بررسی استفاده از ترکیبات معدنی فسفاتی، مولیبداتی و نیتریتی به عنوان بازدارنده خوردگی فولاد ساده‌کربنی در محلول شبیه‌ساز حفرات بتن حاوی غلظت‌های ۱/۸ و ۳/۵ درصد سدیم کلرید

فرشاد تیموری[۱]، سعیدرضا اله‌کرم[۲*]، ایمان اعظمیان[۱]، میلادجوهری[۱]، ایمان سمیعی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران.

[۲] استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران.

[۳] دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: akaram@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰٤/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۱/۱۱

چکیده

خوردگی فولاد در بتن از مهمترین دلایل تخریب زودرس سازه‌های بتنی است. استفاده از بازدارنده‌های خوردگی یکی از راه‌های کنترل خوردگی آرماتور در بتن می‌باشد. این مواد در مقادیر خیلی کم به محیط خورنده اضافه می‌شوند تا سرعت خوردگی را با تاثیر گذاری بر سرعت واکنش‌های آندی، کاتدی و یا هر دو کاهش دهند. در این مقاله اثر بازدارندگی خوردگی سه ترکیب معدنی دی سدیم هیدروژن فسفات، سدیم مولیبدات و سدیم نیتریت در محلول شبیه‌ساز حفرات بتن در دو غلظت ۳/۵٪ و ۱/۸٪ سدیم کلرید بررسی و مقایسه شده است. در این پژوهش با توجه به آزمون‌های انجام شده در محلول شبیه‌ساز حاوی ۱/۸٪ وزنی سدیم کلرید، بازدارنده‌های نیتریتی، فسفاتی و مولیبداتی به ترتیب در غلظت‌های۰/۲ ، ۰/۰۰۰۲ و ۰/۱۵ مولار، منجر به راندمان ۶۹ ، ۵۹ و ۸۱ درصدی شدند. همچنین در بررسی‌های میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص گردید که استفاده از این سه بازدارنده تعداد و فاصله حفرات سطحی را تا حد بسیار زیادی نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: خوردگی آرماتور، بازدارنده‌های خوردگی معدنی، سدیم نیتریت، دی‌سدیم هیدروژن فسفات، سدیم مولیبدات، طیف امپدانس الکتروشیمیایی.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

Investigation of the Use of Phosphate, Molybdate and Nitrite Mineral Compounds as Corrosion Inhibitors for Low Carbon Steel in Concrete Pore Solution Containing Concentrations of ۱/۸٪ and ۳/۵٪ Sodium Chloride

F. Teymouri [1], S. R. Allahkaram [2*], I. Azamian [1], M. Johari [1], I. Samiei [3]

[1] M.Sc., School of Metallurgy and Materials Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Iran.
[2] Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Iran.
[3] B. Sc., School of Metallurgy and Materials Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Iran.

* **Corresponding Author:** akaram@ut.ac.ir

Submission: 2020/07/13 Acceptance: 2021/03/30

Abstract
Corrosion of steel in concrete is the most important reason for the premature destruction of concrete structures. The use of corrosion inhibitors is a suitable way to control the corrosion of reinforcement in concrete. These chemicals are added in small amounts to the corrosive medium to reduce the rate of corrosion by affecting the rate of anodic, cathodic, or both reactions. In this paper, we investigate the corrosion inhibitory effects of disodium hydrogen phosphate, sodium molybdate, and sodium nitrite in simulated concrete pore solution in two concentrations of 1.8% and 3.5% NaCl. Hence according to the tests performed in simulator solution containing 1.8 wt.% NaCl salts, the nitrite, phosphate, and molybdate inhibitors added in 0.2, 0.0002, and 0.15 M, resulted in the efficiencies of 69, 59 and 81 percent, respectively. Also, in scanning electron microscopy micrographs, it was found that the use of these three inhibitors dramatically reduces the number and distance of surface pits compared to the control sample.

Keywords: Rebar Corrosion; Inorganic Corrosion Inhibitors; Sodium Nitrite; Disodium Hydrogen Phosphate; Sodium Molybdate; Electrochemical Impedance Spectroscopy.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

۱ـ مقدمه

خوردگی آرماتورها به عنوان مهم‌ترین عامل در تعیین طول عمر سازه‌های بتن مسلح معرفی می‌شود [۱]. فولادها معمولا تنها در محیط‌های اسیدی خورده می‌شوند. لذا محیط بتن به علت قلیاییت بالا (pH>12) و امکان تشکیل لایه محافظ بر روی آرماتور، شرایطی ایده‌آل برای میلگردهای فولادی فراهم می‌کند. از این رو در حالتی که سطح فولاد دارای لایه‌ای رویین و محافظ است یا به اصطلاح غیرفعال(پسیو) است، نرخ خوردگی ۰/۱ میکرومتر در سال است؛ بدین معنی که عملا از خوردگی مصون است. اما در صورتی که فیلم محافظ به هر دلیلی تشکیل نشود یا پایدار و پیوسته نباشد، میزان خوردگی افزایش خواهد یافت [۲]. یکی از عوامل تخریب یا عدم تشکیل لایه محافظ، افزایش میزان یون‌های خورنده مانند یون کلرید به مقادیری فراتر از حد مجاز است. نفوذ یون کلرید ناشی از محیط‌های باتلاقی و نمکی، نمونه‌هایی از حالاتی هستند که می‌توانند خورده شدن آرماتور را در پیش داشته باشند[۳]. علاوه بر این، حضور آب و اکسیژن و نفوذ احتمالی آن‌ها نیز می‌تواند سبب تشدید خوردگی میلگردهای فولادی شود. از این رو آب، اکسیژن و یون‌های خورنده نظیر کلرید را میتوان از عوامل اصلی تخریب آرماتور در بتن و در نتیجه نابودی سازه، دانست [۵].

در طول دهه‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بر روی به‌کارگیری از راهکارهای مختلف به‌منظور کاهش نرخ خوردگی آرماتورها، در جهان انجام گرفته است. با این وجود، نیاز به بررسی‌های تکمیلی دقیق‌تر برای بهینه‌سازی روش‌های کم هزینه، مطمئن و سازگار با محیط زیست برای جلوگیری یا کاهش نرخ خوردگی آرماتور، در شرایط محیطی مختلف، احساس می‌شود. از سوی دیگر برخی تکنولوژی‌ها و مواد جدید در سال‌های اخیر برای کاهش نرخ خوردگی آرماتورها و افزایش عمر و کارآیی سازه‌های بتن مسلح، معرفی شده‌اند. برخی از این دستاوردها عبارتند از: استفاده از فولادهای زنگ‌نزن، حفاظت کاتدی، پوشش‌دهی آرماتور، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی و پوشش‌های سیلانی بر روی سطح بتن مسلح[۵].در بین روش‌های فوق، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی به دلیل سهولت در استفاده و در دسترس بودن، محتمل‌ترین گزینه است. بازدارنده‌های خوردگی ترکیبات شیمیایی هستند که در هنگام حضور در سیستم و در مقادیر کافی قادر به کاهش نرخ خوردگی بدون تغییر غلظت در عوامل خوردگی هستند. بازدارنده‌های خوردگی می توانند در فرآیند خوردگی به دو صورت اثر بگذارند: ۱- فرایند از بین رفتن لایه محافظ انفعالی را به تاخیر بیندازند.۲- لایه محافظ را تقویت کند یا بعد از نابودی لایه محافظ نرخ خوردگی را کاهش دهد[۶]. بنابراین استفاده از بازدارنده‌های خوردگی در بتن به میزان مناسب، شروع فرآیند خوردگی را با تاخیر مواجه می‌کند و منجر به افزایش عمر سازه می‌گردد. بنابراین بازدارنده‌ها در غلظت‌های کم به مخلوط بتن اضافه می‌شوند و سبب کندشدن یا تاخیر درشروع فرایند خوردگی آرماتور می‌شوند. اکثر بازدارنده‌ها با پایدار کردن سطح فولاد به وسیله‌ی تشکیل لایه محافظ عمل می‌کنند و برخی از بازدارنده‌ها با ساختار بتن ترکیب شده و با ایجاد ترکیباتی نفوذ پذیری بتن را کاهش می‌دهند [۷]. از جمله‌ی بازدارنده‌های معدنی، نیتریت‌ها هستند؛ این ترکیبات به عنوان بازدارنده‌ی اکسید کننده عمل کرده و می‌توانند حتی در حضور یون کلر لایه‌ی رویین را پایدار کنند [۸]. این ترکیب از جمله بازدارنده‌های پرکاربرد صنعتی می‌باشد که مکانیزم عملکرد آن ایجاد ترکیب با فلز در مناطق آندی بر روی سطح فلز می‌باشد [۹]. دومین بازدارنده معدنی مورد استفاده در این پژوهش دی سدیم هیدروژن فسفات است. بازدارنده‌های فسفاتی نیز همانند نیتریتی‌ها از طریق مکانیزم تشکیل فیلم عمل می‌کنند. فیلمی که تشکیل می‌شود عمدتا از جنس فاز استرنجیت ($FePO_4.2H_2O$) یا فسفات آهن ($FePO_4$) است که از طریق واکنش بین یون فسفات و یون آهن سه ظرفیتی تشکیل می‌شود. تشکیل این ترکیبات هم در مناطق

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

آندی و هم در مناطق کاتدی سطح فلز اتفاق می‌افتد [۱۰]. سومین بازدارنده معدنی مورد استفاده در این پژوهش سدیم مولیبدات است. بازدارنده‌های مولیبداتی بازدارنده‌های آندی هستند که در عملکرد خود به حضور اکسیژن یا عامل اکسیدکننده مانند CrO_4^{2-}، NO_2^- یا NO_3^- نیاز دارند. به طور کلی در حضور اکسیژن، $FeMO_4$ تشکیل شده در لایه خارجی اکسید هیدروکسید فیلم جایگزین می‌شود و پایداری آن را بهبود می‌بخشد [۱۱ و ۱۲].

با توجه به مطالب ذکر شده، در این مقاله به بررسی عملکرد سه نوع از بازدارنده‌های معدنی‌خوردگی سدیم نیتریت، دی سدیم هیدروژن فسفات و سدیم مولیبدات در محلول شبیه‌ساز حفرات بتن خواهیم پرداخت و با استفاده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی و آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به بررسی عملکرد بازدارنده‌ها در برابر خوردگی آرماتورها خواهیم پرداخت.

۲ ـ روش تحقیق

۲ ـ ۱ ـ مواد مصرفی

نوع آرماتور استفاده شده در آزمایش‌ها، آرماتور فولادی CK-۴۵ با قطر ۲۰ میلی‌متر تولید شده توسط شرکت ذوب‌آهن اصفهان بوده است، که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات آرماتور فولادی مورد استفاده.

عناصر	Fe	S	P	Mn	Si	C
برحسب درصد وزنی	۹۷/۶	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۱/۳۰	۰/۶۰	۰/۳۲

به منظور انجام آزمایش‌ها در محیط شبیه‌سازی بتن از سه ترکیب هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$)، هیدروکسید پتاسیم (KOH) و هیدروکسید سدیم (NaOH) ساخت شرکت مرک استفاده شد. برای ساخت محلول از ترکیبات شیمیایی یاد شده به میزان ۰/۰۲ مولار کلسیم هیدروکسید، ۰/۲۵ مولار پتاسیم هیدروکسید و ۰/۲۵ مولار سدیم هیدروکسید آماده شد و پس از به حجم رسانیدن با آب مقطر، آماده آزمایش شد. سپس بازدارنده‌های سدیم نیتریت، دی‌سدیم هیدروژن فسفات و سدیم مولیبدات ساخت شرکت مرک در مقادیر متفاوت به محلول شبیه‌ساز اضافه شدند و در دو غلظت ۳/۵٪ و ۱/۸٪ سدیم کلرید خواص بازدارندگی آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. غلظت‌های به کار گرفته این ترکیبات از بازه ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۶ مولار بررسی گردید که در بخش نتایج صرفا بازه‌های غلظتی با راندمان بالای این بازدارنده‌ها آورده شد. ترکیبات محلول شبیه ساز pH نهایی محلول را به بالای عدد ۱۲/۵ می‌رساندکه مطابق با محیط بتن مسلح است. pH محلول‌ها نیز هر بار پس از آماده‌سازی محلول با استفاده از دستگاه pH سنج ساخته شرکت .ZAG CHEMIE Co مدل PTR 79 به تایید رسید.

۲ ـ ۲ ـ بررسی آزمایشگاهی

آزمون در محلول شبیه‌سازی اشاره شده در پیل استاندارد که شامل الکترود کار (آرماتور)، یک الکترود پلاتین به عنوان الکترود کمکی و الکترود کالومل به عنوان الکترود مرجع انجام گردید. در این روش، پس از قرار گرفتن نمونه‌ها در پیل طراحی شده حاوی محلول شبیه‌ساز حفرات بتن به مدت ۴۸ ساعت و در حالت مدار باز، آرماتورها تحت آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز و با دامنه ۵ میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز خود در دمای محیط (۲۵°C) قرار گرفتند. سطح مقطع نمونه‌ها با محلول در پیل طراحی شده در حدود ۰/۷۸۵ سانتی متر مربع بود. دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات مورد استفاده در این تحقیق ساخت شرکت EG&G و با مدل ۲۷۳A است. پس از بررسی الکتروشیمیایی، نمونه‌های در معرض غلظت بهینه تحت ارزیابی با میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند که نمونه‌های مورد بررسی به صورت مجزا از آزمون‌های

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

الکتروشیمیایی تحت غوطه‌وری قرار گرفتند. در این تحقیق از میکروسکوپ الکترونی روبشی HITACHI مدل S-4160 و در حالت الکترون‌ثانویه استفاده شد. با استفاده از تصاویر توپوگرافیک حاصله از عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان وضعیت خوردگی در محیط خورنده، در غیاب و در حضور بازدارنده‌ها را بررسی نمود.

۳ ـ نتایج و بحث

۳ ـ ۱ ـ آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

۳ ـ ۱ ـ ۱ ـ سدیم نیتریت

برای فولاد کربنی در محلول حاوی ۳/۵ ٪ و ۱/۸٪ کلرید و غلظت‌های مختلف بازدارنده سدیم نیتریت، طیف EIS به فرم نمودار باد، باد-فاز و نایکوئیست در شکل ۷ ارائه شده است. وجود یک حلقه خازنی در نمودار نایکوئیست نشان می‌دهد که جهت شبیه‌سازی و ارائه نتایج بهتر است از مدار تک حلقه الکتریکی معروف یعنی مدار ساده رندلز استفاده شود (مدار داخل شکل ۱-ب) چراکه بیشترین تطابق با المان‌های الکتریکی شبیه‌سازی شده توسط این مدار برقرار می‌شود. در این مدل از R_s مقاومت محلول، R_{ct} مقاومت انتقال بار و المان فاز ثابت (CPE) به جای یک عنصر خازنی استفاده شده است. همانطور که قبلا گفته شد. هر دو عنصر R_{ct} و CPE به ویژگی‌های لایه دوگانه در فصل مشترک فلز-محلول مربوط می‌شود. استفاده از C_{dl} که در واقع یک خازن واقعی است در مدار معادل منجر به تشکیل یک نیم دایره تقریبا نامنظم در نمودار نایکوئست را نشان می‌شود که ناشی از پراکندگی شدید داده‌های امپدانس در ناحیه فرکانس‌های پایین به عنوان نتیجه‌ای از ناهمگنی سطح فلز است. طبعا با افزایش ناهمواری‌ها و غیریکنواختی‌های سطحی ماهیت فرضی تیغه‌های خازنی یک خازن ایده‌آل زیر سوال می‌رود. علاوه بر آن از آنجایی که محصولات سطحی به عنوان دی‌الکتریک این خازن فرضی تلقی می‌شوند، غیر یکنواخت بودن ضخامت این مواد در طول سطح سبب غیرایده‌آل شدن خازن موردنظر و نهایتا عدم تطابق اطلاعات با داده‌های حاصل از مدار معادل می‌گردد. در این حالت لازم است به جای خازن از شاخص CPE با دقت مناسب نسبت به داده‌های امپدانس استفاده شود. امپدانس CPE طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳].

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y(\omega j)^n} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

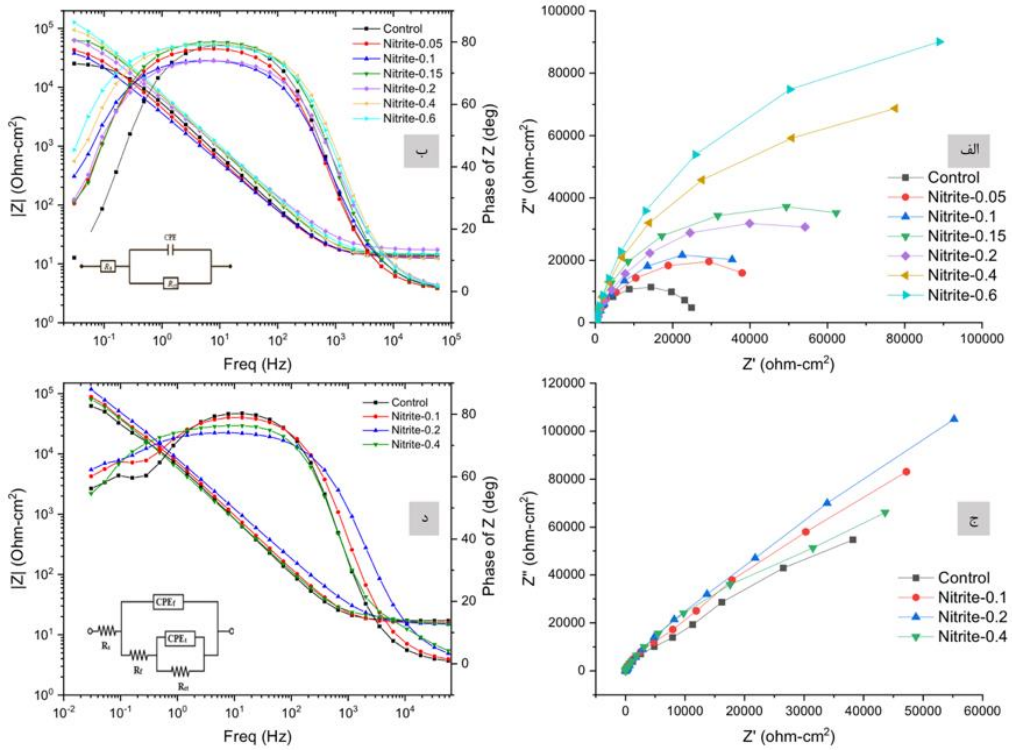
که Y معرف ضریب ادمیتانس ($\Omega^{-1}s^n cm^{-2}$)، ω فرکانس زاویه‌ای (rad/s)، j یک عدد موهومی ($\sqrt{-1}$) و n برابر توان CPE با مقادیر ($0 \le n \le 1$) می‌باشد.

طیف امپدانس به خوبی با مدار رندلز در نرم‌افزار Zsim تطابق داده شد و پارامترهای محاسبه شده در جدول ۷ ارائه شده است. مقدار R_{ct} زمانی که غلظت نیتریت از ۰/۰۵ به ۰/۶ می‌رسد یک روند افزایشی داشته است. این نشان می‌دهد که نیتریت از طریق مکانیزم تشکیل کمپلکس، کمپلکس‌های هیدروکسیدی روی سطح تشکیل داده و با افزایش غلظت، میزان پوشانندگی سطح را افزایش داده است[۹]. بدین معنی که مکان‌های آندی توسط کمپلکس‌ها اشغال و به دلیل قطع تماس با محلول حاوی یون مهاجم، خوردگی آرماتور متوقف شده است. با افزایش غلظت نیتریت منجر به ایجاد بالاترین درجه غیرفعالسازی و بیشترین مقاومت انتقال بار روی سطح فلز می‌شود. همچنین با استناد به جدول ۷ مشخص می‌شود که CPE با افزایش غلظت نیتریت تا ۰/۶ مولار روندی کاهشی داشته است. این رفتار به وضوح نمایانگر پدیده‌های سطحی در حال وقوع در لایه هلمهولتز می‌باشد که در واقع نزدیکترین لایه به سطح فلز است. مقدار ظرفیت CPE بیشترین تعامل و وابستگی را با لایه دوگانه شامل ضخامت (d)، سطح (A) و ثابت دی‌الکتریک (ε) دارد که این پارامترها طبق معادله زیر به هم مرتبط می‌شوند[۲]:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{d} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

که ε_0 ضریب گذردهی خلا و A سطح مورد نظر الکترود کار است. حضور این بازدارنده در یک محیط قلیایی آلوده به کلر سبب ایجاد یک وضعیت رقابتی بین یون‌های کلرید و نیتریت برای واکنش با یون‌های آهن و تشکیل فیلم اکسید آهن می‌گردد.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]



شکل ۱- نمودارهای (الف) نایکوئست و (ب) باد در دمای ۲۵°C و ۳/۵٪ نمک NaCl برای سدیم نیتریت در غلظت‌های مختلف به همراه مدار ساده رندلز. نمودارهای (ج) نایکوئست و (د) باد در دمای ۲۵°C و ۱/۸٪ نمک NaCl برای سدیم نیتریت در غلظت‌های مختلف به همراه معادل به کار گرفته شده.

واکنش یون نیتریت به صورت زیر است[۳]:

$$Fe^{2+} + 2OH^- + 2NO_2^- \rightarrow 2NO + Fe_2O_3 + H_2O$$

رابطه (۳)

واکنش بالا سریع‌تر از واکنش خوردگی یعنی تولید یون دوظرفیتی آهن اتفاق می‌افتد و به لحاظ سینتیک قوی‌تر است، لذا حتی در حضور یون کلرید نیز یون نیتریت (در صورتی که در غلظت مناسب بکار رود) می‌تواند سطح را با تشکیل یک فیلم یکپارچه غیرفعال کند. همانطور که در جدول ۲ مشخص است، با افزایش غلظت نیتریت تا ۰/۶ مولار، ظرفیت CPE به مرور کاهش می‌یابد. در این باره می‌توان گفت که پس از افزایش غلظت و متعاقبا افزایش ضخامت فیلم اکسیدی تشکیل شده روی سطح، همچنین با کاهش مساحت سطحی به علت بازدارندگی ظرفیت خازن مطابق با رابطه ۲ کاهش می‌یابد. علاوه بر این موادی که در اثر تشکیل فیلم، جایگزین مولکول آب در لایه دوگانه می‌شوند، دی‌الکتریک کمتری نسبت به آب دارند و باعث کاهش بیشتر ظرفیت لایه دوگانه می‌شوند. در نهایت، مقدار بازده بازدارنده (η) محاسبه شده نشان می‌دهد که بهترین رفتار حفاظتی از فولاد در محلول قلیایی حاوی یون کلرید در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با اضافه کردن ۰/۶ مولار نیتریت حاصل شده است.

$$\eta = \frac{R_{ct} - R_{ct.}}{R_{ct}} \times ۱۰۰$$

رابطه (۴)

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

جدول ۲- داده‌های امپدانس برای خوردگی فولاد کربنی در محلول ۳/۵٪ وزنی کلرید در دمای ۲۵°C با غلظت‌های مختلف نیتریت.

غلظت (M)	مقاومت محلول ($\Omega \cdot cm^2$)	مقاومت انتقال بار ($\Omega \cdot cm^2$)	CPE_{dl}		(٪)
			ظرفیت ($\Omega^{-1} \cdot s^n \cdot cm^{-2} \times 10^{-5}$)	n	
۰	۱۳/۸	۲۶۴۹۰	۳/۳۷	۰/۹۰۷۵	–
۰/۰۵	۱۳/۴۸	۵۱۵۰۰	۴/۳۴	۰/۸۸۵۳	۴۸/۶
۰/۱	۱۲/۶	۵۷۶۴۰	۵/۷۹	۰/۸۴۰۸	۵۴
۰/۱۵	۱۴/۳۸	۸۲۰۷۰	۲/۶۰	۰/۹۰۵۲	۶۷/۷
۰/۲	۱۷/۲۴	۸۳۷۶۰	۳/۲۸	۰/۸۳۹۶	۶۸/۴
۰/۴	۱۲/۱۵	۱۴۴۷۰۰	۲/۶۴	۰/۸۹۲۳	۸۱/۷
۰/۶	۱۴/۶۱	۲۱۹۸۰۰	۲/۴۸	۰/۸۸۷۹	۸۷/۹

عملکرد این بازدارنده در ۱/۸٪ نمک NaCl شکل شماره۱-ج نشان داده شده است. دلیل انتخاب این مدار این است که با توجه به اینکه در غلظت نمک ۱/۸٪، میزان حملات به سطح آرماتور بسیار کمتر است، لایه FeOOH حاصل از محیط قلیایی در حضور یون نیتریت، تا حد بالایی می‌تواند پایدار باقی بماند و فیلم کمپلکس نیتریتی روی این لایه تشکیل می‌شود. البته لایه نیتریتی در این حالت ضخامت کمتر و چسبندگی و جذب ضعیف‌تری دارد و لذا نسبت به حالتی که روی سطح فلز می‌نشیند مقاومت شیمیایی کمتری دارد. از این رو در اینجا با توجه به غلظت کمتر نمک است و شرایط ملایم‌تر است کمپلکس‌های نیتریتی هم‌چسبی مناسبی ندارند، لایه نیتریتی با مقاومت کمتری تسلیم و لایه FeOOH در برابر کلرید قرار می‌گیرد[۹]. در چنین شرایطی FeOOH به راحتی تخریب شده و خوردگی رخ می‌دهد. با توجه به وضعیت سطح، مدار معادل نسبت به حالت قبل متفاوت خواهد بود. چراکه در اینجا علاوه بر لایه مربوط به ترکیبات نیتریتی، لایه γ-FeOOH، نیز در سطح فلز موجود است. نمودار نایکوئست موجود در شکل ۱-ج نیز وجود دو فرکانس شکست و در نتیجه دو ثابت زمانی را نشان می‌دهد. در داخل شکل ۱-د مدار معادل مربوط به بازدارنده نیتریتی در محلول شبیه‌ساز ۱/۸٪ وزنی نمک NaCl، را نشان می‌دهد.

در این حالت طبق جدول ۳ با افزایش غلظت بازدارنده، مقاومت انتقال بار افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش یکپارچگی لایه اکسیدی است. البته افزایش غلظت از ۰/۲ به ۰/۴ باعث افت R_{ct} شده که این رفتار به وضوح نمایانگر پدیده‌های سطحی در حال وقوع در لایه هلمهولتز می‌باشد که در واقع نزدیک‌ترین لایه به سطح فلز است. ظرفیت لایه دوگانه نیز با حرکت از کمترین غلظت به بیشترین غلظت ابتدا دچار کاهش و سپس افزایش می‌شود. این وضعیت می‌تواند به علت تجمع غیریکنواخت کمپلکس‌های نیتریتی در غلظت‌های بالا باشد که سبب ایجاد نوعی ناهمگنی در ضخامت لایه هلمهولتز می‌گردد. در این شرایط با توجه به رابطه۲، ظرفیت لایه دوگانه افت می‌کند. بطور کلی در این پژوهش بهترین غلظت بازدارنده نیتریتی در محلول شبیه‌ساز حفرات بتن حاوی ۱/۸٪ وزنی یون کلرید در دمای ۲۵ °C، ۰/۲ مولار بدست آمد.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

جدول ۳- داده‌های امپدانس برای خوردگی فولاد کربنی در محلول ۱٪/۸ وزنی کلرید در دمای ۲۵°C با غلظت‌های مختلف نیتریت.

غلظت (M)	مقاومت محلول ($\Omega \cdot cm^2$)	مقاومت انتقال بار ($\Omega \cdot cm^2$)	CPE_{dl}		بازده (٪)
			ظرفیت $(cm^{-2} \times 10^{-5}) \Omega^{-1} \cdot s^n$	n	
۰	۱۷/۰۳	۱۱۶۰۰۰	۴/۰۴	۰/۹۲۱۵	–
۰/۱	۱۵/۶۸	۱۸۴۰۰۰	۲/۳۵	۰/۸۹۹۶	۳۷/۲
۰/۲	۱۴/۷۵	۳۷۵۰۰۰	۱/۷۲	۰/۸۳۳۷	۶۹/۱
۰/۴	۱۵/۳۱	۲۱۳۰۰۰	۰/۶۵	۰/۷۹۵۱	۴۵/۶

۳ ـ ۱ ـ ۲ ـ دی‌سدیم هیدروژن فسفات

دومین بازدارنده معدنی مورد استفاده در این پژوهش دی سدیم هیدروژن فسفات است. بازدارنده‌های فسفاتی نیز همانند نیتریتی‌ها از طریق مکانیزم تشکیل کمپلکس عمل می‌کنند. کمپلکسی که تشکیل می‌شود عمدتا از جنس فاز استرنجیت ($FePO_4.2H_2O$) یا فسفات آهن ($FePO_4$) است که از طریق واکنش بین یون فسفات و یون آهن سه ظرفیتی بصورت زیر تشکیل می‌شود [۱۰]:

$$PO_4^{3-} + Fe^{3+} + 2H_2O \rightleftarrows FePO_4 + 2H_2$$ رابطه (۵)

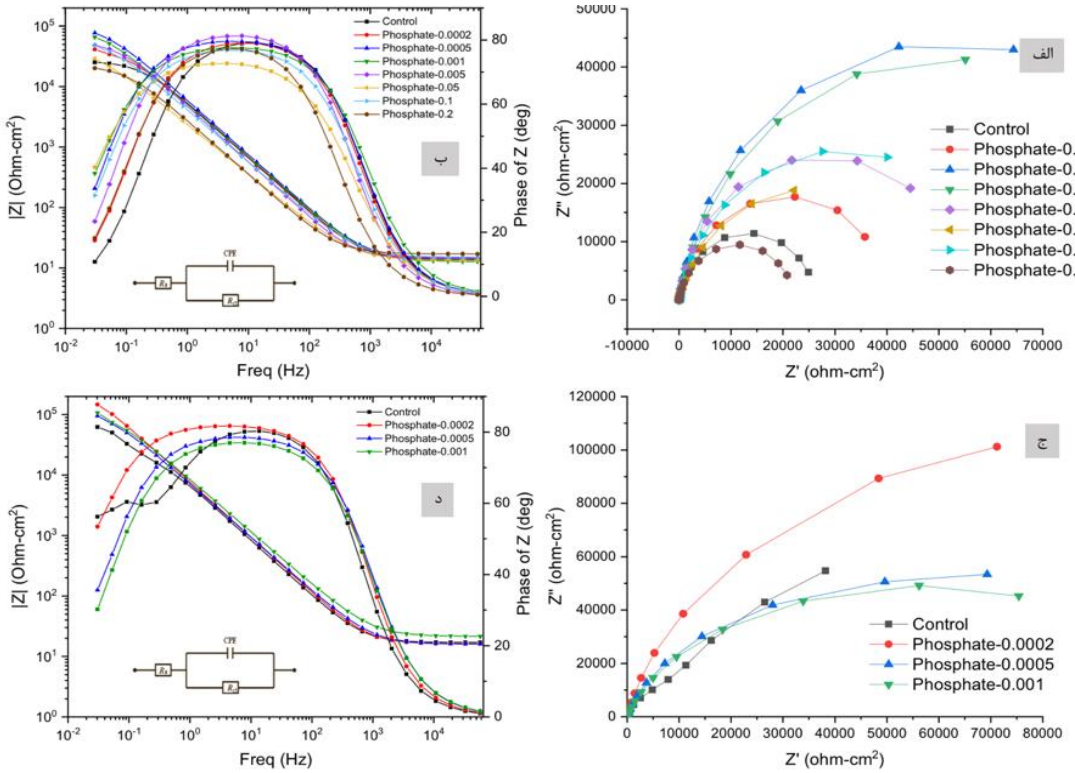
$$PO_4^{3-} + Fe^{3+} \rightleftarrows FePO_4$$ رابطه (۶)

شکل ۲ نمودار نایکوئست و باد مربوط به غلظت‌های مختلف بازدارنده فسفاتی مورد استفاده در محلول شبیه‌ساز ساختار بتن حاوی ۳/۵٪ و ۱/۸٪ وزنی نمک NaCl در دمای ۲۵℃ را نشان می‌دهد. خاصیت حفاظتی بازدارنده فسفاتی در محلول شبیه‌ساز ناشی از تشکیل لایه فیلم محافظی است که روی سطح فولاد شکل می‌گیرد. مقاومت شیمیایی نسبی این لایه امکان تشکیل محصولات خوردگی مانند $FeCl_3$ را تا حد زیادی برطرف می‌کند و لذا غیرفعال بودن سطح حفظ می‌شود [۱۴].

با توجه به نمودار نایکوئست و باد بازدارنده فسفاتی در محلول شبیه‌ساز ساختار بتن حاوی ۳/۵٪ وزنی نمک NaCl در دمای ۲۵℃ در شکل ۲، مشخص است که با افزایش غلظت بازدارنده تا ۰/۰۰۰۵ مولار، مقاومت به خوردگی سطح آرماتور افزایش و سپس با افزایش بیشتر غلظت تا مقادیر ۰/۲ مولار، کاهش می‌یابد. بطوری که در غلظت نهایی، همانطور که از نمودار نایکوئست (۲-الف) مشخص است، میزان مقاومت به خوردگی آرماتور فولادی از محلول شبیه‌ساز کنترل نیز کمتر می‌شود.

جدول ۴ اطلاعات حاصل از برازش داده‌های تست امپدانس بازدارنده فسفاتی با استفاده از مدار ساده رندلز را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴، تا غلظت ۰/۰۰۰۵ و تقریبا ۰/۰۰۱، بازدارنده فسفاتی توانسته به خوبی عمل کند بطوری که R_{ct} افزایش و ظرفیت خازن لایه دوگانه کاهش می‌یابد. نکته مورد اهمیت در مورد این بازدارنده این است که با توجه به مکانیزم عملکرد آن که در واقع تشکیل رسوب $FePO_4$ و فسفات آهن آب‌دار (استرنجیت) است، به مرور با افزایش غلظت، نسبت فاز استرنجیت به فسفات آهن بدون آب، افزایش می‌یابد [۱۴]. با توجه به قوام و هم‌چسبی کمی که در فاز استرنجیت وجود دارد، افزایش آن استحکام لایه موجود روی سطح را تحت الاشعاع قرار می‌دهد. لذا در غلظت‌های بالاتر، لایه تشکیل شده بر روی سطح مقاومت چندانی در برابر خوردگی از خود نشان نمی‌دهد. به همین دلیل است که داده‌های حاصل از برازش با مدار معادل، با افزایش غلظت بازدارنده فسفاتی به طرز چشمگیری افت می‌کند. شکل ۲-الف و ب نمودار نایکوئست و باد مربوط به غلظت‌های مختلف بازدارنده فسفاتی در دمای ۲۵℃ حاوی ۳/۵٪ وزنی نمک NaCl را نشان می‌دهد.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]



شکل ۲- نمودارهای (الف) نایکوئست و (ب) باد در دمای ۲۵°C و ۳/۵٪ نمک NaCl برای دی‌سدیم هیدروژن فسفات در غلظت‌های مختلف به همراه مدار ساده رندلز. نمودارهای (ج) نایکوئست و (د) باد در دمای ۲۵°C و ۱/۸٪ نمک NaCl برای دی‌سدیم هیدروژن فسفات در غلظت‌های مختلف به همراه مدار ساده رندلز.

جدول ٤- داده‌های امپدانس برای خوردگی فولاد کربنی در محلول ۳/۵٪ وزنی کلرید در دمای ۲۵°C با غلظت‌های مختلف فسفات.

غلظت (M)	مقاومت محلول ($\Omega \cdot cm^2$)	مقاومت انتقال بار ($\Omega \cdot cm^2$)	CPE_{dl}		بازده (٪)
			ظرفیت ($\Omega^{-1} \cdot s^n$) ($cm^{-2} \times 10^{-5}$)	n	
۰	۱۳/۸	۲۶۴۹۰	۳/۳۷	۰/۹۰۷۵	–
۰/۰۰۰۲	۱۴/۳	۴۱۴۳۰	۳/۶۰	۰/۹۰۲۵	۳۶/۱
۰/۰۰۰۵	۱۴/۹	۱۰۴۱۰۰	۳/۲۲	۰/۸۹۹۵	۷۴/۶
۰/۰۰۱	۱۲/۷	۱۰۰۹۰۰	۳/۸۷	۰/۸۷۶۱	۷۳/۷
۰/۰۰۵	۱۴/۴۶	۵۵۶۷۰	۳/۸۲	۰/۹۲۳۹	۵۲/۴
۰/۰۵	۱۳/۲۵	۴۹۷۹۰	۹/۱۱	۰/۸۲۷۸	۴۶/۸
۰/۱	۱۵/۰۸	۶۲۹۵۰	۴/۸۱	۰/۸۷۲۶	۵۷/۹
۰/۲	۱۷/۱۱	۲۲۴۴۰	۶/۹۱	۰/۸۹۳۸	۰

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

با توجه به شکل ۲-ج و د، بهینه‌ترین عملکرد بازدارنده در غلظت ۰/۰۰۰۲مولار است و با افزایش غلظت مقاومت به خوردگی آرماتور کاهش می‌یابد. در این حالت نیز مشاهده می‌شود که با توجه به کمتر بودن غلظت یون مهاجم کلرید و کاهش شدت حملات، لایه FeOOH حاصل از محیط قلیایی توانسته تا حد بالایی پایدار بماند و متعاقبا همانند نیتریت، چسبندگی ترکیبات فسفاتی به سطح را کاهش دهد. نتایج حاصل از برازش داده‌های این بازدارنده در این محلول نیز نشان می‌دهد که با افزایش غلظت، پارامتر n-که نمودی از میزان یکنواختی سطحی است- کاهش می‌یابد، جدول ۵. علاوه بر این در بالاترین غلظت یعنی ۰/۰۰۱ مولار شاهد کمترین میزان بازده (۴/۲٪) هستیم که نشان دهنده این است که حضور و عدم حضور بازدارنده عملا در حفاظت از پدیده خوردگی بی‌اثر بوده است.

جدول ۵- داده‌های امپدانس برای خوردگی فولاد کربنی در محلول ۱/۸٪ وزنی کلرید در دمای ۲۵°C با غلظت‌های مختلف فسفات.

غلظت (M)	مقاومت محلول ($\Omega \cdot cm^2$)	مقاومت انتقال بار ($\Omega \cdot cm^2$)	CPE_{dl}		بازده (٪)
			ظرفیت ($\Omega^{-1} \cdot s^n \cdot cm^{-2} \times 10^{-5}$)	n	
۰	۱۷/۰۳	۱۱۶۰۰۰	۴/۰۴	۰/۹۲۱۵	-
۰/۰۰۰۲	۱۶/۱۵	۲۸۱۰۰۰	۲/۴۰	۰/۹۱۷۲	۵۸/۸
۰/۰۰۰۵	۱۵/۹۸	۱۲۴۰۰۰	۲/۷۲	۰/۸۸۶۸	۶/۶
۰/۰۰۱	۱۶/۳۸	۱۲۱۰۰۰	۲/۳۵	۰/۸۷۱۷	۴/۲

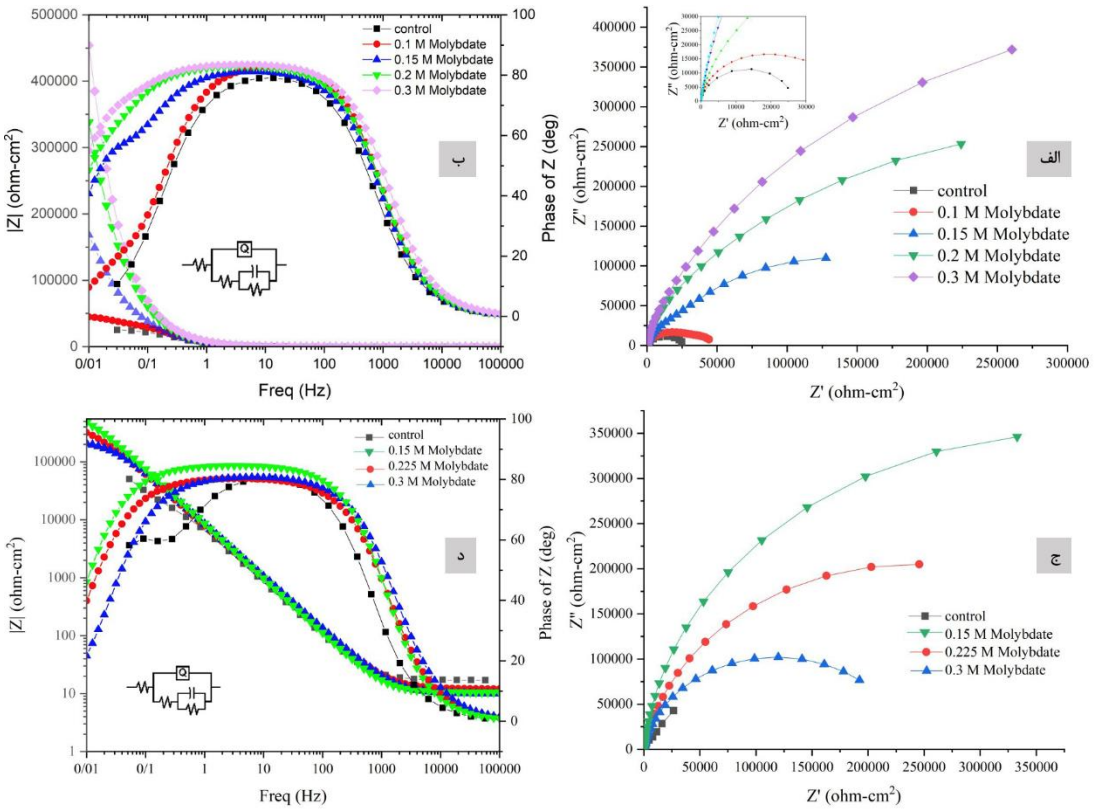
۳ ـ ۱ ـ ۳ ـ سدیم مولیبدات

سومین بازدارنده معدنی مورد بررسی در این پژوهش سدیم مولیبدات است. ترکیبات مولیبداتی مکانیزم عملکرد آندی دارند در عملکرد خود نیاز به حضور اکسیژن یا عوامل اکسیدکننده دارند. به طور کلی در حضور اکسیژن، $FeMO_4$ برروی لایه اکسید هیدروکسید آهن تشکیل می‌شود و پایداری آن را بهبود می‌بخشد. این بازدارنده تاثیر غیر مخربی بر محیط زیست ندارد و پتانسیل بالایی در امر حفاظت در برابر خوردگی دارد [۱۲-۱۱]. مطالعات زیادی روی مکانیزم بازدارندگی خوردگی مولیبدات‌ها انجام شده است. مکانیزم عملکرد بازدارندگی ترکیبات مولیبداتی به چند مرحله تقسیم می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به جذب، اکسیداسیون، رسوب اشاره نمود. در مکانیزم جذب، جذب رقابتی بین یون کلرید و مولیبدات اتفاق می‌افتد. مولیبدات‌ها در ابتدا یک فیلم جذبی تشکیل می‌دهند و اگر این فیلم توسط عوامل مخرب آسیب ببیند، یون‌های مولیبدات در نواقص جذب شده و از خوردگی حفره‌ای جلوگیری می‌کنند[۱۵]. در فرایند اکسیداسیون زیر لایه، مولیبدات احیا می‌شود که در ابتدا یون مولیبدات به $MoO(OH)_2$ احیا شده و سپس به اکسید مولیبدنیوم، تبدیل می‌شود[۱۶]. در مکانیزم رسوب، سدیم مولیبدات ذرات نامحلول $MoCl_3$، $FeMoO_4$ و $Fe_2(MoO_4)_3$ را تشکیل می‌دهد که روی دیواره‌های حفره‌ها نشسته و سبب غیر فعال شدن مجدد حفره‌ها می‌گردد[۱۱].

شکل ۳ نمودار نایکوئست و باد مربوط به بازدارنده مولیبداتی حاوی ۳/۵٪ و ۱/۸٪ وزنی نمک NaCl در دمای ۲۵℃ در محلول شبیه را نشان می‌دهد. همان طور که از نمودارهای امپدانس الکتروشیمی نمونه‌ها پیداست با افزایش غلظت بازدارنده، قطر منحنی‌های امپدانس افزایش یافته است که این

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

امر می‌تواند به معنی کاهش نرخ خوردگی نمونه‌های فولادی در اثر بازدارندگی سدیم مولیبدات باشد. افزایش غلظت یون کلرید از ۱/۸٪ به ۳/۵٪ وزنی باعث افزایش خوردگی نمونه فولادی و کاهش بازدارندگی سدیم مولیبدات می‌شود. با افزایش غلظت یون مولیبدات، یون‌ها روی سطح جذب می‌شوند و مناطق فعال آن را به طور کامل می‌پوشانند و با تشکیل فیلم جذبی از رسیدن یون‌های کلر به سطح جلوگیری می‌کنند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت سدیم مولیبدات، جذب مولکول‌های مولیبدات روی سطح فولاد افزایش یافته و به تبع آن مقدار زاویه فازی افزایش می‌یابد که این امر ناشی از تشکیل یک لایه محافظتی است. به عبارت دیگر کاهش در ارتفاع زاویه فازی با کاهش غلظت بازدارنده، نشان دهنده عبور جریان از نواقص لایه محافظ است که به دلیل پوشیده شدن بخشی از سطح فولاد یا ناپایداری لایه محافظ مولیبدات است.



شکل ۳- نمودارهای (الف) نایکوئست و (ب) باد در دمای ۲۵℃ و ۳/۵٪ نمک NaCl برای سدیم مولیبدات در غلظت‌های مختلف به همراه مدار معادل. نمودارهای (ج) نایکوئست و (د) باد در دمای ۲۵℃ و ۱/۸٪ نمک NaCl برای سدیم مولیبدات در غلظت‌های مختلف به همراه مدار معادل به کار گرفته شده.

با توجه به مدار معادل موجود در شکل ۳ وجود دو تقعر در نمودار باد، نمایانگر دو ثابت زمانی است که مربوط به وجود به دو عنصر حافظه دار در سیستم است که از شکل مدار معادل آن نیز می‌توان به این قضیه پی برد. اولین ثابت زمانی R_f-Q_f در فرکانس های بالا مشاهده می‌شود که R_f مربوط به مقاومت به جریان یون و C_f مربوط به خازن فیلم سطح و خواص دی الکتریک این فیلم می‌باشد. ثابت زمانی دوم R_{ct} –C_{dl} در فرکانس‌های پایین مشاهده می‌شود که مربوط به فرآیند

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

خوردگی و واکنش اکسایش-کاهش آهن می‌باشد. جدول ۶ پارامترهای حاصل از تطبیق طیف سنجی امپدان الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج برازش شده، بیشترین بازدهی(۹۵٪) بدست آمده است که مربوط به غلظت ۰/۳ مولار سدیم مولیبدات است که می‌تواند این گونه توجیه شود که جذب مولیبدات در غلظت‌های بالاتر، بیشتر بوده است و محافظت بهتری از سطح فولاد در برابر یون‌های مخرب انجام داده است و سرعت خوردگی را کاهش داده است.

جدول ٦- داده‌های امپدانس برای خوردگی فولاد کربنی در محلول۳/۵٪ وزنی کلرید در دمای ۲۵℃ با غلظت‌های مختلف مولیبدات.

غلظت (M)	مقاومت محلول ($\Omega \cdot cm^2$)	مقاومت انتقال بار ($\Omega \cdot cm^2$)	CPE_{dl}		بازده (%)
			ظرفیت ($\Omega^{-1} \cdot s^n \cdot cm^{-2} \times 10^{-5}$)	n	
۰	۱۳/۸	۲۶۴۹۰	۳/۳۷	۰/۹۰۷۵	-
۰/۱	۱۵/۲۷	۴۶۵۰۰	۲/۵۳۶	۰/۹۴۱۱	۴۳
۰/۱۵	۱۳/۲۱	۲۳۵۰۰۰	۲/۹	۰/۹۱۱۳	۸۵
۰/۲	۱۲/۱۱	۴۶۰۰۰۰	۲/۲	۰/۹۳۳۲	۹۳
۰/۳	۱۷/۰۸	۶۴۹۰۰۰	۲/۰۲	۰/۹۵۰۶	۹۵

همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت بازدارنده، مقاومت فیلم پسیو افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد فیلم پسیو مقاوم‌تر، پایدارتر و متراکم‌تر شده است. با افزوده شدن غلظت بازدارنده، ظرفیت لایه دوگانه کاهش یافته است که با جذب سطحی مولکول‌های بازدارنده روی سطح فلز، ضخامت لایه دوگانه افزایش یافته است و طبق مدل هلمهولتز ظرفیت لایه دوگانه کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۷ در این پژوهش بهترین غلظت بازدارنده مولیبداتی در محلول شبیه‌ساز حفرات بتن حاوی ۱/۸٪ وزنی یون کلرید در دمای ۲۵ ℃، در غلظت ۰/۱۵ مولار بدست آمد.

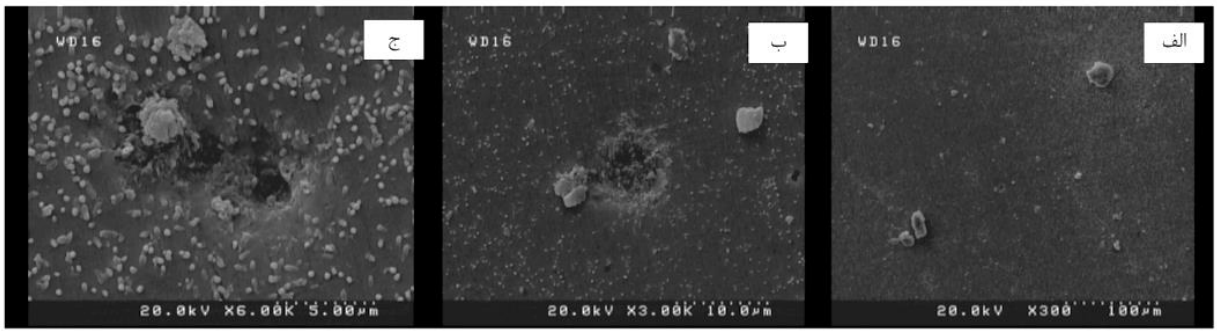
جدول ۷- داده‌های امپدانس برای خوردگی فولاد کربنی در محلول ۱/۸٪ وزنی کلرید در دمای ۲۵℃ با غلظت‌های مختلف مولیبدات.

غلظت (M)	مقاومت محلول ($\Omega \cdot cm^2$)	مقاومت انتقال بار ($\Omega \cdot cm^2$)	CPE_{dl}		بازده (٪)
			ظرفیت ($\times 10^{-5}$ $\Omega^{-1} \cdot s^n \cdot cm^{-2}$)	n	
۰	۱۷/۰۳	۱۱۶۰۰۰	۴/۰۴	۰/۹۲۱۵	-
۰/۱۵	۱۶/۶۱	۶۲۸۰۰۰	۱۲/۲۱	۰/۹۰۳۲	۸۱
۰/۲۲۵	۱۷/۱۱	۴۵۸۰۰۰	۱۴/۳۲	۰/۸۹۹۱	۷۴
۰/۳	۱۸/۹	۲۴۱۰۰۰	۲۵/۸۷	۰/۹۴۱۱	۵۲

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

۳ ـ ۲ ـ میکروسکوپ الکترونی روبشی

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، سطح نمونه‌ی جلا داده شده در اثر غوطه وری در محیط بازی حاوی سدیم کلرید به شدت خورده شده‌است و در سطح فولاد حفره‌های ناشی از خوردگی غیر یکنواخت مشاهده می‌شود. همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، پیدایش این‌گونه حفرات ناشی از وجود وتجمع ناشی از یون کلر در برخی از مناطق مستعد به حفره‌زنی می‌باشد و پیدایش و رشد این حفرات با گذشت زمان از عمر مفید سازه خواهد کاست و سبب خسارات غیر قابل پیش‌بینی و جبران ناپذیری می‌گردد[۳]. با گذشت زمان و ایجاد حفره‌های جدید به همراه رشد حفره‌های موجود، از یکنواختی سطح خواهد کاست که تاثیر آن را می‌توان بر پارامتر n در آزمون طیف امپدانس الکتروشیمیایی مشاهده نمود. با توجه به مقادیر n گزارش شده در جدول‌های موجود در بخش ۳-۱، بیشترین مقادیر n در دو صورت به‌دست خواهد آمد، حالت اول آن است که پدیده خوردگی بر روی سطح فولاد رخ نداده باشد و حالت دوم هنگامی اتفاق می‌افتد که با افزودن بازدارنده خوردگی به مقادیر کافی، متناسب با نحوه عملکرد بازدارنده (ایجاد ترکیب کمپلکس با فلز در سطح، جذب سطحی و...) از خوردگی عمومی و موضعی جلوگیری شود و به تبع آن ناهمگونی سطحی کاهش خواهد یافت و میزان آن با افزایش غلظت بازدارنده بیشتر می‌شود. در شکل شماره ۴ نمونه شاهد مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل وجود حفرات ناشی از خوردگی در تصویر نمایان است که در اطراف این حفرات برجستگی‌هایی مشاهده می‌شود که نشان دهنده محصولات خوردگی از قبیل اکسیدها و هیدروکسیدها می‌باشد. در منابع ذکر شده است که تشکیل حفرات عمدتا در نواحی مستعد از لحاظ انرژی (انرژی بالاتر) رخ می‌دهد، از این رو بیشتر حفرات در فصل مشترک‌های بین فازی و مرزدانه‌ای تشکیل می‌شوند.

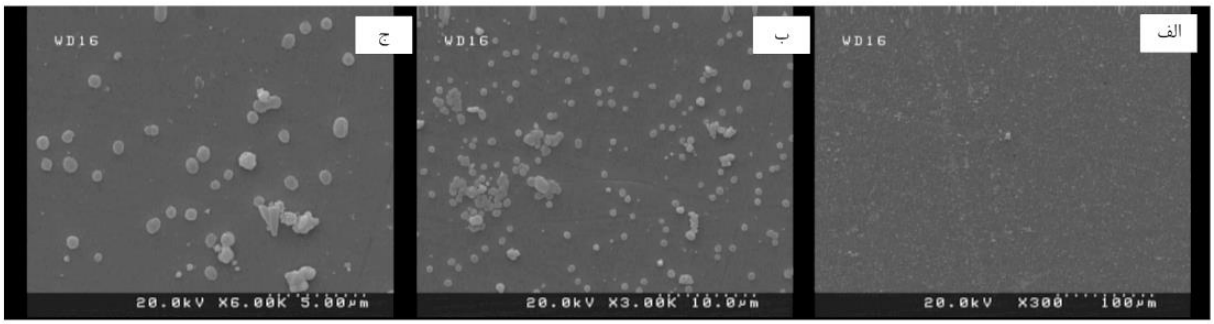


شکل ٤- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه‌ی به‌کار برده شده در محلول شبیه‌ساز دارای ۳/۵٪ وزنی نمک سدیم کلرید در دمای ۲۵℃ در بزرگنمایی‌های مختلف.

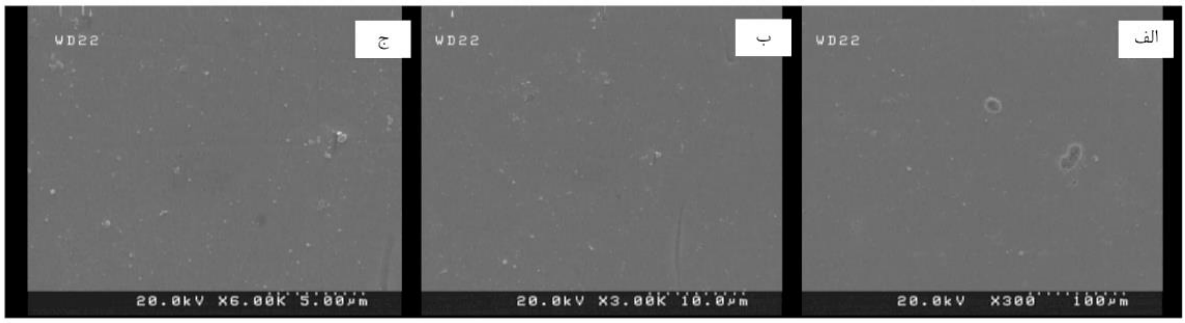
در شکل شماره ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده از بازدارنده معدنی نیتریتی نشان داده شده‌است. اصول عملکرد این نوع از بازدارنده‌ها به صورت تشکیل کمپلکس بر روی سطح فلز خواهد بود و به این ترتیب از خوردگی موضعی تا حد زیادی جلوگیری می‌شود[۹]. با مقایسه این تصاویر با تصاویر مربوط به نمونه شاهد مشاهده می‌شود که میزان حفرات ناشی از خوردگی موضعی کاهش شدیدی داشته است که نشان از تشکیل کمپلکس بر روی سطح فلز دارد. در شکل شماره ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده از بازدارنده معدنی فسفاتی نشان داده شده‌است. این بازدارنده همانند بازدارنده نیتریتی یک بازدارنده لایه ساز(ایجاد کمپلکس) است. همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شد، این بازدارنده

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

راندمان عملکردی پایین‌تری به نسبت نیتریتی‌ها دارد که با مشاهده تصاویر تعدادی از حفرات ناشی از خوردگی موضعی مشاهده می‌شود که تعداد و اندازه این حفرات به نسبت بازدارنده نیتریتی بیشتر می‌باشد. از سوی دیگر بازدارنده‌های پایه فسفاتی به دلیل واکنش با ترکیبات هیدروکسیدی موجود در بتن یک سری ترکیبات نامحلول با قابلیت بستن حفرات ایجاد می‌کنند و از عملکرد بازدارندگی این ترکیبات خواهد کاست [۸].



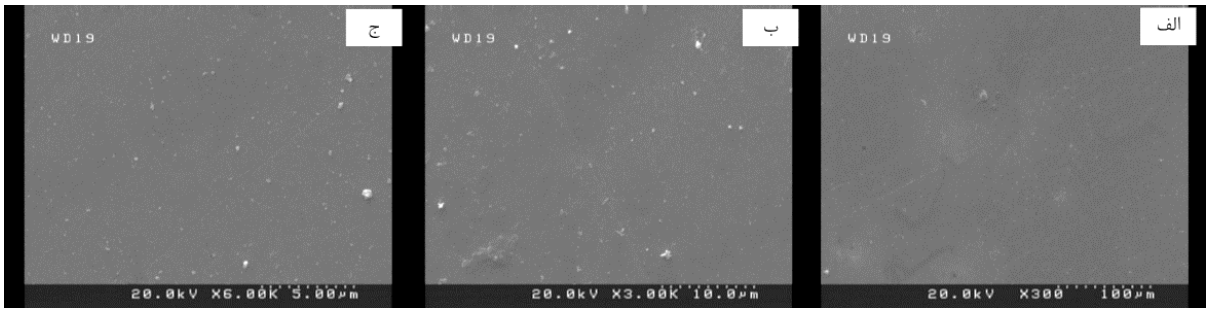
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه‌ی به‌کار برده شده در محلول شبیه‌ساز دارای ۳/۵٪ وزنی نمک سدیم کلرید در دمای ۲۵℃ حاوی غلظت ۰/٦ مولار از بازدارنده سدیم نیتریت در بزرگنمایی‌های مختلف.



شکل ٦- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه‌ی به‌کار برده شده در محلول شبیه‌ساز دارای ۳/۵٪ وزنی نمک سدیم کلرید در دمای ۲۵℃ حاوی غلظت ۰/۰۰۰۵ مولار از بازدارنده فسفاتی در بزرگنمایی‌های مختلف.

در شکل شماره ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده از بازدارنده معدنی مولیبداتی نشان داده شده‌است. همانطور که گفته شد مولیبدات‌ها بازدارنده‌هایی با مکانیزم آندی بوده که در حضور اکسیژن یا عامل اکسیدکننده، بر روی سطح فلز تشکیل فیلم می‌دهند[۱۱]. این بازدارنده نسبت به سایر بازدارنده‌های مورد بررسی عملکرد بهتری داشته و میزان و ابعاد حفرات ناشی از خوردگی حفره‌ای بر روی آن نسبت به سایر بازدارنده‌ها کمتر است. هم‌چنین سطح مشاهده شده از صافی و یکنواختی مناسبی برخوردار است.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه‌ی به‌کار برده شده در محلول شبیه‌ساز دارای ۳/۵٪ وزنی نمک سدیم کلرید در دمای ۲۵℃ حاوی غلظت ۰/۰۰۰۵ مولار از بازدارنده مولیبداتی در بزرگنمایی‌های مختلف.

نتیجه‌گیری

با بررسی مطالعات انجام شده در محلول شبیه‌ساز حفرات بتن، ترکیبات نیتریتی، فسفاتی و مولیبداتی به ترتیب در غلظت‌های ۰/۶، ۰/۰۰۰۵ و ۰/۳ مولار، منجر به دستیابی به بازده‌های ۸۹، ۷۵ و ۹۵ درصدی در محلول حاوی ۳/۵ ٪ وزنی NaCl شدند. همچنین غلظت ۱/۸٪ وزنی NaCl، بازدارنده‌های نیتریتی، فسفاتی و مولیبداتی به ترتیب در غلظت‌های۰/۲ ، ۰/۰۰۰۲ و ۰/۱۵ مولار، بالاترین بازده عملکردی را از خود نشان دادند. غلظت بالای بازدارنده نیتریتی و مولیبداتی، به دلیل ماهیت آندی آن است، چراکه کمتر شدن نسبت $[NO_2^-]/[Cl^-]$ از مقدار ۰/۴، منجر به پوشش نامناسب و غیریکنواخت در مکان‌های آندی می‌گردد و افزایش احتمال خوردگی حفره‌ای در این مناطق افزایش می‌گردد. از سوی دیگر بازدارنده فسفاتی می‌توانند در مقادیر بسیار کمتر از دو بازدارنده نیتریتی و مولیبداتی عملکرد حفاظتی مناسبی از خود نشان دهند و این ترکیبات در غلظت‌های کم توانایی ایجاد رسوبات غیر محلول در بتن را دارند که ایجاد این رسوبات عملکرد موثری در مقابله با نفوذ یون‌های کلرید ایفا می‌کنند. از طرفی بازدارنده‌های مولیبداتی راندمان عملکردی بالایی در غلظت بالا و پایین کلراید از خود نشان داد. همچنین در بررسی‌های میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص گردید که استفاده از این سه بازدارنده تعداد و فاصله حفرات سطحی را تا حد بسیار زیادی نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش می‌دهد که بیانگر تعویق شروع خوردگی حفره‌ای نسبت به نمونه شاهد است.

مراجع

[1] Zhang, Fan, et al. "Investigation and application of mussel adhesive protein nanocomposite film-forming inhibitor for reinforced concrete engineering." Corrosion Science 153 (۲۰۱۹): ۳۳۳-۳۴۰.

[2] Toujas, S., M. Vázquez, and María Beatriz Valcarce. "Unexpected effect of citrate ions on the corrosion process of carbon steel in alkaline solutions." Corrosion Science 1۲۸ (۲۰۱۷): ۹۴-۹۹.

[3] Ogunsanya, I. G., and C. M. Hansson. "Influence of chloride and sulphate anions on the electronic and electrochemical properties of passive films formed on steel reinforcing bars." Materialia ۸ (۲۰۱۹): ۱۰۰۴۹۱.

[4] Cao, Chong, Moe MS Cheung, and Ben YB Chan. "Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate." Corrosion Science 69 (2013): ۹۷-۱۰۹.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]

[5] Yan, Lei, Guang-Ling Song, and Dajiang Zheng. "Magnesium alloy anode as a smart corrosivity detector and intelligent sacrificial anode protector for reinforced concrete." Corrosion Science 155 (2019): 13-2۸.

[6] Finšgar, Matjaž, and Jennifer Jackson. "Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: a review." Corrosion science 86 (2014): 17-41.

[7] Zhao, Yazhou, et al. "Corrosion inhibition efficiency of triethanolammonium dodecylbenzene sulfonate on Q235 carbon steel in simulated concrete pore solution." Corrosion Science 1۵۸ (۲۰۱۹): ۱۰۸۰۹۷.

[8] Das, Jyoitsh Kumar, and Bulu Pradhan. "Effect of cation type of chloride salts on corrosion behaviour of steel in concrete powder electrolyte solution in the presence of corrosion inhibitors." Construction and Building Materials 2۰۸ (۲۰۱۹): ۱۷۵–۱۹۱.

[9] Okeniyi, Joshua Olusegun, et al. "Effect of NaNO2 and C6H15NO3 synergistic admixtures on steel-rebar corrosion in concrete immersed in aggressive environments." Advances in Materials Science and Engineering 2015 (2015).

[10] Mohagheghi, Amir, and Reza Arefinia. "Corrosion inhibition of carbon steel by dipotassium hydrogen phosphate in alkaline solutions with low chloride contamination." Construction and Building Materials 187 (2018): 760-۷۷۲.

[11] Sagoe-Crentsil, K. K., V. T. Yilmaz, and F. P. Glasser. "Properties of inorganic corrosion inhibition admixtures in steel-containing OPC mortars Part 1: Chemical properties." Advances in cement Research 4.15 (1992): 91-۹۶.

[12] Sastri, V. S., and J. Bednar. "Corrosion inhibition in coal-water slurries." Materials Performance 29.5 (1990): 44-4۶.

[13] Skale, Saša, Valter Doleček, and Mojca Slemnik. "Substitution of the constant phase element by Warburg impedance for protective coatings." Corrosion Science 4۹.۳ (۲۰۰۷): ۱۰۴۵–۱۰۵۵.

[14] Elshami, Ahmed A., et al. "Novel anticorrosive zinc phosphate coating for corrosion prevention of reinforced concrete." European Journal of Environmental and Civil Engineering 2۱.۵ (2017): 572-593.

[15] El Din, AM Shams, and Liufu Wang. "Mechanism of corrosion inhibition by sodium molybdate." Desalination 107.1 (1996): 29-4۳.

[16] Zhou, Yun, Yu Zuo, and Bing Lin. "The compounded inhibition of sodium molybdate and benzotriazole on pitting corrosion of Q235 steel in NaCl+ NaHCO3 solution." Materials Chemistry and Physics 192 (2017): 86-۹۳.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-11-13]