



Using a Mixture of Corrosion Inhibitors to Increase Inhibition Efficiency and Analysis of the Synergistic Inhibition Effect

A. Khormali^{1*}, S. Ahmadi²

1- Assistant Professor of Petroleum Engineering, Gonbad Kavous University

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, Persian Gulf University

Email: A.khormali@gonbad.ac.ir

Abstract

In this study, the inhibition efficiency of four inhibitors (methylenephosphonic acid, benzotriazole, 2-mercaptobenzimidazole and 2-ethylbenzimidazole) for corrosion prevention of carbon steel samples in one molar HCl solution was evaluated by weight loss method. Experimental design and modeling of the corrosion control process for two inhibitors with the highest effectiveness was carried out using a combined mixture-process design method at different temperatures, concentrations, and mixing ratios. 2-Mercaptobenzimidazole and 2-ethylbenzimidazole were selected for investigation as a mixture. Through analysis of variance of experimental data, a new model was developed to predict the inhibition efficiency of the mixture of these two inhibitors. The inhibition efficiency predicted by the model was in good agreement with the laboratory data, and the P value of the model was less than 0.0001. In addition, the coefficient of determination, adjusted coefficient of determination, and predicted coefficient of determination were 0.9989, 0.9986, and 0.9982, respectively. The results showed that the inhibition efficiency increased with increasing the mixture concentration. Also, temperature had a negative effect on the inhibition efficiency. As the temperature increased, the inhibition efficiency of the mixture decreased. Through modeling, the optimal values for temperature, mixture concentration and mixing ratio were determined to be 25°C, 130 ppm and 75:25 of 2-mercaptobenzimidazole to 2-ethylbenzimidazole, respectively. Under these conditions, the inhibition efficiency of the mixture was more than 93%. Moreover, synergistic effect between 2-mercaptobenzimidazole and 2-ethylbenzimidazole inhibitors was determined. The highest synergistic effect was more than 6.5%, which increased the corrosion inhibition efficiency by more than 6.5%.

Received: 13 February 2024

Accepted: 11 June 2024

Page Number: 117-135

Keywords:

Corrosion Inhibition Efficiency,
Synergistic Effect,
Combined Mixture-Process Design Method,
Analysis of Variance

Please Cite this Article Using:

Khormali, A., & Ahmadi, S. (2025). Using a Mixture of Corrosion Inhibitors to Increase Inhibition Efficiency and Analysis of the Synergistic Inhibition Effect. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(139), 117-135, [In Persian].



استفاده از مخلوط بازدارنده‌های خوردگی برای افزایش راندمان بازدارندگی خوردگی و بررسی اثر هم‌افزایی

عزیزاله خرمالی^{۱*}، سروش احمدی^۲

۱- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه گنبد کاووس

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه خلیج فارس

پیام نگار: A.khormali@gonbad.ac.ir

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

شماره صفحات: ۱۱۷ تا ۱۳۵

در این مطالعه، کارایی چهار بازدارنده (متیلن فسفونیک اسید، بنزوتریازول، ۲- مرکاپتوبنزیمیدازول و ۲- اتیل بنزیمیدازول) برای مهار خوردگی نمونه‌های فولاد کربنی در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید با روش کاهش وزن، ارزیابی شد. طراحی آزمایش و مدل‌سازی فرایند کنترل خوردگی برای دو بازدارنده‌ای که بالاترین راندمان را داشتند، با استفاده از روش طراحی ترکیبی مخلوط- فرایند در دما، غلظت و نسبت‌های مختلف اختلاط انجام شد. ۲- مرکاپتوبنزیمیدازول و ۲- اتیل بنزیمیدازول برای بررسی به صورت مخلوط انتخاب شدند. با تحلیل واریانس داده‌های آزمایشگاهی، مدل جدیدی برای پیش‌بینی راندمان بازدارندگی مخلوط این دو بازدارنده به دست آمد. داده‌های راندمان بازدارندگی پیش‌بینی شده از مدل، مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت و مقدار P مدل کمتر از $0/0001$ بود. علاوه بر این، مقادیر ضریب تعیین، ضریب تعیین تعدیل شده و ضریب تعیین پیش‌بینی به ترتیب $0/9989$ ، $0/9986$ و $0/9982$ بود. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت مخلوط بازدارنده‌ها، راندمان بازدارندگی افزایش می‌یابد. همچنین، دما بر کارایی مهار خوردگی اثر منفی داشت و با افزایش دما، درصد بازدارندگی مخلوط کاهش یافت. مقادیر بهینه دما، غلظت مخلوط و نسبت اختلاط با مدل‌سازی تعیین شد که به ترتیب 25 درجه سلسیوس، 130 ppm و 75 درصد ۲- مرکاپتوبنزیمیدازول به 25 درصد ۲- مرکاپتوبنزیمیدازول بود. در این شرایط، راندمان بازدارندگی مخلوط بیشتر از 93 درصد بود. علاوه بر این، میزان اثر هم‌افزایی بین بازدارنده‌های ۲- مرکاپتوبنزیمیدازول و ۲- اتیل بنزیمیدازول تعیین شد. بالاترین میزان اثر هم‌افزایی بیش از $6/5$ درصد بود که راندمان بازدارندگی خوردگی را بیش از $6/5$ درصد افزایش داد.

کلیدواژه‌ها:

راندمان بازدارندگی خوردگی،

اثر هم‌افزایی،

روش طراحی ترکیبی

مخلوط- فرایند،

تحلیل واریانس

* گنبد کاووس، دانشگاه گنبد کاووس، دانشکده علوم پایه و فنی- مهندسی، گروه شیمی

استناد به مقاله:

خرمالی، عزیزاله، و احمدی، سروش. (۱۴۰۴). استفاده از مخلوط بازدارنده‌های خوردگی برای افزایش راندمان بازدارندگی خوردگی و بررسی اثر هم‌افزایی، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۳۹)، ۱۱۷-۱۳۵.

استفاده از بازدارنده‌ها یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای محافظت سطوح فلزات در برابر خوردگی است. انواع مختلفی از ترکیبات آلی و معدنی وجود دارد که خواص حفاظتی قوی در محیط‌های خورنده دارند. به‌طور کلی، ترکیبات آلی مانند آمین‌ها، الکل‌های استیلنیک، ترکیبات هتروسیکلیک، فسفونات‌ها و غیره به‌عنوان بازدارنده خوردگی در صنایع مختلف استفاده می‌شود [۱۲]. استفاده از اسیدهای فسفونیک آلی و ترکیبات آزولی برای محافظت از سطوح فلزات در برابر خوردگی، موضوع پژوهش‌های مختلفی بوده است. چندین نویسنده اثربخشی بازدارنده‌های آلی را گزارش کردند که خوردگی فلز را با تشکیل یک لایه برروی سطح آن کنترل می‌کنند [۳ و ۴]. ترکیبات شیمیایی حاوی حلقه‌های آروماتیک و هترواتم‌ها (اتم‌های نیتروژن، گوگرد و اکسیژن) می‌تواند روی سطح فلز جذب شود و خاصیت بازدارندگی از خوردگی دارد [۵-۸]. اولین مرحله مهار با این مواد شیمیایی، جذب در سطح مشترک محلول-فلز و جای‌گزینی مولکول‌های بازدارنده با مولکول‌های آب و یا مولکول‌های اسید است [۹]. سپس، یک پیوند شیمیایی بین مرکز جذب مولکول و اوربیتال پرنشده دی^۱ در آهن تشکیل می‌شود [۱۰-۱۳]. ترکیبات حاوی نیتروژن مانند ایمیدازولین و مشتقات آن با موفقیت برای جلوگیری از فرایند خوردگی استفاده شده است [۱۴-۱۶]. این ترکیبات آلی با جذب برروی سطح فلز و تشکیل یک لایه محافظ، از رسیدن یون‌های مهاجم به سطح فلز جلوگیری می‌کنند.

مهدویان و اشهری اثر ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول (2-MBI) را بر خوردگی فولاد نرم در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید با استفاده از قطبش پتانسیودینامیکی و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، مطالعه کردند [۱۷]. آن‌ها مشاهده کردند که چگالی جریان آندی و کاتدی با افزایش غلظت بازدارنده از ۰/۰۵ میلی‌مولار به ۱ میلی‌مولار کاهش می‌یابد، که نشان می‌دهد ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول واکنش‌های آندی و کاتدی را با جذب برروی سطح فولاد نرم کنترل می‌کند. تصاویر میکروسکوپی وجود گوگرد را برروی سطح فولاد نشان داد که جذب 2-MBI را در سطح

فلز تأیید می‌کند. مطالعات گارگ^۳ و همکاران نشان داد که بین فلز و 2-MBI پیوند شیمیایی به‌وسیله اتم‌های نیتروژن بازدارنده تشکیل می‌شود [۱۸]. آن‌ها دریافتند که لایه‌های آلی تشکیل شده روی سطح فلز شامل یک لایه داخلی و یک لایه بیرونی است که لایه داخلی با جذب شیمیایی و لایه بیرونی با جذب فیزیکی ایجاد می‌شود. بازدارنده ۲-اتیل‌بنزیمیدازول^۴ (2-EBI) و مشتقات آن برای کنترل خوردگی در محیط‌های اسیدی به‌صورت گسترده استفاده می‌شود. موهان^۵ و همکاران کارایی بازدارندگی 2-EBI را برروی فولاد نرم در غلظت‌های مختلف هیدروکلریک اسید بررسی کردند [۱۹]. نتایج آن‌ها نشان داد که راندمان با افزایش دما و غلظت اسید کاهش می‌یابد. مهار، با جذب سطحی (هم فیزیکی و هم شیمیایی) انجام شد. اممال^۶ و همکاران با مطالعه سازوکار بازدارندگی 2-EBI مشاهده کردند که مهار خوردگی در محیط هیدروکلریک اسید با جذب بازدارنده در سطح فلز رخ می‌دهد [۲۰]. مشاهده شد که ماهیت جذب با عوامل مختلفی مانند نوع محیط خورنده، ماهیت بار فلز، بار و ممان دوقطبی بازدارنده و غیره تعیین می‌شود. از تجزیه و تحلیل پتانسیل بار صفر، مشخص شد که سطح فولاد بارهای مثبت را در محیط اسیدی حمل می‌کند. رامیا^۷ و همکاران دریافتند که ۲-متیل‌بنزیمیدازول، ۲-اتیل‌بنزیمیدازول و ۲-پروپیل-بنزیمیدازول بازدارنده‌های مؤثری برای مهار خوردگی فولاد در محلول یک‌مولار هیدروکلریک اسید هستند [۲۱]. بازدارنده‌ها در سطح فلز هم به‌صورت فیزیکی و هم شیمیایی جذب شد، که این رفتار از مقادیر انرژی آزاد جذب مشخص شد. لبحار^۸ و همکاران متیلن‌فسفونیک اسید^۹ (ATMP) را به‌عنوان یک بازدارنده برای مهار خوردگی فولاد کربنی در محلول یک‌مولار هیدروکلریک اسید با استفاده از روش‌های کاهش وزن، قطبش پتانسیودینامیکی و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی کردند [۲۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که متیلن‌فسفونیک اسید یک بازدارنده مؤثر برای مهار خوردگی در فولاد کربنی در محلول یک‌مولار هیدروکلریک اسید است و با افزایش غلظت بازدارنده، کارایی بازدارندگی آن افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های امپدانس یک

3. Garg

4. 2-Ethylbenzimidazole-2-EBI

5. Mohan

6. Ammal

7. Ramya

8. Labjar

9. Methylenephosphonic Acid-ATMP

1. D Orbital

2. 2-Mercaptobenzimidazole-2-MBI

حلقه خازنی با فرکانس بالا فرایند انتقال بار خوردگی فلز را نشان داد. خوردگی با جذب متیلن فسفونیک اسید بر روی سطح فولاد کربنی مهار شد و جذب بازدارنده طبق مدل همدمای جذب لانگمویر^۱ انجام گرفت. احمدی و خرمالی کارایی ATMP را در مهار خوردگی فولاد کربنی در محیط هیدروکلریک اسید یک مولار باروش کاهش وزن، مطالعه کردند [۲۳]. در غلظت ۱۵۰ ppm بازدارنده و دمای ۵۰ درجه سلسیوس بعد از ۵۵ ساعت غوطه‌وری، راندمان بازدارندگی ۷۹ درصد مشاهده شد. راندمان بازدارندگی متیلن فسفونیک اسید به شدت به دمای محیط وابسته بود و با افزایش دما، کارایی کاهش یافت. بنزوتریازول^۲ (BTA) یک بازدارنده خوردگی سازگار با محیط زیست است که دارای راندمان ضد خوردگی بالا بر روی فلزات از جمله مس، آهن و آلومینیوم است. اونیچو و سولومون^۳ کارایی BTA را در مهار خوردگی فولاد کم کربن با آزمون‌های الکتروشیمیایی در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید بررسی کردند [۲۴]. بنزوتریازول در غلظت ۱۰۰ ppm و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در برابر خوردگی بسیار مؤثر بود و حداکثر راندمان بازدارندگی ۸۰ درصد بود. با این حال، راندمان در دمای ۳۵ درجه سلسیوس به شدت کاهش یافت. ادوزیونو^۴ و همکاران، نتایج بهینه‌سازی و تهیه مدل‌های پیش‌بینی برای مهار خوردگی فولاد نرم را در اسید سولفوریک به وسیله متیل-۵-بنزوتیل-۲-بنزیمیدازول کاربامات گزارش کردند [۲۵]. آن‌ها مشخصه‌های فرایند بازدارندگی خوردگی را بهینه‌سازی کردند و مدل‌های ریاضی را برای پیش‌بینی نرخ خوردگی و راندمان بازدارندگی با استفاده از روش سطح پاسخ^۵ و ابزار طراحی مرکب مرکزی^۶ در برنامه دی‌زاین اکسپرت^۷ به دست آوردند. مدل‌های به دست آمده دقیق بوده و مقادیر نرخ خوردگی و راندمان بازدارندگی به دست آمده از مدل‌ها با مقادیر آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشت.

در برخی از منابع، اثر هم‌افزایی^۸ دو یا چند بازدارنده خوردگی برای بهبود عملکرد کنترل خوردگی و کاهش غلظت مورد نیاز بازدارنده‌ها گزارش شده است [۲۶-۲۹]. وانگ^۹ و همکاران بازدارندگی مخلوط

۲- مرکاپتوبنزیمیدازول و اولئیک ایمیدازولین را برای مهار خوردگی فولاد کربنی در محلول آب نمک و اثر هم‌افزایی آن‌ها بررسی کردند [۳۰]. مشاهده شد که مخلوط این دو بازدارنده در نسبت معینی که با آزمایش مشخص می‌شود، کارایی بهتری نسبت به هریک از بازدارنده‌ها دارد. خرمالی و احمدی با ترکیب ۲- مرکاپتوبنزیمیدازول و اولئیک ایمیدازولین در نسبت یک به یک، کارایی بازدارندگی را برای کنترل خوردگی نمونه‌های فولاد کربنی در محیط هیدروکلریک اسید به میزان ۱۵/۹ درصد در مقایسه با تنها یک بازدارنده، افزایش دادند [۳۱]. علاوه بر این، مشاهده شد که با افزایش دما، راندمان بازدارندگی مخلوط کاهش قابل توجهی ندارد که به دلیل جذب کامل آن بر روی سطح نمونه‌ها بود. ژانگ^{۱۰} و همکاران اثر بازدارندگی هم‌افزایی اس-بنزیل-ال-سیستین^{۱۱} و تیواوره^{۱۲} را بر خوردگی فولاد کربنی در آب سازندی با آزمایش‌های الکتروشیمیایی و تجزیه و تحلیل سطح، ارزیابی کردند [۲۷]. مشخص شد که مخلوط این دو ماده اثر هم‌افزایی قابل توجهی را در مهار خوردگی نشان می‌دهد. محاسبات نظری نشان داد که ذرات اس-بنزیل-ال-سیستین و تیواوره می‌توانند از راه برهم‌کنش بین مولکولی با یکدیگر پیوند تشکیل دهند. علاوه بر این، برهم‌کنش بین مولکولی این دو بازدارنده منجر به پیوند قوی‌تر با سطح آهن شد. در نتیجه، یک لایه محافظ فشرده‌تر و بادوام‌تر ایجاد شد که باعث افزایش راندمان بازدارندگی و کاهش غلظت مورد نیاز بازدارنده شد. هی^{۱۳} و همکاران، اثر هم‌افزایی اولئیک ایمیدازولین و مشتقات سولفونات غیرفعال حاوی گوگرد را در محلول هیدروکلریک اسید، بررسی کردند [۳۲]. آن‌ها توانستند عملکرد بازدارندگی خوردگی را با تعیین نسبت اختلاط بهینه بازدارنده‌ها بهبود بخشند.

با وجود مطالعات متعدد در مورد کارایی بازدارنده‌های خوردگی به تنهایی، اثر هم‌افزایی در بین آن‌ها کمتر مطالعه شده است. نیازهای مستمر صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، مستلزم مطالعات جدید و بهبود عملکرد بازدارنده‌های خوردگی موجود است که در غلظت‌های پایین مؤثر باشند. هدف این مطالعه، بررسی راندمان بازدارندگی چهار بازدارنده خوردگی در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید، برای نمونه‌های فولاد کربنی است: متیلن فسفونیک اسید،

1. Langmuir Isotherm
2. Benzotriazole
3. Onyechu and Solomon
4. Edoziuno
5. Response Surface Methodology-RSM
6. Central Composite Design-CCD
7. Design Expert
8. Synergistic Effect
9. Wang

10. Zhang
11. S-Benzyl-L-Cysteine
12. Thiourea
13. He

جدیدی برای پیش‌بینی راندمان این مخلوط به کمک داده‌های آزمایشگاهی ارائه می‌شود که مشخصه‌های دما، غلظت مخلوط و نسبت اختلاط را در نظر می‌گیرد. در نهایت، برای اولین بار با آزمایش و مدل‌سازی درصد اثر هم‌افزایی دو بازدارنده ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول و ۲-اتیل‌بنزیمیدازول در کنترل خوردگی تعیین می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ بازدارنده‌ها

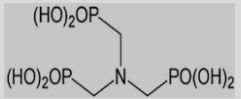
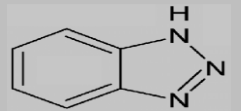
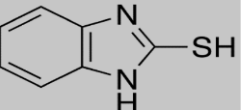
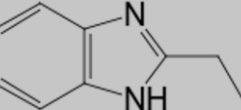
در این مطالعه، عملکرد چهار بازدارنده مختلف صنعتی که در مهار خوردگی فلزات استفاده می‌شود، بررسی شد. نام، اختصار، فرمول و ساختار شیمیایی این ترکیبات در جدول (۱) آمده است. لازم به ذکر است که این بازدارنده‌ها به‌طور گسترده در صنایع مختلف به‌منظور کنترل خوردگی استفاده می‌شود. این چهار بازدارنده (با درصد خلوص ۹۸) از شرکت مرک^۲ تهیه و بدون خالص‌سازی بیشتر استفاده شد.

بنزوتریازول، ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول و ۲-اتیل‌بنزیمیدازول. برای این منظور از روش کاهش وزن برای تعیین راندمان بازدارندگی این چهار ماده استفاده می‌شود. برای کاهش بیشتر نرخ خوردگی و افزایش کارایی، دو بازدارنده‌ای که بالاترین درصد مهار خوردگی را دارند به‌صورت مخلوط در نسبت‌های مختلف اختلاط ارزیابی می‌شوند. هم‌چنین، مدل جدیدی برای پیش‌بینی راندمان بازدارندگی مخلوط با تحلیل واریانس^۱ با استفاده از روش سطح پاسخ و ابزار طراحی مرکب مرکزی ارائه می‌شود. به کمک مدل پیشنهادی اثر دما، نسبت اختلاط و غلظت بازدارنده مخلوط بر عملکرد بازدارندگی خوردگی بررسی می‌شود. علاوه بر این، برهم‌کنش مشخصه‌های دما، غلظت مخلوط بازدارنده‌ها و نسبت اختلاط آن‌ها ارزیابی می‌شود تا مقادیر بهینه آن‌ها مشخص شود. در نهایت، میزان اثر هم‌افزایی مخلوط دو بازدارنده تعیین می‌شود.

نوسآوری این پژوهش در بررسی کارایی مخلوط دو بازدارنده ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول و ۲-اتیل‌بنزیمیدازول در مهار خوردگی فولاد کربنی است که پیش از این مطالعه نشده است. هم‌چنین، مدل

جدول ۱. بازدارنده‌های خوردگی استفاده شده در این مطالعه.

Table 1. The corrosion inhibitors used in this study.

No.	Inhibitor	Abbreviation	Chemical formula	Chemical structure
1	aminotris (methylenephosphonic acid)	ATMP	In1. $C_3H_{12}NO_9P_3$	
2	benzotriazole	BTA	In2. $C_6H_5N_3$	
3	2-mercaptobenzimidazole	2-MBI	In3. $C_7H_6N_2S$	
4	2-ethylbenzimidazole	2-EBI	In4. $C_9H_{10}N_2$	

1. Analysis of Variance-ANOVA

2. Merck

۲-۲ روش کاهش وزن برای تعیین نرخ خوردگی و راندمان بازدارندگی

در این پژوهش، نمونه‌های فولاد کربنی در حضور و عدم حضور بازدارنده‌های خوردگی در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید غوطه‌ور شد و با اندازه‌گیری کاهش وزن آن‌ها، نرخ خوردگی و راندمان بازدارندگی تعیین شد. برای تعیین مقادیر بهینه بازدارنده‌ها، آزمایش‌ها در غلظت‌های مختلف بازدارنده‌ها تکرار شد. علاوه بر این، به منظور تعیین اثر دما و مدت زمان آزمایش بر راندمان بازدارندگی، آزمون‌ها در دماها و زمان‌های مختلف انجام شد. نرخ خوردگی^۱ (CR) نمونه‌ها در محلول و راندمان بازدارندگی^۲ (IE) به شرح زیر تعیین شد [۳۳ و ۳۴]:

$$CR = \frac{87.6 \Delta m}{Atp} \quad (1)$$

$$IE\% = \frac{CR_1 - CR_2}{CR_1} \times 100 \quad (2)$$

در روابط بالا، CR نرخ خوردگی بر حسب Δm , mm/y، کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب A , mg، مساحت سطح نمونه‌ها بر حسب t , mm²، زمان آزمایش بر حسب ساعت، ρ چگالی نمونه‌ها بر حسب IE , gr/cm³ راندمان بازدارندگی بر حسب درصد، CR_1 نرخ خوردگی در غیاب بازدارنده بر حسب mm/y و CR_2 نرخ خوردگی در حضور بازدارنده بر حسب mm/y است.

در مرحله اول، چهار بازدارنده خوردگی بالا در دما، غلظت و زمان‌های مختلف غوطه‌وری به صورت جداگانه بررسی شد. تمام آزمایش‌ها در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید انجام شد. سپس، دو بازدارنده‌ای که بالاترین عملکرد را داشتند، برای مرحله دوم انتخاب شدند تا کارایی آن‌ها به شکل مخلوط بررسی شود.

۲-۳ طراحی آزمایش‌ها برای مخلوط بازدارنده‌ها

از بین چهار بازدارنده‌ای که در بالا ذکر شد، دو ماده‌ای که بالاترین راندمان را در کنترل فرایند خوردگی دارند، برای مطالعه به صورت مخلوط انتخاب خواهند شد. بنابراین، توسعه و بهینه‌سازی سامانه مخلوط دوتایی جدید با استفاده از بازدارنده‌های مذکور و باهدف

کاهش بیشتر نرخ خوردگی و افزایش کارایی بازدارندگی از راه طراحی و مدل‌سازی مهار خوردگی بررسی می‌شود. بدین منظور، طراحی آزمایش‌ها^۳ و تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از برنامه دیزاین اکسپرت انجام شد. هدف از پردازش آماری داده‌های آزمایشگاهی، به دست آوردن یک مدل بادقت بالا برای پیش‌بینی راندمان بازدارندگی و تعیین اثر مشخصه‌های مختلف بر تابع پاسخ (راندمان بازدارندگی) است. در این مطالعه، از روش طراحی ترکیبی مخلوط-فرایند^۴ به عنوان یک ابزار ریاضی و آماری برای طراحی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند کنترل خوردگی استفاده شد. در واقع، این یک رویکرد ترکیبی از روش‌های طراحی مخلوط و سطح پاسخ است که به طور هم‌زمان اجزای مخلوط و مشخصه‌های فرایندی را به منظور توسعه و بهینه‌سازی یک سامانه مخلوط جدید ترکیب می‌کند. مشخصه‌های اصلی مورد مطالعه در این کار به شرح زیر است: نسبت اختلاط^۵ بازدارنده‌ها، دما و غلظت مخلوط. جدول (۲) سطوح مشخصه‌های استفاده شده را در طراحی آزمایش‌های مهار خوردگی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پنج سطح برای نسبت اختلاط بازدارنده‌ها (۱۰۰:۰، ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵، ۰:۱۰۰)، پنج سطح برای غلظت مخلوط بازدارنده‌ها بر حسب (۲۵، ۶۵، ۱۱۰، ۱۵۵، ۲۰۰) و سه سطح برای دما (۲۵، ۵۰، ۷۵ درجه سلسیوس) در نظر گرفته شد. این غلظت‌های بازدارنده بر اساس نتایج تجربی مشاهده شده در کارهای قبلی انتخاب شدند [۳۵ و ۳۴ و ۳۱ و ۲۳]. دلیل انتخاب سه سطح برای دما کاهش تعداد آزمون‌ها است. هم‌چنین، مطابق نتایج پژوهش‌های قبلی، اثر دما بر راندمان بازدارندگی در مقایسه با سایر مشخصه‌ها ضعیف‌تر است [۳۵ و ۳۴]. بنابراین، کارایی مخلوط بازدارنده‌ها با ۷۵ آزمون بررسی می‌شود. با استفاده از نتایج این ۷۵ آزمایش و به کمک روش تحلیل واریانس، مدل جدیدی برای پیش‌بینی راندمان بازدارندگی مخلوط ارائه و دقت آن ارزیابی می‌شود.

۲-۴ تعیین میزان اثر هم‌افزایی

برای افزایش عملکرد بازدارندگی خوردگی نمونه‌های فولاد کربنی، بازدارنده‌های ۳ و ۴ (2-MBI و 2-EBI) به شکل مخلوطی در نسبت‌های مختلف اختلاط آزمایش شد. راندمان بازدارندگی مخلوط

3. Design of Experiments-DOE
4. Combined Mixture-Process Design-CMPD
5. Mixing Ratio

1. Corrosion Rate-CR
2. Inhibition Efficiency-IE

جدول ۲. طراحی آزمایش و نمادگذاری مشخصه‌ها.

Table 2. Experimental design and parameter notation.

Factor	A		B		C		D	
Name	wt.% of 2-MBI (%)		wt.% of 2-EBI (%)		Inhibitor concentration (ppm)		Temperature (°C)	
	actual value	coded value	actual value	coded value	actual value	coded value	actual value	coded value
Level	0	-1	100	1	25	-1	25	-1
	25	-0.5	75	0.5	65	-0.5	50	0
	50	0	50	0	110	0	75	1
	75	0.5	25	-0.5	165	0.5	-	-
	100	1	0	-1	200	1	-	-

این آزمون در شکل (۱)، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که راندمان بازدارندگی با افزایش زمان غوطه‌وری برای همه بازدارنده‌های مورد مطالعه افزایش یافته است. افزایش عملکرد بازدارنده با افزایش زمان در آزمون‌های الکتروشیمیایی در مطالعه مبین^۱ و همکاران نیز مشاهده شده است. نویسندگان مهاجرت مولکول‌های آب به وسیله یون‌های کلر در اسید و جذب مولکول‌های بازدارنده روی سطح فولاد را دلیل این رفتار بیان کردند [۳۷]. از بین بازدارنده‌های مورد مطالعه، 2-MBI و 2-EBI بالاترین راندمان بازدارندگی را در تمامی آزمون‌ها داشت. بنابراین، مطالعات در زمان‌های مختلف غوطه‌وری نشان داد که بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI بهترین انتخاب برای بررسی اثر هم‌افزایی در حالت مخلوطی هستند.

در مرحله بعد، مهار خوردگی نمونه‌های فولاد کربنی در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس در حضور هر چهار بازدارنده بررسی شد. اثر دما بر راندمان بازدارندگی در غلظت ثابت ۱۰۰ ppm بازدارنده‌ها بررسی شد تا پایداری لایه محافظ تشکیل شده با آن‌ها روی سطح نمونه‌ها پس از ۵۵ ساعت به دست آید. نتایج حاصل در شکل (۲)، آورده شده است. مشاهده می‌شود که راندمان بازدارندگی با افزایش دما برای تمام بازدارنده‌ها کاهش یافته است. در بین بازدارنده‌های مطالعه شده، 2-MBI و 2-EBI (بازدارنده‌های ۳ و ۴) بالاترین درصد مهار خوردگی را در تمامی دماها داشتند. بنابراین، نتایج این مرحله نیز مانند مرحله قبل نشان می‌دهد که بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI بهترین انتخاب برای بررسی اثر هم‌افزایی هستند. کاهش راندمان

بعد از ۴۸ ساعت غوطه‌وری با استفاده از رابطه (۲) تعیین شد. درصد اثر هم‌افزایی که میزان افزایش راندمان بازدارندگی مخلوط را در کنترل خوردگی در مقایسه با تنها یک بازدارنده نشان می‌دهد، از رابطه زیر حساب شد [۳۶]:

$$Syn\% = \frac{IE_m}{IE_3 \times a_3 + IE_4 \times a_4} \times 10000 - 100 \quad (3)$$

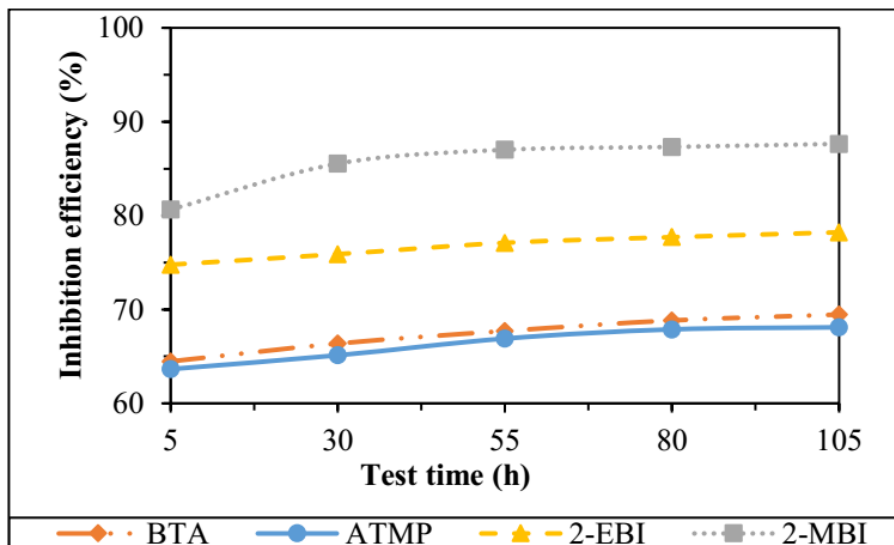
در معادله بالا، Syn مقدار اثر هم‌افزایی بر حسب درصد، IE_m راندمان بازدارندگی مخلوط بر حسب درصد، IE_3 راندمان بازدارندگی ماده 2-MBI بر حسب درصد، a_3 درصد وزنی بازدارنده 2-MBI در مخلوط بر حسب درصد، IE_4 راندمان بازدارندگی ماده 2-EBI بر حسب درصد و a_4 درصد وزنی بازدارنده 2-EBI در مخلوط بر حسب درصد است.

۳. نتایج و تفسیر آن‌ها

۳-۱ نتایج آزمایشگاهی برای انتخاب بهترین بازدارنده‌ها برای مهار خوردگی

در این مرحله، بازدارنده‌ها به صورت جداگانه در دما، زمان و غلظت‌های مختلف به کمک روش کاهش وزن، آزمایش شد. ابتدا، خوردگی نمونه‌های فولاد کربنی در حضور بازدارنده‌های ATMP (بازدارنده ۱)، BTA (بازدارنده ۲)، 2-MBI (بازدارنده ۳) و 2-EBI (بازدارنده ۴) بعد از ۵ تا ۱۰۵ ساعت غوطه‌وری در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید بررسی شد. در این حالت، اثر زمان آزمایش در غلظت ۱۰۰ ppm بازدارنده‌ها و دمای ۵۰ درجه سلسیوس بر عملکرد مهار خوردگی، مطالعه شد تا پایداری لایه محافظ تشکیل شده بر روی سطح فلز پس از هر آزمایش مشخص شود. نتایج

1. Mobin

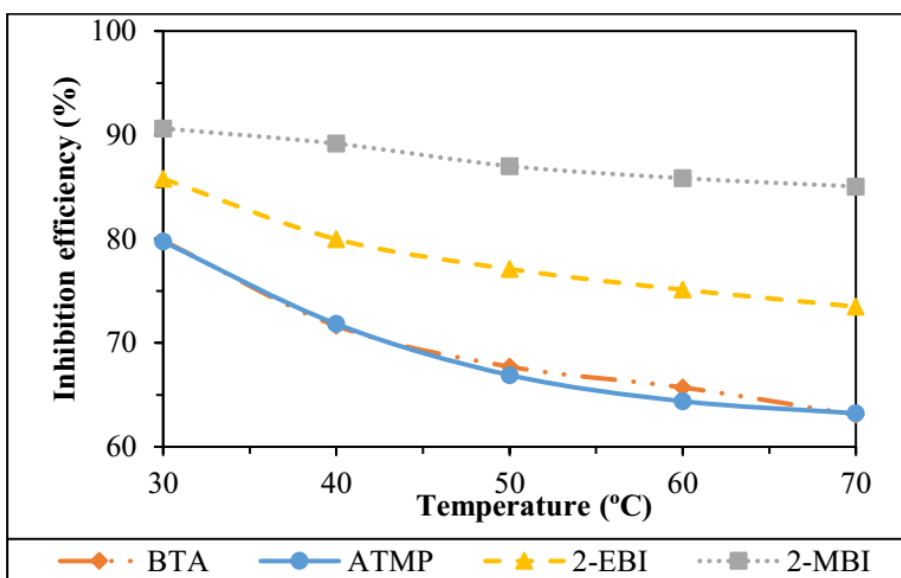


شکل ۱. وابستگی راندمان بازدارندگی به زمان آزمایش در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و غلظت ۱۰۰ ppm بازدارنده‌ها.

Figure 1. Dependence of inhibition efficiency on test time at 50 °C and 100 ppm of the inhibitors.

سرعت واکنش‌های آندی و کاتدی نسبت دادند. این رفتار مربوط به افزایش حلالیت مولکول‌های بازدارنده رسوب شده بر روی سطح فلز است. تعداد مولکول‌های جذب شده روی سطح فلز با افزایش دما کاهش می‌یابد که باعث کاهش عملکرد بازدارنده می‌شود.

بازدارندگی با افزایش دما به دلیل افزایش سرعت واکنش‌های خوردگی در سطح فلز در دماهای بالا است [۳۸ و ۳۹]. این رفتار، مطابق نتایج پژوهش ال-امیری^۱ و همکاران است [۴۰]. آن‌ها کاهش راندمان بازدارندگی با افزایش دما را به سازوکار جذب و افزایش



شکل ۲. وابستگی و راندمان بازدارندگی به دمای آزمایش در غلظت ۱۰۰ ppm بازدارنده‌ها بعد از ۵۵ ساعت غوطه‌وری.

Figure 2. Dependence of inhibition efficiency on temperature at a concentration of 100 ppm of inhibitors after 55 hours.

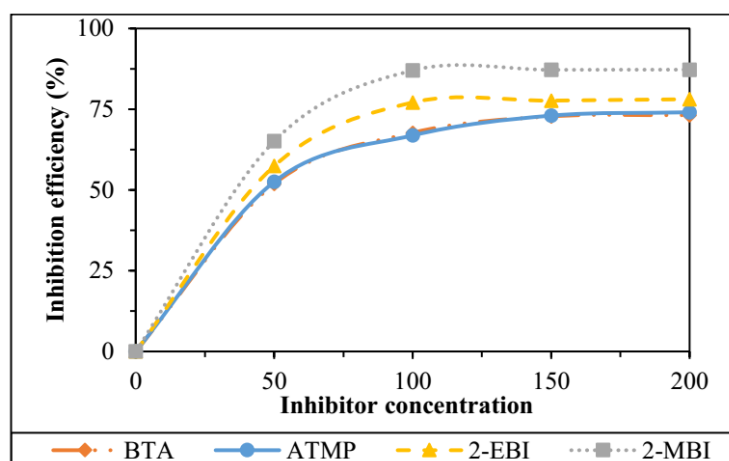
همان‌طور که مشاهده شد، هر سه آزمایش عملکرد بهتر بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI را در کنترل خوردگی نمونه‌های فولاد کربنی در محلول یک‌مولار هیدروکلریک اسید نسبت به دو بازدارنده دیگر نشان دادند. بنابراین، در مرحله بعد مخلوط این دو ماده در نسبت‌های مختلف اختلاط، دما و غلظت بازدارنده‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی فرایند کنترل خوردگی بررسی می‌شود. هدف از این کار، تعیین بهترین نسبت اختلاط و شرایط عملیاتی بهینه با حداکثر اثر هم‌افزایی برای دستیابی به حداکثر راندمان بازدارندگی است.

۲-۳ نتایج تحلیل واریانس داده‌های آزمایشگاهی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI و ارائه مدل برای پیش‌بینی راندمان بازدارندگی

در این مرحله، کارایی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI با استفاده از روش طراحی ترکیبی مخلوط- فرایند با ۷۵ آزمایش بررسی شد. با استفاده از تحلیل واریانس داده‌های آزمایشگاهی، مدل زیر برای پیش‌بینی راندمان بازدارندگی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI در محلول یک مولار هیدروکلریک اسید به دست آمد:

مدل به دست آمده برای پیش‌بینی درصد راندمان بازدارندگی بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI:

$$\begin{aligned}
 IE = & (85.716 \times A) + (76.56 \times B) + (15.0629 \times AB) + (10.4311 \times AC) - (3.22077 \times AD) + (8.15886 \times BC) - (5.56877 \times BD) + \\
 & (13.7594 \times ABC) + (3.79657 \times ABD) - (26.0724 \times AC^2) + (1.1926 \times AD^2) - (23.6354 \times BC^2) + (3.243 \times BD^2) + (11.232 \times AB(A- \\
 & B)) - (4.03048 \times ABC^2) + (16.1637 \times AC^3) + (15.7859 \times BC^3) - (7.35746 \times ABC^3)
 \end{aligned}$$



شکل ۳. وابستگی راندمان بازدارندگی به غلظت بازدارنده‌ها در ۵۰ درجه سلسیوس بعد از ۵۵ ساعت.

Figure 3. Dependence inhibition efficiency on inhibitor concentration at 50 °C after 55 hours.

سایر مشخصه‌ها است که نشان می‌دهد درصد وزنی بازدارنده 2-MBI و غلظت مخلوط بیشترین تأثیر را بر فرایند کنترل خوردگی دارد. مقادیر آماری R^2 که شامل ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده (R^2_{adj}) و ضریب تعیین پیش‌بینی (R^2_{pred}) و همچنین، مشخصه دقت کافی^۱ برای مدل به دست آمده تعیین شد. به طور معمول، زمانی که مقادیر آماری R^2 بزرگ و نزدیک به یک باشد و مقدار دقت کافی بیش از چهار باشد، مدل کارآمد و دقیق دانسته می‌شود [۳۵]. مقادیر R^2 ، R^2_{adj} و R^2_{pred} به ترتیب ۰/۹۹۸۹، ۰/۹۹۸۶ و ۰/۹۹۸۲ است، که هر سه مقدار بسیار نزدیک به یک هستند که نشان دهنده دقت بالای مدل است. در نهایت، مشخصه دقت کافی مدل برابر با ۱۷۴/۳۷ بود که بسیار بزرگ‌تر از چهار است. لذا، این مشخصه نیز دقت بالای مدل به دست آمده را تأیید می‌کند.

تجزیه و تحلیل واریانس شامل تعیین مقادیر F و P است که معیار اصلی برای نشان دادن اهمیت مدل به دست آمده است. زمانی که مقدار P یک مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد و مقدار F آن بزرگ باشد، مدل را می‌توان با اهمیت و کارآمد در نظر گرفت [۴۱]. در این پژوهش، دقت مدل به دست آمده و اهمیت مشخصه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد بررسی شد. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس مدل ارائه شده در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقدار P مدل کمتر از ۰/۰۰۰۱ است که نشان می‌دهد مدل معنی‌دار و با اهمیت است. علاوه بر این، مقدار F مدل ۳۰۷۵/۵۸ است که نشان دهنده اهمیت و کارآمدی بالای آن است. همچنین، مشاهده می‌شود که مشخصه AC^2 (حاصل ضرب درصد وزنی بازدارنده 2-MBI در مجذور غلظت مخلوط بازدارنده‌ها) دارای بالاترین مقدار F (۳۲۷۹/۵۶) در بین

جدول ۳. نتایج آزمون آماری تحلیل واریانس مدل ارائه شده برای پیش‌بینی درصد راندمان بازدارندگی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI.

Table 3. ANOVA results of the developed model for predicting the inhibition efficiency of the mixture of 2-MBI and 2-EBI.

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	
model	32118.7	17	1889.33	3075.58	< 0.0001	significant
AB	76.64	1	76.64	124.76	< 0.0001	
AC	102.06	1	102.06	166.14	< 0.0001	
AD	117.12	1	117.12	190.65	< 0.0001	
BC	62.44	1	62.44	101.64	< 0.0001	
BD	350.13	1	350.13	569.96	< 0.0001	
ABC	8.6	1	8.6	14	0.0004	
ABD	7.88	1	7.88	12.83	0.0007	
AC^2	2014.64	1	2014.64	3279.56	< 0.0001	
AD^2	7.9	1	7.9	12.86	0.0007	
BC^2	1655.63	1	1655.63	2695.14	< 0.0001	
BD^2	58.43	1	58.43	95.11	< 0.0001	
AB(A-B)	26.61	1	26.61	43.32	< 0.0001	
ABC^2	2.33	1	2.33	3.8	0.0563	
AC^3	11.1999	1	11.1999	324.12	< 0.0001	
BC^3	189.91	1	189.91	309.15	< 0.0001	
ABC^3	2	1	2	3.25	0.0766	
residual	35.02	57	0.6143			
Cor Total	32153.7	74				
R^2	0.9989			R^2_{pred}		
R^2_{adj}	0.9986			Adeq Precision		174.34

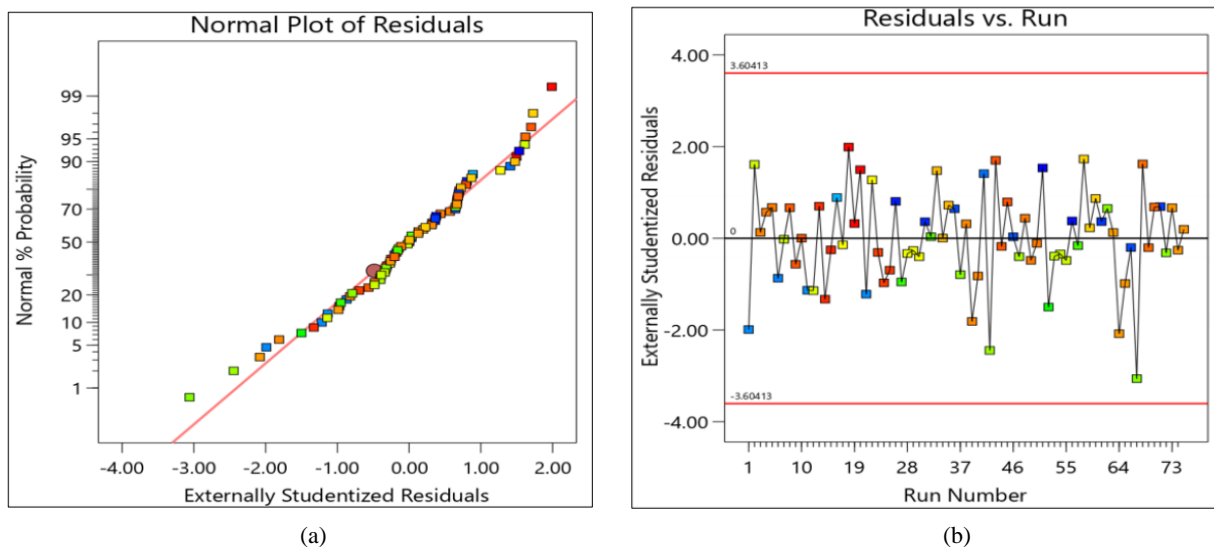
1. Adequate Precision

باقی مانده‌ها به‌طور تصادفی بدون هیچ روند یا الگویی در نقاط مختلف توزیع شده‌اند که استقلال آن‌ها و دقت مدل به‌دست‌آمده را تأیید می‌کند. این روش توزیع داده‌ها در پژوهش رشیدی و همکاران نیز مشاهده شد [۴۲]. آن‌ها گزارش کردند که در یک مدل دقیق، باقی مانده‌ها به‌طور مساوی در امتداد خط میانگین توزیع می‌شوند و هیچ داده پرتی وجود ندارد که نشان دهنده غیرعادی بودن توزیع باشد.

نتایج مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده راندمان بازدارندگی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI با مقادیر آزمایشگاهی در شکل (۵) نشان داده شده است. برای این که یک مدل بتواند مقادیر را به‌درستی پیش‌بینی کند، لازم است که مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نزدیک به هم باشند و به‌طور تصادفی در امتداد یک خط مورب پراکنده شوند [۴۳ و ۴۴]. شکل (۵) نشان می‌دهد که تمام داده‌ها در امتداد خط مورب توزیع شده‌اند و هیچ انحرافی وجود ندارد. در نتیجه، دقت بالای مدل به‌دست‌آمده تأیید می‌شود.

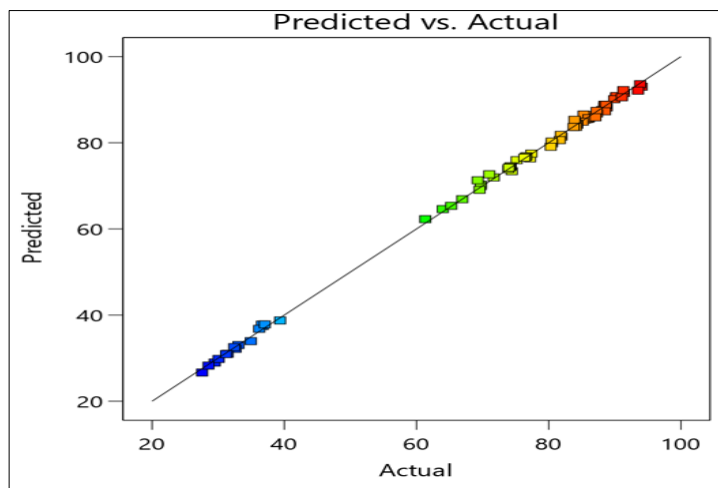
۳-۳ اعتبارسنجی مدل به‌دست‌آمده

شکل (۴) (a,b) به ترتیب نمودار احتمال نرمال را نسبت به باقی مانده‌ها و نمودار باقی مانده‌ها را در مقابل شماره آزمایش برای مدل به‌دست‌آمده نشان می‌دهد. نمودار نرمال باقی مانده‌ها برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها استفاده می‌شود. در توزیع نرمال یک مدل خوب با دقت بالا، باقی مانده‌ها در امتداد یک خط مستقیم توزیع می‌شوند [۳۵]. همان‌طور که در شکل (۴) (a) مشاهده می‌شود، باقی مانده‌ها به‌صورت نرمال توزیع شده‌اند و هیچ‌گونه انحرافی از خط مستقیم برای همه ۷۵ داده راندمان بازدارندگی مخلوط وجود ندارد. از سوی دیگر، شکل (۴) (b) مشخصه‌های پنهانی را که ممکن است بر پاسخ در طول آزمایش تأثیر بگذارد، بررسی می‌کند. اگر باقی مانده‌ها به‌طور مستقل توزیع شوند، هنگام نمایش زمانی نباید از هیچ الگو یا روندی پیروی کنند. وجود الگوها در نقاط می‌تواند نشان‌دهنده همبستگی باقی مانده‌ها باشد و در نتیجه، مستقل از یکدیگر نیستند [۳۵]. در واقع، یک پراکنندگی تصادفی در اطراف خط مرکزی این فرض را تأیید می‌کند که باقی مانده‌ها مستقل از یکدیگر هستند. همان‌طور که در شکل (۴) (b) نشان داده شده است،



شکل ۴. (a) نمودار احتمال نرمال نسبت به باقی مانده‌ها و (b) نمودار باقی مانده‌ها در مقابل شماره آزمایش.

Figure 4. (a) Normal probability plots of the residuals and (b) residual plots versus run number.



شکل ۵. مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده راندمان بازدارندگی از مدل با مقادیر آزمایشگاهی.

Figure 5. Comparison of predicted values of inhibition efficiency with laboratory values.

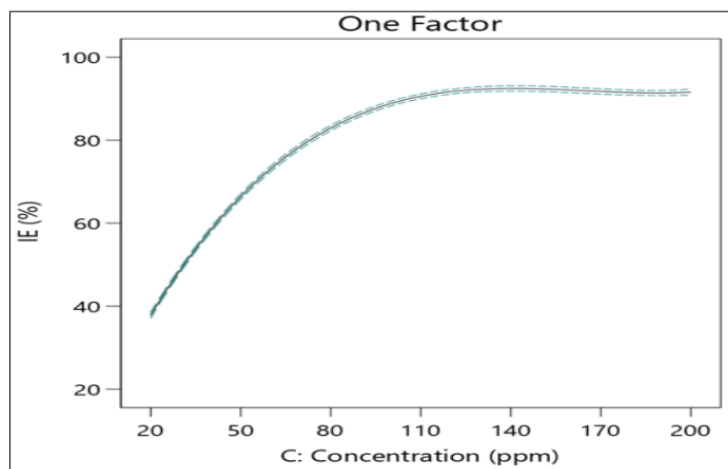
غلظت‌های بالاتر از ۱۴۰ ppm، با افزایش غلظت مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI، کارایی آن تغییری نکرده است. لازم به ذکر است که ضخامت لایه محافظ ایجاد شده بر روی سطح فلز با افزایش غلظت بازدارنده به دلیل جذب بیشتر مولکول‌های آن افزایش می‌یابد، اما در غلظت‌های بالای بازدارنده به دلیل عدم جذب بیشتر مولکول‌های آن بر روی سطح فلز، ضخامت لایه محافظ با افزایش غلظت تغییر نمی‌کند و راندمان افزایش نمی‌یابد [۲۲].

شکل (۷)، تغییرات راندمان بازدارندگی مخلوط را در دماهای مختلف در غلظت و نسبت اختلاط ثابت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت اختلاط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI برابر با ۵۰:۵۰ و غلظت مخلوط ۱۱۰ ppm است. شکل (۷)، نشان می‌دهد که با افزایش دما تا حدود ۶۵ درجه سلسیوس، راندمان بازدارندگی مخلوط کاهش می‌یابد. این رفتار به دلیل کاهش میزان جذب مخلوط بازدارنده‌ها در سطح نمونه‌های فولاد کربنی با افزایش دما است. در دماهای بالاتر (بیش از ۶۵ درجه سلسیوس)، تغییرات دما بر راندمان مهار خوردگی تأثیری نداشت. این رفتار به دلیل عدم دفع^۱ بیشتر مولکول‌های بازدارنده از سطح فلز است که در اثر دگرگونی‌های شیمیایی مولکول‌ها ایجاد می‌شود. این تأثیر در کار قبلی نیز مشاهده شد [۳۱].

۳-۴ بررسی اثر غلظت مخلوط بازدارنده‌ها، دما و نسبت اختلاط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI بر راندمان بازدارندگی هدف اصلی این بخش بررسی تأثیر مشخصه‌های اصلی بر راندمان بازدارندگی با کمک مدل ارائه شده است. اثر غلظت مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI، دما و نسبت اختلاط بر راندمان بازدارندگی در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. در این نمودارها، راندمان بازدارندگی تنها به عنوان تابعی از یک مشخصه تعیین می‌شود و مقدار دو مشخصه دیگر در یک عدد ثابت نگه داشته می‌شود.

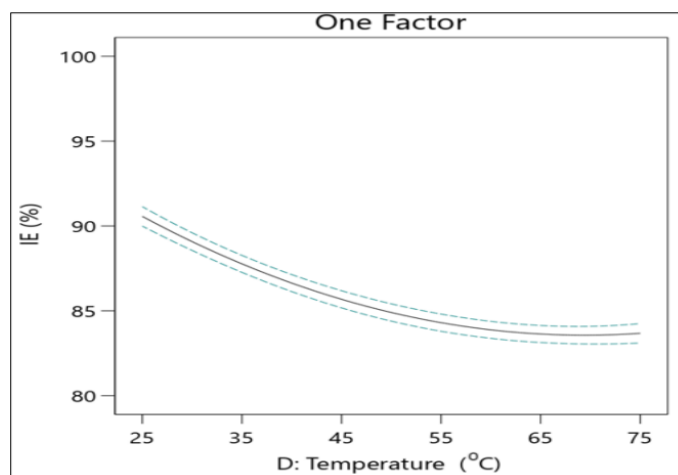
شکل (۶)، تأثیر غلظت مخلوط بازدارنده‌ها را بر راندمان بازدارندگی نشان می‌دهد. بررسی در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس و نسبت اختلاط ۵۰:۵۰ این دو بازدارنده انجام شد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت مخلوط، راندمان بازدارندگی به شدت افزایش می‌یابد تا زمانی که غلظت مخلوط بازدارنده‌ها به حدود ۱۱۰ ppm برسد. این رفتار، به دلیل جذب بیشتر بازدارنده در سطح نمونه‌های فلزی با افزایش غلظت است که حفاظت بهتری از نمونه‌ها را در برابر فرایند خوردگی فراهم می‌کند. افزایش راندمان بازدارندگی با افزایش غلظت بازدارنده به دست بسیاری از محققان گزارش شده است که دلیل آن افزایش جذب مولکول‌های بازدارنده در سطح فلز است [۳۲ و ۳۳ و ۲۵ و ۱۸ و ۱۱]. شکل (۶)، نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالاتر از ۱۱۰ ppm، میزان افزایش راندمان بازدارندگی با افزایش غلظت مخلوط بازدارنده‌ها ناچیز است. به طوری که در

1. Desorption



شکل ۶. وابستگی راندمان بازدارندگی به غلظت مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI در نسبت اختلاط ۵۰:۵۰ و دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس.

Figure 6. Dependence of inhibition efficiency on the concentration of the mixture of 2-MBI and 2-EBI at a mixing ratio of 50:50 and 25 °C.

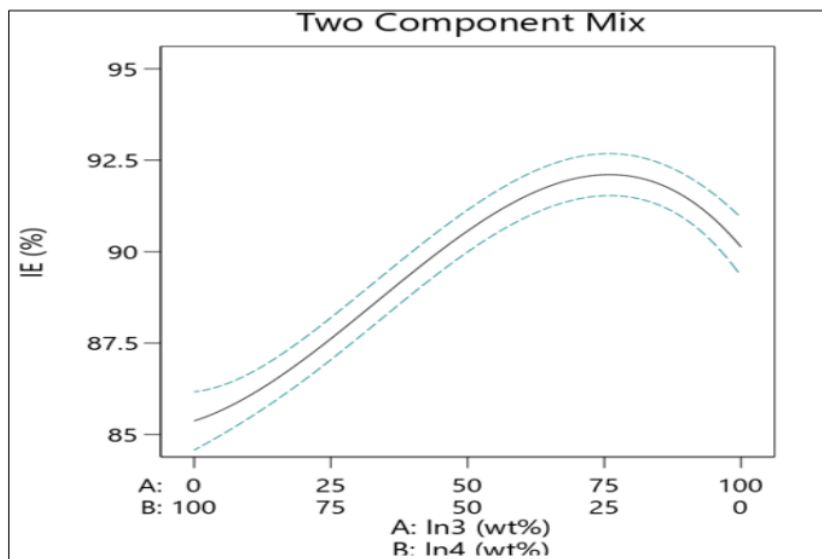


شکل ۷. وابستگی راندمان بازدارندگی به دما در غلظت ۱۱۰ ppm مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI و نسبت اختلاط ۵۰:۵۰.

Figure 7. Dependence of inhibition efficiency on temperature at 110 ppm and 50:50 mixing ratio of 2-MBI and 2-EBI.

وجود ندارد. همان‌طور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی بازدارنده 2-MBI (In3) در مخلوط، راندمان بازدارندگی به‌طور مداوم کاهش می‌یابد. شکل نشان می‌دهد که بالاترین راندمان بازدارندگی در نسبت ۷۵:۲۵ بازدارنده 2-MBI به بازدارنده 2-EBI مشاهده می‌شود. با افزایش بیشتر درصد وزنی بازدارنده 2-MBI در مخلوط، راندمان بازدارندگی کاهش یافته‌است. در کارهای قبلی نیز بر وجود نسبت بهینه بین دو بازدارنده در مخلوط تأکید شده‌است [۳۱ و ۳۰].

شکل (۸)، تغییرات راندمان بازدارندگی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI (In3) و 2-EBI (In4) را براساس تغییرات نسبت اختلاط این دو ماده در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و غلظت ۱۱۰ ppm مخلوط نشان می‌دهد. نسبت اختلاط از ۱۰۰:۰ تا ۰:۱۰۰ بازدارنده 2-MBI (In3) به بازدارنده 2-EBI (In4) تغییرات داشت. نسبت اختلاط ۱۰۰:۰ بدین معنی است که تنها بازدارنده 2-MBI (In3) (۱۰۰ درصد) در مخلوط وجود دارد. همچنین، نسبت ۰:۱۰۰ نشان می‌دهد که درصد وزنی بازدارنده 2-EBI (In4) در مخلوط ۱۰۰ است و هیچ مقداری از بازدارنده 2-MBI (In3) در آن



شکل ۸. وابستگی راندمان بازدارندگی به نسبت اختلاط 2-MBI (In3) به 2-EBI (In2) در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس و غلظت ۱۱۰ ppm مخلوط بازدارنده‌ها.

Figure 8. Dependence of inhibition efficiency on the mixing ratio of 2-MBI (In3) to 2-EBI (In2) at 25 °C and 110 ppm.

مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI (In3) و 2-EBI (In2) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، غلظت مخلوط حدود ۱۲۰-۱۷۰ ppm و نسبت اختلاط ۷۵:۲۵ انجام می‌شود. شکل (۱۰)، تغییرات راندمان بازدارندگی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI (In3) و 2-EBI (In4) را در غلظت‌ها و نسبت‌های مختلف اختلاط در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان‌طور که پیدا است، راندمان بازدارندگی بیش از ۹۰ درصد در غلظت‌های بالاتر از ۱۱۰ ppm و درصد وزنی بیش از ۵۰ بازدارنده 2-MBI (In3) دیده می‌شود. همچنین، بیشترین مقادیر راندمان بازدارندگی خوردگی (بیش از ۹۳ درصد) در محدوده معینی از غلظت مخلوط و نسبت اختلاط بازدارنده‌ها رخ می‌دهد. در این حالت، بهترین شرایط برای کنترل خوردگی در نسبت اختلاط ۷۵:۲۵ بازدارنده 2-MBI (In3) به بازدارنده 2-EBI (In4) و غلظت ۱۳۰-۱۳۵ ppm مخلوط بازدارنده‌ها مشاهده می‌شود.

۳-۶ نتایج تعیین اثر هم‌افزایی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI در کنترل خوردگی

شکل (۱۱)، نمودار تغییرات اثر هم‌افزایی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI (In3) و 2-EBI (In4) را در دماها و نسبت‌های مختلف اختلاط نشان می‌دهد. پیدا است که درصد اثر هم‌افزایی مخلوط

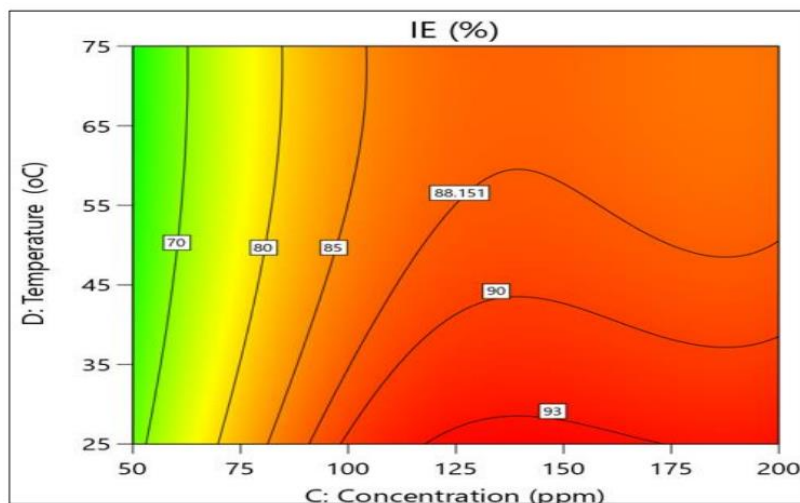
۳-۵ اثر برهم‌کنش دما، نسبت اختلاط و غلظت مخلوط بر راندمان بازدارندگی

اثر برهم‌کنش مشخصه‌های دما، غلظت مخلوط بازدارنده‌ها و نسبت اختلاط بازدارنده‌های 2-MBI (In3) و 2-EBI (In4) بر راندمان بازدارندگی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این نمودارها، تغییرات راندمان بازدارندگی به‌عنوان تابعی از دو مشخصه انتخابی بررسی شد و مقدار مشخصه سوم در یک سطح ثابت در نظر گرفته شد. شکل (۹) اثر هم‌زمان دما و غلظت مخلوط بر راندمان بازدارندگی را در نسبت اختلاط ثابت ۷۵:۲۵ بازدارنده 2-MBI (In3) به بازدارنده 2-EBI (In4) نشان می‌دهد. همچنین، در شکل (۱۰) تأثیر مشخصه‌های غلظت مخلوط و نسبت اختلاط دو بازدارنده بر راندمان بازدارندگی در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس دیده می‌شود.

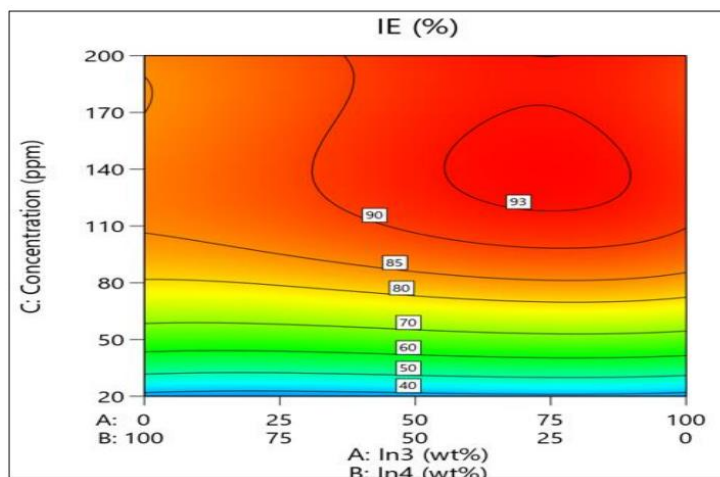
شکل (۹)، تغییرات راندمان بازدارندگی مخلوط را بر اساس دما و غلظت بازدارنده‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در غلظت‌های بالا (بیشتر از ۱۲۰ ppm)، راندمان بازدارندگی در تمام دماهای مورد بررسی بیش از ۸۸ درصد است. همچنین، راندمان بازدارندگی ۹۳ درصد و بالاتر تنها در محدوده غلظت ۱۲۰ تا ۱۷۳ ppm و دمای بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که بهترین شرایط برای مهار خوردگی با استفاده از

سلسیوس رخ می‌دهد. علاوه بر این، میزان اثر هم‌افزایی بیش از ۶ درصد در محدوده دمایی بزرگ‌تر (از حدود ۳۸ تا ۷۵ درجه سلسیوس) مشاهده می‌شود. بنابراین، استفاده از مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI کارآمدتر از استفاده از هریک از آنها به تنهایی است.

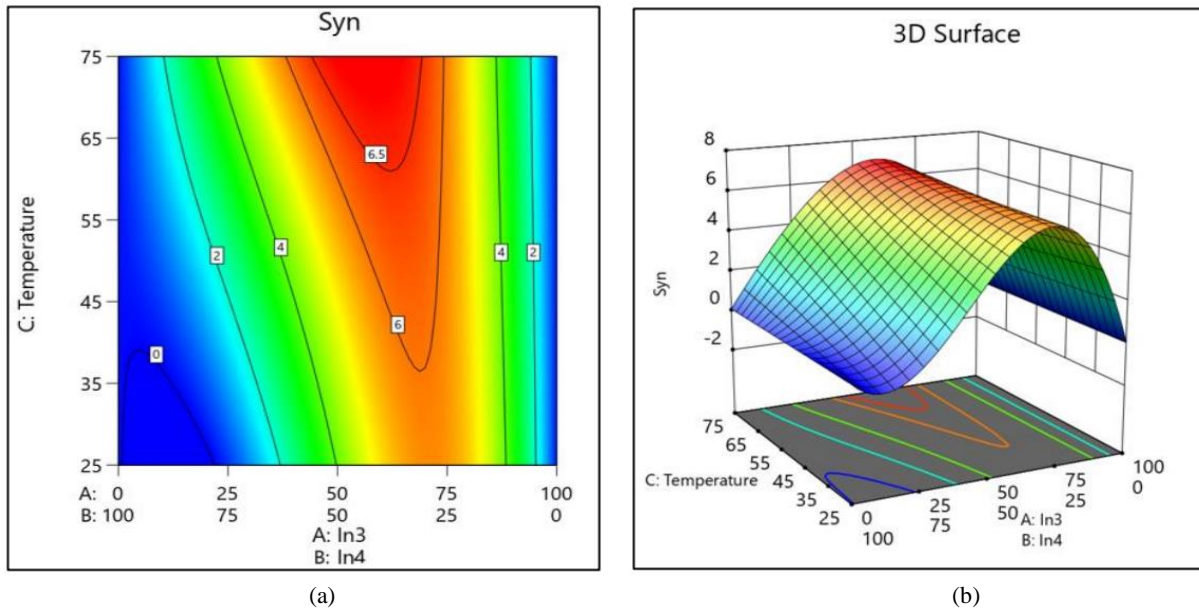
بسته به مقدار دما و نسبت اختلاط از ۰ تا ۶/۷۹ متغیر است. همان‌طور که در شکل (۱۱)، دیده می‌شود، بیشترین میزان اثر هم‌افزایی در دماهای بالا رخ داده است. این رفتار بدین دلیل است که تأثیر دما بر راندمان بازدارندگی مخلوط ضعیف‌تر از تأثیر آن بر کارایی یک بازدارنده است. اثر هم‌افزایی بیش از ۶/۵ درصد در محدوده نسبت اختلاط از ۵۰:۵۰ تا ۷۵:۲۵ بازدارنده 2-MBI (In3) به بازدارنده 2-EBI (In4) و دما از حدود ۶۰ تا ۷۵ درجه



شکل ۹. وابستگی راندمان بازدارندگی به دما و غلظت مخلوط در نسبت اختلاط ۷۵:۲۵ بازدارنده 2-MBI به بازدارنده 2-EBI.
 Figure 9. Dependence of inhibition efficiency on temperature and mixture concentration at a mixing ratio of 75:25 (2-MBI to 2-EBI).



شکل ۱۰. وابستگی راندمان بازدارندگی به غلظت و نسبت اختلاط بازدارنده 2-MBI (In3) به بازدارنده 2-EBI (In4) در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس.
 Figure 10. Dependence of inhibition efficiency on the concentration and mixing ratio of 2-MBI (In3) and 2-EBI inhibitor (In4) at 25 °C.



شکل ۱۱. تغییرات اثر هم‌افزایی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI (In3) و 2-EBI (In4) برحسب دما و نسبت اختلاط (a) نمودار کانتور، (b) نمودار سه‌بعدی).

Figure 11. The synergistic effect between 2-MBI (In3) and 2-EBI (In4) depending on temperature and mixing ratio (a) Contour graph, (b) Three-dimensional graph).

خوردگی استفاده‌شد. در این مرحله، ۷۵ آزمایش در دماها، غلظت‌ها و نسبت‌های اختلاط مختلف طراحی و انجام‌شد. آزمایش‌های این مرحله در مدت زمان ۴۸ ساعت تکمیل‌شد. با استفاده از تحلیل واریانس داده‌های آزمایشگاهی، مدل جدیدی برای پیش‌بینی راندمان بازدارندگی مخلوط بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI در محلول یک‌مولار هیدروکلریک اسید به‌دست‌آمد. مدل از دقت بسیار بالایی برخوردار بود و داده‌های پیش‌بینی شده با مدل مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت. مشخصه‌های آماری نیز دقت بالای مدل را تأیید کردند. R^2_{adj} ، R^2 و R^2_{pred} به ترتیب ۰/۹۹۸۹، ۰/۹۹۸۶ و ۰/۹۹۸۲ بودند که هر سه مقدار بسیار نزدیک به یک هستند. همچنین، مقدار F ، P و دقت کافی مدل ارائه‌شده به ترتیب کمتر از ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۷۵/۵۸ و ۱۷۴/۳۷ بود که نشان‌دهنده اهمیت و کارآمدی بالای مدل در پیش‌بینی راندمان بازدارندگی مخلوط 2-مرکاپتوبنزیمدازول و 2-اتیل‌بنزیمدازول است.

۳. نمودار احتمال نرمال نسبت به باقی‌مانده‌ها و نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل شماره آزمایش برای مدل به‌دست‌آمده، نشان داد که باقی‌مانده‌ها در امتداد یک خط مستقیم توزیع شده‌اند. هیچ انحرافی از خط مستقیم برای داده‌های آزمایشگاهی استفاده‌شده

۴. نتیجه‌گیری

۱. کارایی چهار بازدارنده متیلن فسفونیک اسید (ATMP)، بنزوتریازول (BTA)، 2-مرکاپتوبنزیمدازول (2-MBI) و 2-اتیل‌بنزیمدازول (2-EBI) برای مهار خوردگی نمونه‌های فولاد کربنی در محلول یک‌مولار هیدروکلریک اسید، به‌روش کاهش وزن مطالعه‌شد. نتایج استفاده از بازدارنده‌ها به صورت تنها نشان داد که با افزایش دما، راندمان بازدارندگی کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش جذب بازدارنده‌ها در سطح فلز است. همچنین، با افزایش زمان غوطه‌وری نمونه‌ها راندمان بازدارندگی افزایش یافت. افزایش راندمان بازدارندگی با زمان به جذب بیشتر بازدارنده در سطح نمونه‌ها مربوط می‌شود. ترتیب راندمان بازدارندگی چهار ماده به شرح زیر بود: 2-MBI > 2-EBI > BTA > ATMP. درصد بازدارندگی 2-MBI، 2-EBI، BTA و ATMP بعد از ۱۰۵ ساعت غوطه‌وری در غلظت ۱۰۰ ppm و دمای ۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۸۷/۶۴، ۷۸/۲۲، ۶۹/۴۶ و ۶۸/۱۰ بود.

۲. بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI برای افزایش بیشتر راندمان بازدارندگی خوردگی به صورت مخلوط بررسی‌شد. در این مطالعه، از روش طراحی ترکیبی مخلوط_فرایند به عنوان یک ابزار ریاضی و آماری برای طراحی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند کنترل

مراجع

- [1] Khormali, A. (2021). Using a New Mixture of Reagents for Effective Inhibition of Corrosion and Salt Precipitation in the Petroleum Industry. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 55(2), 257-276.
- [2] Salleh, S. Z., Yusoff, A. H., Zakaria, S. K., Taib, M. A. A., Seman, A. A., Masri, M. N., ... & Ter Teo, P. (2021). Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127030.
- [3] Talebi, H., Maghsoudy, S., & Habibzadeh, S. (2022). Synthesis and Characterization of Corrosion Inhibitor Nanoparticles in Oil and Gas Industry. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(124), 7-29, [In Persian].
- [4] Dehghani, A., Berdimurodov, E., Verma, C., Verma, D. K., Berdimuradov, K., Quraishi, M. A., & Aliev, N. (2024). Constructing efficacy: A novel perspective on organic corrosion inhibitors and interfacial interactions. *Chemical Papers*, 78(3), 1367-1397.
- [5] Hau, N. N., & Huong, D. Q. (2023). Effect of aromatic rings on mild steel corrosion inhibition ability of nitrogen heteroatom-containing compounds: Experimental and theoretical investigation. *Journal of Molecular Structure*, 1277, 134884.
- [6] Verma, C., Abdellatif, M. H., Alfantazi, A., & Quraishi, M. A. (2021). N-heterocycle compounds as aqueous phase corrosion inhibitors: A robust, effective and economic substitute. *Journal of Molecular Liquids*, 340, 117211.
- [7] Huong, D. Q., Lan Huong, N. T., Anh Nguyet, T. T., Duong, T., Tuan, D., Thong, N. M., & Nam, P. C. (2020). Pivotal role of heteroatoms in improving the corrosion inhibition ability of thiourea derivatives. *ACS omega*, 5(42), 27655-27666.
- [8] Wang, J., Cao, Y., Xue, J., Zhang, X., Liang, Y., Chen, K., ... & Zheng, D. (2024). A comparative experimental and theoretical calculation study of CaAl-LDH modified with various aromatic inhibitors for corrosion protection study in epoxy coatings. *Corrosion Science*, 231, 111994.
- [9] Kadhim, A., Al-Amiery, A. A., Alazawi, R., Al-Ghezi, M. K. S., & Abass, R. H. (2021). Corrosion inhibitors. A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 54-67.
- [10] Hajiahmadi, Z., & Tavangar, Z. (2019). Extensive theoretical study of corrosion inhibition efficiency of some pyrimidine derivatives on iron and the proposal of new inhibitor. *Journal of Molecular Liquids*, 284, 225-231.

وجودنداشت. علاوه بر این، باقی مانده‌ها بدون هیچ روند یا الگویی به صورت تصادفی در نقاط مختلف توزیع شدند که نشان دهنده استقلال آن‌ها و دقت بالای مدل به دست آمده است.

۴. به کمک مدل ارائه شده، اثر دما، غلظت مخلوط بازدارنده‌ها و نسبت اختلاط آن‌ها بر بازده مهار خوردگی، تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که راندمان بازدارندگی با افزایش غلظت مخلوط به دلیل افزایش میزان جذب مولکول‌های بازدارنده در سطح فلز افزایش می‌یابد. با افزایش دما از ۲۵ به ۶۵ درجه سلسیوس، راندمان مخلوط از حدود ۹۰/۵ درصد به ۸۳/۵ درصد کاهش یافت که مربوط به افزایش سرعت واکنش‌های خوردگی با دما بود. با افزایش بیشتر دما از ۶۵ به ۷۰ درجه سلسیوس، تغییر محسوسی در راندمان بازدارندگی مشاهده نشد که به دلیل دفع نشدن بیشتر مولکول‌های بازدارنده از سطح فلز بود. هم‌چنین، با افزایش درصد ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول در مخلوط، راندمان بازدارندگی افزایش یافت. بالاترین کارایی در مخلوط حاوی ۷۵ درصد ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول مشاهده شد.

۵. راندمان بازدارندگی بالای ۹۳ درصد برای مخلوط در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، غلظت ۱۳۰ ppm و نسبت اختلاط ۷۵ به ۲۵ ۲-مرکاپتوبنزیمیدازول به ۲-اتیل بنزیمیدازول مشاهده شد.

۶. اثر هم‌افزایی بین بازدارنده‌های 2-MBI و 2-EBI در نسبت‌های مختلف اختلاط مشاهده شد و بیشترین مقدار در نسبت اختلاط ۷۵:۲۵ بازدارنده 2-MBI به بازدارنده 2-EBI رخ داد. در این نسبت اختلاط، میزان اثر هم‌افزایی در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سلسیوس بیش از ۶/۵ درصد بود. این میزان اثر هم‌افزایی بدین معنی است که با به کارگیری مخلوط، بیش از ۶/۵ درصد افزایش در کارایی فرایند مهار خوردگی مشاهده می‌شود. این افزایش کارایی می‌تواند هزینه‌های صنایع درگیر با خوردگی را کاهش دهد.

۵. تقدیر و تشکر

این پژوهش در طول فرصت مطالعاتی ارتباط با جامعه و صنعت دکتر عزیزاله خرمالی در شرکت رنگ‌ورزین کیمیا سبز یاران و با حمایت دانشگاه گنبد کاووس انجام شده است.

- [11] Jassim, G. S., Al-Dhalimy, A. M. B., Noori, A. S., Shadhar, M. H., Kadhim, M. M., Almashhadani, H. A., ... & Liu, P. (2022). Study the application of new type green corrosion inhibitors for iron metal. *Inorganic Chemistry Communications*, 142, 109650.
- [12] Mamand, D. M., Kak Anwer, T. M., & Qadr, H. M. (2024). Corrosion inhibition performance of organic compounds and theoretical calculations based on density functional theory (DFT). *Corrosion Reviews*, 42(1), 1-15.
- [13] Ikeuba, A. I., Faithpraise, F. O., Nwokolo, K. I., Umo, F. E., Echem, O. C., Ibrahim, A. T., ... & Iwuji, P. C. (2024). A combined electrochemical and DFT investigation of ornidazole as a benign anti-corrosion agent for carbon steel materials in acidizing environments. *Results in Materials*, 21, 100542.
- [14] Xiong, L., Wang, P., He, Z., Chen, Q., Pu, J., & Zhang, R. (2021). Corrosion behaviors of Q235 carbon steel under imidazoline derivatives as corrosion inhibitors: experimental and computational investigations. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(2), 102952.
- [15] Wang, B., Du, M., Zhang, J., & Gao, C. J. (2011). Electrochemical and surface analysis studies on corrosion inhibition of Q235 steel by imidazoline derivative against CO₂ corrosion. *Corrosion Science*, 53(1), 353-361.
- [16] Li, S., Du, T., Cui, G., He, H., Wu, P., & Li, Y. (2024). Inhibition Localized Corrosion of N80 Petroleum Pipeline Steel in NaCl-Na₂S Solution Using an Imidazoline Quaternary Ammonium Salt. *Processes*, 12(3), 491.
- [17] Mahdavian, M., & Ashhari, S. (2010). Corrosion inhibition performance of 2-mercaptobenzimidazole and 2-mercaptobenzoxazole compounds for protection of mild steel in hydrochloric acid solution. *Electrochimica Acta*, 55(5), 1720-1724.
- [18] Garg, V., Zanna, S., Seyeux, A., Wiame, F., Maurice, V., & Marcus, P. (2024). Interfacial bonding and corrosion inhibition of 2-mercaptobenzimidazole organic films formed on copper surfaces under electrochemical control in acidic chloride solution. *Electrochimica Acta*, 484, 144114.
- [19] Mohan, R., Ramya, K., Anupama, K. K., & Joseph, A. (2016). Density functional treatment and electro analytical measurements of liquid phase interaction of 2-ethylbenzimidazole (EBI) and ethyl (2-ethylbenzimidazolyl) acetate (EEBA) on mild steel in hydrochloric acid. *Journal of Molecular Liquids*, 220, 707-717.
- [20] Ammal, P. R., Prajila, M., & Joseph, A. (2018). Effective inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric acid using EBIMOT, a 1, 3, 4-oxadiazole derivative bearing a 2-ethylbenzimidazole moiety: Electro analytical, computational and kinetic studies. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 823-833.
- [21] Ramya, K., Mohan, R., & Joseph, A. (2014). Interaction of benzimidazoles and benzotriazole: its corrosion protection properties on mild steel in hydrochloric acid. *Journal of materials engineering and performance*, 23, 4089-4101.
- [22] Labjar, N., Lebrini, M., Bentiss, F., Chihib, N. E., El Hajjaji, S., & Jama, C. (2010). Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid. *Materials Chemistry and Physics*, 119(1-2), 330-336.
- [23] Ahmadi, S., & Khormali, A. (2023). Development of an RSM-based predictive model for evaluation of corrosion efficiency of ATMP in one molar HCl for carbon steel samples. *Petroleum Science and Technology*, 1-19.
- [24] Onyeachu, I. B., & Solomon, M. M. (2020). Benzotriazole derivative as an effective corrosion inhibitor for low carbon steel in 1 M HCl and 1 M HCl+ 3.5 wt% NaCl solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 313, 113536.
- [25] Edoziuno, F. O., Adediran, A. A., Odoni, B. U., Akinwekomi, A. D., Adesina, O. S., & Oki, M. (2020). Optimization and development of predictive models for the corrosion inhibition of mild steel in sulphuric acid by methyl-5-benzoyl-2-benzimidazole carbamate (mebendazole). *Cogent Engineering*, 7(1), 1714100.
- [26] Kozlica, D. K., Kokalj, A., & Milošev, I. (2021). Synergistic effect of 2-mercaptobenzimidazole and octylphosphonic acid as corrosion inhibitors for copper and aluminium—An electrochemical, XPS, FTIR and DFT study. *Corrosion Science*, 182, 109082.
- [27] Zhang, Q. H., Li, Y. Y., Zhu, G. Y., Lei, Y., Wang, X., Liu, H. F., & Zhang, G. A. (2021). In-depth insight into the synergistic inhibition mechanism of S-benzyl-L-cysteine and thiourea on the corrosion of carbon steel in the CO₂-saturated oilfield produced water. *Corrosion Science*, 192, 109807.
- [28] Umoren, S. A., & Solomon, M. M. (2017). Synergistic corrosion inhibition effect of metal cations and mixtures of organic compounds: a review. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(1), 246-273.
- [29] Khanna, R., Kalia, V., Kumar, R., Kumar, R., Kumar, P., Dahiya, H., ... & Kumar, H. (2024). Synergistic experimental and computational approaches for evaluating pyrazole Schiff bases as corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *Journal of Molecular Structure*, 1297, 136845.

- [30] Wang, X., Yang, J., Chen, X., & Ding, W. (2022). Synergism of 2-mercaptobenzimidazole and oleic imidazoline on corrosion inhibition of carbon steel in CO₂-saturated brine solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 368, 120645.
- [31] Khormali, A., & Ahmadi, S. (2023). Synergistic effect between oleic imidazoline and 2-mercaptobenzimidazole for increasing the corrosion inhibition performance in carbon steel samples. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(1), 321-336.
- [32] He, Z., Xiong, L., Zhang, R., Hu, J., Lei, J., Liu, J., & Shen, M. (2019). The synergistic inhibition effects of oleic imidazoline quaternary ammonium salt and sulfonate on Q235 steel corrosion in HCl media. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 7(4), 045005.
- [33] Bashir, S., Thakur, A., Lgaz, H., Chung, I. M., & Kumar, A. (2020). Corrosion inhibition efficiency of bronopol on aluminium in 0.5 M HCl solution: Insights from experimental and quantum chemical studies. *Surfaces and Interfaces*, 20, 100542.
- [34] Khormali, A., & Ahmadi, S. (2023). Experimental and modeling analysis on the performance of 2-mercaptobenzimidazole corrosion inhibitor in hydrochloric acid solution during acidizing in the petroleum industry. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(11), 2217-2235.
- [35] Ahmadi, S., & Khormali, A. (2024). Optimization of the corrosion inhibition performance of 2-mercaptobenzothiazole for carbon steel in HCl media using response surface methodology. *Fuel*, 357, 129783.
- [36] Khormali, A., Sharifov, A. R., & Torba, D. I. (2018). Increasing efficiency of calcium sulfate scale prevention using a new mixture of phosphonate scale inhibitors during waterflooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 164, 245-258.
- [37] Mobin, M., Parveen, M., & Aslam, R. (2022). Effect of different additives, temperature, and immersion time on the inhibition behavior of L-valine for mild steel corrosion in 5% HCl solution. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 161, 110422.
- [38] Solomon, M. M., Umoren, S. A., Quraishi, M. A., Tripathy, D. B., & Abai, E. J. (2020). Effect of alyl chain length, flow, and temperature on the corrosion inhibition of carbon steel in a simulated acidizing environment by an imidazoline-based inhibitor. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106801.
- [39] Farhadian, A., Rahimi, A., Safaei, N., Shaabani, A., Abdouss, M., & Alavi, A. (2020). A theoretical and experimental study of castor oil-based inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in acidic medium at elevated temperatures. *Corrosion Science*, 175, 108871.
- [40] Al-Amiery, A. A., Shaker, L. M., Kadhum, A. H., & Takriff, M. S. (2021). Exploration of furan derivative for application as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution: Effect of immersion time and temperature on efficiency. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2968-2973.
- [41] Esfahani Bolandbalaei, Z., & Rostami, K. (2021). Verification of Experimental Design and Statistical Methods for Optimization of Dark Hydrogen Production. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(114), 49-75, [In Persian].
- [42] Rashidi, Z., Masoumi, H., & Ghanad Zadeh Gilani, H. (2022). Experimental Study of Photocatalytic Degradation of Basic Red 46 Azo Dye using Response Surface Methodology. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(122), 7-23, [In Persian].
- [43] Mohseni, A. H., & Ghaemi, A. (2020). Experimental Modeling of CO₂ Absorption into Monoethanolamine Amine Using Response Surface Methodology. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 19(111), 43-54, [In Persian].
- [44] Khoobi, A. (2024). Multivariate Optimization for Synthesis of Zinc Ferrite Nanostructures and Investigation of Their Electrocatalytic Properties in Detection of Tyrosine. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(131), 49-64, [In Persian].