

Research Paper; 

Synthesis and evaluation the microstructure and electrochemical properties of rGO-ZIF-8 hybrid nanocoating created on aerospace steel

Seyed Ali Hosseini Moradi¹, Gholamreza Faghani²

1.Basic Science Center, Department of physics, Khatam-Ol-Anbia (PBU) University, Tehran, Iran.

2.Faculty of Mechanical Engineering, Khatam-Ol-Anbia (PBU) University, Tehran, Iran

Article Information

Abstract

Accepted:
2024/08/17

Received:
2024/12/11

Keywords:

*Electrochemical,
Impedance
measurement,
Reduced graphene
oxide, Microstructure,
Polarization*

Abstract

Pitting corrosion is one of the most destructive forms of localized corrosion in aerospace passive alloys such as steel and aluminum, and the presence of chloride ions accelerates the initiation and growth of this phenomenon.. The aim of this study is to synthesize a hybrid nanocomposite of reduced graphene oxide and a stable metal–organic framework with an eight-membered structure and to evaluate its performance in inhibiting pitting corrosion of steel through barrier and active inhibition mechanisms. The hybrid nanocomposite of reduced graphene oxide and the stable metal–organic framework with an eight-membered structure was synthesized via in situ growth on reduced graphene oxide sheets and characterized by Raman spectroscopy, X-ray diffraction, and field emission scanning electron microscopy. The corrosion resistance performance of reduced graphene oxide, the metal–organic framework, and the hybrid nanocomposite was evaluated in 3.5wt.% saline solution using electrochemical impedance spectroscopy and polarization measurements. Microstructural results indicated that the metal–organic framework nanoparticles with uniform polyhedral morphology grew on the reduced graphene oxide surface, forming a stable hybrid structure. Impedance tests showed that the hybrid nanocomposite provided the highest total resistance, reaching 4038 ohm.cm² after 35 hours of immersion. Moreover, polarization measurements demonstrated a significant reduction in corrosion current density and an increase in protection efficiency up to 83%. The superior performance of this system was attributed to the synergistic effect of the physical barrier of reduced graphene oxide and the controlled release of zinc ions and 2-methylimidazole from the metal–organic framework, simultaneously inhibiting anodic and cathodic reactions.

**Corresponding
Author:**
**Gholamreza
Faghani Email:**
*Corresponding
Author:
gfaghani@yahoo.com*

Seyed Ali Hosseini Moradi, Gholamreza Faghani.(2025). Synthesis and evaluation the microstructure and electrochemical properties of rGO-ZIF-8 hybrid nanocoating created on aerospace steel. *Journal of Aerospace Defense*, Vol 4 (Issue 3), Pages120-102.



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی


دوره ۴، شماره ۳

پاییز

صص ۱۰۲-۱۲۰

موسسه خوارزمی

مجلات

مقاله پژوهشی؛ 

سنتر و بررسی خواص میکروساختاری و الکتروشیمیایی نانوپوشش هیبریدی rGO-ZIF-8 ایجاد شده بر روی فولاد هوافضایی

سیدعلی حسینی مرادی^۱، غلامرضا فغانی^۲

۱. استادیار، گروه آموزشی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ع)، تهران، ایران. رایانامه: physiclplasma2011i@gmail.com

۲. استادیار، گروه آموزشی فیزیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ع)، تهران، ایران. رایانامه: gfaghani@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

خوردگی حفره‌ای یکی از مخرب‌ترین انواع خوردگی موضعی در آلیاژهای غیرفعال هوافضایی مانند فولاد و آلومینیوم است. این پدیده در مجاورت هوای مرطوب در حضور یون⁻های کلرید تشدید می‌شود. در این پژوهش، با ساخت نانو کامپوزیت هیبریدی چارچوب آلی - فلزی بر پایه گرافن کاهش یافته، کارایی آن در مهار خوردگی حفره‌ای فولاد در صنایع هوافضا، به شیوه‌ی ایجاد سازوکارهای سدکنندگی و بازدارندگی فعال مورد بررسی قرار گرفت. نانو کامپوزیت هیبریدی چارچوب آلی - فلزی بر پایه گرافن کاهش یافته، با ساختار هشت‌ضلعی پایدار، از طریق رشد درجا بر صفحات گرافن کاهش یافته، سنتر شد. جهت بررسی ساختاری نانو کامپوزیت سنتر شده، از آنالیزهای طیف‌سنجی رامان، پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. رفتار مقاومتی آن در برابر خوردگی در محلول نمکی ۳/۵ درصد وزنی با استفاده از آزمون‌های الکتروشیمیایی امپدانس و اندازه‌گیری پلاریزاسیون بررسی گردید. نتایج ریزساختاری نشان داد نانوذرات چارچوب آلی-فلزی با مورفولوژی چندوجهی یکنواخت بر سطح گرافن کاهش یافته رشد کرده و ساختار هیبریدی پایدار ایجاد می‌کند. نمونه‌ی چارچوب آلی - فلزی بر پایه گرافن بیشترین مقاومت کل (۴۰۳۸ اهم.سانتیمتر مربع) را بعد از ۳۵ ساعت غوطه‌وری نشان داد. نتایج اندازه‌گیری پلاریزاسیون، کاهش چشمگیر چگالی جریان خوردگی و افزایش بازده حفاظت تا ۸۳ درصد را نشان داد. عملکرد برتر این سامانه به اثر هم‌افزای سید فیزیکی گرافن کاهش یافته و رهایش کنترل شده یون‌های روی و ۲-متیل‌ایمیدازول در چارچوب آلی - فلزی، نسبت داده شد که موجب مهار هم‌زمان واکنش‌های آندی و کاتدی شده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۹/۲۱

کلیدواژه‌ها:

الکتروشیمیایی، آزمون

امپدانس، اکسیدگرافن

کاهش یافته،

میکروساختار،

پلاریزاسیون.

نویسنده مسئول:

غلامرضا فغانی

ایمیل:

mpourjafargholi@gmail.com

استناد: سیدعلی حسینی مرادی، غلامرضا فغانی (۱۴۰۴). سنتر و بررسی خواص میکروساختاری و الکتروشیمیایی نانوپوشش

هیبریدی rGO-ZIF-8 ایجاد شده بر روی فولاد هوافضایی. *دفاع هوافضایی*. دوره ۴ (شماره ۳)، صفحات ۱۲۰-۱۰۲.

۱- مقدمه

خوردگی حفره‌ای از مخرب‌ترین اشکال خوردگی موضعی در آلیاژهای غیرفعال نظیر فولاد زنگ‌نزن و آلومینیوم به شمار می‌رود، به‌ویژه زمانی که این مواد در معرض محیط‌های حاوی یون کلرید قرار می‌گیرند. این فرآیند با تخریب موضعی لایه اکسیدی محافظ آغاز شده و به‌سرعت به نواحی عمقی‌تر نفوذ می‌کند. ماهیت خودتشدیدشونده این نوع خوردگی موجب می‌شود حفره‌ها با سرعت بالا گسترش یافته و بدون هشدار قبلی منجر به ایجاد سوراخ‌شدگی‌های ناگهانی شوند. از آن‌جا که تشخیص، پیش‌بینی و ترمیم این آسیب‌ها دشوار است، توسعه سامانه‌های حفاظتی پیشرفته و کارآمد برای جلوگیری از آغاز و پیشروی خوردگی حفره‌ای ضرورت ویژه‌ای دارد. (۱،۲).

در سالیان اخیر، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی در محلول‌های نمکی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. اما بازدارنده‌ها به صورت کنترل نشده در محیط خورنده آزاد می‌شوند و همچنین استفاده از آن‌ها محدود می‌باشد (۳-۵)

برای رفع این محدودیت‌ها، پژوهش‌ها به سمت توسعه نانوصفحات پیش‌رفته است. این نانوذرات علاوه بر بستر مناسبی را جهت آزادسازی بازدارنده‌های خوردگی و ترکیبات کامپوزیتی ایجاد می‌کنند. در میان آن‌ها، ساختارهای دوبعدی مانند گرافن و به‌ویژه اکسیدگرافن کاهش‌یافته (rGO) در کاربردهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۶-۱۰). با این حال، این مواد به تنهایی اثر حفاظتی از خود نشان نمی‌دهند و باید با ترکیبات پیشرفته کامپوزیتی ترکیب شوند (۱۱).

چارچوب‌های فلز-آلی به‌ویژه ZIF-8 با سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد و قابلیت آزادسازی یون روی در پاسخ به تغییر pH، عملکردی هوشمند در محلول نمکی ایجاد می‌کنند. این مواد به دلیل وجود یون‌های روی در ساختار خود به عنوان یک بازدارنده ی بالقوه نیز محسوب می‌شوند. (۱۲-۱۴).

ترکیب rGO و ZIF-8 در یک سامانه هیبریدی امکان بهره‌گیری از اثرات هم‌افزایی را فراهم می‌کند؛ rGO به‌عنوان عامل کنترل‌شونده، به عنوان بستری مناسب برای رشد ZIF-8 محسوب می‌شوند. به‌عنوان منبع آزادسازی بازدارنده، حفاظت فعال و پایدار در برابر خوردگی حفره‌ای ایجاد می‌کند (۱۵). چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) دسته‌ای از مواد متخلخل بلورین هستند که از اتصال مراکز فلزی با پیوندهای آلی تشکیل شده‌اند. در میان آن‌ها، ZIF-8 (چارچوب ایمیدازولات زئولیتی) به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، سطح ویژه گسترده و ساختار متخلخل سه‌بعدی، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این ترکیب از یون‌های روی (Zn^{2+}) و پیوندهای ۲-متیل‌ایمیدازول تشکیل شده است.

که ساختاری مشابه زئولیت سودالیت ایجاد می‌کنند. قابلیت منحصر به فرد ZIF-8 در ذخیره‌سازی مولکولی و آزادسازی هوشمند در پاسخ به محرک‌هایی نظیر تغییرات pH، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل در مهندسی خوردگی تبدیل کرده است، به طوری که در حضور عوامل خورنده، ساختار آن دچار تجزیه کنترل شده و با آزاد کردن یون‌های فعال (Zn^{2+})، لایه‌ای محافظ روی سطح فلز ایجاد می‌کند. نوآوری این پژوهش بر توسعه سامانه محافظتی rGO-ZIF-8 در محلول نمکی متمرکز است که به طور اختصاصی برای حفاظت در برابر خوردگی حفره‌ای طراحی شده که به صورت کنترل شده می‌تواند در محلول نمکی آزاد شده و حفاظت خوردگی مطلوبی ارائه دهد. ساختار نانوکامپوزیت سنتز شده، با طیف‌سنجی رامان، پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی آنالیز شد. سپس رفتار مقاومتی آن در برابر خوردگی در محلول نمکی، توسط آزمون‌های الکتروشیمیایی امپدانس و اندازه‌گیری پلاریزاسیون بررسی گردید.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد اولیه:

برای سنتز نانوساختار rGO-ZIF-8 و تهیه پوشش اپوکسی ضد خوردگی، تمامی مواد اولیه با با درجه تجزیه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند که از شرکت‌های مرک و سیگما آلدریج تأمین شده بودند. به منظور شبیه‌سازی محیط خورنده، محلول کلرید سدیم با غلظت ۳.۵ درصد غلظت ۳/۵ درصد وزنی تهیه شد.

۲-۲- سنتز نانوکامپوزیت rGO-ZIF-8

ابتدا ZIF-8 بر اساس روش گزارش شده سنتز شد (۱۶)؛ به این منظور محلول $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ و ۲-متیل‌ایمیدازول در آب دوبار تقطیر تهیه و پس از ۲۴ ساعت هم‌زدن، رسوب حاصل سانتریفیوژ، شسته و در خلا خشک گردید. اکسیدگرافن با روش هامر اصلاح شده از گرافیت سنتز و سپس به کمک هیدرازین مونوهیدرات در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد احیا شد تا rGO به دست آید (۱۷). برای تهیه نانوکامپوزیت rGO-ZIF-8، ابتدا rGO در محلول متانولی $Zn(NO_3)_2$ پراکنده و اولتراسونیک شد، سپس محلول ۲-متیل‌ایمیدازول افزوده و مخلوط تحت هم‌زدن ادامه یافت. رسوب نهایی سانتریفیوژ، چند بار با متانول شسته و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در خلأ خشک گردید.

۲-۳- روش‌های شناسایی و آزمون‌های الکتروشیمیایی

۲-۳-۱- طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)

برای شناسایی و بررسی نانوذرات سنتز شده، از روش‌های زیر استفاده شد: پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Philips در محدوده زاویه‌ای ۵ تا ۸۰ درجه و با منبع تابش

Cu-K α بررسی گردید.

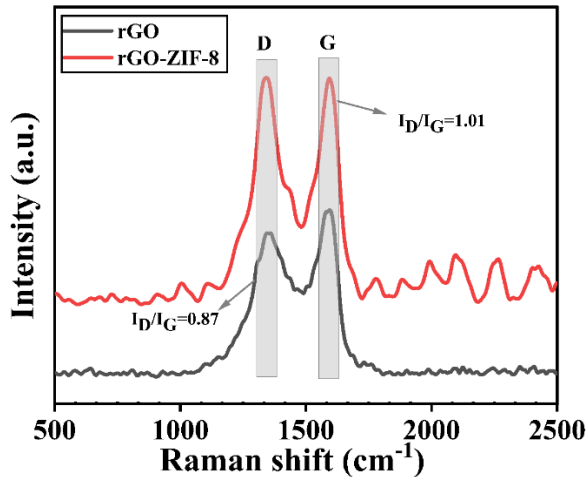
رامان (**Confocal Teksan**)، در طول موج ۵۳۲ نانومتر جهت بررسی ارتعاشات ساختاری انجام گرفت.

برای بررسی مورفولوژی نانوذرات، از میکروسکوپ الکترونی روبشی با گسیل میدانی **FE-SEM** مدل **MIRA3 TESCAN** استفاده شد.

برای ارزیابی عملکرد ضد خوردگی در فاز محلول، از آزمون **EIS** و پلاریزاسیون استفاده شد. آزمون‌ها در سلول سه‌الکتروود شامل پلاتین (الکتروود کمکی)، کالومل اشباع (الکتروود مرجع) و فولاد آلیاژی (کار) انجام گردید. سطح فعال $1 \times 1 \text{ cm}^2$ نمونه فلزی در معرض محلول ۳.۵ درصد وزنی **NaCl** قرار گرفت. برای هر تست، **ppm 1000** از نانوذره به محلول اضافه شد و نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری مورد بررسی قرار گرفت. محلول بدون بازدارنده به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شد.

۲-۳-۲ طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy)

اسپکتروسکوپی رامان برای بررسی تغییرات ساختاری **rGO** و **rGO-ZIF-8** به‌کار رفت (شکل ۱). در هر دو نمونه، قله‌های شاخص **D** ($\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$) و **G** ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$) مشاهده شدند که به ترتیب بیانگر ارتعاشات ناشی از نواقص و ارتعاشات کششی **C=C** هستند. نسبت شدت قله‌ها (**ID/IG**) در **rGO** برابر $0/87$ بوده که نشان‌دهنده میزان نسبتاً پایین عیوب ساختاری است. این نسبت در **rGO-ZIF-8** به $1/01$ افزایش یافت که حاکی از افزایش نواقص پس از ترکیب با **ZIF-8** است. این تغییر به تعامل شیمیایی یا فیزیکی بین صفحات **rGO** و نانوذرات **ZIF-8** نسبت داده می‌شود که موجب ایجاد تنش شبکه‌ای و افزایش مراکز پراکندگی بی‌نظم شده است. در مجموع، این تغییرات ساختاری می‌توانند اثرات مثبتی بر خواص سطحی و عملکرد نانوکامپوزیت داشته باشند (۱۸، ۱۹). در طیف رامان، حضور نوار **D** در حدود 1350 cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاشات ناشی از نواقص ساختاری و بی‌نظمی در شبکه کربنی است، در حالی که نوار **G** در حدود 1580 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای **C=C** در ساختار آروماتیک (گرافنی) می‌باشد. افزایش نسبت شدت این دو نوار (**ID/IG**) در نمونه‌های هیبریدی، نشان‌دهنده برهم‌کنش قوی بین ساختار گرافنی و **ZIF-8** است که منجر به افزایش نقایص ساختاری و تغییر در نظم پیوندهای **C=C** گردیده است.



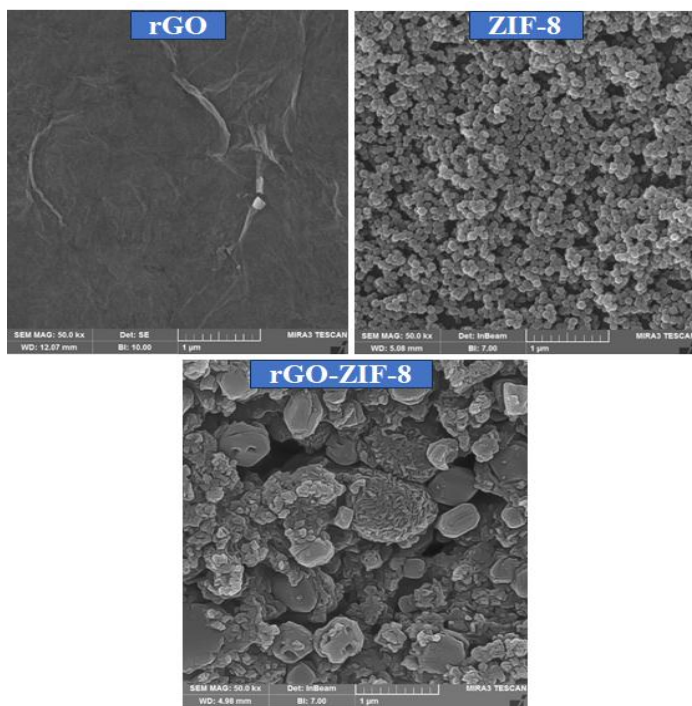
شکل ۱- تصاویر Raman نمونه‌های rGO و rGO-ZIF8

۲-۳-۳ میکروسکوپ الکترونی کسپیل میدانی (FE-SEM)

تصاویر FE-SEM مربوط به rGO، ZIF-8 و نانو ساختار ترکیبی rGO-ZIF-8 در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. در نمونه rGO، صفحات گرافنی با سطحی نسبتاً صاف و ساختار ورقه‌ای مشاهده می‌شود که معرف لایه‌های کاهش یافته اکسید گرافن است. در مقابل، ذرات ZIF-8 مورفولوژی بلوری یکنواخت با شکل لوزی-دودکانه‌ای مشخص از خود نشان دادند که ویژگی معمول این نوع چارچوب‌های فلزی-آلی است.

در نمونه هیبریدی rGO-ZIF-8، تصاویر FE-SEM حاکی از آن است که نانوذرات ZIF-8 به‌طور یکنواخت بر سطح صفحات rGO رشد یافته و ساختارهای چندوجهی منظم، عمدتاً شش‌ضلعی، تشکیل داده‌اند. این رفتار نشان‌دهنده برهم‌کنش مؤثر میان صفحات رسانای rGO و واحدهای نوکلئیشن ZIF-8 طی فرایند رشد بوده و نقش بستر گرافنی را در جهت‌دهی و توزیع یکنواخت نانوذرات تأیید می‌کند. این نتایج با گزارش‌های پیشین در مورد تشکیل ساختارهای هیبریدی ZIF-8 بر روی مواد دوبعدی کربنی هم‌خوانی کامل

دارد (۲۰،۲۱)



شکل ۳- تصاویر FE-SEM نمونه‌های rGO، ZIF-8 و rGO-ZIF-8

۲-۳-۴ طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)

به منظور بررسی رهایش نانوذرات در محیط حاوی NaCl و نقش آنها در مهار خوردگی حفره‌ای، آزمون EIS انجام شد و نمودارهای Nyquist (شکل ۴) و مدار معادل الکتریکی (شکل ۵) ارائه گردید. در نمونه بلنک، برازش داده‌ها با یک مدار تک‌ثابته انجام شد که ناشی از حضور محصولات خوردگی متخلخل بر سطح فلز بود، در حالی که در نمونه‌های حاوی rGO، ZIF-8 و rGO-ZIF-8 به دلیل تشکیل فیلم‌های یکنواخت محافظ، مدار دوثابته مورد استفاده قرار گرفت. مقاومت کل (R_t) با جمع R_s ، R_f و R_{ct} محاسبه و در جدول ۱ مقایسه شد. پس از ۳۵ ساعت غوطه‌وری، نمونه بلنک کمترین R_t را نشان داد که بیانگر وقوع واکنش‌های خوردگی آندی و کاتدی و تخریب سطح فلز است. در مقابل، مقادیر R_t برای نمونه‌های ZIF-8 و rGO-ZIF-8 به ترتیب $24.02/65 \Omega \cdot \text{cm}^2$ و $40.38/0.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ بود که به تشکیل فیلم‌های پایدار و بازدارنده بر سطح فلز نسبت داده شد. این پایداری ناشی از

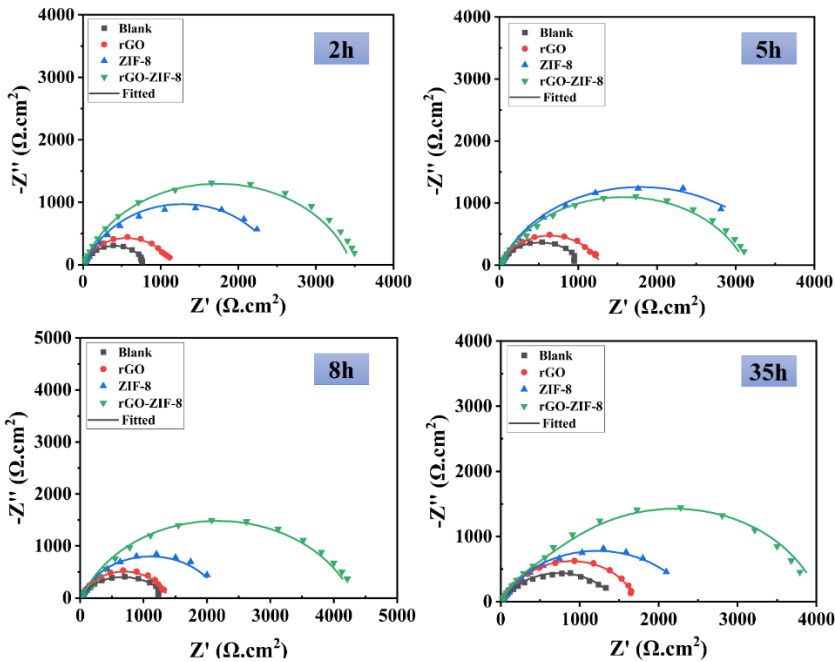
تجزیه ZIF-8 در اثر تغییرات pH و آزادسازی یون‌های Zn^{2+} و مولکول‌های ۲- متیل‌ایمیدازول است که به ترتیب با یون‌های هیدروکسید و یون‌های Fe واکنش داده و ترکیبات محافظی مانند $Zn(OH)_2$ ایجاد می‌کنند.

به منظور ارزیابی کمی بازدارندگی، راندمان حفاظتی (η) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. که در آن $R_{t \text{ inhibited}}$ مربوط به مقاومت کل نمونه‌های حاوی rGO، ZIF-8 و rGO-ZIF-8 است. نتایج نشان داد که پس از ۲۴ ساعت، ZIF-8 و rGO-ZIF-8 به ترتیب بازدهی حفاظتی ۴۰/۲۳٪ و ۶۴/۴۳٪ داشتند. این امر بیانگر نقش هم‌افزای رهاش یون روی و ۲- متیل‌ایمیدازول در محافظت فعال و همچنین تشکیل فیلم یکنواخت و پایدارتر در حضور ساختار هیبریدی rGO-ZIF-8 است. علاوه بر این، افزایش پارامتر n_{dl} در نمونه rGO-ZIF-8 نسبت به سایر نمونه‌ها، گواهی بر یکنواختی بیشتر فیلم محافظ در سطح فلز می‌باشد (۲۲).

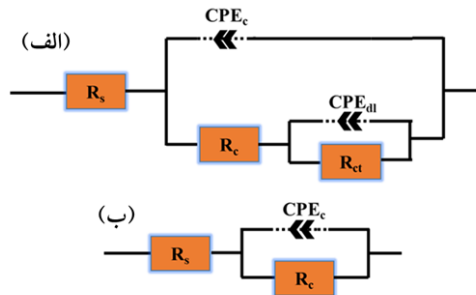
$$\eta = \frac{R_{t \text{ inhibited}} - R_{t \text{ Blank}}}{R_{t \text{ inhibited}}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

جدول ۱- داده‌های اندازه‌گیری امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های فولادی غوطه‌ور در محلول‌های نمکی مختلف طی زمان

نمونه	زمان	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_t ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_t Y_0 ($\mu\Omega^{-1}$)	n_f	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{dl} Y_0 ($\mu\Omega^{-1}$)	n_{dl}	R_t ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	η_{EIS} (%)
Blank	۲	۱۳/۵۳	-	-	-	۵۴/	۵۴/	۰/۸۰	۰/۰۷	-
rGO	۲	۱۰/۳۶	۵۸/	۶۵/	۰/۶۹	۲۹/	۲۲/	۰/۷۸	۲۳/	۱۴/۸۶
ZIF-8	۲	۱۱/۱۱	۲۳۶/۶	۹۰/۶۱	۰/۹۰	۲۱۹/۸۷	۱۱۴/۶۵	۰/۷۷	۱۴/	۵۹/۶۰
rG	۲	۵۶/	۵۶/	۶۵/	۰/۷۵	۶/	۵۱/	۰/۷۵	۵۵/	۲۸/



شکل ۴- نمودار نایکوئیست برای نمونه‌های محافظت شده و محافظت نشده غوطه ور در محلول نمکی.



شکل ۵- مدار معادل الکتریکی (الف) دو ثابت، (ب) یک ثابت

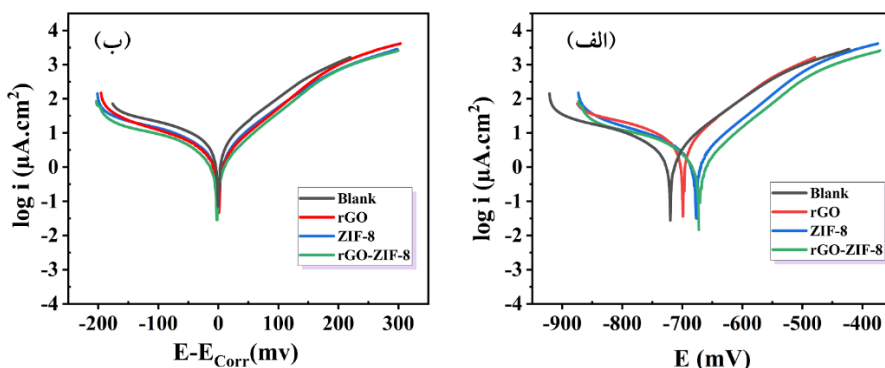
۲-۳-۵ آزمون پلاریزاسیون تافل (Tafel Polarization)

آزمون پلاریزاسیون یکی از بهترین تست‌ها برای سنجش سرعت و میزان خوردگی فلزات است. این آزمون برای نمونه‌های شاهد، rGO، ZIF-8 و rGO-ZIF-8 که به مدت ۳۵ ساعت در NaCl غوطه ور بودند انجام شد و نتایج در شکل ۶ آورده شده است. همچنین در شکل ۶ (ب)، تمامی نمودارها به $E_{corr}=0$ انتقال یافتند تا مقایسه ی دقیق تری از مکانیسم خوردگی به عمل آید.

به‌علاوه، دیتاهای به‌دست‌آمده از نمودار تافل در جدول ۲ جمع‌آوری شده‌اند. همان‌طور که از نتایج یافت می‌شود، E_{corr} در نمونه‌ی شاهد در مقایسه با دیگر نمونه‌ها به سمت پتانسیل منفی‌تر انتقال یافته است اما این انتقال کمتر از ۸۵ mV بوده است که بیانگر مکانیسم حفاظت از نوع مخلوط می‌باشد. همچنین، با بررسی i_{corr} میان نمونه‌ها می‌توان به نرخ کمتر میزان خوردگی در نمونه‌ی rGO-ZIF-8 نسبت به سایر نمونه‌ها دست یافت. جهت مقایسه بهتر بازده‌ی حفاظت نمونه‌ها با فرمول ۲ محاسبه شد که در آن i_{corr} چگالی جریان خوردگی نمونه‌ی شاهد و i_{corr}^* چگالی جریان خوردگی دیگر نمونه‌ها است:

$$\eta = 100 \times \left(1 - \frac{i_{corr}^*}{i_{corr}}\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، بازده‌ی خوردگی در نمونه‌های rGO-ZIF-8 و rGO به ترتیب برابر ۲۱، ۶۹ و ۸۳ است. این نتایج نشان می‌دهد که بازدارنده زینک به همراه مولکول‌های ۲ متیل ایمیدازول و اکسید گرافن به خوبی توانسته‌اند نرخ خوردگی در هر دو نواحی کاتدی و آندی سطح فلز را کنترل و کاهش دهند.



شکل ۶- (الف) نمودار تافل و (ب) منحنی‌های قطبش انتقال یافته به پتانسیل صفر برای نمونه‌های محافظت شده و محافظت نشده غوطه‌ور در محلول نمکی.

جدول ۲- داده‌های برون‌یابی شده از منحنی‌های تافل

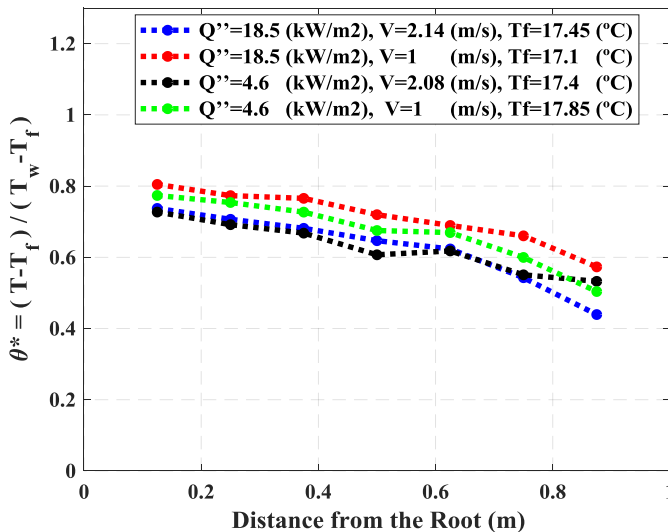
نمونه	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	η (%)
Blank	-۷۲۰/۸۵	۷/۰۲	۱۲۶/۶	۵۷/۸	-
rGO	-۶۹۷/۴۱	۵/۵۵	۸۲	۲۲۱	٪۲۱
ZIF-8	-۶۷۸/۵۲	۲/۲۰	۱۳۰/۹۱	۶۹/۷	٪۶۹

۳-۵- توزیع دمای بدون بعد

برای بررسی کارایی پره، علاوه بر تحلیل و مقایسه نمودار توزیع دما، در نظر گرفتن تأثیرات دمای ریشه پره و مشخصات جریان خنک کننده نیز ضروری است. بنابراین، برای ارزیابی دقیق تر کارایی پره، باید مقادیر دمای ریشه و دمای سیال خنک کننده همراه با دمای سطح پره مورد توجه قرار گیرند. در این مطالعه، یک پارامتر بدون بعد دما طبق معادله ۷ معرفی شده است.

$$\theta = \frac{T_s - T_f}{T_w - T_f} \quad (7)$$

شکل ۷ توزیع دمای بدون بعد در امتداد طول پره‌های مستطیلی و سهمی را بر حسب طول بدون بعد نمایش می‌دهد.



شکل ۷: توزیع دمای بدون بعد در امتداد پره سهمی در شرایط مختلف

شایان ذکر است که دمای سطحی مورد استفاده در معادله ۷ و شکل ۷، میانگین دمای سطحی لبه‌های بالا، پایین، و سطوح جانبی پره‌ها است. مطابق شکل ۷، با بررسی رفتار منحنی‌ها، مشاهده می‌شود که میزان افقی بودن نمودارها یا نزدیکی آنها به خط واحد به ترتیب از نمودارهای با رنگ سبز روشن، سبز تیره، قرمز، و آبی کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان، به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت و نزدیک شدن دمای سطح و سیال در نقاط انتهایی پره، گرادیان دمای بدون بعد افزایش یافته و نمودار از

خط افقی فاصله می‌گیرد. همچنین، با افزایش شار حرارتی، دمای ریشه و سطح پره هر دو افزایش یافته و در نتیجه، با ثابت ماندن سرعت و دمای سیال، نسبت کاهش کمتری بین دمای نوک پره و ریشه ایجاد می‌شود، که نمودار را به خط افق نزدیک‌تر می‌کند. بنابراین، افزایش سرعت جریان و شار حرارتی، به ترتیب باعث افزایش و کاهش فاصله نمودار از خط افقی شده و نشان‌دهنده رابطه‌ی معکوس سرعت جریان و رابطه مستقیم شار حرارتی با کارایی پره است.

۳-۶- کارایی پره

برخلاف پره ایده‌آل که دمای یکنواختی در طول پره دارد، توزیع دما در یک پره حقیقی با حرکت در طول پره کاهش می‌یابد. بنابراین، برای یک پره ایده‌آل، دمای تمام نقاط سطح با دمای ریشه پره برابر است. با توجه به این تفاوت در توزیع دما بین پره حقیقی و ایده‌آل، نسبتی بین انتقال حرارت پره حقیقی و پره ایده‌آل تعریف می‌شود که به عنوان "بازده پره" شناخته شده و با استفاده از معادله ۸ قابل محاسبه است.

$$\eta = \frac{Q_{real}}{Q_{ideal}} = \frac{h_{ave.} (T_{surf,ave.} - T_f)}{h_{ave.} (T_{wall} - T_f)} \quad (8)$$

در بخش ۵-۳، میزان کارایی پره به صورت تقریبی با استفاده از رفتار نمودار انتقال حرارت بدون بعد بررسی شد. علاوه بر این، برای ارزیابی و محاسبه دقیق کارایی پره، از معادله (۸) استفاده می‌شود. جدول ۳ کارایی پره‌های مستطیلی و سهموی را تحت شرایط فیزیکی مختلف نمایش می‌دهد.

جدول ۳: کارایی پره‌ی سهموی در شرایط مختلف

η	θ (degree)	$h_{ave.}$ (W/m ²)	V (m/s)	$Q_{0''}$ (W/m ²)
۰/۶۴	۹۰	۱۸۴۵	۲/۱۸	۱۸۴۹۱
۰/۶۸۸	۹۰	۱۱۱۴	۱	۱۸۳۸۲
۰/۶۶۱۴	۹۰	۱۲۷۲	۱	۴۵۹۵
۰/۵۲۵۳	۹۰	۲۲۶۵	۲/۲۱	۴۵۹۵
۰/۶۱۴۱	۴۵	۲۱۵۵	۱/۸۵	۱۸۳۸۲
۰/۷۵۴۸	۴۵	۱۲۹۲	۱	۱۸۳۸۲
۰/۷۴۹۸	۴۵	۱۵۸۲	۱	۴۵۹۵
۰/۶۲۰۹	۴۵	۲۲۰۸	۱/۹۵	۴۵۹۵
۰/۶۱۳۴	۰	۲۳۳۰	۲/۴۱	۱۸۳۸۲
۰/۷۱۷۰	۰	۲۲۰۹	۱	۱۸۳۸۲
۰/۵۳۸۸	۰	۳۲۱۴	۲/۳۸	۴۵۹۵
۰/۶۶۱۸	۰	۱۹۵۱	۱	۴۵۹۵

با بررسی نتایج جدول ۳، مشاهده می‌شود که تغییرات زاویه بین جریان سیال و امتداد پره

تأثیر چشمگیری بر کارایی پره ندارد. به عبارت دیگر، تغییرات کارایی پره نسبت به زاویه آن، به اندازه‌ای نیست که تغییرات قابل توجهی در کارایی کلی سیستم ایجاد کند. [۲۸] این امر نشان‌دهنده پایداری نسبی عملکرد پره‌ها در برابر تغییرات زاویه‌ای جریان است.

۳-۷- افت فشار

افت فشار یا مقاومتی که پره در برابر جریان سیال ایجاد می‌کند، پارامتری کلیدی در طراحی و ساخت سیستم‌های خنک‌کننده‌ای است که از طریق سطح گسترده، گرمای اضافی را دفع می‌کنند. طبق معادله ۹ [۳۲]، افت فشار اصطکاکی به شدت وابسته به سرعت جریان، ضریب اصطکاک مجرا، و کیفیت سطح پره است.

$$dP_{fric} \propto f \frac{L}{d} \rho V^2 \quad (9)$$

هم‌چنین، افت فشار ناشی از گرانش در سیال طبق رابطه (۱۰) ارائه شده است [۳۲].

$$dP_g \propto \rho g H \quad (10)$$

افت فشار ناشی از کاهش تکانه جریان سیال نیز با استفاده از رابطه ۱۱ [۳۲] تعیین می‌شود.

$$dP_{mom} \propto \mu \rho V^2 \quad (11)$$

از آنجایی که سطح مقطع مجرای خنک‌کاری و پره در تمامی آزمایش‌ها از نظر کیفیت یا ضریب اصطکاک یکسان هستند، افت فشار ناشی از اصطکاک طبق معادله ۹ تنها به سرعت جریان وابسته خواهد بود. همچنین، به دلیل استفاده از مکانیزم همرفتی اجباری، افت فشار ناشی از نیروی گرانش قابل اغماض است. علاوه بر آن، تراکم‌ناپذیری جریان هوا باعث می‌شود افت فشار ناشی از کاهش تکانه تنها تحت تأثیر سرعت جریان قرار گیرد. بنابراین، کل افت فشار ناشی از پره خنک‌کننده تنها به سرعت جریان خنک‌کننده وابسته است. [۲۸] در این آزمایش، سرعت جریان خنک‌کننده پایین در نظر گرفته شده است (عدد ماخ کمتر از واحد)؛ لذا در این محدوده، سرعت جریان قبل از برخورد با پره توسط سرعت جریان پایین‌دستی قابل تعیین است. در نتیجه، افت فشار کل در ساز و کار خنک‌کننده پره تنها به سرعت جریان خنک‌کننده وابسته است. جدول ۴ نتایج اندازه‌گیری سرعت جریان جهت خنک‌سازی پره سهمی را به منظور مقایسه کیفی افت فشار در زوایای مختلف نمایش می‌دهد.

جدول ۴: مقایسه کیفی میانگین سرعت پره در زوایای مختلف

سرعت چرخش فن (rev/min)	زاویه قرارگیری (°)	حداکثر سرعت جریان (m/s)
۴۰۰۰	۹۰	۲/۲
۴۰۰۰	۴۵	۱/۹
۴۰۰۰	۰	۲/۴

بر اساس وابستگی افت فشار به سرعت جریان، مقدار افت فشار در زاویه برخورد صفر درجه

نسبت به سایر زوایا کمترین مقدار را دارد. این پدیده ممکن است ناشی از کمترین مقاومت سطح مقطع عرضی پره در برابر جریان خنک کننده در این زاویه باشد، که به جریان اجازه می دهد با کمترین اختلال از کنار پره عبور کند. همچنین وجود تقعر در هندسه پره سهموی، باعث تیزتر شدن انتهای آن نسبت به پره مثلثی و به حداقل رساندن نوسانات جریان خنک کننده پس از برخورد می شود؛ بنابراین میزان افت فشار در پره با هندسه سهمی مقعر، از پره مثلثی و به وضوح از پره مستطیلی کمتر می باشد [۲۸].

۳-۸- بررسی عدم قطعیت

محاسبه عدم قطعیت در اندازه گیری یکی از مهم ترین مسائل در تحقیقات تجربی است. در این مطالعه، عدم قطعیت یک معادله با چندین متغیر مستقل با استفاده از معادله (۱۲) [۳۳] محاسبه شده است.

$$H = H(X_1, X_2, \dots, X_i) \Rightarrow \delta H = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta H}{\delta X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{0.5} \quad (12)$$

عدم قطعیت $\frac{\delta H}{\delta X_i}$ به صورت ریاضی محاسبه می شود و به دقت تجهیزات اندازه گیری بستگی دارد. دقت این تجهیزات برای مطالعه حاضر در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: میزان عدم قطعیت پارامترهای مورد اندازه گیری

متغیر	تجهیزات مربوطه	میزان عدم قطعیت
دمای سطح	سنسور PT-100	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
فاصله	کولیس دیجیتالی	$\pm 0.05\text{mm}$
ولتاژ الکتریکی	مولتی متر الکتریکی	$\pm 0.1\text{V}$
مقاومت الکتریکی	مولتی متر الکتریکی	$\pm 0.1\Omega$
زاویه	زاویه سنج	$\pm 1^\circ$
سرعت جریان سیال	بادسنج	$\pm 0.1\text{m/s}$
دمای جریان سیال	بادسنج	$\pm 0.1^\circ\text{C}$

با توجه به معادله ۱۲ و جدول ۵، میزان عدم قطعیت در ضریب انتقال حرارت برای همه شرایط محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: میانگین عدم قطعیت در ضریب انتقال حرارت متوسط پره سهمی در زوایای مختلف

عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت %	زاویه پره و جریان سیال (°)
۴۸۸٪	۹۰
۸۱۵٪	۴۵
۷۲۹٪	۰

مقادیر درج شده در جدول ۶ بیانگر میانگین سه اندازه گیری مستقل است. بازه عدم قطعیت

(Uncertainty) نشان‌دهنده انحراف معیار استاندارد (SD) است که با هدف ارزیابی خطای احتمالی سیستماتیک و اطمینان از تکرارپذیری داده‌های به‌دست‌آمده در شرایط محیطی یکسان محاسبه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه حفاظتی کارآمد بر پایه نانوکامپوزیت هیبریدی **rGO-ZIF-8** توسعه یافته و عملکرد آن در مهار خوردگی حفره‌ای فولاد در محیط کلریدی مورد ارزیابی قرار گرفت. نانوساختار ترکیبی به‌دلیل برهم‌کنش مؤثر میان صفحات رسانای **rGO** و واحدهای بلوری **ZIF-8**، مورفولوژی یکنواخت و پایدار ایجاد کرده و نتایج **FE-SEM**، **XRD** و **Raman** پایداری ساختاری و یکپارچگی این ترکیب را تأیید کردند. آزمون‌های الکتروشیمیایی نشان دادند که حضور **rGO-ZIF-8** در محیط خورنده موجب افزایش چشمگیر مقاومت انتقال بار، تشکیل فیلم‌های پایدار بر سطح فولاد و بهبود محسوس پارامترهای امپدانس می‌شود. براساس نتایج به‌دست‌آمده، نمونه حاوی **rGO-ZIF-8** بالاترین مقدار **Rt** و راندمان حفاظتی بیش از ۶۴٪ در **EIS** و ۸۳٪ در پلاریزاسیون را ارائه کرد که این امر نشان‌دهنده سازوکار ترکیبی «سدکنندگی فیزیکی» ناشی از صفحات **rGO** و «بازدارندگی فعال» حاصل از رهائش یون‌های Zn^{2+} و مولکول ۲-متیل‌ایمیدازول است. این ترکیب علاوه بر مهار واکنش‌های آندی و کاتدی، موجب تشکیل لایه‌های یکنواخت محافظ در نواحی آسیب‌دیده نیز شد که به‌وضوح در نتایج آزمون‌های زمان‌دار مشاهده گردید. به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعه نشان داد که طراحی یک سامانه هیبریدی متشکل از چارچوب آل-فلزی **ZIF-8** و صفحات کربنی **rGO** می‌تواند راهکاری مؤثر برای حفاظت فعال و پایدار در برابر خوردگی حفره‌ای باشد. این سامانه با امکان رهائش کنترل‌شده بازدارنده‌ها و ایجاد ساختارهای مقاوم سطحی، ظرفیت قابل‌توجهی برای توسعه پوشش‌ها و افزودنی‌های هوشمند در صنایع دریایی، نفت و گاز و محیط‌های عملیاتی کلریدی دارد. بر این اساس، استفاده از نانوکامپوزیت **rGO-ZIF-8** می‌تواند مسیر جدیدی برای طراحی فناوری‌های نسل آینده در حوزه پوشش‌های خودترمیم‌شونده و ضدخوردگی پیشرفته فراهم سازد. در این پژوهش، سنتز و عملکرد نانوکامپوزیت **rGO-ZIF-8** برای حفاظت از خوردگی بررسی شد. نتایج نشان داد که هم‌افزایی بین خاصیت سدکنندگی **rGO** و بازدارندگی فعال **ZIF-8**، عملکرد حفاظتی را به شدت افزایش می‌دهد.

۵- تشکر و قدردانی

مراتب تشکر و قدردانی خود را از حامیان تحقیق که به صورت غیرمستقیم در پیشبرد آن نقش داشته‌اند، داریم.

۶- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۷- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (باز ترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۸- پیشنهادات برای کارهای آینده:

بررسی تأثیر دماهای مختلف بر سینتیک رهایش بازدارنده از درون حفرات ZIF-8.

انجام آزمون‌های خوردگی در محیط‌های دریایی با غلظت بالای یون‌های کلرید.

توسعه مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی عمر مفید پوشش‌های خودترمیم‌شونده مبتنی بر این نانوکامپوزیت.

۹- فهرست نمادها

نماد	
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h (W/m ² K)
ضریب انتقال حرارت جابجایی	HTC (W/m ² K)
ضریب انتقال حرارت رسانش	K (W/mK)
سرعت	V (m/s)
دما	T (°C)
شار حرارتی	Q_{\bullet} (W/m ²)
طول	L (m)
عدد نوسلت جریان سیال	Nu
توزیع دمای بدون بعد سطح پره	θ^*
شتاب گرانش	g (m/s ²)
ارتفاع	H (m)

زیرنویس

حالت جامد	s
میانگین	ave.
سطح	surf.
سمت چپ	l
سمت راست	r
سمت بالا	u
سمت پایین	d
مرکز	c
سیال	f
اصطکاک	fric.
گرانش	g
مومنتوم (اندازه حرکت)	mom.
ریشه پره	w

	نماد یونانی
ضریب کارایی	η
دمای بدون بعد	θ
چگالی	ρ (Kg/m ³)

۱۰- منابع

- [1] Tan YMike, Revie RWinston. Heterogeneous Electrode Processes and Localized Corrosion. 2012 [cited 2024 Feb 10];272. Available from: https://books.google.com/books/about/Heterogeneous_Electrode_Processes_and_Lo.html?id=BFbwjYRYxV0C
- [2] Pourbaix M, Staehle RW. Introduction to Corrosion. In: Lectures on Electrochemical Corrosion. Boston, MA: Springer US; 1973. p. 1–22.
- [3] Gibson G. Epoxy Resins. Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition. 2017 Jan 1;773–97.
- [4] Jin FL, Li X, Park SJ. Synthesis and application of epoxy resins: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015 Sep 25;29:1–11.

- [5] Parhizkar N, Ramezanzadeh B, Shahrabi T. Corrosion protection and adhesion properties of the epoxy coating applied on the steel substrate pre-treated by a sol-gel based silane coating filled with amino and isocyanate silane functionalized graphene oxide nanosheets. *Appl Surf Sci*. 2018 May 1;439:45–59.
- [6] Park S, An J, Potts JR, Velamakanni A, Murali S, Ruoff RS. Hydrazine-reduction of graphite- and graphene oxide. *Carbon N Y*. 2011 Aug 1;49(9):3019–23.
- [7] Kumar SSA, Bashir S, Ramesh K, Ramesh S. New perspectives on Graphene/Graphene oxide based polymer nanocomposites for corrosion applications: The relevance of the Graphene/Polymer barrier coatings. *Prog Org Coat*. 2021 May 1;154:106215.
- [8] Kumar SSA, Bashir S, Ramesh K, Ramesh S. New perspectives on Graphene/Graphene oxide based polymer nanocomposites for corrosion applications: The relevance of the Graphene/Polymer barrier coatings. *Prog Org Coat*. 2021 May 1;154:106215.
- [9] Saliba D, Ammar M, Rammal M, Al-Ghoul M, Hmadeh M. Crystal Growth of ZIF-8, ZIF-67, and Their Mixed-Metal Derivatives. *J Am Chem Soc [Internet]*. 2018 Feb 7 [cited 2023 Jun 4];140(5):1812–23. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jacs.7b11589>
- [10] Wang L, Liu C, Bai Z, Huang Y, Liu X. Superhydrophobic ZIF-8/PEN films with ultralow dielectric constant and outstanding mechanical properties. *Compos Sci Technol*. 2022 Jul 7;225:109498.
- [11] Tanaka S, Fujita K, Miyake Y, Miyamoto M, Hasegawa Y, Makino T, et al. Adsorption and Diffusion Phenomena in Crystal Size Engineered ZIF-8 MOF. *Journal of Physical Chemistry C [Internet]*. 2015 Dec 24 [cited 2023 May 30];119(51):28430–9. Available from: https://www.researchgate.net/publication/285545744_Adsorption_and_Diffusion_Phenomena_in_Crystal_Size_Engineered_ZIF-8_MOF
- [12] Yang H, Wang N, Wang L, Liu HX, An QF, Ji S. Vacuum-assisted assembly of ZIF-8@GO composite membranes on ceramic tube with enhanced organic solvent nanofiltration performance. *J Memb Sci*. 2018 Jan 1;545:158–66.
- [13] Zhang Y, Jia Y, Li M, reports LHS, 2018 undefined. Influence of the 2-methylimidazole/zinc nitrate hexahydrate molar ratio on the synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 crystals at room temperature. *nature.com* Y Zhang, Y Jia, M Li, L Hou Scientific reports, 2018•nature.com [Internet]. [cited 2025 Sep 17]; Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-28015-7>
- [14] Rathnayake RMNM, Wijayasinghe HWMAC, Pitawala HMTGA, Yoshimura M, Huang HH. Synthesis of graphene oxide and reduced graphene oxide by needle platy natural vein graphite. *Appl Surf Sci [Internet]*. 2017 Jan 30 [cited 2025 May 28];393:309–15. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433216321031>

- [15] Ramezanzadeh M, Asghari M, Ramezanzadeh B, Bahlakeh G. Fabrication of an efficient system for Zn ions removal from industrial wastewater based on graphene oxide nanosheets decorated with highly crystalline polyaniline nanofibers (GO-PANI): Experimental and ab initio quantum mechanics approaches. *Chemical Engineering Journal*. 2018 Apr 1;337:385–97.
- [16] Yang H, Wang N, Wang L, Liu HX, An QF, Ji S. Vacuum-assisted assembly of ZIF-8@GO composite membranes on ceramic tube with enhanced organic solvent nanofiltration performance. *J Memb Sci*. 2018 Jan 1;545:158–66.
- [17] Wang J, Wang Y, Hu H, Yang Q, Cai J. From metal–organic frameworks to porous carbon materials: recent progress and prospects from energy and environmental perspectives. *Nanoscale* [Internet]. 2020 Feb 20 [cited 2025 Jun 9];12(7):4238–68. Available from: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/nr/c9nr09697c>
- [18] Ferrari A, B JRP review, 2000 undefined. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *APSAC Ferrari, J Robertson Physical review B, 2000•APS* [Internet]. 2000 [cited 2025 Jun 9];61(20):14095–107. Available from: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.61.14095>
- [19] Burton AW, Ong K, Rea T, Chan IY. On the estimation of average crystallite size of zeolites from the Scherrer equation: A critical evaluation of its application to zeolites with one-dimensional pore systems. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2009 Jan 1;117(1–2):75–90.
- [20] Keshmiri N, Najmi P, Ramezanzadeh M, Ramezanzadeh B. Designing an eco-friendly lanthanide-based metal organic framework (MOF) assembled graphene-oxide with superior active anti-corrosion performance in epoxy composite. *J Clean Prod*. 2021 Oct 15;319:128732.
- [21] Zheludkevich ML, Shchukin DG, Yasakau KA, Möhwald H, Ferreira MGS. Anticorrosion coatings with self-healing effect based on nanocontainers impregnated with corrosion inhibitor. *Chemistry of Materials* [Internet]. 2007 Feb 6 [cited 2022 Oct 23];19(3):402–11. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cm062066k>
- [22] Najmi P, Keshmiri N, Ramezanzadeh M, Ramezanzadeh B, Arjmand M. Porous 2D Ti3C2 MXene nanosheets sandwiched between imine-based covalent organic frameworks (COFs) for excellent corrosion protective coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2023;456:141001.
- [23] Mostafatabar AH, Bahlakeh G, Ramezanzadeh B. Novel bi-functional RGO-HPSE-Zn@epoxy nanocomposite with superior corrosion protection potency. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2022 Apr 25;108:28–46.