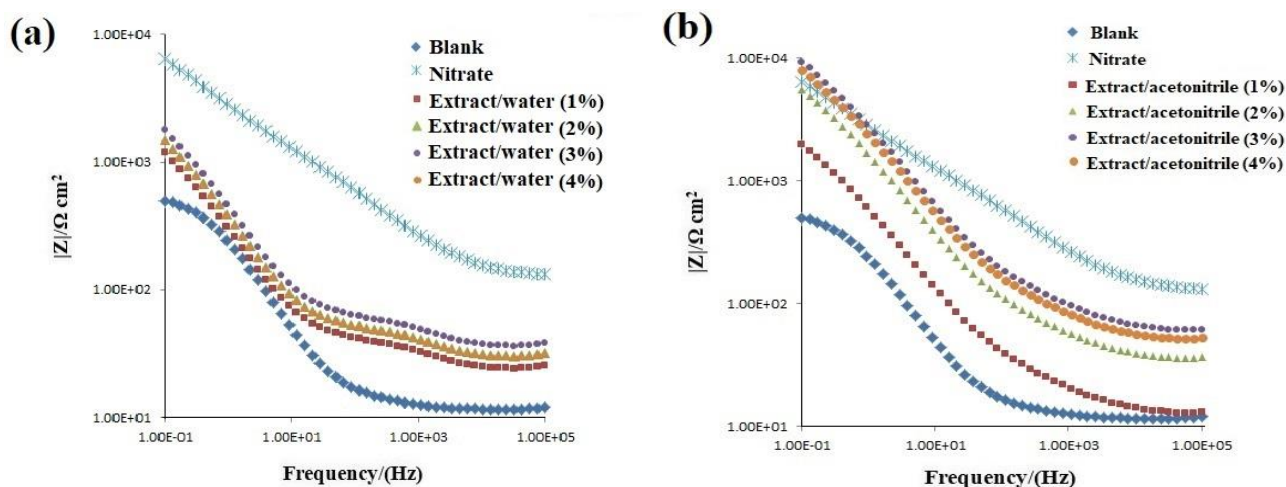
Table 2: Data obtained from the electrochemical impedance of rebar in concrete simulant solution and simulant solution containing different concentrations of inhibitors after two weeks of immersion in accelerated corrosion test conditions.

Sample	Cons. (v/v)	$R_s (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct} (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$CPE_{dl} (\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	$R_p (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$CPE (\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	n	IE %
Blank	-	12.0	14.3	45.8	488	617	0.9539	-
Nitrate	4 %	17.2	963	5.90	5995	86.0	0.9816	91.8
Extract/water	1.0	15.3	39.8	41.5	982	287	0.9855	51.0
	2.0	14.6	43.0	36.7	1310	213	0.9843	62.2
	3.0	12.0	53.4	3.64	1615	188	0.9869	69.7
	4.0	16.2	50.0	7.86	1295	150.5	0.9812	55.8
Extract/water-acetonitrile	1.0	16.3	50.7	32.2	1850	172	0.9885	73.6
	2.0	12.6	97.4	12.3	5328	74.6	0.9896	90.8
	3.0	15.9	195	0.18	8260	63.2	0.9888	94.0
	4.0	14.6	140	2.42	7021	92.5	0.9846	80.0



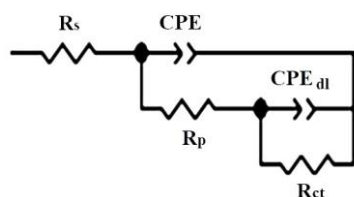
شکل ۳: منحنی نایکوئیست آرماتورهای فولادی غوطه ور در محلول شبیه ساز بتن بدون بازدارنده (شاهد)، حاوی نیترات و محلول شبیه ساز حاوی غلظت های مختلف از عصاره انار استخراج شده در (a) آب و (b) آب / استونیتریل (۲:۱).

Figure 3: Nyquist curve of steel reinforcement immersed in concrete simulant solution without inhibitor (blank), containing nitrate and simulant solution containing different concentrations of pomegranate extract extracted in (a) water, and (b) water/acetonitrile (2:1).



شکل ۴: نمودار بد آرماتورهای فولادی غوطه ور در محلول شبیه ساز بتن بدون بازدارنده (شاهد)، حاوی نیترات و حاوی غلظت های مختلف از عصاره پوست انار استخراج شده در (a) آب و (b) در آب - استونیتریل (۲:۱).

Figure 4: Bode diagrams of steel reinforcements immersed in concrete simulant solution without inhibitor (blank), containing nitrate and containing different concentrations of pomegranate peel extract extracted in (a) water, and (b) water-acetonitrile (2:1).



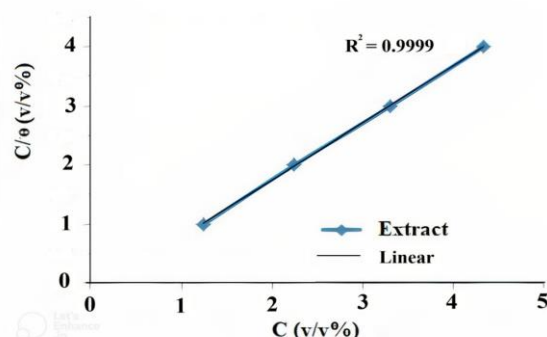
شکل ۵: مدار معادل حاصل از تطبیق داده های امپدانس برای فلز غوطه ور در محلول شبیه ساز بتن بدون بازدارنده و فلز غوطه ور در محلول شبیه ساز حاوی بازدارنده.

Figure 5: Equivalent circuit resulting from fitting impedance data for the metal immersed in a concrete simulant solution without inhibitor and the metal immersed in a simulant solution containing inhibitor

همچنین طبق جدول ۳، میزان مقاومت قطبش که بیانگر مقاومت در برابر خوردگی است از $1/9 \text{ K}\Omega.\text{cm}^2$ در نمونه شاهد به $24/0 \text{ K}\Omega.\text{cm}^2$ و $19/8 \text{ K}\Omega.\text{cm}^2$ به ترتیب در عصاره پوست انار و بازدارنده تجاری نیترات رسید که بیانگر کارایی بهتر عصاره پوست انار در مقایسه با بازدارنده تجاری نیترات است. جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که بازدارنده تجاری نیترات، در مقایسه با عصاره پوست انار دارای یک جابه‌جایی مثبت در مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) در مقایسه با شاهد است که میزان این جابه‌جایی ۴۱ میلی ولت است. با توجه به اینکه پتانسیل‌های خوردگی مثبت در روش قطبش، دلیلی بر وجود فیلم محافظ رویین هستند، مثبت‌تر بودن پتانسیل در بازدارنده تجاری نیترات در مقایسه با عصاره پوست انار مربوط به تشکیل یک فیلم رویین محافظ بر بستر فلز است. علت تغییر پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر منفی در عصاره پوست انار می‌تواند مربوط به جذب اکسیژن توسط ترکیبات پلی فنل موجود در عصاره و کاهش واکنش احیای کاتدی اکسیژن در مکان‌های کاتدی باشد که منجر به عملکرد بازدارندگی مختلط با اثر غالب کاتدی در عصاره پوست انار می‌شود ($37-35.31$). این نتایج، تا حد زیادی با نتایج به‌دست‌آمده از روش کاهش وزن و روش امپدانس الکتروشیمیایی مطابقت داشتند.

۴-۳- بررسی ایزوترم جذب

کارایی و عملکرد یک بازدارنده در محیط خورنده از طریق جذب آن روی سطح فلز تخمین زده می‌شود. مدل‌های ایزوترم جذب یک ابزار مهم برای توصیف برهم‌کنش بازدارنده‌های خوردگی با بستر فلز هستند (۳۸). از ایزوترم‌های جذب معروف می‌توان به ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین اشاره کرد (۳۸، ۳۹). شکل ۷ منحنی هم‌دمای جذب عصاره پوست انار را بروی سطح فولاد در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.



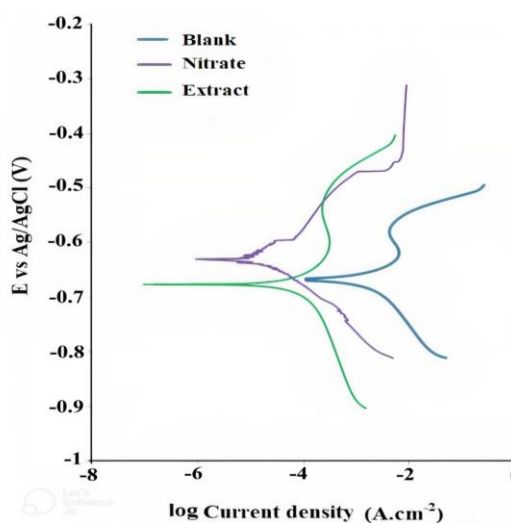
شکل ۷: نمودارهای ایزوترم لانگمویر برای فولاد در محیط شبیه‌ساز بتن

حاوی عصاره پوست انار/آب-استونیتریل ۳ درصد در دمای ۲۰°C.

Figure 7: Langmuir isotherm plots for steel in a concrete simulant containing Pomegranate peel extract/water-acetonitrile 3 % at 20 °C.

۳-۳- تحلیل و بررسی اثر بازدارنده به وسیله روش قطبش

به منظور اندازه‌گیری سرعت خوردگی با استفاده از روش قطبش، خوردگی فولاد در محلول شبیه‌ساز بتن در غیاب و حضور بازدارنده نیترات و همچنین عصاره پوست انار/آب-استونیتریل در غلظت بهینه ۳ درصد به روش قطبش بررسی گردید. شکل ۶ منحنی‌های قطبش فولاد را در محلول شبیه‌ساز بتن در حضور و عدم حضور بازدارنده‌ها نشان می‌دهد. مقادیر تمام عوامل الکتروشیمیایی مانند پتانسیل خوردگی (E_{corr}), شیب‌های تافل کاتدی و آنودی (β_a و β_c) و چگالی جریان خوردگی (I_{corr}) که با برون یابی خطوط تافل بدست آمده و همچنین کارایی بازدارنده در جدول ۳ آورده شده است. طبق نتایج بدست آمده از قطبش مشاهده می‌شود که در حضور بازدارنده‌ها چگالی جریان خوردگی (I_{corr}) کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده تشکیل یک فیلم محافظ از مولکول‌های بازدارنده بر روی سطح فلز است. مولکول‌های بازدارنده، مکان‌های فعال آندی را مسدود کرده و از طریق جذب ترکیبات شیمیایی عصاره روی سطح مشترک فلز / محلول، فرایندهای خوردگی را مهار می‌کند (۳۴). این کاهش میزان چگالی جریان خوردگی طبق جدول ۳ از ۹۵۰ میکروآمپر در نمونه شاهد به ۷۵ میکروآمپر در عصاره پوست انار رسید که کمترین میزان چگالی جریان خوردگی را داشت و نشان‌دهنده این موضوع بود که ترکیبات گیامایه موجود در عصاره پوست انار قادرند به خوبی مکان‌های فعال آندی بر بستر فلز را مسدود کنند. بعد از انار، بازدارنده تجاری نیترات چگالی جریانی در حدود ۸۸ میکروآمپر را نشان داد.



شکل ۶: نمودارهای قطبش فولاد در محلول شبیه‌ساز بتن بدون بازدارنده (شاهد) و محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت بهینه از بازدارنده سبز استخراج شده در سیستم حلالی آب/ استونیتریل بعد از دو هفته غوطه‌وری تحت شرایط آزمون تسریع شده.

Figure 6: Polarization diagrams of steel in concrete simulant solution without inhibitor (blank) and simulant solution containing the optimal concentration of the green inhibitor extracted in water/ acetonitrile solvent system after two weeks of immersion under accelerated test conditions.

جدول ۳: داده‌های حاصل از قطبش فولاد در محلول شبیه‌ساز بدون بازدارنده (شاهد) و محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت‌های بهینه از بازدارنده‌ها بعد از دو هفته غوطه‌وری در آزمون تسریع شده.

Table 3 :Data from steel polarization in a simulant solution without inhibitors (blank) and a simulant solution containing optimal concentrations of inhibitors after two weeks of immersion in the accelerated test.

Sample	(OCP)/V	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	R_p ($K\Omega.cm^2$)	i_{corr} (mA/cm ²)	C.R (mm/y)	IE %
Blank	-0.673	6.20	13.0	1.9	0.95	10.8	-
Nitrate	-0.632	14.5	4.38	19.8	0.088	0.99	90.7
Extract/water-acetonitrile	-0.677	7.22	14.7	24.0	0.075	0.85	92.0

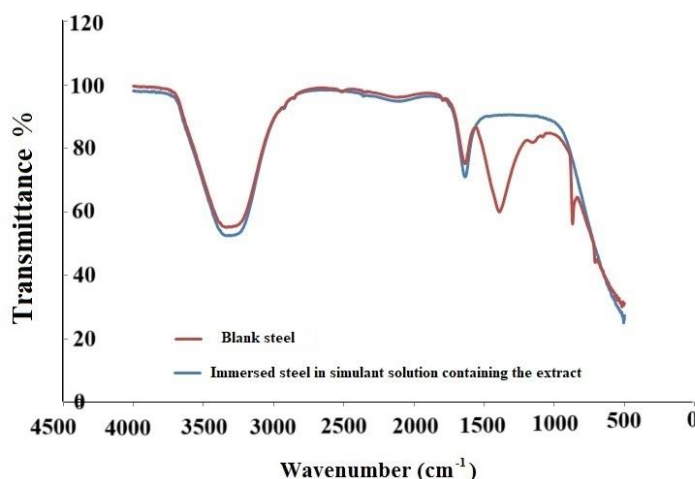
۵-۳ - تحلیل و بررسی طیف FT-ATR

برای بررسی برهم‌کنش بین مولکول‌های بازدارنده موجود در محلول و سطح فلز، قطعات فولادی بعد از سمباده‌زنی و چربی‌زدایی در محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت بهینه از بازدارنده (۳ درصد حجمی/ حجمی) و همچنین در محلول شبیه‌ساز (بدون بازدارنده) به مدت ۲ هفته تحت شرایط تسریع‌شده غوطه‌ور شدند و سپس تست ATR روی قطعات مذکور انجام شد (شکل ۸). در طیف FT-ATR نمونه‌ها، قله نسبتاً بزرگی در محدوده 3400 cm^{-1} مشاهده شد که بیانگر ارتعاشات کششی گروه‌های OH- در نمونه‌های عصاره و همچنین مولکول‌های آب جذب سطحی شده است. قله‌های مشاهده شده در محدوده 500 تا 1360 cm^{-1} و همچنین قله تیز موجود در حوالی 1360 cm^{-1} که فقط در نمونه شاهد مشاهده شد و در نمونه فلز غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز حاوی بازدارنده حذف شده بود، نیز احتمالاً مربوط به اکسید خاصی از فلز در محلول شبیه‌ساز است که به دلیل اثر بازدارندگی عصاره پوست انار در نمونه‌های حاوی بازدارنده مشاهده نشد که البته نیاز به بررسی بیشتر دارد (۱۳).

با توجه به منحنی هم‌دمای جذب، به دلیل اینکه شیب خط حاصل از نمودار $\frac{C}{\theta}$ برحسب C (براساس رابطه ۹) به عدد یک بسیار نزدیک است، این موضوع بیانگر آن است که جذب بازدارنده‌ها از هم‌دمای جذب لانگمویر تبعیت می‌کند.

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (9)$$

که در آن θ درجه پوشش سطحی است که برای تمام غلظت‌های بازدارنده از روش کاهش وزن محاسبه شده است و K_{ads} ثابت تعادل فرایند جذب است (۴۰). رابطه لانگمویر معمولاً توضیح قابل قبولی را درباره رفتار جذب سطحی نشان می‌دهد و از این رو نسبت به دیگر هم‌دمای بیشتر مورد توجه می‌باشد. در ایزوترم لانگمویر فرض بر این است که تعداد ثابتی از مکان‌های جذبی بر روی سطح فلز وجود دارد که هریک از این مکان‌ها تنها با یک مولکول بازدارنده برهم‌کنش داشته و جذب بازدارنده بر سطح فلز به صورت تک‌لایه می‌باشد (۳۸).



شکل ۸: طیف FT-ATR نمونه فولاد کربنی غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بتن آلوده به یون کلرید بدون بازدارنده (نمونه شاهد) و نمونه فولاد غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بتن آلوده به یون کلرید حاوی عصاره پوست انار استخراج شده در آب / استونیتریل ۳ درصد.

Figure 8: FT-ATR spectrum of a carbon steel sample immersed in a chloride ion-contaminated concrete simulant solution without inhibitor (blank sample) and a steel sample immersed in a chloride ion-contaminated concrete simulant solution containing pomegranate peel extract extracted in water /acetonitrile solvent 3 %.

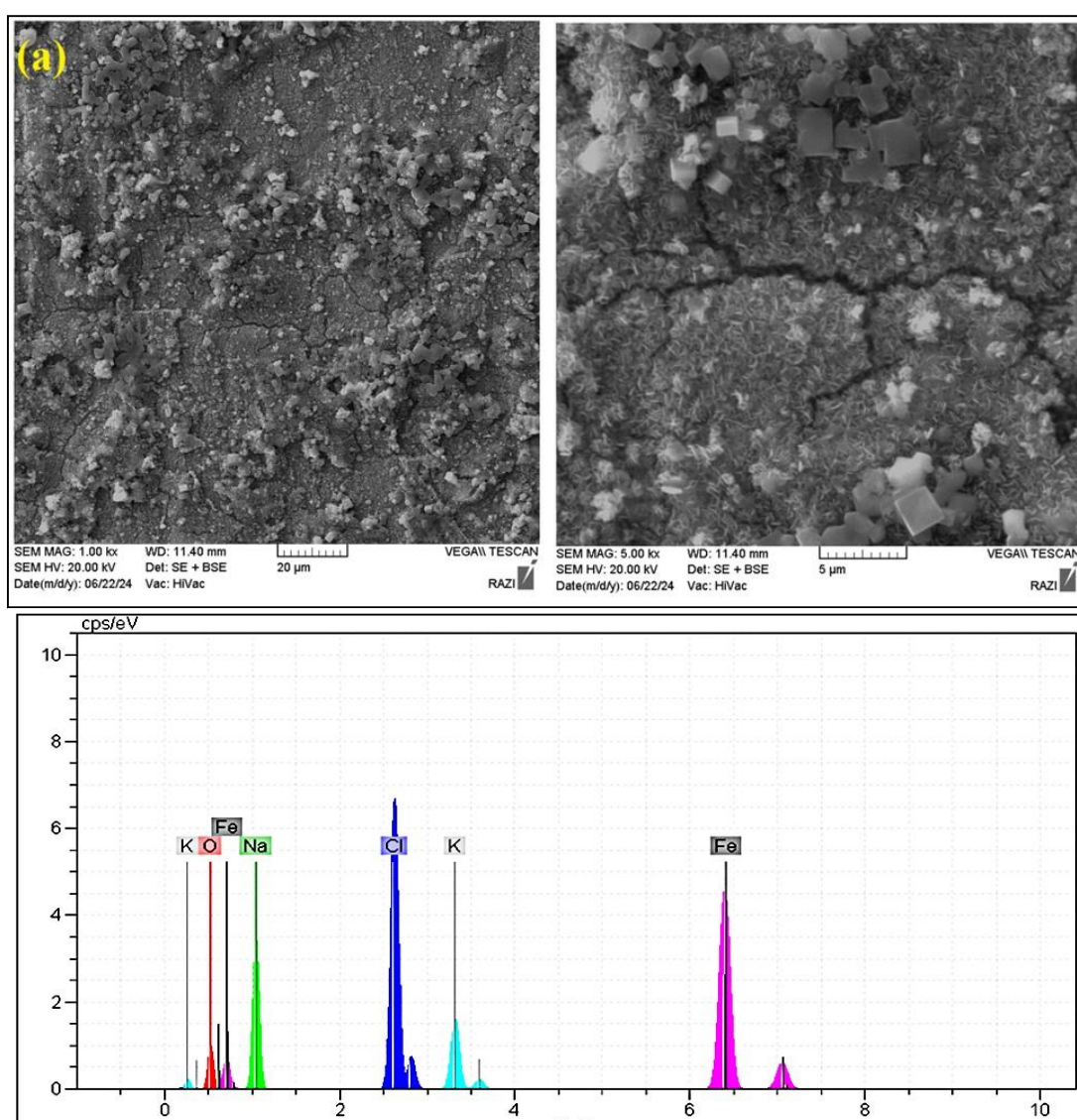
یک سطح ناهموار و ناهمگن بودند. تعداد زیادی ریز ترک و آسیب سطحی در سطح فلز مشاهده شدند که نشانه شکست و انحلال فیلم روئین موجود در سطح فلز در اثر نفوذ و حمله یون کلرید بود (۱۴). همچنین تعداد زیادی ذرات و تجمعات بلوری به صورت مجزا و پراکنده روی سطح فلز مشاهده شد که احتمالاً ناشی از رسوبات مربوط به کلسیم اکسید و کلسیم هیدروکسید موجود در محلول شبیه ساز است (۴۱). همچنین این تجمعات می توانند مربوط به محصولات خوردگی به صورت FeOOH یا ساختار لپیدوکروسیت^۱ (براساس الگوی XRD) باشند (۴۲).

1. Lepidocrocite

بر اساس نتایج آزمون FT-ATR اثر بازدارندگی عصاره پوست انار در کاهش میزان قله های اکسیدی به ویژه در ناحیه cm^{-1} ۴۰۰ تا ۱۴۰۰ (با حذف قله های ترکیبات اکسیدی آهن) کاملاً مشهود است.

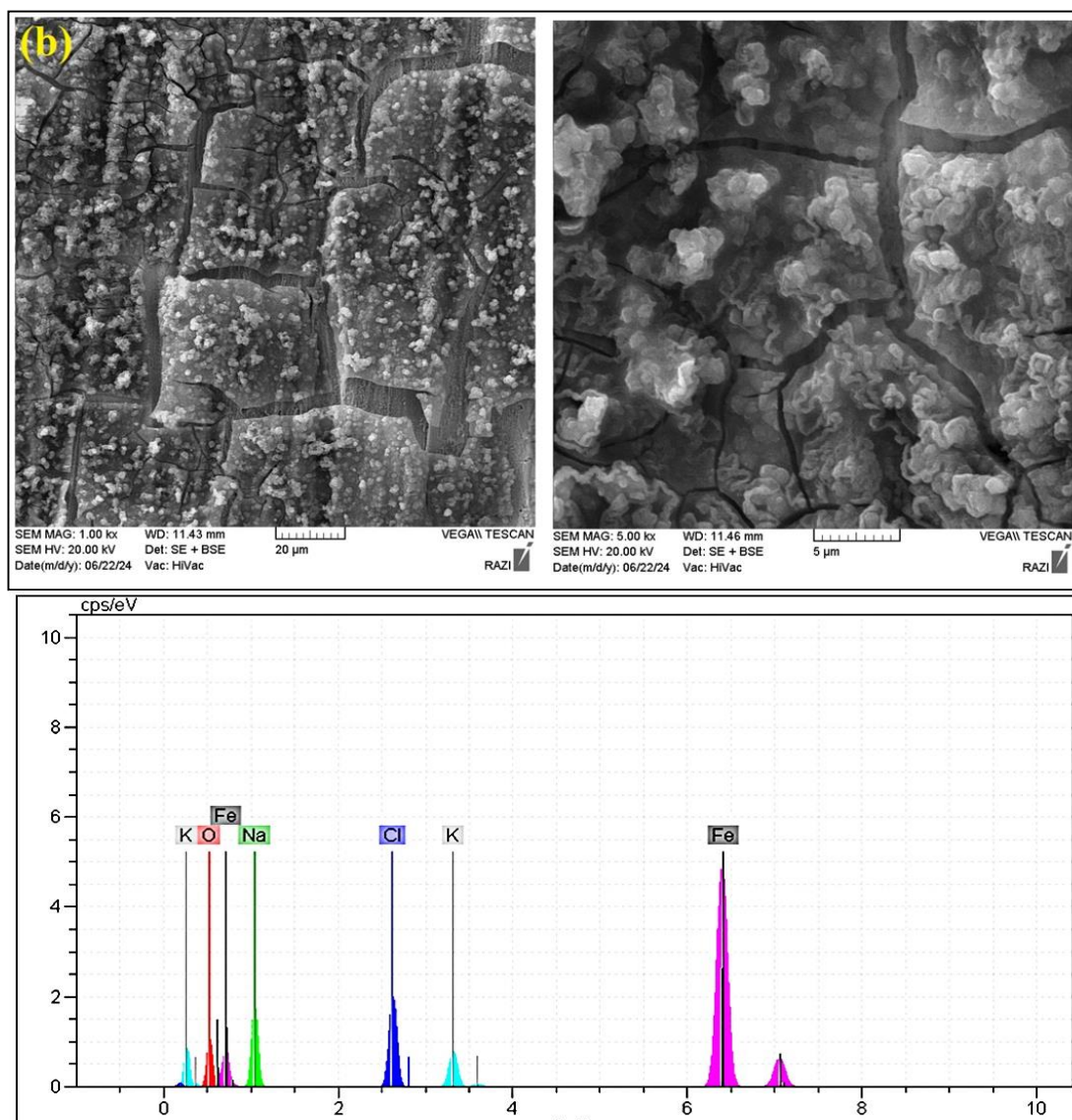
۳-۶- تحلیل و بررسی آنالیز SEM / Mapping EDX

برای بررسی ریخت سطح فلز و ترکیب درصد عناصر آهن، اکسیژن و یون کلرید، از SEM / Mapping EDX استفاده شد. نمونه های کوپن فولادی در محلول شبیه ساز بتن در غیاب و حضور بازدارنده غوطه ور شدند و بعد از دو هفته غوطه وری تحت شرایط خوردگی تسریع شده از محلول خارج و بررسی شدند (شکل ۹). تصاویر SEM مربوط به نمونه بدون بازدارنده (شکل ۹ a) در دو بزرگنمایی کم و زیاد حاکی از وجود



شکل ۹: تصاویر SEM و آنالیز عنصری EDX از (a) نمونه فولاد در محلول شبیه ساز بتن و (b) نمونه فولاد در محلول شبیه ساز بتن حاوی عصاره پوست انار استخراج شده در آب/استونتریل ۳ درصد.

Figure 9: SEM images and EDX elemental analysis of (a) steel sample in concrete simulant solution, and (b) steel sample in concrete simulant solution containing pomegranate peel extract extracted in water/acetonitrile solvent 3 %.



شکل ۹: ادامه.

Figure 9: Continue.

براساس نتایج آنالیز عنصری، درصد وزنی اکسیژن در نمونه حاوی بازدارنده در مقایسه با شاهد افزایش داشت، در حالی که میزان یون کلرید و عنصر آهن کاهش یافت. بر اساس آنالیز عنصری مشاهده می‌شود که در نمونه حاوی بازدارنده، میزان عنصر آهن کاهش یافته است که بیانگر تشکیل یک لایه مانع و محافظ روی بستر فولاد می‌باشد که با پوشاندن سطح فلز موجب کاهش شدت قله مربوط به عنصر آهن شده است (۴۲، ۴۳). در نمونه شاهد به دلیل عدم تشکیل این لایه محافظ، قله مربوط به عنصر آهن شدت بیشتری داشت. از طرفی میزان یون کلرید در حضور بازدارنده کاهش قابل توجهی نشان داد. بر اساس نقشه آنالیز عنصری یون کلرید در شکل b ۱۰ در نمونه حاوی بازدارنده به دلیل وجود فیلم محافظ بر

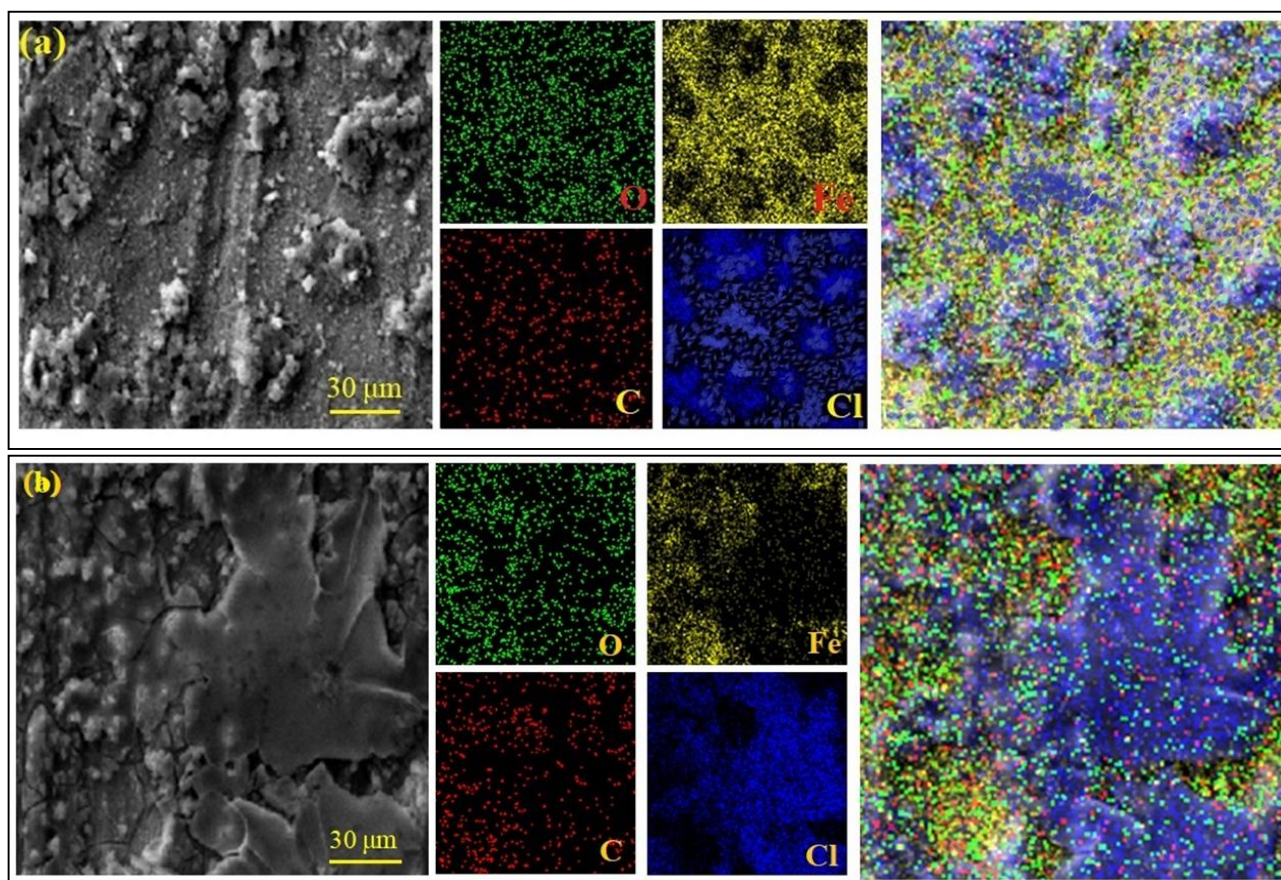
در نمونه حاوی بازدارنده، ریخت سطح کاملاً متفاوت بود. لایه فیلم بازدارنده که تقریباً تمام سطح فلز را پوشش داده بود، مشاهده شد اما فیلم حاصله در برخی نقاط دچار گسیختگی و ترک شده بود بطوریکه کاملاً قابل تشخیص و تمایز از بستر فلز بود. علت این شکست و گسیختگی در فیلم بازدارنده ممکن است به دلیل شرایط آماده‌سازی نمونه (برای SEM) و خشک شدن آن تحت خلاء باشد. بر خلاف نمونه شاهد که فاقد هر گونه فیلم یکپارچه محافظ بر بستر فلز بود، وجود یک فیلم پیوسته از بازدارنده بر بستر فلز به صورت یک لایه محافظ، مانع از نفوذ و جذب یون کلرید بر بستر فلز می‌شود که بدین صورت موجب حفظ فیلم رویین تشکیل شده بر بستر فلز می‌شود.

جدول ۴: آنالیز عنصری EDX از فولاد در محیط شبیه ساز بدون بازدارنده (شاهد) و فولاد در محیط شبیه ساز حاوی بازدارنده بعد از دو هفته غوطه‌وری با شرایط تسریع شده خوردگی.

Table 4: EDX elemental analysis of steel in the simulated environment without inhibitor (blank) and steel in the simulated environment containing inhibitor after two weeks of immersion under accelerated corrosion conditions.

Element	Blank	inhibitor
Fe	59.30	47.4
Cl ⁻	19.10	4.6
O	5.10	20.1
Na ⁺	13.00	21.7
K ⁺	3.50	6.20

بستر فلز، یون‌های کلرید بر سطح فیلم حاصل جذب شده و به تله افتاده‌اند و از نفوذ آنها به زیر لایه و بستر فلز جلوگیری شده است که این حالت بصورت تجمعی از یون‌های کلرید جذب سطحی شده بر فیلم بازدارنده قابل مشاهده است. در حالی که در نمونه شاهد به دلیل عدم وجود فیلم محافظ، سرتاسر بستر فلز، آلوده به یون‌های کلرید جذب سطحی شده است که بخش اعظم آنها به داخل فیلم غیرفعال تشکیل شده بر بستر فلز نفوذ کرده‌اند و نتایج کمی آنالیز عنصری به وضوح حاکی از این پدیده است (جدول ۴). نتیجه این نفوذ عمقی یون کلرید به داخل فیلم رویین بر سطح فلز، شکست و تضعیف لایه رویین تشکیل شده بر بستر فلز است که در تصاویر با بزرگنمایی کم در شکل a قابل مشاهده است. با توجه به نتایج آنالیز عنصری همچنین، علت افزایش میزان اکسیژن در نمونه حاوی بازدارنده می‌تواند مربوط به وجود ترکیبات پلی فنل موجود در عصاره بر بستر فلز باشد.



شکل ۱۰: تصاویر آنالیز عنصری Mapping EDX از فولاد در محیط شبیه ساز (a) بدون بازدارنده و (b) فولاد در محیط شبیه ساز حاوی عصاره پوست انار استخراج شده در آب/استونیتریل ۳ درصد. بعد از دو هفته غوطه‌وری با شرایط تسریع شده خوردگی.

Figure 10: Mapping EDX elemental analysis images of steel in a simulated environment (a) without inhibitor, and (b) steel in a simulated environment containing pomegranate peel extract extracted in water/acetonitrile solvent 3 % after two weeks of immersion under accelerated corrosion conditions

۷-۳- بررسی داده‌های XRD

XRD به عنوان روشی مکمل و مفید در شناسایی و درک وضعیت شیمیایی فازهای اکسیدی سطح فولاد در هر دو شرایط محلول شبیه‌ساز بتن حاوی بازدارنده و بدون بازدارنده است. در شکل ۱۱، الگوی پراش اشعه ایکس سطح نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بتن بدون بازدارنده و محلول شبیه‌ساز بتن حاوی بازدارنده (بعد از ۱۴ روز غوطه‌وری تحت شرایط تسریع شده) آورده شده است. در نمونه شاهد قله‌های ظاهر شده در $2\theta = 65/13^\circ$ و $44/47^\circ$ مربوط به صفحات بلوری (111) (200) ساختار آهن (Fe) است (۴۳). قله مشاهده شده در $2\theta = 31/71^\circ$ مربوط به صفحه بلوری (100) ساختار $Fe(OH)_2$ است. قله موجود در $36/1^\circ$ مربوط به صفحات بلوری (111) ترکیب $\alpha-FeOOH$ است. قله‌های موجود در $58/49^\circ$ و $64/87^\circ$ به ترتیب مربوط به صفحات بلوری (018) و (300) ساختار Fe_2O_3 است (۴۳). در واقع، ترکیبات FeO و $FeOOH$ نیز تشکیل می‌شوند اما به دلیل طبیعت ناپایدار و متخلخل آنها و همچنین حمله مداوم یون کلرید، به محصول خوردگی Fe_2O_3 تبدیل می‌شوند (۴۳). در نمونه حاوی بازدارنده، همان‌طور که مشهود است، قله‌های مربوط به عنصر آهن شدت بیشتری داشتند و قله‌های مرتبط با محصولات خوردگی کاهش یافته و برخی از آنها نیز ناپدید شدند که نشان می‌دهد، سطح فولاد به خوبی توسط فیلم بازدارنده حفاظت شده است (۴۳). به طور کلی، در محیط بدون بازدارنده (شکل ۱۱a) الگوی شلوغ‌تری از نظر میزان پیک‌ها ظاهر شده است، که نشان می‌دهد میزان محصولات خوردگی بریستر فلز بیشتر است درحالی که در محیط حاوی بازدارنده (شکل ۱۱b) تعداد قله‌های مربوط به محصولات خوردگی کاهش پیدا کرده است.

۸-۳- آزمون‌های طولانی‌مدت

۸-۳-۱- آزمون کاهش وزن طولانی‌مدت

بر اساس این آزمون اختلاف قابل توجهی بین نمونه شاهد، بازدارنده تجاری نیترات و عصاره پوست انار مشاهده نشد. لذا از آزمون دقیق‌تر الکتروشیمیایی برای ارزیابی طولانی مدت نمونه‌ها استفاده شد.

۸-۳-۲- آزمون امپدانس بلندمدت

به منظور بررسی طولانی‌مدت نمونه‌ها، نمونه‌ها در غیاب و حضور بازدارنده‌ها (در غلظت‌های بهینه) به مدت ۳ ماه در محلول شبیه‌ساز آلوده به یون کلرید قرار گرفتند. لازم به ذکر است در این آزمون برخلاف آزمون تسریع شده هیچ تغییر pH در محلول شبیه‌ساز بتن حاوی نمونه‌ها انجام نشد و هدف مقایسه کارایی بازدارنده‌ها در این حالت با آزمون تسریع شده بود. طبق نمودارهای بد، میزان امپدانس در بسامد پایین (۰/۱ هرتز) برای نمونه‌های مختلف به این ترتیب به دست آمد (شکل ۱۲):

شاهد (۱۰۳۷۰) > نیترات (۱۰۷۹۷) > عصاره پوست انار (۱۱۰۷۴)

بیشتر بودن میزان امپدانس در بسامد پایین نشانه کارایی بیشتر بازدارنده است که در اینجا نیز عصاره پوست انار در غلظت ۳٪ حجمی/ حجمی، کارایی بیشتری در مقایسه با بازدارنده نیترات و نمونه شاهد نشان داد.

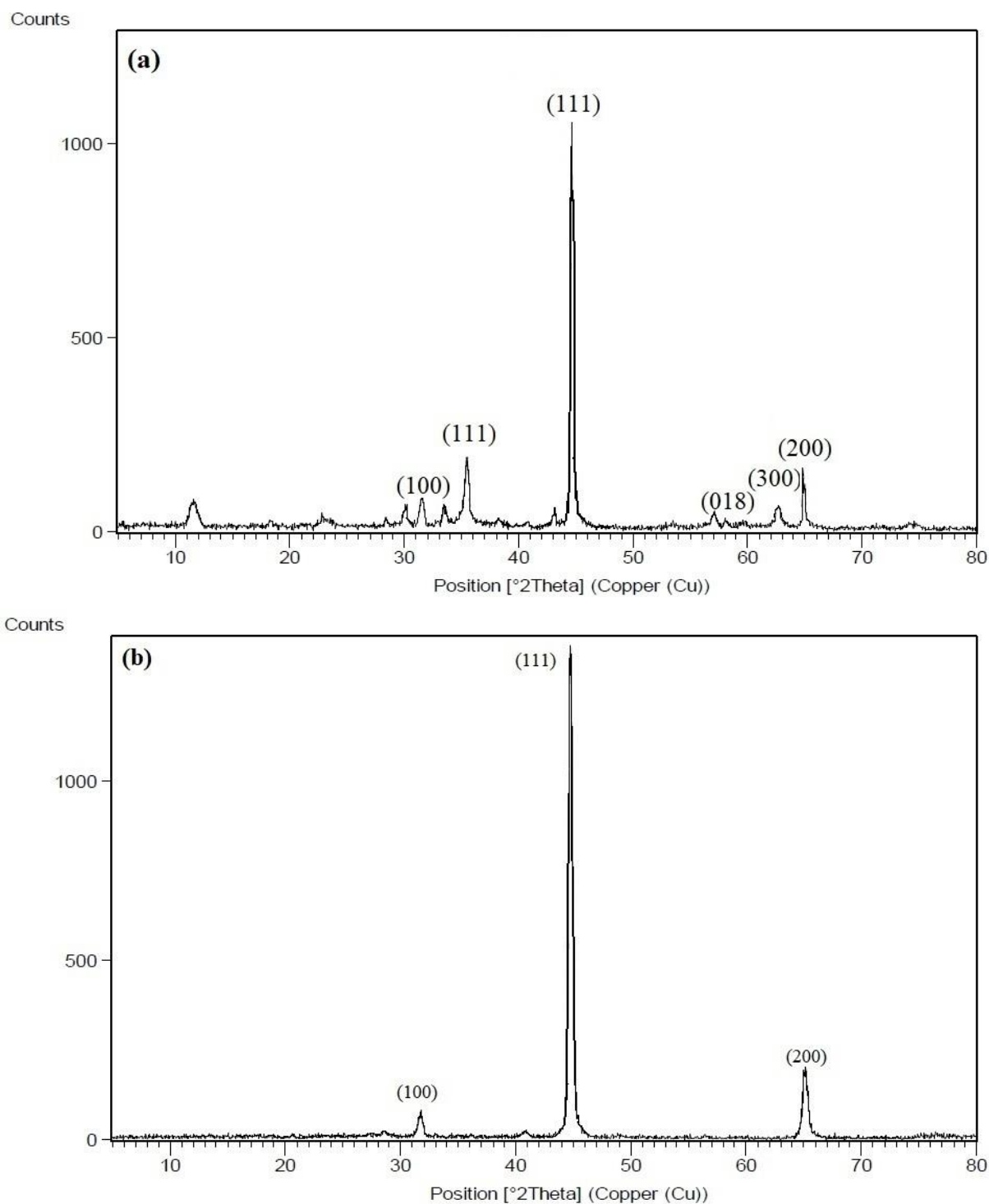
در نمودارهای نایکوئیست، ترتیب افزایش قطر نیم دایره عبارت بود از شاهد > نیترات > عصاره پوست انار (شکل ۱۳).

طبق داده‌های حاصل از امپدانس در جدول ۵، بیشترین میزان کارایی بعد از ۳ ماه برای عصاره پوست انار به میزان ۷۷/۶ درصد دست آمد که در مقایسه با بازدارنده تجاری نیترات ۱۱ درصد افزایش داشت.

جدول ۵: داده‌های حاصل از امپدانس الکتروشیمیایی میلگرد در محلول شبیه‌ساز بتن و محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت‌های بهینه بازدارنده‌ها پس از ۳ ماه غوطه‌وری در شرایط آزمون خوردگی بلند مدت.

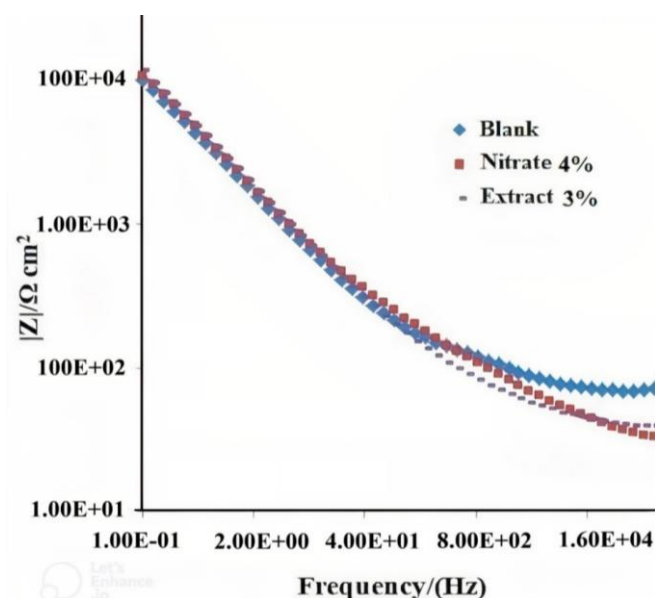
Table 5: Data from the electrochemical impedance of rebar in concrete simulant solution and simulant solution containing optimal concentrations of inhibitors after 3 months of immersion in long-term corrosion test conditions.

Sample	Cons. (v/v)	$R_s (\Omega.cm^2)$	$R_p (\Omega.cm^2)$	$CPE_{dl} (\mu F.cm^{-2})$	$Y_0 (\Omega^{-1}S^n.cm^{-2})$	n	IE%
Blank	-	12.0	9.25	127	113	0.9539	-
Nitrate	4wt. %	9.5	27.34	26.6	18.8	0.9720	66.0
Extract/water-acetonitrile	3%	14.3	41.24	19.2	10.6	0.9813	77.0



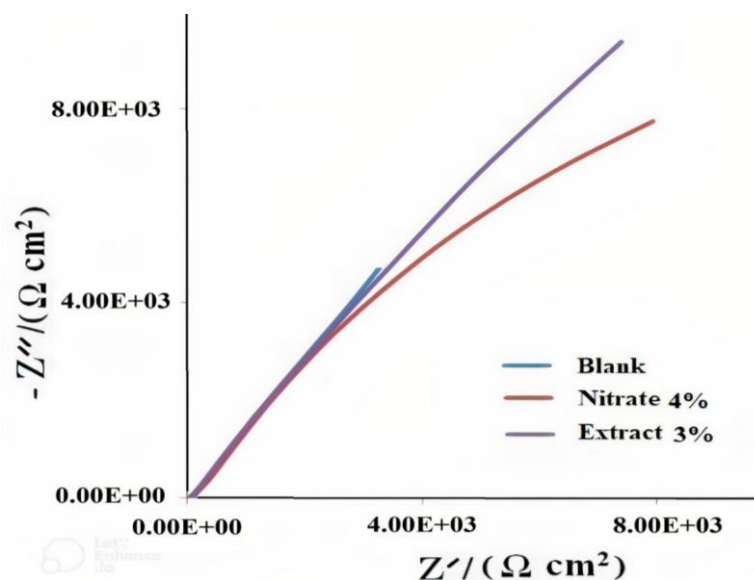
شکل ۱۱: الگوی پراش پرتو ایکس فازهای موجود در محصولات خوردگی تشکیل شده بر روی سطح فولاد در معرض محلول شبیه‌ساز بتن (a) در غیاب بازدارنده و (b) در حضور عصاره پوست انار استخراج شده در آب/استونیتریل ۳ درصد.

Figure 11: X-ray diffraction pattern of phases present in corrosion products formed on the steel surface exposed to concrete simulant solution a) in the absence of inhibitor, and b) in the presence of pomegranate peel extract extracted in water/acetonitrile solvent 3 %.



شکل ۱۲: نمودارهای بد آرماتورهای فولادی غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بتن بدون بازدارنده (شاهد)، حاوی بازدارنده نیترات با غلظت بهینه ۴ درصد و حاوی بازدارنده حاصل از عصاره پوست انار با غلظت ۳ درصد در شرایط آزمون خوردگی بلند مدت (۳ ماه).

Figure 12: Bode diagrams of steel reinforcements immersed in concrete simulant solution without inhibitor (blank), containing nitrate inhibitor with an optimal concentration of 4 %, and containing inhibitor obtained from pomegranate peel extract with a concentration of 3 % under long-term corrosion test conditions (3 months).



شکل ۱۳: نمودارهای نایکوئیست آرماتورهای فولادی غوطه‌ور در محلول شبیه‌ساز بتن بدون بازدارنده (شاهد)، حاوی بازدارنده نیترات با غلظت بهینه ۴ درصد و حاوی بازدارنده حاصل از عصاره پوست انار با غلظت ۳ درصد در شرایط آزمون خوردگی بلند مدت (۳ ماه).

Figure 13: Nyquist plots of steel reinforcement immersed in concrete simulant solution without inhibitor (blank), containing nitrate inhibitor with an optimal concentration of 4%, and containing inhibitor obtained from pomegranate peel extract with a concentration of 3 % under long-term corrosion test conditions (3 months).

۳-۸-۳- آزمون قطبش طولانی مدت

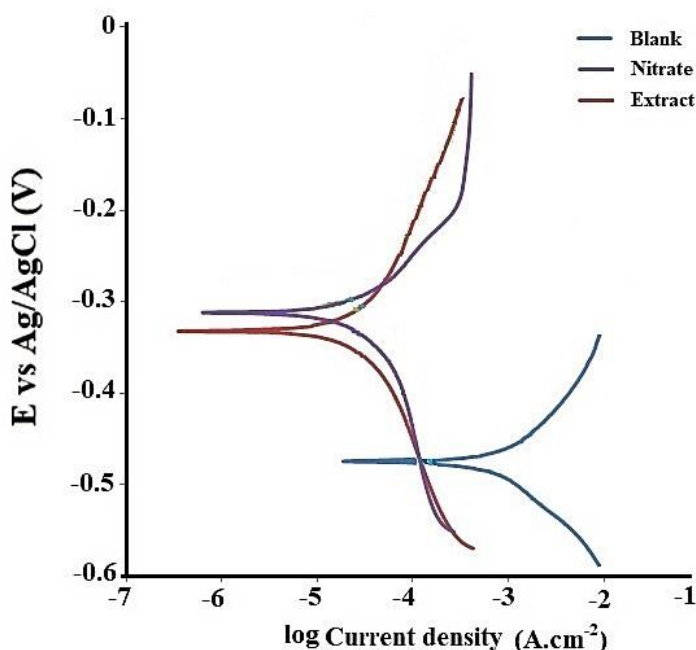
طبق نتایج طولانی مدت آزمون قطبش نیز ترتیب کارایی بازدارنده‌ها بعد از ۳ ماه غوطه‌وری به صورت شاهد > نیترات > عصاره پوست انار به دست آمد که با نتایج امپدانس مطابقت داشت (شکل ۱۴). مقایسه

کارایی بازدارنده‌ها در آزمون تسریع شده کوتاه مدت و آزمون بلند مدت روال نسبتاً مشابهی را نشان داد و به طور کلی حاکی از کارایی قابل رقابت و حتی بالاتر عصاره پوست انار در مقایسه با بازدارنده تجاری نیترات بود (جدول ۶).

جدول ۶: داده‌های حاصل از قطبش فولاد در محلول شبیه‌ساز بدون بازدارنده (شاهد) و محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت‌های بهینه از بازدارنده‌ها بعد از ۳ ماه غوطه‌وری در آزمون بلندمدت.

Table 6: Data from steel polarization in a simulant solution without inhibitors (blank) and a simulant solution containing optimal concentrations of inhibitors after 3 months of immersion in a long-term test.

Sample	(OCP)/V	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	R_p ($K\Omega.cm^2$)	i_{corr} (mA/cm ²)	C.R (mm/y)	IE %
Blank	-0.488	6.10	7.85	3.37	0.22	2.50	–
Nitrate	-0.332	6.30	8.33	20.0	0.078	0.88	64.5
Extract	-0.311	6.94	7.87	25.4	0.063	0.71	71.3



شکل ۱۴: نمودارهای پلاریزاسیون فولاد در محلول شبیه‌ساز بدون بازدارنده (شاهد) و محلول شبیه‌ساز حاوی غلظت‌های بهینه از بازدارنده‌ها بعد از ۳ ماه غوطه‌وری آزمون بلند مدت.

Figure 14: Polarization diagrams of steel in a simulator solution without inhibitors (blank) and a simulator solution containing optimal concentrations of inhibitors after 3 months of long-term test immersion.

۹-۳- سازوکار بازدارندگی عصاره پوست انار در محیط شبیه‌ساز بتن

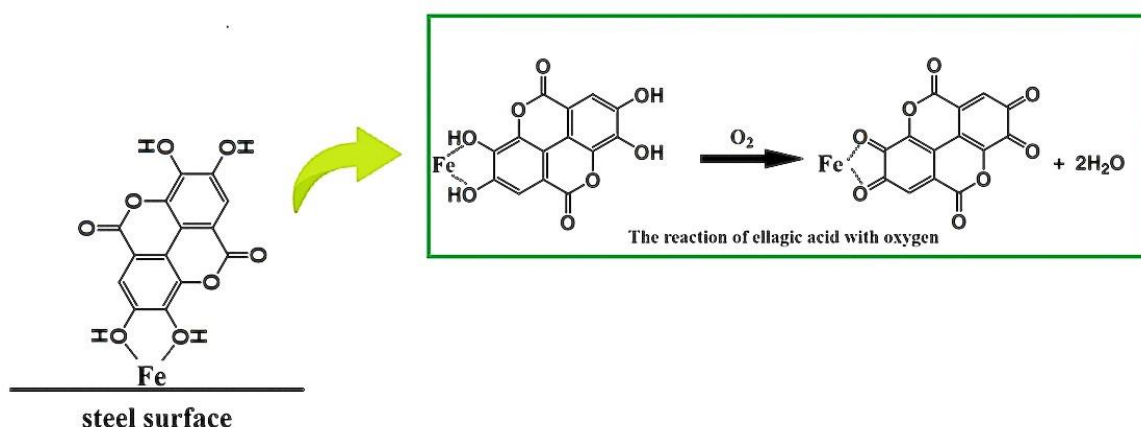
فولاد تعبیه شده در بتن به دلیل ماهیت بسیار قلیایی بتن، به طور خودکار از نظر فیزیکی و شیمیایی در برابر خوردگی محافظت می‌شود (در غیاب یون کلرید). اما باید دانست که وجود مقدار کافی یون کلرید حتی در شرایط قلیایی زیاد می‌تواند فیلم محافظ رویین فولاد را در بتن تخریب کند که این امر منجر به خوردگی فولاد طبق واکنش‌های ۱۰ تا ۱۳ می‌شود.

واکنش احیای اکسیژن در محل‌های کاتد به صورت واکنش ۱۱ است.



از سوی دیگر، یون‌های کلر با Fe و Fe²⁺ واکنش داده و ترکیبات FeCl₂ و FeCl₃ را تشکیل می‌دهند (واکنش ۱۲ و ۱۳).





شکل ۱۵: شمایی از سازوکار مهار خوردگی میلگرد توسط عصاره پوست انار.

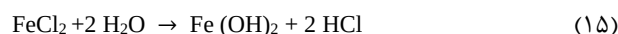
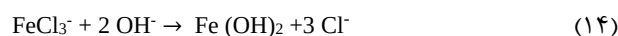
Figure 15: Schematic representation of the mechanism of corrosion inhibition of rebar by pomegranate peel extract.

۴- نتیجه گیری

به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از این است که عصاره پوست انار به عنوان یک بازدارنده سبز دوستدار محیط زیست، غیرسمی با بازده بالا و ارزان قیمت برای مهار خوردگی میلگرد فولادی در محیط شبیه ساز بتن عمل می کند. به طوری که براساس نتایج امپدانس الکتروشیمیایی میزان کارایی ۹۴ درصد برای این بازدارنده به دست آمد. نتایج گزارش شده از آزمون کاهش وزن نشان می دهد که ۱- کاهش وزن برای نمونه های فولادی در حضور عصاره پوست انار در مقایسه با نمونه های فولادی بدون عصاره کمتر بود. ۲- اختلاف قابل توجهی بین کارایی عصاره های استخراج شده در آب/ استونیتیل و آب وجود داشت. این اختلاف در کارایی بازدارندگی، براساس آزمون فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره های استخراج شده، مربوط به استخراج بیشتر ترکیبات گیامایه و مواد موثر در بازدارندگی خوردگی توسط مخلوط حلال های آب و استونیتیل در مقایسه با آب به تنهایی است. ۳- روند بازدارندگی در نمونه های فولادی کوپن مشابه نمونه های آرماتور بود اما درصد بازدارندگی در نمونه های فولادی کوپن در اغلب موارد، در مقایسه با آرماتور عدد بالاتری را نشان داد که مربوط به براق کردن یکنواخت تر و دقیق تر سطوح فولادی کوپن در مقایسه با سطح غیر یکنواخت و آجدار آرماتوری باشد. براساس نتایج تست کاهش وزن و امپدانس الکتروشیمیایی غلظت ۳ درصد به عنوان غلظت بهینه برای بازدارنده سبز به دست آمد و نتایج این آزمون ها نشان دادند که بازدارنده خوردگی سبز حاصل قابل رقابت و حتی جایگزینی با بازدارنده مرسوم تجاری نیترات است.

طبق نتایج ایزوترم جذب، جذب بازدارنده بر روی سطح فولاد از ایزوترم جذب سطحی لانگمویر پیروی می کند. آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنجی پراش اشعه نشان دادند که وجود یک

علاوه بر این، یون های تشکیل شده به این ترتیب با یون های موجود OH^- واکنش نشان می دهند (واکنش ۱۴ و ۱۵) (۱۹).



افزون بر این، هیدروکسید آهن، $\text{Fe}(\text{OH})_2$ با اکسیژن و آب ترکیب می شود و $\text{Fe}(\text{OH})_3$ را تشکیل می دهد که روی سطح فلز رسوب می کند. سپس ترکیبات $\text{Fe}(\text{OH})_2$ و $\text{Fe}(\text{OH})_3$ برای تشکیل محصولات خوردگی نهایی واکنش نشان می دهند. همان طور که در مقدمه ذکر شد، ترکیبات اجزای غالب در عصاره پوست انار شامل گالیک اسید، گالاژیک اسید، الازیک اسید و غیره که حاوی هترواتم اکسیژن و حلقه های آروماتیک بسیار هستند (۱۹). پلی فنل های موجود در پوست انار به دلیل اینکه منابع غنی از الکترون هستند، قادرند به راحتی با اوربیتال های d خالی اتم های سطحی آهن پیوند داتیو داده و به این ترتیب توسط سطح فلز جذب شوند و یک لایه محافظ بر بستر فلز تشکیل دهند که موجب کاهش میزان خوردگی می شود (شکل ۱۵) (۲۰، ۱۹). از طرفی، پس از افزودن عصاره پوست انار (به عنوان منبعی غنی از پلی فنل ها، تانن ها (اسید الازیک، گالیک) این اجزاء می توانند در اثر واکنش و حذف مولکول های اکسیژن، (مطابق شکل ۱۵) با اکسایش سطح فلز نیز مقابله کنند. واکنش جذب و حذف اکسیژن به این صورت است که پلی فنل ها بسیار احیا کننده هستند و می توانند با مصرف O_2 حل شده در محلول به بنزوکینون اکسید شوند (۴۴). بنابراین، ترکیبات پلی فنل موجود در عصاره پوست انار با دو سازوکار جذب سطحی بر سطح فلز و کاهش میزان اکسیژن محلول به دو صورت عملکرد فیزیکی و شیمیایی قادر به حفاظت بستر فولاد هستند.

نیز ناپدید شدند که نشان دهنده این است که سطح فولاد به خوبی توسط فیلم بازدارنده حفاظت شده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پایان نامه خانم سمانه فاتحی کنارسری دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه گیلان می‌باشد. از دانشگاه گیلان به خاطر حمایت‌های مالی در انجام این پروژه تقدیر و تشکر می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

فیلم پیوسته از بازدارنده بر بستر فلز به صورت یک لایه محافظ مانع از نفوذ و جذب یون کلرید بر بستر فلز می‌شود که بدین صورت موجب حفظ فیلم غیرفعال تشکیل شده بر بستر فلز می‌شود.

براساس نتایج FT-ATR، تشکیل فیلم بازدارنده بر بستر فلز، موجب کاهش میزان ترکیبات اکسیدی آهن و کاهش خوردگی آن در حضور بازدارنده سبز می‌شود.

طبق نتایج الگوی XRD، سطح فولاد در محیط حاوی بازدارنده از نظر شدت و تعداد قله‌های مربوط به محصولات خوردگی نسبت به نمونه شاهد کاهش نشان داد. به عبارتی دیگر در نمونه حاوی بازدارنده، قله‌های مربوط به عنصر آهن شدت بیشتری داشتند و قله‌های مرتبط با محصولات خوردگی کاهش یافته و برخی از آن‌ها

۵- مراجع

- Jabed A, Tusher MMH, Shuvo MSI, Imam A. Corrosion of steel rebar in concrete: a review. *Corros Sci Technol*. (2023);22 (4): 273-286. <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.4.273>.
- Wang Q, Wang Z, Li C, Qiao X, Guan H, Zhou Z, Song D, et al. Research progress in corrosion behavior and anti-corrosion methods of steel rebar in concrete. *Metals*. (2024);14(8):862-882. <https://doi.org/10.3390/met14080862>.
- Rodrigues R, Gaboreau S, Gance J, Ignatiadis I, Betelu S. Reinforced concrete structures: a review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Constr Build Mater*. 2021;269(1):121240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>.
- Elsener B, Angst U. Corrosion inhibitors for reinforced concrete. *Sci Technol Concrete Admix*. 2016;321-339. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00014-X>.
- Naderi R, Bautista A, Velasco F, Soleimani M, Pourfath M. Use of licorice plant extract for controlling corrosion of steel rebar in chloride-polluted concrete pore solution. *J Mol Liq*. 2022;346(1):117856. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117856>.
- Sastry VS. Principles and application of corrosion inhibitors. 1th ed. Tehran. Corrosion Association of Iran. (2005) [In Persian].
- Mahdi SM. Study the pomegranate's peel powder as a Natural Inhibitor for Mild steel corrosion. *Int J Mater Chem Phys*. 2015;1(1): 74-81. <http://www.aiscience.org/journal/ijmcp>.
- Abboud Y, Tanane O, Bouari AE, Salghi R, Hammouti B, Chetouani A, Jodeh S, et al. Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution using pomegranate leave extracts. *Corros Eng Sci Technol*. 2016;51(8):557-565. <https://doi.org/10.1179/17432782.15Y.0000000058>.
- Salim AM, Dawood NM, Ghazi R. Pomegranate peel plant extract as potential corrosion inhibitor for mild carbon steel in a 1 M HCl solution. *IOP Conf. Ser. Mater Sci. Eng*. 2020; 987(1):012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/987/1/012019>.
- Sheydaei M. The use of plant extracts as green corrosion inhibitors: A review. *Surf*. 2024;7(2):380-403. <https://doi.org/10.3390/surfaces7020024>.
- Fantana Mars G. Corrosion engineering. 4th ed. Isfahan University Publications. Isfahan Industrial Branch Academic Jihad Publications. 2009. [In Persian].
- Quraishi MA, Kumar V, Singh BN, Singh SK. Calcium palmitate: a green corrosion inhibitor for steel in concrete environment. *J Mater Environ Sci*. 2012;3(6):1001-1008. <https://doi.org/10.9790/1684-1306076266>.
- Liu C, Liu Y, Xia Z, Wang Z, Wu B. Coconut coir dust extract as a novel green corrosion inhibitor for carbon steel in the chloride-contaminated concrete pore solution. *J Build Eng*. 2024;82(12):108194. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2023.108194>.
- Anitha R, Chitra S, Hemapriya V, Chung IM, Kim SH, Prabakaran M. Implications of eco-addition inhibitor to mitigate corrosion in reinforced steel embedded in concrete. *Constr Build Mater*. 2019;213(1):246-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.046>.
- Zhang Z, Ba H, Wu Z. Sustainable corrosion inhibitor for steel in simulated concrete pore solution by maize gluten meal extract: Electrochemical and adsorption behavior studies. *Constr Build Mater*. 2019; 227(1): 117080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117080>.
- Ben Harb M, Abubshait S, Etteyeb N, Kamoun M, Dhouib A. Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater. *Arab J Chem*. 2020;13(3):4846-4856. <https://doi.org/10.1016/j.arabjch.2020.01.016>.
- Hejazian S, Ahmadyari-Sharamin M. Synergistic effect of Arabic and guar gums on corrosion behavior of steel reinforced concrete in a simulator environment. *Case Stud Constr Mater*. 2022; 16(1): e01024. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01024>.
- Rahmani MH, Dehghani A, Salamati M, Bahlakeh G, Ramezanzadeh B. Mango extract behavior as a potent corrosion inhibitor against simulated chloride-contaminated concrete pore solution; coupled experimental and computer modeling studies. *J Ind Eng Chem*. 2024;130(1):368-381. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.040>.
- Harouat A, Bezzar A, Sail L. Pomegranate peel extract as a sustainable corrosion inhibitor on steel in a simulated concrete pore solution and mortar: Experimental and theoretical studies. *Eur J Environ Civ Eng*. 2024;28(3):684-717. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2220788>.
- Baskaran J, Paramasivam S. Performance of pomegranate peel extract coated rebars in concrete. *Gradevinar*. 2023; 75(9):883-892. <https://doi.org/10.14256/JCE.3511.2022>

21. Hossein Nejad Keyvani Iman, Investigation of the effect of different solvents on the extraction rate and efficiency of pomegranate peel extract as a green corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid environment [M.S, thesis], Applied Chemistry, University of guilan; 2023 [In Persian]
22. Wang D, Özen C, Abu-Reidah IM, Chigurupati S, Patra JK., Horbanczuk JO, Atanasov AG. Vasculoprotective effects of pomegranate (*Punica granatum* L.). *Front pharmac.* 2018;544(9):1-15. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00544>
23. Chen G, Zhang M, Pang M, Hou XQSuH, Zhang J. Extracts of *Punica granatum* Linne husk as green and eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in oil fields. *Res. Chem Int.* 2013;39(1):3545-3552. <https://doi.org/10.1007/s11164-012-0861-x>.
24. Zhu CP, Zhai XC, Li LQ, Wu XX, Li B. Response surface optimization of ultrasound-assisted poly-saccharides extraction from pomegranate peel. *Food Chem.* 2015;177(1): 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.022>.
25. Singh A, Ansari KR, AbdelRahim SK, Ali IH, Ibrahimi BE, Alanazi A, Lin Y, et al. Potential application of Ginkgo biloba extract as a green corrosion inhibitor for carbon steel reinforcement in chloride-polluted simulated concrete pore solution. *Proc Safe Environ Protec.* 2024;186(1):819-832. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.003>.
26. Wang Q, Wang R, Zhang Q, Zhao C, Zhou X, Zheng H, Yan Z. Application of biomass corrosion inhibitors in metal corrosion control: A review. *Mol.* 2023;28(6):2832. <https://doi.org/10.3390/molecules28062832>.
27. Chitra S, Parameswari K, Sivakami C, Selvaraj A. Sulpha Schiff Bases as corrosion inhibitors for mild steel in 1M sulphuric acid. *Chem Eng Res Bullett.* 2010;14(1):1-6. <https://doi.org/10.3329/ceerb.v14i1.3766>.
28. Mohammadi S, Roohi H. Influence of functionalized multi-layer graphene on adhesion improvement and corrosion resistance performance of zinc-rich epoxy primer. *Corros Eng Sci and Technol.* 2018;53(6):422-430. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2018.1495679>.
29. Murmu M, Saha SK, Murmu NC, Banerjee P. Nitrate as corrosion inhibitor. *Inorg Anticor Mater.* 2022;269-296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90410-0.00015-5>.
30. Østnor TA, Justnes H. Anodic corrosion inhibitors against chloride induced corrosion of concrete rebars. *Adv Appl Ceram.* 2011;110(3):131-136. <https://doi.org/10.1179/1743676110Y.0000000017>.
31. Nabatipour S, Mohammadi S, Mohammadi A. Synthesis and comparison of two chromone based Schiff bases containing methoxy and acetamido substitutes as highly sustainable corrosion inhibitors for steel in hydrochloric acid. *J Mol Struct.* 2020;1217(1) 128367. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128367>.
32. Patel R. Prevention of corrosion of steel reinforcement in concrete. *AIP Conf Proceed.* 2019;2158(1):AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5127159>.
33. Chitra S, Parameswari K, Selvaraj A. Dianiline Schiff bases as inhibitors of mild steel corrosion in acid media. *Int J Electrocheml Sci.* 2010;5(11):1675-1697. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15421-6](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15421-6).
34. Buyuksagis A, Dilek M, Kargiöglu M. Corrosion inhibition of st37 steel in geothermal fluid by *Quercus robur* and pomegranate peels extracts. *Protection of Met. Phys Chem Surf.* 2015;51(1):861-872. <https://doi.org/10.1134/S2070205115050056>.
35. Ashassi-Sorkhabi H, Mirzaee S, Rostamikia T, Bagheri R. Pomegranate (*Punica granatum*) peel extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution. *Int J Corros.* 2015;2015(1):197587. <https://doi.org/10.1155/2015/197587>.
36. Abboud Y, Chagraoui A., Tanane O, El Bouari A, Hannache H. (2013). *Punica granatum* leave extract as green corrosion inhibitor for mild steel in Hydrochloric acid. *MATEC Web of Conferences.* 2013;5:04029. EDP Sci. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20130504029>.
37. Marsoul A, Ijjaali M, Elhajjaji F, Taleb M, Salim R, Boukir A. Phytochemical screening, total phenolic and flavonoid methanolic extract of pomegranate bark (*Punica granatum* L): Evaluation of the inhibitory effect in acidic medium 1 M HCl. *Mater Today Proc.* 2020;27:3193-3198. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.202>.
38. Musah M, Azeh Y, Mathew JT, Umar MT, Abdulhamid Z, Muhammad AI. Adsorption kinetics and isotherm models: a review. *CaJoST.* 2022; 4(1): 20-26. <https://dx.doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>.
39. Giri R, Kumari N, Behera M, Sharma A, Kumar S, Kumar N, Singh R. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution using pomegranate peel as low-cost biosorbent. *Environ Sustain.* 2021;4(2):401-417. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00192-8>.
40. Ituen E, Akaranta O, James A. Evaluation of performance of corrosion inhibitors using adsorption isotherm models: an overview. *Chem Sci In J.* 2017; 18(1): 1-34. <https://doi.org/10.9734/CSIJ/2017/28976>.
41. Fazayel AS, Khorasani M, Sarabi AA. The effect of functionalized polycarboxylate structures as corrosion inhibitors in a simulated concrete pore solution. *Appl Surf Sci.* 2018;441(4):895-913. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.012>.
42. Subbiah K, Lee HS, Mandal S, Park T. Conifer cone (*Pinus resinosa*) as a green corrosion inhibitor for steel rebar in chloride-contaminated synthetic concrete pore solutions. *ACS Ap Mater Int.* 2021;13(36):43676-43695. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c11994>.
43. Subbiah K, Lee HS, Al-Hadeethi MR, Park T, Lgaz H. Unraveling the anti-corrosion mechanisms of a novel hydrazone derivative on steel in contaminated concrete pore solutions: An integrated study. *J Adv Res.* 2024;58(1):211-228. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.08.016>.
44. Hamdy A. El-Gendy, Nour Sh. Thermodynamic, adsorption and electrochemical studies for corrosion inhibition of carbon steel by henna extract in acid medium. *Egypt J Pet.* 2013; 22(1):17-25. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.06.002>.

How to cite this article:

Fatehi Kenarsari S, Mohammadi S. Investigating the effectiveness of pomegranate peel extract in protecting rebar corrosion in concrete simulant solution. *J Color Sci Tech.* 2025;19(1):25-47. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167495.1256> [In Persian]